

Contaminação do solo e água subterrânea em áreas de disposição dos resíduos sólidos urbanos no estado de Minas Gerais

A disposição irregular de resíduos sólidos urbanos gera diversos impactos ambientais decorrentes da sua decomposição, cujo produto contém substâncias tóxicas e persistentes que podem contaminar o solo e as águas subterrâneas. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi avaliar a contribuição dos depósitos de resíduos urbanos do Estado de Minas Gerais como fonte poluidora de solo e água subterrânea, analisando os riscos de propagação dos contaminantes de acordo com a pedologia e a litologia locais, bem como avaliar a vulnerabilidade natural dos aquífero à contaminação. Foram realizados o levantamento das áreas contaminadas no período de 2009 a 2020, a elaboração de mapas pedológicos e litológicos, a determinação das cargas hidráulicas e fluxos de contaminação e a aplicação do método GOD. Foi constatado que os depósitos de resíduos sólidos urbanos representam menos de 1% do total de áreas contaminadas em Minas Gerais. A vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos indica que as áreas estudadas – lixões de Contagem e de Itueta e aterros de Itabira e Uberaba, apresentam baixa vulnerabilidade, com exceção do lixão de Nova Lima, que apresenta alta vulnerabilidade. Dentre as áreas estudadas, a área de Nova Lima apresentou a pior situação em virtude do solo raso e com baixa capacidade de retenção de poluentes, da baixa profundidade do aquífero e por apresentar substâncias altamente tóxicas; enquanto Uberaba apresenta maior proteção tanto por apresentar nível d'água mais profundo como por possuir aquífero coberto por uma camada de rocha (dacito), que dificulta o acesso do poluente ao aquífero.

Palavras-chave: Aquífero; Pedologia e Litologia; Vulnerabilidade; Tipos de contaminantes.

Contamination of soil and groundwater in area of urban solid residual disposition in state of Minas Gerais

The irregular disposal of urban solid waste generates several environmental impacts resulting from its decomposition, whose product contains toxic and persistent substances that can contaminate the soil and groundwater. Thus, the objective of the work was to evaluate the contribution of urban waste deposits in the State of Minas Gerais as a polluting source of soil and groundwater, analyzing the risks of propagation of contaminants according to local pedology and lithology, as well as evaluating the natural vulnerability of the aquifer to contamination. The survey of contaminated areas was carried out from 2009 to 2020, the elaboration of pedological and lithological maps, the determination of hydraulic loads and contamination flows and the application of the GOD method. It's already been noted that urban solid waste deposits represent less than 1% of the total contaminated areas in Minas Gerais. The vulnerability to aquifer contamination indicates that the areas studied – Contagem and Itueta waste dumps and Itabira and Uberaba landfills, show low vulnerability, with the exception of the Nova Lima waste dump, which is highly vulnerable. Among the studied areas, the Nova Lima area presented the worst situation due to the shallow soil and low pollutant retention capacity, the low depth of the aquifer and for presenting highly toxic substances; while Uberaba has greater protection both because it has a deeper water level and because it has an aquifer covered by a layer of rock (dacite), which hinders the access of the pollutant to the aquifer.

Keywords: Aquifer; Pedology and Lithology; Vulnerability; Type of contaminant.

Topic: **Engenharia Ambiental**

Received: **06/08/2021**

Approved: **27/08/2021**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Leticia Ribeiro Bastos 

Universidade Federal de Itajubá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1931597647424859>
<http://orcid.org/0000-0002-4898-7719>
leleribeirobastos@gmail.com

Fernanda Maria Belotti 

Universidade Federal de Itajubá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/5777360077113950>
<http://orcid.org/0000-0003-3417-3738>
fernandabelotti@unifei.edu.br

Edison Aparecido Laurindo 

Universidade Federal de Itajubá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/5960988651587539>
<http://orcid.org/0000-0002-0679-3983>
edisonlaurindo@unifei.edu.br



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0024

Referencing this:

BASTOS, L. R.; BELOTTI, F. M.; LAURINDO, E. A.. Contaminação do solo e água subterrânea em áreas de disposição dos resíduos sólidos urbanos no estado de Minas Gerais. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.8, p.259-273, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0024>

INTRODUÇÃO

Atualmente, uma das grandes preocupações ambientais está relacionada aos resíduos sólidos gerados pela sociedade moderna e consumista. A adoção de tecnologias apropriadas para a destinação e tratamento desses resíduos ainda é um grande desafio devido a constituição de uma mistura muito complexa e de natureza variada como, também, a dificuldade na escolha de locais apropriados à sua instalação (KEMERICH et al., 2014; CARVALHO et al., 2019).

A utilização dos aterros para a destinação dos resíduos ainda continua sendo a maneira mais popular e praticada no gerenciamento deles em torno do mundo. Por consistir na alternativa ainda mais barata de disposição, é a forma mais utilizada no Brasil, na América Latina em geral, e em diversos países. No entanto, esse processo de destinação tem levado a práticas operacionais inadequadas entre as regiões, principalmente, em virtude da escassez de recursos financeiros pelas prefeituras, acarretando falhas de gestão e ineficiência do sistema (SANTOS, 2011; SOARES et al., 2017).

Os aterros, embora importantes, apresentam algumas limitações, tais como, o tempo de vida razoavelmente curto e a grande dificuldade na obtenção de locais adequados para a sua implementação (MUÑOZ, 2002). As áreas disponíveis para essa finalidade apresentam-se cada vez mais escassas, uma vez que devem ser atendidos critérios de ordem social, econômica e ambiental. Dentre esses critérios de ordem social, destacam-se a distância dos núcleos residenciais urbanos e acesso à área através de vias com baixa densidade de ocupação; os aspectos econômicos, a facilidade de acesso ao aterro, custo de aquisição do terreno e de investimento em construção e infraestrutura e disponibilidade de material de cobertura; e os aspectos ambientais, como a distância do lençol freático, corpos d'água e extração de água subterrânea, características do embasamento geológico, declividade do terreno e características do solo. Contudo, o que pode ser verificado é que a administração municipal, incumbida do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, geralmente opta pelas áreas que possuem o menor valor econômico, e nem sempre os adequados sob o ponto de vista ambiental (SAMIZAVA et al., 2008; NASCIMENTO, 2012; PINHEIRO et al., 2018).

Neste contexto, os países em desenvolvimento apresentam situação mais crítica, pois neles ainda predominam formas inadequadas de disposição, como os lixões e os aterros controlados. De acordo com a ABRELPE (2020), mais de 40% do total dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil tem esta destinação e não se tem registrado iniciativas e programas consistentes para cessar tais práticas, desde a sanção da Política Nacional de Resíduos Sólidos em 2010 (BRASIL, 2010). Essas formas, geralmente, não obedecem aos critérios técnicos para a escolha da área e não há qualquer cuidado quanto à emissão de gases produzidos e ao chorume, representando, assim, uma fonte permanente de poluição (FRÉSCA, 2007; SETTA, 2019).

Além disso, existe o risco, por parte dos aterros sanitários, que mesmo sendo considerados uma técnica de disposição final ambientalmente correta, gerarem contaminação pela perda da funcionalidade ou falha de projetos construtivos, operacionais e naturais (BRANCO et al., 2018; HELENE, 2019). O aterro mal projetado pode causar poluição do ar pela liberação de odores fétidos, fumaças, gases tóxicos ou material particulado; das águas superficiais pelo escoamento de líquidos percolados ou carreamento de resíduos pela

ação das águas da chuva, do solo e das águas subterrâneas, pela infiltração de líquidos percolados (TSUTIYA et al., 2001; COLVERO et al., 2017).

O principal problema ambiental decorrente da disposição dos resíduos está relacionado à contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas devido à sua decomposição, que gera um líquido poluente de cor escura e odor fétido denominado chorume, cuja composição é muito variada, complexa e influenciada por fatores exógenos como a idade do aterro, as condições geológicas e geomorfológicas local, eventos climáticos diversos e as características dos resíduos depositados (SILVA, 2002; SANTOS, 2003; LAGE, 2019). Essa contaminação é decorrente da sua percolação, junto a líquidos de origem externa e da umidade inicial dos resíduos por meio das camadas do aterro. Neste processo ocorre a solubilização de substâncias orgânicas e inorgânicas e o arraste de microrganismos e outros materiais biológicos (CAPELO NETO et al., 2005; MANNARINO et al., 2011; ZELIC, 2017).

Dessa forma, o trabalho teve como objetivo avaliar a contribuição dos depósitos de resíduos urbanos do Estado de Minas Gerais como fonte poluidora de solo e água subterrânea, analisando os riscos de propagação dos contaminantes de acordo com o tipo de solo e a litologia locais; bem como avaliar a vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação na área de estudo.

METODOLOGIA

Área de estudo

Para a realização dos estudos foram selecionadas as áreas contaminadas por depósitos de resíduos sólidos listadas no Cadastro de Áreas Contaminadas da Fundação Estadual do Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais (FEAM, 2021). As áreas selecionadas foram: Lixão do Cinco em Contagem; Aterro Municipal de Itabira; Lixão do município de Itueta; Lixão do Galo em Nova Lima e o Aterro Sanitário Municipal de Uberaba. Na Figura 1 são mostrados mapas de localização dos municípios com as áreas contaminadas pela disposição dos resíduos sólidos listados pela FEAM.

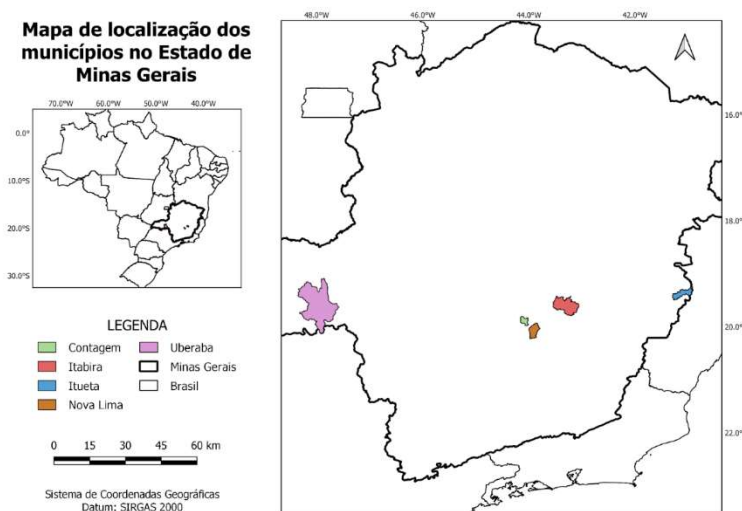


Figura 1: Mapa de localização dos municípios com as áreas contaminadas pela disposição de resíduos sólidos.

Levantamento histórico das áreas contaminadas e elaboração dos gráficos

A primeira etapa do estudo consistiu no levantamento de dados secundários relacionados às áreas contaminadas no Estado de Minas Gerais disponibilizados pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) no período de 2009 a 2020. Inicialmente, definiu-se o percentual de contribuição dos aterros sanitários como fonte de contaminação de solo e de água subterrânea, assim como levantou-se o gráfico contendo a porcentagem total de áreas contaminadas em relação ao número de áreas cadastradas cuja fonte de contaminação são os depósitos de resíduos urbanos. Também se identificou os principais contaminantes nas áreas contaminadas.

Elaboração de mapas temáticos de pedologia e litologia

Para analisar o comportamento dos contaminantes de acordo com o tipo de solo e o tipo de rocha presentes nas áreas contaminadas, elaborou-se mapas pedológicos, mapeados pela FEAM e pela Universidade Federal de Viçosa - UFV; e litológicos, mapeados pela Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais - Codemig e pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM, ambos disponíveis na plataforma *WebGis* da Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Adicionalmente, os limites municipais usados foram extraídos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016) e os mapas temáticos foram elaborados com o auxílio do *software QGIS 3.16.0 Hannover*.

Determinação das cargas hidráulicas e fluxo de contaminação

As cargas hidráulicas e o fluxo de contaminação foram determinados seguindo a metodologia de Health (1982), onde o sentido do movimento da água subterrânea foi determinado a partir dos dados de três poços, de cada município, na qual foram alocados em um arranjo triangular.

O conjunto de dados foi obtido a partir do *website* do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) do Sistema Geológico do Brasil (CPRM, 2021) e, no caso de Itabira, complementados pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto - SAAE (informação verbal)¹. As informações dos poços estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Dados dos poços utilizados.

Município	Poços	Cota / m	Profundidade / m	Nível d'água / m	Carga de posição / m	Carga de pressão / m	Carga total / m	hidráulica
Contagem	1	855,00	100,00	4,30	850,70	0,00	850,70	
	2	858,00	120,00	8,00	850,00	0,00	850,00	
	3	900,00	127,00	17,20	882,80	0,00	882,80	
Itabira	1	762,00	150,00	3,79	758,21	0,00	758,21	
	2	686,53	61,00	4,00	682,53	0,00	682,53	
	3	751,33	100,00	5,20	746,13	0,00	746,13	
Itueta	1	96,00	150,00	12,50	83,50	0,00	83,50	
	2	164,00	120,00	2,90	161,10	0,00	161,10	
	3	108,00	100,00	1,60	106,40	0,00	106,40	

¹ Dados fornecido pelo desenhista do SAAE Itabira, Miguel Albino da Silva, em outubro de 2020.

Nova	1	1425,00	111,30	13,50	1411,50	0,00	1411,50
Lima	2	1326,00	104,20	95,68	1230,32	0,00	1230,32
	3	918,00	258,00	42,32	875,68	0,00	875,68
Uberaba	1	756,65	110,00	60,00	696,65	0,00	696,65
	2	953,00	80,00	0,50	952,50	0,00	952,50
	3	985,00	85,00	6,30	978,70	0,00	978,70

Para a obtenção do sentido do fluxo dos contaminantes utilizou-se a posição geográfica relativa, os dados da cota do terreno e do nível d'água, encontrando as cargas hidráulicas totais, e as distâncias entre eles, sendo este último, obtido pelo *QGIS* 3.16.0. Todos os poços apresentaram carga de pressão 0,00 m por serem de ocorrência livre, fazendo com que só tenha a influência da pressão atmosférica, que é nula (CABRAL, 2008; MIRANDA, 2012).

Aplicação do método *GOD*

O método *GOD*, proposto por Foster et al. (1988), modificado por Foster et al. (2006), permite estimar a vulnerabilidade do aquífero quanto à contaminação baseando-se na análise de três parâmetros representados por "*G*" (*Groundwater hydraulic confinement*) que classifica o grau de confinamento, variando de 0,0 a 1,0; "*O*" (*Overlying strata*) que refere-se a litologia encontrada na zona não saturada e/ou seu grau de fraturamento variando de 0,4 a 1,0 e "*D*" (*Depth to groundwater table*) que estima a profundidade até o lençol freático (para aquíferos não confinados) ou da profundidade do primeiro nível principal de água subterrânea (para aquíferos confinados) variando de 0,6 a 1,0 (FOSTER et al., 2006).

O cálculo do Índice de Vulnerabilidade (IV) é determinado pelo produto dos três parâmetros acima, como demonstrado na Equação 1, na qual valores finais podem ser classificados como: 0,0 a 0,1 (desprezível), 0,1 a 0,3 (baixa), 0,3 a 0,5 (média), 0,5 a 0,7 (alta) e 0,7 a 1,0 (extrema) (FOSTER et al., 2006).

$$IV = G \times O \times D \quad (1)$$

Para a aplicação do método *GOD* foram extraídas informações dos poços tubulares presentes no banco de dados do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais (CPRM). Dessa forma, foram utilizados apenas os poços que apresentaram os registros necessários para a execução do método, como, a identificação do número de cadastro do poço, coordenadas, formações geológicas penetradas na perfuração do poço, a condição do meio aquífero (livre, confinado ou semi-confinado), e o nível estático da água.

Com as informações dos poços foi possível estabelecer os valores para cada tipo de poço em cada município. Os índices *GOD* foram calculados de acordo com Foster et al. (2006), através da alimentação dos dados obtidos em uma planilha montada no programa *Microsoft Excel 2016*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da série histórica das áreas contaminadas por depósitos de resíduos sólidos urbanos identificou que entre os anos de 2009 a 2020, o estado de Minas Gerais apresentou um total de 5 áreas contaminadas. O primeiro registro foi em 2011 com os municípios de Contagem (Lixão dos Cinco), Itabira (Aterro de Itabira) e Nova Lima (Lixão do Galo). Em 2018, teve-se a inserção de uma área em Uberaba (Aterro

Sanitário Municipal de Uberaba) e, em 2019, o aumento de mais uma área em Itueta (Lixão de Itueta) (FEAM, 2021). Ao longo dos anos, esse tipo de contaminação representou menos de 1% do total de áreas contaminadas registradas pela FEAM (Figura 2). Todas as áreas tiveram o solo e a água subterrânea como meios impactados.

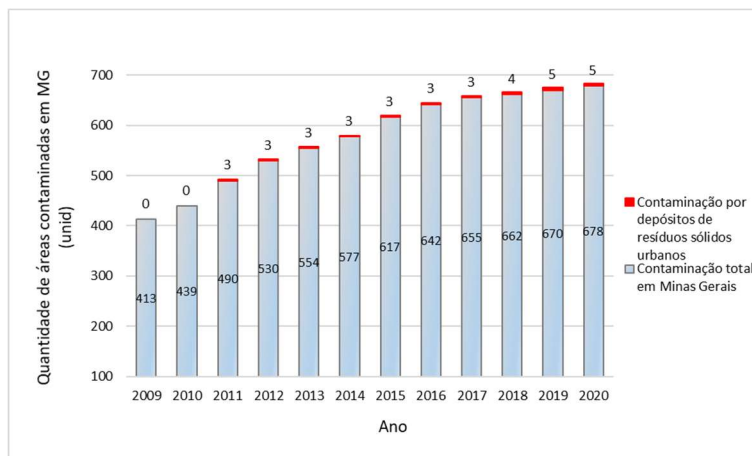


Figura 2: Relação entre o total de áreas contaminadas x contaminação por depósitos de resíduos sólidos urbanos no Estado de Minas Gerais.

Os tipos de contaminantes encontrados nas áreas estudadas foram classificados em dois grupos: compostos inorgânicos tóxicos incluindo-se os metais pesados e os elementos que, em alta concentração, conferem toxicidade, como o alumínio, e os compostos orgânicos tóxicos como o cloreto de vinila e o benzeno. Observou-se que mais de 90% dos contaminantes encontrados são classificados como compostos inorgânicos tóxicos, uma vez eles não são biodegradáveis, tornando-se bioacumulativos, determinando a sua permanência em ciclos biogeoquímicos globais (GONÇALVES et al., 2016). Os compostos orgânicos tóxicos foram encontrados em menor porcentagem, cerca de 7%. Essa menor porcentagem pode ser atribuída à capacidade da zona não saturada em atenuar os materiais orgânicos, através dos processos de oxidação, redução, volatilização, microbiológico, neutralização por adsorção iônica (filtração) (MEAULO, 2004).

A vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos nas áreas de localização dos depósitos de resíduos sólidos urbanos, estimada pelo método *GOD*, indica que quase todos os municípios apresentam baixa vulnerabilidade, com exceção do município de Nova Lima, que apresenta alta vulnerabilidade, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros do método *GOD*.

Cidade	Poço	Grau de confinamento hidráulico	"G"	Ocorrência de estrato cobertura	"O"	Distância ao nível d'água (m)	"D"	IV	Classe de vulnerabilidade
Contagem	3100020349	Livre (coberto)	0,60	Solo residual	0,40	10,35	0,80	0,19	Baixa
Contagem	3100025882	Livre (coberto)	0,60	Solo residual	0,40	7,00	0,80	0,19	Baixa
Itabira	3100002296	Livre (coberto)	0,60	Solo residual	0,40	1,05	0,90	0,22	Baixa
Itabira	3100003630	Livre (coberto)	0,60	Solo residual	0,40	27,00	0,70	0,17	Baixa
Itabira	3100003634	Livre (coberto)	0,60	Solo residual	0,40	3,65	0,90	0,22	Baixa
Itueta	3100005647	Livre (coberto)	0,60	Solo residual	0,40	2,40	0,90	0,22	Baixa
Itueta	3100022259	Livre (coberto)	0,60	Solo residual	0,40	12,5	0,80	0,19	Baixa
Itueta	3100005648	Livre (coberto)	0,60	Solo residual	0,40	1,60	0,90	0,22	Baixa

Nova Lima	3100002370	Livre (coberto)	0,60	Solo residual	0,40	2,00	0,90	0,22	Baixa
Nova Lima	3100002376	Livre	1,00	Metagabro	0,60	0,00	0,90	0,54	Alta
Nova Lima	3100006369	Livre (coberto)	0,60	Solo residual	0,40	4,00	0,90	0,22	Baixa
Uberaba	3100001537	Livre (coberto)	0,60	Dacito	0,60	20,00	0,80	0,29	Baixa
Uberaba	3100007117	Livre (coberto)	0,60	Solo residual	0,40	15,00	0,80	0,19	Baixa
Uberaba	3100001543	Livre (coberto)	0,60	Dacito	0,60	60,00	0,60	0,22	Baixa

Em relação ao índice do grau de confinamento hidráulico, todos os municípios receberam valores superiores a 0,6, demonstrando que todos possuem aquíferos do tipo livre, coberto com solo residual; exceto o aquífero de Uberaba que é coberto por dacito e o de Nova Lima que não apresenta cobertura, quando encontrado na forma aflorante em superfície (0,00 m).

O índice G, que trata do confinamento hidráulico de água subterrâneas, faz parte do conjunto de características que determinam o quanto o aquífero poderá ser afetado pela carga de poluentes (CETESB, 2021). O tipo de aquífero, confinado ou livre, exerce o maior controle sobre o acesso hidráulico dos contaminantes, independente do contaminante considerado (HIRATA, 1994). Nos aquíferos confinados, existe uma maior dificuldade de contato do contaminante com a água subterrânea, devido tanto a ele estar delimitado por camadas impermeáveis como também pela filtração e reações biogeoquímicas que ocorrem na camada não saturada, tornando-os mais bem protegidos (BOSCOV, 2008; HIRATA et al., 2008; REBOUÇAS, 2008).

Nos aquíferos livres, existe uma maior preocupação, pois esse tipo concede, às águas subterrâneas, maior exposição à contaminação, especialmente nas áreas onde o lençol freático é raso e em que a zona vadosa é pouco espessa, constituindo-se em uma zona de alta vulnerabilidade (FOSTER et al., 2006; HIRATA et al., 2008). Diante disso, observou-se essa condição no município de Nova Lima, no qual o aquífero que não apresentou nenhum tipo de cobertura, demonstrou-se mais vulnerável, ao contrário dos outros municípios com aquíferos cobertos.

A profundidade da água subterrânea é uma propriedade de grande relevância, uma vez que, quanto mais profundo for o lençol freático, maior é o tempo e a distância que o contaminante terá que percorrer. Quando infiltrados, os contaminantes terão maior interação com o solo, aumentando o tempo disponível para que as reações de atenuação aconteçam, o que dificultaria a chance de contato com as águas subterrâneas, que, conseqüentemente, tornaria o aquífero menos vulnerável a contaminação (FOSTER et al., 2006; SOARES, 2012).

Nota-se que a maioria dos aquíferos apresentados possuem valores de *D* (Tabela 2) entre 0,8 e 0,9, o que retrata pequena distância entre a superfície e o nível freático. De acordo com Pinheiro et al. (2015), quanto mais raso for o nível da água maior será o risco de contaminação e, portanto, os parâmetros adotados serão mais elevados. Diante disso, quando comparados os municípios de Uberaba e Nova Lima, observou-se uma diferença expressiva entre as profundidades. Enquanto o primeiro possui maiores distâncias da superfície do solo, tornando-o menos vulnerável, o segundo apresenta o aquífero mais superficial, o que facilitaria a interação da água com o contaminante (VOGEL, 2008). Estudo como de Alves (2012) corrobora

com essa informação, indicando que a maior proximidade entre a base do depósito de lixo e a água subterrânea proporciona maior infiltração do lixiviado na zona saturada do aquífero.

Embora a maioria dos aquíferos apresente níveis d'água pouco profundos, o que ocasionaria em uma alta vulnerabilidade, os perfis naturais dos solos sobrejacentes têm um papel relevante, podendo atuar na susceptibilidade à contaminação do aquífero influenciando diretamente na infiltração e atenuando grande parte dos contaminantes (RIBEIRO et al., 2007; SILVA et al., 2020).

A zona de aeração funciona como uma faixa protetora do aquífero contra a poluição das águas subterrâneas, possuindo a capacidade de reter quantidades apreciáveis de diversos contaminantes. O tipo de material da zona vadosa condiciona o tempo de contato com o poluente, permitindo a ocorrência de diversos processos como de degradação, oxidação e adsorção (CORREIA, 2006; SOARES, 2012).

De acordo com os mapas pedológicos apresentados nas figuras 3 a 7, observa-se que os solos encontrados acima dos aquíferos das áreas contaminadas, nos municípios de Itabira (Figura 3) e Uberaba (Figura 4) são da classe de Latossolos, caracterizados, de acordo com a EMBRAPA (2018), como solos mais espessos, bem como os Argissolos, presentes em Itueta (Figura 5). Ambos se tornam menos vulneráveis à contaminação devido às suas maiores profundidades, diferentemente do de Nova Lima (Figura 6), que se encontra mais vulnerável, uma vez que o aquífero está inserido em um Cambissolo, caracterizado por solos mais rasos (EMBRAPA, 2018), o que poderia favorecer a sua contaminação.

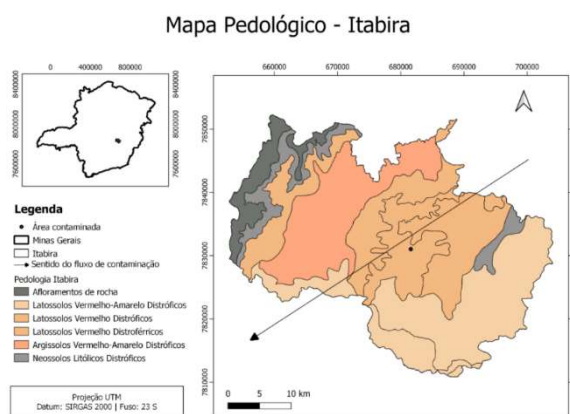


Figura 3: Mapa pedológico de Itabira.

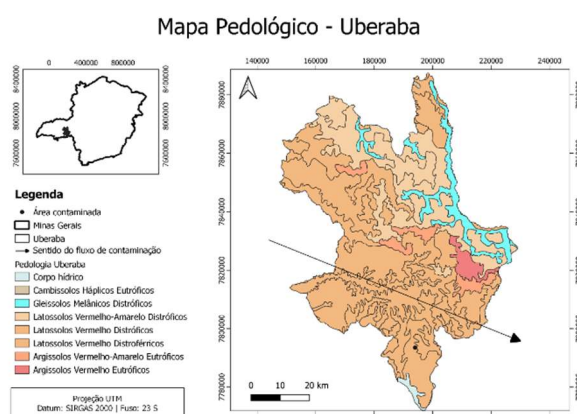


Figura 4: Mapa pedológico de Uberaba.

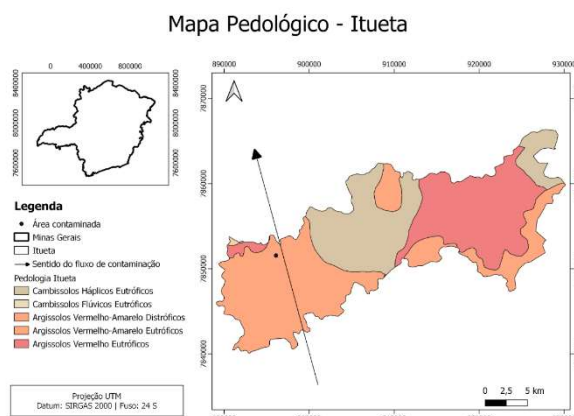


Figura 5: Mapa pedológico de Itueta.

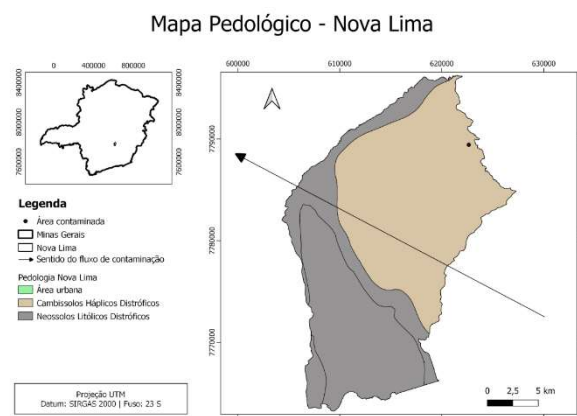


Figura 6: Mapa pedológico de Nova Lima.

O estudo de Carriconde-Azevedo et al. (2013) apresenta um cenário similar de estudo, no qual avaliou o comportamento de contaminante em diferentes tipos de solo. Eles observaram que o Argissolo e

Latossolo resultaram em um elevado poder de atenuação, enquanto o Cambissolo apresentou menor potencial de atenuação, principalmente aos metais.

Em Cambissolos, Suzuki et al. (2005) e Lage (2019) observaram que a inserção de uma área de depósitos irregulares de resíduos, nessa classe de solo, apresentou susceptibilidade à contaminação, indicando baixa capacidade de retenção dos metais pesados, possibilitando que eles atingissem a água subterrânea. Diante disso, sugere-se que a área de Nova Lima (Figura 6) é a mais vulnerável, tanto por apresentar aquíferos mais próximos ao solo, quanto por possuir características pedológicas, que favorecem a percolação dos contaminantes.

Já nos Latossolos, estudos como o de Oliveira et al. (2004) demonstraram que os metais ficaram retidos no solo, ocasionando no decréscimo da concentração dos poluentes devido ao aumento da distância do fluxo, assim como constatado por Borba et al. (2019), no qual o tipo de solo apresenta condições favoráveis para o suporte das atividades geradoras de resíduos sólidos. Rowe et al. (2009) também confirmaram o grande poder de atenuação dos contaminantes em Latossolos Vermelhos Distroféricos, os mesmo de Itabira e Uberaba, evidenciando que o solo apresentou a redução na permeabilidade quando em contato com o chorume.

Nos Argissolos, Pereira Júnior et al. (2015) e Born (2013) descreveram boas condições de atenuação natural, devido ao acúmulo de argila nos horizontes subsuperficiais, conferindo baixa permeabilidade. Entretanto, quando comparados com os Latossolos, Caires (2009) mostrou que eles podem conferir menor atenuação, principalmente dos metais pesados. Ainda assim, os Argissolos apresentam melhores condições para instalação de aterros quando comparados ao Cambissolos.

As propriedades pedológicas nem sempre são capazes de produzir uma redução significativa dos contaminantes (STRELAU, 2006). Diante disso, as características do meio geológico, também são importantes por contribuírem no seu comportamento subterrâneo, a partir de informações sobre a litologia, presença de falhas ou fraturas, existência de aquíferos importantes, colaborando para a previsão dos caminhos preferenciais de propagação dos contaminantes (CETESB, 2001).

Os mapas litológicos das áreas estudadas (Figuras 8 a 12) mostram a direção dos contaminantes em cada área, bem como as litologias dos municípios de Contagem, Itabira, Itueta, Nova Lima e Uberaba, respectivamente. O sentido do fluxo de contaminantes na região de Contagem (Figura 8) e Nova Lima (Figura 10) são direcionados à região noroeste, Itueta (Figura 9) para norte, Itabira (Figura 11) para sudoeste, e Uberaba (Figura 12) para leste.

Em relação às litologias, a área de disposição de resíduos sólidos urbanos está localizada em gnaisse, no município de Contagem (Figura 8), em metatonalito no município de Itueta (Figura 9), e em metagabro no município de Nova Lima (Figura 10), todas rochas metamórficas. Em Itabira (Figura 11) e em Uberaba (Figura 12), a área de disposição de resíduos sólidos está localizada em granito e dacito, respectivamente, ambas rochas ígneas (magmáticas).

Em aquíferos de natureza ígnea e metamórfica, a porosidade e a permeabilidade decorrem de fraturas, que, quanto maiores, maior a velocidade da água e, portanto, maior a velocidade de propagação

dos contaminantes (BRAGA, 2006; WAGNER, 2018). Estudo como de Coelho et al. (2004) constatou que na inserção de um aterro sanitário nesse tipo de rocha, o percolado líquido pode ser facilmente transportado por entre as fraturas e fissuras das rochas, atingindo as águas mais profundas. O aquífero de Uberaba é o único coberto por dacito, que é caracterizado por apresentar poucas fraturas (DIAS, 2013). Dessa forma, a presença do dacito torna o aquífero de Uberaba mais protegido que os demais aquíferos estudados.

Mapa Pedológico - Contagem

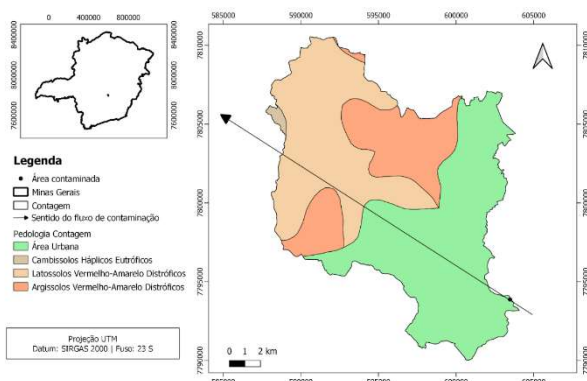


Figura 7: Mapa pedológico de Contagem.

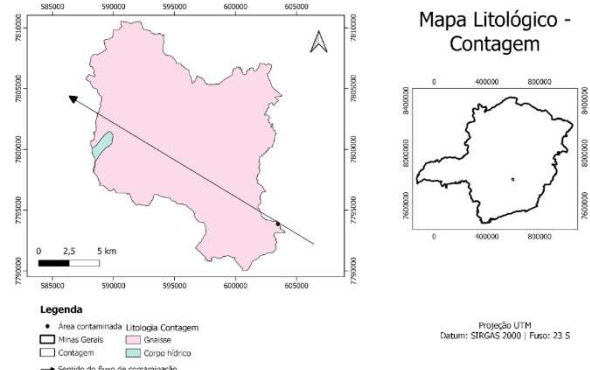


Figura 8: Mapa litológico de Contagem.

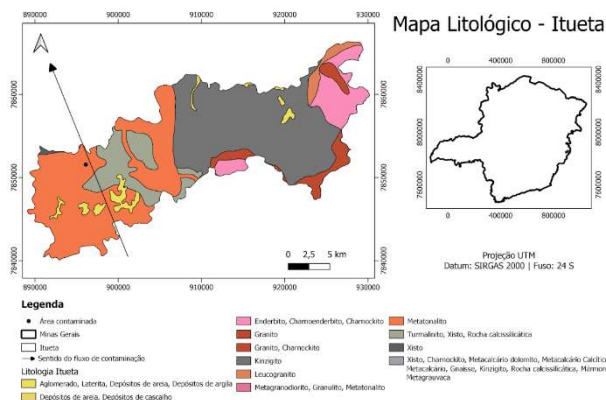


Figura 9: Mapa litológico de Itueta.

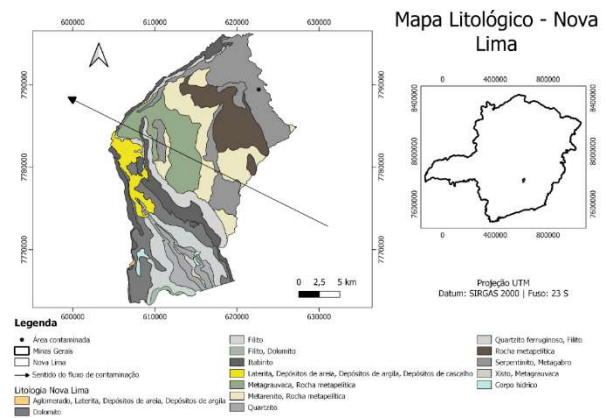


Figura 10: Mapa litológico de Nova Lima.

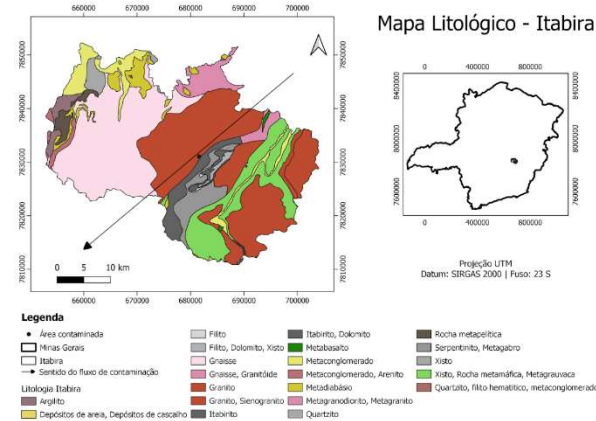


Figura 11: Mapa litológico de Itabira.

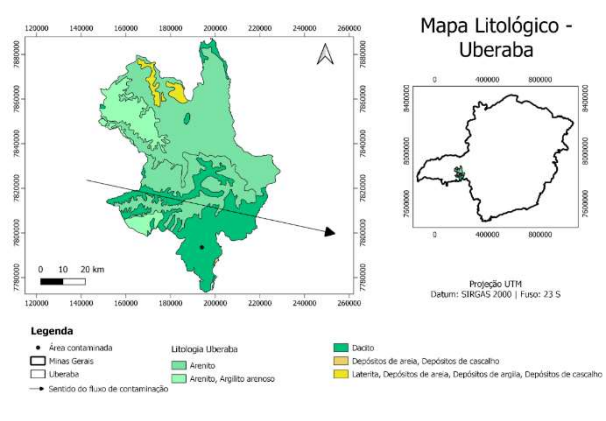


Figura 12: Mapa litológico de Uberaba.

Além das integrações entre a pedologia e a geologia, que influenciam na facilidade ou dificuldade da propagação dos contaminantes (vulnerabilidade), o risco de poluição das águas subterrâneas, depende da carga contínua de contaminantes, na qual existirá contaminação se estes apresentarem persistência e tiverem concentrações suficientes para superarem a capacidade de atenuação dos materiais subjacente (HIRATA et al., 2008; LINHARES, 2012).

De acordo com a FEAM (2021), todos os contaminantes apresentam concentrações acima do estabelecido pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 02/2010 (MINAS GERAIS, 2010). Os metais pesados foram encontrados em todas as áreas estudadas, sendo os mais comuns o chumbo, o cádmio, o bário e o cromo. As áreas de estudo de Itabira e de Nova Lima foram as que apresentaram as maiores concentrações de contaminantes, sendo a de Nova Lima mais crítica.

O lixão do Galo, em Nova Lima, foi o que apresentou maior preocupação, tanto do ponto de vista ambiental, pela contaminação das águas subterrâneas e de um importante curso fluvial, localizado no entorno da área do lixão (PMSB, 2015), como também para a saúde humana devido à grande toxicidade dos metais encontrados, dentre eles, o arsênio, o chumbo e o mercúrio. De acordo com a Agência dos Estados Unidos para Substâncias Tóxicas e Registro de Doenças (ATSDR, 2019) esses metais estão entre as três substâncias, das 275, mais tóxicas para o ser humano, respectivamente.

Por outro lado, no aterro de Itabira foi encontrado o maior número de contaminantes. De acordo com Madeira (2020), isso deve-se, pelo local ter funcionado, por mais de 20 anos, como um vazadouro a céu aberto. Ao transformar-se em aterro, observou-se no local diversos problemas relacionados aos efluentes e ao chorume, o que potencializou ainda mais a sua contaminação. Apesar disso, as condições poderiam ter sido piores, se o solo da área não tivesse uma alta capacidade de atenuação da poluição, como também relato por Machado et al. (2004).

O agravamento do potencial de contaminação acontece quando o solo atinge a sua capacidade máxima de retenção, o que faz com que muitos contaminantes, que apresentam baixa mobilidade, como o cádmio, o cromo, o chumbo, tornem-se facilmente lixiviáveis, entrando em contato com as águas subterrâneas. Esses, além de serem altamente tóxicos, também são bastante persistentes (NASCENTES, 2006; HIRATA, 2001).

Esse cenário foi constatado por Madeira (2020), no aterro de Itabira, e por Fortunato (2009) em área de antigo lixão, na qual foram recebidos elevados aportes de resíduos, ocasionando a saturação do solo, com consequente contaminação das águas subterrâneas. Essa análise pode ser aplicada às outras áreas do estudo, que por serem lixões desativados, como em Contagem, Itueta e Nova Lima, e aterro controlado, em Uberaba, receberam, por anos, grandes quantidade e variedades de resíduos, fazendo com que a atenuação dependesse, apenas, dos fatores ambientais.

Assim, ressalta-se a importância do monitoramento das águas subterrâneas nessas áreas e no seu entorno, principalmente, nas mais vulneráveis, como forma de avaliar o avanço das plumas de contaminação, como também o direcionamento de ações corretivas para a remediação das áreas.

CONCLUSÕES

A partir da avaliação do método *GOD*, observou-se que grande parte das áreas estudadas apresentaram baixa vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação, em virtude da cobertura do aquífero por solo residual espesso, na qual Itabira, Itueta e Uberaba apresentam pedologias favoráveis a retenção dos contaminantes, diferentemente de Nova Lima que apresentou aquífero sem cobertura e mais próximo da

superfície, caracterizando uma zona de alta vulnerabilidade. A simplicidade desse método pode auxiliar em uma análise preliminar das áreas prioritárias para possíveis intervenções

A determinação da direção do fluxo de contaminante faz-se importante pois pode-se ter uma ideia do sentido do contaminante, de forma a avaliar se os parâmetros naturais locais podem facilitar ou dificultar a disseminação da contaminação. Entretanto, o auxílio de métodos mais avançados e detalhados, como os modelos matemáticos, podem determinar, com melhor precisão, o sentido da pluma de contaminação, contribuindo para o planejamento de ações voltadas a minimizar os riscos na área de entorno.

Diante das características pedológicas e litológicas de cada região, observou-se que a área de Nova Lima é a que apresenta maior vulnerabilidade, por possuir solo raso e por apresentar aquíferos mais próximos à superfície e contaminantes mais tóxicos. Por outro lado, Uberaba é a que apresenta menor vulnerabilidade por compreender aquíferos mais profundos e cobertos por dacito, como também por estar inserida em um Latossolo, o que diminui a propagação dos contaminantes.

Ressalta-se que todas as áreas não obedeceram a nenhum critério ambiental para a escolha da disposição dos resíduos, uma vez que elas apresentam históricos semelhantes de descarte irregular e por conta disso elas ainda possuem reflexos dessa ação, com exceção de Itabira, que além disso, apresentou falhas durante a transformação em aterro. Dessa forma ressalta-se que para melhores resultados deve-se realizar o diagnóstico *in loco* a fim de determinar os possíveis fatores que podem intervir na contaminação local.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020.

ALVES, C. F. D. C.. **Geoquímica das águas subterrâneas de um aterro de resíduos sólidos em Araras, SP**. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

ATSDR. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. **Substance Priority List**. Washington: ATSDR, 2019.

BORBA, W. F.; SILVA, J. L. S. D.; KEMERICH, P. D. D. C.; SOUZA, E. E. B. D.; FERNANDES, G. D.; FLORES, B. A.; FRANÇA, J. R.; FLORES, C. E. B.. Análise de parâmetros geotécnicos de solo ocupado por aterro sanitário na região noroeste no estado do Rio Grande do Sul. In: TULLIO, L.. **Formação, Classificação e Cartografia dos Solos**. Ponta Grossa: Atena, 2019. p.48-57.

BORN, V.. **Avaliação da aptidão de áreas para a instalação de aterro sanitários com o uso de ferramentas de apoio à decisão por múltiplos critérios**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2013.

BOSCOV, M. E. G.. **Geotécnica ambiental**. São Paulo: Oficina de texto, 2008.

BRAGA, A. C. D. O.. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e**

contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

BRANCO, O. E. D. A.; LEAL, F. C. T.; SILVA, J. B. G.; PAIVA, L. E. D. D.; GOMES, A. N. R.; CARVALHO, A. L.; PESSOA, G. D. M.; CÂNDIDO, V. B. D. R.. Simulação matemática do transporte de contaminantes no solo e em águas subterrâneas: metodologia de screening aplicada ao gerenciamento de atividades potencialmente poluidoras. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL, 3. **Anais**. Juiz de Fora: UFJF, 2018.

BRASIL. **Lei n. 12305 de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: DOU, 2010.

CABRAL, J. J. D. S. P.. Vulnerabilidade à poluição de aquíferos. In: FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A.. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p.77-91.

CAIRES, S. M. D.. **Determinação dos teores naturais de metais pesados em solos do estado de Minas Gerais como subsídio ao estabelecimento de valores de referência de qualidade**. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

CAPELO NETO, J. C.; CASTRO, M. A. H. D.. Simulação e avaliação do desempenho hidrológico da drenagem horizontal de percolado em aterro sanitário. **Engenharia**

Sanitária e Ambiental, Fortaleza, v.10, n.3, p.229-235, 2005.

DOI: <http://doi.org/10.1590/S1413-41522005000300007>

CARRICONDE-AZEVEDO, M. F.; GARNIER, J.; CAMPOS, J. E. G.; CUNHA, L. S. D.. Estudo do parâmetro do solo nos métodos de determinação de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos usando colunas de solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 34. **Anais**. Florianópolis: Universidade de Brasília, 2013.

CARVALHO, M. B. D.; JUNIOR, N. G.; LOLLO, J. A. D.; LIMA, C. G. R.. Uso de geotecnologias na seleção de áreas para implantação de aterros sanitários: abordagem composta aplicada ao município de Mirandópolis, SP. **Revista Geociências**, Ilha Solteira, v.38, n.3, p.717-729, 2019.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. São Paulo: CETESB/GTZ, 2001.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Poluição das águas subterrâneas. Água subterrânea**. São Paulo: CETESB, 2021.

COELHO, M. G.; LIMA, S. D. C.; MARAGNO, A. L. F. C.; ALBUQUERQUE, Y. T.; LEMOS, J. C.; SANTOS, C. L. D.; BRANDÃO, S. L.. Disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos e a suas consequências na contaminação de águas subterrâneas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 1. **Anais**. Florianópolis: UFU, 2004.

COLVERO, D. A.; ALMEIDA, M. G. D.; PFEIFFER, S. C.; GOMES, A. P.. Aterro sanitário de Goiânia: uma identidade territorial e a vulnerabilidade e exclusão social da população do seu entorno. **Engenharia Ambiental Pesquisa e Tecnologia, Espírito Santo do Pinhal**, v.14, n.2, p.03-20, 2017.

CORREIA, E. R. C.. **Caracterização da vulnerabilidade natural do aquífero Boa Viagem no município de Recife**: Método GOD. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2006.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Sistema de Informação de Águas Subterrâneas – SIAGAS**. Rio de Janeiro: CPRM, 2021.

DIAS, F. A.. **Caracterização estrutural e hidrogeológica do sistema aquífero Serra Geral (SASG) na região de Carlos Barbosa (RS)**. Monografia (Bacharelado em Geologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília: EMBRAPA, 2018.

FEAM. Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Inventário e lista de áreas contaminadas em Minas Gerais**. FEAM, 2021.

FORTUNATO, J. M.. **Comportamento dos íons chumbo, cobre, níquel e zinco em área de manguezal associado a antigo lixão no município de Santos - SP**. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FOSTER, S.; HIRATA, R.. **Groundwater pollution risk**

assessment a methodology USING available data, technical manual. Lima: WHO, 1988.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M.. **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. Washington: Groundwater Management Advisory GW.MATE WB, 2006.

FRÉSCA, F. R. C.. **Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares no município de São Carlos, SP, a partir da caracterização física**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

GONÇALVES, M. F.; KISHI, R. T.; FERNANDES, C. V. S.. Poluição por metais pesados na bacia do Rio Barigui, estado do Paraná. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre, v.13, n.2, p.175-185, 2016. DOI: <http://doi.org/10.21168/rega.v13n2.p175-185>

HEATH, R. C.. **Hidrologia básica de águas subterrâneas**. USGS Paper nº20. Denver: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, 1983.

HELENE, L. P. I.. **Dinâmica da geração e fluxo de chorume em aterro sanitário de pequeno porte a partir de monitoramento geofísico**. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2019.

HIRATA, R. C. A.. **Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas**. Estudo de casos no estado de São Paulo. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

HIRATA, R.. Recursos Hídricos. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. D.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F.. **Decifrando a terra**. São Paulo: Oficina de textos, 2001. p.422-444.

HIRATA, R.; FERNANDES, A. J.. Movimento das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A.. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p.405-424.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Bases cartográficas contínuas - Brasil**. IBGE, 2016

KEMERICH, P. D. C.; FLORES, C. E. B.; BORBA, W. F.; GERHARDT, A. D.; FLORES, B. A.; RODRIGUES, A. C.; BARROS, G.. Indicativo de contaminação ambiental por metais pesados em aterro sanitário. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v.13, n.4, p. 3744-3755, 2014. DOI: <http://doi.org/10.5902/2236130814441>

LAGE, L. A.. **Investigação da contaminação das águas superficiais e subterrâneas no entorno do lixão do município do Novo Gama/GO por meio de análise de parâmetros de qualidade da água e de medição da eletrorresistividade do solo**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

LINHARES, F. M.. **Vulnerabilidade intrínseca e risco de contaminação do aquífero livre da bacia hidrográfica do Rio Gramame - PB**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João

Pessoa, 2012.

MACHADO, S. L.; RIBEIRO, L. D.; KIPERSTOK, A.; BOTELHO, M. A. B.; CARVALHO, M. D. F.. Diagnóstico da contaminação por metais pesados em Santo Amaro da Purificação - BA. **Revista Água Subterrânea**, Salvador, v.9, n.2, p.140-155, 2004.

MADEIRA, G. R.. **A contaminação da água subterrânea no aterro sanitário do município de Itabira (MG)**: Estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itabira, 2020.

MANNARINO, C. F.; FERREIRA, J. A.; MOREIRA, J. C.. Tratamento combinado de lixiviado de aterros de resíduos sólidos urbanos e esgoto doméstico como alternativa para a solução de um grave problema ambiental e de saúde pública: revisão bibliográfica. **Caderno de Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v.19, n.1, p.11-19, 2011.

MEAULO, F. J.. **Vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP)**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental. **Deliberação Normativa COPAM n. 02, de 08 de setembro de 2010**. Institui o Programa Estadual de Gestão de Áreas Contaminadas, que estabelece as diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por substâncias químicas. Belo Horizonte: DOE, 2010.

MIRANDA, M. C. D.. **Modelagem e simulação do escoamento em aquíferos livres sotoposto a zonas urbanas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

MUÑOZ, S. I. S.. **Impacto ambiental na área do aterro sanitário e incinerador de resíduos sólidos de Ribeirão Preto, SP**: avaliação dos níveis de metais pesados. Tese (Doutorado em Saúde Ambiental) - Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2002.

NASCENTES, R.. **Estudo da mobilidade de metais pesados em um solo residual compactado**. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006

NASCIMENTO, V. F.. **Proposta para indicação de áreas para a implantação de aterro sanitário no município de Bauru-SP, utilizando análise multicritério de decisão e técnicas de geoprocessamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.

OLIVEIRA, S. D.; PASQUAL, A.. Avaliação de parâmetros indicadores de poluição por efluente líquido de um aterro sanitário. **Engenharia sanitária e ambiental**, Botucatu, v.9, n.3, p.240-249, 2004.

PEREIRA JUNIOR, L. C. P.; SOARES, H. L. T.; CASTRO, S. S. D.. Vulnerabilidade natural e risco de contaminação do aquífero Bauru no município de Rio Verde- GO. **Revista Águas Subterrâneas**, Goiânia, v.29, n.2, p.129-145, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v29i2.27947>

PINHEIRO, M. M, F.; OSCO, L. P.; GONÇALVES, T. S.; RAMOS,

A. P. M.. Critérios para identificação de áreas para implantação de aterro sanitário. **Colloquium Exactarum**, Presidente Prudente, v.10, n.3, p.23-37, 2018. DOI: <http://doi.org/10.5747/ce.2018.v10.n3.e243>

PINHEIRO, R. J. B.; RAUBER, A. C. C.; NUMMER, A. V.; SILVA, J. L. S. D.. Aplicação dos Métodos GOD e POSH para determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação dos aquíferos na cidade de Santa Maria-RS. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre, v.12, n.2, p.61-79, 2015.

PMSB. Plano Municipal de Saneamento Básico de Nova Lima/MG. **Produto I. Diagnóstico Setorial. Limpeza Urbana e Manejo dos resíduos sólidos**, 2015.

REBOUÇAS, A. D. C.. Importância da água subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A.. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p.13-29.

RIBEIRO, M. L.; LOURENCETTI, C.; PEREIRA, S. Y.; MARCHI, M. R. R. D.. Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: avaliação preliminar. **Química Nova**, Araraquara, v.30, n.3, p.688-694, 2007.

ROWE, E. J.; CARDOSO, D. L.. A utilização de mapas temáticos no diagnóstico de áreas suscetíveis à contaminação por percolado de aterro. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n.4, p.670-678, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0100-69162009000400017>

SAMIZAVA, T. M.; KAIDA, R. H.; IMAI, N. N.; NUNES, J. O. R.. SIG aplicado à escolha de áreas potenciais para instalação de aterros sanitários no município de Presidente Prudente - SP. **Revista Brasileira de Cartografia**, Presidente Prudente, v.60, n.1, p.43-55, 2008.

SANTOS, A. F. D. M. S.. **Caracterização, avaliação da biodegradabilidade aeróbia e anaeróbia e tratamento em reator UASB do chorume do aterro de Muribeca**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

SANTOS, G. G. D. D.. **Análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos: o caso da incineração e da disposição em aterros**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SETTA, B. R. S.. **Avaliação da efetividade da recuperação ambiental do vazadouro do Município de Volta Redonda - RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SILVA, A. C.. **Tratamento do percolado de aterro sanitário e avaliação da toxicidade do efluente bruto e tratado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

SILVA, J. M.; MELO, J. G. D.; FILHO, J. B. D.. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Barreiras na Bacia no Rio Pirangi/RN utilizando os Métodos GOD, DRASTIC e IS. **Revista Águas Subterrâneas**, Natal, v.34, n.1, p.1-17, 2020. DOI: <http://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29786>

SOARES, F. R.; MIYAMARU, E. S.; MARTINS, G.. Desempenho ambiental da destinação e do tratamento de resíduos sólidos urbanos com reaproveitamento energético por meio da avaliação do ciclo de vida na Central de Tratamento de Resíduos-Caieiras. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, São Paulo, v.22, n.5, p.993-1003, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1413-41522017155522>

SOARES, L. C. D. R.. **Estudo do comportamento da pluma de benzeno em fase dissolvida na água subterrânea sob a influência do sistema de remediação integrado: injeção de ar e extração de vapores do solo, no município de Cubatão-SP.** Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2012.

STRELAU, J. R. D. M.. **Estudo comparativo de métodos de extração para determinação de compostos orgânicos em lixiviados de aterros sanitários por cromatografia gasosa acoplado a espectrometria de massas (GC/MS).** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SUZUKI, E. Y.; TAIOLI, F.; RODRIGUES, C. L.. Avaliação do comportamento geoquímico do solo da região do lixão de Ilhabela - SP. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, v.19,

n.2, p.67-76, 2005.

TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. P.; SOBRINHO, P. A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. D. C. T. D.; MELFI, A. J.; MELO, W. J. D.; MARQUES, M, O.. **Biossólidos na agricultura.** São Paulo: SABESP, 2001.

VOGEL, M. M.. **Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos na região cultural da quarta colônia de imigração italiana, RS.** Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

WAGNER, L. T.. **Avaliação da contaminação do solo e água subterrânea e vulnerabilidade do aquífero em um aterro de resíduos industriais na região metropolitana de Porto Alegre, RS.** Monografia (Bacharelado em Geologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ZELIC, M. C.. **Avaliação do processo de destilação do percolado de aterro em função dos parâmetros estabelecidos pela resolução CONAMA 430.** Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenere Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.