

II-072 - EMPREGO DE GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS NA PERCOLAÇÃO DE ESGOTO TRATADO NO SOLO SOB CONDIÇÕES ANAERÓBIAS

Isabelly Bezerra Braga Gomes⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Mestre em Engenharia Sanitária pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Carolina Tavares Paula⁽²⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Mestranda em Engenharia Sanitária pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Fagner Alexandre Nunes de França⁽³⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Mestre em Geotecnia pela Universidade de São Paulo. Doutor em Geotecnia pela Universidade de São Paulo.

Hélio Rodrigues dos Santos⁽⁴⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Mestre em mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo. Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo.

Endereço⁽¹⁾: Av. Senador Salgado Filho, 1559 – Lagoa Nova - Natal - RN - CEP: 59015-000 - Brasil - Tel: (84) 4005-2603 - e-mail: isabelly.medeiros@ifrn.edu.br

RESUMO

A disposição final de esgoto tratado no solo é a solução mais empregada em sistemas descentralizados ou onde não existem sistemas coletivos de esgotamento sanitário. Todavia, a colmatção precoce desses dispositivos tem sido observada em alguns casos, mesmo quando os projetos atendem à NBR 13969, com elevados custos para limpeza (geralmente ineficiente) ou construção de novos sistemas de percolação. Dessa forma, neste trabalho, avaliamos a utilização de geotêxteis não tecidos como recobrimento do solo em sistemas de percolação de esgoto tratado como alternativa para preservação da capacidade de infiltração do solo, considerando a hipótese de que a retenção de material sólido no geotêxtil reduz o aporte de sólidos e, portanto, a colmatção do solo. Além disso, caso haja colmatção do sistema “geotêxtil+solo”, pode-se efetivar a troca do geotêxtil com facilidade, renovando, ao menos parcialmente, a capacidade de percolação do solo. Para isso, foram monitoradas três configurações de unidades piloto de percolação (colunas de infiltração): (1) solo arenoso recoberto com geotêxtil não tecido de 130 g/m²; (2) solo arenoso recoberto com geotêxtil não tecido de 300 g/m² e (3) solo arenoso sem cobertura de geotêxtil. Cada configuração foi operada em triplicata, alimentada pelo efluente de um sistema de tratamento composto por tanque séptico seguido de filtro anaeróbio. As mesmas configurações de colunas de infiltração, alimentadas com água potável, também foram testadas em duplicata, para verificar a influência da perda de carga nos geotêxteis ao longo do tempo. Os sistemas foram alimentados continuamente, de maneira que era sempre mantida uma carga hidráulica constante de 10 cm sobre as colunas de infiltração, induzindo-as a condições anaeróbias. O experimento foi operado por 52 dias, sendo que no 38^a dia, os geotêxteis de duas colunas de cada triplicata foram substituídos. Análises de condutividade hidráulica e físico-químicas (turbidez, sólidos, nitrogênio amoniacal e orgânico, nitrato, fósforo e DQO) foram realizadas semanalmente no afluente e efluente das configurações. Concluiu-se que os geotêxteis retiveram parcela considerável dos sólidos presentes no afluente, principalmente o de 300 g/m², reduzindo a colmatção no solo das colunas de percolação. Entretanto, os geossintéticos causaram uma perda de carga considerável, reduzindo os valores de condutividade hidráulica dos sistemas. Os geotêxteis não se mostraram como fator de interferência na eficiência de remoção de nutrientes, DQO e turbidez.

PALAVRAS-CHAVE: Infiltração de Esgoto, Geotêxteis Não tecidos, Colmatção do Solo.

INTRODUÇÃO

O tanque séptico (TS) é o mais conhecido e utilizado dentre os sistemas anaeróbios empregados no tratamento descentralizado de esgoto doméstico, devido a suas características favoráveis, como baixo custo, simplicidade

operacional, baixa demanda de área e baixa produção de sólidos. Entretanto, esse sistema possui suas limitações, como baixa eficiência na remoção de matéria orgânica, microrganismos patogênicos e nutrientes, mesmo quando operado com tempo de detenção hidráulico elevado (MASSOUD et al., 2009).

A disposição de efluentes de TS no solo é uma opção amplamente utilizada. Essa prática, contudo, pode contaminar o solo e as águas. O solo atua como um filtro, depurando os resíduos nele lançados, no entanto, essa capacidade de depuração pode ser alterada em função do efeito cumulativo da deposição dos diversos elementos ainda presentes no efluente tratado. A migração dos poluentes através do solo, para as águas superficiais e subterrâneas, se constitui em uma ameaça para a qualidade dos recursos hídricos utilizados em abastecimento público, industrial, agrícola, comercial, lazer e serviços (CASARINI et al., 2001).

Os mecanismos que envolvem o processo de infiltração de esgotos tratados, não são facilmente compreendidos. Pell e Nyberg (1989) afirmaram que o bom resultado da infiltração é devido ao desenvolvimento da população microbiana nos interstícios da areia, capaz de remover o material orgânico poluente. Em contrapartida, Pedescoll et al. (2011) complementam que não só o processo biológico é capaz de remover os contaminantes de esgotos domésticos, mas também processos físicos e químicos. Assim, a estimativa de parâmetros de projeto para dispositivos de infiltração torna-se complexa e pouco compreendida.

A diminuição dos valores de condutividade hidráulica do solo durante a infiltração de esgotos tratados está associada à obstrução física, decorrente do aporte de sólidos em suspensão e dos coloidais (PELL; NYBERG, 1989); biológica, em virtude do desenvolvimento da população microbiana nas camadas de solo (BAVEYE et al., 1998) e devido à deposição e acumulação de precipitados (PEDESCOLL et al., 2011).

Essa obstrução das camadas do solo configura-se como a colmatagem do meio filtrante, ocasionando o retardo no fluxo do líquido e diminuindo a eficiência da infiltração, independentemente do tipo de solo (SOLEIMANI et al., 2009). Desta forma, a camada colmatante é o principal fator que regula o fluxo em sistemas de disposição no solo de esgoto tratado (BEAL et al., 2006).

Em areias, a condutividade hidráulica é alta no início da disposição do esgoto tratado, permitindo que uma maior carga orgânica se acumule no solo. Já em solos de baixa permeabilidade, como argilas, a baixa capacidade de infiltração inicial determina uma taxa de aplicação reduzida (BEAL et al., 2006).

Rolland et al. (2009) ressaltam que a distribuição de tamanho das partículas de areia é um parâmetro importante na determinação da eficiência do tratamento, bem como a confiabilidade e durabilidade do sistema. Isso porque problemas com colmatagem podem ocorrer em sistemas de disposição do solo, devido ao excesso de biofilme desenvolvido nos interstícios e à carga orgânica aplicada ao sistema.

A camada colmatante se desenvolve com maior intensidade na superfície do solo e logo abaixo dela. Essa região passa a apresentar cor escura, alto acúmulo de matéria orgânica, elevada saturação e alta densidade microbiana (TOMARAS et al., 2009). A espessura dessa camada, segundo Leverenz et al. (2009) varia em função de vários fatores, dentre os quais: a idade e projeto do sistema de disposição, qualidade do esgoto tratado lançado, forma como o efluente do esgoto tratado é aplicado no solo, permitindo ou não a aeração do mesmo, taxas de carregamento e características do solo.

Considerando a aplicação de esgoto no terreno natural como um método de tratamento, além de disposição final, a colmatagem do solo é um fenômeno que pode, até certo ponto, contribuir para a eficiência de processos físico-químicos e bioquímicos na zona de obstrução e na camada insaturada logo abaixo dela. Entretanto, a colmatagem intensa pode levar à disfunção hidráulica e condições anóxicas ou anaeróbias no solo (PAVELIC et al., 2011).

A disposição final no solo do esgoto tratado em sistemas descentralizados cresce como alternativa frente à insuficiente extensão da rede pública de esgotamento sanitário que possibilite a disposição final centralizada aos esgotos domésticos. Além disso, a praticidade construtiva, proximidade com o sistema de tratamento e inexistência de legislações específicas que regulem padrões de lançamento contribuem para o aumento do uso

desses sistemas. Todavia, o rápido esgotamento do solo, devido à colmatção, tem causado o transbordamento desses dispositivos, reduzindo a vida útil dos mesmos.

Um dos grandes desafios na concepção de sistemas de infiltração apresentados na literatura especializada é a avaliação do melhor nível de pré-tratamento de esgoto antes do lançamento no solo. Ademais, observações conflitantes foram relatadas com relação à interferência dos sólidos em suspensão presentes no esgoto tratado e a condutividade hidráulica do solo (BEAL et al., 2006) e a influência da carga hidráulica disponível nas taxas de infiltração do solo (LEVERENZ et al., 2009).

A recuperação desses sistemas de infiltração, após a ocorrência de sua colmatção, também é considerada um grande desafio. Além de difíceis, as limpezas desse tipo de dispositivo normalmente são ineficientes, tornando o processo impraticável em muitos casos. Tais dificuldades levam à desativação dos sistemas colmatados e construção de novas unidades, demandando novas áreas.

Dessa forma, a utilização de geotêxteis não tecidos surge como uma alternativa que pode contribuir para maior eficiência e durabilidade de dispositivos de infiltração. O recobrimento do solo por esse material pode possibilitar a conservação e renovação da capacidade de infiltração do solo uma vez que, a retenção de material sólido pelo geotêxtil pode reduzir a colmatção no solo.

Os geotêxteis são elementos que possuem alta permeabilidade e permitem a passagem de fluidos através de sua estrutura, retendo as partículas sólidas, sendo utilizados, portanto, principalmente como dispositivos filtrantes (DAS, 2006). O crescimento de microrganismos e acumulação de material orgânico em geotêxteis foi observada por Mlynarek et al., (1990) em filtros que protegem sistemas de coleta de chorume em aterros sanitários. Yaman et al., (2005) compararam o desempenho de geotêxteis tecidos e não tecidos com relação à infiltração de esgoto tratado e chegaram à conclusão de que os não tecidos são ainda mais eficientes, visto que exercem sua função provocando menor perda de carga no sistema.

Assim, em vez de buscar pré-tratamentos que reduzam a colmatção do solo e preservem por mais tempo a integridade destes, a utilização do geossintético surge como uma alternativa de prolongar a vida útil dos dispositivos de infiltração. Uma das principais vantagens do uso do geotêxtil é a possibilidade de substituição do material e recuperação do sistema, além do baixo custo da operação. Desta forma, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar o uso de geotêxteis não tecidos no prolongamento da vida útil de dispositivos de percolação em solos arenosos, com disposição de esgoto tratado, sob condições anaeróbicas.

DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Para avaliar a aplicabilidade de geotêxteis na preservação a capacidade de infiltração de esgoto em solos arenosos, foram construídas unidades piloto de percolação (colunas de infiltração) contendo amostras de um solo franco arenoso, que foram alimentadas com o efluente de um sistema de tratamento composto por tanque séptico seguido de filtro anaeróbio (TS+FA_n). Foram monitoradas três configurações de filtros-piloto, cada uma em triplicata: filtro de areia recoberto com geotêxtil não tecido de 130 g/m² (G130); filtro de areia recoberto com geotêxtil não tecido de 300 g/m² (G300); e filtro de areia sem geotêxtil (SG).

Com o objetivo de verificar a influência da perda de carga dos geotêxteis na condutividade hidráulica dos sistemas, foram também monitoradas as três configurações de filtros-piloto alimentados com água potável (AP), proveniente de um poço profundo, sem adição de cloro ou qualquer desinfetante, sendo que cada coluna foi operada em duplicata (Figura 1). Os sistemas eram alimentados continuamente, de maneira que era sempre mantida uma carga hidráulica constante de 10 cm sobre todas as colunas de percolação.

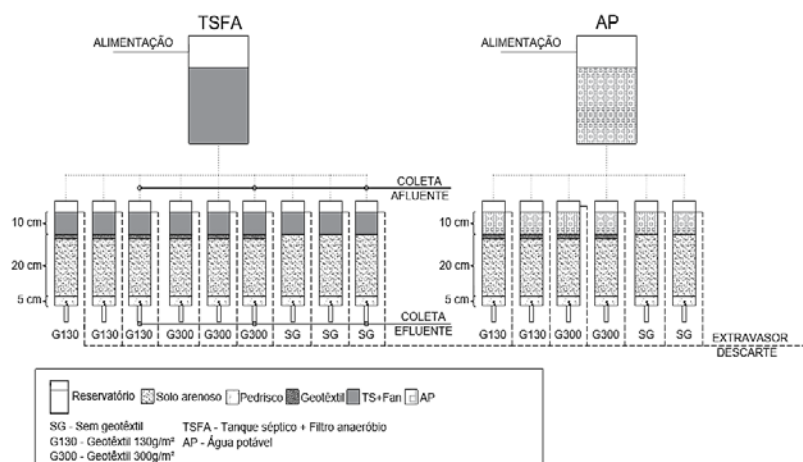


Figura 1 – Configuração experimental dos ensaios de percolação.

Ensaio de condutividade hidráulica com carga constante foram realizados semanalmente nos sistemas de percolação. Com a mesma frequência, análises laboratoriais de sólidos, turbidez, DQO, Fósforo Total, Nitrogênio orgânico, amoniacal e nitrato também foram efetuadas com os afluentes e efluentes (TS+Fan e AP) das colunas de percolação (Tabela 1). As coletas foram realizadas nas extremidades inferiores das configurações e mangueiras de alimentação dos dispositivos de percolação (Figura 1).

Tabela 1: Planejamento experimental para os ensaios de percolação com carga constante

Afluentes	CONDIÇÕES DE ENSAIO	Parâmetros monitorados
TS+Fan– Efluente tanque séptico + filtro anaeróbio.	CARGA: Constante de 10cm RECOBRIMENTO DO SOLO: <ul style="list-style-type: none"> Geotêxtil não-tecido 130 g/m² Geotêxtil não-tecido 300 g/m² Sem recobrimento 	Sólidos (ST, STV, STF, SST, SSV, SSF, SDT, SDV e SDF)*, Turbidez, DQO, Fósforo total, N-orgânico, N-amoniacal, Nitrato e Condutividade hidráulica.
AP – Água potável provida de poço profundo		

*ST – Sólidos Totais; STV – Sólidos Totais Voláteis; STF – Sólidos Totais Fixos; SST – Sólidos Suspensos Totais; SSV – Sólidos Suspensos Voláteis; SSF – Sólidos Suspensos Fixos; SDT – Sólidos Dissolvidos Totais; SDV – Sólidos Dissolvidos Voláteis; SDF – Sólidos Dissolvidos Fixos.

No 38ª dia de experimento, quando a condutividade hidráulica dos filtros-piloto G130 e G300 atingiram respectivamente 0,07 m/dia e 0,04 m/dia e já não era mais possível tecnicamente a medição da condutividade hidráulica, foi iniciado o procedimento de substituição dos geotêxteis, em duas das configurações de cada repetição, abastecidas com TS+Fan. Assim, após a troca, o sistema passou a funcionar em duplicata até o 52ª dia.

Para substituição dos geotêxteis, a extremidade inferior das configurações foi vedada, de forma a manter o solo das colunas saturado com o afluente, não havendo reaeração. O procedimento de troca durou 5 dias tendo em vista a abertura das colunas demandar tempo. Desta forma, o sistema voltou a funcionar no 43ª dia.

Após a desativação das colunas, tanto no 38º dia (uma coluna de cada triplicata) como no 52º dia (duas colunas de cada triplicata), foi efetuada a análise dos sólidos retidos nos meios filtrantes das colunas através do ensaio de quantificação de matéria orgânica no o solo de preenchimento das mesmas.

INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS

As colunas aplicadas ao experimento foram confeccionadas em material transparente (acrílico), para que fosse possível realizar a análise visual da colmatagem do solo. Durante a operação, todas as colunas foram envolvidas

com papel alumínio, de forma a restringir a incidência de insolação e possível desenvolvimento de algas e outros seres fototróficos.

As colunas de percolação possuíam seção quadrada, com dimensões de 4,5 cm e altura útil de 35 cm, dividida em duas partes interligadas por flanges (Figura 2). O preenchimento de uma parcela da coluna com pedrisco contribuiu na distribuição uniforme do escoamento. O fluxo era vertical para baixo com saída na extremidade inferior das colunas.

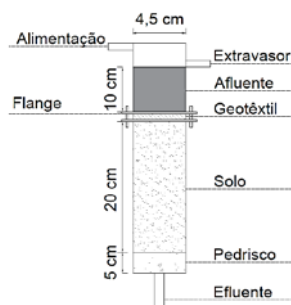


Figura 2 - Detalhe das colunas de percolação.

As dimensões das colunas foram projetadas em uma escala adequada para minimizar os requisitos de volume de alimentação, mas simultaneamente garantir que a influência dos efeitos de parede fosse desprezível, conforme sugerido por Smith e Dillon (1997).

O experimento foi montado em um abrigo coberto com lona escura, em local próximo aos sistemas de tratamento dos afluentes (TS+FAn e AP). Desta forma, a alimentação das colunas era realizada continuamente, induzindo o estabelecimento de condições anaeróbias em toda a sua extensão.

O reservatório, que alimentava o sistema de percolação com afluente TS+FAn, foi abastecido através de bomba centrífuga, que funcionava vinte e quatro horas por dia e bombeava o efluente final do tratamento e recalava para o reservatório de armazenamento, de onde este seguia para a alimentação, por gravidade, das colunas. Para o afluente AP, foi utilizada uma mangueira para alimentar o reservatório, conectada a um ponto de torneira de jardim.

SOLO DE PREENCHIMENTO DAS COLUNAS

O solo utilizado para o experimento foi uma areia com granulometria média uniforme (Tabela 2), originária de sedimentos de Dunas. As amostras tipo deformadas foram coletadas na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, que fica nas imediações do Parque das Dunas de Natal/RN.

A coleta foi realizada utilizando sacos plásticos para conservar o teor de umidade de campo. No laboratório, o solo secou naturalmente e foi peneirado (abertura da peneira: 2 mm), de forma a eliminar folhas, pedras ou qualquer constituinte que não fizesse parte do mesmo. A caracterização física do solo foi realizada previamente por Fontoura (2015).

Tabela 2: Índices físicos da areia

ÍNDICES FÍSICOS	VALORES
Massa específica dos sólidos	2,62 g/cm ³
Coefficiente de uniformidade, C_u	1,861
Coefficiente de Curvatura, C_c	0,971
Diâmetro efetivo, D_{10}	0,153
Índice de vazios mínimo, e_{\min}	0,59
Índice de vazios máximo, e_{\max}	0,80

FONTE: Fontoura (2015)

A massa de solo seca a ser inserida na coluna foi determinada a partir do índice de vazios e da massa específica dos sólidos. O valor do índice de vazios utilizado foi determinado pela Equação (1), considerando a densidade relativa de compactação igual a 70%, tendo em vista que esse valor aproxima-se do estado natural da areia compactada (DAS, 2006).

equação (1)

A massa de solo foi introduzida em cada coluna de forma fracionada (cinco camadas de quatro centímetros cada), tendo em vista que o solo estava seco e era necessária a compactação em camadas para obtenção da densidade relativa desejada. Em cada porção de solo adicionada um soquete de madeira com dimensões compatíveis com a seção transversal das colunas auxiliava na compactação do solo.

Colunas que obtiveram valores de condutividade hidráulica com variação de 15% com relação às demais de mesma configuração foram montadas novamente e testadas até que sua condutividade estivesse inserida dentro do limite estabelecido, conforme o procedimento sugerido por PAVELIC et al. (2011).

GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS

Duas especificações de geotêxteis não tecidos foram utilizadas no experimento: 130g/m² (G130) e 300g/m² (G300). A decisão de testar diferentes gramaturas foi induzida pelos seguintes questionamentos: observação de qual gramatura interferia mais nas cargas hidráulicas do sistema, influência da espessura do geotêxtil no local de formação do biofilme, resistência do material as deformações e intempéries, praticidade e o custo de instalação.

Os geotêxteis utilizados possuem fibras de alta tenacidade, compostas de poliéster e polipropileno além de alta resistência a ataques químicos e biológicos. Suas propriedades se diferenciam principalmente nos aspectos hidráulicos e mecânicos (Tabela 3).

Tabela 1: Propriedades dos geotêxteis utilizados nos experimentos

PROPRIEDADES	G130	G300
Resistência a Tração (kN)	7	16
Resistência ao rasgo trapezoidal (N)	160	340
Resistência ao puncionamento (kN)	1,20	2,60
Abertura média de filtração (µm)	160	110
Permeabilidade normal (cm/s)	0,4	0,4

FONTE: Ober (2015)

O geotêxtil foi instalado na superfície do solo e preso por flanges que conectavam a parte inferior da coluna (solo + pedrisco) e a superior (carga hidráulica + extravasamento) (Figura 2). Para evitar vazamentos, uma camada de silicone foi aplicada externamente no flange.

AFLUENTES: TS+FAN E AP

O afluente TS+FAN utilizado para a alimentação das colunas era proveniente de um sistema de tratamento composto por tanque séptico com duas câmaras em série seguido por filtro anaeróbio. O sistema recebia esgoto com características essencialmente domésticas, coletado das residências universitárias, do departamento de educação física, do restaurante universitário e do pouso universitário da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Com relação ao afluente AP, o mesmo provinha de um reservatório de distribuição, abastecido por um poço profundo também localizado no campus da UFRN. O aquífero Barreiras é o responsável pelo abastecimento de todos os poços da universidade. A caracterização dos afluentes está representada na Tabela 4.

Tabela 4: Caracterização média dos afluentes utilizados

PARÂMETRO	TS+FA _n	AP
Turbidez (NTU)	43,97	1,04
pH	7,34	5,33
Nitrogênio amoniacal (mg N/l)	72,50	0,34
Nitrogênio orgânico (mg N/l)	4,25	0,79
Nitrogênio Total Kjeldhall (mg N/l)	76,75	1,13
Nitrato (mg/l)	0,72	33,54
Fósforo total (mg/l)	8,87	0,69
Sólidos totais (mg/l)	526,14	40,50
Sólidos suspensos totais (mg/l)	36,14	2,00
Sólidos dissolvidos totais (mg/l)	490,00	38,50

ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados com carga constante em todas as colunas de solo. Foi medido, o tempo necessário para a coleta de determinado volume do efluente e, conhecendo fatores como a altura da coluna de solo, a carga hidráulica sobre o solo e a área da seção da coluna, se utilizou da Equação (2) para o cálculo da condutividade hidráulica (DAS, 2006):

$$k = \frac{V \times L \times 86.400}{t \times A \times (L + h) \times 100} \quad \text{equação (2)}$$

Na equação anterior, k representa a condutividade hidráulica (m/dia), V o volume coletado (ml), L a altura da coluna de solo (cm), t o tempo necessário para coletar V (s), A a área da seção da coluna (cm²) e h a carga hidráulica sobre o solo (cm).

ANÁLISES LABORATORIAIS

As análises físico-químicas laboratoriais foram realizadas semanalmente nos afluentes e nos efluentes das colunas de percolação alimentados por TS+FA_n. Os afluentes e efluentes das configurações alimentadas por AP passaram apenas por análises de turbidez e sólidos durante todo o experimento, as demais análises foram realizadas apenas nas três primeiras semanas. Todos os métodos utilizados nas análises físico-químicas seguem as prescrições do Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water (APHA, 2012) e estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Análises laboratoriais realizadas

PARÂMETRO	MÉTODO	REFERÊNCIA	PROTOCOLO
Sólidos (ST, STV, STF, SST, SSV, SSF, SDT, SDV e SDF)*	Gravimetria	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA et al., 2012)	2540 - B,C,D,E
Fósforo total	Colorimétrico		4500 - E
Nitrogênio amoniacal	Método Kjeldahl		4500 - B, C
Nitrogênio orgânico	Método Kjeldahl		4500 - C
N-NO ₃ ⁻	Colorimétrico		4500-NO ₃ ⁻ - B
DQO	Titulométrico		5220 - B
Turbidez	Nefelométrico		2130 - B

*ST – Sólidos Totais; STV – Sólidos Totais Voláteis; STF – Sólidos Totais Fixos; SST – Sólidos Suspensos Totais; SSV – Sólidos Suspensos Voláteis; SSF – Sólidos Suspensos Fixos; SDT – Sólidos Dissolvidos Totais; SDV – Sólidos Dissolvidos Voláteis; SDF – Sólidos Dissolvidos Fixos.

TRATAMENTOS ESTATÍSTICOS

Realizou-se a análise estatística descritiva dos dados coletados, obtendo-se médias aritméticas das triplicatas para todos os parâmetros físico-químicos analisados. Foi realizada a análise de variâncias (ANOVA) a fim de se avaliar estatisticamente as variáveis (parâmetros analisados) que apresentaram maior efeito com relação ao uso dos geotêxteis nas colunas de percolação.

Foi realizado o teste t de Student pareado de forma a comparar o teor de matéria orgânica na primeira análise do solo (38^a dia) e na segunda (52^a dia), de forma a verificar a significância estatística entre elas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Nas colunas que receberam o efluente do TS+FAn, a condutividade hidráulica (Figura 4), apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$), entre SG e G300, a partir do 7^a dia de experimento até o 38^a (antes da substituição dos geotêxteis), quando testadas dia à dia. G130 também mostrou diferenças com relação à SG, do 24^a ao 38^a dia. Já G130 e G300 foram estatisticamente diferentes apenas nos 31^a e 38^a dias. O processo de colmatção é evidente nessas colunas pela redução da condutividade hidráulica ao longo do tempo.

Por outro lado, nas colunas SG, G130 e G300, as quais foram alimentadas por água potável, observaram-se diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) na condutividade hidráulica nos 52 dias de experimento (Figura 4). Nesse caso, a condutividade hidráulica reduz com o tempo, tendendo assintoticamente a um valor constante.

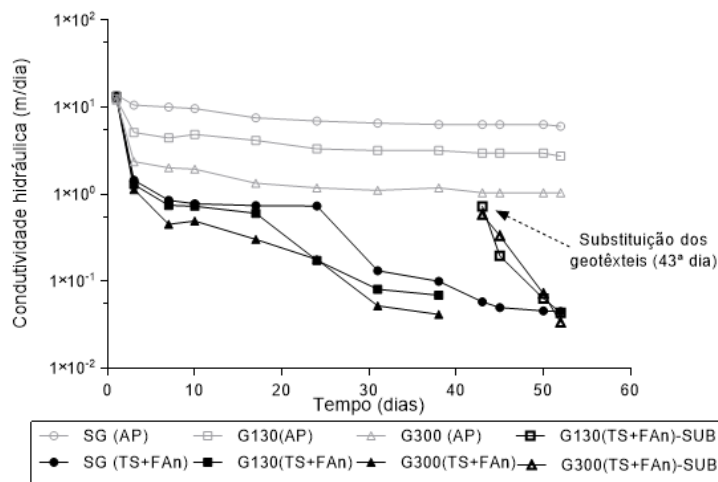


Figura 1– Condutividade hidráulica ao longo do tempo para percolação de AP e TS+FAn

A diferença na condutividade hidráulica entre as colunas nas quais percolava água potável caracteriza-se pela perda de carga provocada pelo geotêxtil. Essa perda de carga também interferiu nas configurações que receberam o efluente do TS+FAn, sendo a G300 a mais afetada por esse fenômeno.

A redução da condutividade hidráulica na percolação de TS+FAn ocorreu devido à redução do volume de vazios no solo, ocupados pelos sólidos retidos nas colunas. Isso porque a condutividade hidráulica depende da existência de vazios pelos quais o líquido pode fluir, e a ocupação desses espaços reduziu a capacidade de infiltração do solo.

A condutividade hidráulica após a substituição dos geotêxteis nas colunas nas quais percolava o efluente do TS+FAn mostrou um aumento significativo ($p < 0,0001$) em seus valores com relação aos imediatamente antes da troca, para ambas as configurações (G130 e G300), melhorando a capacidade de infiltração do sistema (Figura 04). Houve uma diferença significativa também, entre a condutividade hidráulica em SG e as colunas com o novo geotêxtil durante sete dias após a substituição.

A recuperação da capacidade de infiltração dos sistemas após a substituição dos geotêxteis ocorreu pelo fato do material novo conter uma quantidade menor de partículas retidas em comparação ao que foi removido. Isso permitiu uma menor perda de carga e consequentemente aumento nos valores de condutividade hidráulica.

No entanto, a melhora no potencial de infiltração reduziu rapidamente, e a condutividade hidráulica atingiu em poucos dias, valores inferiores àqueles que antecederam a troca do geossintético. A análise entre a variação da condutividade hidráulica em função da variação do tempo ($\frac{dh}{dt}$) (Figura 5) mostra que a capacidade de infiltração dos sistemas reduziu de forma mais rápida com o novo geotêxtil. Tal fato pode ser justificado pela colmatação parcial que já havia ocorrido na areia.

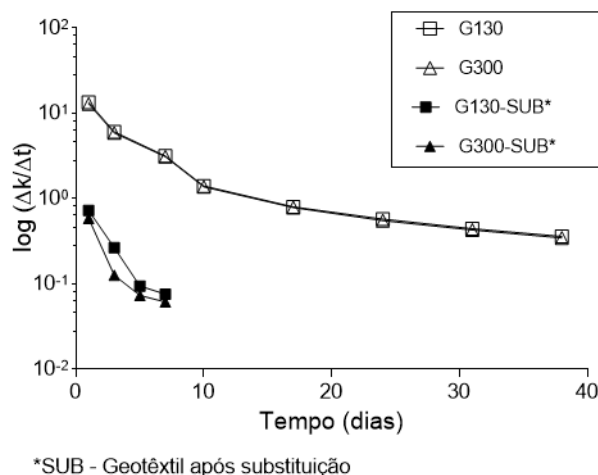


Figura 2 – Variação da redução da condutividade hidráulica em função do tempo antes e após a substituição dos geotêxteis

A redução da condutividade hidráulica nas colunas que percolaram esgoto tratado, sob condições de anaerobiose, ocorreu de forma acelerada, assim como em estudos desenvolvidos por LEVERENZ et al. (2009) e PAVELIC et al. (2011), em que esgoto tratado foi disposto em solos submetidos a condições anaeróbias. OLIVEIRA et al. (2013) e BEAL et al. (2006) também analisaram a infiltração no solo de esgoto previamente tratado, através de colunas de percolação sem o uso de geotêxtil, com a aplicação do afluente efetuado em bateladas e provindo de um tratamento aeróbio. Em comparação ao presente experimento, o valor da condutividade hidráulica atingida nos trabalhos citados foi muito superior, indicando estado mais brande de colmatção do sistema. Assim, a presença de oxigênio dissolvido permite a proliferação de uma biomassa aeróbia, que degrada matéria orgânica de forma mais rápida.

REMOÇÃO DE SÓLIDOS

A eficiência de remoção de SST nas colunas G300 (Figura 6) foi significativa ($p < 0,05$) em relação às demais configurações, confirmando que o geotêxtil de maior gramatura retém uma maior parcela de sólidos.

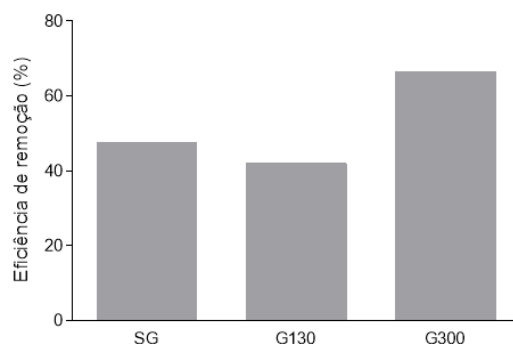


Figura 3 – Eficiência de remoção de SST, SSV e SSF nas colunas de percolação.

O acúmulo de SST por volume infiltrado de esgoto tratado no sistema apresentou uma boa correlação com a condutividade hidráulica ($p < 0,05$) (Figura 7). Esse fato é confirmado pela literatura, já que a correlação entre a diminuição na condutividade hidráulica e a carga total acumulada de sólidos suspensos é significativa (PEDESCOLL et al., 2011; SIEGRIST et al., 1987).

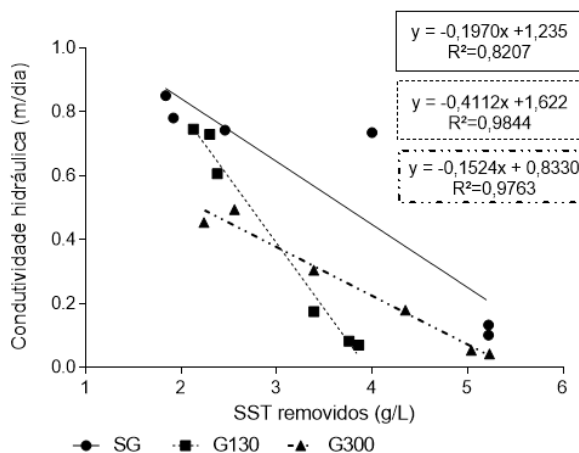


Figura 4 – Relação de SST por volume de afluente infiltrado com a condutividade hidráulica

Foi possível observar uma boa correlação entre o volume infiltrado de TS+FA e os sólidos totais removidos (Figura 8), constatando-se que G300 possui uma maior capacidade de retenção de sólidos por volume infiltrado.

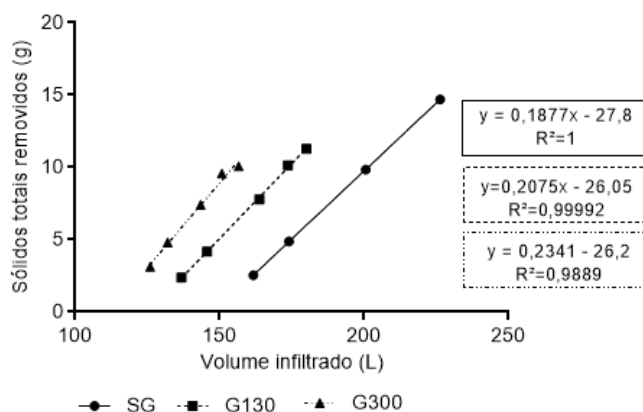


Figura 5 – Relação dos ST removidos e volume de esgoto tratado infiltrado

Nas configurações que não utilizaram o geotêxtil, o acúmulo de sólidos pode ser considerado um indicador direto do estado de colmatação do solo, contribuindo para a redução da condutividade. No entanto, esse processo não ocorre da mesma forma nos sistemas que fazem o uso do geotêxtil, uma vez que, o material retém grande parte dos sólidos, evitando o contato dos mesmos com o solo, reduzindo a colmatação. Já a redução da condutividade hidráulica é influenciada tanto pela retenção de sólidos como pela perda de carga causada pela presença do geotêxtil.

REMOÇÃO DE NUTRIENTES, DQO E TURBIDEZ

Não foram observadas remoções significativas de nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrato e fósforo total durante a operação das colunas, indicando que a utilização do geotêxtil não influenciou neste aspecto. A baixa eficiência quanto à remoção desses constituintes era de se esperar, devido às condições anaeróbias de operação do sistema.

Com relação à turbidez, houve redução dos valores deste parâmetro em todas as configurações, quando comparadas ao afluente, devido à remoção de sólidos em suspensão. No entanto, não foram verificadas diferenças entre os arranjos ($p=0,966$), mostrando que o uso do geotêxtil não interfere na redução da turbidez.

A colmatção das colunas de percolação contribuiu para a redução da DQO durante a infiltração do esgoto tratado. As configurações SG e G130, que obtiveram uma colmatção mais intensa, mostraram diferenças ($p=0,019$) de redução da concentração da DQO com relação ao afluente.

Por outro lado, G300 não apresentou diferenças ($p=0,255$) tanto entre o afluente, quanto entre os efluentes das demais colunas. Contudo, em termos de eficiência de remoção de DQO, nenhuma das colunas apresentou significância. Assim como nos demais parâmetros químicos analisados, o geotêxtil não se mostrou como fator de interferência na eficiência dos sistemas em relação a tal parâmetro.

CONCLUSÃO

O uso dos geotêxteis não tecidos auxilia na preservação do solo arenoso, sob condições anaeróbias, em sistemas de percolação de esgoto tratado. Isso ocorre porque grande parte dos sólidos presentes no afluente fica retida no geotêxtil, principalmente no de 300 g/m^2 . Assim, a colmatção no solo dos sistemas que fazem o uso do geossintético ocorre em menores proporções, conservando a integridade do solo e, consequentemente, prolongando a capacidade de infiltração do mesmo.

A falta de aeração em sistemas de percolação acelera a colmatção, interferindo na capacidade de infiltração do solo arenoso. Outros fatores como a taxa de aplicação, carga disponível, temperatura e a qualidade do esgoto tratado lançado no solo, também interferem no processo de colmatção.

Várias distribuições de sistemas de percolação podem ser testadas a fim de verificar quais fatores interferem na redução da capacidade de infiltração dos solos, de forma a encontrar melhores condições para sistemas de disposição. As variações dessas novas distribuições podem incluir: diferentes tipos de solo, taxas de aplicação variáveis, tempo de procedimento prolongado, tipo do geotêxtil, condições ambientais e etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22 ed. New York: American Public Health Association Inc., 2012.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13969: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1997.
3. BAVEYE, P.; VANDEVIVERE, P.; HOYLE, B.L.; DELEO, P.C.; SANCHEZ DE LOZADA, D. Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, volume 28, p. 123-191, 1998.
4. BEACH, D.; MCCRAY, J.; LOWE, K.; SIEGRIST, R. Temporal changes in hydraulic conductivity of sand porous media biofilters during wastewater infiltration due to biomat formation. Journal of Hydrology, volume 311, p. 230-243, 2005.
5. BEAL, C. D.; GARDNER, E. A.; KIRCHHOF, N. W. Menzies. Long-term flow rates and biomat zone hydrology in soil columns receiving septic tank effluent. Water Research, volume 40, p. 2327-2338, 2006.
6. CASARINI, D.C.P.; DIAS, C.L. & LEMOS, M.M.G. Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo. IV Série. São Paulo, CETESB, 2001. 73p. (Série Relatórios Ambientais)
7. DAS, B. M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. 6. ed. Sacramento: Thomson, 2006.
8. DAVIES, B. E. Loss-on-ignition as an Estimate of Soil Organic Matter. Soil Science Society of America Proceedings, v. 38, p. 347-353, 1974.
9. FONTOURA, T. B. Comportamento tensão-deformação e resistência ao cisalhamento de uma areia de dunas cimentada artificialmente. 2015. 162 f. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.
10. LEVERENZ, H. L.; TCHOBANOGLOUS, G.; DARBY, J. L. Clogging in intermittently dosed sand filters used for wastewater treatment. Water Research, p.695-705, fev. 2009.

11. MASSOUD, May A; AKRAM TARHINI, Joumana A. Nasr. Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *Journal of Environmental Management*, p.652–659, jul.2009.
12. MLYNAREK, J.; LAFLEUR, J.; LEWANDOWKI, J.B. Field study of long term geotextile performance. *Proceedings of the Fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products. The Hague, Netherlands, volume. 1, p. 259-262, 1990.*
13. OBER. Geofort Geotêxtil: catálogo. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em:< http://www.obergeio.com.br/catalogo/catalogo_geofort.pdf>. Acesso em: 18 dez.2015.
14. OLIVEIRA JÚNIOR, J. L. de; SOUSA, J. T. de; SILVA, S. A. da. Comportamento da Infiltração de Esgotos Domésticos Tratados em Sistemas Anaeróbios. *Conex. Ci. e Tecnol.*, Fortaleza, p.18-24, nov. 2013.
15. PAVELIC, P. et al. Laboratory assessment of factors affecting soil clogging of soil aquifer treatment systems. *Water Research*, p. 3153-3163, abr. 2011.
16. PEDESCOLL, A. et al. The effect of primary treatment and flow regime on clogging development in horizontal subsurface flow constructed wetlands: Anexperimental evaluation. *Water Research*, p.3579-3589, jun. 2011.
17. PELL, M.; NYBERG, F. Infiltration of wastewater in a newly started pilot sand-filter system: Development and distribution of the bacterial populations. *Journal of Environmental Quality*, volume 18, p. 457-462, 1989.
18. RICE, R. C.. Soil Clogging during Infiltration of Secondary Effluent. *Water Pollution Control Federation*, p. 708-716, abr. 1974.
19. ROLLAND, L.; MOLLE, P.; LIE'NARD, A.; BOUTELDJA, F.; GRASMICK, A. Influence of the physical and mechanical characteristics of sands on the hydraulic and biological behaviors of sand filters. *Desalination*, volume 248, p. 998-1007, 2009.
20. SIEGRIST, R. L.; BOYLE, W. C. Wastewater-Induced soil clogging development. *Journal of Environmental Engineering*. p. 550-566. jun. 1987.
21. SOLEIMANI, S. V; GEEL, P. J.; ISGOR, O. B.; MOSTAFA, M. B.; Modeling of biological clogging in unsaturated porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*, volume 106, p.39–50, 2009.
22. TOMARAS, J. et al. Microbial Diversity of Septic Tank Effluent and a Soil Biomat. *Applied and Environmental Microbiology*, Colorado, p. 3348-3351, mar. 2009.
23. YAMAN, C.; MARTIN, J. P.; KORKUT, E. Use of Layered Geotextiles to Provide a Substrate for Biomass Development in Treatment of Septic Tank Effluent Prior to Ground Infiltration. *Journal of Environmental Engineering*, p.1667-1675, dez. 2005.
24. SMITH, A.; DILLON, P. Fluid flow and biogeochemical processes in porous media: a survey of laboratory columns designs. *Centre for Groundwater Studies Report*, volume 77, 1997.