

Estudo do potencial de contaminação do Aterro Controlado do Jockey Club, Distrito Federal

Study of the contamination potential of the Jockey Club Landfill, Distrito Federal, Brazil

Andressa Pereira Giacomazzo^{1*} , Wagner Santos de Almeida¹ 

RESUMO

O Aterro Controlado do Jockey Club (ACJC), localizado no Distrito Federal, operou como área de disposição final inadequada de resíduos sólidos desde 1960 até o início de 2018. O principal objetivo desta pesquisa consistiu em avaliar o potencial de contaminação desse aterro, em razão da produção de chorume e biogás. Inicialmente, foram identificadas as áreas mais suscetíveis à contaminação nas sub-bacias hidrográficas do Bananal e do Riacho Fundo, onde o aterro está situado, por meio da produção de um mapa de vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos. Para tanto, utilizou-se a metodologia DRASTIC, que consiste em uma combinação linear ponderada de sete parâmetros hidrogeológicos, com o auxílio da ferramenta de análise multicritério AHP (Análise Hierárquica de Processos) e de algoritmos de álgebra de mapas implementados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Esse mapa evidenciou que o ACJC está localizado em áreas de moderada a elevada vulnerabilidade natural à contaminação. Simulou-se também o balanço hídrico no aterro por meio do modelo *Hydrologic Evaluation of Landfill Performance* (HELP), o qual possibilitou a identificação de áreas com maior potencial de contaminação em razão do maior volume de chorume produzido. Por fim, realizou-se uma análise da temperatura de cobertura do solo na região do aterro, por meio de imagens sazonais do sensor orbital TM/Landsat entre os anos de 1986 e 2016, as quais evidenciaram aumento gradual da temperatura, servindo de possível indicador da distribuição subsuperficial de biogás presente no aterro.

Palavras-chave: contaminação; aterro controlado; metodologia DRASTIC; modelo *Hydrologic Evaluation of Landfill Performance*; análise hierárquica de processos.

ABSTRACT

The Jockey Club Landfill is a solid waste disposal site located at Brazil's Federal District, which operated inadequately from 1960 until the beginning of 2018. The main objective of this paper was to assess the contamination potential of the Jockey Club Landfill due to leachate and biogas production. Initially, the most susceptible areas to contamination were identified within the two hydrographic sub-basins of Bananal and Riacho Fundo, where the landfill is located, by producing a map of the aquifer's natural vulnerability to contamination. This map was produced based on the DRASTIC methodology, which consists in a weighted linear combination of seven important hydrogeological parameters, with support of the multicriteria Analytic Hierarchy Process (AHP) and map algebra tools implemented in a Geographic Information System (GIS) environment. This map evidenced that Jockey Club Landfill is located in areas of moderate to high natural vulnerability to contamination. The water balance throughout the landfill profile was also simulated using the Hydrologic Evaluation of Landfill Performance model (HELP), whose results evidenced that the contamination potential is higher in some portions of the landfill due to greater volumes of leachate produced. Lastly, an analysis of ground cover temperature in the landfill region was undertaken, using TM/Landsat seasonal images between the years 1986 to 2016, which indicated a gradual increase in ground temperature, evidencing a possible occurrence of subsurface biogas distribution in the landfill.

Keywords: contamination; landfill; DRASTIC methodology; Hydrologic Evaluation of Landfill Performance model; analytic hierarchy process.

INTRODUÇÃO

O Aterro Controlado do Jockey Club (ACJC), localizado no Distrito Federal (DF), serviu de disposição final inadequada dos resíduos sólidos gerados no DF durante o período compreendido entre a década de 1960 e o início do ano de 2018, e tornou-se o maior lixão

da América Latina. Os resíduos foram ali depositados diretamente sobre a superfície do solo, sem a presença de camada impermeabilizante e de sistemas de coleta e tratamento do chorume e do biogás produzido, o que causou, segundo estudos realizados no local (KOIDE; BERNARDES, 1998; CARNEIRO, 2002; CAVALCANTI,

¹Universidade de Brasília - Brasília (DF), Brasil.

*Autora correspondente: andressa.giacomazzo@gmail.com

Fonte de financiamento: Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (processo nº 193.001.362/2016).

Recebido: 04/12/2018 - **Aceito:** 10/09/2019 - **Reg. Abes:** 20180223

2013), alterações significativas na qualidade da água de poços escavados na vizinhança do aterro, de modo a configurar um quadro de contaminação das águas subterrâneas. Tal contaminação deve-se à infiltração no solo do líquido percolado produzido, constituído, basicamente, da água da chuva e do chorume gerado no processo de biodegradação dos resíduos sólidos aterrados.

O problema associado à contaminação torna-se crítico pelo fato de o ACJC ser fronteiro ao Parque Nacional de Brasília (PNB), unidade de conservação que resguarda ecossistemas típicos do Cerrado e abriga importantes nascentes do DF.

A elaboração de mapas de vulnerabilidade de aquíferos é de significativa importância para o gerenciamento das águas subterrâneas, pois possibilita identificar as áreas mais sensíveis à contaminação e, assim, subsidiar a implementação de medidas de controle, visando à manutenção da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos (SENER; SENER, 2015). Além disso, por meio desses mapas, é possível otimizar esforços e recursos para a realização de estudos mais avançados nas áreas indicadas como mais suscetíveis à contaminação.

Por sua vez, o modelo *Hydrologic Evaluation of Landfill Performance* (HELP), desenvolvido pela U.S Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, estima o balanço hídrico em aterros sanitários e em quaisquer outras formas de aterramento no solo, o que corresponde a um fator importante de pesquisa, visto que, por meio das estimativas referentes à parcela de água percolada, é possível inferir sobre o potencial de contaminação nas diferentes porções de um aterro.

Quanto ao biogás produzido em aterros, Meneses (1988) observou que sua composição contém cerca de 60% de gás metano e 40% de dióxido de carbono, de forma a representar elevados riscos de poluição atmosférica e possibilidades de focos de incêndio, que ameaçam a população em seu entorno, sobretudo em razão do caráter inflamável do metano, o que demanda a necessidade de estudo das atuais condições do biogás no ACJC.

A distribuição subsuperficial de biogás em aterros sanitários e controlados, por sua vez, pode ser inferida por meio da análise da temperatura de cobertura do solo na área do aterro, obtida a partir de algoritmos de processamento de imagens de sensoriamento remoto orbital da região espectral do infravermelho termal.

Nesse sentido, a presente pesquisa teve por objetivo avaliar o potencial de contaminação do ACJC, considerando os riscos associados ao chorume e ao biogás produzido. Os citados riscos são representados por meio de um mapa de vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos presentes nas sub-bacias hidrográficas do Bananal e do Riacho Fundo, pela estimativa do volume de percolado produzido nas diferentes porções do ACJC, com o auxílio do modelo HELP, e pela análise da temperatura de cobertura do seu solo.

METODOLOGIA

A área de estudo abrange o ACJC e localiza-se entre as coordenadas geográficas de 15°40' e 15°60' de latitude sul e de 47°55' e 48°05' de longitude oeste, de forma a compreender as sub-bacias hidrográficas do Ribeirão Bananal, com área total de 122,2 km², e do Ribeirão Riacho Fundo, com área total de 200,6 km², ambas tributárias da Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá (Figura 1).

Tais sub-bacias apresentam características bastante distintas, pois a do Ribeirão Bananal situa-se majoritariamente em unidade de conservação, enquanto a do Ribeirão Riacho Fundo é marcada por intensa ocupação antrópica. Apesar disso, ambas as sub-bacias estão sujeitas à contaminação decorrente do chorume produzido no ACJC.

No desenvolvimento da pesquisa, foram utilizados os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) ArcGIS 10.5.1 e SPRING 5.4.3 para a produção de mapas de vulnerabilidade à contaminação e da temperatura de cobertura do solo. Também foi utilizado o *software* com o modelo HELP para simular o balanço hídrico no ACJC. Por fim, utilizou-se o Agisoft PhotoScan 3D Modeler para a confecção do modelo digital de terreno (MDT) de 2017, obtido a partir de 128 fotos registradas por um veículo aéreo não tripulado (VANT). A Tabela 1 apresenta a relação das imagens de sensores remotos (orbitais/aéreos) e os MDT utilizados, com as respectivas datas de obtenção, resoluções espaciais e fonte fornecedora, além da base de dados cartográficos utilizada na pesquisa.

As imagens correspondentes aos satélites Landsat 5 e Landsat 8 foram obtidas no portal do United States Geological Service (USGS, 2017). Os MDTs de 1991 e 2013 foram confeccionados por meio de aerolevantamento realizado pelo Sistema Cartográfico do Distrito Federal (SICAD) e pela Secretaria de Estado de Gestão do Território e

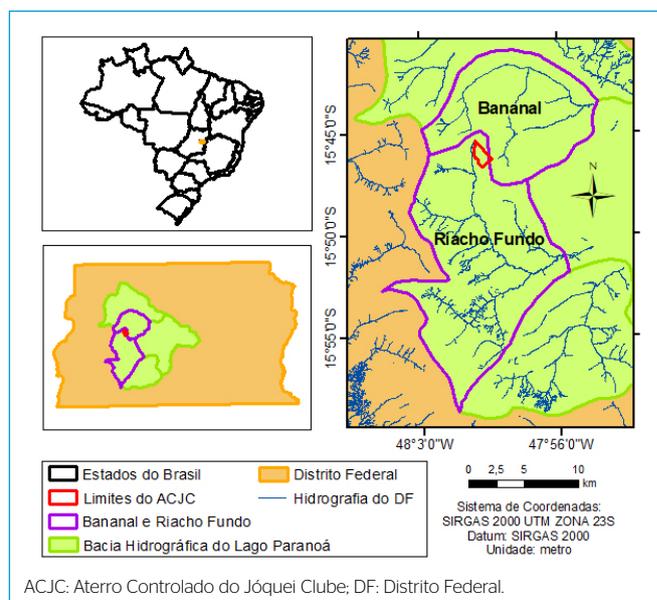


Figura 1 - Localização da área de estudo (sub-bacias do Bananal e do Riacho Fundo, Distrito Federal).

Tabela 1 - Imagens, modelo digital de terreno e bases cartográficas utilizadas.

Imagem/MDT/ Base cartográfica	Data	Resolução espacial (metros)/ Escala	Fonte
Imagem (Landsat 5)	07/1986 07/1998 07/2001 07/2010 07/2013	30	USGS (2017)
Imagem (Landsat 8)	07/2016	30	USGS (2017)
MDT (aerolevantamento)	1991	1:10.000	SICAD
MDT (aerolevantamento)	2013	1:10.000	SEGETH (2017)
MDT (VANT)	10/2017	0,055	VANT/Zago Consultoria
Profundidade do nível d'água no DF	1997	1:100.000	Aguiar (1997)
Textura dos solos do DF	1997	1:100.000	Aguiar (1997)
Espessura dos solos do DF	1997	1:100.000	Aguiar (1997)
Pedologia do DF	2004	1:100.000	EMBRAPA (2004)
Geologia do DF	2014	1:250.000	CPRM
Carta hidrogeológica do DF	1998	1:100.000	Freitas-Silva e Campos (1998)
Dados meteorológicos	2007-2016	-	INMET

MDT: modelo digital de terreno; USGS: United States Geological Service; SICAD: Sistema Cartográfico do Distrito Federal; SEGETH: Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habitação; VANT: veículo aéreo não tripulado; DF: Distrito Federal; EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária; CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais; INMET: Instituto Nacional de Meteorologia.

Habitação (SEGETH), respectivamente. Quanto ao MDT de 2017, este foi obtido por meio de voo com um VANT de propriedade da empresa Zago Consultoria. As bases cartográficas correspondentes à profundidade do nível d'água, à textura e espessura dos solos do DF foram retiradas do estudo de zoneamento geotécnico do DF, desenvolvido por Aguiar (1997) em sua tese de Doutorado. A base de dados pedológicos do DF utilizada corresponde ao mapa pedológico elaborado pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (EMBRAPA, 2004). Quanto ao mapa geológico do DF, este foi fornecido pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). A carta hidrogeológica do DF foi retirada do inventário hidrogeológico desenvolvido por Freitas-Silva e Campos (1998). Por fim, os dados meteorológicos de precipitação (mm), temperatura média (°C), insolação (h), umidade relativa média (%) e velocidade média do vento (km/h) foram obtidos no portal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e correspondem à Estação Brasília.

Mapa de vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação

O mapa de vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação foi elaborado com base na metodologia DRASTIC, desenvolvida pela Agência de Proteção ao Meio Ambiente (EPA) dos Estados Unidos, que considera as principais características hidrogeológicas contribuintes para o grau de susceptibilidade natural dos aquíferos à contaminação, a saber: profundidade do nível d'água (D), que corresponde à distância entre a superfície do solo e o topo do lençol freático; recarga do aquífero (R), correspondente à quantidade total de água (em lâmina d'água) que percola da superfície do solo até o aquífero no decorrer de um ano; geologia do aquífero (A), referente ao meio rochoso, consolidado ou não consolidado, dentro do qual o aquífero está contido; tipo de solo (S), correspondente à porção superior da zona vadosa, caracterizada por intensa atividade biológica; topografia do terreno (T), que corresponde à declividade do terreno; impacto da zona vadosa (I), que indica as características de atenuação da zona vadosa, relacionadas à ocorrência de processos de biodegradação, neutralização, volatilização, dispersão, entre outros, além do grau de favorecimento às trajetórias e rotas dos contaminantes; e, por fim, condutividade hidráulica do aquífero (C), que corresponde à capacidade do aquífero de transmitir a água (ALLER *et al.* 1987).

Segundo Babiker *et al.* (2005), com a utilização da metodologia DRASTIC, obtém-se índices de vulnerabilidade ambiental em diferentes localidades, por meio da combinação de planos de informações contendo as camadas temáticas, processados em ambiente computacional de um SIG. Essas camadas temáticas correspondem a cada um dos sete parâmetros hidrogeológicos definidos pela DRASTIC.

Abiy *et al.* (2016) afirmam que os índices de vulnerabilidade DRASTIC (DVI), adimensionais, são calculados por meio de uma combinação linear ponderada, caracterizada pelo somatório do produto entre a importância relativa de um parâmetro sobre o outro (peso "p") e o valor numérico (nota "n") atribuído às diferentes feições que compõem cada um dos sete parâmetros da DRASTIC, conforme apresentado na Equação 1.

$$DVI = D_p D_n + R_p R_n + A_p A_n + S_p S_n + T_p T_n + I_p I_n + C_p C_n \quad (1)$$

Em que:

DVI = índice de vulnerabilidade DRASTIC;

$D_p, R_p, A_p, S_p, T_p, I_p$ e C_p = pesos relativos de cada um dos sete parâmetros; $D_n, R_n, A_n, S_n, T_n, I_n$ e C_n = classificação numérica (entre 1 e 10) atribuída às feições de cada parâmetro conforme respectivo grau de susceptibilidade à contaminação.

Os pesos são atribuídos de acordo com a importância de cada parâmetro em relação ao objetivo da análise, que, neste estudo, corresponde

à verificação da vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação pelo chorume oriundo de um aterro controlado.

Os pesos de cada um dos parâmetros foram determinados com base na metodologia de Análise Hierárquica de Processos (AHP), proposta por Saaty (1980), que consiste em uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão, com vistas a reduzir a subjetividade das análises. No método AHP, inicialmente é realizada a comparação pareada entre todos os parâmetros, por meio da escala fundamental de comparação pareada, para determinar com que intensidade um fator predomina sobre o outro. O julgamento entre os critérios constitui a etapa mais importante do método AHP, pois estabelece os fatores que influenciarão com maior intensidade no resultado final da análise. Portanto, nessa etapa realiza-se ampla revisão bibliográfica sobre a importância de cada critério em relação ao objetivo final da análise. Por fim, é verificada a consistência entre as comparações realizadas, por meio do cálculo da razão de consistência.

Por sua vez, os fatores D_n , R_n , A_n , S_n , T_n , I_n e C_n correspondem às notas atribuídas, na escala de 1 a 10, aos intervalos ou às feições que compõem cada um dos sete parâmetros, de acordo com o seu respectivo potencial de favorecer a contaminação, em que 1 representa o menor potencial e 10, o maior potencial. Nesta pesquisa, os valores foram atribuídos de acordo com a proposta de Aller *et al.* (1987), o que resultou na padronização das classes que compõem os mapas temáticos.

Após a alocação dos pesos obtidos pela AHP, os sete mapas temáticos padronizados foram combinados por meio da ferramenta de álgebra de mapas do SIG, conforme a Equação 1, para então gerar o mapa de vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação. As bases cartográficas utilizadas para subsidiar a produção dos mapas estão apresentadas na Tabela 1.

Estimativa do balanço hídrico no Aterro Controlado do Jóquei Clube

Atualmente, os drenos existentes no ACJC são precários e não cobrem toda a sua área, de modo a permitir que grande parcela do volume de chorume produzido pela biodegradação dos resíduos sólidos percole livremente por entre as camadas de resíduos aterrados.

Nesse sentido, o balanço hídrico no ACJC foi estimado com o auxílio do programa de modelagem hidrológica HELP, o qual simula a condução e o armazenamento da água através das diversas camadas de solo, resíduos, geomembranas e outros tipos de barreiras de contenção que compõem as áreas onde há aterramento de resíduos. A simulação é realizada após a inserção, no modelo HELP, de dados meteorológicos e dados referentes às características do solo e do perfil do aterro (CARNEIRO, 2002). Por fim, o resultado é apresentado sob a forma de um balanço da precipitação, da evapotranspiração, do escoamento superficial e da percolação.

O passo inicial para a aplicação do modelo HELP ao caso do ACJC consistiu na delimitação das camadas de solo e de lixo. Para isso, foram consideradas duas situações:

- a espessura das camadas mais antigas de lixo aterrado em trincheiras;
- a espessura das camadas mais recentes de lixo, sobrepostas às camadas anteriores.

No primeiro caso, considerou-se que as camadas mais antigas de lixo estavam dispostas abaixo das cotas topográficas originais do terreno, com espessura média entre 2 e 3 m (SANTOS, 1996). Em relação às camadas mais recentes de lixo, adotou-se o seguinte procedimento:

- no ArcGIS, a partir das curvas de nível de 5 m do SICAD correspondentes ao ano de 1991 (Tabela 1), foi gerado um MDT, que corresponde a uma representação matemática da distribuição espacial da característica de um fenômeno vinculada a uma superfície real — neste caso, o relevo terrestre da área de estudo (INPE, 2017). O ano de 1991 corresponde ao ano mais antigo cujos dados encontravam-se disponíveis. Portanto, considerou-se que, anteriormente a esse período, os resíduos haviam sido dispostos apenas abaixo das cotas topográficas originais do terreno;
- gerou-se o MDT da região atual com base nas curvas de nível espaçadas entre si de 5 m da SEGETH, obtidas no ano de 2013 (Tabela 1);
- realizou-se a superposição dessas duas malhas de cotas altimétricas, correspondentes aos anos de 1991 e 2013, a partir da qual foram obtidos os valores das diferenças de cotas altimétricas entre esses anos. Considerou-se essa diferença de cotas como equivalente à espessura das camadas mais recentes de lixo, neste caso correspondente ao ano de 2013. Com base nesses dados, foram definidas quatro áreas para a simulação hidrológica com o HELP, dentro dos limites do aterro, e uma área em sua porção antiga a sudeste (Figura 2), desativada desde 1978 (PEREIRA *et al.*, 1997b). Para cada uma dessas áreas, foram estabelecidos valores médios de espessura das camadas de lixo. Quanto aos valores médios de espessura das camadas de solo, foram adotados os valores obtidos por Carneiro (2002).

A área 3, apresentada na Figura 2, correspondia à porção mais ativa do ACJC dos últimos 20 anos, a qual recebia cerca de um terço dos resíduos domiciliares do DF, de modo a apresentar as camadas mais espessas de lixo. Por esse motivo, optou-se por realizar um voo com um VANT sobre a área 3, a fim de que se pudesse obter dados de melhor resolução espacial para o MDT e, assim, aumentar a precisão da modelagem com o HELP. O processamento das 128 fotos registradas pelo VANT foi realizado com auxílio do *software* PhotoScan 3D Modeler, que possui como produto final do aerolevanteamento um mosaico ortoretilificado e um MDT com resolução espacial de 5,5 cm (Tabela 1).

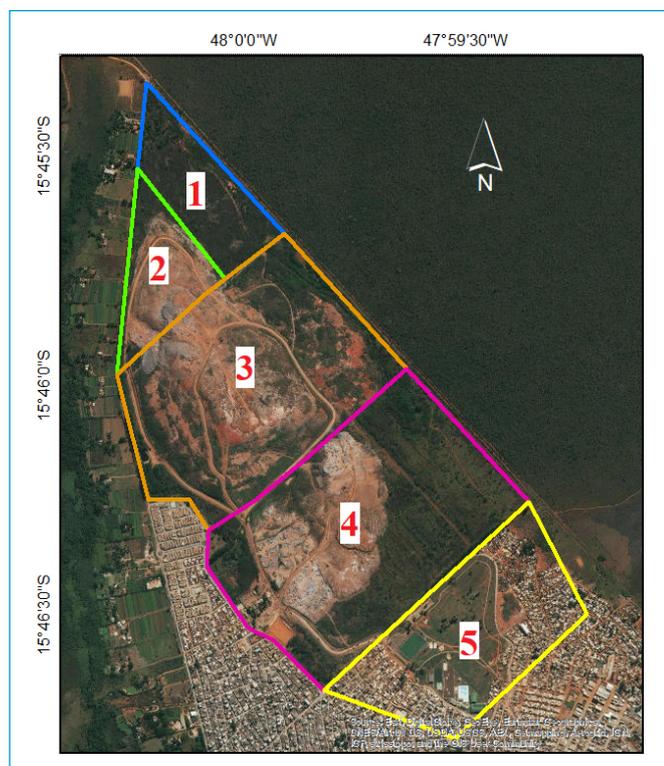


Figura 2 - Áreas definidas no interior do Aterro Controlado do Jôquei Clube para a simulação hidrológica com o modelo *Hydrologic Evaluation of Landfill Performance* (HELP).

O MDT da área 3 obtido com o VANT, em 2017, foi então sobreposto ao MDT do ano de 1991 para se obter a diferença das cotas altimétricas das camadas superficiais de lixo desse período de 26 anos, e com base na diferença de cotas altimétricas entre os anos de 2017 e 1991, obteve-se a espessura das camadas mais recentes de lixo. Para cada área do aterro demarcada (Figura 2), foram determinados os parâmetros requeridos pelo modelo HELP, apresentados na Tabela 2. Ressalta-se que as classes de cobertura do uso do solo introduzidas no HELP são do tipo:

- solo exposto;
- baixo padrão de grama;
- razoável padrão de grama;
- bom padrão de grama;
- excelente padrão de grama.

Os parâmetros requeridos pelo HELP apresentados na Tabela 2 foram obtidos por meio de algoritmos de geoprocessamento do ArcGIS, citados a seguir:

- área do aterro: cálculo de área a partir do *shapefile* que delimita o perímetro da área estudada, em hectares;
- porcentagem do escoamento superficial: estimada com base na densidade da vegetação de cobertura, verificadas com o auxílio das imagens do *software* Google Earth;

Tabela 2 - Parâmetros requeridos pelo modelo *Hydrologic Evaluation of Landfill Performance* (HELP) para cada área do Aterro Controlado do Jôquei Clube.

	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área 5
Área do aterro (hectares)	19,3	16,2	75,9	84,8	46,2
Porcentagem onde o escoamento superficial é possível (%)	60	95	90	80	85
Declividade média (%)	3,0	5,7	4,0	2,0	1,3
Comprimento de declividade (m)	167	132	625	600	654
Característica da cobertura de uso do solo	4	1	2	3	2

- declividade média: obtida com a função *slope* em porcentagem a partir do MDT de 2013;
- comprimento de declividade em metros: obtida com a função *slope* a partir do MDT de 2013;
- característica da cobertura de uso do solo: obtida com base na fotointerpretação das imagens obtidas com o VANT e das imagens citadas na Tabela 1.

Os dados meteorológicos requisitados pelo programa HELP (evapotranspiração, precipitação, temperatura e radiação solar) foram obtidos por meio dos registros diários da Estação Brasília (estação mais próxima à área de estudo) do INMET, considerando os anos compreendidos entre 2007 e 2016, para que pudessem ser atingidas as condições de estado estacionário desejáveis para a simulação no modelo HELP.

Para o cálculo da evapotranspiração, foram inseridos dados referentes à localização geográfica da região; aos valores médios de umidade relativa obtidos da Estação Brasília do INMET; à profundidade da zona evaporativa, definida como a profundidade máxima até onde a água pode ser removida por evapotranspiração; e ao índice máximo de área foliar (IAF), definido como o valor adimensional da razão entre a área de folhagem da vegetação e a área superficial por ela ocupada. A profundidade da zona evaporativa e o IAF foram estimados para cada uma das cinco áreas do aterro, de acordo com os valores de referência propostos por Schroeder *et al.* (1994), considerando-se a textura predominante do solo (argila concrecionária), obtida a partir do mapa de pedologia (Tabela 1), e a densidade da cobertura vegetal nas diferentes porções do aterro.

Em relação aos dados diários de precipitação (mm) e de temperatura média diária (°C), correspondentes ao período de dez anos (2007–2016), eles foram inseridos diretamente no modelo HELP. Quanto aos dados de radiação solar, aplicou-se a equação de Angstrom (Equação 2), proposta por Tucci e Beltrame (2000), para converter

os dados de insolação diária (horas), obtidos da Estação Brasília do INMET, em radiação solar diária (MJ.m^{-2}).

$$Q_s = Q_o * \left(a + \left(b * \frac{n}{N} \right) \right) \quad (2)$$

Em que:

Q_s = radiação solar (MJ.m^{-2}) recebida no ponto de observação;

Q_n = radiação solar (MJ.m^{-2}) recebida no topo da atmosfera, cujos valores são indicados por Tucci e Beltrame (2000);

N = valores de duração máxima da insolação diária em horas;

n = insolação diária em horas.

Por sua vez, os valores dos coeficientes a e b da equação de Angstrom dependem das características físicas da camada atmosférica a ser atravessada pela radiação solar e são influenciados pela época do ano, pela latitude e altitude do local. Os valores de a (0,282) e b (0,49) adotados foram obtidos no estudo desenvolvido por Dornelas, Silva e Oliveira (2006), os quais determinaram os valores desses coeficientes para a cidade de Brasília.

Assim, de posse dos parâmetros exigidos pelo modelo HELP, simulou-se o balanço hídrico em cada uma das cinco áreas do ACJC.

Mapa da temperatura de cobertura do solo

A temperatura de cobertura do solo da área ocupada pelo ACJC foi analisada para inferir sobre a possível distribuição subsuperficial de biogás no aterro, decorrente do processo de decomposição dos resíduos sólidos lá depositados. A região considerada para a análise da temperatura de cobertura do solo corresponde ao aterro em si e seu entorno inserido em um raio de 1 km, a partir dos seus limites externos.

Para o cálculo da temperatura de cobertura do solo da área de estudo, foram analisadas seis imagens do sensor TM/Landsat na região espectral do infravermelho termal (Tabela 1), entre os anos de 1986 e 2016, correspondentes ao período da estação de seca do DF e escolhidas de acordo com a evolução da deposição das camadas de resíduos sólidos no ACJC.

Em relação às imagens do satélite Landsat-5, adotou-se a metodologia proposta por Malaret *et al.* (1985), a qual propõe a conversão do número digital de cada *pixel* de imagem da banda espectral do infravermelho termal nos respectivos valores da temperatura aparente da superfície, a partir de um modelo de regressão quadrática, evidenciado na Equação 3.

$$T = 209,831 + 0,834 * DN - 0,0013 * DN^2 \quad (3)$$

Em que:

T = valor da temperatura aparente da superfície, em Kelvin;

DN = número digital de cada *pixel* da banda espectral 6 (infravermelho termal).

Quanto às imagens do satélite Landsat-8, foram utilizadas as equações fornecidas pelo portal do USGS, as quais realizam correções radiométricas para o cálculo da temperatura de cobertura do solo com base na radiância da banda espectral do sensor de infravermelho termal (*Thermal Infrared Sensor — TIRS*). Inicialmente, procede-se ao cálculo da radiância (L_λ) da banda espectral 10, por meio da Equação 4. Em seguida, calcula-se a temperatura (T) em graus Celsius, com base na Equação 5.

$$L_\lambda = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (4)$$

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda}\right)} - 273 \quad (5)$$

Em que:

M_L = fator de reescalonamento multiplicativo específico da banda 10;

Q_{cal} = nível de cinza das imagens dos sensores do Landsat-8;

A_L = fator de reescalonamento aditivo específico da banda 10;

K_1 = constante 1 de conversão termal específica da banda 10;

K_2 = constante 2 de conversão termal específica da banda 10.

Os parâmetros M_L , A_L , K_1 e K_2 das Equações 4 e 5 são obtidos no arquivo de metadados das imagens Landsat.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mapa de vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação

O mapa de vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação, correspondente à metodologia DRASTIC, foi obtido a partir da combinação linear ponderada dos sete mapas temáticos padronizados, conforme apresentado na Equação 6.

$$DVI = 2,8D_n + 0,7R_n + 1,1A_n + 1,7S_n + 0,3T_n + 2,7I_n + 0,7C_n \quad (6)$$

Em que:

DVI = índice de vulnerabilidade DRASTIC;

D_n , R_n , A_n , S_n , T_n , I_n e C_n = classificação numérica (entre 1 e 10) atribuída às feições de cada parâmetro conforme respectivo grau de susceptibilidade à contaminação.

Os valores numéricos da Equação 6 correspondem aos pesos de cada mapa temático, os quais foram gerados pelo método de análise multicritério AHP. A etapa de julgamento de valores prevista na metodologia AHP baseou-se em consulta bibliográfica, que englobou distintos exemplos de aplicação da metodologia DRASTIC, tanto em âmbito nacional (ALVES; RAMOS; CORIDOLA, 2009; AHLERT; REGINATO,

2011) quanto em âmbito internacional (ALLER *et al.*, 1987; PISCOPO, 2001; GUIGUER; KOHNKE, 2002; EL-NAQA; HAMMOURI; KUISI, 2006; TAANY *et al.*, 2013; SENNER; SENNER, 2015; ABIY *et al.*, 2016; PINTO, 2016). Optou-se também por considerar a qualidade cartográfica dos mapas utilizados na etapa de julgamento dos valores, de modo a reduzir a ordem de importância dos mapas com escalas bastante inferiores em relação aos demais. Após a obtenção dos pesos, calculou-se a razão de consistência entre as comparações realizadas, a qual apresentou valor de 0,014, ou seja, inferior ao limite recomendado de 0,1, o que indica que as comparações realizadas são consistentes. Recomenda-se, para estudos posteriores, a realização de uma análise de sensibilidade dos pesos de cada parâmetro, visto que essa metodologia fornece informações importantes sobre a influência de cada parâmetro no contexto do estudo de caso considerado, conforme se observa em El-Naqa, Hammouri e Kuisi (2006).

O grau de vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos foi subdividido em cinco classes, de acordo com o valor do índice de vulnerabilidade obtido, cuja margem de variação é de 10 a 100. Nesse sentido, adotou-se o padrão de classificação evidenciado na Tabela 3. Por fim, o mapa resultante, que representa a vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos das sub-bacias hidrográficas do Bananal e do Riacho Fundo, é apresentado na Figura 3.

Tabela 3 - Classes adotadas de vulnerabilidade natural à contaminação.

Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta
10 a 28	28 a 46	46 a 64	64 a 82	82 a 100

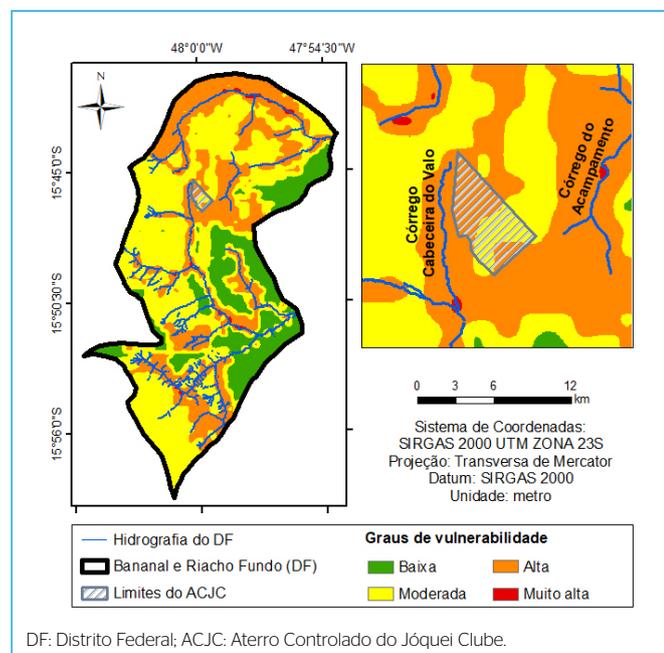


Figura 3 - Mapa de vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos das sub-bacias do Bananal e do Riacho Fundo (DF).

Observa-se no mapa da Figura 3 que a área de estudo apresentou diferenciados graus de vulnerabilidade à contaminação, desde valores pertencentes à classe de baixa vulnerabilidade até valores que configuram vulnerabilidade muito alta. As áreas com vulnerabilidade muito alta devem-se, sobretudo, ao fato de o lençol freático ser bastante raso, com profundidade variando entre zero e 1 m nessas regiões, e também à presença de gleissolos, solos sujeitos a inundações e com a presença do lençol freático próximo à superfície na maior parte do ano.

Tais áreas caracterizam-se também pela presença de unidades geológicas mais suscetíveis à contaminação por infiltração, como os depósitos aluvionares (areias e cascalhos), e pela presença de latossolo vermelho-amarelo, solo de textura argilosa a arenosa, com elevada porosidade e permeabilidade à água no DF. Além disso, observa-se que a porção central e leste da sub-bacia do Riacho Fundo possui espessuras menores da camada vadosa, variando entre zero e 5 m, o que torna essas regiões mais suscetíveis à contaminação.

As áreas com vulnerabilidade moderada e baixa ocorrem em zonas de lençóis freáticos mais profundos, localizados abaixo de 10 m da superfície, cuja camada vadosa é mais espessa, superior a 10 m. Além disso, predominam os solos de textura argilossiltosa, os latossolos vermelhos e os cambissolos, cujos valores de permeabilidade são menores.

Por fim, observa-se que o ACJC está situado em zonas de moderada a alta vulnerabilidade à contaminação, o que evidencia a necessidade de monitoramento e controle dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais próximos ao aterro, sobretudo em razão da sua proximidade às matas de galeria, cuja função de barreira de proteção natural dos cursos hídricos pode ser comprometida. Destaca-se, particularmente, a vulnerabilidade dos córregos Cabeceira do Valo e do Acampamento, pertencentes, respectivamente, às sub-bacias do Riacho Fundo e do Bananal. Conforme se observa na Figura 3, tais córregos, além de muito próximos ao aterro, estão localizados em áreas de alta susceptibilidade à contaminação.

Estimativa do balanço hídrico no Aterro Controlado do Jóquei Clube

Os resultados do balanço hídrico simulado pelo modelo HELP nas cinco porções do aterro são apresentados na Tabela 4. Observa-se que a soma dos valores correspondentes ao escoamento superficial, à evapotranspiração e à percolação através da última camada equivale ao valor de precipitação, cuja lâmina d'água é igual para todas as áreas. Os valores referentes à "percolação através da última camada" correspondem à geração de líquidos percolados.

Observa-se que a área 1 (vide Figura 2), apesar de menor, apresentou uma estimativa mais elevada da quantidade produzida de líquidos percolados. Tal fato é justificado pela presença de cobertura vegetal densa na região, que se recompõe após o término do período em que os resíduos sólidos foram nela depositados, entre os anos de 1995 e

Tabela 4 - Valores anuais estimados para o balanço hídrico no Aterro Controlado do Jôquei Clube pelo modelo *Hydrologic Evaluation of Landfill Performance* (HELP).

	Precipitação	Escoamento superficial	Evapotranspiração	Percolação através da última camada
Área 1				
Volume (m³/ano)	284.666	9.821	157.243	117.602
Lâmina d'água (mm/ano)	1.483	55	819	609
Parcela (%)	100	3,45	55,24	41,31
Área 2				
Volume (m³/ano)	239.538	70.708	87.336	81.494
Lâmina d'água (mm/ano)	1.483	438	539	506
Parcela (%)	100	29,52	36,46	34,02
Área 3				
Volume (m³/ano)	1.121.850	154.995	474.014	492.841
Lâmina d'água (mm/ano)	1.483	209	625	649
Parcela (%)	100	13,82	42,25	43,93
Área 4				
Volume (m³/ano)	1.252.596	89.949	678.851	483.796
Lâmina d'água (mm/ano)	1.483	110	762	611
Parcela (%)	100	7,18	54,20	38,62
Área 5				
Volume (m³/ano)	683.523	89.651	334.441	259.431
Lâmina d'água (mm/ano)	1.483	196	725	562
Parcela (%)	100	13,12	48,93	37,95

1996. A vegetação consolidada ampliou a capacidade de infiltração da água no solo e reduziu a parcela escoada superficialmente. O mesmo ocorre com a área 4 e com a parcela leste da área 3, cuja cobertura vegetal encontra-se bastante reconstituída pelo fato de essa região ter sido embargada pelo Instituto Brasileiro de Recursos Renováveis (IBAMA), por fazer fronteira com o PNB.

Ainda observando a Figura 2, a cobertura vegetal da área 2 é praticamente ausente, marcada pela exposição dos resíduos sólidos a céu aberto. Além disso, o fato de essa área apresentar declividade mais elevada (5,7%) favorece o escoamento superficial da água precipitada, reduzindo a parcela de água infiltrada e, conseqüentemente, a geração de líquidos percolados. A área 5, por sua vez, não pertence ao

ACJC desde 1978, de modo que as camadas de resíduos nela aterradas são muito menos espessas. Além disso, cerca de 60% de sua área encontra-se impermeabilizada em razão do assentamento do núcleo habitacional da Estrutural, o que contribui para a redução da parcela de água infiltrada.

Os resultados encontrados demonstram que a quantidade de líquidos percolados gerados em um aterro é diretamente proporcional à quantidade de água que nele infiltra e é influenciada pelas condições de funcionamento da camada de cobertura do aterro. É importante destacar que, conforme Sobrinho (2000) observou, o volume de líquidos percolados simulado pelo HELP pode ser superestimado pela subestimação do escoamento superficial, em função das características da camada superficial e da cobertura vegetal. A subestimação do escoamento superficial é caracterizada pela forma como o HELP considera o fenômeno da precipitação.

Apesar dessas limitações citadas referentes ao modelo HELP, pode-se afirmar, com relação aos resultados obtidos, que a área 3 do ACJC apresenta maior potencial de contaminação, dado o maior volume de líquidos percolados gerados. Tal fato é justificado pelo volume de resíduos depositados nessa porção do aterro, superior ao depositado nas outras áreas, pois essa porção encontrava-se ativa desde o ano de 1987. O volume mais elevado de líquidos percolados produzido na área 3 é corroborado pelo estudo desenvolvido por Cavalcanti (2013), o qual, a partir de métodos geoeletricos, detectou a lixiviação de maiores quantidades de chorume produzido em direção ao nível freático, bem como pelo estudo de Carneiro (2002), segundo o qual parte da região compreendida pela área 3 desta pesquisa apresentou valores de líquidos percolados superiores às demais.

Em relação à área 4, a sua cobertura vegetal se reestabeleceu a partir da camada superficial, o que ampliou a capacidade de infiltração da água precipitada no solo que, por sua vez, contribuiu para o aumento da produção de chorume proveniente dos resíduos sólidos aterrados no passado. Paralelo a isso, Carneiro (2002) observou uma elevada concentração de amônia na amostra de água de um poço localizado na região correspondente à área 4 do ACJC, indicando que o seu lençol freático já sofria, no ano de 2002, alterações significativas na qualidade de suas águas, em razão da contaminação provocada pelo chorume percolado no solo.

Nesse sentido, é importante que sejam instalados poços de monitoramento para verificação da qualidade das águas subterrâneas nos limites do aterro, com avaliação dos principais parâmetros indicadores de contaminação, sobretudo nas áreas a jusante da nascente do Córrego Cabeceira do Valo, localizado a oeste do aterro, e nas áreas próximas à nascente do Córrego do Acampamento, localizado a leste. Recomenda-se também que os sistemas de coleta de chorume e de água pluvial sejam submetidos à manutenção periódica, pois são comuns os relatos dos funcionários do ACJC sobre vazamentos desses sistemas precários.

Mapa da temperatura de cobertura do solo

A metodologia citada para obtenção da temperatura de cobertura do solo a partir das bandas espectrais do infravermelho termal das imagens TM/Landsat permitiu a obtenção dos mapas apresentados na Figura 4, o que possibilitou uma avaliação temporal do comportamento da temperatura de cobertura do solo entre os anos de 1986 e 2016. Observa-se tendência de aumento da temperatura de cobertura do solo no período analisado, sobretudo ao final da década de 1990. Para se proceder a uma análise da distribuição subsuperficial do biogás é necessário, todavia, revisar o histórico de deposição dos resíduos sólidos no ACJC.

Inicialmente, observa-se na Figura 4 que o ano de 1986 apresenta uma porção a sudeste do ACJC com valores de temperatura mais elevados. Entre os anos de 1978 e 1986, apenas essa porção a sudeste havia sido utilizada para dispor os resíduos sólidos (PEREIRA *et al.*, 1997a), evidenciando a possibilidade de a temperatura da superfície do solo mais elevada estar associada à produção de biogás resultante do processo de degradação da fração orgânica dos resíduos sólidos nessa região. Além disso, destaca-se que a porção a sudeste fora dos limites do ACJC, cujos valores de temperatura também são mais elevados, foi utilizada para depósito de resíduos sólidos até o ano de 1978 (PEREIRA *et al.*, 1997a), o que corrobora o vínculo entre a produção de biogás e o aumento da temperatura da superfície.

A partir de 1987, a deposição de resíduos no aterro procedeu-se para a sua região intermediária (CARNEIRO, 2002). Observa-se na Figura 4 que, de 1998 em diante, a temperatura apresenta-se mais elevada em toda a sua extensão, inclusive na porção norte, cujos resíduos passaram a ser dispostos a partir do ano de 1995 (PEREIRA *et al.*, 1997a), de modo a evidenciar um possível aumento na geração de biogás em razão do acúmulo dos resíduos sólidos.

Por fim, observa-se nas imagens dos anos de 2010, 2013 e 2016, a ocorrência de manchas de temperatura mais elevadas nas regiões correspondentes, sobretudo, às porções 3 e 4 do ACJC (vide Figura 2). Nesse sentido, tem-se que possivelmente o biogás produzido está mais concentrado nessas duas regiões, o que é coerente, visto que correspondem às duas áreas que ainda estavam ativas no início do ano de 2018, com atividade de biodegradação mais intensa.

Azevedo e Souza (2013), por sua vez, verificaram que as características ambientais e antrópicas de determinadas localidades são determinantes para a definição da temperatura de cobertura do solo alcançada. Assim, a análise da temperatura de cobertura do solo se constitui em um indicador de qualidade da distribuição subsuperficial de biogás no ACJC.

Todavia, recomenda-se a utilização de modelos que estimem o volume de biogás gerado em aterros, além de estudos acerca das características de migração dos gases produzidos, a fim de que se avalie com maior precisão o nível de periculosidade representado pelas

emissões de biogás no ACJC, tendo em vista que este oferece riscos à população fronteiriça.

Análise final

Na Figura 5, é apresentada a superposição das cinco áreas do aterro, separadas de acordo com os valores de percolado produzido (mm/ano), obtidos por meio do modelo HELP, com outros dois resultados: à esquerda, tem-se a superposição com as áreas de vulnerabilidade natural à contaminação, obtidas pela metodologia DRASTIC, ao passo que,

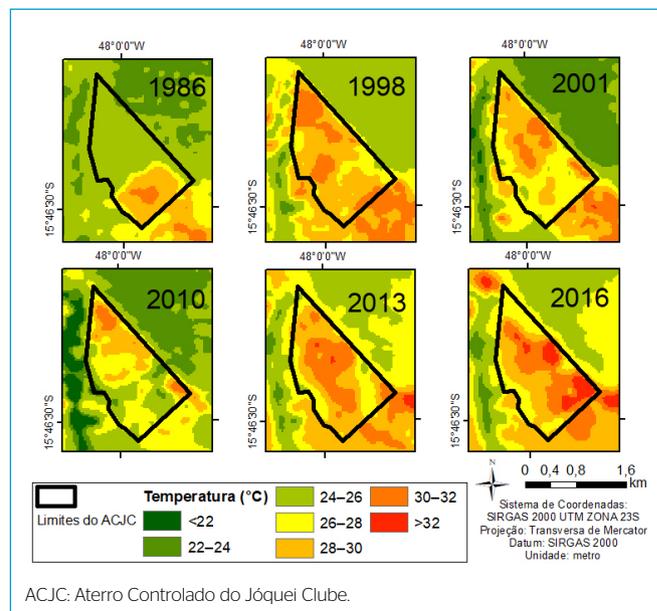


Figura 4 - Mapas da temperatura de cobertura do solo, correspondentes ao período de 1986 a 2016.

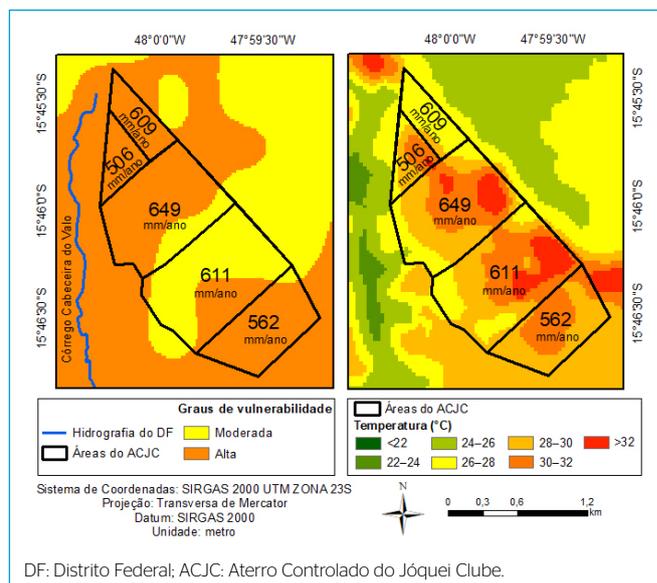


Figura 5 - Superposição dos valores de percolado produzido por área (mm/ano), obtidos pelo modelo *Hydrologic Evaluation of Landfill Performance* (HELP), com as áreas de vulnerabilidade à contaminação, resultantes da metodologia DRASTIC (à esquerda), e os valores de temperatura da cobertura do solo referentes ao ano de 2016 (à direita).

à direita, tem-se a superposição com o mapa de temperatura da cobertura do solo referente ao ano de 2016.

Os resultados da simulação do balanço hídrico obtidos por meio do modelo HELP demonstram que o potencial de contaminação por chorume do ACJC é elevado e que tal fato se agrava pelo aterro estar inserido em zonas de moderada a alta vulnerabilidade natural à contaminação, conforme se observa no mapa à esquerda da Figura 5. Além disso, os mapas de temperatura da cobertura do solo dos anos mais recentes, sobretudo do ano de 2016, evidenciaram manchas de temperatura mais elevadas nas áreas 3 e 4 do aterro (vide mapa à direita da Figura 5), onde o modelo HELP simulou os maiores volumes de líquidos percolados. Essas constatações reforçam a necessidade de monitoramento e controle prioritário das áreas 3 e 4 do aterro, em razão dos riscos de contaminação apresentados tanto para o lençol freático quanto para a atmosfera.

CONCLUSÕES

O mapa de vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos, gerado a partir da aplicação da metodologia DRASTIC, evidenciou áreas de elevada vulnerabilidade subjacentes e próximas ao ACJC, que corresponde a uma das principais fontes poluidoras das sub-bacias hidrográficas do Bananal e do Riacho Fundo, indicando a urgência de implementação de medidas de controle do avanço da contaminação pelo chorume e seu constante monitoramento.

A simulação do balanço hídrico no ACJC por meio do modelo HELP constitui uma importante etapa inicial para a análise do potencial de contaminação do aterro, pois estima a geração do volume de líquidos percolados. O resultado da simulação confirmou a tendência de contaminação observada em estudos anteriores, a qual é proveniente principalmente das áreas 3 e 4 do aterro, áreas estas recentemente ativas quanto à disposição dos resíduos sólidos. Recomenda-se, para estudos futuros, a utilização de outros modelos que incorporem os resultados

do balanço hídrico e simulem a trajetória dos contaminantes, de modo a permitir o delineamento da pluma de contaminação.

Ressalta-se que a precisão da modelagem hidrológica está muito relacionada à qualidade dos dados levantados, sobretudo os referentes às camadas de resíduos sólidos e de solo. Os dados obtidos com o VANT para a área 3 do aterro permitiram a geração de um MDT com elevada resolução espacial, o que possibilitou obter maior confiabilidade em relação à espessura das camadas de resíduos sólidos dispostas nessa região. Portanto, recomenda-se que seja realizado um voo aerofotogramétrico com VANT sobre toda a extensão do ACJC, em uma escala que possibilite a geração de MDT com resolução espacial inferior a 1 m, o que permitiria a realização de análises mais precisas sobre a evolução das camadas de deposição de resíduos sólidos ao longo dos anos.

Por fim, têm-se que os resultados obtidos com os mapas de temperatura da cobertura do solo apresentaram aumento gradual da temperatura sobre a área ocupada pelo ACJC, o que constitui possivelmente um indicador da distribuição subsuperficial de biogás no aterro. Destaca-se que, nos últimos anos, houve considerável avanço da população em direção à área ocupada pelo aterro, a qual está sujeita a sofrer consequências danosas à vida humana, em razão do risco associado à crescente concentração subsuperficial do biogás. Recomenda-se que sejam realizados voos constantes de VANT equipados com câmera multiespectral na região espectral do infravermelho termal sobre toda a extensão do aterro, a fim de se realizar monitoramentos contínuos a partir da temperatura de cobertura do solo, como indicador da distribuição do biogás presente nas camadas subsuperficiais do ACJC.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal o apoio financeiro concedido à pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABIY, A.Z.; MELESSE, A.M.; BEHABTU, Y.M.; ABEBE, B. (2016) Groundwater vulnerability Analysis of the Tana sub-basin: in application of DRASTIC index method. In: MELESSE, A.; ABTEW W. (org.). *Landscape Dynamics, Soils and Hydrological Processes in Varied Climates*. Cham: Springer Geography. p. 435-441.

AGUIAR, R.L. (1997) *Zoneamento geotécnico geral do Distrito Federal: procedimentos metodológicos e sua inserção na gestão ambiental*. Tese (Doutorado) - Departamento de Geotecnica, Universidade de São Paulo, São Carlos.

AHLERT, S.; REGINATO, P.A.R. (2011) Utilização de geoprocessamento na avaliação da vulnerabilidade dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. *Anais...* p. 5402-5409.

ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R. (1987) *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. EPA/600/2-85/018. Washington, DC.: U.S. Environmental Protection Agency.

- ALVES, M.G.; RAMOS, I.S.; CORIDOLA, R. (2009) Metodologia DRASTIC na análise da vulnerabilidade dos aquíferos livres de Campos dos Goytacazes. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 14., 2009, Natal. *Anais...* p. 3433-3438.
- AZEVEDO, G.F.; SOUZA, N.M. (2013) Uso de imagens Landsat TM 5 para análise da temperatura de superfície do Distrito Federal. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 16., 2013, Foz do Iguaçu. *Anais...* p. 1861-1868.
- BABIKER, I.S.; MOHAMED, M.A.A.; HIYAMA, T.; KATO, K. (2005) A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of The Total Environment*, v. 345, n. 1-3, p. 127-140. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.11.005>
- CARNEIRO, G.A. (2002) *Estudo de Contaminação do Lençol Freático sob a Área do Aterro de Lixo do Jôquei Clube-DF e suas Adjacências*. 140f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.
- CAVALCANTI, M.M. (2013) *Aplicação de métodos geoeletricos no delineamento da pluma de contaminação nos limites do Aterro Controlado do Jokey Clube de Brasília - DF*. 111f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.
- DORNELAS, K.D.S.; SILVA, C.L.; OLIVEIRA, C.A.S. (2006) Coeficientes médios da equação de Angstrom-Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 8, p. 1213-1219. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000800001>
- EL-NAQA, A.; HAMMOURI, N.; KUISI, M. (2006) GIS-based evaluation of groundwater vulnerability in the Russeifa area, Jordan. *Revista Mexicana de Ciências Geológicas*, v. 23, n. 3, p. 277-287.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). (2004) *Mapa pedológico digital - SIG atualizado do Distrito Federal, Escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo*. Brasília: EMBRAPA. 31 p.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY OF UNITED STATES (EPA/US). *Hydrologic Evaluation of Landfill Performance, HELP*. EPA/US. Disponível em: <<https://www.epa.gov/land-research/hydrologic-evaluation-landfill-performance-HELP-model>>. Acesso em: 19 maio 2017.
- FREITAS-SILVA, F.H.; CAMPOS, J.E.G. (1998) Geologia do Distrito Federal 1:100.000. *In: FREITAS-SILVA, F.H.; CAMPOS, J.E.G. (org.). Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal*. Brasília: IEMA/SEMATEC/UnB. v. 1. Parte 1. p. 1-87.
- GUIGUER, N.; KOHNKE, M.W. (2002) Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 2002, 12., Florianópolis. *Anais...* 13p.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa. *Download de dados meteorológicos*. INMET. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/inicio.php>>. Acesso em: 9 set. 2017.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). *Teoria: Modelagem Digital de Terreno*. INPE. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/mnt/mnt.htm>>. Acesso em: 22 nov. 2017.
- KOIDE, S.; BERNARDES, R.S. (1998) Contaminação do lençol freático sob a área do Aterro Controlado do Jôquei Clube, Distrito Federal. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 10., São Paulo. *Anais...* 11 p.
- MALARET, E.; BARTOLUCCI, L.A.; LOZANO, D.F.; ANUTA, P.E.; MCGILLEM, C.D. (1985) Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper data quality analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 51, n. 9, p. 1407-1416.
- MENESES, L.V.T. (1988) *Biogás: definição, fontes de geração, processamento, aplicação*. Secretaria de Serviços e Obras, Departamento de Limpeza Urbana, Divisão Técnica de Aterros Sanitários.
- PEREIRA, J.H.F.; PASTORE, E.L.; BERNARDES, R.S.; SOUZA, N.M.; CARVALHO, J.C. (1997a) *Estudos Geológico-Geotécnicos para o Planejamento e Projeto de Disposição de Resíduos Urbanos do Aterro de Lixo do Jôquei*. Relatório Parcial. Brasília: Universidade de Brasília. v. 3.
- PEREIRA, J.H.F.; PASTORE, E.L.; BERNARDES, R.S.; SOUZA, N.M.; CARVALHO, J.C. (1997b) *Estudos Geológico-Geotécnicos para o Planejamento e Projeto de Disposição de Resíduos Urbanos do Aterro de Lixo do Jôquei*. Relatório Final. Brasília: Universidade de Brasília. v. 4.
- PINTO, A. (2016) *Metodologias de Avaliação da Vulnerabilidade à Poluição e Definição de Perímetros de Proteção dos Recursos Hídricos Subterrâneos em Viqueque - Timor Leste*. 96f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto.
- PISCOPO, G. (2001) *Groundwater vulnerability map explanatory, Lachlan Catchment*. Austrália: NSW Department of Land and Water Conservation.
- SAATY, T.L. (1980) *The Analytic Hierarchy Process*. Nova York: McGraw-Hill. 287 p.
- SANTOS, P.C.V. (1996) *Estudos da Contaminação de Água Subterrânea por Percolado de Aterro de Resíduos Sólidos - Caso Jôquei Clube - DF*. 135f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília.
- 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. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development.
- SECRETARIA DE ESTADO DE GESTÃO DO TERRITÓRIO E HABITAÇÃO DO DISTRITO FEDERAL (SEGETH). *Portal*. Disponível em: <<https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/mapa/>>. Acesso em: 14 ago. 2017.

SENER, E.;SENER, S. (2015) Evaluation of groundwater vulnerability to pollution using fuzzy analytic hierarchy process method. *Environmental Earth Sciences*, v. 73, p. 8405-8424. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-4001-3>

SOBRINHO, N.L.C. (2000). *Uma análise do balanço hídrico do aterro sanitário de Presidente Prudente*. 115f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

TAANY, R.A.; ALAWEEN, M.A.; AL-KUISI, M.M.; AL-MANASEER, N.M. (2013) GIS-based model of groundwater vulnerability and

contamination risk of Wadi Kufrinja Catchment area, Jordan. *World Applied Sciences Journal*, v. 24, n. 5, p. 570-581. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.24.05.13210>

TUCCI, C.E.M.; BELTRAME, L.F.S. (2000) Evaporação e Evapotranspiração. *In: TUCCI, C.E.M. (org.) Hidrologia: ciência e aplicação*. 2ª ed. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. v. 4. p. 253-287.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). *Obtenção de imagens de satélites e de radares*. USGS. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: abr. 2017.

