



II-468 - METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE LODO PROVENIENTE DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO ESTADO DA BAHIA

Flávia Melo Menezes ⁽¹⁾

Mestre em Engenharia Industrial da Escola Politécnica da UFBA (PEI/UFBA). Pesquisador da Rede de Tecnologias Limpas (TECLIM/UFBA).

Alisson Meireles Brandão ⁽²⁾

Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Univ. Estadual de Feira de Santana/BA. Pesquisador da Rede de Tecnologias Limpas (Teclim). Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Univ. Federal da Bahia. Funcionário da Empresa Baiana de Águas e Saneamento - EMBASA. Experiência em Desenvolvimento de Projetos, principalmente nos seguintes temas: gestão de ativos no saneamento, tecnologias limpas, meio ambiente, reuso de água, qualidade da água e saneamento ecológico.

Quize Maia da Costa ⁽³⁾

Engenheira sanitaria e ambiental (UFBA); Mestranda em Meio Ambiente, Águas e Saneamento (UFBA).

Francisco Ramon Alves do Nascimento ⁽⁴⁾

Doutor Engenharia Industrial da Escola Politécnica da UFBA (PEI/UFBA). Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA. Pesquisador e líder da Rede de Tecnologias Limpas (TECLIM-UFBA).

Eduardo Henrique Borges Cohim Silva ⁽⁵⁾

Doutor em Energia e Meio Ambiente. Professor Titular da Universidade Estadual de Feira de Santana. Pesquisador da Rede de Tecnologias Limpas (TECLIM/UFBA)

Endereço ⁽¹⁾: 4th Avenida, 420 - Centro Administrativo da Bahia, Salvador - BA, 41745-002 - Brasil - Tel: +55 (71) 3372 – 4656 e-mail: alisson.brandao@embasa.ba.gov.br / alissonmeireles@gmail.com; @alisson.eng.saneamento

RESUMO

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, o lodo de esgoto deve ser reciclado e tratado para usos benéficos, ao invés de ser descartado em aterros sanitários. Embora os usos benéficos do lodo representem um desafio a nível nacional, é possível identificar experiências bem-sucedidas em alguns estados brasileiros. No Estado da Bahia, existe um vasto campo para expansão dos usos benéficos do lodo das Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs), gerando um cenário oportuno para reunir as informações necessárias ao estudo de sua viabilidade. Diante deste contexto, uma metodologia para determinar o potencial de utilização do lodo para usos benéficos foi desenvolvida na Bahia. Esta metodologia reuniu critérios relacionados tanto com a oferta de lodo pelas ETEs, quanto com a demanda de lodo para usos benéficos em: agricultura, recuperação de áreas degradadas, indústrias de cimento e cerâmica e uso de energia. Definidos os critérios de oferta e demanda, foram utilizados fatores de influência para cada ETE, de forma a definir o potencial de oferta e o potencial de demanda através das respectivas ponderações. Por fim, o potencial de aproveitamento benéfico do lodo de esgoto é determinado a partir do menor valor entre oferta e demanda ponderadas. Trata-se de uma metodologia robusta, uma vez que os critérios adotados para a caracterização da oferta de lodo pelas ETEs e demanda por usos benéficos foram baseados na literatura científica. Contudo, devido às considerações feitas ao longo do desenvolvimento desta metodologia, o objetivo deste estudo não visa esgotar o tema, mas sim apresentar uma ferramenta de tomada de decisão a nível empresarial para a realização de estudos mais aprofundados visando o aproveitamento do lodo gerado nas ETEs para usos benéficos na Bahia.

PALAVRAS-CHAVE: Saneamento, Lodo de Esgoto, Embasa, Uso benéfico, Biossólidos.

**INTRODUÇÃO**

A Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece que a disposição final de rejeitos em aterros sanitários é a última opção na ordem de prioridades para fins de gestão de resíduos sólidos. No caso do lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto (ETEs), deve-se primeiro buscar a sua reciclagem e tratamento para fins de aproveitamento em usos benéficos. Além disso, a disposição em aterros não é uma prática sustentável, uma vez que apresenta custos elevados em função de maiores distâncias, além do atendimento às crescentes restrições ambientais.

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, cerca de 63% dos resíduos sólidos de ETEs são destinados para aterro sanitário, 21% são lançados em terreno baldio, lixão ou aterro controlado, e menos de 2% são reciclados no Brasil. Apesar do aproveitamento do lodo em usos benéficos se apresentar como um desafio a nível nacional, é possível identificar experiências bem-sucedidas em alguns Estados. São Paulo e Paraná apresentam experiências de aplicação do lodo na agricultura, em culturas de café e milho. Em Brasília, o lodo é aplicado em jardins e parques da cidade. Por fim, Minas Gerais apresenta a utilização deste resíduo no condicionamento de solos e aproveitamento energético.

Na Bahia, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 37% dos municípios atendidos pela Embasa apresentam serviço de esgotamento sanitário, e destes, 94% possuem tratamento de esgoto. Diante do Novo Marco Legal do Saneamento no Brasil que definiu a meta de cobertura do atendimento de esgotamento sanitário para 90% até 2033, espera-se um aumento do volume de lodo gerado nas ETEs. Portanto, apresenta-se um vasto campo de ampliação dos usos benéficos dos lodos das ETEs baianas, gerando um cenário oportuno para se levantar as informações necessárias afim de estudar a viabilidade do aproveitamento do lodo nesses usos.

Diante deste contexto, uma metodologia foi desenvolvida para determinar as potencialidades de aproveitamento de lodo para usos benéficos na Bahia. Essa metodologia reuniu critérios relacionados tanto para oferta de lodo pelas ETEs, quanto para a demanda por lodo para usos benéficos em: agricultura, recuperação de áreas degradadas, indústria cimenteira e ceramista, e aproveitamento energético. Além disso, fatores de ponderação foram utilizados para relativizar os critérios de oferta e demanda, a fim de definir o potencial de aproveitamento de lodo de ETE para usos benéficos nos municípios baianos.

A fim de que o aproveitamento de lodo de ETE em usos benéficos ganhasse escala no Estado da Bahia, focou-se em ações que pudessem promover a criação de mais exemplos bem-sucedidos. Dessa forma, vislumbrou-se a criação de uma ferramenta de suporte à decisão para o manejo eficiente de lodo provenientes de Estações de Tratamento de Esgoto operados pela Embasa.

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia capaz de diagnosticar, mapear e avaliar as alternativas potenciais de aproveitamento de lodo para usos benéficos em solos baianos. Dessa forma, buscou-se realizar uma revisão da literatura bibliográfica, inicialmente, a fim de levantar as informações necessárias para o estabelecimento de critérios para a caracterização, tanto da oferta do lodo pelas ETEs, quanto para a demanda por lodo para usos benéficos. Em seguida, ponderações para estes critérios foram estabelecidos a fim de avaliar os potenciais de oferta e demanda, e finalmente, o potencial de aproveitamento do lodo para usos benéficos na área de abrangência da Embasa.

Tais práticas fornecem subsídios para diversas frentes de planejamento a fim de valorizar os resíduos, assim como responder à necessidade de uma gestão efetiva dos resíduos sólidos e manejo ambientalmente adequado de ETE e seus biossólidos.

MATERIAIS E MÉTODOS

A proposta de elaboração de uma metodologia para determinação do potencial de aproveitamento de lodo em usos benéficos objetivou realizar essa avaliação especificamente na área de abrangência da Embasa. Por sua vez, esta é composta por 367 municípios baianos que apresentam pelo menos sistemas de abastecimento de água. Destes, 114 municípios são contemplados por sistema de esgotamento sanitário, foco do presente estudo.





As estações de tratamento de esgotos desses municípios foram estudadas a fim de identificar e sistematizar as experiências realizadas pela Embasa referente ao manejo do lodo. As informações levantadas incluíram dados sobre a produção, gestão e tratamento do lodo, assim como dados sobre a sua qualidade e quantidade. Essas informações foram importantes para a definição dos critérios necessários para a caracterização da oferta de lodo pelas ETEs na área de abrangência para fins de aproveitamento do lodo em usos benéficos.

Dados primários e secundários foram analisados à luz da legislação vigente no país e no estado, assim como recomendações na literatura científica a fim de sistematizar os principais usos benéficos para lodos de ETEs na área de abrangência. Dentre os possíveis usos benéficos levantados foi a sua aplicação no solo como biofóssido, seja para o uso agrícola ou recuperação de áreas degradadas, e na indústria como combustível ou matéria prima. A partir do levantamento dessas informações, critérios técnicos para o aproveitamento de lodo nos diversos usos, assim como riscos à saúde pública e ao meio ambiente foram definidos. Além disso, informações relevantes ao entendimento das potencialidades de aproveitamento de lodo de ETE no Estado da Bahia foram produzidas no âmbito das prefeituras, dos órgãos federais e estaduais, a fim de que a metodologia proposta fosse adequada e focada nos usos benéficos potenciais na região do estudo. Dessa forma, pode-se caracterizar a demanda por lodo de ETE para usos benéficos no Estado da Bahia.

RESULTADOS

A fim de definir o potencial de aproveitamento do lodo em usos benéficos, deve-se levar em consideração tanto a caracterização da oferta de lodo pelas ETEs, como a caracterização da demanda por lodo em usos benéficos potencial na área de abrangência em estudo. Uma vez essas etapas realizadas, fatores de influência podem ser definidos, assim como ponderações a fim de relativizar a realidade da oferta e da demanda em cada município estudado. Por fim, o potencial de aproveitamento de lodo para usos benéficos pode ser estabelecido a partir de uma relação entre a oferta potencial de lodo e a demanda potencial por lodo para usos benéficos na região em estudo. A fim de organizar e padronizar os dados disponíveis ou preencher eventuais lacunas de informação, algumas premissas foram adotadas.

CARACTERIZAÇÃO DA OFERTA DO LODO

No âmbito da oferta do lodo pelas ETEs, premissas foram estabelecidas relativas aos critérios: porte e faixa de vazão, níveis de tratamento da fase líquida, tipo de lodo produzido, quantidade de lodo produzido, e nível de tratamento do lodo.

- **PORTE E A FAIXA DE VAZÃO**

Faixas de vazão foram estabelecidas para organizar as ETEs segundo seu porte, de forma a facilitar a sua avaliação. Elas foram determinadas segundo “Estudo de Avaliação das Potencialidades de Reúso de Efluente Sanitário Tratado no Estado da Bahia”, apresentados no Subproduto 2.2 – Soluções e Adequações. O padrão adotado para a classificação das ETEs por faixas de vazão é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação do porte das ETEs.

PORTE	VAZÃO (l/s)
Pequeno	$Q < 100$
Médio	$100 < Q < 500$
Grande	$Q > 500$

- **NÍVEL DE TRATAMENTO DA FASE LÍQUIDA**

Outro critério adotado para avaliação das ETEs foi seu nível de tratamento, que foi definido segundo (...) VER “Estudo de Avaliação das Potencialidades de Reúso de Efluente Sanitário Tratado no Estado da Bahia”,



Subproduto 2.1.3 – Caracterização da Demanda. A Tabela 2 apresenta o padrão adotado para classificação das ETEs segundo seu nível de tratamento.

Tabela 2: Padrão adotado para os níveis de tratamento das ETEs.

NÍVEL DE TRATAMENTO	DESCRIÇÃO	EXEMPLOS DE PROCESSOS
Primário	Remoção parcial dos sólidos suspensos e matéria orgânica.	Tanques de sedimentação; Tanque Imhoff; Fossas sépticas e Reatores anaeróbios
Secundário	Remoção de matéria orgânica biodegradável (em solução ou suspensão) e sólidos suspensos, sem nitrificação. Desinfecção pode ou não estar incluída.	Lagoas de estabilização aeróbias; Reator UASB combinado com tratamento aeróbio; Filtros biológicos e Lodo ativado (convencional)
Secundário avançado	Remoção de matéria orgânica biodegradável, sólidos suspensos, e nutrientes (nitrogênio, fósforo ou ambos); nitrificação e desnitrificação. Desinfecção pode ou não estar incluída.	Lodo ativado (para nitrificação e remoção de nutrientes) e MBR ⁽¹⁾
Terciário	Remoção de sólidos suspensos residuais (após tratamento secundário ou secundário avançado). Remoção de nutrientes está em geral incluída. Desinfecção pode ou não estar incluída.	Lagoas de maturação ⁽²⁾ ; Filtração granular, por membranas ou por outros meios ⁽²⁾ e Wetlands ⁽²⁾
Avançado	Remoção de materiais suspensos ou dissolvidos que permanecem no efluente após tratamento biológico (Secundário avançado). Desinfecção necessária.	Filtração biológica com ozônio; Filtros de carvão ativado; Nanofiltração (NF)/ Osmose reversa (OR/RO) e UVAOP

- Os MBRs produzem uma qualidade de efluente de nível terciário, porém são consideradas como secundário avançado, pois fazem parte do tratamento secundário.
- Após tratamento secundário avançado, caso contrário terá pouca remoção, similar a tratamento secundário.

Fonte: adaptado de Embasa (2020).

• MANEJO DO LODO

Segundo a literatura científica, a depender da etapa do tratamento na qual o lodo é gerado, ele pode ser classificado como primário, biológico ou misto. A Tabela 3 apresenta os critérios utilizados para a classificação do lodo segundo a etapa de tratamento do efluente assim como frequência de remoção.

Tabela 3: Tipo do lodo e frequência de remoção segundo processo de tratamento de esgotos.

SISTEMA	FREQUÊNCIA DE REMOÇÃO DO LODO DO EFLUENTE	
	LODO PRIMÁRIO	LODO BIOLÓGICO
Tratamento Primário (Tanques Sépticos)	Meses	-
Tratamento primário convencional	Horas	-
Sistemas Alagados Construídos (Wetlands)	-	-
Lagoa Facultativa	-	Décadas
Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa +Lagoa de Maturação	-	Anos
Tanque Séptico + Filtro Anaeróbio	Meses	Meses

SISTEMA	FREQUÊNCIA DE REMOÇÃO DO LODO DO EFLUENTE	
	LODO PRIMÁRIO	LODO BIOLÓGICO
Reator UASB	-	Semanas
UASB + lodos ativados	-	Semanas
UASB + lagoas de polimento	-	Semanas
UASB + lagoa aerada facultativa	-	Semanas
Lodos ativados convencional	Horas	~Contínuo
Lodos ativados – aeração prolongada	-	~Contínuo
Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P	Horas	~Contínuo

Fonte: Adaptado de Embasa, 2020.

• QUANTIDADE DE LODO PRODUZIDO

Na ausência de dados disponíveis, a produção de lodo nas ETEs foi estimada por meio de expressões de cálculo consolidadas na literatura.

Conforme Lehmann (2015), a produção de lodo primário pode ser calculada a partir do rendimento de eliminação dos Sólidos Suspensos no decantador primário. O autor afirma que esse rendimento oscila entre 50% e 70%. Tomando como base o valor médio de 60%, e o valor de 90g/dia *per capita*, tem-se que:

$$\text{Lodo primário per capita (LP)} = 0,60 \times 0,090 \text{ kg/dia} = 0,054 \text{ kg/dia.}$$

Quanto ao lodo secundário ou biológico, Lehmann (2015) orienta que sua produção pode ser calculada a partir do rendimento da eliminação de DBO no reator biológico, aplicando a proporção entre a quantidade de DBO eliminada e a geração de lodo biológico de 0,9. Assim, considerando que: a geração *per capita* de DBO seja de 60g/dia, o afluente do reator apresente 65% de DBO da água bruta (efluente de decantador primário), e que o rendimento médio de um reator biológico seja de 91%, tem-se que:

$$\text{DBO eliminada do reator biológico} = 0,06 \text{ kg/dia} \times 0,65 \times 0,91 = 0,0355 \text{ kg/dia.}$$

$$\text{Lodo biológico per capita (LB)} = 0,9 \times 0,03549 \text{ kg/dia} = 0,032 \text{ kg/dia.}$$

Dessa forma, a produção diária de lodo pode ser estimada considerando a soma da geração dos dois tipos de lodo (0,086 kg/dia) multiplicado pelo número de habitantes atendidos pela ETE.

Por fim, o lodo biológico é composto por aproximadamente 70% de sólidos em suspensão (SS) fixos, e cerca de 30% de SS voláteis segundo Lehmann (2015). O autor ainda afirma que um processo de digestão (aeróbio ou anaeróbio) do lodo elimina cerca de 45% dos SS voláteis. Portanto, tem-se que:

$$\text{Lodo produzido tratado} = 0,086 \times (0,7 + 0,3 \times 0,55) = 0,074 \text{ kg/hab.dia.}$$

• TRATAMENTO DO LODO

Outro critério adotado para avaliação das ETEs é o nível de tratamento do lodo, entre: adensamento, estabilização, condicionamento, desaguamento, higienização, destinação ou disposição final. O padrão adotado para avaliação deste critério é apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4: Padrão adotado para os níveis de tratamento de lodo nas ETEs.**

NÍVEL DE TRATAMENTO	PROCESSO
Adensamento ou espessamento	Adensadores por gravidade; adensadores por flotação; centrífugas; filtro prensa de esteiras.
Estabilização	Digestão anaeróbia; digestão aeróbia; tratamento térmico; estabilização química.
Condicionamento	Condicionamento químico; Condicionamento térmico.
Desaguamento ou desidratação	Leitos de Secagem; Lagoas de lodo; Filtro prensa; Centrífuga; Filtro prensa de esteiras; Filtro a vácuo; Secagem Térmica.
Higienização	Adição de cal (caleação); Tratamento térmico; Compostagem; Oxidação úmida; outros (radiação gama, solarização etc.).
Destinação e Disposição Final	Reciclagem agrícola; Recuperação de áreas degradadas; Landfarming (disposição no solo); Incineração; Oxidação úmida; Aterro Sanitário.

A Embasa é composta por 19 Unidades Regionais (UR), das quais 13 unidades estão distribuídas no interior, e 6 URs na Região Metropolitana de Salvador. Um recorte amostral foi definido, composto por pelo menos uma ETE em cada UR, a fim de consolidar as informações referente à caracterização da oferta, por meio coleta de dados primários em campo.

CARACTERIZAÇÃO DA DEMANDA POR USOS BENÉFICOS

A fim de caracterizar a demanda por lodo para usos benéficos, deve-se definir um raio de influência das ETEs, a partir do qual os potenciais usuários do lodo possam ser identificados. Considerando que o lodo de ETE é um resíduo sólido, foi estabelecido o raio de influência de 30km segundo recomendação do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e Compromisso Empresarial para Reciclagem (IPT e CEMPRE, 2018). Dados georreferenciados devem ser utilizados a fim de melhor visualização dos resultados por meio de mapas referentes às premissas adotadas para cada uso benéfico na área de influência das ETEs. Os usos benéficos considerados neste estudo foram: uso agrícola e recuperação de áreas degradadas, uso na construção civil, e aproveitamento energético.

- **USO AGRÍCOLA E RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS:**

Algumas premissas foram adotadas para a caracterização da demanda por lodo para uso agrícola e recuperação de áreas degradadas na área de abrangência: critérios para a caracterização do lodo em biossólido, identificação de áreas com restrições legais, identificação das principais ocupações do solo, e identificação das características pedológicas.

Caracterização do lodo em biossólido

A Resolução Conama nº498/2020 define critérios para a caracterização do lodo em biossólido, cuja qualificação é fundamental para definir as possibilidades de uso em solo. Conforme a resolução, o biossólido pode ser classificado em classe A ou B, em função dos limites de *Escherichia coli* por grama de sólidos totais e do seu regime de tratamento. Para que o biossólido seja classificado como Classe A, ele deverá apresentar o máximo de 10^3 *Escherichia coli* por grama de sólidos totais, e Classe B, o limite é de 10^6 de *E.coli* /g SST. Além disso, eles são divididos em classes 1 e 2, de acordo com os valores máximos permitidos para substâncias químicas conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Valores máximos de substâncias químicas no biossólido.

SUBSTÂNCIA QUÍMICA	VALOR MÁXIMO (mg/kg base seca)	
	CLASSE 01	CLASSE 02
Arsênio	41	75
Bário	1300	1300
Cádmio	39	85
Chumbo	300	840
Cobre	1.500	4.300
Cromo	1.000	3.000
Mercúrio	17	57
Molibdênio	50	75
Níquel	420	420
Selênio	36	100
Zinco	2.800	7.500

O biossólido Classe A pode ser aplicado, sem restrição, em cultivo de produtos alimentícios sem contato com o solo, produtos que não são consumidos crus ou não alimentícios. Por sua vez, o biossólido classe B pode ser utilizado no cultivo de produtos alimentícios que não sejam consumidos crus e produtos não alimentícios, pastagens e forrageiras, e árvores frutíferas com algumas restrições. No entanto, apresenta proibição expressa para uso no cultivo e produtos alimentícios que possam ser consumidos crus.

Em ambos os casos, é permitido o uso em florestas plantadas, recuperação de solos, áreas degradadas e áreas protegidas. Em Unidades de Conservação de Proteção Integral, apenas poderá ser aplicado biossólido Classe A1. Por fim, é vedada a aplicação de qualquer tipo de biossólido em Áreas de Preservação Permanente – APP.

Aptidão de solo para o uso do biossólido

Andreoli, Pergorini e Fernandes (2014) afirmam que a aptidão do solo para o uso de biossólidos deve ser avaliada em função do comportamento do solo quanto à erodibilidade, drenagem interna, e impedimentos a motomecanização, que dificultam a aplicação e incorporação adequadas dos biossólidos. Souza et al. (1994) *apud* Andreoli, Pergorini e Fernandes (2014) estruturou um sistema de classificação da aptidão do solo para o uso de lodo de esgoto que relaciona o parâmetro do solo e o grau de risco associado. A Tabela 6 apresenta o sistema de classificação e aptidão do solo para aplicação de biossólidos, considerando o risco associado aos parâmetros edáficos: profundidade, textura superficial, drenagem, dentre outros.

Tabela 6: Classificação e aptidão do solo para aplicação de biossólidos.

FATOR	CRITÉRIO	GRAU	CLASSE
Profundidade	Latossolo, cambissolo ou podzólicos profundos	0 - nulo	I
	Cambissolos ou podzólicos com citação de pouca profundidade	2 - moderado	III
	Litólicos ou outras unidades com citação de solos rasos	3 - forte	V
Textura Superficial	Textura argilosa (35 a 65% de argila)	0 - nulo	I
	Textura muito argilosa (> de 60% argila) e média (15-35% argila)	1 - ligeiro	II
	Textura siltosa (< 35% de argila e < 15% de areia)	2 - moderado	III
	Textura arenosa (< 15% de argila)	3 - forte	IV



FATOR	CRITÉRIO	GRAU	CLASSE
Drenagem	Solos acentuadamente bem drenados	0 – nulo	I
	Solos fortemente drenados	1 - ligeiro	I
	Solos moderadamente drenados	2 - moderado	III
	Solos imperfeitamente ou excessivamente drenados	3 - forte	V
	Solos mal e muito mal drenados	4 – muito forte	V

Fonte: Adaptado de Souza et al. (1994) *apud* Andreoli, Pergorini e Fernandes (2014).

Assim, a aptidão do solo é definida como a classe mais restritiva obtida (Andreoli, Pergorini e Fernandes, 2014):

- **Solos Classe I** - apresentam potencial muito alto para o uso de biossólidos;
- **Solos Classe II** - apresentam potencial alto para o uso de biossólidos;
- **Solos Classe III** - apresentam potencial moderado para o uso de biossólidos, devendo ser recomendadas práticas rigorosas de conservação de solos;
- **Solos Classe IV** - poderão ser utilizados desde que critérios atenuantes, como alternativas de manejo e práticas culturais, sejam apresentados.
- **Solos Classe V** - em hipótese alguma podem receber aplicações de biossólidos. Nestes solos a utilização do resíduo representa graves riscos ao meio ambiente e a população.

Devido à disponibilidade dos dados, pode-se avaliar os tipos de solo na área de abrangência avaliando os parâmetros edáficos: profundidade, textura superficial e drenagem. Dessa forma, foi proposto um intervalo para correspondência de valores, variando de 5 para a classe menos restritiva (I) e 1 para a classe mais restritiva (V), e posteriormente aplicou-se pesos a cada parâmetro edáfico, conforme Tabela 7. Após a ponderação dos parâmetros edáficos, os valores resultantes foram ranqueados de 1 a 5, sendo categorizados em: alta aptidão – valores iguais a 5; média aptidão – valores entre 4 e 3; baixa aptidão – valores abaixo de 3.

Tabela 7: Ponderação dos parâmetros edáficos.

CRITÉRIO	PESO
Profundidade	0,3
Textura superficial	0,2
Drenagem	0,5

• ÁREAS DE MINERAÇÃO

Uma vez que as áreas destinadas à mineração sofrem alterações significativas quanto às suas características naturais, elas devem ser recuperadas por obrigação legal. Dessa forma, a fim de identificar as possíveis áreas que poderão demandar biossólidos para sua recuperação, foi utilizada a classificação “área não vegetada” do Mapbiomas, excluindo áreas de praia e dunas, infraestrutura urbana e outras áreas não vegetadas, utilizando a classe de Área de Mineração.

• RESTRIÇÃO LEGAL

Conforme a Resolução do Conama nº 498/2020, não é permitida a aplicação de biossólidos nas Áreas de Preservação Permanente (APP). Neste estudo, foram consideradas as APP, as áreas referentes às faixas marginais (50m) de cursos d’água natural perenes ou intermitentes, um raio de 50m entorno das áreas de nascentes e olhos d’água perenes. Também foram consideradas APP, os manguezais e os lagos e lagoas em toda sua extensão.

Dessa forma, o raio de influência de 30km no entorno das ETEs pode ser utilizado para identificar as áreas com restrições legais (UC e APP) para o uso do lodo como biossólido. Uma vez identificadas essas áreas, toda a extensão de área livre de restrições torna-se potencial para uso de lodo, a depender da atividade ali praticada, assim como da aptidão do solo para o uso do biossólido.

Em função da aptidão do solo, pode-se estimar a demanda por lodo para uso como biossólido na agricultura, assim como na recuperação de áreas degradadas. Para isso, pode-se utilizar uma taxa de aplicação do biossólido em função da necessidade de Nitrogênio e da quantidade de Nitrogênio no lodo para cada cultura identificada, assim como na recuperação de áreas degradadas identificadas na área do estudo.

• APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Outro critério de avaliação que pode ser utilizado é o potencial de aproveitamento energético das ETEs. Como se trata de um estudo cujo foco é o aproveitamento do lodo, foi considerado o potencial de aproveitamento energético em função do biogás gerado a partir da digestão biológica do lodo. Quando ocorre a estabilização biológica do lodo em condições anaeróbias, há liberação de biogás, composto por metano e dióxido de carbono. As ETEs do tipo lodo ativado convencional são aquelas que podem produzir o biogás a partir do lodo.

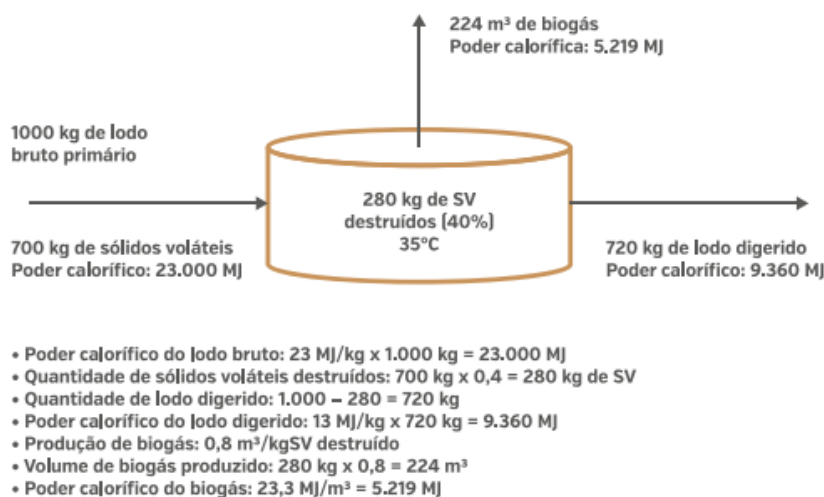


Figura 1: Balanço de massa e energia em digestor anaeróbio.

Fonte: Brasil (2015) apud Andreoli; Von Sperling e Fernandes (2010).

A Figura 1 apresenta um exemplo de balanço de massa e energia de um digestor anaeróbio, a partir do qual se pode estimar a quantidade de biogás gerado a partir da digestão do lodo, assim como seu poder calorífico.

• USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Quanto ao uso industrial do lodo, pode-se avaliar o aproveitamento do seu poder calorífico em processos de coprocessamento em cimenteiras, assim como sua incorporação no processo industrial na indústria ceramista.

Indústria Cimenteira

O lodo pode ser aproveitado na Indústria Cimenteira por meio do seu coprocessamento em fornos de clínquer. Trata-se de uma técnica de destruição térmica de resíduos, sem a geração de passivos ambientais, aproveitando o potencial energético e/ou mineral do resíduo. Estima-se que o lodo pode substituir até 50% da matriz energética como combustível alternativo nos fornos de clínquer.

As indústrias cimenteiras localizadas no estado da Bahia podem ser identificadas conforme as informações disponibilizadas pela Federação das Indústrias da Bahia – FIEB, através do Guia Industrial que apresenta as empresas de Produtos Mineraiis não Metálicos.



SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO
DE ENGENHARIA SANITÁRIA
E AMBIENTAL

Indústria Ceramista

O setor industrial de cerâmica vermelha faz parte do setor de minerais não-metálicos da Indústria de Transformação Mineral, tendo como principal matéria-prima a argila. Quanto à incorporação do lodo no processo industrial da cerâmica vermelha os principais fatores limitantes identificados foram a perda ao fogo e a umidade. A perda ao fogo afeta a qualidade do bloco e a umidade pode trazer problemas operacionais ao processo produtivo. A umidade ideal da massa cerâmica para produção de tijolos por extrusão está compreendida entre 10% e 30% (DUARTE, 2008; INGUNZA et al., 2006).

A fim de estimar a demanda por lodo para uso na indústria ceramista, é necessário estimar o consumo de matéria prima (argila), uma vez que as taxas de aplicação de lodo costumam ser percentuais em massa. Segundo Duarte (2008), a taxa adequada de incorporação de lodo em peças cerâmicas pode variar entre 15% e 20% em massa.

Assim como para a indústria cimenteira, para a estimativa da demanda por lodo de ETE na indústria de cerâmica podem ser consideradas as indústrias de cerâmica vermelha com produtos voltados para a construção civil presentes no Guia Industrial da FIEB. Mapas podem ser elaborados a fim de ilustrar a localização das empresas e indústrias em relação as ETEs no Estado da Bahia.

POTENCIAL DE APROVEITAMENTO

Uma vez os critérios de oferta e demanda definidos, fatores de influência foram utilizados para cada ETE, para definir o potencial de oferta e o potencial de demanda por meio de ponderações.

Quanto aos fatores que influenciam no potencial da oferta, foram considerados a frequência de remoção e o tratamento necessário para o uso benéfico do lodo, visto que interferem na disponibilidade da massa total de lodo e na necessidade de investimento em infraestrutura para tratamento da fase sólida. A Figura 1 apresenta os fatores de influência definidos e suas respectivas ponderações.



FATOR DE INFLUÊNCIA	ID	CARACTERÍSTICA DO FATOR DE INFLUÊNCIA	FATOR DE PONDERAÇÃO
MASSA DE LODO GERADA	OF1	Massa de lodo gerada em t/ano	1
FREQUÊNCIA DE REMOÇÃO DO LODO	OF2	Diariamente, contínuo, semanalmente, plurisemanalmente, mensalmente	1
		2-6 meses	0,8
		Anualmente, plurianualmente	0,5
		Não removido, sem frequência definida	0,3
TRATAMENTO NECESSÁRIO PARA USO BENÉFICO	OF3	Implantação de uma etapa de tratamento da fase sólida ou existência de toda a infraestrutura do tratamento necessário para fase sólida	1
		Implantação de duas etapas de tratamento da fase sólida	0,5
		Implantação de três etapas de tratamento da fase sólida	0,3
		Implantação de quatro etapas de tratamento da fase sólida	0,1

Figura 1: Fatores de influência e sua ponderação para definição da oferta potencial de lodo pelas ETEs.

O nível de tratamento do lodo necessário para uso benéfico foi definido com base no nível de tratamento da fase líquida, assim como no processo de tratamento utilizado, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: Tratamento do lodo para uso benéfico conforme tratamento da fase líquida.

Nível de tratamento da fase líquida	Processo de tratamento	Tipo de lodo	Tratamento necessário para uso benéfico
Primário	Tanques de sedimentação	Lodo primário	1. Adensamento 2. Estabilização 3. Secagem/desidratação 4. Higienização
	Tanque Imhoff	Lodo primário	1. Secagem/desidratação 2. Higienização
	Fossas sépticas	Lodo primário	1. Secagem/desidratação 2. Higienização
	Reatores anaeróbios (UASB)	Lodo biológico	1. Secagem/desidratação 2. Higienização



Nível de tratamento da fase líquida	Processo de tratamento	Tipo de lodo	Tratamento necessário para uso benéfico
Secundário	Lagoas de estabilização aeróbias	Lodo biológico	1. Secagem/desidratação 2. Higienização
	Reator UASB combinado com tratamento aeróbio	Lodo biológico	1. Secagem/desidratação 2. Higienização
	Filtro biológico aerado	Lodo biológico	1. Adensamento 2. Estabilização 3. Secagem/desidratação 4. Higienização
	Filtro biológico anaeróbio	Lodo biológico	1. Secagem/desidratação 2. Higienização
	Lodo ativado (convencional)	Lodo misto	1. Adensamento 2. Estabilização 3. Secagem/desidratação 4. Higienização
	Lodo ativado (aeração prolongada)	Lodo biológico	1. Adensamento 2. Secagem/desidratação 3. Higienização
Secundário avançado	Lodo ativado (para nitrificação e remoção de nutrientes)	Lodo misto	1. Adensamento 2. Estabilização 3. Secagem/desidratação 4. Higienização

Fonte: adaptado de Embasa (2020); Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2014).

Quanto ao potencial de demanda, a presença de indústrias da construção civil, requisitos mínimos para o uso do lodo em solos e recuperação de área degradada, assim como para aproveitamento energético, além de restrições legais foram utilizados como fatores de influência. No total, cinco fatores de influência foram definidos assim como suas respectivas ponderações, conforme apresentado na Figura 2.

FATOR DE INFLUÊNCIA		ID	CARACTERÍSTICA DO FATOR DE INFLUÊNCIA	FATOR DE PONDERAÇÃO
APTIDÃO DO SOLO		DE1	Alta aptidão	1
			Média aptidão	0,5
			Baixa aptidão	0,1
ÁREAS DE MINERAÇÃO		DE2	Áreas não vegetadas	1
PREDISPOSIÇÃO AO USO INDUSTRIAL	PREDISPOSIÇÃO NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA	DE3.1	Indústrias cimenteiras inseridas no estado da BA	1
	PREDISPOSIÇÃO NA INDÚSTRIA CERÂMICA	DE3.2	Indústrias cerâmicas inseridas no estado da BA	1
APROVEITAMENTO PARA A GERAÇÃO BIOGÁS		DE4	Presença do sistema de lodos ativados convencional + viabilidade em função do número de habitantes	1
			Presença do sistema de lodos ativados convencional	0,5
			Não apresenta viabilidade para geração de biogás a partir do lodo	0
RESTRICÇÃO LEGAL - ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE		RL	Inserido	0
			Não Inserido	1

Figura 2: Fatores de influência e sua ponderação para definição da demanda potencial por lodo em usos benéficos.

Uma vez os fatores de oferta e demanda definidos e ponderados, pode-se realizar a avaliação do potencial, a fim de fornecer uma ordem de grandeza das potencialidades do aproveitamento do lodo no estado da Bahia. Este potencial é determinado por meio da relação entre oferta e a demanda ponderadas, em que o valor mais restrito (menor) entre elas define o potencial de aproveitamento do lodo para a área estudada. A fim de facilitar a comunicação e divulgação deste resultado no âmbito empresarial, oferta, demanda, e potencial são representados em termos de massa – toneladas por ano.

O fluxograma apresentado na Figura 3 ilustra a metodologia aplicada para a determinação do potencial de aproveitamento de lodo das ETES considerando os fatores de oferta e demanda apresentados.

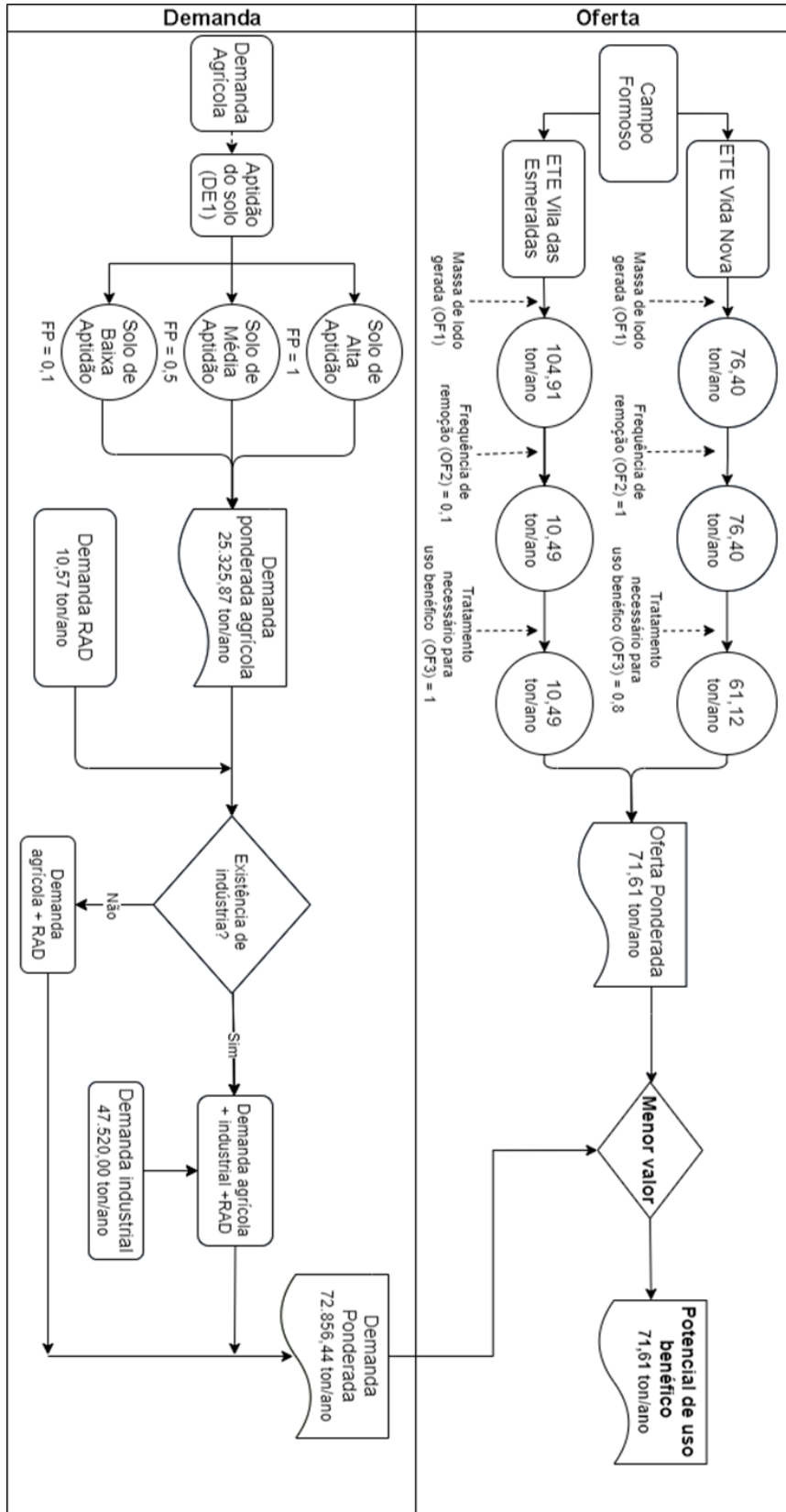


Figura 3: Exemplo de aplicação da metodologia no município de Campo Formoso.



Devido às considerações realizadas ao longo da elaboração dessa metodologia, a determinação do potencial não apresenta como objetivo esgotar o tema, mas apresentar um indicador para tomadas de decisão no âmbito empresarial a fim de se realizar estudos mais aprofundados visando o aproveitamento dos lodos gerados nas ETEs em usos benéficos.

CONCLUSÕES

Este trabalho é o resultado de uma iniciativa da Embasa para estruturar a atuação corporativa do aproveitamento de lodo de ETE em usos benéficos. A metodologia desenvolvida é parte integrante do contrato firmado, em maio de 2021, entre o Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA) e o Consórcio Incibra, Inccive, Nippon Koei Lac, no âmbito do Projeto de Cooperação Técnica BRA/IICA/16/003, firmado entre a Embasa, o IICA e a Agência Brasileira de Cooperação do Ministério das Relações Exteriores.

A metodologia desenvolvida tem como objetivo estimar uma quantidade de lodo que possa ser aproveitada para usos benéficos em termos de toneladas anuais, de forma a apresentar uma ordem de grandeza do potencial de aproveitamento na área de operação da Embasa. Banco de dados georreferenciado e mapas temáticos podem ser produzidos para representação gráfica desse potencial, servindo como ferramentas de auxílio a tomadas de decisão. A literatura aponta que as geotecnologias aceleram, complementam e subsidiam a etapa de planejamento dos projetos, apesar de não extinguirem a verificação e análises de campo.

A fim de determinar o potencial de aproveitamento do lodo de ETE foram caracterizados tanto a oferta de lodo pelas ETEs, quanto a demanda por usos benéficos na área de abrangência. Os critérios adotados para a avaliação de cada aspecto referente à oferta do lodo pelas ETEs, e demanda por usos benéficos foram levantados pela literatura científica. Dessa forma, trata-se de uma metodologia robusta para uso visando a caracterização da oferta de lodo e demanda por usos benéficos para fins de aproveitamento do lodo.

O objetivo da determinação do potencial de aproveitamento de lodo de ETE para usos benéficos nos municípios baianos não é esgotar o tema em si, mas criar um indicador que oriente as ações da gestão pública em priorizar uma região ou outra com ações nesse sentido. Dessa forma, recomenda-se a elaboração de metodologias para estudos e avaliações mais pormenorizadas a fim de identificar, dentre aquelas que apresentem maiores potenciais, qual seria a região/ município prioritária para o planejamento e realização de projetos pilotos ou ações mais objetivas para fins de aproveitamento do lodo em usos benéficos.

A partir da aplicação da metodologia desenvolvida, e da consolidação dos resultados, uma análise de viabilidade poderá ser realizada considerando as características locais, impactos sociais, econômicos e ambientais, e demais fatores que interfiram no manejo e aproveitamento eficiente do lodo resultante do tratamento, com economia de escala e a possibilidade de formação de arranjos produtivos locais e/ou regionais. Dessa forma, trilha-se um caminho rumo ao aproveitamento de lodo no Estado Bahia por meio de levantamento de informações e geração de conhecimento necessários para futuros empreendimentos nessa área, culminando em melhoria da qualidade de vida da população baiana e conservação do meio ambiente no futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDREOLI, C. V., PEGORINI, E. S., FERNANDES, F. Disposição do lodo no solo. In: ANDREOLI, C. V., SPERLING, M. V., FERNANDES, F. Ed(s). Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.
2. BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>.
3. BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 25 mai. 2012. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm>.



SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO
DE ENGENHARIA SANITÁRIA
E AMBIENTAL



4. BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o Marco Legal do Saneamento Básico. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 jul. 2020. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/14026.htm>.
5. BRASIL. Resolução CONAMA 498, 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólidos em solos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 de agosto de 2020. Disponível em: <<http://conama.mma.gov.br/component/sisconama/?view=atosnormativos>>.
6. BRASIL. SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Série Histórica. Água e Esgotos. 2022. Disponível em: <<http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/>>.
7. BRASIL. SNSA - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto / Probiogás; Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). Brasília, DF. 2015.
8. EMBASA – Empresa Baiana de Águas e Saneamento. Estudo de Avaliação das Potencialidades de Reuso de Efluente Sanitário Tratado no Estado da Bahia. 2020.
9. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. PNSB - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. 2017. SIDRA - Sistema IBGE de Recuperação Automática. Esgotamento Sanitário. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pnsb/pnsb-2017>>.
10. LEHMANN, A. H.. Manual de Diseño de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales. 2. ed. Madrid: Garceta, 2015.
11. SILVA, Lucas de Almeida Chamhum et al. Identificação e avaliação de áreas potenciais de uso agrícola do lodo de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário nas bacias dos rios Velhas, Jequitaiá e Pacuí. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental UFMG, 2018.