

III-457 - SIMULAÇÃO DE FLUXO VERTICAL EM ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Victoria Ottoni Almeida de Souza⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Mestre em Geotecnia Ambiental pela COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro. Engenheira Civil da COPPE/UFRJ. Doutoranda em Geotecnia Ambiental no Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ.

Claudio Fernando Mahler⁽²⁾

Doutorado em Geotecnia Clássica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Prof. Associado III da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PEC/COPPE/UFRJ). Líder do Grupo de Estudos em Tratamento de Resíduos (GETRES) na UFRJ.

Martinus Theodorus van Genuchten⁽³⁾

Doutorado em Física de Solos pela New Mexico State University, Estados Unidos. Professor no Department of Earth Sciences da Utrecht University, Holanda. Professor Colaborador no Departamento de Engenharia Mecânica da COPPE/UFRJ.

Endereço⁽¹⁾: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Mecânica, COPPE. Caixa Postal 68503 – CEP 21945-970, Rio de Janeiro, Brasil. Tel: (21) 2562-8390 e-mail: victoria@mecanica.coppe.ufrj.br

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo principal estudar e simular o fluxo de água em camadas de cobertura de aterros sanitários através do emprego do código computacional HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 1998) e comparar tais resultados com resultados de monitoramento de um caso real de aterro sanitário.

Adicionalmente, foram realizados dois estudos complementares como proposta de coberturas especiais para a camada de cobertura final, visando à minimização da infiltração através desta e, consequentemente, por todo o corpo do aterro. A primeira cobertura estudada foi uma barreira capilar construída com composto de resíduo sólido urbano e a outra opção analisada foi a de uma cobertura vegetal com gramíneas e espécies nativas da região. Este estudo não contemplou o transporte de contaminantes no aterro.

PALAVRAS-CHAVE: Aterros Sanitários, Fluxo Vertical, Vazão de Percolados, Estudo de Caso, HYDRUS-1D.

INTRODUÇÃO

A presença de percolados em aterros sanitários tem se mostrado um problema de difícil solução. O controle de seu fluxo é de extrema importância, valendo observar que, nos procedimentos mais modernos, não se busca uma vedação total do aterro, uma vez que os processos de degradação precisam de água e oxigênio.

Por outro lado, o conhecimento prévio da geração de lixiviados é de extrema importância para a definição de estratégias de gestão, assim como na definição de procedimentos de tratamento a serem adotados no projeto de um aterro. Características tais como: local, tipo de resíduos depositados, tamanho das partículas, clima, método de exploração, sistemas de drenagem implantados e sistema de impermeabilização da base são fatores que influenciam e afetam as características quantitativas e qualitativas do lixiviado (RUSSO & VIEIRA, 2000).

Dessa forma, o conhecimento dos processos hidrológicos que ocorrem no interior do aterro, assim como a previsão do fluxo ao longo da sua vida útil e no pós-fechamento é de extrema importância para as manobras de operação do aterro tais como recirculação, armazenamento e tratamento de lixiviados, para posterior lançamento no corpo receptor ou mesmo para a previsão de falhas na cobertura final ou na camada de impermeabilização da base.

Adicionalmente, cabe ressaltar a influência preponderante da camada de cobertura final em todos os processos hidráulicos ligados ao balanço hídrico, na geração de líquidos que percolam através das camadas do aterro em direção à sua camada de base, e daí, ao sistema de drenagem e captação.

Buscando conhecer melhor o fluxo de líquidos no aterro como um todo, foram desenvolvidos diversos modelos numéricos para simulação dos processos que ocorrem no interior dos aterros sanitários, constituindo-se numa poderosa ferramenta para o entendimento da gestão do sistema, que serve para auxiliar na definição das estratégias do empreendimento, de uma forma global.

Modelos numéricos para simular e analisar a constituição e efeitos das diferentes camadas de cobertura podem ser de grande utilidade, porém, se adequadamente empregados. A escolha de um determinado modelo, nem sempre se constitui numa tarefa fácil, pois depende de uma série de variáveis. Um modelo, que possa resultar numa análise adequada para uma determinada situação de campo, nem sempre é adequado para a análise de outra situação que possa parecer semelhante. Além disso, a dificuldade na aquisição de dados, tanto em termos quantitativos quanto qualitativamente suficientes, que na maioria das vezes necessitam de ajustes para o caso específico estudado, acaba por invalidar o emprego de determinado modelo.

Diante disso, buscou-se compreender, através da utilização do código computacional HYDRUS, em sua versão unidimensional, o fluxo de percolados em aterros de resíduos sólidos urbanos.

O programa HYDRUS-1D simula o movimento unidimensional de água, calor e soluto, em meios porosos variavelmente saturados, para várias condições limite, incluindo precipitação e evaporação. A solução do problema requer a definição da distribuição inicial de pressão (o que dá a distribuição hídrica inicial) e das condições de contorno do sistema em questão, descritas na modelagem do problema.

Como caso prático, estudou-se o fluxo de água no aterro sanitário de Nova Iguaçu. Aplicações para casos de coberturas com barreiras capilares e plantio de vegetação foram também avaliadas.

O desenvolvimento dessa pesquisa contou com o apoio de Laboratório de Geotecnia do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) pelas informações fornecidas relativamente a dados meteorológicos, da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro pela disponibilidade de informações de pluviometria obtidas na internet referentes ao Sistema Alerta Rio e, fundamentalmente, da empresa que administra o aterro, pelas informações e dados fornecidos.

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho baseia-se em dados obtidos em Aterro Sanitário, cuja área de implantação está situada entre as latitudes de 22° 30' e 23° S e os meridianos de 043°00'W, em região de planície.

Os dados referentes à vazão de percolados foram fornecidos pela empresa que administra o aterro. A Tabela 1 apresenta a produção anual de percolados, desde o segundo ano da disposição de resíduos em células (janeiro de 2004) até dezembro de 2010.

Tabela 1 – Quantitativo de resíduos recebidos e geração anual de percolados.

ANO	PARÂMETROS	TOTAL ANUAL	TOTAL ACUMULADO
2003	Resíduo (Ton)	294.607	294.607
	Percolado (m³)	-	-
2004	Resíduo (Ton)	580.682	875.289
	Percolado (m³)	30.084	-
2005	Resíduo (Ton)	796.115	1.671.403
	Percolado (m³)	55.445	-
2006	Resíduo (Ton)	532.337	2.203.740
	Percolado (m³)	41.041	-
2007	Resíduo (Ton)	365.671	2.569.411
	Percolado (m³)	41.899	-
2008	Resíduo (Ton)	316.636	2.886.048
	Percolado (m³)	55.088	-
2009	Resíduo (Ton)	68.561	2.954.609
	Percolado (m³)	50.103	-
2010	Resíduo (Ton)	97.693	3.052.301
	Percolado (m³)	33.098	-

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Geotecnia do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, e constou, em sua fase preliminar, de 05 etapas distintas: 1) Coleta de amostras no campo (CTR - Nova Iguaçu); 2) Realização de ensaios de laboratório para a determinação de parâmetros geotécnicos e hidráulicos, para aplicação posterior no HYDRUS-1D; 3) Análise dos parâmetros visando escolha destes para entrada no Programa; 4) Realização de simulações preliminares para Análise de Sensibilidade das variáveis do Modelo; 5) Definição do(s) Modelo(s) para o cálculo final da vazão de percolados; e, 5) Comparação dos resultados obtidos com as vazões monitoradas no aterro. Numa etapa complementar foram analisadas algumas hipóteses para cobertura final, adicionadas à estrutura existente no aterro, com vistas à minimização da infiltração.

Foram utilizados dados diários de precipitação da Estação de Anchieta, localizada ao norte do Município do Rio de Janeiro, por se tratar da estação mais próxima ao aterro, operando na região. Os dados foram obtidos através do site AlertaRio, da Fundação GEORIO (<http://www2.rio.rj.gov.br/georio/site/alerta/alerta.htm>), juntamente com dados de temperaturas máximas e mínimas diárias, da Estação Automática de Ecologia Agrícola (Seropédica), fornecidos pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Para o estudo do fluxo através das simulações com o código HYDRUS, os dados meteorológicos empregados corresponderam a um período de 10 anos (janeiro/2001 – dezembro/2010), replicados para 20 anos.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de granulometria para as amostras AMS01, AMS02 e AMS03, referentes aos pontos de coleta PT-02, PT-01 e PT-03, do solo de cobertura (Figura 1).

Tabela 2: Composição Granulométrica para as amostras 01, 02 e 03 dos solos das 3 regiões do Sub-Aterro 1.

Composição Granulométrica amostra 01 (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
31	21	13	18	14	3
Composição Granulométrica amostra 02 (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
25	18	15	18	19	5
Composição Granulométrica amostra 03 (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
36	16	8	13	23	4

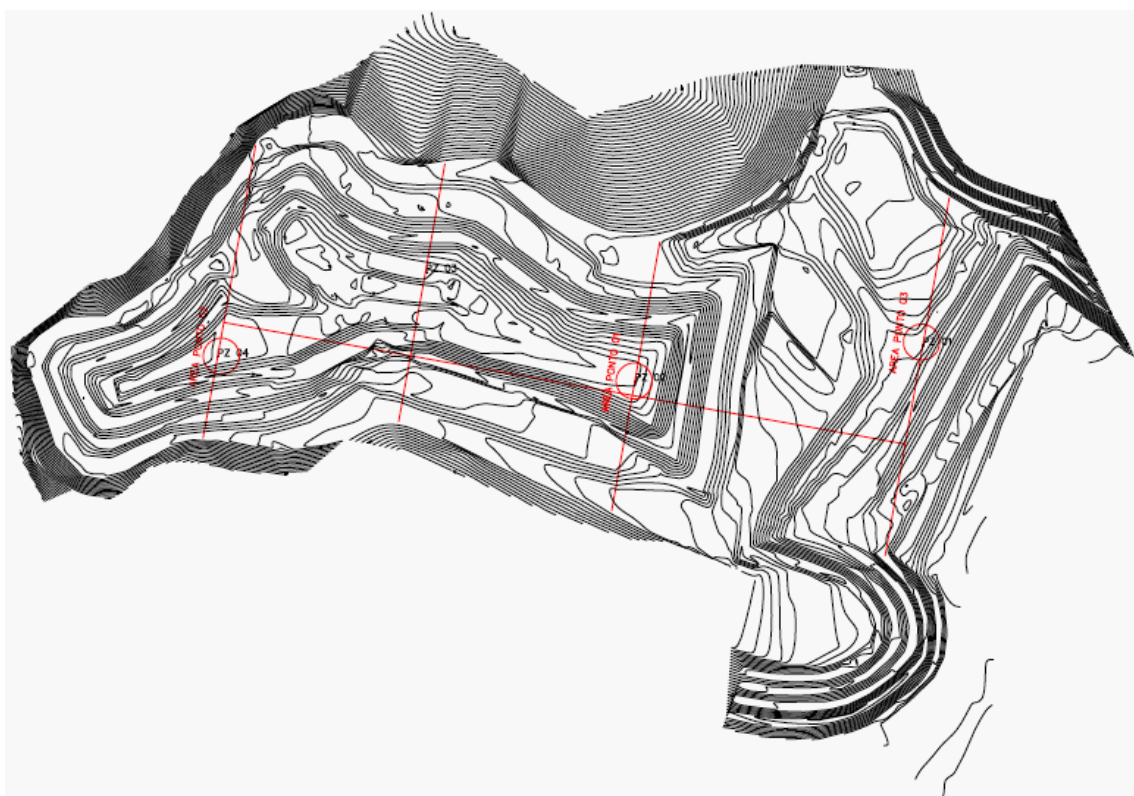


Figura 1 – Localização dos pontos de retirada das amostras para ensaios de permeabilidade e composição granulométrica (da esquerda para a direita: PT-02, PT-01 e PT-03, marcados com círculos).

A determinação da condutividade hidráulica saturada das amostras coletadas em pontos distintos do aterro (Figura 1) foi obtida através de ensaios de carga variável, realizados em conformidade com a NBR 14545/2000, com a utilização do permeâmetro de carga variável, do Laboratório de Geotecnia da UFRJ.

A Tabela 3 apresenta os valores da condutividade hidráulica vertical média das amostras do solo de cobertura do Sub-Aterro 1 (AS-1).

Tabela 3: Valores médios calculados (em cm/s) para as permeabilidades de cada ponto e valor médio final para emprego nas simulações.

	K_{AM1}	K_{AM2}	K_{AM3}	K_m
PT-01	3,88804E-05	3,53667E-05	3,04000E-05	3,48824E-05
PT-02	3,74750E-05	1,93000E-05	-	2,83875E-05
PT-03	8,75333E-06	9,05000E-06	3,48000E-05	1,75344E-05
	Média Final			2,69345E-05

(-) amostra não aproveitada por estar danificada.

Os valores dos parâmetros de condutividade hidráulica para os resíduos foram selecionados de pesquisa recente de BREITMEYER (2011), onde o autor realiza um estudo amplo e detalhado dos parâmetros hidráulicos, relativamente aos resíduos sólidos urbanos (RSU), através do emprego do programa HYDRUS-1D, utilizando o modelo de van Genuchten-Mualem. A Tabela 4 apresenta os parâmetros definidos para os resíduos que foram empregados em todas as simulações.

Tabela 4 – Parâmetros hidráulicos para a permeabilidade média dos RSU (BREITMEYER, 2011)

van Genuchten-Mualem							
Material	ρ_d (Kg/m ³)	K_s (m/s)	θ_s	θ_r	α (kPa ⁻¹)	n	l
RSU (ρ_M)	632	2,7 x105	0,53	0,25	2,00	1,98	0,50

METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO ATRAVÉS DO PROGRAMA HYDRUS-1D

O Modelo Geométrico:

Para todas as simulações realizadas, foram consideradas as camadas de cobertura final e intermediárias, como tendo espessura de 60 cm, e camadas de resíduos, com espessuras de 500 cm, com pequenas variações na camada de resíduos da base, de acordo com a necessidade de definição dos perfis estudados. Os perfis simulados, para o estudo preliminar realizado, corresponderam aos pontos de coleta das amostras (PT-01, PT-02 e PT-03) e podem ser observados na Figura 2.

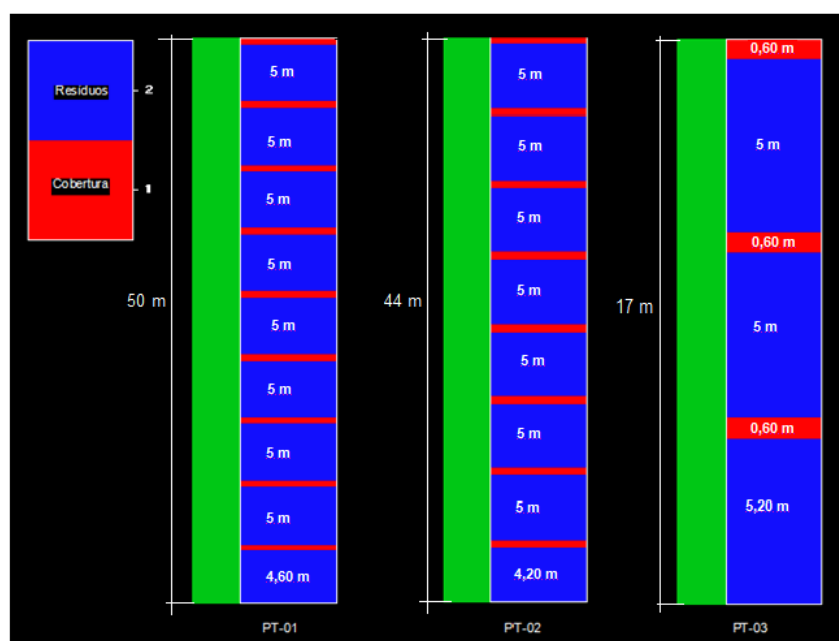


Figura 2 – Perfis dos pontos PT-01 (50m), PT-02 (44m) e PT-03 (17m), criados pelo HYDRUS-1D

O modelo adotado para as propriedades hidráulicas do solo foi o de van Genuchten – Mualen, para o qual se considerou como condição inicial o solo não saturado.

Na etapa preliminar, foi realizada a análise de sensibilidade para alguns parâmetros e variáveis de entrada no Programa HYDRUS-1D, com o objetivo de se conhecer como a mudança nos valores de determinados parâmetros e de algumas variáveis de entrada, poderia impactar nos resultados das simulações. Essa análise teve também como objetivo conhecer o comportamento do fluxo através da região vadosa do corpo do aterro para o ajuste de alguns parâmetros, visando o emprego destes nas simulações dos Modelos Finais do aterro, para obtenção da vazão de líquidos e, comparação com os dados de monitoramento disponíveis.

Numa etapa complementar, verificou-se o efeito de barreira capilar constituída por composto de RSU, obtido na Usina de Compostagem do Caju, e coberturas vegetais com gramíneas e espécies nativas da região.

O cálculo final da geração de percolados, foi realizado através do estabelecimento de dois cenários, baseados na estrutura real das células do Sub-Aterro 1.

CENÁRIO 1: Células consideradas isoladamente e com base nas dimensões reais de cada uma delas.

Para este cenário, foi considerada a influência de cada célula, isoladamente, tomada como a média aritmética da área do piso e da crista de cada célula (Figura 3) e tendo como premissa que o fluxo gerado em cada célula é todo captado pela rede de drenagem desta.

Para o cálculo do fluxo relativamente a este cenário, adotou-se a Taxa de Recarga (R) de 0,0703 cm/dia, definida em função das simulações preliminares e realizadas para perfis de 1 a 10 metros, em que todos os resultados para uma distribuição regular de nós, com elemento da malha de 1 cm, e mesmo tempo de discretização, forneceram valores muito próximos, em torno de 0,0703 cm/dia.



Figura 3 – Representação Esquemática da Célula do Aterro.

Resultado para o CENÁRIO 1:

Calculando-se o volume de líquido produzido por cada célula, somou-se ao final o volume destas, para cômputo do volume total de percolados produzidos no Sub-Aterro 1.

Todavia, como a soma das áreas das células equivale a quatro vezes o valor da área informada para o Sub-Aterro 1, cujo valor é de 120.000 m² e, na situação real de campo, a chuva incide apenas numa área quatro vezes menor, dividiu-se este valor por quatro, que resultou no volume total simulado de 30.925,90 m³.

CENÁRIO 2: Células sobrepostas considerando-se as áreas de influência para cada altura.

Com base nas informações anteriores, relativamente às dimensões de cada célula, foi estabelecido um modelo para a estrutura final do aterro, considerando-se as áreas da base e da crista de cada célula, porém superpostas, como na situação real do aterro, e mostrado no modelo simplificado da Figura 4.

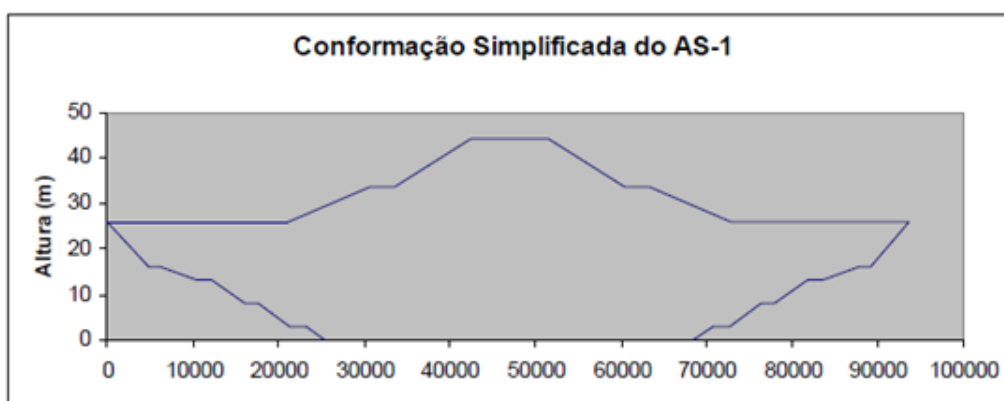


Figura 4 – Modelo da Conformação Simplificada do AS-1, para o Cenário 2.

Para o cálculo do fluxo relativamente a este cenário, foram consideradas Taxas de Recarga distintas para cada altura de perfil. A variação da Taxa de Recarga com a altura deve-se ao fato de que quanto maior a altura do perfil, mais camadas de cobertura intermediária existirão, e estas, por possuírem um k_s (coeficiente de permeabilidade saturada) bem menor do que o k_s dos resíduos, dificultarão a infiltração do fluxo através destes. Esta variação pode ser visualizada através de Figura 5, a seguir:

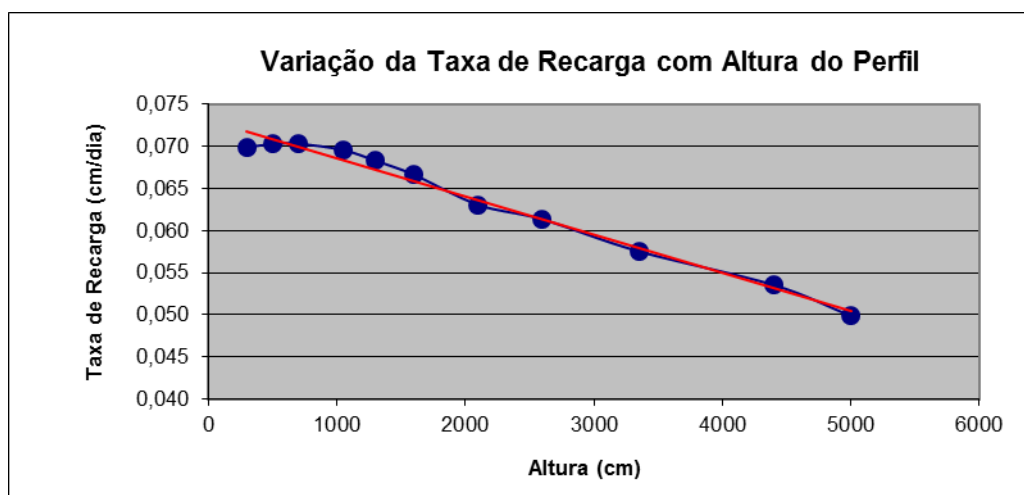


Figura 5 – Variação da Taxa de Recarga com a Altura do Perfil para o Cenário 2.

Resultado para o CENÁRIO 2:

O volume total de líquidos percolados gerados no Sub-Aterro 1, para o período de um ano, relativamente ao Cenário 2, foi de 27.020,64 m³.

O volume total de líquidos gerados, com base no monitoramento, para o período de janeiro a dezembro de 2010 foi de 33.098 m³.

ESTUDO DO FLUXO A PARTIR DO EMPREGO DE COBERTURAS ADICIONAIS

Com vistas à minimização da infiltração pela camada de cobertura final, foram analisadas as seguintes alternativas:

1) Barreira Capilar (BC) com camadas de 30 cm de composto de RSU com granulometrias distintas; 2) Barreira Capilar (BC) com camadas de 50 cm de composto de RSU com granulometrias distintas; 3) Plantio de Gramínea; 4) Plantio de Vegetação Braquiária nativa da região do empreendimento.

RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

As hipóteses de cobertura analisadas, como alternativa para minimizar a infiltração pela camada de cobertura final e, conseqüentemente, o fluxo através da massa de resíduos, obtiveram um resultado positivo, como indicado na Figura 6. Nesta, são apresentadas as Taxas de Recarga, relativamente às seguintes coberturas finais: 1) solo compactado; 2) Barreira Capilar (BC) com camadas de 30 cm; 3) Barreira Capilar (BC) com camadas de 50 cm; 4) Gramínea; 5) Vegetação Braquiária nativa da região do empreendimento.

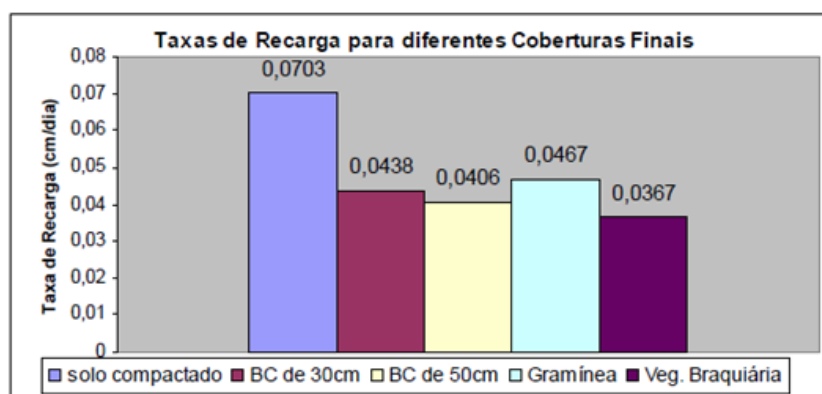


Figura 6 – Comparativo das Taxas de Recarga para hipóteses analisadas de Cobertura Final.

O emprego de barreira capilar de composto, como componentes do sistema de cobertura final, resultou numa redução, em relação ao sistema de cobertura convencional da ordem de 37,7%, para barreira capilar com camadas de 30 cm e 42,2%, para barreira capilar com camadas de 50 cm. Porém, devido à baixa permeabilidade desse material, aliada ao alto índice pluviométrico na região do aterro, a aplicação desta resultou em grande perda hídrica por escoamento lateral (*run-off*).

Por outro lado, o plantio de vegetação resultou numa redução de 33,6% para gramíneas e 47,8% para o plantio de vegetação braquiária, o que pode ser explicado pela elevada retenção de água pelas raízes através dos processos naturais, e posterior evapotranspiração. Como consequência deste elevado armazenamento, a perda por escoamento lateral (*run-off*) foi quase que totalmente reduzida.

CONCLUSÕES

O modelo computacional empregado nas simulações, apesar de unidimensional, pode ser considerado uma valiosa ferramenta para o estudo dos processos hidráulicos e avaliação da geração de percolados em aterros sanitários.

O estudo complementar sobre a camada de cobertura final, visando à minimização da infiltração através desta camada, mostrou que, apesar da não obrigatoriedade de implantação de camada de cobertura vegetal em aterros de RSU, o emprego desta camada aumenta a evapotranspiração, diminuindo significativamente a quantidade de chuva que se infiltra, e, conseqüentemente, reduzindo a quantidade de percolados gerados no aterro.

O estudo da barreira capilar como cobertura final, também forneceu resultados satisfatórios na diminuição da geração de percolados, porém, a sua aplicação em regiões em que o índice pluviométrico é muito elevado deve ser criteriosamente analisada.

A escolha de um determinado sistema não deve estar condicionada apenas à redução da taxa de recarga, mas sim, aos fatores que contribuem para a minimização da infiltração de líquidos no interior do aterro, aliada à minimização da erosão do material que forma esta camada, entre outros fatores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, J.R., 2011. Estudo do Comportamento de Barreira Capilar em Aterros de Resíduos, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 152p.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995. Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Granulares à Carga Constante. NBR 13292/1995.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000. Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos à Carga Variável. NBR 14545/2000.
4. BREITMEYER, R.J., 2011. Hydraulic Characterization of Municipal Solid Waste, Ph.D. Dissertation, University of Wisconsin-Madison, U.S.A., 192p.
5. GEORIO, 2011. Prefeitura do Rio de Janeiro – Alerta Rio, Dados Pluviométricos Diários. Disponível em <<http://www2.rio.rj.gov.br/georio/site/alerta/download.htm>>. Acesso em: 04/03/2011.
6. INMET, 2011. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/pg_automaticas.php>. Acesso em: setembro de 2011.
7. RUSSO, M.A.T., VIEIRA, C., 2000. Estudos sobre tratamento de lixiviados de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 9, 2000. Porto Seguro, BA. Anais.... Rio de Janeiro: ABES, 2000.
8. ŠIMŮNEK, J., ŠEJNA, M, van GENUCHTEN, M.Th., 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Version 2.0. IGWMC – TPS – 70, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 162p.
9. VAN GENUCHTEN, M.Th., 1978. “A numerical model for water and solute movement in and below the root zone”. Research Report no 121, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside Califórnia.