

Processo analítico hierárquico para priorizar a avaliação de riscos ecológicos em áreas contaminadas por petróleo e derivados

Analytic hierarchy process to prioritize ecological risk assessment in contaminated sites by oil and derivatives

André Moreira de Souza Filho^{1*} , Emilio Lèbre La Rovere², Márcio Roberto Schneider³

RESUMO

A Avaliação de Risco Ecológico (ARE) é uma etapa importante do gerenciamento de áreas contaminadas. Contudo, a ausência de critérios na seleção das áreas alvo para a aplicação da ARE no Brasil ou a simples adoção de um critério binário (ausência/presença de receptores ecológicos) não são suficientes para a priorização da ARE. A definição de critérios de priorização é fundamental nos países em desenvolvimento com grande diversidade ecológica e escassez de recursos técnicos e financeiros. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho compreende a aplicação do processo analítico hierárquico (AHP) para classificar as áreas com maior prioridade de aplicação da ARE, com ênfase nos impactos de vazamentos de petróleo e derivados. Foram realizados um levantamento de critérios internacionais de inclusão e exclusão da ARE, a integração desses critérios no método AHP e a aplicação da metodologia em 12 áreas contaminadas por hidrocarbonetos. Os resultados revelaram que esta abordagem possui potencial para auxiliar órgãos ambientais, consultores e partes interessadas no gerenciamento de áreas contaminadas, permitindo mensurar e adequar as ações às especificidades de cada local de forma mais criteriosa, priorizando a aplicação dos recursos disponíveis para as áreas de maior relevância ecológica.

Palavras-chave: processo analítico hierárquico; áreas contaminadas no Brasil; vazamento de óleo e derivados; avaliação de risco ecológico.

ABSTRACT

Ecological Risk Assessment (ERA) is an important stage in the management of contaminated sites. However, the absence of criteria for the selection of target areas for the application of ERA in Brazil, or the simple adoption of a binary criterion (absence/presence of ecological receptors) is not sufficient for the prioritization of ERA. The definition of prioritization criteria is fundamental in developing countries with great ecological diversity and scarcity of technical and financial resources. In this context, the objective of this study comprised the application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) to classify the areas with higher priority of application of ERA, considering the specificities of contamination scenarios. A survey of international criteria for inclusion and exclusion of ERA, the integration of these criteria in the AHP method and the application of the methodology in twelve hydrocarbon-contaminated areas were pursued. The results indicated that the AHP approach has the potential to assist environmental agencies, consultants and stakeholders in the management of contaminated sites to measure and adapt actions to the specificities of each site in a more judicious way, prioritizing the application of available resources for the areas of greater ecological relevance.

Keywords: analytic hierarchy process; contaminated sites in Brazil; ecological risk assessment; leakage of oil and derivatives.

INTRODUÇÃO

A contaminação de solo e águas subterrâneas por substâncias químicas de origem petrolífera é um problema difuso, de escala global e majoritariamente localizado em zonas urbanas (CACHADA *et al.*, 2016). Como a remediação de todas as áreas contaminadas consumiria uma quantidade considerável de recursos e seria quase impossível remediá-las simultaneamente (CRITTO;

SUTER, 2009), a Avaliação de Risco à Saúde Humana (ARSH) foi introduzida para priorizar ações nos locais de maior risco. Com a evolução das estratégias voltadas à recuperação dos passivos ambientais, na década de 1990, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) publicou diretrizes com princípios e especificações para a Avaliação de Risco Ecológico (ARE) (USEPA, 1992, 1997, 1998).

¹Gerência de Tratamentos Ambientais, Resíduos e Recursos Hídricos - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Planejamento Energético - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

³Universidade Federal de Santa Catarina, Núcleo Ressacada de Pesquisas em Meio Ambiente - Florianópolis (SC), Brasil.

*Autor correspondente: andre.moreira@ppe.ufrj.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: nenhum.

Recebido: 15/09/2021 - Aceito: 29/03/2022 - Reg. ABES: 20210250

A execução de ARE em locais com pouca importância ecológica (MENZIE; FRESHMAN, 1997) motivou a inclusão de uma etapa preliminar, na qual são avaliados critérios relativos às características do local contaminado, ao contaminante e aos potenciais receptores e seus habitats, de modo a identificar áreas com maior importância ecológica. Com base nos resultados dessa etapa, a ARE pode ser descartada ou pode ser necessário detalhar a investigação ambiental. Nos Estados Unidos, a análise de aplicabilidade da ARE em locais contaminados inclui os seguintes critérios: quantidade de contaminante; potencial de migração; exposição confirmada de receptores ambientais; significância dos caminhos de exposição completos; tamanho da área contaminada; profundidade e distância da contaminação até áreas não perturbadas; e proximidade de áreas sensíveis (CALEPA, 1996; ODEQ, 2001; LDEQ, 2003; ASTM, 2014; TCEQ, 2018; WSDE, 2018). Em síntese, a ARE só é indicada se o local contaminado apresentar características como potencial existência de habitats, receptores e vias de exposição completas. No Reino Unido, a Lei de Proteção Ambiental de 1990 (EA, 2008) determina a verificação da sensibilidade do local, da presença de receptores, da existência de vias de ingresso, das propriedades dos contaminantes, dos fatores de bioacumulação por meio de cadeias alimentares e da possibilidade de as substâncias presentes causarem danos significativos ou poluição de águas (WEEKS; COMBER, 2005). A Holanda estabeleceu valores de referência para a proteção dos receptores ecológicos (SWARTJES; CARLON; WIT, 2008) e adota critérios de extensão superficial e de potencial de toxicidade das áreas contaminadas (VROM, 2013).

No Brasil não há diretrizes para orientar a decisão sobre a priorização de aplicação da ARE. Recentemente, os Estados de São Paulo e Santa Catarina emitiram novas versões de diretrizes para a gestão de áreas contaminadas, nas quais foram incluídas as preocupações da ARE (CETESB, 2017; IMA, 2018), mas que não fornecem critérios técnicos para determinar a necessidade de sua aplicação. A Norma Técnica P4.001, proposta pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2020a), determina que a ARE pode ser dispensada se “não houver receptores ecológicos susceptíveis” (CETESB, 2020a), afirmação que pode gerar muitas dúvidas em locais com forte interação urbana e ecológica, como encontrado no Brasil. Essas questões geram muitas discussões entre órgãos ambientais, consultores e empreendedores, por vezes afetando a credibilidade dessa importante ferramenta de gerenciamento de áreas contaminadas. A ausência de critérios de priorização adequados às especificidades de cada local pode causar desperdício de recursos humanos e financeiros se os estudos forem realizados em áreas com baixa relevância ecológica ou em locais com uso e ocupação incompatíveis com sua preservação. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho compreende a aplicação do processo analítico hierárquico (AHP) para classificar as áreas com maior prioridade de aplicação da ARE, ponderando as especificidades dos cenários de contaminação. Como o método AHP tem sido bem-sucedido em diversos campos do conhecimento, acreditamos que o processo de sistematização e hierarquização dos critérios para a execução da ARE minimizará a subjetividade e tornará a tomada de decisão mais objetiva e consistente, fornecendo maior segurança na classificação e priorização de áreas de maior relevância ecológica.

METODOLOGIA

A metodologia incluiu uma revisão dos documentos que orientam a execução da ARE em diversos países, com atenção aos pré-requisitos de aplicação,

visando estabelecer a base dos critérios de priorização. Com base na revisão dos documentos, foram realizadas a seleção e a aplicação do método multicritério. O AHP (SAATY, 1990) foi selecionado por ser um método robusto, amplamente conhecido e aplicado nas mais diversas áreas do conhecimento (ISHIZAKA; LABIB, 2011), permitindo analisar o julgamento do especialista no processo de decisão.

Critérios para a priorização da avaliação de risco ecológico

A definição de critérios para a priorização da ARE é a base para estruturar e aplicar o método AHP e foi realizada considerando-se as variáveis mais importantes envolvidas no gerenciamento de áreas contaminadas potencialmente sujeitas a riscos ecológicos citadas nas normativas do Canadá (GC, 2012; BRITISH COLUMBIA MINISTRY OF ENVIRONMENT, 2013), Estados Unidos (CALEPA, 1996; USEPA, 1997; ODEQ, 2001; LDEQ, 2003; ASTM, 2014; TCEQ, 2018; WSDE, 2018), Holanda (VROM, 2013) e Reino Unido (DEFRA, 2006). O tamanho da propriedade (Sprop) foi escolhido pelo fato de uma propriedade mais extensa apresentar mais possibilidades de ocorrência de áreas contaminadas e de receptores ecológicos. Quanto maior o tamanho da superfície de solo contaminado (Sac), maior será a possibilidade de haver contato entre os receptores ecológicos e o contaminante. A migração de contaminante para águas superficiais (MIGasup) é determinante na possibilidade de expansão da mancha de contaminação. A potencial existência de receptores sensíveis (RECSen) é condição essencial para que a ARE seja aventada. A verificação de impactos sobre espécies sensíveis (IMPsen) evidencia a ocorrência de riscos, mesmo que estes não sejam apontados pelas outras variáveis avaliadas. O uso do solo (USO) do local é determinante, pois, quanto menos antropizado, mais propícias serão as condições para a existência de componentes ecológicos.

A distância até área protegida (Dap) tem correlação direta com a possibilidade de o local contaminado estar localizado na área de vida de receptores ecológicos. A existência de barreiras entre a área protegida (Bar) e o local contaminado pode impedir que receptores acessem o local contaminado. A existência de condições para habitat (Hab) favoráveis a espécies sensíveis é determinante para que o local sob avaliação possa suportar uma população viável. Condições favoráveis para o reaproveitamento econômico da área contaminada (Reap) demonstram que a reabilitação do local para uso menos restritivo pode evitar a expansão de fronteira de ocupação antrópica, além de ser mais econômica. O Quadro 1 mostra a descrição dos dez critérios adotados para a classificação de áreas contaminadas quanto à relevância ecológica, e na coluna de observações são apresentadas explicações para as condições limitantes dos critérios.

Foi possível estabelecer valores quantitativos para três critérios (Sprop, Sac, Dap), sendo os demais qualitativos. Foi adotada a superfície de 5 ha como o menor valor nominal para o critério Sprop por ser essa a área do menor módulo fiscal — extensão mínima de propriedade rural considerada economicamente viável. Ele varia de 5 a 110 ha e é estabelecido para cada município (LANDAU *et al.*, 2012), sendo utilizado pelo Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012) para estabelecer a obrigação de restaurar a vegetação das margens de rios e áreas de reserva florestal legal eventualmente danificadas. Com relação ao tamanho da área contaminada e à migração de contaminantes, foi considerado que uma propriedade com área menor que 5 ha ou uma Sac menor que 500 m², sem tendência de propagação de contaminantes, onde não ocorra MIGasup, não requer

Quadro 1 - Critérios para a classificação de áreas, com explicações.

Critério	Descrição	Observação
Sprop	Tamanho da propriedade	O tamanho da propriedade é inferior a 5 ha (menor Módulo Fiscal).
Sac	Superfície de área contaminada	A superfície de área contaminada é inferior a 500 m ² (1% de 5 ha).
MIGasup	Migração de contaminante para águas superficiais	A migração de contaminante não atinge águas superficiais e receptores.
RECsen	Receptores sensíveis	Não há exposição de receptores sensíveis.
IMPsen	Impacto sobre espécies e habitats sensíveis	Não há sinais de impacto sobre espécies e habitats sensíveis.
USO	Uso do solo (industrial/comercial; urbano; rural; natural)	O uso antrópico limita serviços ecossistêmicos.
Dap	Distância até área protegida	A distância (e.g., 3 km até unidade de conservação) atua como zona tampão entre área protegida e o local contaminado.
Bar	Barreiras – suaves ou sólidas – até Área Protegida	Barreiras impedem que receptores da área protegida visitem o local contaminado.
Hab	Condições para habitat de espécies protegidas	As condições para habitat de espécies protegidas não suportam população viável.
Reap	Reaproveitamento econômico da área e arredores	O reaproveitamento da área evita o uso de área limpa e pode ser mais econômico.

Fonte: os autores.

a aplicação de ARE. Além disso, se não houver espécies sensíveis expostas a estressores nem sinais de impactos sobre eles ou seus habitats, os critérios de exclusão por tamanho e migração de contaminantes também são atendidos.

A análise da legislação brasileira (BRASIL, 2010; 2012) permitiu considerar uma faixa adicional de 3.000 m como a Dap que provê proteção contra a possível contaminação de uma unidade de conservação. Para áreas de preservação permanente, localizadas nos limites de cursos de água não efêmeros e outros corpos hídricos (lagos, lagoas e nascentes), a distância de proteção estabelecida por lei varia de 30 a 500 m. Assim sendo, como a distância protetora das unidades de conservação é maior do que as distâncias para os outros casos, a faixa de 3 km adotada como distância de proteção até a área protegida pretende garantir que contaminações eventuais não interfiram na preservação de áreas protegidas.

Aplicação do método analítico hierárquico

O método AHP (SAATY, 1990) é um procedimento amplamente utilizado no modelamento de problemas de tomada de decisão, no qual as variáveis envolvidas são representadas e quantificadas em uma hierarquia de critérios ponderados por preferências (pesos). As magnitudes relativas de cada critério são definidas por meio de comparações par a par, de forma sistematizada. Nesse procedimento, as várias alternativas são analisadas com base na experiência do analista. A Figura 1 apresenta as etapas para a aplicação do método AHP, em que a razão de consistência (RC) é utilizada para verificar o grau de consistência das comparações entre pares de critérios.

Com base na revisão da literatura, foram definidos dez critérios com quatro níveis para um diagnóstico qualitativo e quantitativo das áreas alvo, de acordo com o julgamento de um grupo de especialistas em gestão de áreas contaminadas, avaliação de risco e ecologia. Por exemplo, o critério Sprop pode receber o enquadramento 5, 15, 50 ou > 200 ha, dependendo do tamanho da área avaliada. Os valores das classificações foram normalizados em faixas de 0,25; 0,50; 0,75 e 1,00, respectivamente. A Tabela 1 ilustra a definição dos critérios, seus valores nominais por faixa e a normalização atribuída, em que V_n é o valor normalizado.

O passo seguinte compreendeu a comparação paritária para cada um dos critérios, utilizando julgamentos (pesos), por um especialista com conhecimento relativamente preciso do problema. Com base na escala de Saaty (1990), foi elaborada a matriz de comparação recíproca, apresentada na Figura 2, na qual: A e B são os critérios, x é o valor atribuído à comparação de A com B,

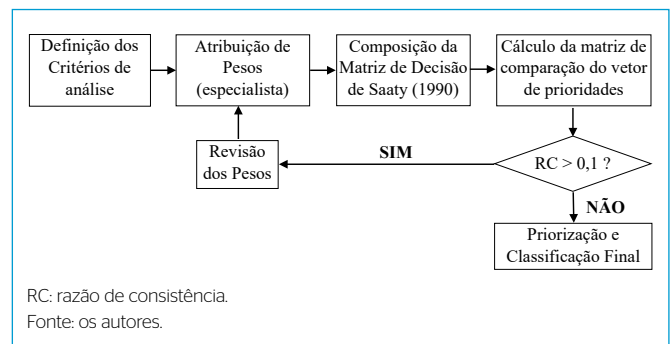


Figura 1 - Etapas do método analítico hierárquico.

a diagonal principal da matriz é representada pela unidade e o critério A tem preferência sobre o critério B.

Os critérios foram comparados segundo a escala de julgamentos, também denominada de escala fundamental de Saaty (1990), e a quantificação dos julgamentos foi realizada por meio de uma escala de valores que varia de 1 a 9 (Tabela 2).

Com a matriz de comparação de Saaty (Matriz S) é calculado o “autovetor de prioridades”. Este é utilizado para a determinação do peso relativo de cada critério, conforme Equação 1:

$$\text{Dada a Matriz } S = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{2n} \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{nn}=1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Em que:

a_{ij} = elementos da matriz S, $n \times n$.

Os valores da matriz normalizada (S') por coluna são representados pela Equação 2:

$$S'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

O vetor prioridade (w_i), que indica os pesos dos critérios, é calculado por meio da Equação 3:

$$w_i = \sum_{j=1}^n w_j a_{ij} \quad (3)$$

Tabela 1 - Definição de critérios e normalização atribuída.

Critérios	Parâmetros Escolhidos para os Critérios							
	1		2		3		4	
	Valor	Vn	Valor	Vn	Valor	Vn	Valor	Vn
Sprop	5	0,25	15	0,5	50	0,75	200	1
Sac	500	0,25	1000	0,5	5.000	0,75	10000	1
MIGasup	Muito difícil	0,25	Difícil	0,5	Pouco provável	0,75	Provável	1
RECSen	Ausentes	0,25	Possível	0,5	Relatos	0,75	Presentes	1
IMPsen	Ausente	0,25	Improvável	0,5	Relatos	0,75	Verificado	1
USO	Industrial/Comercial	0,25	Urbano	0,5	Rural	0,75	Natural	1
Dap	3.000	0,25	1.000	0,5	100	0,75	30	1
Bar	Muros /Estradas	0,25	Ruas	0,5	Estruturas	0,75	Relevo	1
Hab	Adversas	0,25	Muito restritas	0,5	Pouco prováveis	0,75	Favoráveis	1
Reap	Evidente	0,25	Possível	0,5	Negociável	0,75	Impedido	1

Sprop: tamanho da propriedade; Sac: superfície de área contaminada MIGasup: migração de contaminantes para águas superficiais; RECSen: receptores sensíveis; IMPsen: impacto sobre espécies sensíveis; USO: uso do solo; Dap: distância até área protegida; Bar: barreiras até área protegida; Reap: reaproveitamento econômico da área contaminada.

Critério	A	B
A	1	x
B	1/x	1

Fonte: adaptado de Saaty (1990).

Figura 2 - Matriz de comparação de critérios.

Em que w_j é representado pela Equação 4:

$$w_j = \frac{\sum_{i=1}^n S'_{ij}}{n} \tag{4}$$

A análise de consistência dos julgamentos foi realizada pelo cálculo do autovalor da matriz avaliada. Inicialmente, foi determinado o autovalor máximo (λ_{max}), conforme a Equação 5:

$$\lambda_{max} = T \cdot w \tag{5}$$

Em que:

T = o vetor normalizado;

w = a soma das colunas da matriz de comparações para cada critério.

A consistência de uma matriz requer que o autovalor máximo (λ_{max}) seja igual ao número de linhas (ou colunas) da matriz de comparações paritárias n (ordem da matriz). Quanto mais próximo λ_{max} for de n , maior a consistência do resultado. A determinação do índice de consistência (IC) dos resultados foi realizada por meio da Equação 6:

$$IC = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \tag{6}$$

Para a determinação do grau de violação da proporcionalidade dos julgamentos no processo analítico com o método AHP, foi calculada a RC por meio da Equação 7:

$$RC = IC / CA \tag{7}$$

Em que:

CA = índice de consistência aleatória, cujos valores foram obtidos por Saaty e Tran (2007), para matrizes de ordem 15 por 15.

A possibilidade de determinação do nível de consistência dos julgamentos é um dos pontos positivos do método AHP. Valores de RC de até 10% são indicadores de boa qualidade da análise. Valores superiores podem ser indicadores de inconsistências nos julgamentos, apontando a fragilidade dos resultados da aplicação do método AHP. No caso de valores de RC maiores que 10%, recomenda-se a revisão da matriz de comparações dos julgamentos buscando torná-los mais consistentes (SAATY, 1990).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia AHP foi aplicada em 12 estudos de caso reais, de locais contaminados por hidrocarbonetos de petróleo para os quais havia disponibilidade de informações e facilidade de acesso a visitas. Foram considerados diferentes cenários de uso (natural, rural, urbano, comercial e industrial) para classificar os critérios de aplicação e priorizar a execução de ARE nas áreas mais relevantes. As bases de dados utilizadas para selecionar locais contaminados foram as dos Estados do Rio de Janeiro (INEA, 2019) e São Paulo (CETESB, 2020b). Duas áreas do Estado de Santa Catarina completam a lista de estudos de caso. A Tabela 3 apresenta as informações sobre uso do solo, localização e tipologia do empreendimento dos 12 casos estudados.

Para definir se a avaliação dos riscos ecológicos é adequada para o gerenciamento de um local contaminado, é importante reunir o maior número possível de informações sobre a área, o que inclui o tipo de contaminante e seus efeitos correlacionados, condições de exposição, características dos sistemas naturais potencialmente expostos e requisitos legais relevantes. A classificação da área na faixa de critérios é afetada pela existência de possíveis impactos sobre receptores sensíveis; pelo uso do local para fins industriais, comerciais, urbanos ou

Tabela 2 - Escala de valores de comparação.

Escala numérica	Escala de importância	Descrição
1	Igual	Os dois elementos comparados contribuem igualmente para o objetivo.
3	Moderada	O elemento comparado é ligeiramente mais importante que o outro.
5	Forte	A experiência e o julgamento favorecem fortemente o elemento em relação ao outro.
7	Muito Forte	O elemento comparado é muito mais forte que o outro, e tal importância é observada na prática.
9	Absoluta	O elemento comparado apresenta o mais alto nível de evidência possível a seu favor.
2,4,6,8	Valores intermediários entre dois julgamentos, utilizados quando o avaliador sentir dificuldade em escolher entre dois graus de importância adjacentes	

Fonte: adaptado de Saaty e Vargas (2012).

Tabela 3 - Uso, localização e tipologia dos casos.

Caso	Estado	Uso	Localização	Tipologia
1	RJ	Residencial	Urbana	Oleoduto
2	RJ	Industrial	Urbana	Metalúrgica
3	RJ	Industrial	Urbana	Refinaria
4	SP	Natural	Floresta	Oleoduto
5	SP	Comercial	Urbana	Venda de Derivados
6	SC	Agrícola	Rural	Fazenda Experimental
7	SC	Industrial	Urbana	Química
8	RJ	Comercial	Urbana	Viação
9	RJ	Comercial	Urbana	Posto de Serviços
10	RJ	Industrial	Urbana/Rural	Fundição
11	RJ	Industrial	Urbana	Papel
12	RJ	Industrial	Urbana	Papel

Fonte: os autores.

rurais; pela distância da área contaminada até a área protegida; pelas condições para habitat; e pela existência de barreiras que impeçam o contato da fauna da área protegida com o local contaminado.

O vetor de prioridades, estabelecido pelas comparações sucessivas entre pares de critérios, mostra que a ordem de importância hierárquica dos critérios foi definida pelos especialistas como: IMPsen; RECsen; MIGasup; Hab; Bar; Sac (Superfície área contaminada); Dap; USO; Sprop; e Reap. A Tabela 4 mostra os pesos atribuídos a cada um dos critérios. Pode-se notar que IMPsen tem a maior importância, com peso aproximado de 0,322, e o critério Reap foi considerado o de menor importância hierárquica, com peso aproximado de 0,0167.

Para ilustrar a aplicação da metodologia, a Tabela 5 apresenta as matrizes AHP de resultados dos casos 2 e 4, que obtiveram a menor e a maior pontuação de priorização. Pode-se notar que, no caso 2, apenas dois critérios — Sprop e Dap — tiveram classificação no nível 2 da faixa de critérios, e os oito critérios restantes foram avaliados no nível 1 da faixa de classificação de critérios. No caso 4, à exceção do critério Sac, que foi classificado no nível 3, todos os demais critérios foram classificados na faixa 4.

Uma grande vantagem da metodologia AHP é fornecer a possibilidade de comparar critérios, tanto qualitativos quanto quantitativos, e traduzir em números a priorização das opções avaliadas, facilitando a interpretação dos resultados para os tomadores de decisão. Uma possível interpretação dos resultados seria a indicação de prioridade de execução da ARE na sequência de casos 4, 12, 6, 9, 1, 10, 8, 7, 11, 5, 3 e 2. Outra interpretação possível seria a comparação

Tabela 4 - Pesos atribuídos aos critérios.

Critério	Descrição sucinta	Pesos
Sprop	Tamanho da propriedade (ha)	0,0180105
Sac	Superfície da área contaminada (m ²)	0,057155945
MIGasup	Migração de contaminante para águas superficiais	0,113567779
RECsen	Receptores sensíveis	0,247020084
IMPsen	Impacto sobre espécies sensíveis	0,321986366
USO	Uso do solo	0,038297645
Dap	Distância até área protegida (m)	0,042888702
Bar	Barreiras até área protegida	0,060114497
Hab	Condições para Habitat	0,084327197
Reap	Reaproveitamento econômico da área	0,016631286
	Somatório	1,00

Sprop: tamanho da propriedade; Sac: superfície de área contaminada; MIGasup: migração de contaminantes para águas superficiais; RECsen: receptores sensíveis; IMPsen: impacto sobre espécies sensíveis; USO: uso do solo; Dap: distância até área protegida; Bar: barreiras até área protegida; Reap: reaproveitamento econômico da área contaminada.

Fonte: os autores.

Tabela 5 - Matriz do Processo Analítico Hierárquico dos casos 2 e 4.

Critério	Faixa de Critérios			
	Caso 2		Caso 4	
	1	2	3	4
Sprop		15		200
Sac	500		5000	
MIGasup	Muito difícil			Provável
RECsen	Ausentes			Presentes
IMPsen	Ausente			Verificado
USO	Industrial / Comercial			Natural
Dap		1000		30
Bar	Muros / Estradas			Relevo
Hab	Inapropriadas			Favoráveis
Reap	Evidente			Impedido
Total	0,2461391		0,9714220	

Fonte: os autores.

com um limite preestabelecido pelos gestores, avaliadores e partes interessadas, digamos de 0,5. Seis casos apresentariam valores superiores e seis casos valores inferiores a esse limite, demonstrando que os casos 1, 4, 6, 9, 10 e 12 deveriam prosseguir com a ARE. A planilha completa com instruções para utilização e as matrizes AHP dos 12 estudos de caso estão disponíveis como material complementar e podem ser solicitadas ao autor correspondente. Os critérios de análise e classificação, incluindo o tamanho da propriedade, o tamanho da área contaminada, a distância do local contaminado até o limite de áreas protegidas e a possibilidade de reutilização da área para uso de solo menos restritivo (reabilitação para uso pretendido) devem ser baseados nas peculiaridades de cada região e respeitar os requisitos legais específicos do local. A Figura 3 mostra o gráfico com os resultados das avaliações dos 12 casos de contaminação real por hidrocarbonetos petrolíferos.

A utilização da metodologia pode ajudar a identificar locais contaminados onde as ações não devem ser guiadas pelos resultados de ARE e sim pela ARSH, haja vista a ocupação desses locais pelo homem. Como as ARE são mais complexas e demandam mais recursos que as ARSH, a priorização da primeira para locais onde haja recursos ambientais valiosos com alta biodiversidade, que sejam passíveis de restauração e que apresentem maior capacidade de manutenção de populações viáveis (MORAES; MELLO; TOPPA, 2017), pode significar a possibilidade de destinação de recursos vitais para a conservação da sustentabilidade em áreas não antropizadas.

Um dos pontos de maior sensibilidade da metodologia, com relação aos resultados da hierarquização do modelo, é a definição da matriz dos critérios de julgamento aplicados ao método. Para minimizar esses impactos, os critérios de avaliação foram selecionados com base em diretrizes de países desenvolvidos

com extensa experiência em ARE. Contudo, esses critérios poderão ser alterados conforme o julgamento técnico de especialista ou novas diretrizes estabelecidas pelos órgãos ambientais locais.

Os resultados demonstraram que a metodologia proposta possui elevado potencial de aplicação, podendo ser aperfeiçoada, principalmente com relação à definição de critérios ecológicos de avaliação do cenário de contaminação, à medida que houver aplicação em um número substancialmente maior de casos reais. Além disso, os órgãos ambientais poderão revisar os critérios de análise e propor ajustes para validar a metodologia para aplicação em avaliações de locais em processos legais, já que a decisão final de realizar uma ARE é de competência desses órgãos de controle e fiscalização.

CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou que o método AHP, aplicado em 12 estudos de caso de vazamentos de hidrocarbonetos de petróleo, pode ser utilizado para classificar os critérios de aplicação e auxiliar no julgamento da pertinência da execução da ARE, reduzindo a subjetividade na tomada de decisão pelos analistas ambientais. O processo de tomada de decisão multicritério permitiu incluir as especificidades de cada área de estudo e a definição de uma escala eletiva, de forma a estabelecer se a avaliação de riscos ecológicos é aplicável ou não à área de interesse. O método AHP mostrou-se útil para priorizar a aplicação da ARE, considerando-se a necessidade de preservação e proteção ecológica em um contexto de escassez de recursos humanos e financeiros e ponderando-se a vocação ecológica do local em relação ao desenvolvimento urbano e industrial no qual a área contaminada está inserida. A metodologia

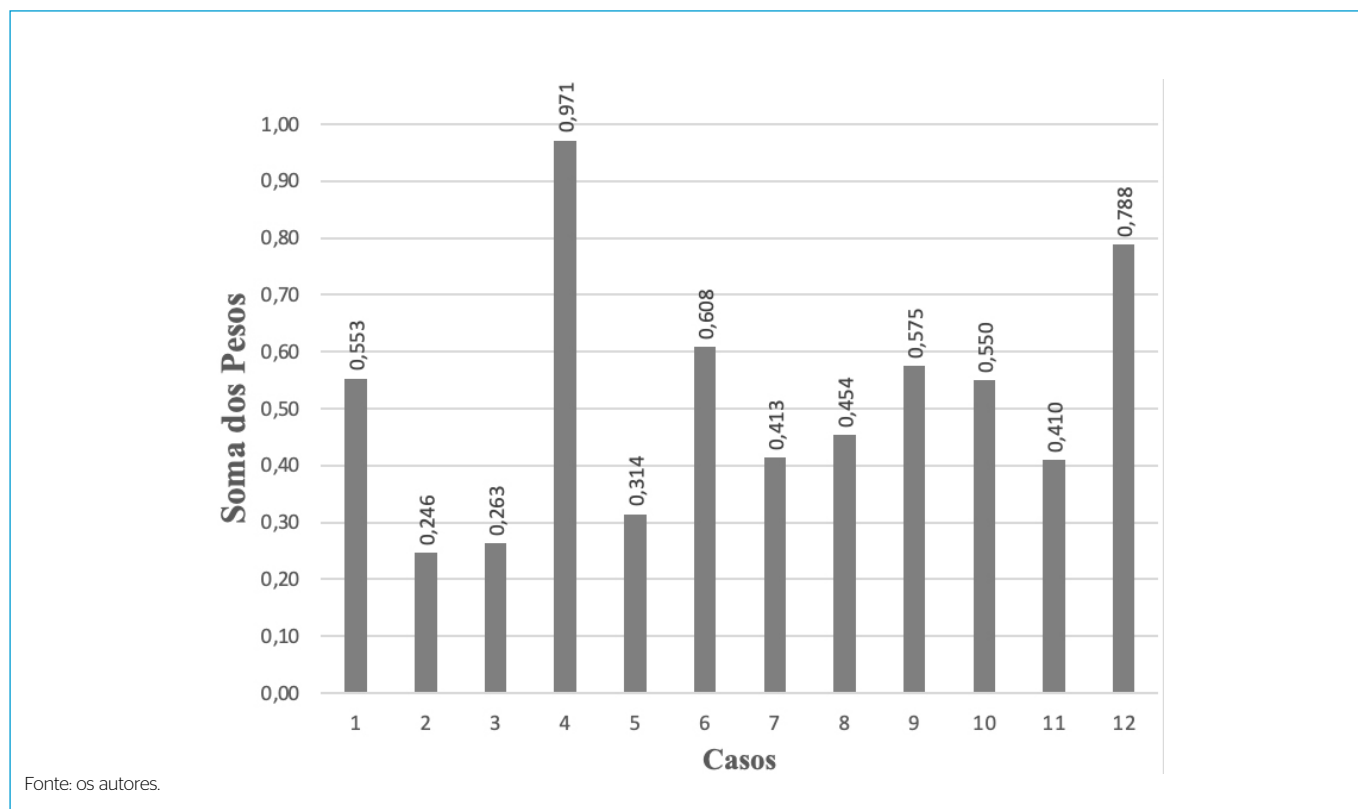


Figura 3 - Resultados do somatório dos pesos para cada um dos 12 casos.

tenderá a adquirir maior aderência às políticas de proteção ambiental de cada região mediante sua ampla aplicação por empresas de consultoria e órgãos ambientais, e poderá contribuir como passo importante para fomentar a aplicação adequada da ARE em diferentes países em desenvolvimento com lacunas normativas, como é o caso do Brasil.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Souza Filho, A.M.: Conceituação, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Escrita — Primeira Redação, Escrita — Revisão e Edição. La Rovere, E.L.: Supervisão, Validação, Visualização. Schneider, M.R.: Curadoria de Dados, Software, Escrita — Revisão e Edição.

REFERÊNCIAS

- ASTM. *Standard Guide for Risk-Based Corrective Action for Protection of Ecological Resources*. E2205/E2205M – 2002. ASTM, 2014.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 428/2010*. Dispõe, no âmbito do licenciamento ambiental sobre a autorização do órgão responsável pela administração da Unidade de Conservação (UC). Brasil: CONAMA, 2010. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=641>. Acesso em: nov. 2016.
- BRASIL. *Lei nº 12.727, outubro de 2012*. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Brasil, 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12727.htm. Acesso em: fev. 2016.
- BRITISH COLUMBIA MINISTRY OF ENVIRONMENT. *Protocol 12 for Contaminated Sites: site risk classification, reclassification and reporting*. British Columbia: British Columbia Ministry of Environment, 2013. Disponível em: https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/site-remediation/docs/protocols/p12_jan_2021_revisions_final_signed.pdf. Acesso em: jan. 2018.
- CACHADA, A.; SILVA, E.; DUARTE, A.; PEREIRA, R. 2016. Risk assessment of urban soils contamination: the particular case of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Science of the Total Environment*, v. 551-552, p. 271-284. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.012>
- CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (CALEPA). *Guidance for Ecological Risk Assessment at Hazardous Waste Sites and Permitted Facilities*. Part B: Scoping Assessment. Califórnia: California Environmental Protection Agency, 1996. Disponível em: <https://dtsc.ca.gov/wp-content/uploads/sites/31/2018/01/scope.pdf>. Acesso em: fev. 2019.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). *Decisão de Diretoria nº 038/2017/C*. São Paulo: CETESB, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-038-2017-C.pdf>. Acesso em: jun. 2019.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). *Norma Técnica P4.0001 - Avaliação de Risco Ecológico (ARE)*. São Paulo: CETESB, 2020a. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2020/10/NTC-P4.001-EM-CONSULTA-PUBLICA-03.11.2020.pdf>. Acesso em: ago. 2021.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). *Relatório de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo*. São Paulo: CETESB, 2020b. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/areas-contaminadas-criticas/>. Acesso em: fev. 2021.
- CRITTO, A.; SUTER, G. Environmental risk assessment. In: MARCOMINI, A.; SUTER, G.; CRITTO, A. (org.). *Decision support systems for risk-based management of contaminated sites*. Springer, 2009. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09722-0>
- DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD AND RURAL AFFAIRS (DEFRA). *Circular 01/2006*. Environmental Protection Act 1990: Part 2A Contaminated Land. Londres: DEFRA, 2006.
- ENVIRONMENT AGENCY (EA). *Guidance on desk studies and conceptual site models in ecological risk assessment*. Science Report – SC070009/SR2a. Bristol: Environment Agency, 2008.
- GOVERNMENT OF CANADA (GC). *Federal Contaminated Sites Action Plan: Ecological Risk Assessment Guidance*. Canadá: Government of Canada, 2012.
- INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA (IMA). *Instrução Normativa 74 – Recuperação de Áreas Contaminadas*. Santa Catarina: IMA, 2018. Disponível em: <https://in.ima.sc.gov.br/instrucaoNormativa/downloadPDF/51>. Acesso em: set. 2018.
- INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). *Base de dados geoespaciais*. INEA, 2019. Disponível em: <https://inea.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=00cc256c620a4393b3d04d2c34acd9ed>. Acesso em: mar. 2019.
- ISHIZAKA, A.; LABIB, A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert System with Applications*, v. 38, n. 11, p. 14336-14345, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.143>
- LANDAU, E.; CRUZ, R.; HIRSCH, A.; PIMENTA, F.; GUIMARÃES, D. *Variação geográfica do tamanho dos módulos fiscais no Brasil*. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/949260/1/doc146.pdf>. Acesso em: out. 2018.
- LOUISIANA DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL QUALITY (LDEQ). *Risk Evaluation/Corrective Action Program (RECAP)*. Appendix C – RECAP Forms. Louisiana: Louisiana Department of Environmental Quality, 2003. Disponível em: <https://www.deq.louisiana.gov/page/recap>. Acesso em: jan. 2019.
- MENZIE, C.A.; FRESHMAN, J.S. An assessment of the risk assessment paradigm for ecological risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment*, v. 3, n. 5, p. 853-892, 1997. <https://doi.org/10.1080/10807039709383732>
- MINISTRY OF HOUSING, SPATIAL PLANNING AND THE ENVIRONMENT (VROM). *Soil Remediation Circular 2013*. Holanda: Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, 2013.
- MORAES, M.C.P.; MELLO, K.; TOPPA, R.H. Protected areas and agricultural expansion: Biodiversity conservation versus economic growth in the

Southeast of Brazil. *Journal of Environmental Management*, v. 188, p. 73-84, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.075>

OREGON DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL QUALITY (ODEQ). Waste Management & Cleanup Division. Cleanup Policy & Program Development Section. *Guidance for Ecological Risk Assessment: Levels I, II, IV*. Portland: Oregon Department of Environmental Quality, 2001. Disponível em: <https://digital.osl.state.or.us/islandora/object/osl:21154>. Acesso em: fev. 2019.

SAATY, T. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-1)

SAATY, T.; TRAN, L. On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the analytic hierarchy process. *Mathematical and Computer Modelling*, v. 46, n. 7-8, p. 962-975, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.03.022>

SAATY, T.; VARGAS, L. *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process*. Springer Science, 2012.

SWARTJES, F.A.; CARLON, C.; WIT, N.H. The possibilities for the EU-wide use of similar ecological risk-based soil contamination assessment tools. *Science of the Total Environment*, v. 406, n. 3, p. 523-529, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.034>

TEXAS COMMISSION ON ENVIRONMENTAL QUALITY (TCEQ). *Conducting Ecological Risk Assessments at Remediation Sites in Texas*. RG-263. Texas:

Texas Commission On Environmental Quality, 2018. Disponível em: www.tceq.texas.gov/assets/public/comm_exec/pubs/rg/rg-263.pdf. Acesso em: fev. 2019.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Ecological Risk Assessment Guidance for Superfund: Process for Designing and Conducting Ecological Risk Assessments*. Interim Final. EPA 540-R-97-006. Washington, DC.: USEPA, 1997. Disponível em: <https://www.epa.gov/risk/ecological-risk-assessment-guidance-superfund-process-designing-and-conducting-ecological-risk>. Acesso em: jun. 2016.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Guidelines for Ecological Risk Assessment*. EPA/630/R-95/002F. Washington, DC.: USEPA, 1998. Disponível em: http://www2.epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/eco_risk_assessment1998.pdf. Acesso em: mar. 2016.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Risk Assessment Forum. *Framework for Ecological Risk Assessment*. EPA/630/R-92/001. Washington, DC.: USEPA, 1992.

WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF ECOLOGY (WSDE). *Washington Administrative Code - WAC 173-340*. Washington: Washington State Department of Ecology, 2018. Disponível em: <https://apps.leg.wa.gov/WAC/default.aspx?cite=173-340>. Acesso em: abr. 2019.

WEEKS, J.; COMBER, S. Ecological risk assessment of contaminated soil. *Mineralogical Magazine*, v. 69, n. 5, p. 601-613, 2005. <https://doi.org/10.1180/0026461056950274>