XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/125

Waterfill – Aplicativo Aberto para Cálculo de Balanço Hídrico em Aterro Sanitário

Guilherme Barbosa de Santana
Graduando em Ciência da Computação, UFBA, Salvador, Brasil, gbarbosaa.021@gmail.com

Sandro Lemos Machado
Professor, DCTM-UFBA, Salvador, Brasil, smachado@ufba.br

Miriam de Fátima Carvalho
Professora, DCTM-UFBA, Salvador, Brasil, miriam.machado@ufba.br

Mehran Karimpour-Fard
Professor, IUST, Tehrãn, Irã, mehranfard@gmail.com

RESUMO: Este trabalho apresenta a implementação, em linguagem Python, do modelo proposto por São Mateus et al. (2012) para o cálculo do balanço hídrico em aterros sanitários localizados em regiões de clima tropical , bem como sua compilação para as plataformas Windows e Linux. O Waterfill é um aplicativo gratuito, de livre distribuição, disponível para download. O sistema dispõe de uma interface simples e intuitiva para inserção e visualização de dados, incorporando mecanismos de controle que reduzem a ocorrência de erros na entrada de informações e é destinado a profissionais, pesquisadores e órgãos de gestão ambiental, que frequentemente carecem de ferramentas específicas, acessíveis e confiáveis para a realização desse tipo de análise.

PALAVRAS-CHAVE: Balanço hídrico, Aplicativo, Aterro sanitário.

ABSTRACT: This work presents the implementation, in Python, of the model proposed by São Mateus et al. (2012) for calculating the water balance in landfills located in tropical climate regions and developing countries, as well as its compilation for Windows and Linux platforms. Waterfill is a free application, freely distributed for non-commercial purposes, available for download. The system has a simple and intuitive interface for data entry and visualization, incorporating control mechanisms that reduce the occurrence of errors in data input. The application is intended for professionals, researchers, and environmental management agencies, who frequently lack specific, accessible, and reliable tools for carrying out this type of analysis.

KEYWORDS: Water balance, Application, Sanitary landfill.

1 INTRODUÇÃO

São Mateus et al. (2012) apresentam uma revisão abrangente sobre balanço hídrico em aterros sanitários e propõem um modelo de cálculo, validado por meio de um estudo de caso na célula 5 do Aterro Sanitário Metropolitano Centro (ASMC), em Salvador – Ba, com base em dados de monitoramento geotécnico. O modelo contempla as particularidades dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em regiões tropicais, geralmente caracterizados por altos teores de umidade e matéria orgânica e busca suprir lacunas frequentemente negligenciadas em métodos tradicionais de balanço hídrico, como o HELP – hydrologic evaluation of landfill performance (Schroeder et al., 1994) e o MODUELO (MODUELO, 2006), que não contemplam a expulsão de líquidos dos RSU por compressão, decorrente do peso das camadas sobrepostas e a liberação de líquidos de constituição excedentes durante a decomposição dos resíduos.

O modelo proposto por São Mateus et al (2012) utiliza informações climáticas (precipitação e temperatura), produção de biogás, volume de lixiviado coletado, volume de RSU disposto e a evolução geométrica da célula ao longo do tempo. Os fenômenos contemplados pelo modelo constam na Figura 1 e na equação 1. Como as dimensões em planta do aterro são muito superiores à espessura da massa de RSU, os fenômenos analisados podem ser representados de forma unidimensional. As variáveis de entrada do balanço hídrico atuam no topo da célula, considerando fundo e laterais impermeáveis, e incluem a precipitação (R) e a quantidade de água que entra no aterro com o RSU e com o solo de cobertura. As variáveis de saída compreendem evaporação (E), escoamento superficial (RO), consumo de água nos processos de decomposição, geração de lixiviado e a liberação de vapor d'água associada à extração de biogás. A Figura 1 ilustra dois cenários utilizados para derivar as equações do modelo, considerando ou não o uso de camadas de cobertura. Nesta figura, $I_{(soil)}$ é a infiltração de água na camada de cobertura, $I_{(MSW)}$ é a infiltração de água no RSU e L é o volume de lixiviado coletado. $\Delta\theta$ é relacionado às mudanças de volume de água armazenada no sistema e $\theta_{i(soil)}$ e $\theta_{i(MSW)}$ são os valores de umidade volumétrica iniciais do solo de cobertura e do RSU, respectivamente.

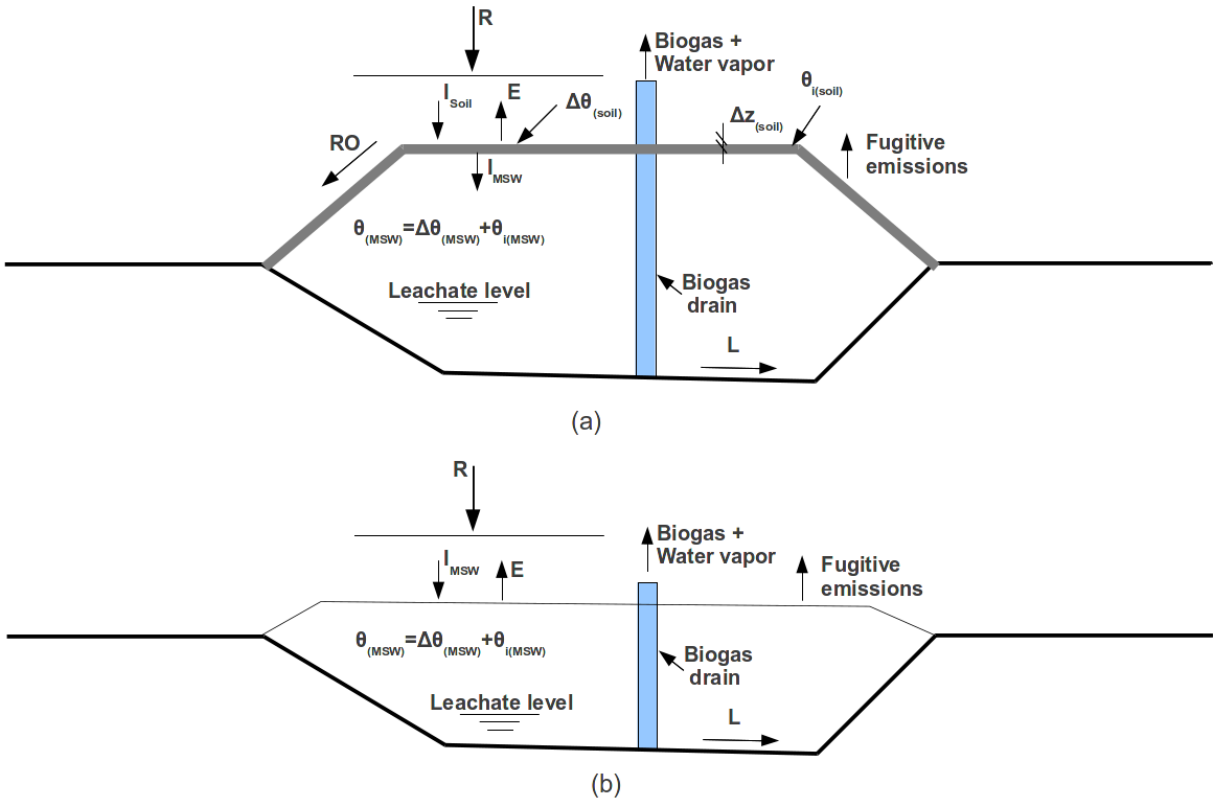


Figura 1. Modelo físico adotado para o balanço hídrico proposto: a) aterro com camada de cobertura e b) aterro sem camada de cobertura.

$$R + \theta_{i(soil)} \cdot \Delta z_{(soil)} = RO + E + \Delta\theta_{(soil)} \cdot \Delta z_{(soil)} + I_{(MSW)} \quad (1)$$

Em que $\Delta\theta_{(soil)}$ (-) representa as mudanças de umidade volumétrica na camada de solo de cobertura e $\Delta z_{(soil)}$ (L) é a espessura da camada de cobertura. R, RO, E, e $I_{(MSW)}$ são considerados em termos de coluna de água equivalente (L). No modelo proposto, o escoamento superficial é calculado como uma função da intensidade da chuva ($\partial R/\partial t$) e da capacidade de infiltração de água no solo ($\partial I_{(soil)}/\partial t$), Equação 2. O valor de $I_{(soil)}$ (L), é calculado com o uso da Equação 03.

$$\frac{\partial RO}{\partial t} = \frac{\partial R}{\partial t} - \frac{\partial I_{(soil)}}{\partial t} \quad (2)$$

$$I_{(soil)}\ (t) = S.t^{1/2} + A.t \quad (3)$$

Em que t é o tempo decorrido (T), A (L/T) é a permeabilidade ajustada do solo $0{,}5\ k_{sat} \leq A \leq 2/3\ k_{sat}$, onde k_{sat} é a permeabilidade do solo saturado e a capacidade de absorção de água do solo é representada por S ($L \cdot T^{-1/2}$), a qual é função de sua umidade inicial (ver Equação 4).

$$S^2 = 2k_{sat}\,[h_{surf} - h_o]\,[\theta_f - \theta_o] \quad (4)$$

Em que h_{surf} (L) representa a coluna de água sobre a superfície do solo, considerada como zero neste trabalho; h_o (L) representa a carga de sucção do solo da camada de cobertura para a uma condição de umidade inicial (θ_o) e θ_f é a umidade final do solo após a infiltração.

2 COMO USAR O APLICATIVO DE BALANÇO HÍDRICO, ENTRADA E VISUALIZAÇÃO DE DADOS NO PROGRAMA, E SUGESTÕES DE PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.

A Figura 2 apresenta a tela principal do programa, que reúne os botões de acesso aos módulos de entrada e visualização de dados, além do manual do usuário, disponível em português, inglês e Farsi. Ao selecionar o botão *Project ID*, é exibida a interface ilustrada na Figura 3, na qual o usuário deve inicialmente definir o diretório de trabalho. Em seguida, o programa realiza a busca por arquivos de entrada; caso não sejam encontrados, é sugerida a criação de um novo arquivo. Quando há arquivos disponíveis, estes são listados para seleção, permitindo a importação dos dados para edição ou visualização. Ao carregar um arquivo preexistente, o período de análise previamente definido é automaticamente recuperado, podendo ser ajustado, por exemplo, para a ampliação do intervalo de análise do balanço hídrico. Na criação de um novo arquivo, o usuário deve informar obrigatoriamente o período de análise, etapa essencial para o correto funcionamento das telas subsequentes, conforme ilustrado na Figura 4.

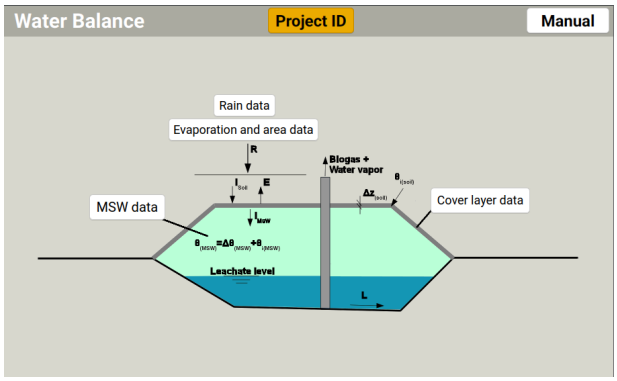


Figura 2. Tela principal do programa.

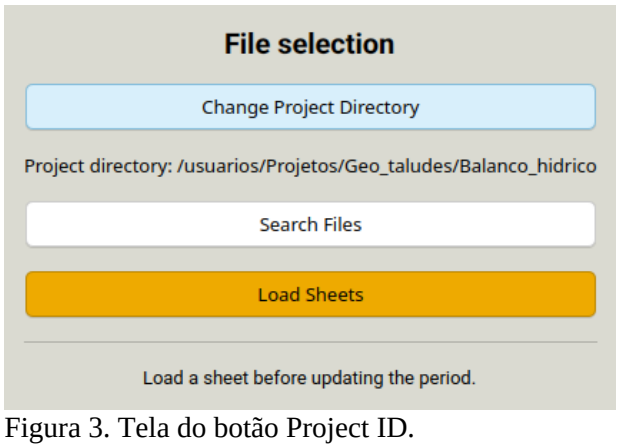


Figura 3. Tela do botão Project ID.

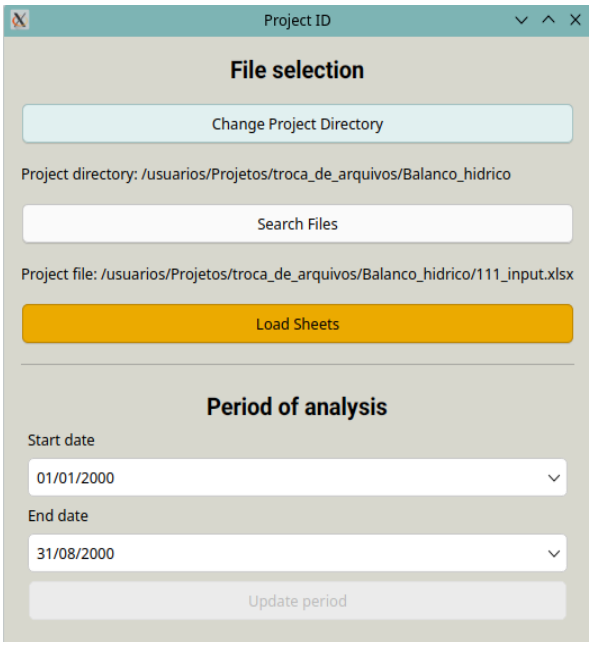


Figura 4. Tela para escolha do período de análise.

Para a inserção dos dados de precipitação, após a definição do período de análise, o usuário deve acessar o botão *Rain Data*, que abre uma tabela com 24 colunas correspondentes às horas de cada dia do período de simulação do balanço hídrico. Os dados podem ser inseridos diretamente nas planilhas geradas pelo programa ou por meio de operações de copiar e colar nos menus de entrada.

O cálculo da coluna de água que infiltra no solo é realizado com base na Equação 2, conforme ilustrado na Figura 5. O escoamento superficial ocorre somente quando a intensidade da precipitação supera a capacidade de infiltração do solo. A área sob a curva de infiltrabilidade (em vermelho) representa a coluna de água infiltrante, enquanto a área em verde corresponde à parcela convertida em escoamento superficial. A determinação dessas componentes requer a definição de parâmetros hidráulicos do solo, como coeficiente médio de permeabilidade da camada de cobertura (k) e a curva média de retenção de água.

Os valores de k devem ser preferencialmente obtidos por meio de ensaios de permeabilidade em campo, como o permeâmetro de Guelph e os ensaios de infiltração em cavas. Estes últimos avaliam um volume maior de solo, permitindo representar de forma mais realista descontinuidades e heterogeneidades do meio, como trincas e fissuras associadas à retração ou ao recalque diferencial. Orientações para a execução desses ensaios são apresentadas por Azevedo e Albuquerque Filho (2013). Ressalta-se contudo, que estes ensaios não conseguem atingir um alto grau de controle na sua execução como no caso do uso do permeâmetro Guelph (Reynolds e Elrick, 1985 e Reynolds et al. 1983).

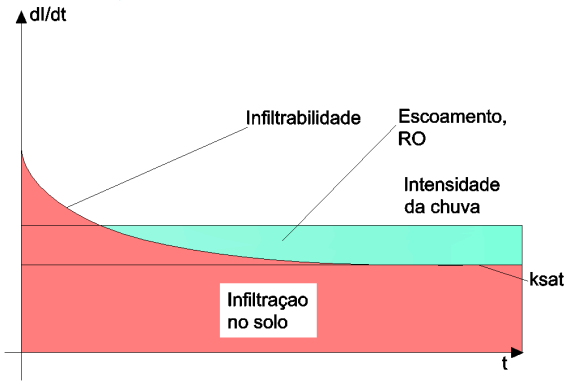


Figura 5. Cálculo da coluna de água infiltrante e do escoamento superficial.

A inserção do valor médio de permeabilidade e das demais propriedades da camada de cobertura é realizada por meio do botão *Cover Layer Data*, que abre a interface apresentada na Figura 6. Nessa tela, além do valor de k_{sat}, são informados os parâmetros da curva de retenção de água do solo, que relaciona a carga hidráulica à umidade, como h_0 e θ_0 na Equação 4, bem como os dados necessários ao ajuste da função E/Ep, que razão entre a evaporação do solo (E) e a evaporação da água livre (Ep). A curva de retenção é ajustada pela Equação 5, proposta por Van Genuchten (1980), sendo os ajustes das funções de retenção e E/Ep realizados automaticamente pelo programa. Os gráficos gerados podem ser visualizados e exportados por meio dos comandos disponíveis na interface.

$$\theta_{soil} = \theta_r + \frac{\theta_{sat} - \theta_r}{\left[1 + \left|-\alpha h_o\right|^n\right]^m} \tag{5}$$

Em que , θ_r (-) e θ_{sat} (-) são as umidades volumétricas residual e saturada, receptivamente, e α (L^{-1}), m (-) e n (-) são parâmetros de ajuste da equação. Existem diferentes técnicas para a determinação da curva de retenção de água no solo, cada uma aplicável a faixas específicas de sucção. Para solos argilosos compactados, destacam-se a câmara de Richards, pela técnica de translação de eixos, e métodos baseados em potenciômetros de ponto de orvalho ou papel-filtro, podendo-se adotar o procedimento de Machado e Dourado (2001) para acelerar os ensaios.

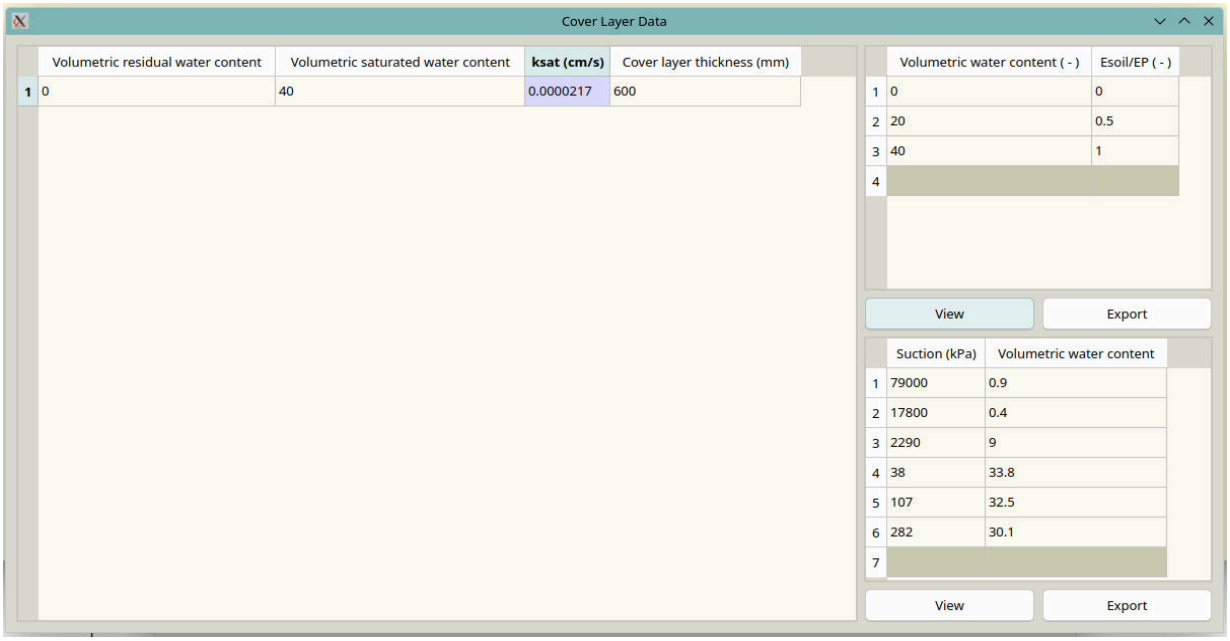


Figura 6. Tela de entrada de dados da camada de cobertura.

A taxa de evaporação pode ser determinada experimentalmente como descrito por São Mateus (2008), a partir de ensaios com dois recipientes cilíndricos submetidos às mesmas condições atmosféricas: um contendo água e outro contendo solo da camada de cobertura inicialmente saturado. As variações diárias de massa permitem determinar a razão entre a evaporação do solo (E) e a evaporação da água livre (Ep), a qual diminui ao longo do processo de secagem em função do aumento da sucção do solo. A evaporação de campo é então estimada multiplicando-se a razão E/Ep pelos valores de evaporação potencial, obtidos por estação meteorológica ou estimados mensalmente com base em dados climáticos locais. Os dados experimentais de E/Ep são inseridos no menu da Figura 6, que são automaticamente ajustados por regressão linear (Figura 7), enquanto os valores de evaporação potencial e os parâmetros geométricos do aterro referentes a área total e descoberta de RSU são informados na caixa acessada pelo botão *Evaporation and Area Data* (Figura 8).

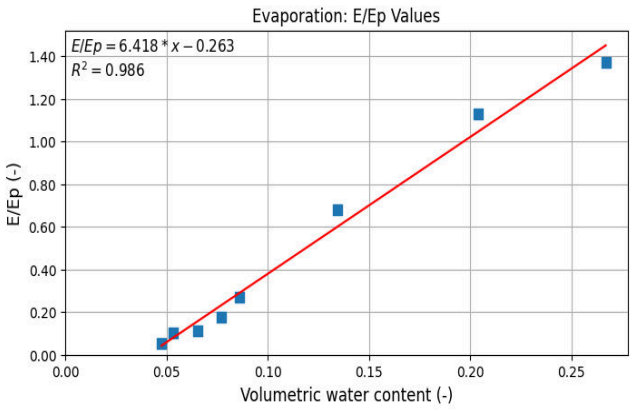


Figura 7 - Ajuste dos dados da razão E/EP versus umidade volumétrica.

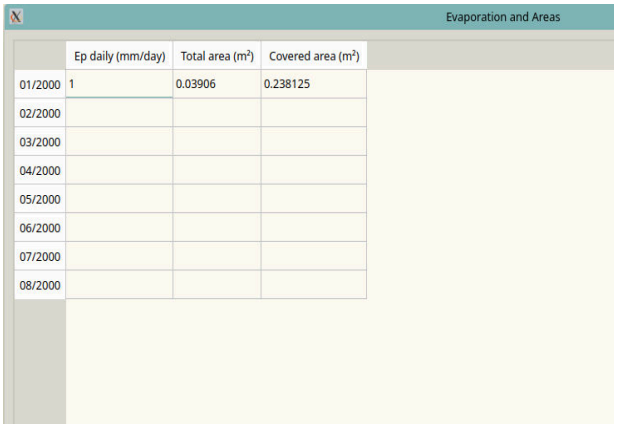


Figura 8 - Entrada de dados de EP, área total e área descoberta.

Uma vez determinados $I_{(soil)}$ e a razão E/Ep, a Equação 6 é empregada para estimar as variações do teor de água na camada de cobertura. Os valores de teor de água obtidos por essa equação são limitados pela capacidade de campo da camada de cobertura, θ_{cc}. Quando $[\theta_{(soil)}+\Delta\theta_{(soil)}]<\theta_{cc}$, toda a infiltração é retida na camada de cobertura. Caso contrário, a parcela excedente é considerada infiltração no RSU, sendo $I_{(MSW)}$ calculado pela Equação 7.

$$\Delta\theta_{(soil)} = (I_{(soil)}-E)/\Delta z_{(soil)} \quad (6)$$

$$I_{(MSW)} = I_{(soil)}-E-(\theta_{(soil)}-\theta_{cc})\cdot\Delta z_{(soil)} \quad (7)$$

Conhecido $I_{(MSW)}$ a Equação 8 é aplicada para o cálculo do balanço hídrico do RSU. Nessa etapa, a quantidade de líquido armazenada na célula ($\theta_{(MSW)}.z_{(MSW)}$) é determinada em função de $I_{(MSW)}$, da quantidade de água incorporada ao RSU durante o período de análise ($\sum\theta_{i(MSW)}\cdot\Delta z_{(MSW)}$), do lixiviado coletado ($L/A_{(MSW)}$), da saída de vapor de água associada ao biogás ($V_{wvapor}/A_{(MSW)}$) e da água consumida nos processos de biodegradação ($V_{wbiodeg}/A_{(MSW)}$).

$$\theta_{(MSW)}.z_{(MSW)} = I_{(MSW)} + \Sigma\theta_{i(MSW)}.\Delta z_{(MSW)} - L/A_{(MSW)} - V_{w\ biodeg}/A_{(MSW)} - V_{w\ vapor}/A_{(MSW)} \quad (8)$$

Em que $\theta_{(MSW)}$ (-) é a umidade volumétrica do RSU; $V_{w\ biodeg}$ (L^3) é o volume de água consumido pelos processos de biodegradação; $V_{w\ vapor}$ (L^3) é a quantidade de água extraída do aterro com o biogás, que segundo São Mateus et al., (2012) e outros autores citados na literatura é pouco significativa nos cálculos; L (L^3) é o volume de lixiviado coletado/tratado; $A_{(MSW)}$ (L^2) representa a área transversal das células do aterro; $\Delta z_{(MSW)}$ (L) é a espessura de cada camada de RSU disposta nas células do aterro; $z_{(MSW)}$ (L) é a espessura total do maciço de RSU (L).

A perda de massa do RSU, o consumo de água na decomposição e a liberação da água de constituição excedente é calculada conforme descrito em Machado *et al*. (2009) a partir da geração de gás estimada para o aterro, com o uso do parâmetro C_m (ver Tabela 1, com valores típicos de C_m e de consumo de água na decomposição), que representa a geração de metano por massa de RSU seca decomposta, obtida com o uso de equações estequiométricas. Para fins de simplificação, um valor de C_m = 480 m^3 CH_4/Mg RSU seco degradado é adotado pelo programa, assim como um consumo de água médio de 0,20 Mg H_2O/Mg RSU seco degradado.

Tabela 1. Valores de C_m e de consumo de água por decomposição do RSU (adaptado de MACHADO et al., 2009)

Componentes degradáveis do RSU	Consumo de água (média) (Mg H_2O/Mg RSU seco degradado)	Cm (médio) (m^3 CH_4/Mg RSU seco degradado)
Comida/ lixo jardim	0,27	493,36
Papel/papelão	0,18	428,61
Madeira	0,24	484,94

Para a estimativa da produção de biogás do aterro, devem ser informados os valores do potencial de geração de metano (Lo) e da constante de decaimento (k), empregados no modelo de decaimento de primeira ordem. Esses parâmetros são inseridos na janela acessada pelo botão *MSW data* (Figura 9). Para o cálculo do balanço hídrico do maciço de RSU, também são necessários informar os volumes de lixiviado coletado no aterro (L) e de água expulsa por compressão em função dos alteamentos das camadas de resíduos. Esses dados devem ser informados mensalmente, por meio dos menus apresentados nas Figuras 8 e 9.

A estimativa do volume de lixiviado expulso do RSU por compressão, conforme São Mateus et al. (2012), é realizada por meio de ensaios de compressão confinada em consolidômetro de grandes dimensões (Figura 10), utilizando amostras coletadas na frente de serviço do aterro. A partir da relação entre a pressão vertical aplicada e a quantidade de água expulsa, juntamente com o teor de umidade inicial do resíduo, constrói-se o gráfico $\Delta\sigma_z$ x Δw, o qual permite quantificar a parcela de líquidos expulsa por compressão no balanço hídrico do RSU. O teor de umidade inicial é determinado a partir de amostras quarteadas de RSU, com massa mínima de 15 kg, coletadas na frente de serviço e secas em estufa a 70 °C até constância de massa.

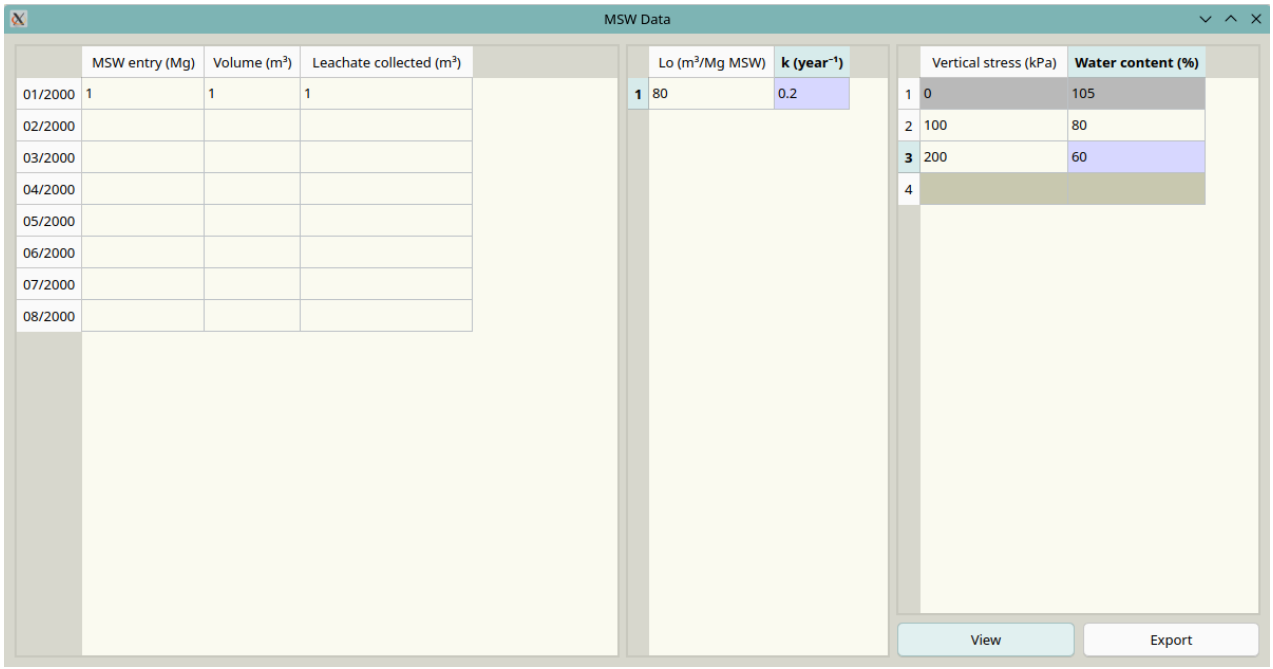


Figura 9. Entrada de dados relativos ao RSU no programa.



Figura 10. Equipamento típico utilizado para a realização do ensaio de compressão confinada de grandes dimensões.

No caso ilustrado na Figura 1b, que representa a condição na frente de serviço (sem camada de cobertura) assume-se que toda a precipitação se converte em infiltração na massa de RSU. Nessa situação, a evaporação é considerada igual à evaporação potencial da água livre. O balanço hídrico correspondente é descrito pela Equação 9.

$$R + \Sigma \theta_{i(MSW)} \cdot \Delta z_{(MSW)} = E + L / A_{(MSW)} + \theta_{(MSW)} \cdot z_{(MSW)} + V_{w\ biogás} / A_{(MSW)} + V_{w\ vapor} / A_{(MSW)} \quad (9)$$

Os dados de água consumida no processo de decomposição em conjunto com os dados de água expulsa do RSU por compressão são utilizados para separar a quantidade de água que permanece junto às partículas daquela que vai se juntar aos valores de $I_{(MSW)}$ para formar o nível de lixiviado no aterro, o qual pode ser acompanhado pela instalação de piezômetros no local, conforme descrito em São Mateus et al., (2012). Ao se pressionar o botão *View Results* o programa apresenta as tabelas e gráficos resultantes do cálculo do balanço hídrico para o período de análise, possibilitando a exportação dos mesmos para uso externo.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o aplicativo Waterfill, desenvolvido em linguagem Python com base no modelo de São Mateus et al. (2012), para o cálculo do balanço hídrico em aterros sanitários de regiões tropicais. A ferramenta incorpora mecanismos frequentemente negligenciados, como a expulsão de líquidos dos RSU por compressão e durante a decomposição, além de uma representação simplificada das trocas de umidade com a atmosfera. Com interface intuitiva, mecanismos de controle e distribuição gratuita, o Waterfill constitui uma ferramenta potencialmente útil para apoio técnico, científico e à gestão ambiental

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azevedo, A. A., Albuquerque Filho, J. L. (2013). Ensaio de Permeabilidade em solos: orientações para sua execução no campo. 4 ed. São paulo: ABGE, 75p.

Machado, S. L., Dourado, K. A. (2001). Novas técnicas para obtenção da curva característica de sucção do solo. Anais *4° Simpósio de Brasileiro de Solos Não Saturados.* Porto Alegre, v. 1.

Machado, S.L., Carvalho, M.F., Gourc, J.P., Vilar, O.M., Nascimento, J.C.F (2009). Methane generation rates in tropical landfills: simplified methods and field results. *J. Waste Management*, 29 (1), p.153-161 doi:10.1016/journal.wasman.2008.02.017.

Moduelo – MT. (2006). Manual Técnico del usuário de la versión 3. Grupo de ingeniería Ambiental. Departamento de ciências y Técnicas del Agua y del Médio Ambiente, Universidad de Cantabria, España.

Reynolds, W.D., Elrick, D.E. (1985). In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the a parameter using the Guelph permeameter. *Soil Science*, 140 (4), p.292-302.

Reynolds, W.D., Elrick, D.E., Topp, G.C. (1983). A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hidraulic conductivity above the water table. *Soil Sci.* 136 (4), p.250- 268.

São Mateus, M.S.C. (2008). *Proposta de modelo para avaliação do balanço hídrico de aterros de resíduos sólidos urbanos: Estudo de caso do Aterro Metropolitano Centro de Salvador.* Tese Doutorado – UFRJ, COPPE, Rio de Janeiro – RJ, Brazil, 312p.

São Mateus, M.S.C., Machado, S.L., Barbosa, M.C. (2012). An attempt to perform water balance in a Brazilian municipal solid waste landfill. *Waste Management (Elmsford)*, 32, p.471-481.

Schroeder, P.R., Aziz, N.M., Lloyd, C.M., Zappi, P.A., (1994). The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: User's Guide for Version 3, EPA/600/R-94/168a, US Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC.

Van Genuchten, M.T.H., (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Proc. *Soil Sci.* Soc. Am. 44 (5), p.892–898.