

I-1196 - GERENCIAMENTO DO LODO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA DO MUNICÍPIO DE SALTO-SP: LOGÍSTICA E TRANSPORTES

Camila Gomes Marchesini Fonseca⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestre em Engenharia Civil, na área de Saneamento e Ambiente, pela Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (FECFAU/UNICAMP). Doutoranda em Engenharia Civil na FECFAU/UNICAMP.

Luiz Henrique Freitas da Silva⁽²⁾

Graduando em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (FECFAU/UNICAMP).

Ricardo de Lima Isaac⁽³⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Mestre em Engenharia Civil, Hidráulica e Sanitária pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli/USP). Doutor em Engenharia Civil, Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). Pós-doutorado pela University College London (UCL). Professor do Departamento de Infraestrutura e Ambiente (InfrA) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP.

Endereço^(1,2,3): Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Infraestrutura e Ambiente. Av. Albert Einstein, 951 - Distrito de Barão Geraldo - Campinas - SP - CEP: 13084-971 - Caixa-postal: 6021 - Brasil - Tel: (019)3521-2368 - e-mail: fonseca@fec.unicamp.br⁽¹⁾; 1240506@dac.unicamp.br⁽²⁾; isaac@unicamp.br⁽³⁾

RESUMO

A disposição final dos lodos gerados nas estações de tratamento de água (ETA) brasileiras de forma ambientalmente adequada e economicamente viável ainda constitui um grande desafio para o setor do saneamento e para o País. Esses resíduos comumente são dispostos nos cursos d'água mais próximos à ETA, impactando negativamente o ecossistema aquático, com reflexos na saúde humana. Sob a ótica das legislações pertinentes, destacadamente a Política Nacional de Resíduos Sólidos, e pelo princípio da sustentabilidade, eles devem receber destinação final ambientalmente adequada e, assim sendo, destaca-se para isso, seu uso benéfico como matéria-prima em outros processos. O emprego de lodo de ETA como substituto da argila no setor ceramista tem sido amplamente estudado, com trabalhos técnicos comprovando sua viabilidade. Dentre os aspectos que impactam os custos da disposição do lodo, destacam-se aqueles relacionados à logística de transporte. Isto posto, esse projeto de pesquisa visa analisar os aspectos logísticos de transporte relacionados ao gerenciamento do lodo gerado nas ETA do município de Salto - SP, com foco em sua destinação às indústrias ceramistas almejando sua incorporação à massa cerâmica como forma de destinação final ambientalmente adequada.

PALAVRAS-CHAVE: lodo de estação de tratamento de água, uso benéfico, gerenciamento de resíduos sólidos, sistemas de informação geográfica.

INTRODUÇÃO

As águas naturais superficiais, comumente utilizadas como fonte para abastecimento público, contêm impurezas que precisam ser removidas objetivando atender o padrão de potabilidade vigente, tornando-as apropriadas para o consumo humano. Para isso, diferentes tecnologias podem ser aplicadas, destacando-se o tratamento convencional (ciclo completo), amplamente empregado nas Estações de Tratamento de Água (ETA) no Brasil e no mundo (PÁDUA et al., 2009). Durante as etapas do tratamento físico-químico em uma ETA convencional (*i.e.*, coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção), grandes quantidades de resíduos são geradas na forma de lodos, advindos, principalmente, das operações de limpeza dos decantadores e da lavagem dos filtros granulares (SCALIZE, P.; ALBUQUERQUE; DI BERNARDO, 2021).

Embora o lodo seja basicamente composto pelas impurezas retiradas da água bruta, como sólidos em suspensão, minerais de base argilosa e de granulação muito fina, acrescido dos produtos químicos adicionados durante o tratamento, como hidróxidos de alumínio ou de ferro (BANDIEIRA et al., 2021), suas características quali-

quantitativas são variáveis e dependentes de fatores como a tecnologia de tratamento de água utilizada, a qualidade da água bruta, a dosagem e o tipo de produtos químicos aplicados (GERVASONI, 2014) além das questões relacionadas ao tratamento do próprio resíduo.

A disposição final dos resíduos gerados nas ETA brasileiras de forma ambientalmente adequada e economicamente viável ainda constitui uma questão chave para o setor do Saneamento. Esses resíduos comumente são dispostos nos cursos d'água mais próximos à ETA, impactando negativamente o ambiente, com reflexos na saúde humana, encaminhados para aterros sanitários ou enviados para estações de Tratamento de Esgotos (ETE) (IBGE, 2020). Ainda que o lodo seja, em parte, constituído por materiais presentes nas águas brutas naturais, seu lançamento *in natura* em corpos d'água acarreta impactos ambientais negativos, com possíveis reflexos sobre a saúde humana (ANDREOLI, 2006). A disposição de lodo em aterro sanitário pode ser um problema, uma vez que os lodos apresentam alta plasticidade, baixa resistência ao cisalhamento e baixa permeabilidade à água, podendo acarretar futuramente problemas estruturais aos aterros (URBAN et al., 2019). A transposição do lodo de ETA para as ETE, apenas transfere o problema, podendo ainda causar dificuldades no que concerne ao tratamento de esgoto, assim como do aproveitamento do lodo gerado na ETE (URBAN et al., 2019). Tal situação é agravada pela tendência de acréscimo na geração e piora da qualidade desses resíduos impulsionados tanto pelo aumento da demanda por água potável, dado o cenário de crescimento populacional e maior acesso ao saneamento, como pela deterioração da qualidade dos cursos d'água (URBAN et al., 2019).

Conforme a Norma Técnica ABNT/NBR 10.004 (ABNT, 2004) os lodos gerados nos sistemas de tratamento de água são classificados como resíduos sólidos e, por isso, devem atender às disposições da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010). Ainda com base na referida Lei, o lançamento do lodo em corpos d'água ou na rede pública de esgotos é inadequada, dado suas características, podendo configurar crime ambiental, alicerçado pela Lei de Crimes Ambientais, Lei nº 9.605/1998, (BRASIL, 1998). Sob a ótica da PNRS e de outras legislações pertinentes (*e.g.*, Constituição Federal (BRASIL, 1988), Plano Nacional de Recursos Hídricos - Lei nº 9.433/1997 (BRASIL, 1997), Lei de Crimes Ambientais - Lei nº 9.605/1998 (BRASIL, 1998), Novo Marco do Saneamento - Lei nº 14.026/2020 (BRASIL, 2020)), fundamentado nos princípios dos objetivos do desenvolvimento sustentável, economia circular, aterro mínimo e lixo zero, e considerando os impactos adversos ao meio ambiente e à saúde humana, o lodo de ETA deve receber destinação final ambientalmente adequada.

Diante desse cenário, o uso benéfico do lodo surge como uma alternativa promissora. Pesquisadores ao redor do mundo buscam diferentes aplicações para esse resíduo em diversas áreas, sendo citadas na literatura científica, possibilidades como: uso no setor ceramista; fabricação de blocos de concreto para vedação e fabricação de cimento; usos em obras geotécnicas, como material de recobrimento de aterro sanitário ou sub-base de pavimentos; uso agrícola; uso como substrato para *wetlands*; sendo possível, também, a recuperação de coagulantes. O emprego de lodo de ETA como substituto da argila no setor ceramista tem sido amplamente estudado ao longo dos anos, com trabalhos comprovando sua viabilidade (*e.g.*, MONTEIRO et al., 2008; TARTARI et al., 2011; KIZINIEVIC et al., 2013; SILVA et al., 2015).

Para que o lodo seja aplicado em escala real, não basta apenas verificar a viabilidade técnica e ambiental de seu uso pretendido, pois os problemas logísticos, a relação custo-benefício e o atendimento aos interesses e restrições de cada ator envolvido no processo, influenciam significativamente na seleção do melhor destino para o lodo (URBAN et al., 2019). Uma vez que os custos com o transporte, juntamente com o de disposição, representam grande parcela das despesas relacionadas ao gerenciamento desse resíduo (RICHTER, 2001), e que o principal meio de locomoção da torta de lodo é o modal rodoviário, através de caminhões, estando os custos de transporte diretamente ligados ao peso, volume e distância a percorrer, estudos que abordam as questões relacionadas aos aspectos logísticos do transporte do lodo com vistas à sua destinação ambientalmente adequada são de grande valia para a efetivação de seu uso benéfico.

Frente a esta realidade, o Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) do município de Salto-SP e a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) celebraram um convênio, via Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FECFAU), para o desenvolvimento do Projeto de Pesquisa e Inovação Tecnológica visando, a partir da criação e aplicação de ferramenta de tomada de decisão orientada para a segurança da água, desenvolver estudo de concepção de nova estação de tratamento de água do rio Jundiáí (Classe 3), sendo um dos objetivos do projeto o gerenciamento dos resíduos gerados no tratamento de água tanto das ETA existentes como da estação a ser construída.

Deste modo, a presente pesquisa visa identificar e analisar os aspectos logísticos relacionados ao transporte do lodo gerado nas ETA de Salto para seu uso benéfico em indústrias cerâmicas da região, contribuindo para a elaboração do panorama logístico da destinação do lodo de ETA. Para isso, a ferramenta de análise espacial, Sistemas de Informação Geográfica (SIG), foi utilizada para auxiliar na avaliação e proposições de soluções para o lodo. Mapas temáticos foram elaborados através do cruzamento de dados georreferenciados, possibilitando a visualização especializada das informações.

OBJETIVO

O objetivo da pesquisa foi analisar com o uso de Sistema de Informação Geográfica (SIG) os aspectos logísticos relacionados ao transporte e destinação final ambientalmente adequada do lodo gerado nas ETA do município de Salto no estado de São Paulo, com foco no seu uso benéfico no setor ceramista.

METODOLOGIA UTILIZADA

O município de Salto-SP conta atualmente com duas ETA do tipo convencional em operação: ETA Bela Vista e ETA João Jabour, estando prevista a construção de outras duas: ETA Pedra Branca e ETA Jundiá. Considerando-se que as estações existentes remontam a 1969 e 1999, portanto, com décadas de operação, os projetos originais não contemplaram sistema de tratamento nem a disposição final dos resíduos. A escolha dessa área de estudo justifica-se pelo convênio firmado entre o SAAE de Salto-SP e a UNICAMP, para o desenvolvimento de Projeto de Pesquisa e Inovação Tecnológica, que tem como um de seus objetivos o gerenciamento dos resíduos gerados nas ETA. Este trabalho contém a discussão prospectiva com base em dados secundários de operação dessas duas ETA existentes, com recorte para o período de abril de 2022 a março de 2023, para a ETA Bela Vista, e de junho de 2022 a março de 2023, para a ETA João Jabour, considerando os períodos de cheia e de estiagem.

Para a construção do SIG, foram levantados dados sobre as ETA de Salto e os possíveis receptores do lodo (indústrias ceramistas) considerando um raio de influência de 10 km, baseado em Urban (2016). Dados sobre a rede viária que interliga a posição geográfica das ETA aos seus receptores também foram levantados. De posse desses dados, foi elaborado com o auxílio do *software* QGIS, um mapa de localização do município de Salto, trazendo informações e aspectos geográficos para a construção do panorama logístico. Um mapa com a plotagem das localizações geográficas de cada ETA e indústria cerâmica dentro da área de influência adotada, também foi elaborado.

Foram plotados dados sobre o sistema de transporte considerando a área de estudo. Assim, foi inserida a camada de transporte viário e rodoviário em operação, além de restrições impostas pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER), quais sejam, comprimentos e peso por eixo para caminhões de cargas.

Baseado em método empírico, a produção de lodo nas duas ETA foi estimada, a fim de realizar uma análise quantitativa do número de caminhões necessários para o transporte do lodo, bem como de quais indústrias teriam a capacidade de receber, total ou parcialmente, o resíduo para ser usado como substituto de parte da matéria-prima. Neste trabalho, a estimativa da produção de lodo foi realizada considerando a equação proposta por Richter (2001) (equação 1).

$$S = (0,2C + k_1T + k_2D) \cdot 10^{-3} \quad \text{(equação 1)}$$

Onde:

S – produção de sólidos (kg de matéria seca / m³ de água bruta tratada)

C – cor da água bruta (uC)

T – turbidez da água bruta (UNT)

D – dosagem de coagulante (mg/L)

k₁ – coeficiente de relação entre sólidos suspensos totais e turbidez, que varia entre 0,5 e 2,0

k₂ – coeficiente de relação estequiométrica na formação do precipitado de hidróxido, sendo dependente do tipo de coagulante

A massa de sólidos, por unidade de tempo, removida na unidade de processo foi estimada com o uso da equação 2 (RICHTER, 2001).

$$M_s = 86,4 \eta SQ \quad (\text{equação 2})$$

onde:

M_s – massa de sólidos (kg/dia)

η – rendimento da unidade de processo

S – produção de sólidos (kg de matéria seca / m^3 de água bruta tratada)

Q – vazão de água bruta a ser tratada (L/s)

A massa de lodo precipitada foi estimada com o uso da equação 3 (RICHTER, 2001).

$$M_l = M_s/C \quad (\text{equação 3})$$

onde:

M_l – massa de lodo (kg/dia)

M_s – massa de sólidos (kg/dia)

C – porcentagem de sólidos secos no lodo, em m/m

A densidade do lodo foi estimada com o uso da equação 4 e, finalmente, seu volume, com a equação 5 (RICHTER, 2001).

$$d_l = 1 / [C/d_s + (1-C)/d_a] \quad (\text{equação 4})$$

$$V_l = M_l / d_l \quad (\text{equação 5})$$

onde:

d_l – densidade do lodo (kg/m^3)

d_s – densidade dos sólidos secos (kg/m^3)

d_a – densidade da água (kg/m^3)

V_l – volume de lodo produzido (m^3 /dia)

A massa e o volume da torta de lodo produzido após o processo de desaguamento podem ser estimados aplicando-se as equações 6 e 7, respectivamente (RICHTER, 2001).

$$T = M_l \cdot C/C_t \quad (\text{equação 6})$$

$$V_t = T/d_t \quad (\text{equação 7})$$

onde:

T – massa da torta de lodo desaguado (kg/dia)

C_t – concentração de sólidos na torta de lodo

V_t – volume da torta de lodo desaguado (m^3 /dia)

A estimativa da produção de lodo foi realizada com base nos valores médios de vazão nominal e dosagens de coagulante, e médio, máximo (representando o período de chuva) e mínimo (representando o período de estiagem) anual considerando-se os dados da qualidade da água bruta (turbidez e cor) para o período estudado. Embora haja críticas da utilização da turbidez para a estimativa da concentração de sólidos em suspensão na água bruta (KATAYAMA et al., 2015), neste trabalho adotou-se $k_1 = 1,3$, baseado no valor usual indicado por Richter (2001). O valor de k_2 , coeficiente que corresponde à relação estequiométrica na formação do precipitado de hidróxido e depende do coagulante utilizado, corresponde a 0,26 quando da aplicação de sulfato de alumínio. Para a aplicação de cloreto de polialumínio (PAC), ainda não há um valor de k_2 descrito na literatura. Entretanto, conforme resultados obtidos por Ferreira Filho e Waelkens (2009), para uma mesma dosagem de coagulante, a produção de lodo quando da aplicação de PAC apresenta valores próximos comparado ao emprego de sulfato de alumínio, sendo possível afirmar, segundo os autores, que ambos os coagulantes apresentam comportamento

semelhante com respeito à produção de lodo. Dessa forma, neste trabalho, adotou-se o valor de $k_2 = 0,26$ também para o PAC.

A densidade de sólidos secos foi adotada com base na recomendação de Richter (2001), sendo esta igual a 1.800 kg/m^3 . Assumiu-se o valor de 90% para a eficiência de remoção de sólidos do decantador, de 2% para a concentração de sólidos no lodo do decantador convencional, de 30% - mínimo exigido para recebimento em aterro sanitário (RIBEIRO, 2008) - para o teor de sólidos do lodo desaguado, e esse mesmo valor para o transporte às cerâmicas. Considerou-se também que a concentração de sólidos na água drenada no desaguamento é praticamente nula. Para a estimativa do volume de lodo produzido e, conseqüentemente, do custo para o transporte desse lodo gerado, foram utilizadas as equações empíricas descritas e a metodologia aplicada por Ribeiro (2008).

Após o cálculo da quantidade de lodo produzido nas ETA estudadas, estimou-se a capacidade de recepção do lodo de cada indústria cerâmica. Com base nos resultados apresentados por Urban (2016), a quantidade média de argila processada mensalmente pelas indústrias cerâmicas no Estado de São Paulo é de 2.223 ton/mês. Considerou-se 10% de incorporação do lodo em substituição à argila usada como matéria prima pelas cerâmicas, valor que se encontra dentro da faixa de relação mássica lodo/argila descrita na literatura (entre 5% e 12,5%), para que não ocorram alterações significativas nas propriedades mecânicas das peças cerâmicas produzidas (URBAN, 2016). Além disso, neste trabalho, será considerado que todas as cerâmicas presentes na área de estudo estão dispostas a receber o lodo como parte de substituição de sua matéria-prima e que elas possuem a mesma capacidade de recepção do lodo. Assume-se também que o lodo gerado nas ETA será igualmente distribuído entre os ceramistas.

Partindo da estimativa da geração de lodo, realizou-se uma análise logística para auxiliar no gerenciamento desse material de forma econômica, segura e sustentável. Inicialmente, utilizou-se o SIG desenvolvido para roteirizar as opções de percursos entre as ETA estudadas e as indústrias cerâmicas selecionadas na base de dados. Isso permitiu desenvolver rotas mais eficientes para o destino do lodo, calculando as distâncias entre as ETA e os potenciais receptores. Desse modo, foram identificados 12 percursos no total, com 6 rotas possíveis para cada uma das ETA (Bela Vista e João Jabour), cobrindo todo o trajeto entre a estação de tratamento e as 6 indústrias cerâmicas consideradas neste estudo.

O custo do transporte em caminhão tipo com capacidade de 14 toneladas foi admitido como sendo de R\$ 12,42, valor atualizado pelo Índice Geral de Preços de Mercado (IGP-M) a partir daquele utilizado por Ribeiro (2008) referente ao custo de transporte de lodo na região das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (Bacia PCJ).

Considerando esses pontos, foram propostos dois cenários distintos para estimar o custo logístico de gerenciamento do resíduo. No primeiro cenário, seria contratado um caminhão diariamente para transportar o lodo das duas ETA até as cerâmicas estudadas. Já no segundo cenário, o gerenciamento da destinação do lodo seria realizado mensalmente, considerando uma infraestrutura de tratamento e armazenamento por parte das ETA.

RESULTADOS OBTIDOS

A localização do município de Salto e de seus municípios limítrofes, dentro do Estado de São Paulo, está representada na figura 1.

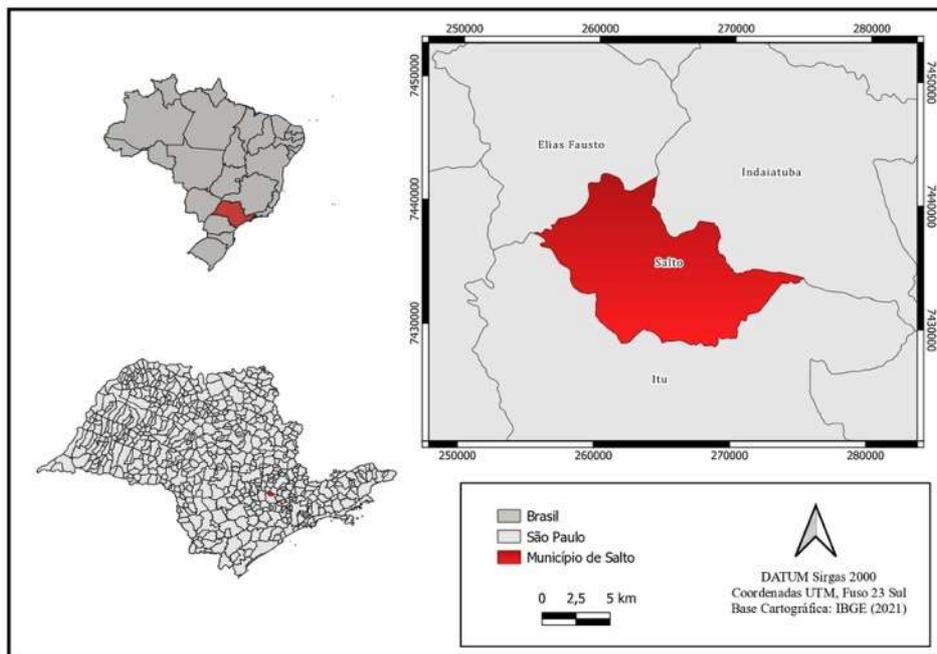


Figura 1: Localização geográfica do município de Salto – SP.

A figura 2 contém o mapa com as informações sobre as localizações geográficas das ETA estudadas, além dos possíveis receptores do lodo, no caso, indústrias cerâmicas, considerando a área de influência com raio de 10 km. Para a seleção das indústrias cerâmicas, foram coletados dados cartográficos das posições geográficas de cada ceramista com auxílio do site da Junta Comercial de São Paulo (JUCESP) e da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER).

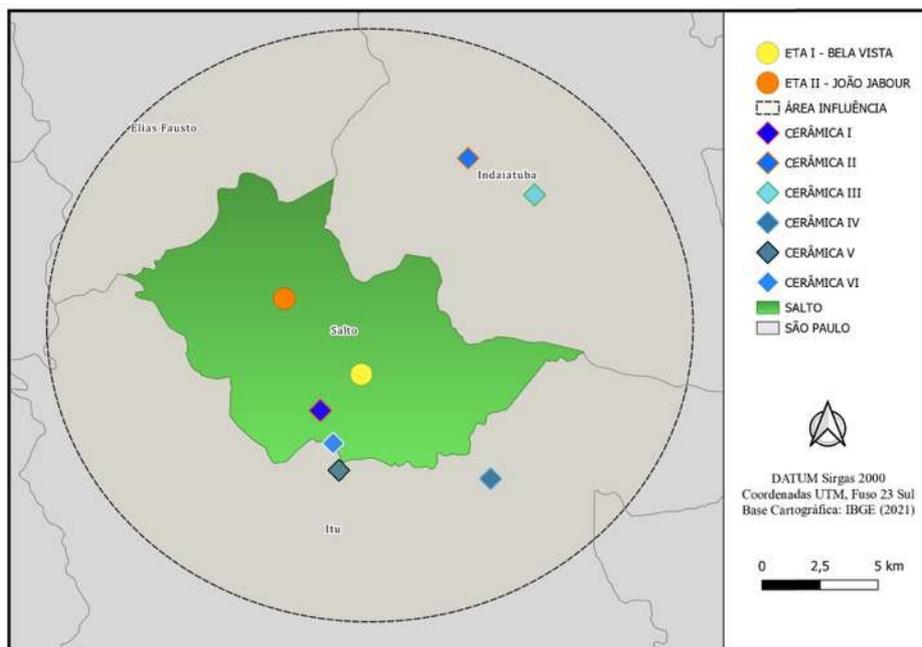


Figura 2: Localização das ETA no município de Salto e de potenciais receptores do lodo.

Posteriormente, na base do DER, foram selecionados os dados sobre restrições de peso e comprimento de trem-tipo, liberados para trânsito nas vias regulamentadas pelo órgão. Para tais dados, foram filtradas e plotadas as informações para a área de influência adotada. A figura 3 apresenta as restrições impostas e suas distribuições na área estudada.

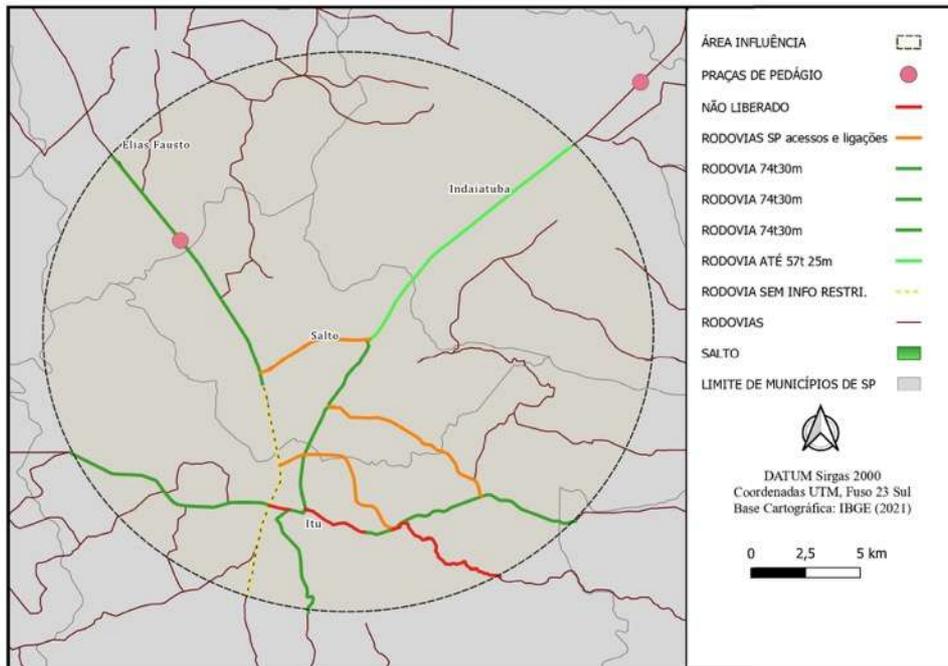


Figura 3: Mapa de restrições rodoviárias impostas pelo DER.

Na figura 4, foram plotados tanto os dados das vias intermunicipais - disponíveis no site do IBGE - dos municípios limítrofes à Salto, parcialmente inseridos na área de influência adotada, como as localizações de pontes de acesso à cidade, avaliando-se a permissão para circulação de caminhões nas mesmas.

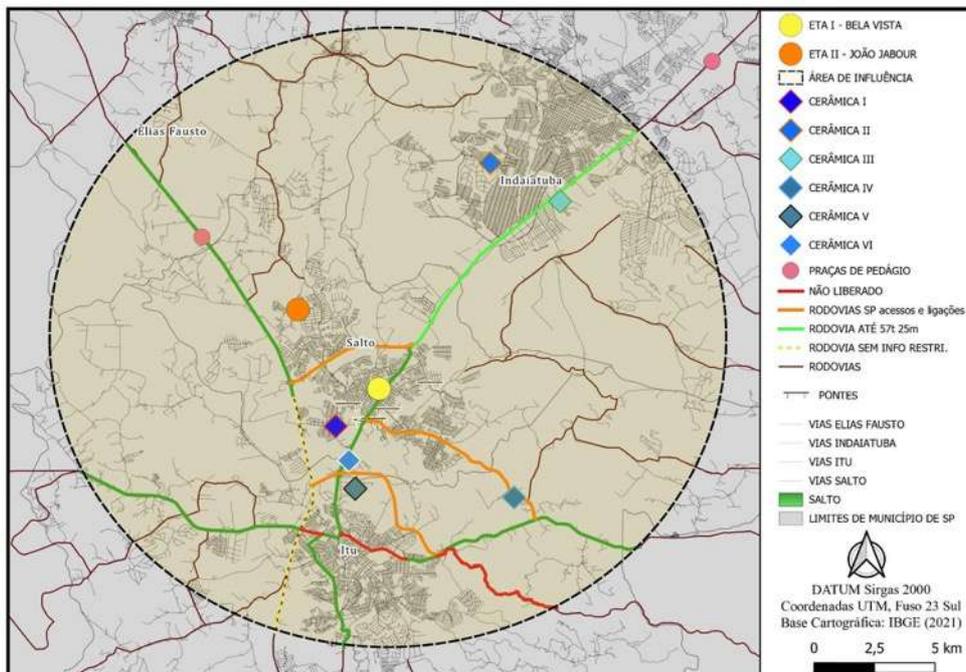


Figura 4: Localização de vias e pontes nos municípios estudados.

Com os dados de qualidade da água bruta e de insumos utilizados no seu tratamento, fornecidos pelo SAAE Salto, e utilizando as equações já descritas, é apresentada, na tabela 1, a estimativa da quantidade de lodo desaguado gerado na ETA Bela Vista e, na tabela 2, na ETA João Jabour.

Tabela 1: Características da água bruta e estimativa da produção de lodo - ETA Bela Vista.

PARÂMETRO	MÉDIA			UNIDADE
Vazão aduzida	342,44			L/s
Dosagem de coagulante (Sulfato de alumínio)	33,86			mg/L
PARÂMETRO	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO	UNIDADE
Turbidez da água bruta	19,63	3,04	640	UNT
Cor da água bruta	72,93	4,64	437	uC
Produção de sólidos - S	0,05	0,01	0,93	kg/m ³
Massa de sólidos - M _s	1,30	0,36	24,72	ton/dia
Massa de lodo - M _l	65,2	18,2	1.235,8	ton/dia
Densidade do lodo - d _l	1.008,97	1.008,97	1.008,97	kg/m ³
Volume de lodo produzido - V _l	64,7	18,1	1224,8	m ³ /dia
Massa da torta de lodo desaguado - T	4,34	1,21	82,39	ton/dia
Volume da torta de lodo desaguado - V _t	3,8	1,1	71,4	m ³ /dia

Tabela 2: Características da água bruta e estimativa da produção de lodo - ETA João Jabour.

PARÂMETRO	MÉDIA			UNIDADE
Vazão aduzida	73,93			L/s
Dosagem de coagulante (PAC)	35,95			mg/L
PARÂMETRO	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO	UNIDADE
Turbidez da água bruta	90,06	0,25	4275	UNT
Cor da água bruta	147,77	0,60	1505	uC
Produção de sólidos - S	0,16	0,01	5,87	kg/m ³
Massa de sólidos - M _s	0,90	0,06	33,73	ton/dia
Massa de lodo - M _l	44,8	2,8	1.686,3	ton/dia
Densidade do lodo - d _l	1.008,97	1.008,97	1.008,97	kg/m ³
Volume de lodo produzido - V _l	44,4	2,8	1671,3	m ³ /dia
Massa da torta de lodo desaguado - T	2,99	0,19	112,44	ton/dia
Volume da torta de lodo desaguado - V _t	2,6	0,2	97,4	m ³ /dia

Assim, essa estimativa da produção de lodo pode ser comparada com a capacidade de recepção desse resíduo pelas indústrias cerâmicas. Seguindo a metodologia já descrita, considerando 10% de incorporação do lodo à massa cerâmica, a capacidade de recepção de cada indústria é de 222,3 ton/mês ou 7,29 ton/dia, para um fator de conversão igual a 30,5 dias/mês, utilizado para estimar a capacidade de recepção diária a partir da capacidade mensal. Logo, considerando os 6 potenciais receptores do lodo presentes na área de estudo, a capacidade de recepção total corresponde a 1.333,80 ton/mês (43,73 ton/dia). Pelos dados das tabelas 1 e 2, a quantidade de lodo mínima, média e máxima a ser destinada (massa da torta de lodo desaguado), considerando a soma do produzido nas duas ETA, é de 1,40, 7,33 e 194,83 toneladas por dia. Assumindo que esse resíduo será igualmente distribuído entre as 6 ceramistas presentes na área de estudo, a quantidade de lodo a ser diariamente destinada para cada uma delas é de 0,20, 0,72 e 13,73 ton/dia, correspondendo aos valores mínimos, médios e máximos, respectivamente. Assim, exceto para o cenário de máxima produção de lodo, que pode representar a estação chuvosa, onde a turbidez e a cor da água bruta tendem a ser mais elevadas, as cerâmicas possuem capacidade de receber todo o lodo gerado. Para os casos em que a geração de lodo nas ETA supere a capacidade de recepção pelas indústrias cerâmicas, pode-se ampliar a área de influência delimitada para que novas indústrias sejam consideradas aptas a receber o lodo excedente; buscar outras alternativas de uso benéfico, assegurando que todo o lodo receba uma destinação final ambientalmente adequada; ou ainda, como uma alternativa provisória até que uma das duas opções anteriores se concretize, destinar o excedente para aterros sanitários.

Na abordagem logística, foram criados mapas de roteirização do lodo para a ETA Bela Vista (Figura 5) e para a ETA João Jabour (Figura 6), levando em consideração a distância, o tempo e as restrições de vias, a fim de analisar a solução mais eficiente com base no custo/distância e avaliar o uso das rotas em situações reais de transporte do lodo. Ressalta-se que nas referidas figuras constam as distâncias entre as ETA e as cerâmicas, considerando as rotas selecionadas. O custo de transporte do lodo foi calculado em dois cenários, conforme descrito na metodologia, admitindo o custo de transporte por quilômetro percorrido igual a R\$ 12,42.

Pelos dados das tabelas 1 e 2, a quantidade mínima diária estimada para a massa da torta de lodo desaguado, considerando o gerado na ETA Bela Vista é de 1,21 ton/dia e, para a ETA João Jabour, esse valor corresponde a 0,19 ton/dia. Assim, assumindo que o lodo será igualmente distribuído entre as 6 ceramistas selecionadas nesse estudo, a quantidade mínima que cada ETA destinará corresponde a 0,20 ton/dia e 0,032 ton/dia, para a ETA Bela Vista e a João Jabour, respectivamente, sendo, portanto, a quantidade total mínima de lodo a ser destinado à cada indústria cerâmica igual a 0,23 ton/dia. Aplicando o mesmo raciocínio para a geração média e máxima, a tabela 3 sintetiza os resultados da quantidade diária de lodo gerado em cada ETA que deve ser destinado para cada uma das indústrias cerâmicas.

Tabela 3: Quantidade diária de lodo gerado em cada ETA e quantidade de lodo que deve ser destinado para cada uma das indústrias cerâmicas consideradas.

ETA	Quantidade de lodo gerada (massa da torta de lodo desaguado) (ton/dia)			Quantidade de lodo a ser destinado para cada indústria cerâmica (ton/dia)		
	MÍNIMA	MÉDIA	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÁXIMA
ETA Bela Vista	1,21	4,34	82,39	0,20	0,72	13,73
ETA João Jabour	0,19	2,99	112,44	0,032	0,50	18,74
TOTAL	1,40	7,33	194,83	0,23	1,22	32,47



Figura 5: Roteirização do transporte do lodo da ETA Bela Vista para as Indústrias Cerâmicas.



Figura 6: Roteirização do transporte do lodo da ETA João Jabour para as Indústrias Cerâmicas.

Na tabela 4 é apresentada uma estimativa do custo com o transporte do lodo, considerando que a destinação ocorra de forma separada para cada ETA. Como a máxima produção de lodo excede a capacidade de recepção de cada indústria cerâmica (7,29 ton/dia.cerâmica), para estimar os custos com o transporte nessa situação, considerou-se que serão enviadas 7 ton/dia para cada cerâmica, quantidade de lodo próxima à capacidade de recepção de cada uma, sendo que o excedente deverá, conforme já comentado, receber outra forma de uso benéfico ou ser encaminhado para aterro sanitário. Dado que a capacidade do caminhão para o transporte do lodo é de 14 toneladas, será necessário apenas a contratação de 1 caminhão de carga para levar o lodo até as cerâmicas.

Tabela 4: Estimativa de custo de transporte do lodo das ETA até as cerâmicas, para as gerações mínimas, médias e máximas diárias de lodo (ton/dia).

Quantidade de lodo a ser destinado para cada indústria cerâmica (ton/dia)	ETA Bela Vista		ETA João Jabour	
	mínima: 0,20 média: 0,72 máxima: 7,00 (excedente: 6,73)		mínima: 0,032 média: 0,50 máxima: 7,00 (excedente: 11,74)	
Cerâmicas	Distâncias ETA/Cerâmica (km)	Custo transporte (R\$)	Distâncias ETA/Cerâmica (km)	Custo transporte (R\$)
Cerâmica I	3,50	43,47	9,08	112,77
Cerâmica II	15,52	192,76	19,66	244,18
Cerâmica III	14,46	179,59	18,61	231,14
Cerâmica IV	8,52	105,82	14,37	178,48
Cerâmica V	7,00	86,94	13,17	163,57
Cerâmica VI	3,87	48,07	12,37	153,64

Da tabela 4, observa-se que a quantidade de lodo transportada não aproveita toda a capacidade do caminhão. Assim, caso seja adotada a destinação diária de lodo das ETA até as cerâmicas, pode-se optar por contratar apenas um caminhão para realizar o transporte dos lodos das duas ETA para uma mesma cerâmica, no qual será feito o recolhimento do lodo das ETA e o transporte para a indústria cerâmica, tendo neste caso, o acréscimo do custo referente ao transporte de uma ETA para outra, mas, em compensação, gerando a economia com os custos associados a contratação de um veículo.

Para o segundo cenário, considerando a destinação mensal do lodo às cerâmicas, a produção estimada de lodo por mês, considerando a soma das duas ETA, corresponde a 42,70, 223,57 e 5.942,32 ton/mês, para a geração mínima, média e máxima de lodo, respectivamente. Destaca-se que, considerar valores mínimos e máximos de turbidez e cor registrados no período analisado (de abril de 2022 a março de 2023, para a ETA Bela Vista, e de junho de 2022 a março de 2023, para a ETA João Jabour) pode sub ou superestimar a geração mensal de lodo, uma vez que é pouco provável que as águas brutas naturais registrem valores tão baixos ou tão elevados de cor e turbidez, sistematicamente, durante todo o mês, mesmo em períodos secos ou chuvosos. Por essa razão, para esse cenário de destinação mensal do lodo às cerâmicas, adotou-se apenas a quantidade média de lodo gerada (massa da torta de lodo desaguado), sendo esta igual a 22,06 ton/mês para a ETA Bela Vista e 15,20 ton/mês, para a ETA João Jabour. Dito isto, considerando que esse lodo será igualmente distribuído entre as 6 ceramistas escolhidas, a quantidade de lodo a ser destinada para cada uma delas é de 37,26 toneladas por mês. Importante destacar que a capacidade de recepção de cada indústria cerâmica é de 222,3 ton/mês. A tabela 5 sintetiza os resultados da quantidade mensal de lodo gerado em cada ETA que deve ser destinado para cada uma das indústrias cerâmicas.

Tabela 5: Quantidade média mensal de lodo gerado em cada ETA e quantidade média mensal de lodo que deve ser destinado para cada uma das indústrias cerâmicas consideradas.

ETA	Quantidade de lodo gerada (massa da torta de lodo desaguado) (ton/mês)	Quantidade de lodo a ser destinado para cada indústria cerâmica (ton/mês)
ETA Bela Vista	132,37	22,06
ETA João Jabour	91,20	15,20
TOTAL	223,57	37,26

Para a quantidade de lodo a ser destinada para cada indústria cerâmica considerando a geração média mensal de lodo, serão necessários 2 caminhões para o transporte do lodo e os custos são apresentados na tabela 6.

Tabela 6: Estimativa de custo de transporte do lodo das ETA até as cerâmicas, para a geração média de lodo em ton/mês.

Cerâmicas	ETA Bela Vista		ETA João Jabour	
	Distâncias ETA/Cerâmica (km)	Custo transporte (R\$)	Distâncias ETA/Cerâmica (km)	Custo transporte (R\$)
Cerâmica I	3,50	86,94	9,08	225,55
Cerâmica II	15,52	385,52	19,66	488,35
Cerâmica III	14,46	359,19	18,61	462,27
Cerâmica IV	8,52	211,64	14,37	356,95
Cerâmica V	7,00	173,88	13,17	327,14
Cerâmica VI	3,87	96,13	12,37	307,27

Pelos dados apresentados, nota-se que poderia ser adotada a mesma solução prevista anteriormente para a destinação diária do lodo, porém neste caso de destinação mensal haveria um melhor aproveitamento da capacidade dos caminhões, com redução de custos com transporte. Para destinar o lodo de forma mensal, é necessário considerar não apenas os custos com o transporte, mas também os de armazenamento do resíduo, além de fatores relacionados ao controle das qualidades mínimas exigidas pelas cerâmicas para o lodo. Esses itens devem ser somados ao cálculo do custo da logística de transporte do lodo para compor o custo total de sua destinação final.

Além de fatores relacionados à qualidade da água bruta, como turbidez e cor, outros fatores influenciam a geração de lodo em uma ETA, como a qualidade da água bruta, o tipo de processo de tratamento utilizado tanto para a água bruta como para o lodo gerado, e as condições operacionais da ETA. Como as características da água bruta são variáveis ao longo do tempo, a quantidade e qualidade do lodo também o são. Essa variabilidade pode representar desafios para a logística e transporte deste resíduo, sendo esta uma etapa importante do processo de gerenciamento do lodo de ETA, por impactar diretamente os custos de transporte e destinação do lodo. Uma forma de minimizar os efeitos da variabilidade quantitativa da geração do lodo nas ETA seria a implantação de unidades de gerenciamento de lodo (UGL), também denominadas centrais de lodo, como as propostas por Urban (2019), que objetivam o gerenciamento conjunto de lodo de várias ETA, recebendo e armazenando esse resíduo por um período até que o mesmo seja encaminhado para seu uso benéfico. Entretanto, essa alternativa pode impactar nos custos de destinação final já que, conforme apontado pelo referido autor, o custo de armazenamento é dependente do tempo de espera necessário para envio do material para o destino final, sendo que quanto maior for a necessidade de espera, maior a será a área requerida, podendo influenciar no custo com aluguel, se for o caso, no custo de manutenção e no custo com a estrutura de armazenamento necessária.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Realizou-se para as duas ETA uma análise buscando verificar quais cerâmicas teriam capacidade de receber, em parte, o lodo produzido para a incorporação na fabricação dos materiais cerâmicos, com auxílio das equações empíricas para a estimativa da produção de lodo e dos mapas de localizações e restrições já mencionadas. Foi elaborada uma análise logística com todos os possíveis destinos do lodo de cada estação de tratamento inserindo: quantos caminhões serão necessários para o transporte dos resíduos, quais rotas poderão ser utilizadas e por fim, o custo diário e mensal de transporte por peso e distância para os destinos selecionados.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

A análise de dados espaciais é uma importante ferramenta para a tomada de decisões relacionadas a logística de transporte do lodo gerado nas ETA, pois permite prever as possibilidades de destinação final do lodo, tanto na etapa de planejamento para novas estações, quanto no gerenciamento das já existentes. Os resultados obtidos ao final da pesquisa auxiliarão o gestor da empresa de saneamento na tomada de decisão quanto ao projeto e operação dos sistemas de tratamento de lodo a serem implementados nas respectivas ETA tendo por premissa o uso benéfico desse resíduo. Além disso, o método ora proposto e aplicado poderá ser replicado em outros municípios contribuindo para o gerenciamento do resíduo de ETA.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Serviço Autônomo de Água e Esgoto do município de Salto-SP (SAAE Salto) pela cessão dos dados indispensáveis para a realização deste trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 10.004. Resíduos sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
2. ANDREOLI, C. V. (Ed.). *Alternativas de usos de resíduos do saneamento. Usos alternativos de lodos de estações de tratamento de água e estações de tratamento de esgoto*. Curitiba - PR: RiMa, ABES. Projeto PROSAB, 2006. ISBN 85-7022-151-7.
3. BANDIEIRA, M., ZAT, T., SCHUSTER, S. L., JUSTEN, L. H., WEIDE, H., RODRÍGUEZ, E. D. Water treatment sludge in the production of red-ceramic bricks: effects on the physico-mechanical properties. *Materials and Structures* 54, 168 (2021). DOI: 10.1617/s11527-021-01764-0.
4. BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil*, de 5 de outubro de 1988. Brasília, Brasil, 1988.
5. BRASIL. *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010*: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, Brasil, 2010.
6. BRASIL. *Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020*: Atualiza o marco legal do saneamento básico e dá outras providências. Brasília, Brasil, 2020.
7. BRASIL. *Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997*: Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei no 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei no 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, Brasil, 1997.
8. BRASIL. *Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998*: Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília, Brasil, 1998.
9. FERREIRA FILHO S. S., WAELKENS B. E., Minimização da produção de lodo no tratamento de águas de abastecimento mediante uso do cloreto de polialumínio e sua disposição em estações de tratamento de esgotos, *Eng. Sanit. e Ambient.*, v. 14, n. 3, p. 317–326, 2009. DOI: 10.1590/S1413-41522009000300005.
10. GERVASONI, R. *Caracterização e avaliação do potencial de destinação do lodo de estações de tratamento de água do estado do Paraná*. 2014. Disse. (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Exatas, Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Curitiba, PR, Brasil.

11. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Demográfico Brasileiro de 2010*. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.
12. KATAYAMA, V. T.; MONTES, C. P.; FERRAZ, T. H.; MORITA, D. M. Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica. *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 20, n. 4, p. 559–569, 2015. DOI: 10.1590/S1413-41522015020040105046.
13. KIZINIEVIČ, O.; ŽURASKIENĖ, R.; KIZINIEVIČ, V.; ŽURASKAS, R. Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. *Constr. Build. Mater.*, v. 41, p. 464–473, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.041.
14. MONTEIRO, S.N.; ALEXANDRE, J.; MARGEM, J.L.R.; SANCHES, R.; VIEIRA, C.M.V. Incorporation of sludge waste from water treatment plant into red ceramic. *Constr. Build. Mater.*, v. 22, n. 6, p. 1281–1287, 2008. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.01.013.
15. PÁDUA, V. L. (Ed.). *Remoção de microrganismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano*. Rio de Janeiro: ABES, 2009. Projeto PROSAB 5. ISBN: 978-85-7022-165-0.
16. RIBEIRO, C. F. *Uso de sistema de informações geográficas na gestão do lodo das estações de tratamento de água de uma bacia hidrográfica*. 2008. Diss. (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Campinas, SP, Brasil. DOI: 10.47749/T/UNICAMP.2008.433740.
17. RICHTER, C. A. *Tratamento de lodos de estações de tratamento de água*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2001. p. 102. ISBN 978-85-212-0289-9.
18. SCALIZE, P.; ALBUQUERQUE, A.; DI BERNARDO, L. Impact of Alum Water Treatment Residues on the Methanogenic Activity in the Digestion of Primary Domestic Wastewater Sludge. *Sustainability*, v. 13, n. 16, 2021. DOI: 10.3390/su13168783.
19. SILVA, E. M.; MORITA, D.; LIMA, A. C. M.; MACHADO, L. C. G. T. Manufacturing of ceramic bricks with polyaluminum chloride (PAC) sludge from water treatment plant. *Water Sci. Technol.*, v. 71, p. 1638–1645, 2015. DOI: 10.2166/wst.2015.132.
20. TARTARI, R.; DIAZ-MORA, N.; MÓDENES, A. N.; PIANARO, S. A. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. Parte I: Caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense. *Cerâmica*, v. 57, p. 288–293, 2011. DOI: 10.1590/S0366-69132011000300006.
21. URBAN, R. C. *Metodologias para gerenciamento de lodo de ETA e ETE*. 2016. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Campinas, SP, Brasil. DOI: 10.47749/T/UNICAMP.2016.976272.
22. URBAN, R. C.; ISAAC, R. d. L.; MORITA, D. M. Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte. *Revista DAE*, v. 67, n. 219, p. 128–158, 2019. DOI: 10.4322/dae.2019.050.