

## II-510 - AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE USO AGRÍCOLA DE LODO DE REATOR ANAERÓBIO DA ETE DE PIRAPORA - MG

**Lucas de Almeida Chamhum Silva<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Ambiental e Sanitarista pela UFJF. Mestrando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG.

**Andrés Felipe Torres Franco<sup>(2)</sup>**

Engenheiro e mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidad del Valle (Cali, Colombia). Doutorando em Engenharia Sanitária, Ambiental e Recursos Hídricos pela UFMG.

**Renata Leandro Rodrigues Bortolini<sup>(3)</sup>**

Engenheira Ambiental pela Universidade Federal de Minas Gerais. Mestranda em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais.

**Cesar Rossas Mota Filho<sup>(4)</sup>**

Doutorado em *Civil and Environmental Engineering* pela *North Carolina State University*, Estados Unidos, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais.

**Antonio Teixeira de Matos<sup>(5)</sup>**

Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade Federal de Viçosa  
Professor Titular Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627, Escola de Engenharia da UFMF, bloco 1, sala XX – Pampulha – Belo Horizonte – MG – CEP: - Brasil – Tel: (32) 98875-0525 – e-mail: [lucas.almeida@engenahria.ufjf.br](mailto:lucas.almeida@engenahria.ufjf.br)

### RESUMO

A expansão dos serviços de coleta e tratamento de esgoto doméstico tende a promover incremento na geração do lodo de esgoto. O aproveitamento agrícola do lodo, além de representar uma forma de destinação final, possibilita a reciclagem dos nutrientes presentes neste subproduto. O objetivo do presente estudo consiste em avaliar o potencial do lodo gerado no reator UASB da ETE de Pirapora (MG) para atender a demanda por nutrientes das atividades agrícolas, pecuária e de silvicultura no município. Para a consecução do trabalho, realizou-se a caracterização dos principais parâmetros qualitativos (pH, teor de água, sólidos fixos e voláteis, carbono orgânico total, nitrogênio total *Kjeldahl*, Fósforo total, Coliformes totais e E. coli) e quantitativos (cenário atual da ETE e de final de plano). Realizou-se, ainda, por meio de sistema de informação geográfica (SIG), a avaliação do uso e ocupação do solo e da demanda por nutrientes associadas às atividades agrossilvipastoris, no referido município. Tal avaliação foi realizada em três áreas circunscritas nos raios de 5, 10 e 20 km a partir da ETE. Comparando-se a demanda e a oferta de nutrientes presentes no lodo, verificou-se que no raio de 5 km há uma demanda associada às pastagens superior à oferta do lodo. Nos raios de 10 e 20 km, além das pastagens, observou-se também a demanda da silvicultura. Os valores obtidos para parâmetros qualitativos avaliados situaram-se, de forma geral, dentro das faixas reportadas na literatura. Na condição final de plano, estima-se um incremento na oferta de nitrogênio e fósforo de 278 e 240%, respectivamente, em relação à condição de operação atual. Como conclusão, observou-se boas perspectivas de aproveitamento agrícola do lodo no município de Pirapora. Ademais, constatou-se a viabilidade de utilização de geotecnologias e dados espaciais como forma de subsidiar o gerenciamento de lodo e planejamento por parte do responsável pelo sistema de esgotamento sanitário.

**PALAVRAS-CHAVE:** Lodo de reator UASB, Uso agrícola, Reciclagem de Nutrientes, SIG.

### INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos, outrora considerados bens naturais infundáveis e gratuitos, têm figurado, cada vez mais, como um fator limitante ao desenvolvimento das atividades humanas, seja pela redução na sua disponibilidade ou degradação da sua qualidade. Neste sentido, é imprescindível atentar-se à qualidade da água não apenas antes como também após seu uso, de forma a se evitar o aporte de poluentes ao meio ambiente. De forma geral, visando a evitar tal poluição, são empregadas diferentes técnicas de tratamento de efluentes gerados

nessas atividades, as quais podem variar em função da qualidade a ser alcançada, tipo de efluente, entre outros. No caso de efluente ou esgoto sanitário, realiza-se o tratamento em estações de tratamento de esgoto (ETEs), que podem dispor de variadas técnicas para tal. À medida em que o tratamento é realizado há geração de subprodutos nas fases líquida, gasosa e sólida. Segundo Andreoli, von Sperling e Fernandes (2014), a fração sólida pode compreender o material gradeado, areia, espuma e lodo, sendo este último o subproduto predominante. Ainda segundo estes autores, as características quanti e qualitativas do lodo são função do tipo de esgoto bruto e sistema de tratamento empregado.

O gerenciamento do lodo assume papel de destaque no processo de tratamento de esgoto, pois, se por um lado o volume gerado é pequeno se comparado ao do efluente tratado (proporção entre 1 a 2%), por outro, o custo relacionado a este subproduto pode variar entre 20 a 60% dos custos operacionais totais de uma ETE (SPINOSA *et al.*, 2011; ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014). A geração de lodo é função do sistema de tratamento, sendo observada ampla faixa de variação, desde 8 até 90 g de lodo desidratado por habitante por dia (FYTILI; ZABANIOTOU, 2006; ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014).

Dentre as formas de destinação final deste subproduto, pode-se elencar aproveitamento agrícola, *landfarming*, recuperação de áreas degradadas, incineração, aterro, descarga oceânica, processos termais (pirólise, gaseificação, oxidação úmida, combustão, co-processamento), uso na construção civil como agregado, entre outros. Vale destacar, que cada método possui suas vantagens e desvantagens e a seleção do mais adequado pode ser norteada a partir de alguns parâmetros, tais como: disponibilidade de área, composição do lodo (presença de contaminantes, teor de matéria orgânica, nutrientes e outros), possibilidade de uso como insumo em processos produtivos e respectivas formas de tratamento associadas, tecnologias disponíveis na região, custos e desempenho operacionais, impactos ambientais e sociais e legislações afins.

Segundo Andreoli, von Sperling e Fernandes (2014), no Brasil, o gerenciamento do lodo tem sido negligenciado, mesmo com a tendência de crescente geração de lodo, com o advento de novas ETEs e incremento na coleta e tratamento de esgotos. Estes autores mencionam, ainda, diferentes perspectivas de disposição do lodo no Brasil. Enquanto em Curitiba e Brasília o lodo é tratado sob a ótica de subproduto, sendo disposto em áreas agrícolas, em São Paulo destina-se predominantemente à aterros.

Já no cenário internacional, observam-se situações variadas. Na União Europeia, no ano de 2006, 37% do lodo produzido era utilizado na agricultura, 11% incinerado, 12% aproveitado em reflorestamento e recuperação de áreas degradadas e, finalmente, 40% foi destinado a aterros, sendo observada gradual redução desta forma de destinação (FYTILI; ZABANIOTOU, 2006). Nos EUA, cerca de 49% do lodo gerado em 2004 foi aplicado em áreas agrícolas, silvicultura ou áreas degradadas, enquanto 45% foi disposto (aterro, *landfarming* ou incinerado) e 6% foi destinado de outras formas (NEBRA, 2007). Na China, observou-se, no ano de 2010, as seguintes formas de disposição final do lodo: 45% para uso agrícola, 3,5% incineração, 34,5% aterro e 17% outros (CHEN *et al.*, 2012).

O aproveitamento agrícola do lodo apresenta diversos efeitos benéficos. Dentre os benefícios relacionados à melhoria na qualidade do solo, a maior parte está associada à adição de matéria orgânica, podendo-se mencionar: aumento na superfície específica da fração sólida, estruturação e estabilização dos agregados, retenção de água, melhoria da consistência, aumento na fertilidade, alteração favorável no pH, neutralização de elementos químicos tóxicos, adição de micronutrientes e melhoria na biota do solo (MATOS, 2014). Outras vantagens associadas à essa prática são: maior parcelamento da adubação, evitando-se perdas e atendendo às necessidades das plantas nas diferentes etapas de desenvolvimento da cultura; e economia de insumos, com consequente economia de recursos financeiros (BASTOS, 2003). Porém, alguns riscos associados ao uso agrícola do lodo têm sido reportados, principalmente devido ao conteúdo de metais pesados, ao aspecto sanitário, à estabilidade, ao conteúdo de nitrogênio e à interação do lodo com o meio ambiente (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014).

No Brasil, tal regulação cabe ao Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, que, por meio da resolução 375 de 2006, estabelece critérios e procedimentos para tal uso. Dentre as restrições preconizadas na resolução estão aquelas relacionadas à qualidade e quantidade do lodo aplicado, ao tipo de cultura, ao local de aplicação e tipo de solo (BRASIL, 2006). No que tange especificamente às restrições locais, existem diversos parâmetros que devem ser considerados, o que pode tornar a seleção de áreas aptas um desafio aos gestores, quando da disposição do lodo em áreas agrícolas. Assim, destaca-se o potencial de utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), por meio dos quais é possível avaliar a adequação de uma área em

relação à diversos parâmetros. O entrecruzamento entre os dados permite a geração de mapas de aptidão do solo à aplicação do lodo, importante instrumento de zoneamento de áreas para esta finalidade, cuja aplicabilidade pode ser verificada tanto em escala regional como municipal (SOUZA *et al.*, 2008; URBAN; ISAAC, 2016).

Como estudo de caso, e tendo em vista a necessidade de se dispor adequadamente o lodo gerado em ETEs e a possibilidade de uso agrícola do mesmo, no presente trabalho objetivou-se avaliar o potencial do lodo gerado no reator UASB da ETE de Pirapora (MG) para atender a demanda por nutrientes das atividades agrícolas, pecuária e de silvicultura, no município. Os tópicos abordados incluem caracterização química, física e biológica do lodo anaeróbico e quantitativos gerados, além da caracterização da demanda de nitrogênio e fósforo das atividades agrossilvipastoris. Ademais, cumpre-se ressaltar a importância do setor agrossilvipastoril no município em estudo. Segundo levantamento de uso e ocupação do solo (IBGE, 2016), 4% da área total do município constitui ocupação urbana, 75% pastagens (natural e plantada), 3,8% silvicultura, 7% área agrícola e 10% corpos d'água.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Caracterização da área de estudo

O trabalho foi desenvolvido no município de Pirapora – MG, em área limitada pelas bacias hidrográficas do Rio das Velhas (SF5) e Rios Jequitai e Pacuí e Trecho do São Francisco (SF6), ambas sub-bacias do Rio São Francisco. Embora a extensão territorial do município de Pirapora esteja compreendida nas duas referidas bacias hidrográficas, a área urbanizada encontra-se totalmente inserida na bacia dos Rios Jequitai e Pacuí, assim como a Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), cujos efluentes tratados são lançados no Rio São Francisco, conforme apresentado na Figura 1. O município de Pirapora, apesar de ser o quarto menor em extensão territorial da bacia SF6 – 549 km<sup>2</sup>, destaca-se pelo maior despejo de efluentes domésticos nesta bacia, sendo o município com maior população urbana, cerca de 55.193 habitantes, o que corresponde a 98,2% da população total (SNIS, 2015; IBGE 2016).

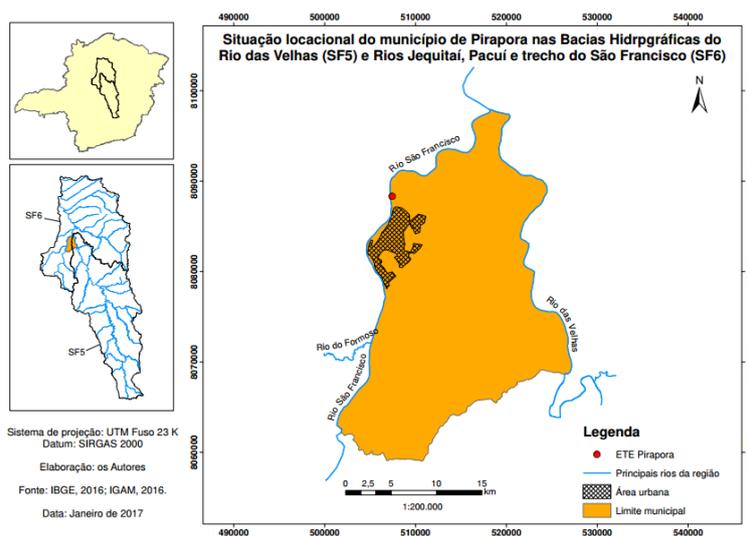


Figura 1: Mapa da área de estudo.

O sistema de tratamento de esgoto na ETE do município, localizada nas coordenadas 17°17'23"S e 44°55'50"O, é constituído por gradeamento manual, caixa de areia, quatro reatores anaeróbios tipo UASB, lagoa facultativa e quatro leitos de secagem do lodo. Embora a ETE tenha uma capacidade de tratamento instalada de 56,98 L/s, a vazão tratada no ano de 2016 foi em torno de 35 L/s, o que se deve ao fato de que apenas 30% da população urbana do município possui ligação predial de esgoto na rede coletora. A operação da ETE de Pirapora é de responsabilidade do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Pirapora – SAAE Pirapora (PMSB, 2014).

## Produção de lodo

Considerando que o estudo visa à avaliação do potencial do uso do lodo na agricultura, neste primeiro momento determinou-se parâmetros principais do lodo. Assim, a produção de lodo foi avaliada com base na caracterização físico-química e microbiológica do lodo gerado no reator UASB e os registros operacionais coletados em 2016, em relação às quantidades de lodo descartadas do reator, assim como a produção de sólidos após o processo de secagem. Os parâmetros avaliados foram teor de água, pH, sólidos voláteis (SV) e fixos (SF), Carbono orgânico total, nitrogênio total *Kjeldahl* (NTK), Fósforo total ( $P_{total}$ ), Coliformes totais e *E. coli*. Na Tabela 1 estão apresentados os métodos laboratoriais utilizados para determinação dos parâmetros citados.

**Tabela 1: Métodos de análises físico-químicas e microbiológicas do lodo.**

PARÂMETRO	MÉTODO	REFERÊNCIA
Umidade	Gravimétrico	BRASIL, 2007 apud MATOS, 2015
pH <sup>1</sup>	Eletroquímico (potenciometria)	BRASIL, 2007 apud MATOS, 2015
Sólidos voláteis (SV) e fixos (SF)	Gravimétrico	BRASIL, 2007 apud MATOS, 2015
Carbono orgânico total (COT)	Instrumental (oxidação térmica)	DESA UFMG, 2015
Nitrogênio total <i>Kjeldahl</i> (NTK) <sup>2</sup>	Titulométrico	BREMNER, 1996
Fósforo total <sup>2</sup>	Colorimétrico	APHA, 2013
Coliformes totais e <i>E. coli</i>	Técnica Colilert®	Kramer e Liu, 2002; IDEXX, 2013

1. 1 pH em solução 0,01 mol/L de CaCl<sub>2</sub>; proporção de lodo por solução igual a 1:5.
2. 2 Amostras previamente submetidas à digestão ácida à quente.

Realizou-se, igualmente, uma avaliação do potencial de produção de lodo em uma condição de final de plano da ETE de Pirapora, através de balanços de massa teóricos baseados na população a ser atendida, neste caso 61.500 habitantes. Os balanços de massa foram realizados conforme metodologia proposta por Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2014), de acordo com as equações 1 e 2 e empregando valores *per capita* de produção de lodo calculados para ETE Pirapora:

**Produção mássica de Lodo (gSS/d) = População x gSS/hab.d** Equação (1)

**Produção volumétrica de Lodo (L/d) = População x L/ hab.d** Equação (2)

Assim, a partir do cálculo da quantidade de lodo produzido pela ETE de Pirapora e determinadas as concentrações dos nutrientes nitrogênio e fósforo neste lodo, estimou-se a possível oferta de nitrogênio e fósforo a partir deste subproduto.

## Demanda de nutrientes

A avaliação da demanda de nutrientes no município procedeu-se a partir dos dados de culturas agrícolas temporárias e permanentes, pecuária e silvicultura, disponibilizados no Portal IBGE Cidades (IBGE, 2015). Foram selecionadas as culturas agrícolas cuja parte comestível não entre em contato com o solo, conforme estabelecido pela Resolução CONAMA 375 de 2006 (BRASIL, 2006). Considerando-se as espécies cultivadas, foi obtida a demanda nutricional (nitrogênio e fósforo) de cada espécie, por meio da recomendação oficial para uso de fertilizantes em Minas Gerais (CFSEMG, 1999). Na ausência de dados obtidos em campo, consideraram-se os valores médios de classe de fertilidade do solo e produtividade das culturas agrícolas.

Posteriormente, estimou-se a demanda média unitária por tipo de atividade, a saber, agricultura, pecuária e silvicultura. A demanda unitária agrícola foi obtida através do somatório da demanda dos cultivos permanentes e temporários, dividido pela área total ocupada pelas lavouras. Já para a pecuária e silvicultura (considerado cultivo de eucalipto), obteve-se a demanda nutricional baseado na recomendação oficial, conforme mencionado anteriormente.

## Análise espacial

Adicionalmente à demanda e oferta de nutrientes, analisou-se a distribuição espacial das atividades agrossilvipastoris no município, por meio dos dados de uso e ocupação do solo, com escala de 1:1.000.000, referente ao ano de 2014 (IBGE, 2016). Para isso contabilizou-se o total de área agrossilvipastoril em três cenários: i) área delimitada por um raio de 5 km a partir da ETE; ii) área delimitada por um raio de 10 km e, iii) área delimitada por um raio de 20 km – equivalente a, aproximadamente, 70% da área total do município. Para os três cenários empregou-se os valores de demanda unitária, a fim de se determinar a demanda total por nitrogênio e fósforo por atividade agrossilvipastoril. Esta etapa do trabalho foi realizada no ambiente de Sistema de Informações Geográficas *ArcGIS*. Finalmente, relacionando a demanda e oferta de nutrientes presentes no lodo, verificou-se o quantitativo de lodo necessário para suprir a demanda nutricional das culturas inseridas em cada circunscrição

## RESULTADOS

### Produção de lodo

A Tabela 1 apresenta os resultados de caracterização físico-química e microbiológica do lodo gerado no reator UASB da ETE Pirapora. A partir destes resultados e os balanços de massa baseados nos registros operacionais foi estimada a oferta de nutrientes, apresentada na Tabela 2.

**Tabela 2: Caracterização físico-química e microbiológica do lodo seco gerado no reator UASB da ETE Pirapora.**

PARÂMETRO	pH	TEOR DE ÁGUA	SV	SF	COT	NTK	P <sub>TOTAL</sub>	COLIFORMES TOTAIS	E. COLI
		%	dag/kg				NMP/g		
Valor	4,65	29,3	51,1	48,9	27,6	2,9	0,58	8,8x10 <sup>4</sup>	5,7x10 <sup>3</sup>

Segundo os registros operacionais de descarte de lodo da ETE Pirapora, são descartados aproximadamente 18 m<sup>3</sup> de lodo a cada 2 meses, o equivalente a 108 m<sup>3</sup> por ano. Assumindo-se uma densidade de 1050 kg/m<sup>3</sup>, a quantidade em massa de lodo produzida anualmente é igual a 113,4 toneladas. Tendo em vista que o lodo coletado para análise se tratava do lodo pronto para remoção do leito de secagem, sabe-se que a umidade do lodo removido dos leitos equivale a 29,3% e, portanto, a quantidade de lodo seco produzida anualmente é igual a 80,2 toneladas. A partir deste valor calculado e conhecendo-se a concentração de nitrogênio e fósforo no lodo, tem-se os valores de oferta anual de nutrientes apresentados na Tabela 3.

Dada a população atendida no presente momento e a produção de lodo pela estação, pode-se inferir que a contribuição per capita de sólidos secos por dia é aproximadamente 13 gSS/hab.d. Extrapolando este valor para a condição de final de plano, isto é, em que toda população urbana é atendida, a produção de lodo será de 378 m<sup>3</sup>.

**Tabela 3: Oferta anual de nutrientes no lodo da ETE Pirapora nas condições de operação atual e operação final de plano.**

NUTRIENTE	CONDIÇÃO ATUAL		OPERAÇÃO FINAL DE PLANO	
	N	P	N	P
Valor (ton/ano)	2,3	0,5	8,66	1,73

### Demanda de nutrientes e avaliação de cenários de aproveitamento

A demanda teórica de nutrientes (N e P) para as atividades agrossilvipastoris do município de Pirapora segue apresentada na Tabela 3. Observa-se que os cultivos com maiores demandas nutricionais foram cafeeiro, bananeira, silvicultura e pastagens.

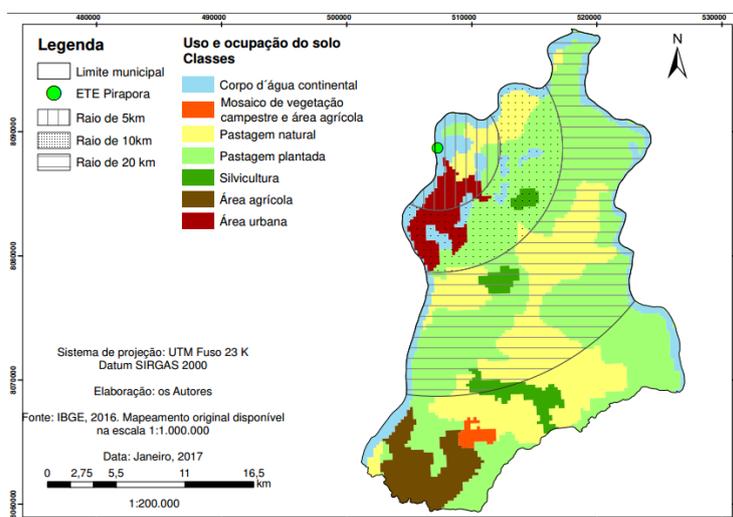
**Tabela 4: Requerimento de nutrientes e doses de aplicação do lodo de reator UASB para as atividades produtivas de Pirapora.**

CULTIVO	ÁREA (ha)	RECOMENDAÇÃO ADUBAÇÃO (kg/(ha.ano))		DEMANDA NUTRICIONAL (t/ano)	
		N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	N	P
Feijoeiro <sup>1</sup> (grãos)	165	50	60	8,3	4,3
Milho <sup>1</sup> (grãos)	300	115	80	34,5	10,5
Cana-de-açúcar <sup>1</sup>	160	80	0	12,8	0
Cafeeiro Arábica <sup>2</sup> (grãos)	600	300	25	180,0	6,5
Abacateiro <sup>2</sup>	4	24	10	0,1	1,7x10 <sup>-2</sup>
Bananeira <sup>2</sup>	600	340	40	204,0	10,5
Citrus <sup>2</sup>	400	95	25	38,0	4,4
Mamoeiro <sup>2</sup>	40	130	35	5,2	0,6
Mangueira <sup>2</sup>	10	44	13	0,4	0,1
Maracujazeiro <sup>2</sup>	20	90	40	1,8	0,3
Videira <sup>2</sup>	90	130	50	11,7	2,0
Pastagens <sup>3</sup> (pecuária)	14670	50	50	733,5	320,2
Eucalipto	2950	40	60	118,0	77,3
			Total	1348,3	436,7

1. Lavoura Temporária. Adotado um ciclo produtivo por ano.
2. Lavoura Permanente.
3. Área obtida a partir da contagem de bovinos (IBGE, 2015) e densidade bovina nas pastagens (INCT Pecuária apud INAES, 2015).

### Análise espacial

Na Figura 2 apresenta-se o mapa de uso e ocupação do solo de Pirapora com destaque para os raios de 5, 10 e 20 km gerados a partir da ETE. Tomando-se as áreas circunscritas por cada raio, determinou-se o quantitativo de área de cada classe de uso do solo. A partir da demanda unitária e do quantitativo de área ocupada com agricultura, pecuária e silvicultura, definiu-se a demanda total por nutrientes para os três raios analisados – 5, 10 e 20 km, conforme apresentado na Tabela 5.



**Figura 2. Distribuição do uso e cobertura do solo para área de estudo.**

Fonte: Adaptado de IBGE, 2016.

**Tabela 5: Avaliação da demanda por nutrientes em cada atividade agrossilvipastoril nas áreas circunscritas nos raios de 5, 10 e 20 km, a partir da ETE de Pirapora.**

ATIVIDADE	DEMANDA UNITÁRIA POR NUTRIENTES (kg/(ha .ano))		DEMANDA TOTAL POR NUTRIENTES (t/ano)					
			5 km		10 km		20 km	
	N	P	N	P	N	P	N	P
Agricultura <sup>1</sup>	127	34	-	-	-	-	-	-
Pecuária <sup>2</sup>	50	50	65	65	387	387	1492	1492
Silvicultura <sup>3</sup>	40	60	-	-	12	18	45	68
		Total	65	65	398	404	1538	1560

## DISCUSSÃO

A produção *per capita* de sólidos secos (13 gSS/hab.d) esteve dentro da faixa reportada por Andreoli, von Sperling e Fernandes (2014), entre 12 a 18 gSS/hab.d para reatores UASB. O valor obtido para o pH encontra-se ligeiramente abaixo do valor médio indicado por Nascimento (2016) e Lara *et al.* (1999), de 7,8 e 7,0, respectivamente.

O valor do teor de água, 29,3%, esteve abaixo da faixa indicada por Andreoli, von Sperling e Fernandes (2014), de 55 a 70%. Acredita-se que esta diferença possa ser atribuída ao elevado tempo de residência do lodo no leito de secagem, em torno de 45 dias, enquanto o tempo geralmente praticado é de 25 dias. Há, também, que se considerar as condições climáticas do município, que podem contribuir para redução do teor de água no lodo (LARA *et al.*, 1999).

Já os valores de sólidos fixos e voláteis estão dentro das faixas reportadas por Andreoli *et al.* (1999). Em relação aos parâmetros carbono orgânico total e NTK, os valores obtidos (27,6 e 2,9 dag.kg<sup>-1</sup>, respectivamente) foram condizentes com aqueles consultados na literatura (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; CARVALHO *et al.*, 2015; NASCIMENTO, 2016; ROSA; CHERNICHARO; MELO, 2015). Se por um lado, o parâmetro P<sub>total</sub> mensurado no presente estudo, 0,58 dag.kg<sup>-1</sup>, foi próximo do indicado por Andreoli, von Sperling e Fernandes (2014), 0,67 dag.kg<sup>-1</sup>, por outro, esteve abaixo dos valores mínimos relatados por Nascimento (2016) e Carvalho *et al.* (2015), equivalente a 7,6 e 7,1 dag.kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

No que se refere aos parâmetros microbiológicos, obteve-se 8,8x10<sup>4</sup> NMP/g ST para coliformes totais e 5,7x10<sup>3</sup> NMP/g ST para E.coli. Comparando-se o valor de coliformes com os limites estabelecidos na CONAMA 375 de 2006, verifica-se que este ultrapassou o máximo permitido (<10<sup>3</sup> NMP/g ST) (BRASIL, 2006). A legislação brasileira não faz referência ao parâmetro E. coli. Vale ressaltar que a análise microbiológica foi realizada 4 dias após a coleta, período acima do preconizado na metodologia (24 h), não sendo possível afirmar quão relevante é este intervalo na determinação do parâmetro. Ademais, o lodo analisado não foi submetido ao processo de higienização, ou seja, é esperado que após esta fase os valores estejam dentro dos limites estabelecidos.

Baseado na análise de nutrientes (nitrogênio e fósforo) presentes no lodo e no quantitativo gerado no ano de 2016, verificou-se a possibilidade de aproveitamento de 2,3 e 0,5 toneladas por ano de nitrogênio e fósforo, respectivamente. Caso se considere o cenário de fim de plano, tais valores são acrescidos em 278% (nitrogênio) e 240% (fósforo), equivalente a 8,7 e 1,7 toneladas por ano.

Comparando-se a oferta com a demanda de nutrientes, observa-se que a demanda total de nitrogênio e fósforo (1348 e 437 t/ano, respectivamente) em todo o município é muito superior à oferta gerada a partir do lodo. Avaliando-se as áreas circunscritas no raio de 5 km a partir da ETE, verifica-se que apenas as pastagens (755 ha) já possuem uma demanda por nutrientes superior à oferta proporcionada pelo lodo gerado no município. Nos raios de 10 e 20 km a partir da ETE observou-se um incremento da demanda associada à pecuária – fato relacionado à predominância de pastagens, natural e plantada, na cobertura do solo. Ademais, pode-se notar a demanda relacionada à silvicultura. Em nenhum dos três raios avaliados foram englobadas áreas agrícolas, as quais estão concentradas na região sul do município, como pode-se observar na Figura 2.

Embora tenha sido verificada elevada demanda nutricional das pastagens, fortemente impulsionada pela grande área explorada, deve-se ressaltar as restrições estabelecidas na CONAMA 375 de 2006, a qual define que as pastagens ora enriquecidas com lodo de esgoto não poderão ser utilizadas para pastejo durante um período mínimo de 2 anos (BRASIL, 2006). Entretanto, esses períodos de não uso da área estão sendo revistos no próprio âmbito da resolução, tendo em vista que não encontram respaldo científico.

Os indícios de baixo nível tecnológico empregado nas pastagens, inferência baseada nas baixas taxas de ocupação das pastagens por bovinos, poderá ser revertido considerando-se que o lodo proporcionará melhoria na qualidade da pastagem e, com isso aumento na sua ocupação.

Embora exista uma tendência de se diminuir as restrições para uso de lodo em áreas de pastagens, a fim de se minimizarem possíveis problemas dessa forma de uso, sugere-se, ao menos por enquanto, priorizar a aplicação do lodo em florestas plantadas, em função do longo tempo que estas devem permanecer isoladas e baixa exposição do material ao ser humano e animais. Tal proposição é factível nos raios de 10 e 20 km, nos quais pode-se observar demanda da silvicultura superior à oferta.

Vale destacar que, embora as análises tenham sido realizadas em triplicata, representam as características do lodo quando da coleta do material para análise. Porém, sabe-se que os parâmetros avaliados não são estáticos e diversos fatores, como época do ano e forma de amostragem, podem afetar os resultados (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014).

Finalmente, a análise espacial foi desenvolvida com base no levantamento de uso e ocupação do solo realizado em nível nacional, único disponibilizado gratuitamente para o município. Desta forma, a escala em que o levantamento foi realizado, 1:1.000.000, pode não ser a mais adequada para planejamento em nível municipal. Entretanto, mesmo com o baixo detalhamento do uso e ocupação do solo, no presente estudo pôde-se corroborar o potencial de utilização de geotecnologias como instrumento complementar no gerenciamento do lodo (SOUZA *et al.*, 2008; URBAN; ISAAC, 2016). Vislumbrado o aproveitamento agrícola como forma de destinação final do lodo, sugere-se a elaboração de um levantamento do uso e ocupação do solo mais detalhado para indicar áreas com maior potencial para tal uso.

## CONCLUSÕES

As análises preliminares da qualidade do lodo de Pirapora indicaram boas perspectivas para o uso deste subproduto nas atividades agrossilvipastoris. Todavia, para que esta proposta seja exequível a qualidade do lodo deve ser compatível com aquela definida pela resolução CONAMA 375 de 2006, sendo necessárias análises complementares.

O uso e ocupação do solo permitiram inferir que a uma distância de 5 km no entorno da ETE de Pirapora há uma demanda por nutrientes associada às pastagens superior à oferta gerada a partir do lodo. Nas distâncias de 10 e 20 km, além das pastagens, observou-se demanda por nutrientes na silvicultura.

A utilização de geotecnologias permitiu integrar espacialmente informações de dois setores distintos, agricultura e saneamento, demonstrando o potencial destas ferramentas no gerenciamento do lodo e no planejamento e tomada de decisão dos gestores do saneamento. Por fim, destaca-se que quanto mais detalhada a base de dados espaciais melhores e mais precisas serão as análises realizadas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais), ao Programa de Pós-Graduação em Saneamento Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SMARH-UFGM) pelo apoio no desenvolvimento deste estudo, e ao Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Pirapora pelas informações fornecidas que possibilitaram a execução do presente trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 2013.
2. ANDREOLI, C. V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. **Lodo de Esgotos: tratamento e disposição final**, 2º ed., Vol. 6. Belo Horizonte: UFMG 2014.
3. LARA, A.I. et al. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. PROSAB, 1999. 98 p.
4. BASTOS, R. K. X (Coord.). **Utilização de Esgotos Tratados em Fertirrigação, Hidroponia e Piscicultura**. 1ª Edição. ed. Rio de Janeiro: RIMA, 2003.
5. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências, Brasília, DF. 2006.
6. BRASIL – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos**. Brasília: MAPA, 2007. 141 p apud MATOS, A. T. DE. **Manual de Análise de Resíduos Sólidos e Águas Residuárias**. 1a ed. Viçosa: Editora UFV, 2015.
7. BREMNER, J. M. Nitrogen total. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMMER, M. E. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 3. Madison: America Society of Agronomy, 1996. P 1085-1121 (SSSA Book Series, 5)
8. CARVALHO, C.S. et al. Composição química da matéria orgânica de lodos de esgoto. **Agrária – Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, PE, v.10, n.3, p. 413-419, 2015.
9. CHEN, H. et al. Utilization of urban sewage sludge: Chinese perspectives. **Environ Sci Pollut Res.**, v.19, p.1454-1463, 2012.
10. COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS - CFSEMG. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5º Aproximação**. Viçosa, MG. 1999.
11. DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – DESA UFMG. Procedimento operacional padrão: analisador carbono orgânico total SHIMADZU – SSM 5000A. Belo Horizonte:UFMG, 2015.
12. FYTILI, D., ZABANIOTOU, A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.12, p.116-140, 2008.
13. IDEXX. Quanti-Tray/2000. **Insert and Most Probable Number (MPN) Table**. 2013
14. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Mapa de cobertura e uso da terra do Brasil 2014**. Rio de Janeiro, 2016. 1 arquivo vetorial. Escala 1:1.000.000.
15. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Cidades, 2015. Disponibiliza dados sobre atividades agrossilvipastoris. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=315120&search=||info%EFicos:-informa%E7%F5es-completas>>. Acesso em: 5 jan. 2017.
16. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Cidades, 2016. Disponibiliza dados sobre população do município. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=315120&search=||info%EFicos:-informa%E7%F5es-completas>>. Acesso em: 5 jan. 2017.
17. INCT PECUÁRIA apud INSTITUTO ANTONIO ERNESTO DE SALVO – INAES. **Estado da arte das pastagens em Minas Gerais**. Belo Horizonte, MG, 2015.
18. KRAMER, T. A.; LIU, J. Enumeration of Coliform Bacteria in Wastewater Solids Using Defined Substrate Technology. **Water Environmental Research**, Volume 74, Number 6. Novembro/Dezembro 2002, pages 526-530.
19. MATOS, A. T. **Tratamento e Aproveitamento Agrícola de Resíduos Sólidos**. 1ª Edição. ed. Viçosa: Editora UFV, 2014.
20. MATOS, A.T.; MATOS, M.P. Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos. Editora UFV, Viçosa. 2016. 371p.
21. NASCIMENTO, A.L. **Caracterização microbiológica, química e presença de poluentes orgânicos em amostras de lodo de esgoto de São Paulo**. 2016. 88 p. Tese (doutorado em Ciências), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.
22. NORTH EAST BIOSOLIDS AND RESIDUALS ASSOCIATION – NEBRA. **A national biosolids regulation, quality, end use & disposal survey**. 2007. 34 p.
23. PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO BÁSICO – PMSB. **Relatório final do Plano Municipal de Saneamento Básico**. Pirapora, MG, 2014.

24. ROSA, A.P.; CHERNICHARO, C.A.L.; MELO, G.C.B. Contribuição para o aproveitamento energético do lodo de ETEs em processos térmicos. **Revista DAE**, jan.-abr. de 2015. 8 p.
25. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS. Diagnóstico dos serviços de Água e Esgoto, 2015. Disponível em:< <http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos>>. Acesso em: 6 jan. 2017.
26. SOUZA, M. L.P. et al. Aptidão das terras do estado do Paraná para disposição final de lodo de esgoto. **Revista DAE**, p. 20-29, mai. de 2008
27. SPINOSA, L. et al. Sustainable and innovative solutions for sewage sludge management. **Water**, v.3, p. 702-717, 2011.
28. URBAN, R.C.; ISAAC, R.L. Mapa de aptidão do solo para a aplicação de lodo de esgoto: Bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v.11, n.1, 2016.
29. USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method 1680: Fecal Coliforms in Sewage Sludge (Biosolids) by Multiple-Tube Fermentation using Lauryl Tryptose Broth (LTB) and EC Medium**. Washington, April 2010.