



# CAPÍTULO 3

## CARACTERIZACIÓN



GENERAL DE

LODOS Y BIOSÓLIDOS



DOI: <https://doi.org/10.24267/9789585120136.3>



#### MIGUEL MANSUR AISSE

Ingeniero civil de la Universidad Federal de Paraná (UFPR). Maestro en Hidráulica y Saneamiento de la Escuela de Ingeniería de San Carlos (USP). Doctor en Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica (EP USP). Profesor del Programa de Posgrado en Ingeniería de Recursos Hídricos y Ambiental (PPGERHA) da Universidad Federal de Paraná (UFPR), Brasil. E-mail: miguel.dhs@ufpr.br.

#### FERNANDO FERNANDES

Ingeniero Civil de la UNICAMP (Universidad Estatal de Campinas), Doctor en Ingeniería por el Instituto Nacional Politécnico de Toulouse (INPT), Francia. Profesor del Centro de Tecnología y Urbanismo de la Universidad Estatal de Londrina (UEL) en el programa de ingeniería civil y en el programa de posgrado en ingeniería civil a nivel de maestría y doctorado en el Estado de Paraná, Brasil. E-mail: fernando@uel.br

#### CRISTIANE SILVEIRA

Graduada en Tecnología en Gerenciamiento Ambiental por la UTFPR campus Medianeira. Ingeniera Ambiental de la Faculdade Pitágoras Londrina. Maestra en Ingeniería de Edificios y Saneamiento de Universidade Estatal de Londrina y Especialización en Docencia de la Educación Superior. E-mail: cristina.silveira@pitagoras.com.br.

#### EMILIA KIYOMI KURODA

Ingeniera Civil de la Escuela de Ingeniería de San Carlos Universidad de San Pablo - EESC-USP (1999), Maestría (2002) y Doctorado (2006) en Hidráulica y Saneamiento de las mismas instituciones y pos-doctorado en University de Meijo, Japón (2007 - 2008) y la Universidad Estatal de Londrina UEL (2008-2009). Profesora en el Centro de Tecnología y Urbanismo de la Universidad Estatal de Londrina. E-mail: ekkuroda@uel.br



### 3.1 PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICO, QUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DE LOS LODOS Y BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

*Miguel Mansur Aisse*

Históricamente, los proyectos de Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) fueron elaborados y puestos en marcha sin que hubiese preocupación por el manejo adecuado del lodo generado en el proceso. El crecimiento de las áreas urbanas, la expansión de las redes de alcantarillado, la implementación de sistemas de tratamiento más eficientes y el aumento de la presión por parte de los órganos ambientales, exigieron que las empresas de saneamiento adoptaran medidas sanitarias y ambientales de tratamiento y disposición final de los lodos generados en el saneamiento de las aguas residuales.

Para definir la alternativa más adecuada para la disposición final es necesario considerar las características del lodo generado en las PTAR, debido a que la cantidad y calidad de ese lodo dependen, principalmente, tanto del sistema de tratamiento como de la composición y el caudal del efluente. Dichos lodos poseen una cantidad considerable de materia orgánica y de nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal, por lo que pueden ser utilizados en la recuperación de suelos erosionados, de áreas con tierras degradadas y como fuente de nutrientes para cultivos agrosilvopastoriles; sin embargo, esos residuos también pueden contener contaminantes orgánicos e inorgánicos, con potencial para causar impactos negativos al ambiente, así como, agentes patógenos que deben ser reducidos a niveles que no representen riesgos a la salud humana.

En el presente capítulo se abordarán aspectos concernientes al origen del lodo y a su composición físico-química; con ese propósito, se incluyen ejemplos de constitución de lodos provenientes del saneamiento de AR en Brasil y Colombia, con un enfoque en los parámetros que tienen influencia en el potencial del material para el destino agrícola.

## Características de los lodos y los biosólidos

El lodo es el material sólido que queda después de que el agua a tratar pasa por tratamiento primario, secundario y terciario de una PTAR. En la Tabla 3.1 se presentan los tipos de lodos que se producen en las PTAR, con su respectiva descripción.

**Tabla 3.1** Tipos de lodos generados durante el saneamiento de aguas residuales.

<b>Lodo crudo</b>	No ha sido tratado ni estabilizado. Tiende a producir la acidificación de la digestión y produce olor.
<b>Lodo primario</b>	Producido durante los procesos de tratamiento primario de las aguas residuales. Contiene generalmente una gran cantidad de material orgánico.
<b>Lodo activo</b>	Se genera a partir del tratamiento biológico. Normalmente, este lodo se encuentra en forma de flóculos que contienen biomasa viva y muerta, además de partes minerales y orgánicas adsorbidas y almacenadas en ellos.
<b>Lodo activo de recirculación</b>	Proviene del proceso de aireación biológica en tanques, dirigida al proceso de clarificación final. La mayor parte del lodo que se reinserta nuevamente al tanque de aireación se llama lodo activo de recirculación.
<b>Lodo secundario</b>	Contiene partículas no hidrolizables y biomasa, resultantes del metabolismo celular.
<b>Lodo terciario</b>	Se produce a través de procesos de tratamiento ulterior (e.g., adición de agentes floculantes).
<b>Lodo digerido</b>	Su generación tiene lugar en los procesos de digestión aeróbica. Generalmente, presentan color negro y olor a tierra. Contienen una proporción de materia orgánica del orden del 45 al 60 %.

Fuente: Hurtado (2015).

En el tratamiento de aguas residuales se pueden usar varios procesos, o combinaciones de ellos, que dependen de las características de las aguas a sanear. Estos pueden ser procesos: anaerobios (*i.e.*, filtros y lagunas anaerobios, reactores anaerobios de flujo ascendente, mantos de lodos anaerobios, reactores aerobios con biofilmes de baja y alta carga), aerobios

(i.e., lodos activados de aeración convencional y de aeración prolongada, lagunas aireadas y facultativas) o combinaciones de ambos. En cuanto a las aguas con alto contenido de materia orgánica, el sistema más utilizado es el proceso anaerobio, ya que el subproducto de este sistema es un compuesto final más estable, además de eliminar la mayor parte de microorganismos patógenos. Este tipo de digestión se usa para tratar lodos primarios y secundarios. Por su parte, la digestión aerobia es usada cuando la PTAR procesa caudales menores a  $19.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  ( $220 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ), a fin de estabilizar su componente orgánico. Así, dependiendo del tipo de sistema de tratamiento, la carga microbiana en los lodos será consecuencia del sistema de tratamiento usado (Galvis & Rivera, 2013).

Por su parte, los biosólidos son residuos líquidos, semisólidos o sólidos que resultan del tratamiento de las aguas residuales procesadas, compuestos principalmente de materiales orgánicos y, en algunos casos, pueden contener metales pesados, compuestos orgánicos y trazas poco biodegradables, así como organismos patógenos (virus, bacterias, entre otros). Gracias a su alto valor nutricional pueden ser usados en agricultura y jardinería; además, su contenido de macro y micronutrientes promueven el crecimiento de las plantas y cultivos. Los biosólidos poseen además un alto valor calorífico, con lo cual se convierten en una excelente fuente para el desarrollo de alternativas de cogeneración de energía eléctrica (Hurtado, 2015).

Comúnmente, se suelen confundir los términos lodos y biosólidos; sin embargo, la principal diferencia es que los biosólidos son lodos que ya han sido estabilizados, es decir, que han tenido un proceso de tratamiento mediante el cual se logra reducir el nivel de peligrosidad de estos residuos. En la Tabla 3.2, se pueden observar las diferencias de las características químicas entre lodos y biosólidos.

**Tabla 3.2** Comparación de parámetros físico-químicos entre lodos y biosólidos.

Parámetros	Unidades	Lodos	Biosólidos
pH	Unidad	5-8	6.5-7.5
Alcalinidad	Mg de CaCO <sub>3</sub>	500-1500	2500-3500
Nitrógeno	% de ST	1,5-4	1,6-6
Fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % de ST	0,8-2,8	1,5-4
Aceites y grasas	% de ST	6-30	5-20
Proteínas	% de ST	20-30	15-20
Ácidos orgánicos	Mg L <sup>-1</sup> Hac	6800-10000	2700-6800
Sólidos totales	%	2-8	6-12
Sólidos volátiles	% de ST	60-80	30-60

Fuente: Hurtado (2015).

## Producción de lodo en las instalaciones de saneamiento de aguas residuales

En Brasil, las aguas residuales provienen de vertimientos domésticos, de aguas pluviales y aguas de infiltración, con posibles contribuciones industriales; además, están constituidas generalmente por: 99,99% de agua y 0,01% de sólidos, esta última fracción posee aproximadamente un 70% de sustancias orgánicas, proteínas, carbohidratos y grasas, y el 30% restante de sustancias inorgánicas, sales y arena. En este país, los sistemas de tratamiento de aguas residuales aplicados son bastante diversificados, entre los cuales se encuentran diferentes combinaciones como son: los reactores anaerobios de flujo ascendente y mantos de lodos, sistema convencional de aireación y de aireación prolongada (lodos activados), reactores aerobios con biopelículas de baja y alta carga, filtros anaerobios, lagunas aerobias, anaerobias y facultativas.

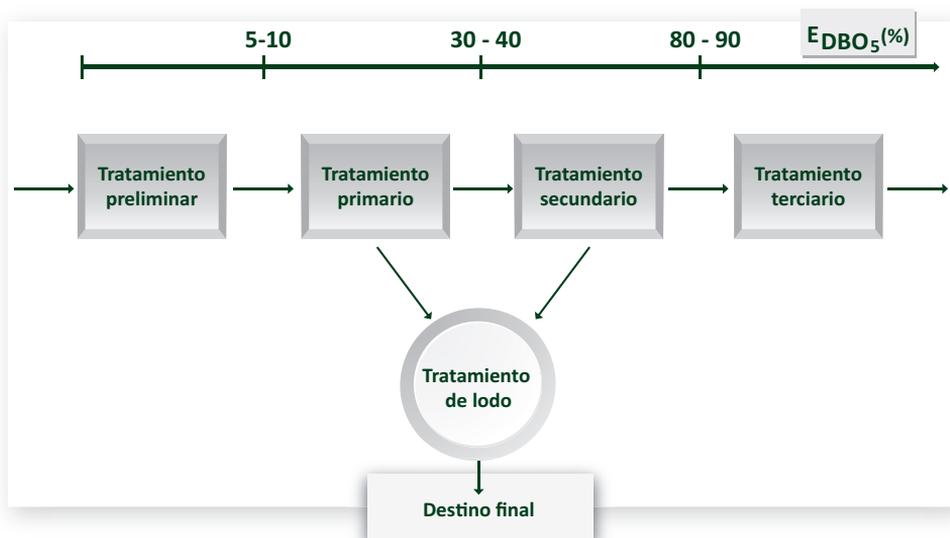
Los lodos son uno de los residuos generados en el proceso de tratamiento de aguas residuales, sus características se derivan de la composición del afluente a la PTAR, del sistema de tratamiento implementado y del método de operación adoptado en esa PTAR. Según Metcalf y Eddy (1991), un lodo proveniente del saneamiento de las AR puede ser clasificado, de acuerdo con el sistema y la etapa de tratamiento de las AR, como lodo:

a) primario: generado en los procesos donde predominan las operaciones de remoción de materia orgánica en suspensión en el medio líquido. Las fases sólido-líquidas son separadas por gravedad o por decantación. Para este tipo de lodos es necesaria una etapa posterior de digestión;

b) secundario: se origina durante los procesos biológicos de degradación de la materia orgánica del medio líquido, está compuesto, principalmente, de la biomasa contenida en los microorganismos. En sistemas en los cuales los tiempos de detención de lodos son amplios, por lo que no es necesaria una etapa posterior de digestión (ver Figura 3.1);

c) terciario: se genera en los procesos físico-químicos utilizados para la remoción de contaminantes que no fueron removidos en los tratamientos primarios y secundarios de saneamiento de las AR. Actualmente, el tratamiento terciario es poco utilizado en Brasil. Normalmente se emplea para la remoción de organismos patógenos y de nutrientes inorgánicos del AR, como nitrógeno y fósforo, por medio de la precipitación química con sales metálicas o con cal.

**Figura 3.1** Flujograma típico de una PTAR completa.



Nota: No fue considerada la producción de lodo durante el tratamiento terciario.

En la Tabla 3.3 se presenta una breve descripción de los principales tipos de subproductos sólidos, así como el componente del tratamiento de las AR que los generan. Los sólidos gruesos son removidos por el desarenador, y serán abordados al final de este capítulo.

**Tabla 3.3** Componentes en los que se generan los principales subproductos sólidos en las PTAR.

Subproductos	Componentes o procesos de PTAR
Sólidos gruesos	Rejilla Desarenador
Arena	Desarenador
Material flotante	Desarenador Decantador primario Decantador secundario Laguna de estabilización Reactor anaerobio de mantos de lodos
Lodo primario	Tanque séptico Decantador primario
Lodo biológico aerobio	Lodos activados con aereación convencional Reactores aerobios con biopelículas-alta carga (e.g., filtro biológico de alta carga, biofiltros aireados sumergidos y biodiscos)
Lodo biológico aerobio (estabilizado)	Lodos activados aereación prolongada Reactores aerobios con biopelículas-baja carga (e.g., filtro biológico de baja carga, biofiltros aireados y biodiscos)
Lodo biológico anaerobio (estabilizado)	Lagunas de estabilización (e.g., lagunas facultativas, lagunas anaerobias-facultativas, lagunas aireadas facultativas, lagunas aireadas de mezcla completa-lagunas de decantación) Reactores anaerobios (e.g., reactores UASB, filtros anaerobios)
Lodo químico	Decantador primario con precipitación química Lodos activados con precipitación química de fósforo Tanque de flotación por aire disuelto, precedido de coagulación-floculación, para remoción de fósforo

## Cantidades producidas de lodo

Los sistemas que, respectivamente generan las menores y mayores cantidades de lodo son las lagunas de estabilización y los lodos activados de aireación convencional. Este hecho ocurre porque, en las lagunas, el lodo queda retenido por varios años, durante los cuales sufre digestión y espesamiento; en consecuencia, se reducen los volúmenes de lodo, contrario a lo que ocurre en el sistema de lodos activados con aireación convencional, donde es corto el tiempo de permanencia del lodo en el sistema (ver Tabla 3.4).

**Tabla 3.4** Características y cantidades de lodo producido en diferentes tipos de sistemas de saneamiento de AR.

Tipo de sistema	Características del lodo producido y separado de la fase líquida (dirigido al proceso de tratamiento de lodos)			
	kgSS/ kgDQO aplicada	Contenido de sólidos secos (%)	Masa de lodo (gSS/hab·d) <sup>(a)</sup>	Volumen de lodo (L/ hab·d) <sup>(b)</sup>
Tratamiento primario convencional	0,35-0,45	2-6	35-45	0,6-2,2
Tratamiento primario (tanques sépticos)	0,20-0,30	3-6	20-30	0,3-1,0
Laguna facultativa	0,12-0,32	5-15	12-32	0,1-0,25
<b>Laguna Anaerobia + Laguna Facultativa</b>				
Laguna Anaerobia	0,20-0,45	15-20	20-45	0,1-0,3
Laguna Facultativa	0,06-0,10	7-12	6-10	0,05-0,15
Total	0,26-0,55	-	26-55	0,15-0,45
Laguna Aireada + Facultativa	0,08-0,13	6-10	8-13	0,08-0,22
Laguna Aireada mezcla completa (Laguna de sedimentación)	0,11-0,13	5-8	11-13	0,15-0,25
<b>Tanque séptico + filtro anaerobio</b>				
Tanque séptico	0,20-0,30	3-6	20-30	0,3-1,0
Filtro anaerobio	0,07-0,09	0,5-4,0	7-9	0,2-1,8
Total	0,27-0,39	1,4-5,4	27-39	0,5-2,8

Tipo de sistema	Características del lodo producido y separado de la fase líquida (dirigido al proceso de tratamiento de lodos)			
	kgSS/ kgDQO aplicada	Contenido de sólidos secos (%)	Masa de lodo (gSS/hab·d) <sup>(a)</sup>	Volumen de lodo (L/ hab·d) <sup>(b)</sup>
<b>Lodos activados convencionales</b>				
Lodo primario	0,35-0,45	2-6	35-45	0,6-2,2
Lodo secundario	0,25-0,35	0,6-1	25-35	2,5-6,0
Total	0,60-0,80	1-2	60-80	3,1-8,2
Lodos activados- aireación prolongada	0,50-0,55	0,8-1,2	40-45	3,3-5,6
<b>Filtro Biológico de alta carga</b>				
Lodo primario	0,35-0,45	2-6	35-45	0,6-2,2
Lodo secundario	0,20-0,30	1-2,5	20-30	0,8-3,0
Total	0,55-0,75	1,5-4,0	55-75	1,4-5,2
<b>Biofiltro aireado sumergido</b>				
Lodo primario	0,35-0,45	2-6	35-45	0,6-2,2
Lodo secundario	0,25-0,35	0,6-1	35-35	2,5-6,0
Total	0,60-0,80	1-2	60-80	3,1-8,2
Reactor UASB	0,12-0,18	3-6	12-18	0,2-0,6
<b>UASB + pos-tratamiento aerobio <sup>(c)</sup></b>				
Lodo anaerobio (UASB)	0,12-0,18	3-4	12-18	0,3-0,6
Lodo aerobio (lodos activados) <sup>(d)</sup>	0,08-0,14	3-4	8-14	0,2-0,5
Total	0,20-0,32	3-4	30-32	0,5-1,1

Nota: en las unidades con largo tiempo de retención de lodos (e.g. lagunas, tanque séptico, reactor UASB, filtro anaeróbico), los valores presentados incluyen la digestión y el espesamiento que ocurren en la propia unidad (los cuales reducen la masa y el volumen del lodo).

a) Asumiendo 0.1 kgDQO/hab·d y 0.06 kgSST/hab·día.

b) Litros de lodo/hab·d = [(gSST/hab·d) / (sólidos secos (%))] x (100/1000) (asumiendo densidad de 1000 kg/m<sup>3</sup>)

c) Pos-tratamiento aerobio: lodos activados, biofiltro aireado sumergido, filtro biológico.

d) Lodo aerobio retirado del reactor UASB, después de la reducción de masa y de volumen en la digestión y espesamiento que ocurren en el propio reactor (el lodo aerobio excedente al afluente del reactor UASB también es menor, pues en este caso la influencia de la pérdida de sólidos en el efluente del decantador secundario pasa a desempeñar una mayor influencia)

Fuente: Von Sperling y Gonçalves (2014).

Además, en la literatura se pueden encontrar trabajos sobre la reducción al mínimo del volumen de lodos producidos en las PTAR, especialmente en el tratamiento aerobio por lodos activados. Este aspecto se trata en otro capítulo.

## **Remoción de los lodos en las unidades de tratamiento**

En el saneamiento con base en procesos biológicos, parte de la materia orgánica es absorbida y mineralizada, la cual pasa a formar parte de la biomasa microbiana, también denominada lodo biológico o secundario, compuesto principalmente de sólidos de origen biológico. El metabolismo bacteriano es determinante en la producción de lodos. En los sistemas aerobios la producción de lodo es mayor, comparada con los sistemas anaerobios, esto debido a que la mayor parte del sustrato orgánico es incorporada a la masa celular de las bacterias, mientras que en el sistema anaerobio, el metabolismo metanogénico transforma casi toda la materia orgánica en subproductos estables, generándose menor cantidad de lodo. En los tratamientos secundarios se suscita el incremento de la actividad microbiana aerobia y/o anaerobia; de esta forma se convierten los sólidos disueltos en sólidos suspendidos (biomasa microbiana) y, en consecuencia, se reduce el contenido de materia orgánica. Posteriormente, la biomasa microbiana es precipitada junto con otras partículas para generar así el lodo clasificado como secundario.

Las características del lodo originado en la unidad de tratamiento biológico de AR se alteran según varíe el periodo de permanencia del mismo en dicha unidad, especialmente la estabilidad del lodo (Von Sperling & Gonçalves, 2014). Según estos autores, la relación entre sólidos volátiles (SVT) y sólidos totales (ST) representa la fracción orgánica de los ST presentes en el lodo y, por consecuencia, el nivel de digestión de ese lodo (nivel de estabilidad). En los lodos digeridos, esa relación se sitúa alrededor de 0.6 a 0.65, por otro lado, en los lodos no digeridos se encuentra entre 0.75 y 0.80, debido a que los lodos permanecen dentro de las unidades biológicas por meses o años, esos se tornan más digeridos y espesados. En la Tabla 3.5 se presentan los intervalos típicos de remoción de lodo en los sistemas de saneamiento de AR:

**Tabla 3.5** Intervalos típicos de remoción de lodos, a partir de la fase líquida, que se presentan en las unidades o sistemas de las PTAR.

Sistema	Intervalo de remoción de lodo a partir de la fase líquida		
	Lodo primario	Lodo secundario	Lodo químico
Tratamiento primario (convencional)	Horas		
Tratamiento primario (tanques sépticos)	Meses		
Tratamiento primario con coagulación			Horas
Laguna facultativa		Años	
Laguna anaerobia + laguna facultativa		Años	
Laguna aireada facultativa		Años	
Laguna aireada con mezcla completa + laguna sedimentación		Años	
Laguna facultativa + laguna de maduración		Años	
Laguna facultativa + laguna de alta tasa		Años	
Laguna facultativa + remoción físico-química de algas		Años <sup>(a)</sup>	Horas
Infiltración lenta		(b)	
Infiltración rápida		(b)	
Escorrentía superficial		(b)	
Humedales construidos		(b)	
Tanque séptico + filtro anaerobio	Meses	Meses	
Tanque séptico + infiltración	Meses	(b)	
Reactor UASB		Semanas	
UASB + lodos activados		Semanas <sup>(c)</sup>	
UASB + biofiltro aireado sumergido		Semanas <sup>(c)</sup>	
UASB + filtro anaerobio		Semanas	
UASB + filtro biológico de alta carga		Semanas <sup>(c)</sup>	
UASB + flotación		Semanas	Horas
UASB + lagunas de estabilización		Semanas	

Sistema	Intervalo de remoción de lodo a partir de la fase líquida		
	Lodo primario	Lodo secundario	Lodo químico
UASB + escorrentía superficial		Semanas <sup>(b)</sup>	
Lodos activados (convencional)	Horas	~ Continuo	
Aireación prolongada		~ Continuo	
Reactor por lotes o tandas (aireación prolongada)		Horas	
Lodos activados convencional con remoción biológica de N/P	Horas	~ Continuo	
Lodos activados con remoción biológica y química de N/P		~ Continuo	Horas
Filtro biológico de baja carga	Horas	Horas	
Filtro biológico de alta carga	Horas	Horas	
Biofiltro aireado sumergido	Horas	Horas	
Biodiscos	Horas	Horas	

a) El lodo químico recirculado para la laguna anaeróbica o para la laguna facultativa puede permanecer almacenado por años.

B) En sistemas de aplicación controlada en el suelo, se presenta la necesidad de remover periódicamente la biomasa vegetal formada como resultado de la irrigación.

C) Suponiendo retorno del lodo excedente con el lodo anaeróbico.

Fuente: Von Sperling y Gonçalves (2014).

## Composición del lodo de agua residual

En la Tabla 3.6 se encuentran algunos parámetros típicos, encontrados en lodos brutos y digeridos.

**Tabla 3.6** Composición química típica de los lodos crudos y digeridos generados durante el saneamiento de AR.

Constituyente Variación	Lodos primarios no tratados o crudos		Lodos primarios digeridos		Lodos activados	
	Típico	Variación	Típico	Variación	Variación	
<b>Sólidos Totales (% ST)</b>	2,0-8,0	5,0	6,0-12,0	10,0	0,8-1,2	
<b>Sólidos Volátiles (% ST)</b>	60-80	65	30-60	40	59-88	
<b>Cebos y grasas (% ST)</b>	Éteres solubles	6-30	-	5-20	18,0	-
	Éteres extraíbles	7-35	-	-	-	5-12
<b>Proteínas (% ST)</b>	20-30	25	15-20	18,0	32-41	
<b>Nitrógeno (N) (% ST)</b>	1,5-4,0	2,5	1,6-6,0	3,0	2,4-5,0	
<b>Fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) (% ST)</b>	0,8-2,8	1,6	1,5-4,0	2,5	2,8-11,0	
<b>Potasio (K<sub>2</sub>O) (% ST)</b>	0-1,0	0,4	0,0-3,0	1,0	0,5-0,7	
<b>Celulosa (% ST)</b>	8,0-15,0	10,0	8,0-15,0	10,0	-	

Fuente: Metcalf y Eddy (1991)

El conocimiento de la composición físico-química de los lodos, provenientes del saneamiento de AR, es fundamental en la selección de las alternativas de destino final de los mismos. Estos lodos presentan cantidades significativas de nutrientes, como son: Nitrógeno (N), Fósforo (P), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg), mismos que son necesarios en los cultivos agrícolas (ver Tabla 3.6). La presencia de estos nutrientes en los lodos está directamente relacionada con las características del AR tratada, el tipo de tratamiento al que se sometieron dichas AR (que originó el lodo), y el proceso de saneamiento del lodo mismo. Los nutrientes encontrados en mayor cantidad en los lodos son N y P. Los cationes de Ca y Mg se encuentran en pequeñas cantidades, con excepción de los lodos higienizados con cal. El Potasio (K) está presente en pequeñas cantidades, por lo tanto, en suelos abonados con dichos lodos se hace necesaria la aplicación de este nutriente por medio de la fertilización mineral (Andreoli, et al., 2001).

**Tabla 3.7** Contenidos de nutrientes y de sustancias inorgánicas en los lodos generados en diferentes sistemas de tratamiento de AR en Brasil.

Constituyente	Unidad	Ubicación de la PTAR						
		Franca, SP <sup>(1)</sup>	Barueri, SP <sup>(2)</sup>	Mangueira, PE <sup>(3)</sup>	Belém, PR <sup>(4)</sup>	Brasília Norte, DF <sup>(5)</sup>	Jundiaí, SP <sup>(6)</sup>	Pacotuba, ES <sup>(7)</sup>
Humedad	%	38,5	72,3	-	22,7	86-88	68	-
pH	% ST	6,1	8,7	5,7	11,6	-	5,9	5,2
C <sub>org</sub>	% ST	34,1	37,4	28,6	20,3	31-33	28,9	16
NKT <sub>I</sub>	% ST	4,5	4,1	2,5	3,1	0,5-0,6	3,2	5646
Fósforo	% ST	0,8	2,5	0,5	2,0	0,3-0,6	1,8	4128
Potasio	% ST	0,2	0,1	0,2	0,2	0,02-0,06	0,2	1623
Calcio	% ST	1,9	2,5	2,2	12,6	-	1,3	-
Magnesio	% ST	0,3	0,4	0,2	7,3	-	0,3	-
Manganeso	% ST	0,02	0,03	0,02	-	-	0,07	-
Hierro	% ST	1,9	3,2	1,6	-	-	2,9	-
Aluminio	% ST	-	1,8	-	-	0,2-0,4	-	-
Arsenio	mg·kg <sup>-1</sup> ST	-	-	-	-	<0,6	0,59	<0,5
Bario	mg·kg <sup>-1</sup> ST	-	-	-	-	-	-	156
Boro	mg·kg <sup>-1</sup> ST	-	9,5	-	-	-	-	-
Cadmio	mg·kg <sup>-1</sup> ST	2	10,9	3,1	8,5	4-6	7,21	<0,05
Plomo	mg·kg <sup>-1</sup> ST	100	206,1	350,1	43	10-11	184,4	29
Cobre	mg·kg <sup>-1</sup> ST	204	879,5	59,5	120	87-104	722	98
Cromo	mg·kg <sup>-1</sup> ST	102	791,1	-	40	18-21	152,7	26
Mercurio	mg·kg <sup>-1</sup> ST	-	-	-	2,1	<4	<0,1	-
Molibdeno	mg·kg <sup>-1</sup> ST	-	-	-	-	<7	-	3,5
Níquel	mg·kg <sup>-1</sup> ST	69	395,1	-	50	5-6	34,5	11
Selenio	mg·kg <sup>-1</sup> ST	-	-	-	-	<1,3	-	< 0,5
Zinc	mg·kg <sup>-1</sup> ST	1279	2.827,3	937,1	549	159-169	500	409

Nota: <sup>(1)</sup> Sistema de lodos activados convencional. <sup>(2)</sup> Lodo proveniente del digestor anaeróbico, generado en el proceso de lodos activados. <sup>(3)</sup> Lodo del lecho de secado generado en reactor anaerobio. Nitrógeno del Nitrógeno total <sup>(4)</sup> Lodo higienizado con cal, proveniente de centrifuga generado en proceso lodos activados con aireación prolongada, Fósforo en P205 y Potasio en K20. <sup>(5)</sup> Lodo primario y secundario desaguado en prensa generado en proceso de lodos activados, Nitrógeno del Nitrógeno total. <sup>(6)</sup> Lodo generado en un sistema compuesto por lagunas aireadas aeróbicas, seguidas de lagunas de decantación. <sup>(7)</sup> Sistema de tanque séptico seguido de filtro anaerobio de flujo ascendente, todos los valores en mg·dm<sup>-3</sup>.

En la Tabla 3.7 se muestra que, usualmente, el lodo contiene cantidades significativas de micronutrientes como cobre (Cu) y zinc (Zn). Sin embargo, es importante destacar que esos micro-elementos son requeridos por los cultivos vegetales en cantidades pequeñas, y el uso de lodos a niveles importantes puede resultar en efectos tóxicos, reduciendo la productividad de los cultivos (Andreoli et al., 2001).

El tipo de tratamiento e higienización afecta las características finales del lodo proveniente del saneamiento de AR. Los lodos cuya estabilización o higienización sea efectuada con base en cal tendrán un pH más elevado y menos nitrógeno, debido a las pérdidas por volatilización del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) que produce esa adición. Los lodos compostados contendrán menos nitrógeno y una relación  $C_{\text{org}}/\text{N}$  más elevada, debido a la adición de material rico en  $C_{\text{org}}$ , para contribuir al compostaje de la mezcla. En cuanto a los demás macro-nutrientes, se observa una mayor presencia de Ca, P y S en los lodos deshidratados que terminan en forma de torta, con respecto al Mg y K. Los lodos húmedos o con contenidos grandes de agua poseerán más K, debido a que no son sometidos al proceso de desaguado en su generación. Estos subproductos también contienen micronutrientes, principalmente Zn y Cu, en concentraciones que varían dependiendo de las características de la cuenca de captación de las aguas y del sistema de tratamiento adoptado para su saneamiento.

El lodo higienizado mediante la estabilización alcalina prolongada (EAP) presenta características que pueden corregir la acidez de los suelos donde se apliquen. Los óxidos e hidróxidos de Ca y Mg que forman parte del lodo proveniente de una planta de tratamiento para potabilizar agua (PTAP), poseen mayor velocidad de reacción cuando se comparan con los carbonatos de Ca y Mg, constituyentes de cal, material normalmente utilizado como correctivo de acidez de suelos agrícolas.

### **Contaminantes contenidos en los lodos generados en el saneamiento de AR**

Dependiendo del destino final que se seleccione para los lodos generados en el saneamiento de aguas, las sustancias tóxicas presentes en ellos pueden ser una fuente potencial de contaminación. El uso excesivo de estos lodos en la agricultura puede resultar en una fuerte contaminación ambiental. La adición en exceso de nitrógeno en forma de nitrato (contenida en los lodos), por encima del consumo del cultivo agrícola, es una preocupación ambiental de importancia, pues puede representar un fuerte riesgo de contaminación de las aguas freáticas. La acumulación de P resultante

en el suelo después de una aplicación excesiva de estos lodos, mineral que por lo general ha sido absorbido por los cultivos durante largos períodos de cosechas continuas, contribuye a aumentar el potencial de transmisión de P al ambiente. Las sustancias inorgánicas (metales pesados), los contaminantes orgánicos y los microorganismos patógenos presentes en el lodo generado en el saneamiento de AR, también pueden suponer riesgos para el medio ambiente y la salud cuando se aplican en la agricultura sin observar medidas de control.

**Tabla 3.8** Contenidos de sustancias inorgánicas (metales pesados) en los lodos generados en diferentes sistemas de tratamiento de AR en Brasil.

Ubicación de la PTAR	Parámetros (mg kg <sup>-1</sup> )										
	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
São Paulo, SP <sup>(1)</sup>	-	-	7,0	2981	808	29,0	-	219,0	276,0	-	2086
Jerônimo Monteiro, ES <sup>(2)</sup>	-	-	0,40	14,8	129	4,10	-	9,4	39,7	-	320
Suzano, SP <sup>(3)</sup>	-	-	8,0	579	625	-	-	346	217	-	1,12
RMC, PR <sup>(4)</sup>	0,2	138,1	0,3	47,7	100,9	0,1	0,4	30,1	31,7	8,0	343
Barueri, SP <sup>(5)</sup>	12,0	-	18,0	-	850,0	2,0	13,0	34,0	189,0	1,0	1870
Franca, SP <sup>(6)</sup>	-	306,6	3,27	284,5	572,6	-	2,8	56,6	77,3	-	1028

Fuente: Bittencourt (2014)

La presencia y los niveles de concentración de contaminantes químicos orgánicos e inorgánicos en los lodos provenientes del saneamiento de AR se derivan, principalmente, de la contribución de efluentes no domésticos a la red colectora de estas. La NBR 9.800-Criterios para el vertimiento de efluentes líquidos industriales en el sistema colector público de alcantarillado sanitario (ABNT, 1987)- tiene como objetivo garantizar la seguridad y el buen funcionamiento de la red de alcantarillado y del sistema de tratamiento de aguas residuales, sin considerar aún la calidad del lodo generado en el proceso.

En el Estado de Paraná, una concesionaria del saneamiento, la Compañía de Saneamiento de Paraná (SANEPAR), solo acepta el vertimiento de las aguas residuales industriales dentro de la red de aguas residuales domésticas,

previo cumplimiento por parte de las industrias de los criterios de calidad de sus efluentes. Así, los lodos generados en las PTAR, operadas por esta empresa, presentan bajos contenidos de sustancias orgánicas e inorgánicas (metales pesados). De esta forma, el lodo generado en el saneamiento de AR se enmarca en la clasificación de residuos Clase II -no inertes en los términos de la NBR 10004-, los cuales pueden tener propiedades tales como: combustibilidad, biodegradabilidad o solubilidad en agua (ABNT, 2004). La contaminación en forma de organismos patógenos contenida en los lodos provenientes del saneamiento de AR es consecuencia de las condiciones de salud de la población, cuyas descargas de aguas usadas contribuyen a la red de alcantarillado. Este aspecto será también presentado en otro capítulo de este libro. Así, y con el objetivo de reducir la concentración de los organismos patógenos en estos lodos, se lleva a cabo la higienización de los mismos, de modo que no representen riesgos para la salud de la población ni para la de los trabajadores que se encargan del manejo y disposición final de los mismos.

### **Lodos generados en tanques sépticos**

En la NBR 7229/1993 se estima una tasa de producción de lodos durante el uso de tanques sépticos que depende de las características del afluente y de la fuente generadora de AR. La tasa de acumulación del lodo es función del volumen de lodo digerido y de los intervalos entre las limpiezas del tanque. En la Tabla 3.9 se presenta información sobre esta norma, proporcionando valores que se deben utilizar en el dimensionamiento de este tipo de tanques.

**Tabla 3.9** Tanque séptico: contribución diaria de desechos y carga orgánica.

Predio	Unidad	Contribución		
		Per-cápita L/d	Lodo fresco L/d	Carga orgánica g DBO/d
<b>Ocupantes permanentes</b>				
Residencia	Persona	160	1,00	50
Patrón alto	Persona	130	1,00	45
Patrón medio	Persona	100	1,00	40
Patrón bajo	Persona	100	1,00	30
Hoteles (sin cocina y lavandería)	Persona	80	1,00	30
Alojamientos provisionales	Persona			
<b>Ocupantes temporales</b>				
Fábricas en general	Persona	70	0,30	25
Oficinas	Persona	50	0,20	25
Edificios públicos o comerciales	Persona	50	0,20	25
Predio	Unidad	Contribución		
		Per-cápita L/d	Lodo fresco L/d	Carga orgánica g DBO/d
Escuelas y locales de larga permanencia	Almuerzo	50	0,20	20
Restaurantes y similares	Persona	25	0,10	25
Cines, teatros, y lugares de corta permanencia	Sanitario	2	0,02	1
Sanitarios públicos		480	4,00	120
Nota: *Solo de acceso abierto al público (terminales de autobuses y ferroviarias, espacios públicos, estadios de deportes, locales para eventos, entre otros).				

Fuente: ABNT (1993).

Los lodos generados en tanques sépticos están compuestos, en gran parte, por agua y AR, material inorgánico (e.g., arenas, suelos finos) y material orgánico (Leite, et al., 2006). La heterogeneidad de sus compuestos es una propiedad relevante que es función de algunos factores como: la frecuencia de limpieza, las características del efluente que ingresa al tanque

y las mezclas que suceden durante su trayecto de recolección. Los estudios demuestran que los lodos de este tipo, recolectados por las empresas de saneamiento, presentan variaciones que van desde la composición semejante a las AR que circulan por el alcantarillado sanitario hasta aquella típica del lodo seco.

Las concentraciones de amoníaco y huevos de helmintos pueden ser diez veces mayor que la se encuentra en las AR (Montangero, et al., 2000, citado en Leite, et al., 2006). El lodo puede ser clasificado en función de su estabilidad (alta o baja), la cual depende del grado de digestión a la que fue sometido; así, se puede decir que el tiempo de permanencia del lodo en el tanque séptico es el gran responsable de su estabilización. En la Tabla 3.10 se muestra la composición (media y típica) de estos lodos.

**Tabla 3.10** Características físico-químicas de los lodos generados en tanques sépticos.

Variable	Jordão y Pessoa (2005)		USEPA (2002)	
	Media (mg·L <sup>-1</sup> )	Típica (mg·L <sup>-1</sup> )	Media (mg·L <sup>-1</sup> )	Típica (mg·L <sup>-1</sup> )
Sólidos totales	-	-	34.100	1.100 a 130.400
Sólidos totales volátiles	-	-	23.100	353 a 71.400
Sólidos suspendidos volátiles	15.000	2.000 a 100.000	12.800	310 a 93.300
DBO	6.000	2.000 a 30.000	6.400	440 a 78.600
DQO	-	-	31.900	1.500 a 703.000
NTK	700	100 a 1.600	580	66 a 1.000
N-Amoniacal	400	100 a 800	87	3 a 116
Fósforo	250	50 a 800	210	20 a 760
Grasas y aceites	8.000	5.000 a 10.000	5.600	200 a 23.300

Fuente: Montangero, et al. (2002), citado en Leite, et al. (2006).

Además de su gran variabilidad, el lodo proveniente de tanques sépticos presenta algunas otras características como la mala sedimentación, por tanto, para sistemas de tratamiento que dependen de la capacidad de sedimentación del lodo, por ejemplo, los tanques de sedimentación, es de extrema importancia que se realicen ensayos para verificar la capacidad de

sedimentación del lodo o de la mezcla de lodo y aguas residuales domésticas. También, es un factor importante la concentración elevada de aceites y grasas (por encima de  $300 \text{ mg L}^{-1}$ ), la cual puede afectar negativamente la capacidad de sedimentación de estos lodos.

En general, los lodos producidos en tanques sépticos contienen baja cantidad de metales y otros contaminantes, además, presentan coloración oscura y olor característico resultante de la presencia de gas sulfhídrico y otros gases (Jordão & Pessoa, 2014; Leite, et al., 2006). A pesar del potencial contaminante, no es inusual encontrar evidencias que muestran que el destino final de estos lodos fue inadecuado, es decir, depositados en terrenos baldíos, pozos de inspección de la red de alcantarillado o, incluso, vaciados en cursos de agua y redes de drenaje urbano.

Ingunza et al. (2009) llevaron a cabo la caracterización de residuos de fosas y tanques sépticos, a partir de los resultados obtenidos en investigaciones hechas en Brasil, en el marco del Programa de Investigaciones en Saneamiento Básico (*Pesquisas em Saneamento Básico-Prosab 5*). En dicho estudio se obtuvieron los valores mínimos, máximos y medios, resultantes de la caracterización físico-química de lodos generados en tanques sépticos, muestreados aleatoriamente, utilizando el procedimiento de recolección de alícuotas de sendos volúmenes descargados por los camiones limpiadores en la entrada de la PTAR (ver Tabla 3.11).



**Tabla 3.11** Características fisicoquímicas de lodos generados en tanques sépticos en algunas locaciones de Brasil.

Parámetro	FAE/SANEPAR/UFPR				UFRN				UnB				USP			
	N	Mín	Máx	Media	N	Mín	Máx	Media	N	Mín	Máx	Media	N	Mín	Máx	Media
<b>pH</b>	22	5,1	8,4	7,2	125	4,2	8,3	6,6	15	5,9	7,9	7,1	31	6	7,5	6,9
<b>Alcalinidad (mgCaCO<sub>3</sub>/L)</b>	21	132	1618	773	123	0	2051	471	15	79	1450	390	18	219	878	477
<b>Conductividad (µS/cm)</b>	22	805	2800	1636	122	231	11270	1193	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>DBO (mg/L)</b>	21	137	6280	2734	62	89	14242	2176	-	-	-	-	30	76	7413	1524
<b>DQO (mg/L)</b>	21	700	24600	11219	116	212	23492	4205	13	108	6932	1281	32	162	22445	4491
<b>N amoniacal (mgNH<sub>3</sub>-N/L)</b>	22	33	264	124	118	3	277	75	13	11	98	51	20	76	396	167
<b>NTK (mgN/L)</b>	22	50	1211	444	121	23	511	129	11	53	473	160	8	16	168	90
<b>Fósforo total (mgPO<sub>4</sub>-P/L)</b>	22	4	459	132	-	-	-	-	14	0	52	14	18	17	73	39
<b>Grasas y aceites (mg/L)</b>	21	130	7037	1908	118	2	6419	613	-	-	-	-	23	7	2803	345
<b>ST (mg/L)</b>	22	1051	38000	12116	122	399	28590	6508	8	715	45555	10214	30	695	27932	5216
<b>STV (mg/L)</b>	22	687	33628	7891	122	233	22146	4368	7	133	31097	7368	29	214	21152	3053
<b>SST (mg/L)</b>	12	566	19750	6656	114	134	22276	3891	8	574	35853	6395	29	200	19280	3257
<b>SSV (mg/L)</b>	12	500	15266	4361	113	120	16050	2776	7	257	24047	4996	28	48	11032	1749
<b>S Sed (mL/L)</b>	21	2	600	145	121	0	825	136	15	0	450	70	28	1	250	50

**Nota:** N: Número de parámetros; FAE/SANEPAR/UFPR: lodos recolectados en la Región Metropolitana de Curitiba (PR); USP: lodo colectado en la Región de São Carlos (SP).

Fuente: Ingunza, et al. (2009)



La gran heterogeneidad en la composición de los lodos generados en tanques sépticos y el intervalo de variación de las concentraciones de los parámetros evaluados son consecuencia de los distintos orígenes de los lodos y de los diversos tipos de unidades (*e.g.*, tanques sépticos, fosos, sumideros). A pesar de que todos son genéricamente fosos sépticos, técnicamente hubo variaciones en su construcción, operación y en los tiempos de retención de los lodos, además, las AR vinieron de diferentes clases de contribuyentes. Los autores resaltan que, al proyectar sistemas para el saneamiento de esos subproductos, es necesario tener en cuenta no solo la elevada concentración de materia orgánica, sino también las altas concentraciones de las dos formas de nitrógeno (*i.e.*, nitratos y nitritos), así como de las concentraciones de sólidos que les son características y que no son típicas del lodo de las PTAR, ni de los alcantarillados sanitarios. Es importante resaltar que el drenado de los tanques sépticos debe hacerse dentro del período considerado en sus respectivos proyectos.

Los procedimientos realizados durante la evacuación de los sistemas, por las empresas encargadas del mantenimiento (*i.e.*, limpiadoras de fosos), contribuyen a la gran variabilidad de las características del lodo séptico, ya que el mantenimiento es realizado en tanques y sumideros, entre otros. Los residuos se diluyen y, usualmente, se utilizan cantidades significativas de agua para “lavar el sistema”.

Según los resultados obtenidos por Ingunza, et al. (2009), presentados en la Tabla 3.10, los residuos drenados por los camiones limpiadores de fosos son mucho más concentrados que las aguas residuales domésticas, pero no llegan a tener características similares a los lodos provenientes de las PTARs.

### **Material grueso (desechos) residuos de las rejillas**

El material retenido en las rejillas procede, generalmente, del uso inadecuado de instalaciones prediales, colectores públicos y demás componentes de un sistema de alcantarillado sanitario. La operación de remoción de estos sólidos gruesos se realiza a la entrada de los procesos de saneamiento de las PTARs por medio de unidades de cribado (*i.e.*, rejillas o enrejados). Cabe mencionar que, a menudo, el destino final del material extraído son los rellenos sanitarios. La cantidad de material removido es muy variada, tal y como se representa en la Tabla 3.12.

**Tabla 3.12** Cantidad de sólidos gruesos removidos en función del espaciamiento entre barras.

Espacio entre barras (mm)	Cantidad típica de sólidos gruesos retenidos (L/1000 m <sup>3</sup> )
12,5	50
20	38
25	23
35	12
40	9
50	6

Fuente: Jordão y Pessoa (2014) citando en WEF, Metcalf y Eddy (1991).

## Residuos de los desarenadores

La arena contenida en las aguas residuales está, en gran parte, constituida por materiales minerales como: arenas, piedras, escorias, y gravas; además, contiene poca cantidad de materia orgánica putrescible, es decir: vegetales, grasas, cáscaras de huevos, trozos de huesos, entre otros. El dimensionamiento y remoción se da por la propiedad de rápida sedimentación, debido al peso de las partículas, y ponderando el diámetro mínimo de la arena en 0,2 mm. Este sistema está localizado en las PTAR a continuación de las rejillas. La cantidad de material removido es muy variado; en la Tabla 3.13 se resume el relato técnico de autores de diversas nacionalidades.

**Tabla 3.13** Eliminación de arenas y otras partículas, según varias referencias académicas.

Autor o referencia	Origen	Intervalo mín a máx (10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )		Media (10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
Mara, D.	Escocés	-	17	5 a 10
Metcalf y Eddy	Estadounidense	0,03	18	-
Imhoff, K. <sup>(1)</sup>	Alemán	6,8	16	-
Autor o referencia	Origen	Intervalo mín a máx (10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )		Media (10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )

Degrémont <sup>(1)</sup>	Francés	-	16	-
Azevedo Netto e Hess, M. L.	Brasileño	1,3	4	1,5 a 2,9
PTAR Pinheiros <sup>(2)</sup>	Brasileño	1,3	7,3	4,1
PTAR Vila Leopoldina <sup>(2)</sup>	Brasileño	0,3	2,2	1,2

<sup>(1)</sup>Valores transformados con base en 200 L/hab·d; <sup>(2)</sup>Valores medidos entre enero/1976 a marzo/1977.

Fuente: Jordão y Pessoa (2014).

El destino final del material removido son los rellenos sanitarios específicos para este tipo de material.

## Material Flotante

El material flotante es un subproducto sólido, constituido generalmente de materiales flotables, no degradados durante el tratamiento de efluentes de AR. En general, puede ser definido como una capa de materiales flotantes que se desarrolla en la superficie de reactores UASB. La cantidad y las características del material sobrenadante dependen del sistema preliminar de tratamiento; la composición del sustrato, especialmente de las concentraciones de sólidos suspendidos, y grasas y/o aceites en el AR.

La formación del material flotante puede intensificarse cuando los reactores UASB están operando con bajos tiempos de detención; asimismo, la alta velocidad ascensional aumenta la cantidad de sólidos arrastrados hacia la superficie del reactor contribuyendo a una mayor formación de dicha capa. Otro parámetro de operación de los reactores UASB que puede influir en la formación del material flotante es la remoción de lodo. La no retirada del lodo excedente, con la frecuencia adecuada, seguramente provocará una mayor pérdida de sólidos para el compartimiento de decantación, ocasionando la elevación de la tasa de producción del material flotante y el posible deterioro de la calidad del efluente final (Ross, et al., 2014).

## Referencias

- ABNT (1987). NBR 9.800: *Critérios para o lançamento de efluentes industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário* [Criterios para la introducción de efluentes industriales en el sistema colector público de alcantarillado sanitario]. São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (1993). NBR 7229 - *Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos* [Proyecto, construcción y operación de sistemas de tanques sépticos]. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2004). NBR 10.004: *Resíduos Sólidos - Classificação* [Resíduos sólidos-clasificación]. Río de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Andreoli, C. V., Pegorini, E. S., & Fernandes, F. (2014). Disposição do lodo no solo. [Disposición del lodo en el suelo]. En *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final* [Lodo de aguas residuales: tratamiento y disposición final] Andreoli, C. V.; Von Sperling, M.; Fernandes, F. (Editores). Belo Horizonte, Brasil: Editora UFMG. pp. 317- 95.
- Aisse, M. M. (1999). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. En: Campos, J. R. (Coord.). *Tratamento e destino final do lodo gerado em reatores anaeróbios*. Rio de Janeiro: ABES. pp. 271 - 99.
- Bittencourt, S. (2014). *Gestão do processo de uso agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná: Aplicabilidade da Resolução Conama 375/06*. (Tese Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná. Curitiba.
- Galvis, J., & Rivera, X. (2013). *Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos presentes en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) de la Empresa Jugos Hit de la ciudad de Pereira* (Tesis Tecnólogo en Química). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira- Colombia.
- Hurtado, A. (2015). *Proceso de transformación de biosólidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con vermicompostaje y su aplicación en germinación, caso países europeos: España, Reino Unido, Francia, Portugal, Italia* (Tesis Ingeniería Civil). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá-Colombia.
- Ingunza, M. P. D., Andrade Neto, C. O., Araújo, A. L. C., Souza, M. A. A., Medeiros, S. A., Borges, N. B., & Hartmann, C. M. (2009). Caracterização física, química e microbiologia do lodo de fossa/tanque séptico [Caracterización física, química y microbiología del lodo de fosa / tanque séptico] (pp.375-383). En Andreoli, C.V. (coord.). *Lodo de*

*fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final* [Lodo de fosa y tanque séptico: caracterización, tecnologías de tratamiento, gestión y destino final]. Río de Janeiro, Brasil: ABES.

Jordão, E. P., & Pessoa, C. A. (2014). Remoção de Sólidos Grosseiros. Em *Tratamento de Esgotos Domésticos* [Eliminación de sólidos gruesos. En: Tratamiento de las aguas residuales domésticas]. (7a ed.). Río de Janeiro, Brasil: ABES.

Leite, B. Z., Pegorini, E. S., Andreoli, C. V., & Andrade, F. L. (2006). Caracterização e Alternativas de Disposição Final de Resíduos Sépticos [Caracterización y Alternativas de Disposición Final de Resíduos Sépticos]. En *8º Simpósio Ítalo-brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Fortaleza. Anais*. Rio de Janeiro, Brasil: ABES.

Metcalf & Eddy Inc. (1991). *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. Tchobanoglous, G. e Burton F.L. (eds.), 3a ed. Nueva York: McGraw-Hill.

Ross, B. Z. L., Marques, C. J., Carneiro, C., Costa, J. O. G., Froehner, S., & Aisse, M. M. (2014). Avaliação do impacto da incorporação de espuma em lodo de esgoto destinado a uso agrícola [Evaluación del impacto de la incorporación de espuma en lodo de desagüe destinado a uso agrícola]. En *XXXIV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Monterrey. Anais*. México: AIDIS.

Von Sperling, M., & Gonçalves, R. F. (2014). Lodo de Esgotos: características e produção [Disposición del lodo en el suelo]. En *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final* [Lodo de aguas residuales: tratamiento, gestión y disposición final]. Andreoli, C. V., Von Sperling, M. y Fernandes, F. (Editores). Belo Horizonte, Brasil. Editora UFMG. pp. 15-65.

## 3.2 DESHIDRATACIÓN DE LODOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTAP)

*Fernando Fernandes, Cristiane Silveira, y Emilia Kiyomi Kuroda.*

En el caso de las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP), la producción de lodos en el proceso de purificación de las aguas es, por lo general, menor en cantidad y volumen, además, presenta menores contenidos de agentes contaminantes; sin embargo, cada etapa del procesamiento para sanear estos lodos, a fin de ser aprovechados con beneficios, tiene un objetivo específico que puede ser provocar una alteración o una mejora en sus características físicas, químicas o biológicas, según sea necesario.

Las etapas o procesos se aplican dependiendo de las características finales esperadas en los lodos, las cuales estarán en función de los parámetros legales a cumplir: el espacio físico disponible, las condiciones climáticas locales, el volumen del material a ser procesado, la tecnología que esté al alcance, la elección de la disposición final de los lodos y las condiciones financieras de quienes lleven a cabo el procesamiento. Por lo tanto, el empleo de las etapas de homogeneización, espesamiento, deshidratación y cualquier forma de estabilización, dependerá directamente de la selección de la disposición final de los lodos, la cual debe estar sujeta a los siguientes aspectos: análisis de sustentabilidad técnica y económica, requerimientos legales, de salud pública y ambientales. Aquí es importante destacar que para cada alternativa de destino final puede haber un contenido de humedad más favorable, de forma que los estudios de alternativas de técnicas de deshidratación deben ser efectuados al unísono con la selección del destino final.

### **Reducción de la humedad en los lodos generados en PTAPs**

El desaguado de los lodos es una operación unitaria (llamada así por que se lleva a cabo en formas separadas unas de otras) que reduce el volumen de los lodos a través de la disminución de su contenido de agua y humedad; dicho procedimiento tiene como consecuencia el aumento del contenido de sólidos por unidad de volumen. Por otra parte, la dificultad para deshidratar lodos varía con el tipo de lodo y su contenido de agua; dicha variación en la problemática para ejecutar la deshidratación está directamente relacionada con el tipo de sólidos contenidos en los lodos y con la

forma en que el agua está ligada a esas partículas sólidas. Las principales razones para llevar a cabo la deshidratación del lodo son:

- Reducción de los costos de transportación de los lodos al lugar de disposición final.
- Reducción del volumen y diversificación de alternativas técnicas para disposición final.
- Mejora en las condiciones de manejo del lodo, permitiendo la atención a las disposiciones ambientales legales para ambas matrices (líquida y sólida).

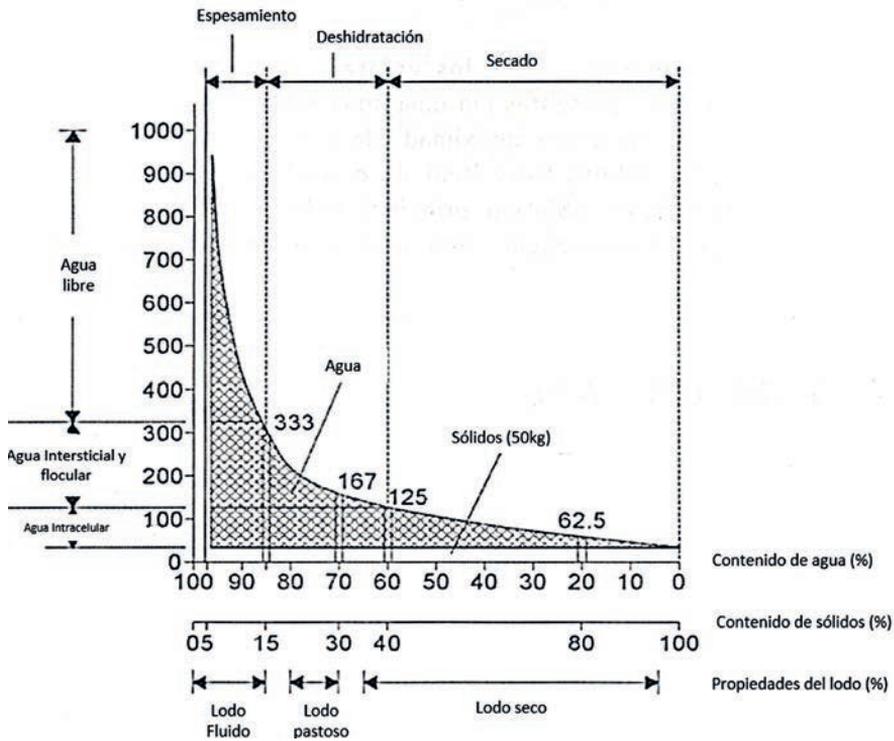
En la Figura 3.2 se muestra cómo varían los volúmenes de los lodos durante los procesos de deshidratación, según el contenido de sólidos dentro de ellos. La curva en forma exponencial manifiesta que en las fases de espesamiento y de deshidratación, con remoción del agua libre e intersticial, es donde se alcanza la mayor reducción de volumen en los lodos, mismas que conllevan la disminución de costos de transporte y de tratamiento posterior de esos lodos.

La deshidratación puede ser ejecutada mediante sistemas: mecanizados (*e.g.*, centrifugadora, filtro prensa, filtro banda), naturales (*e.g.* lagunas de decantación) y de filtración/evaporación (*e.g.*, lechos de secado o drenaje y bloques drenantes). Cabe señalar que recientemente ha sido difundida la aparición del uso de bolsas en sistemas de torre de deshidratación.

En Brasil, los principales procesos utilizados para la deshidratación natural o mecánica son:

- Medios mecánicos (centrífugas, filtros de prensa, prensas de deshidratación).
- Lechos de secado convencional o con bloques drenantes.
- Lechos de drenaje con manta geotextil.
- Torres de deshidratación.

**Figura 3.2** Variación de volumen del lodo en función del contenido de sólidos.



Fuente: SANEPAR (1999).

En la deshidratación natural se utilizan solo agentes naturales (e.g., gravedad, evaporación); estos métodos presentan como desventaja la necesidad de grandes áreas para el proceso y dependen, en gran medida, de las condiciones climáticas prevalecientes en el lugar de secado. Debido a esta necesidad de grandes espacios, este tipo de instalaciones son sugeridas para las PTAPs de pequeño aporte o caudal, en las cuales, la generación de residuos o subproductos se da por consecuencia menor. Por otro lado, para las PTAPs de mayores dimensiones (mayor caudal procesado) o en situaciones donde no hay mayor disponibilidad de espacio o, incluso, donde las condiciones climáticas no son favorables (como regiones subtropicales y templadas), se puede recurrir a técnicas de deshidratación mecanizadas.

Como ya se mencionó, los lodos generados en las PTAPs presentan, en general, bajo contenido de materia orgánica, por lo que no hay necesidad de una estabilización biológica antes de la deshidratación, como es el caso de los lodos producidos en el tratamiento de aguas residuales;

sin embargo, se destaca que, para aumentar la tasa de deshidratación y captura de sólidos, los lodos deben estar sometidos a una etapa de acondicionamiento, previa a la etapa de deshidratación propiamente dicha. El acondicionamiento puede ser efectuado por intermedio de operaciones físicas como sedimentación por gravedad o flotación, además del empleo de productos químicos.

Adicionalmente, es recomendable que, antes de la etapa de deshidratación por centrifugación, la concentración de SST en los lodos sea de por lo menos 2% (masa/masa). A fin de garantizar la eficiencia de deshidratación mediante centrifugación, es necesario llevar a cabo ensayos de laboratorio para determinar el tipo de polímero y la dosificación que corresponda, ya que esta varía generalmente entre 1 y 5 g/kg de SST (Di Bernardo, Dantas & Voltan, 2011). Para las unidades de deshidratación se recomienda, además, que la obtención de parámetros de diseño sea hecha de acuerdo con una planificación previa y que esos sean adecuados a las condiciones reales de aplicación (utilizando el lodo de la propia PTAP) y locales, ya que las diferencias en el clima de los diferentes sitios, así como del suelo, y la forma de operación de las diferentes PTAPs no permiten el uso de parámetros genéricos.

## **Centrifugación y otros medios mecánicos**

La deshidratación de lodos por medio de centrifugadoras ocurre a través de un proceso en el que se aplican fuerzas centrífugas a los lodos, para acelerar la separación de la fase líquida de la sólida. Esta separación se realiza a través de dos operaciones distintas, la clarificación y la compactación. Durante la etapa de clarificación, la fase líquida de los sólidos es removida y en la de compactación, se retiran tanto el agua capilar como la intersticial de la masa del lodo.

Para el tratamiento de lodos generados en las PTAPs, las centrifugadoras más utilizadas son las decantadoras de eje horizontal. Estas centrifugadoras están compuestas por un tambor cilíndrico, movido por un eje horizontal, con una sección cónica convergente en un extremo que gira alrededor de ese eje. Parte de este arreglo también incluye, un transportador de tornillo en el interior del tambor, que al girar a una velocidad diferente a la del tambor raspa el lodo centrifugado (adherido a las paredes) hacia afuera de la centrifugadora. Para contenidos de sólidos en el lodo en torno al 20%, se recomienda, además, el uso de polímeros durante el proceso, a fin de mejorar esta operación.

Durante la operación de las centrifugadoras ocurre, básicamente, la aplicación de una fuerza centrífuga, que aplica una celeridad de entre 500 a 4.000 veces la aceleración de la gravedad. El proceso de centrifugación produce lodos con una concentración media del 20% de sólidos, asociados a un elevado costo en su implementación y operación, debido al alto consumo energético, y principalmente al consumo de polielectrolitos. La centrifugación puede considerarse una etapa intermedia entre el secado y el espesamiento. Las centrifugadoras operan, regularmente, entre 12 y 20 horas al día y las tortas de lodos producidas presentan, en general, una masa específica que varía entre 1,15 y 1,30  $\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$ , y contenido de SST de entre 15 a 35% (Di Bernardo, Dantas & Voltan, 2011; Richter, 2001).

Además de las centrifugadoras se emplean otros equipos, como son: filtros-prensa, prensas desaguadoras (*belt press*), prensas desaguadoras en rosca sin fin. Sin embargo, debido a su facilidad y sencillez de operación, las centrifugadoras han sido la alternativa más utilizada. En algunos casos, equipos con mayor eficiencia son necesarios, tal es el caso de los filtros-prensa que llegan a producir tortas con más del 30% de contenido de sólidos y que, además, requieren menores espacios para su operación. Como fase complementaria también pueden ser citados los secadores térmicos, los cuales representan una forma de secado más avanzada y de mayor costo, pero con la ventaja de suprimir organismos patógenos.

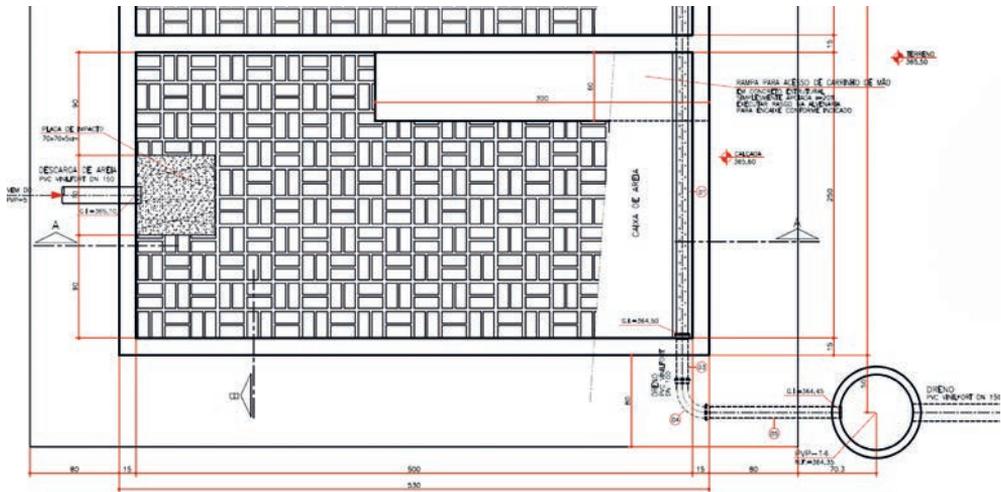
### Lechos de secado convencionales

En los lechos de secado, la remoción de humedad se da por la decantación, drenaje y evaporación, a fin de obtener la concentración de sólidos deseada en el producto final. Este proceso involucra básicamente dos operaciones: aplicación de presión sobre la masa de lodo y filtración del agua contenida en ella. Sin embargo, este sistema tiene la desventaja de ser afectado por la temperatura, humedad del aire, ventilación y viscosidad del lodo, y, en casos de lugares con clima frío de alta humedad, es necesario conceder un largo período para que ocurra la deshidratación del lodo.

El ciclo de secado dura tres semanas o más, dependiendo de las condiciones climáticas y de la concentración de sólidos que se quiera alcanzar. No se utiliza energía durante el proceso, ni la adición de productos químicos. Las variables climáticas pueden influir en el secado del lodo, el cual es recomendado para regiones más calurosas. El contenido final de sólidos puede variar entre el 17 y el 19% en los lechos con cubierta superior o techumbre y del 22

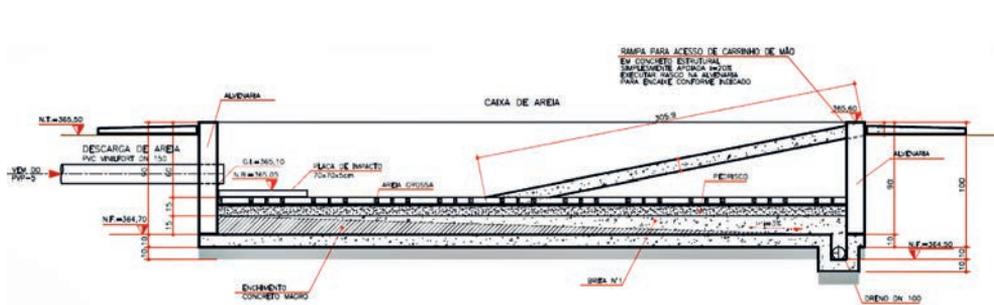
al 28% en los lechos de secado sin cubierta. Las Figuras 3.3 y 3.4 muestran las vistas en planta y en corte, respectivamente, del esquema básico de un proyecto de lechos de secado convencional.

**Figura 3.3** Esquema básico en planta de un proyecto de lechos de secado convencional



Fuente: Autor.

**Figura 3.4** Esquema básico en corte de un proyecto de lechos de secado convencional.



Fuente: Autor

## Lechos de secado con bloques drenantes

En los lechos de secado y drenaje, los mecanismos de deshidratación consisten esencialmente en decantación, percolación (drenaje) y evaporación, siendo estos influenciados principalmente por la temperatura y humedad del aire, viscosidad del lodo espesado y acción de los vientos (Di Bernardo, Dantas & Voltan, 2011; Richter, 2001).

El sistema de bloques filtrantes comprende un tanque raso, de fondo impermeable, donde se montarán bloques con capacidad de drenaje. Cada bloque tiene una sección en planta de 30 x 30 cm y 5 cm de altura. Los bloques filtrantes se ponen en el tanque sobre el piso de hormigón pulido; asimismo, los módulos tienen ranuras tipo macho/hembra (dos lados de cada una) que permiten la sujeción entre bloques; esta fijación por machimbre (macho/hembra) ayuda a que cualquier módulo sea removido y sustituido sin perjuicio de los módulos contiguos. Los bloques están protegidos contra el deterioro ocasionado por rayos UV.

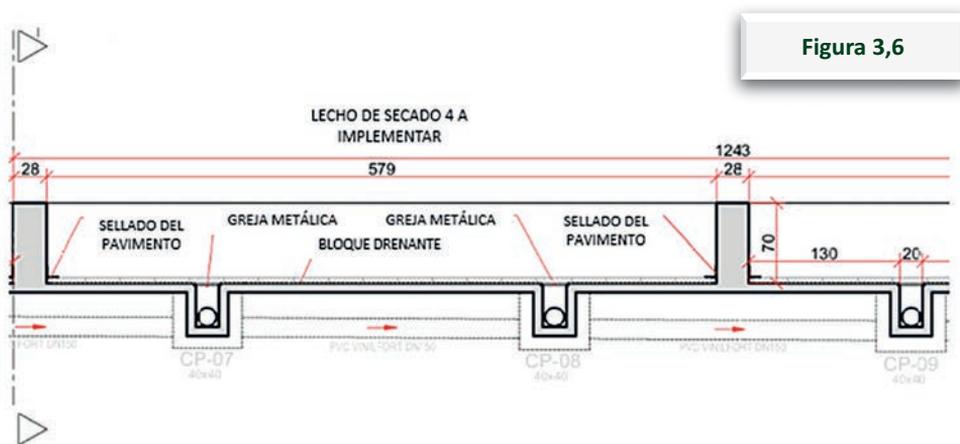
Las Figuras 3.5 y 3.6 muestran, respectivamente, esquemas básicos de diseño de lechos con bloques drenantes en planta y en corte.

**Figura 3.5** Esquema básico en planta de proyecto de lecho de drenaje con bloques drenantes.



Fuente: Autor

**Figura 3.6** Esquema básico en corte de proyecto de lecho de drenaje con bloques drenantes.



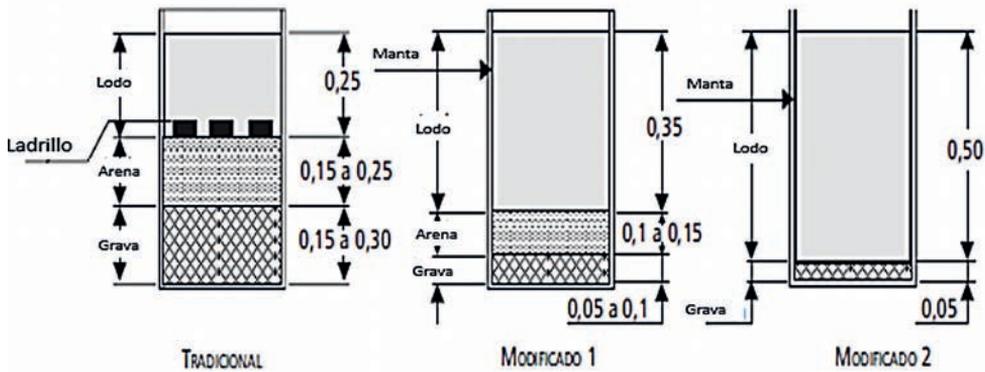
Fuente: Autor

El líquido drenado de los lodos desaguados en los lechos de secado con bloques drenantes, así como el de los lavados respectivos de esos lechos, deben ser recogido en cajas de paso y conducido a un pozo de succión para ser retroalimentado al inicio del proceso de tratamiento.

### Lechos de drenaje con material geotextil

Cordeiro (1993, 2001) estudió la posibilidad de modificar la estructura de los lechos de drenaje/secado convencionales (grava y arena) y observó una mejora progresiva en relación al volumen de drenaje en función del tiempo, con la disposición de una manta de geotextil sobre la capa filtrante de arena (Lecho modificado 1 en la Figura 3.7) y, posteriormente, sobre la capa de grava 0.1 con 5 cm (Lecho modificado 2 en la Figura 3.7).

**Figura 3.7** Etapas de desarrollo de los sistemas de lechos de drenaje/secado



Fuente: Cordeiro (2001).

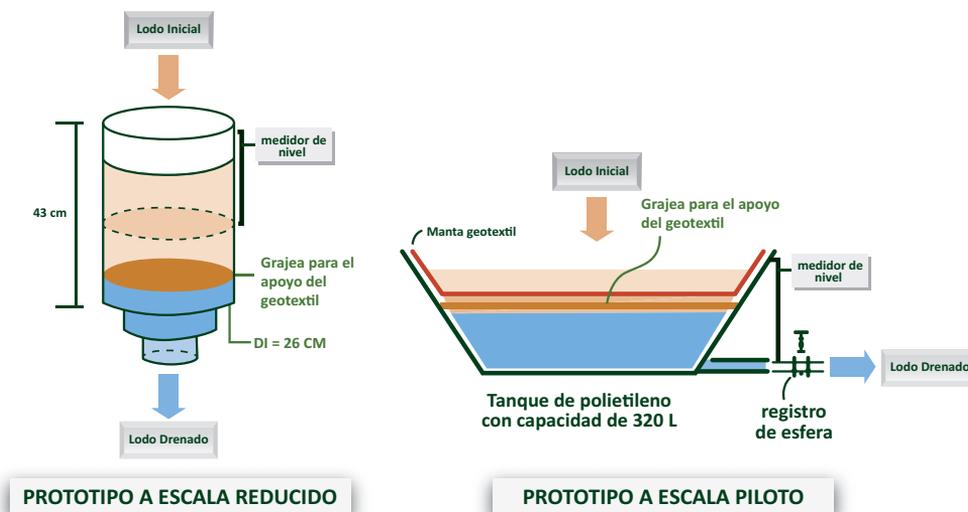
De esta forma, el empleo de lechos de drenaje con uso de manta geotextil pasó a ser una alternativa técnica interesante para su aplicación, especialmente en las PTAP de pequeño porte.

Se realizaron varias investigaciones para evaluar el sistema de deshidratación de lodos de decantadores de las PTAP en lechos de drenaje con uso de manta geotextil en ensayos de laboratorio por medio de prototipos de escalas reducida, piloto y real; esos estudios fueron realizados por Achon (2003), Fontana (2004), Silva (2006), Barroso (2007), Lima (2010); Macedo (2010); Silveira (2012); Kuroda, et al. (2013) y Silveira, et al. (2015).

Después de ejecutar la variación de los parámetros de proyecto en prototipos a escala reducida y piloto (ver Figura 3.8), Silveira (2012) seleccionó densidad de la manta geotextil de  $600 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ , tasa de aplicación de sólidos - TAS de  $7,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , tasa de aplicación de sólidos, -tasa de aplicación volumétrica-TAV de  $15 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ , duración máxima de las fases de drenaje del lodo y de secado de la torta de lodo de 15 días. El rendimiento del sistema de deshidratación fue evaluado por medio de la caracterización cualitativa y cuantitativa de los lodos afluentes al sistema, del agua drenada y de las tortas de lodo retenidas bajo diferentes condiciones climáticas de exposición (controlada y natural de verano e invierno), considerando las características del producto, (coagulantes a base de Fe para el lodo tipo

A (cloruro férrico-CF) y de Al (hidroxi-cloruro de polialuminio-PAC) para el lodo tipo B).

**Figura 3.8** Esquema de los prototipos a escalas reducidas y piloto de un sistema de deshidratación de lodos por decantación para las PTAP.



Fuente: Autor

En la escala piloto, los porcentajes de volumen de drenado que obtuvieron las condiciones de supervisión I y II (Resolución 357/05 del CONAMA) y de reaprovechamiento III en relación con la turbidez fueron del 66%, 69% y 62% para el lodo tipo A y del 84%, 89% y 71% para el lodo tipo B, como se presenta en la Tabla 3.14.

**Tabla 3.14** Porcentajes de volumen de drenado logrados en cada condición, a escala piloto

Tipo de lodo	Condición I (Turbiedad <40 uT)	Condición II (Turbiedad <100 uT)	Condición III (Turbiedad <10 uT)
Lodo tipo A (CF)	66%	69%	62%
Lodo tipo B (PAC)	84%	89%	71%

El desaguado a escala piloto proporcionó para el lodo tipo A, una reducción en la concentración de hierro total de entre 90,8% y 99,93%, y para el lodo tipo B, la reducción de la concentración de aluminio total de entre 99,83% y 99,97%, lo que demuestra la elevada eficiencia de este sistema de deshidratación.

En cuanto al secado del lodo tipo A (ver Figuras 3.9 a 3.11), se observó que después de 7 días de exposición, con una temperatura media de  $18,3^{\circ}\text{C} \pm 1,6$ , humedad relativa media de  $76,7\% \pm 13,4$  y una ocurrencia de precipitación del 6° al 7° día, el contenido de sólidos totales -ST final fue del 16,6%.

**Figura 3.9** Torta del lodo tipo A luego de la fase de drenaje (ST 12,9%)



Fuente: Autores

**Figura 3.10** Torta del lodo tipo A en el 4° día de secado (ST 15%)



Fuente: Autores

**Figura 3.11** Torta del lodo tipo A después de 7 días de secado (ST 16,6%)



Fuente: Autores

Se pudo observar que después de 7 días de secado, con temperatura media de  $23,2\text{ °C} \pm 3,6$  y humedad relativa media de  $69,4\% \pm 8,1$ , el contenido final de sólidos totales, después del secado del lodo tipo B, fue de: 30,2% (ver Figuras 3.12 y 3.13).

**Figura 3.12** Torta del lodo tipo B después de la fase de drenaje (ST 11,2%)



Fuente: Autores

**Figura 3.13** Torta de lodo tipo B después de 7 días de secado (ST 30,2%).



Fuente: Autores.

El secado de los lodos tipos A y B en condiciones naturales críticas de exposición en invierno, desprotegidos de precipitación permitió la obtención de contenidos de sólidos del orden del 16 y 30%, después de 7 días de secado, valores del mismo orden de magnitud de los producidos por técnicas mecánicas de deshidratación.

### Torre de deshidratación

La torre de deshidratación de lodos es una unidad compacta y vertical, de estructura metálica, que utiliza la tecnología de deshidratación por medio de geosintéticos. Se ejercen simultáneamente las funciones de contención de la masa de sólidos, pues almacena grandes volúmenes y drenaje de líquidos, garantizando la calidad del efluente drenado con la eliminación o minimización de tratamientos adicionales. La Figura 3.13 muestra una torre de deshidratación lista para la operación.

Según el fabricante, esta tecnología tiene un consumo más bajo de energía al operar en la deshidratación de lodos, además de ser de fácil instalación y bajo consumo de polímeros. Cada torre tiene capacidad para recibir un caudal máximo de lodo de 23 m<sup>3</sup>/h y un volumen de 11,5 m<sup>3</sup>.

**Figura 3.14** Torre de deshidratación lista para funcionar.



Fuente: Autores

## Consideraciones finales

Se debe considerar que, independientemente del tipo de deshidratación, la recirculación del sobrenadante hacia el inicio del tratamiento de la PTAP puede comprometer el funcionamiento de esta en relación con la calidad final del agua procesada, por la presencia de microorganismos patógenos tales como quistes de *Giardia* y *Cryptosporidium*, o de metales pesados, dependiendo de la calidad del coagulante utilizado o, aún más, de precursores de la formación de subproductos de la oxidación como los THM y AHAs, entre otros. Estos organismos compuestos pueden ser resistentes al tratamiento por ciclo completo y cloración, y se concentran gradualmente a lo largo del tiempo.

De esta forma, se recomienda que se lleven a cabo estudios previos con el agua de recirculación, a fin de evaluar la necesidad de adopción de acondicionamiento/pretratamiento en función de sus características y garantizar la calidad del agua tratada a lo largo del tiempo. Además, se recomienda que el caudal de recirculación no exceda el 10% del caudal de la planta, para no causar grandes cambios en las dosis de productos químicos.

## Referencias

- ACHON, C. L., & CORDEIRO, J. S. (2003). ANÁLISE CRÍTICA DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS NATURAIS DE REMOÇÃO DE ÁGUA LIVRE DE LODO DE ETA. 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. JOINVILLE, SANTA CATARINA.
- BARROSO, M. M. (2007). *INFLUÊNCIA DAS MICRO E MACROPROPIEDADES DOS LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS NOS DESAGUAMENTO POR LEITO DE DRENAGEM* (Tese de Doutorado). UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, SAO PAULO.
- CORDEIRO, J. S. (2001). PROCESSAMENTO DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETAs). (CAPÍTULO V). EN ANDREOLI, C.V. (COORD). *RESÍDUOS SÓLIDOS DO SANEAMENTO: PROCESSAMENTO, RECICLAGEM E DISPOSIÇÃO FINAL*. RIO DE JANEIRO: ABES. PROJETO PROSAB 2.
- CORDEIRO, J. S. (1993). *O PROBLEMA DOS LODOS GERADOS EM DECANTADORES DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA* (Tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento). UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, SÃO CARLOS,
- DI BERNARDO, L., DANTAS, A. D., VOLTAN, P. E. N. (2011). *TRATABILIDADE DE ÁGUA E DOS RESÍDUOS GERADOS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA*. SÃO CARLOS - SP: LDIBE.

- FONTANA, A. O. (2004). *SISTEMA DE LEITO DE DRENAGEM E SEDIMENTADOR COMO SOLUÇÃO PARA REDUÇÃO DE VOLUME DE DECANTADORES E REUSO DE ÁGUA DE LAVAGEM DE FILTROS – ESTUDO DE CASO – ETA CARDOSO* (DISSERTAÇÃO DE MESTRADO). UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, SAO CARLOS.
- KURODA, E. K., SILVA, S. M. C. P., FERNANDES, F., OLIVEIRA, N. S. Y AISSE, M. M. (2013). DESAGUAMENTO DE LODO DE ETA EM LEITOS DE SECAGEM COBERTOS, CONVENCIONAIS E MODIFICADOS. IN *LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA - GESTÃO E PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS*. (v. 1, pp. 342-388). CURITIBA: THINKS CREATIVE.
- KURODA, E. K., SILVEIRA, C., MACEDO, J. G., LIMA, M. S. P., KAWAHIGASHI, F., BATISTA, A. D., FERNANDES, F. (2014). DRENAGEM/SECAGEM DE LODO DE DECANTADORES DE ETAs EM MANTA GEOTEXTIL. *REVISTA DAE*, (1), 24 - 34.
- LIMA, M. S. P. (2010). *DESAGUAMENTO DE LODO DE ETAs POR LEITO DE DRENAGEM COM MANTAS GEOTÊXTEIS EM ESCALA REDUZIDA* (MONOGRAFIA DE ENGENHARIA CIVIL). UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA, LONDRINA.
- MACEDO, J. G. (2010). *DESAGUAMENTO DE LODO DE ETAs POR LEITO DE DRENAGEM COM MANTAS GEOTÊXTEIS – ESCALAS PILOTO E REDUZIDA* (MONOGRAFIA DE ENGENHARIA CIVIL). UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA, LONDRINA.
- RICHTER, C. A. (2001). *TRATAMENTO DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA*. SÃO PAULO: EDGARD BLUCHER.
- SANEPAR (1999). *RECICLAGEM AGRÍCOLA DE LODO DE ESGOTO - ESTUDO PRELIMINAR PARA DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS PARA USO AGRONÔMICO E DE PARÂMETROS PARA NORMATIZAÇÃO AMBIENTAL E SANITÁRIA*. CURITIBA: ED. SANEPAR.
- SILVA, R. C. (2006). *AValiação TÉCNICA E ECONÔMICA DE SISTEMA ALTERNATIVO PARA REDUÇÃO DE VOLUME DE LODO GERADO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETAs) DE PEQUENO PORTE* (MONOGRAFIA DE ENGENHARIA CIVIL). UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA, LONDRINA.
- SILVEIRA, C. (2012). *DESAGUAMENTO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS POR LEITO DE DRENAGEM / SECAGEM COM MANTA GEOTÊXTIL. DISSERTAÇÃO* (MESTRADO EM ENGENHARIA DE EDIFICAÇÕES E SANEAMENTO). UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA, LONDRINA.
- SILVEIRA, C., KURODA, E. K., ABE, C. H., ABE, L. Y., & HIROOKA, E. Y. (2015). DESAGUAMENTO DE LODO DE ETAs POR LEITO DE DRENAGEM / SECAGEM. *ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 20, 250 - 260.