

Identificação de Áreas para Implantação de Aterros Sanitários com Uso de Análise Estratégica de Decisão

MARIA LÚCIA CALIJURI¹

ANDRÉ LUIS DE OLIVEIRA MELO²

JULIANA FERREIRA LORENTZ³

(recebido em 23/09/2002; aprovado em 09/12/2002)

PALAVRAS-CHAVE

Aterro sanitário – Análise multicritério – Sistemas de Informação Geográfica

RESUMO

Este trabalho apresenta a metodologia utilizada na avaliação e seleção de áreas para implantação de aterros sanitários no município de Cachoeiro do Itapemirim, ES, com uso de análise multicritério e sistemas de informação geográfica. Foram encontradas 15 áreas entre 20 e 200 ha que apresentaram adequabilidade alta, superior a 220, na escala de zero a 255. O depósito atual de lixo encontra-se sobre uma área de aptidão nula, distante das áreas com aptidão maior que 220. Os resultados obtidos revelam que o método de análise estratégica de decisão, viabilizada pela potencialidade do SIG, permite a integração de informações espaciais para tomada de decisão no processo de avaliação e seleção de áreas para a implantação de empreendimentos impactantes.

1. INTRODUÇÃO

Devido à crescente urbanização, a quantidade de áreas adequadas ambiental e economicamente e disponíveis para a instalação de aterros sanitários torna-se cada vez menor, exigindo uma abordagem técnica muito mais precisa.

A consideração dos aspectos técnicos, ambientais e socioeconômicos, aliada às técnicas de geoprocessamento, permite a obtenção de algumas alternativas para a localização desses aterros. Uma avaliação criteriosa dessas áreas é importante para garantir a minimização dos impactos ambientais oriundos desse tipo de empreendimento.

Este trabalho apresenta a metodologia utilizada na avaliação e seleção de áreas para a implantação de aterros sanitários no município de Cachoeiro do Itapemirim, ES, com uso de análise multicritério e sistemas de informação geográfica.

2. METODOLOGIA

A metodologia fez uso de lógica *fuzzy* e *análise multicritério* e compreendeu o levantamento e a análise de condicionantes operacionais, legais, ambientais e

¹ E-mail: calijuri@ufv.br

² E-mail: amelo@centro-atlantica.com.br

³ E-mail: juliana_lorentz@hotmail.com

socioeconômicos, seguidos da aquisição, armazenamento, descrição e análise, em nível espacial, desses dados georreferenciados.

De um modo geral, os processos de decisão pretendem satisfazer a um ou múltiplos objetivos, e são desenvolvidos com base na avaliação de um ou vários critérios [East97]. A localização do aterro sanitário é um processo de decisão de natureza *multicritério*, no qual são considerados diversos atributos e implica na avaliação e seleção de áreas aptas, entre várias alternativas possíveis, com base em alguns critérios.

Um outro aspecto que tem sido motivo de preocupação na análise *multicritério* é a questão do risco associado à decisão. Em um problema desta natureza está implícita a avaliação de diferentes aspectos que contribuem para uma decisão. A forma de combinar os critérios, a consideração de todos ou apenas parte deles, a forma como uns podem compensar outros, são aspectos que assumem grande importância nas decisões, particularmente em contextos de recursos escassos. Dentre as atitudes – conservadoras e arriscadas – mais extremas de risco na avaliação, pode haver lugar para cenários que sejam mais compatíveis com as condições que contextualizam a decisão.

Decisão é definida como a escolha entre alternativas. Estas podem representar diferentes localizações, planos, classificações ou hipóteses sobre um fenômeno. A decisão é suportada pela consideração de *critérios* que servem como normas para encontrar as melhores alternativas e representam condições possíveis de quantificar ou avaliar contribuindo para a tomada de decisão. Para este trabalho foram definidos critérios ambientais, operacionais e socioeconômicos. Os critérios podem ser de dois tipos: *Restrições* e *Fatores*.

As restrições estão fundamentadas em critérios *booleanos* (verdadeiros ou falsos) que cerceiam ou limitam a análise a regiões geográficas específicas. Elas diferenciam áreas aptas das não aptas [Cali00].

Os fatores são critérios que definem algum grau de aptidão para todas as regiões geográficas [Cali00]. Normalmente essa aptidão é medida em uma escala contínua e de forma a abranger todo o espaço de solução inicialmente previsto [RM01].

Neste trabalho, as restrições diferenciam áreas ou alternativas que podem ser consideradas aptas para destinação final de resíduos sólidos daquelas que não são aptas sob condição alguma. Por sua vez, os fatores definem áreas ou alternativas em termos de uma medida contínua de aptidão, realçando ou diminuindo a importância de uma alternativa, em consideração, naqueles locais fora das restrições absolutas.

A *Regra de Decisão* é o procedimento pelo qual os critérios eleitos – fatores ou restrições – são combinados.

A forma como os dados disponíveis influem na definição da adequabilidade de uma área à implantação de um aterro sanitário, no município estudado, foi definida considerando-se os diferentes critérios, normalmente adotados na seleção de locais para esse propósito. Como resultado, alguns dados foram classificados em função de sua aptidão para o uso desejado, tomando-se fatores, e outros em função das barreiras absolutas, impedindo o uso da área, tomando-se restrições.

Normalmente, os valores de diferentes critérios não são compatíveis entre si, o que inviabiliza a sua agregação. Para resolver este problema é necessário padronizar ou normalizar cada um dos fatores para uma mesma escala. A padronização é essencialmente um processo de conversão dos valores dos dados originais em níveis de adequabilidade.

O processo de normalização é, na sua essência, idêntico ao processo introduzido pela lógica *fuzzy*, segundo a qual um conjunto de valores expressos numa dada escala é convertido em outro comparável, expresso em uma escala normalizada. Segundo [Zade65], “a teoria do conjunto *fuzzy* é, em suma, o passo seguinte de aproximação entre a precisão da matemática clássica e a imprecisão do mundo real.”

O conjunto *fuzzy* é uma generalização do conjunto ordinário. É definido a partir de um domínio contínuo, com graus de pertinência variando de 0 a 1 ou 0 a 255, após a normalização. Na teoria geral, a pertinência ou afirmativa de um dado fenômeno é relativa. Com o advento dessa teoria, obteve-se uma estrutura conceitual apropriada de tomada de decisão, pois a lógica *fuzzy* auxilia a diminuir a subjetividade na escolha, e aumentar o raciocínio no processo de decisão.

No âmbito da Geotecnia Ambiental, tem-se aplicado a lógica *fuzzy* a diversas finalidades, dentre elas a escolha de áreas para aterros sanitários. Nesses estudos, os resultados têm mostrado que as operações *booleanas* (método baseado na lógica *binária* – base matemática dos SIGs convencionais) apresentam uma falha de 35% na seleção de áreas potenciais para este fim quando comparadas às análises realizadas utilizando lógica *fuzzy* [CG96].

Para a normalização dos critérios, várias funções podem ser utilizadas e dentre as funções de pertinência ao conjunto *fuzzy* estão *Sigmoidal*, *J-Shaped*, *Linear* e *User-Defined* [Zade65; East97; Cali00; RM01]. Em alguns sistemas de informações geográficas essa lógica já está implementada em rotinas computacionais denominadas módulos *fuzzy*.

A atribuição de pesos aos critérios, ou valoração, é a quantificação da importância relativa de cada um deles no processo de decisão. Embora não exista um método consensual para a atribuição de pesos, várias propostas são encontradas na literatura [Voog83; WE86; Malc99]. Alguns desses métodos são apresentados em [Ramo00], como: métodos baseados no ordenamento de critérios; métodos baseados em escalas de pontos; métodos baseados em distribuição de pontos; método baseado na comparação de critérios par a par. Neste trabalho, foi adotado o método baseado na comparação de critérios par a par, presente no algoritmo do programa utilizado nas análises. O módulo calcula um conjunto de pesos e uma razão de consistência, e permite ajustes repetidos à comparação. A razão indica qualquer inconsistência que tenha ocorrido durante o processo de comparação.

Na agregação dos critérios, foram utilizados neste trabalho dois procedimentos, o *Weighted Linear Combination (WLC)* e o *Ordered Weighted Average (OWA)*. A técnica de agregação *WLC* permite a compensação total entre os fatores através da aplicação de pesos ponderados, também chamados de pesos dos fatores. O risco assumido na análise é médio, exatamente entre o *AND* (mínimo) e o *OR* (máximo) da Análise Boolean. Com a *WLC* os fatores são combinados aplicando um peso para cada um deles, seguido pela adição dos resultados para produzir um mapa final de adequabilidade. A mais importante característica do procedimento *WLC* é o fato de permitir a compensação entre fatores (*trade-off*), o que significa que uma baixa adequabilidade em um dado fator pode ser compensada por um conjunto de boas adequabilidades em outros.

A técnica do *OWA*, introduzida por [Yage88], permite a compensação entre os fatores através da aplicação de pesos ponderados – ou pesos dos fatores, e também controla o nível do risco assumido na análise e o grau de compensação entre eles através da aplicação de um segundo conjunto de pesos, chamados de pesos ordenados. O nível de risco depende da posição dos pesos ordenados no *ranking* e da magni-

tude dos seus valores. Valores maiores nas primeiras posições representam menor risco. Valores maiores nas últimas posições representam maior risco. Fazendo variar os pesos ordenados, qualquer combinação é possível desde que o seu somatório seja igual a um. O procedimento OWA permite implementar uma gama (na verdade infinita) de opções de agregação. O deslocamento dos pesos ordenados no sentido do mínimo ou do máximo controla o nível de risco (*ANDness*); por sua vez, a homogeneidade de distribuição dos pesos ordenados pelas posições controla a compensação (*trade-off*).

O resultado é um espectro estratégico de decisão, aproximadamente triangular, definido por um lado pelo risco e, por outro lado, pela compensação [East97], como se observa na Figura 1.

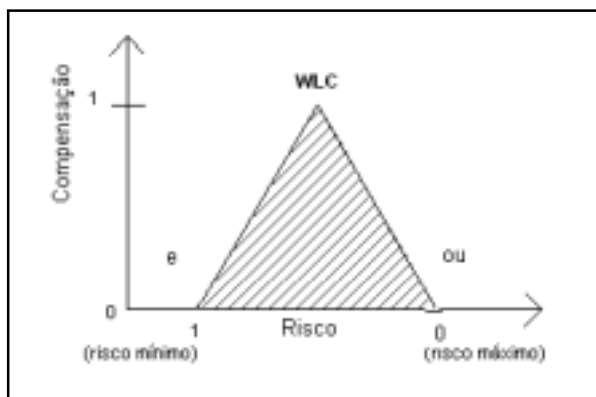


Figura 1 – Espaço Estratégico de Decisão (OWA)

O nível de risco é medido pela variável *Risco*, dada pela equação [East97]:

$$\text{Risco} = \frac{1}{n-1} \sum_i [(n-i)O_i] \quad (\text{Equação 1})$$

e a compensação é dada por:

$$\text{Compensação} = 1 - \sqrt{\frac{n \sum_i \left(O_i - \frac{1}{n} \right)^2}{n-1}} \quad (\text{Equação 2})$$

em que n é o número total de fatores, i é a ordem do fator e O_i é o peso (*order weight*) para o fator de ordem i .

2.1 Seleção de Técnicas Associadas à Avaliação Multicritério

A seleção das técnicas depende tanto da situação particular em análise quanto dos dados e recursos disponíveis. No que se refere à avaliação de pesos, sempre que estiver em causa expressar aquelas que são prioridades de um grupo de decisores, deverá ser utilizada a comparação par a par. Embora este seja um método mais complexo e demorado, que por vezes impõe a iteração para garantir um grau de consistência aceitável, os resultados e o próprio procedimento tornam-se perfeitamente adequados ao problema de localização do aterro sanitário, pois permitem uma avaliação da importância relativa dos critérios de localização.

No que se refere à normalização de critérios, o procedimento mais adequado para variáveis contínuas (distâncias, por exemplo) é a aplicação de uma função *fuzzy*, que

deverá ser escolhida e calibrada criteriosamente. Por sua vez, nos casos em que se está em presença de critérios envolvendo escalas nominais (uso do solo, por exemplo), deverão ser atribuídos arbitrariamente os valores, de acordo com a escala normalizada adotada. Neste trabalho adotou-se a escala variando de 0 a 255.

Com relação ao método de agregação (combinação) de critérios, podem ser utilizados os procedimentos de agregação WLC (combinação linear ponderada) ou OWA (média ponderada ordenada), ou ainda uma combinação de ambos ao longo da estrutura hierárquica de decisão. Interessa recorrer ao OWA sobretudo quando se pretende explorar cenários de risco e variação de compensação. A WLC é um caso particular do procedimento mais geral OWA. Esses procedimentos ampliam a potencialidade das análises espaciais quando comparados com as análises *booleanas*, uma vez que permitem inserir a variável risco e a compensação entre fatores. A análise booleana apenas identifica áreas aptas e inaptas.

3. ESTUDO DE CASO

3.1 Caracterização da Área de Estudo

O município de Cachoeiro do Itapemirim está localizado ao Sul do Estado do Espírito Santo, e constitui parte da Zona Fisiográfica Serrana do Sul, apresentando as seguintes coordenadas geográficas 20° 51' 12" de latitude sul e 41° 06' 22" de longitude oeste de Greenwich. Foram usadas as seguintes informações: planialtimetria, base topográfica (1:50000, 1978), geologia (1:100000, 1992), geomorfologia (1:250000, 1983), pedologia (1:250000, 1983), hidrografia (1:50000, 1983) e a Imagem do Satélite Landsat 5 (órbita 216, ponto 074 de 08/29/1999, bandas 3, 4 e 5).

As Figuras 2, 3, 4 e 5 apresentam, respectivamente, o modelo de sombreamento digital do terreno e a hidrografia, a geologia, a geomorfologia e a pedologia. A Figura 6 apresenta o sistema viário, a área urbana, os distritos e as fazendas do município de Cachoeiro do Itapemirim.

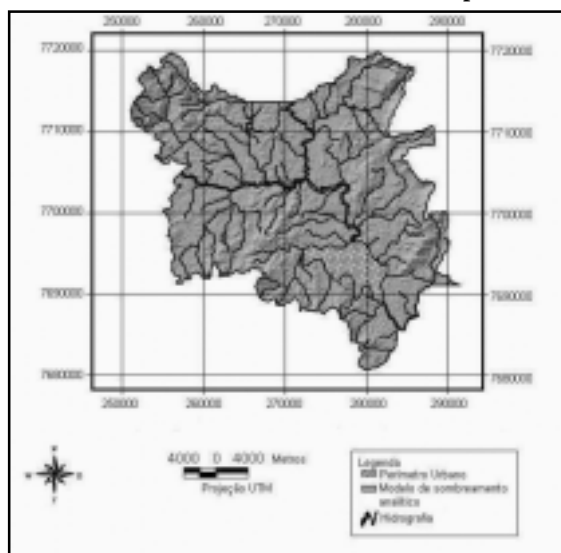


Figura 2- Modelo de Sombreamento Analítico

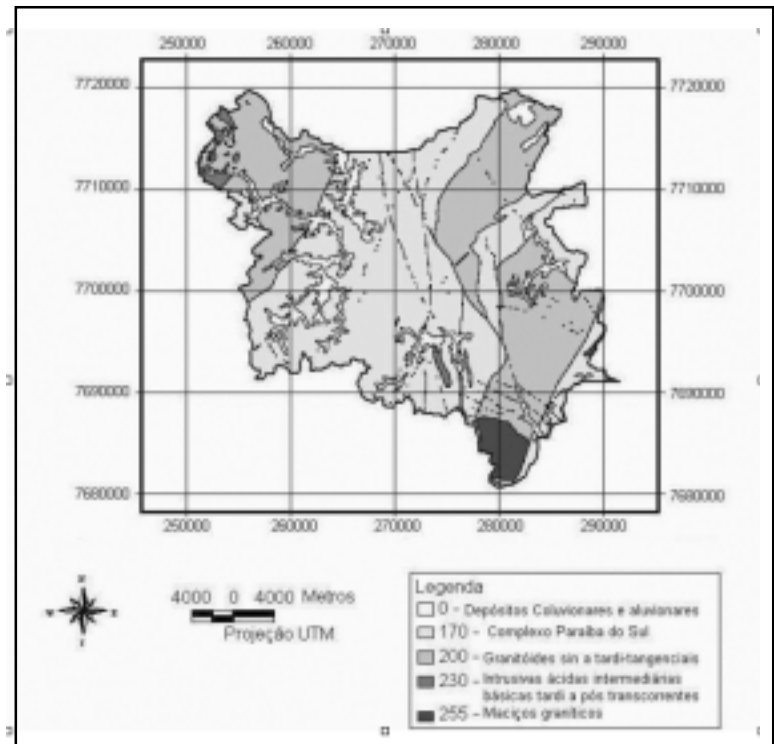


Figura 3- Mapa Geológico

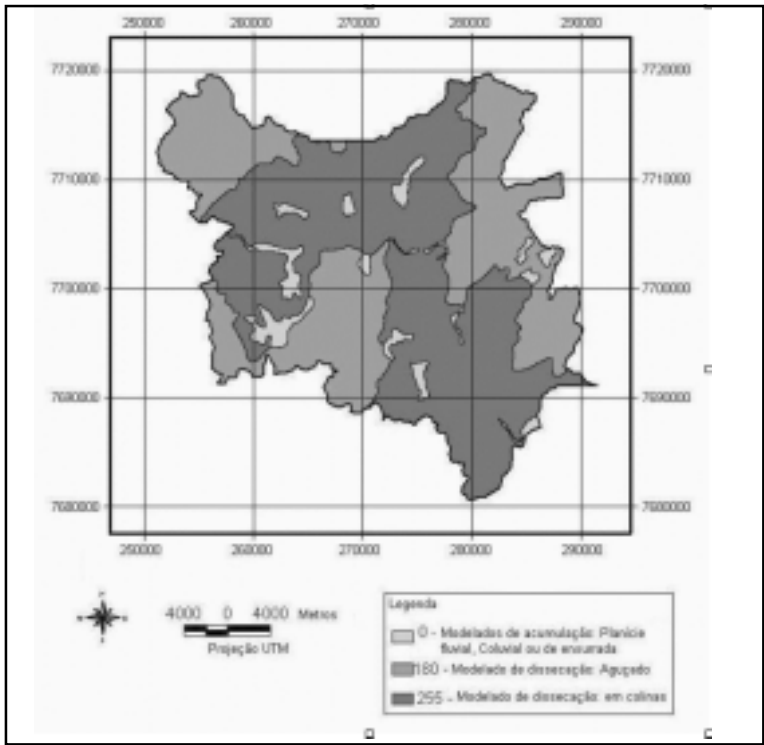


Figura 4- Mapa Geomorfológico

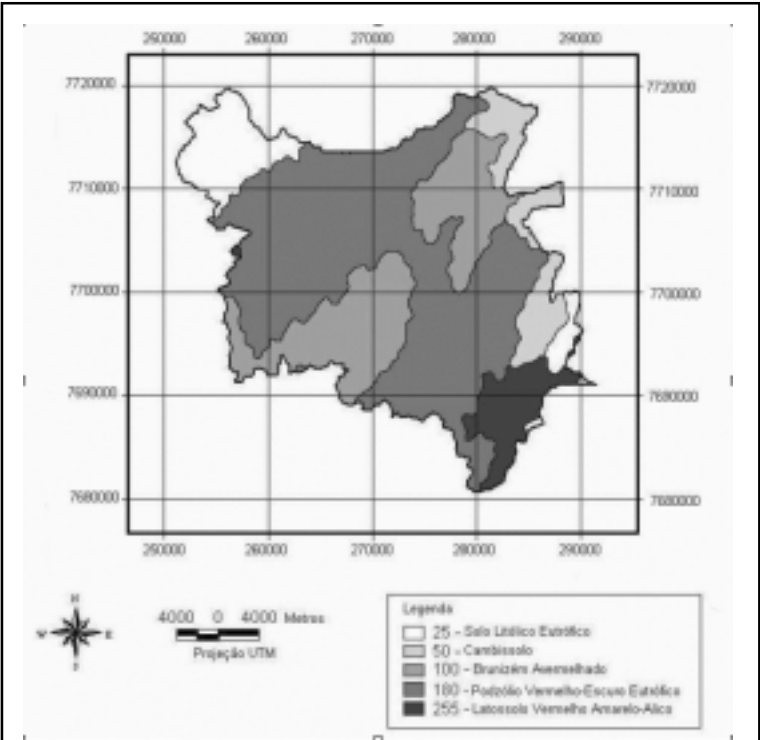


Figura 5.-Mapa Pedológico

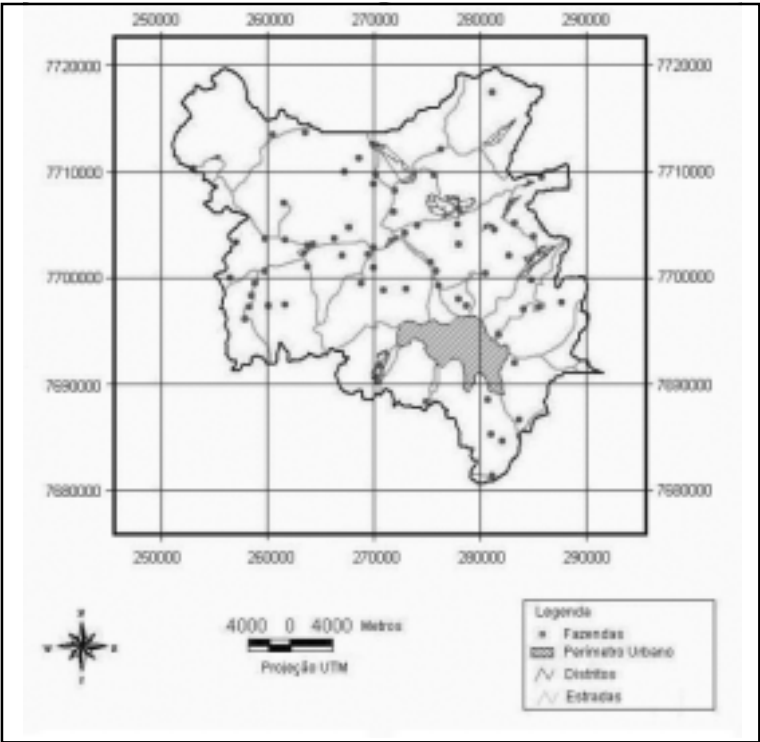


Figura 6- Sistema Viário, Área Urbana, Fazendas

3.2 *Análise Estratégica de Decisão - Estabelecimento dos Critérios*

A análise estratégica de decisão foi subdividida em três critérios – ambiental, operacional e socioeconômico – e teve por objetivo discernir os aspectos que individualizam cada critério (importância relativa), permitindo uma melhor comparação par a par e possibilitando que fatores de mesma natureza fossem relacionados.

3.2.1 *Critérios Restritivos (Restrições)*

As restrições associadas aos critérios ambiental, operacional e socioeconômico consideradas neste trabalho estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Restrições Associadas aos Critérios Ambiental, Operacional e Socioeconômico.

ID	DESCRIÇÃO
RA	Restrições associadas ao critério ambiental
RA1	Distância mínima de 200m (<i>buffer</i>) de qualquer coleção hídrica ou curso d’água (de acordo com a NBR 13896/97)
RA2	Distância mínima de 200m (<i>buffer</i>) do sistema viário
RA3	Distância mínima de 200m (<i>buffer</i>) das falhas geológicas
RO	Restrições associadas ao critério operacional
RO1	Declividade mínima de 1% e máxima de 30% (de acordo com a NBR 13896/97)
RO2	Limite do município de Cachoeiro do Itapemirim
RS	Restrições associadas ao critério socioeconômico
RS1	Distância mínima de 500m (<i>buffer</i>) dos distritos – núcleo populacional (de acordo com a NBR 13896/97)
RS2	Distância mínima de 500m (<i>buffer</i>) da cidade- sede – área urbanizada (de acordo com a NBR 13896/97)
RS3	Distância mínima de 500m (<i>buffer</i>) das sedes das fazendas (de acordo com a NBR 13896/97)

Fonte: Adaptado da NBR 13896/, [Mene95], [MRF95], [Andr99], [Lima99], [Malc99] e [Marq01]

3.2.2 *Critérios Escalonados (Fatores)*

Os fatores associados aos critérios ambiental, operacional e socioeconômico considerados estão apresentados no Quadro 2. Nesse quadro são apresentadas também as funções utilizadas para normalizar os dados, assim como seus respectivos pontos de controle.

Quadro 2 – Fatores Associados aos Critérios Ambiental, Operacional e Socioeconômico. Funções Fuzzy Adotadas e Seus Respectivos Pontos de Controle.

ID	DESCRIÇÃO	Distância mínima	Função Fuzzy	Ponto de Controle			
				a	b	C	d
FA	Fatores associados ao critério ambiental						
FA1	Distância mínima de 200m de qualquer coleção hídrica ou curso d'água (de acordo com a NBR 13896/97)	200m	Sigmoidal monotônica crescente	200m	700m	700m	700m
FA2	Distância mínima de 200m das falhas geológicas	200m	Sigmoidal monotônica crescente	200m	700m	700m	700m
FA3	Pedologia	-	Escala [0-255]	-			
FA4	Geologia	-	Escala [0-255]	-			
FA5	Geomorfologia	-	Escala [0-255]	-			
FA6	Unidades naturais	-	Escala [0-255]	-			
FO	Fatores associados ao critério operacional						
FO1	Declividade mínima de 1% e máxima de 30% (de acordo com a NBR 13896/97)	1%	Linear simétrica	1%	5%	20%	30%
FO2	Distâncias acima de 700m do sistema viário oneram sensivelmente os custos de operação	500m	J monotônica decrescente	500m	500m	500m	700m
FO3	Distâncias menores são consideradas favoráveis	mín.	Linear monotônica decrescente	mín.	máx.	máx	máx.
FS	Fatores associados ao critério socioeconômico						
FS1	Distância mínima de 500m dos distritos - núcleos populacionais (de acordo com a NBR 13896/97)	500m	Linear monotônica crescente	500m	700m	700m	700m
FS2	Distância mínima de 500m da cidade-sede - área urbana (de acordo com a NBR 13896/97)	500m	inear monotônica crescente	500m	700m	700m	700m
FS3	Distância mínima de 500m das fazendas (de acordo com a NBR 13896/97)	500m	Linear monotônica crescente	500m	700m	700m	700m

Fonte: Adaptado da NBR 13896/, [Mene95], [MRF95], [Andr99], [Lima99], [Malc99] e [Marq01]

3.2.3 Estrutura do Modelo de Avaliação

O modelo de avaliação é estruturado por níveis hierárquicos de análise, sendo definido dentro de cada grupo de critérios. Esses grupos são processados segundo uma seqüência que envolve três etapas, descritas no item 2 (Metodologia): padronização (ou normalização) dos fatores, comparação par a par (ou identificação de pesos) e combinação (WLC e OWA). A Estrutura do Modelo de Avaliação utilizada está ilustrada na Figura 7.

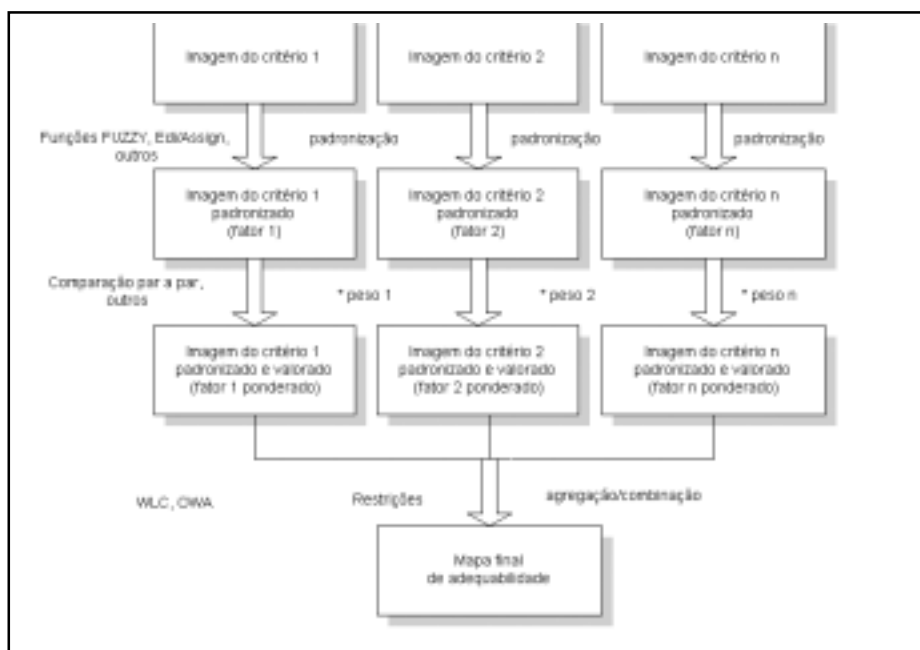


Figura 7 – Estrutura de Análise por Nível e Grupo de Critérios (Adaptado de [RM01])

3.2.4 Ponderação das Variáveis - Comparação Par a Par

Considerando que as variáveis que interferem na escolha de áreas para a implantação do aterro sanitário contribuem com pesos diferenciados no processo final de decisão, estabeleceu-se uma ponderação de acordo com a importância de cada uma para a aptidão da área. O algoritmo utilizado auxilia o estabelecimento dos pesos finais através da comparação da importância relativa das variáveis duas a duas, diminuindo a subjetividade na decisão.

O peso final de cada variável foi estimado através do método AHP (*Analytical Hierarchy Process* – Processo de Hierarquização Analítica) aplicado à matriz de comparação par a par. Os pesos ponderados obtidos estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Pesos Ponderados Obtidos da Matriz de Comparação

Fatores		Pesos Ponderados
FA ambiental	FA1– Fator Distância dos Cursos D’água	0.4417
	FA2– Fator Distância das Falhas Geológicas	0.3013
	FA3– Fator Pedológico	0.0934
	FA4– Fator Geológico	0.0934
	FA5– Fator Geomorfológico	0.0452
	FA6– Fator Unidades Naturais	0.0251
FO operacional	FO1– Fator Declividade	0.0909
	FO2–Fator Distância do Sistema Viário	0.4545
	FO3– Fator Distância do Perímetro Urbano	0.4545
FS Socio— econômico	FS1– Fator Distância dos Distritos	0.2790
	FS2– Fator Distância da Cidade- Sede	0.6491
	FS3– Fator Distância das Fazendas	0.0719

3.2.5 Fluxograma de Análise

A aplicação do modelo de seleção e avaliação do estudo de caso foi realizada com os recursos do GIS *Idrisi32*, *I.32.21*, 2001.

No fluxograma apresentado na Figura 8, os operadores e as imagens são identificados pelo seu nome tal como é feito pelo programa, e é seguida a estrutura hierárquica de análise apresentada no Quadro 4.

Quadro 4 – Critérios Escalonados (Fatores) por Níveis

Nível	Fator ambiental	Fator operacional	Fator socioeconômico
1º	FA	FO	FS
2º	FA1; FA2; FA3; FA4; FA5; FA6	FO1; FO2; FO3	FS1; FS2; FS3

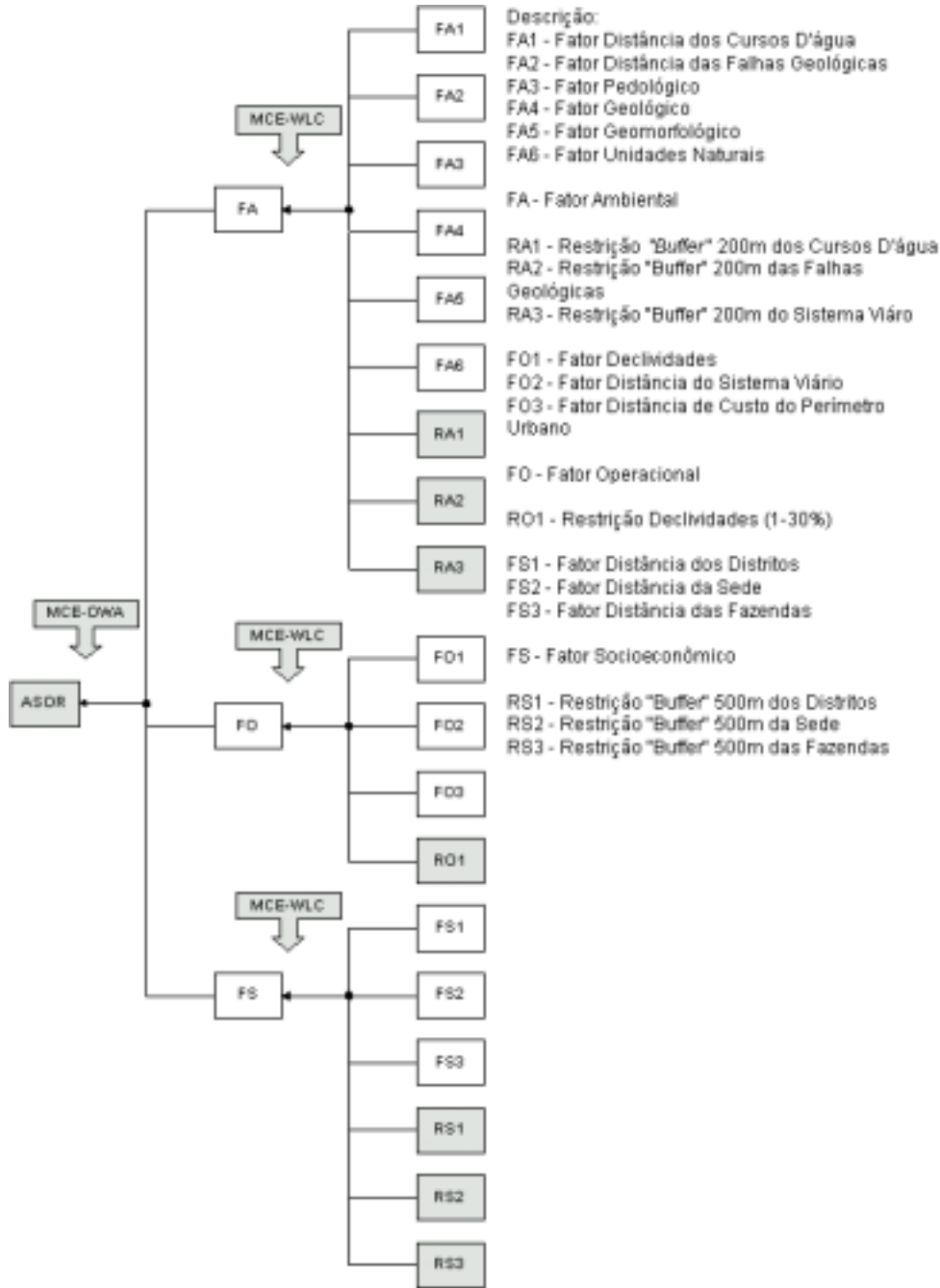


Figura 8 – Fluxograma do Processo de Agregação de Fatores e Restrições
(Adaptado de [RM01])

3.2.6 Cenários de Avaliação

A quantidade de opções possíveis na definição de cenários de avaliação é teoricamente infinita, considerando diferentes combinações de pesos e diferentes combinações de técnicas (MCE-WLC e MCE-OWA) nos diferentes níveis de critérios. Neste trabalho, optou-se por um conjunto de cenários com significado do ponto de vista do seu interesse prático, no contexto da realidade municipal de Cachoeiro do Itapemirim. Os cenários foram obtidos agregando-se os critérios conforme os níveis estabelecidos no Quadro 4:

2º nível: combinação das imagens resultantes do MCE-WLC para cada um dos três grupos de critérios escalonados;

1º nível: Combinação dos resultados da agregação do 2º nível, com uso do MCE-OWA, usando três conjuntos de pesos ponderados e treze conjuntos de pesos ordenados, correspondendo a um total de 39 cenários.

Cada grupo de fator (FA, FO e FS) foi processado no 2º nível pelo operador WLC, utilizando os pesos ponderados mostrados no Quadro 3. A combinação dessas imagens correspondentes ao 1º nível associada às restrições adotadas (RA1, RA2, RA3, RA4, RA5, RA6, RO1, RS1, RS2 e RS3) resultou na imagem final de adequabilidade P_n-C_m (em que n corresponde ao conjunto de pesos adotado no Quadro 5 e m aos cenários processados indicados no Quadro 6).

Quadro 5 – Conjunto de Pesos Ponderados
Referentes à Importância Relativa dos Critérios
Escalonados (Ambiental, Operacional e
Socioeconômico) na Avaliação do 1º Nível

Conjunto de pesos	Fator	Peso
P_i	FA	0.50
	FO	0.30
	FS	0.20
	Soma	1.00
P_{ii}	FA	0.30
	FO	0.50
	FS	0.20
	Soma	1.00
P_{iii}	FA	0.40
	FO	0.40
	FS	0.20
	Soma	1.00

Utilizou-se, neste procedimento, treze conjuntos de pesos ordenados, de acordo com o Quadro 6.

Quadro 6 – Conjunto de Pesos Ordenados na Avaliação do 1º Nível Cenário Pesos ordenados Risco
Compensação Característica

Cenário	Pesos ordenados	Risco	Compensação	Característica
Ci	[0.33 0.33 0.33] 	0.50	1.00	Risco médio Máxima compensação
Cii	[1.00 0.00 0.00] 	1.00	0.00	Risco mínimo Sem compensação
Ciii	[0.00 0.00 1.00] 	0.00	0.00	Risco máximo Sem compensação
Civ	[0.00 1.00 0.00] 	0.50	0.00	Risco médio Sem compensação
Cv	[0.50 0.40 0.10] 	0.70	0.64	Baixo risco Compensação parcial
Cvi	[0.10 0.40 0.50] 	0.30	0.64	Alto risco Compensação parcial
Cvii	[0.10 0.50 0.40] 	0.35	0.64	Risco médio-alto Compensação parcial
Cviii	[0.40 0.50 0.10] 	0.65	0.64	Risco médio-alto Compensação parcial
Cix	[0.70 0.20 0.10] 	0.80	0.44	Baixo risco Compensação parcial
Cx	[0.10 0.20 0.70] 	0.20	0.44	Alto risco Compensação parcial
Cxi	[0.10 0.70 0.20] 	0.45	0.44	Risco médio-alto Compensação parcial
Cxii	[0.20 0.70 0.10] 	0.55	0.44	Risco médio-baixo Compensação parcial
Cxiii	[0.20 0.60 0.20] 	0.50	0.60	Risco médio Compensação parcial

4. RESULTADOS

Na imagem de adequabilidade referente ao fator ambiental, observou-se o predomínio dos fatores Distância dos Cursos D'água e Distância das Falhas Geológicas que receberam os maiores pesos, 0.4417 e 0.3013, respectivamente.

A imagem de adequabilidade característica do fator operacional mostrou predominância dos fatores Distância do Sistema Viário e Distância do Perímetro Urbano com pesos de 0.2790 e 0.6491, respectivamente.

A imagem de adequabilidade referente ao fator socioeconômico apresentou grandes extensões de terras aptas à implantação do aterro. Foi notável a influência dos fatores Distância da Sede e Distância dos Distritos com pesos relativos de 0.4545 e de 0.4545, e suas respectivas restrições.

Na análise das imagens resultantes Pi & C_i e Pii & C_i, foram observadas grandes extensões com baixa aptidão (inferior a 175), sendo as maiores encontradas nas proximidades dos núcleos populacionais. Essas imagens apresentaram risco médio (0.50) e máxima compensação (1.00), devido ao conjunto de pesos ordenados utilizados ([0.33 0.33 0.33]). Vale lembrar que a primeira imagem (Pi & C_i) considera mais importante o fator ambiental (0.50) em detrimento dos fatores operacional (0.30) e socioeconômico (0.20).

As imagens Pi & C_{ii} e Pii & C_{ii} apresentaram risco mínimo (1.00) e nenhuma compensação (0.00). Estas características estão intimamente relacionadas com a análise *boolean*, uma vez que as imagens resultantes apresentaram um cenário pessimista. Áreas com baixíssima adequabilidade (inferior a 80) são encontradas na região oeste e nordeste do município, principalmente nos locais de maior declividade. A diferença entre as duas imagens de aptidão está no conjunto de pesos relacionais.

As imagens que apresentaram as melhores características para implantação do empreendimento (risco médio-alto, 0.35 e compensação parcial, 0.64) foram: Pi & C_{vii} e Pii & C_{vii}. Optou-se pela solução de risco médio-alto por contar-se com dados (mapas) provenientes de fontes confiáveis (IBGE, CPRM e Laboratório de Sistema de Informação Geográfica - SIGEO) e pela segurança em poder assumir, nesse empreendimento, um maior grau de risco.

Para uma decisão mais criteriosa, o maior peso foi aplicado ao fator operacional em detrimento dos outros fatores. Esta decisão foi baseada em dois critérios: o primeiro referiu-se ao fato de que as restrições adotadas já abordavam intensamente os aspectos ambientais, e o segundo estava relacionado com a elevação dos custos operacionais que poderiam inviabilizar o empreendimento. De todos os cenários processados considerou-se a imagem Pii & C_{vii}, Figura 9, como a que apresentou as melhores características para instalação do aterro sanitário.



Figura 9– Carta de Adequabilidade Cenário 2c - Risco Médio- Alto - Compensação Parcial

4.1 Cálculo da Área Mínima

O município apresentava em 2001 uma população de aproximadamente 175.000 habitantes. Adotando-se uma produção de lixo *per capita* da ordem de 0,50 kg/hab/dia, densidade média de lixo de 0,70 tf/m³ e uma vida útil de 10 anos (mínimo exigido pela NBR 13896/97), a produção calculada, no período, foi cerca de 518.381,430 m³ com um volume acumulado (lixo + cobertura de solo) de 622.057,70 m³. Adotando-se o método da trincheira, tem-se como área mínima o valor de 13,5 ha. A fim de acomodar outras atividades operacionais do aterro, além de uma possível ampliação, optou-se por uma área mínima de 20 ha.

4.2 Seleção das Áreas com Maior Adequabilidade

Com a imagem de adequabilidade final (Pii & C_vii - risco médio-alto e compensação parcial) e a área mínima necessária (20 ha) definida, foram selecionadas as áreas mais aptas à implantação do empreendimento. Foi definido que adequabilidades acima de 200 atenderiam aos critérios estabelecidos e que acima de 220 seriam ideais. As imagens resultantes mostradas na Figura 10 apresentaram adequabilidades acima de 220 e 200 respectivamente, respeitando-se área mínima de 20 ha. A grande diferença no número de áreas encontradas deve-se às faixas de adequabilidade da primeira (220-255) e da segunda (200-255).

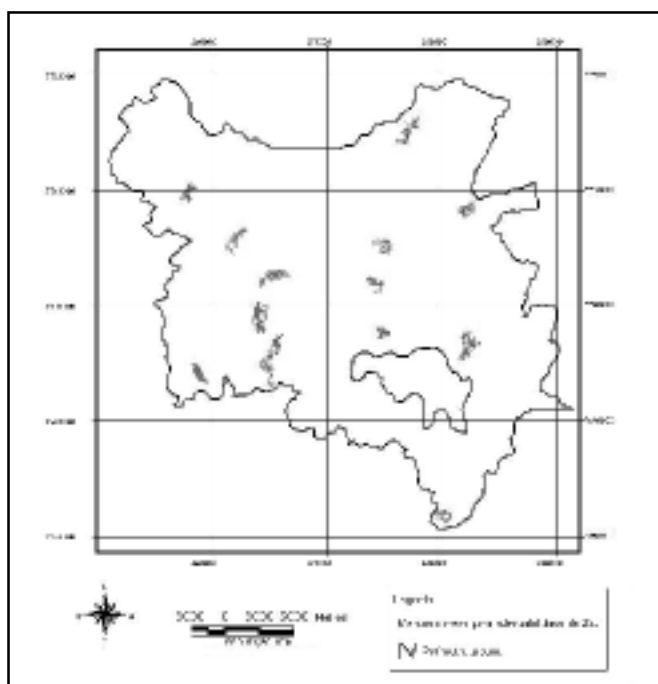


Figura 10 – Melhores Áreas para Adequabilidade de 230

O depósito atual de lixo encontra-se sobre uma pequena área de aptidão nula, distante das regiões com maior adequabilidade. A localização sobre uma área que não é a melhor, associada aos potenciais impactos inerentes ao aterro, indica que a destinação final dos resíduos sólidos deveria ser deslocada para locais mais apropriados, utilizando-se o mapa de aptidão como guia. Existem inúmeras alternativas, incluindo áreas não muito distantes da localização atual, que poderiam ser utilizadas caso o deslocamento para locais mais distantes incorresse em transtornos não previstos nesse estudo. Além da mudança na localização, ressalta-se a necessidade da adoção de outras recomendações para uma adequada disposição de resíduos sólidos urbanos.

4.3 Avaliação do Uso e Cobertura do Solo

Ao analisar a sobreposição das áreas mais adequadas (aptidão maior que 220 e área maior que 20 ha) com a imagem LANDSAT 5 observou-se que algumas áreas se encontravam sobre regiões de intensa cobertura vegetal, sobretudo com a presença de florestas nativas, ainda remanescentes da Mata Atlântica. Observou-se também que um número considerável de áreas apresentavam-se distantes do principal centro gerador de resíduos sólidos: a cidade de Cachoeiro do Itapemirim.

Essa análise conduziu ao descarte de áreas que estavam situadas sobre as regiões de cobertura vegetal primária (vegetação nativa) e muito distantes do centro gerador de lixo, resultando na Figura 11, que apresenta a proposta final para a implantação do aterro sanitário.

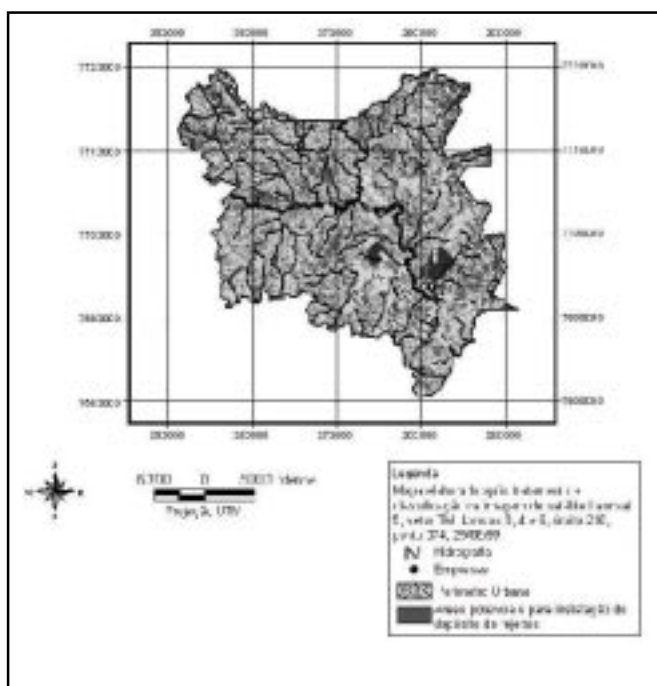


Figura 11 – Áreas Potenciais para Instalação do Aterro

Com essa abordagem, foi possível limitar o número de áreas a serem analisadas em estudos superficiais e sub-superficiais localizados, permitindo racionalizar a aplicação de recursos financeiros e a escolha de alternativas mais adequadas do ponto de vista ambiental, operacional e socioeconômico. Análises como esta realçam as potencialidades do

geoprocessamento para a tomada de decisão em empreendimentos relacionados ao meio ambiente. O processo de ponderação, além de permitir a compensação de uma variável pela outra, pode ser usado para gerar vários cenários para o mesmo objetivo por meio da simples alteração dos pesos ou da inclusão ou exclusão de variáveis. Aliados a outras ferramentas inovadoras, como a geoestatística, recursos como a classificação contínua representam *desktop*, hoje acessíveis a qualquer usuário.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta a metodologia utilizada na avaliação e seleção de áreas para implantação de aterros sanitários no município de Cachoeiro do Itapemirim, ES, com uso de análise multicritério e sistemas de informação geográfica. Foram encontradas 15 áreas entre 20 e 200 ha que apresentaram alta adequabilidade (superior a 220).

O depósito atual de lixo encontra-se sobre uma área de aptidão nula, distante das áreas com aptidão maior que 220 e deverá ser deslocado. Utilizando-se o mapa de aptidão como guia, verifica-se a existência de inúmeras alternativas, incluindo áreas não muito distantes da localização atual, que poderiam ser utilizadas.

Os resultados obtidos revelaram que o método de análise estratégica de decisão, viabilizada pela potencialidade do SIG, permite a integração de informações espaciais para tomada de decisão no processo de avaliação e seleção de áreas para a implantação de empreendimentos impactantes.

KEYWORDS

Sanitary dirt-fill– Multicriterion analyse– Geographical Information Systems

ABSTRACT

This paper presents a methodology used to assess and select areas for development of landfills in the city of Cachoeiro do Itapemirim-ES, Brazil, using multi-criteria analysis and geographical information systems. Fifteen areas between 20 and 200 hectares were found that presented suitability greater than 220. The present landfill is in an area with null suitability and distant from the areas with suitability over 220. The results showed that GIS was a useful and agile tool in integrating spatial information for decision making in the selection of suitable areas for landfills.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[ABNT]. Aterros de resíduos não perigosos: critérios para projeto, implantação e operação (NBR 13.896/97). ABNT, Rio de Janeiro, Brasil, 1997.

[Andr99] ANDRADE, F. S. *Uso de sistemas de informação geográfica na identificação de áreas potenciais para a instalação de aterros sanitários no Distrito Federal*. Tese (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências/UnB, Brasília, DF, Brasil, 1999. 131p.

- [Cali00] CALIJURI, M. L. *Treinamento em Sistemas de Informações Geográficas*. Núcleo SiGEO. Universidade Federal de Viçosa 2000. 156p.
- [CG96] Charnpratheep, K. & Ganer, B. Z. Q. *Preliminary landfill site screening using fuzzy geographical information systems*. Waste Management & Research. V15, p. 197-215, 1996.
- [East97] EASTMAN, J. R. *IDRISI for Windows: User's Guide. Version 2.0*. Worcester: Clark University - Graduate School of Geography, 1997.
- [Lima99] LIMA, G. S. *Seleção de áreas para implantação de aterros sanitários: uma proposta baseada na análise do valor e lógica fuzzy*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1999. 153p.
- [Malc99] MALCZWSKI, J. *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA, 1999.
- [Marq01] MARQUES, E. T. *Identificação de áreas potenciais para a disposição de resíduos de mármore e granitos em Cachoeiro do Itapemirim - ES*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil). DEC/UFV. Viçosa, Minas Gerais, Brasil, 2001. 103p.
- [MRF95] MC BEAN, E. A.; ROVERS, F. A.; FARQHAR, G. J. *Solid waste landfill engineering and design*. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1995. 521p.
- [Mene95] MENEZES, D. B. *Diagnóstico dos impactos do depósito de resíduos sólidos de São Carlos – SP, no meio físico*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil), EESC-USP, São Carlos, São Paulo, Brasil, 1995. 102p.
- [RM01] RAMOS, R. A. R. & MENDES, J. F. G. *Avaliação da aptidão do solo para localização industrial: o caso de Valença*. *Revista Engenharia Civil*, n.10, p.7-29, 2001, Universidade do Minho, Minho, Portugal.
- [Ramo00] RAMOS, R. A. R. *Localização industrial: um modelo para o noroeste de Portugal*. Tese (doutorado). Braga: Universidade do Minho, Minho, Portugal; (in RAMOS & MENDES, 2001). 2000.
- [Voog83] VOOGD, H. *Multicriteria evaluation for urban and regional planning*. Pion Ltd. London, UK, 1983. (in RAMOS & MENDES, 2001).
- [WE86] WINTERFELDT, D. Von & EDWARDS, W. *Decision analysis and behavioural research*. Cambridge University Press. Cambridge, UK, 1986. (in Ramos & Mendes, 2001).
- [Yage88] YAGER, R. R. *On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. Volume 8 (1). p. 183-190, 1988, (in RAMOS & MENDES, 2001); (in RAMOS & MENDES, 2001).
- [Zade65] ZADEH, L. A. *Fuzzy sets. Information and control*. V8. p. 338-353, 1965.

SOBRE OS AUTORES

MARIA LÚCIA CALIJURI

Professora Titular do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa – UFRJ

Doutora em Engenharia Civil pela USP

Áreas de interesse: Sistema de informação geográfica, análise multicritério, geotecnia ambiental

ANDRÉ LUIS DE OLIVEIRA MELO

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa –UFV

Mestre em Geotecnia Ambiental pela UFV – Departamento de Engenharia Civil

Áreas de interesse: Sistema de informação geográfica, análise multicritério, geotecnia ambiental

JULIANA FERREIRA LORENTZ

Graduanda em Engenharia de Agrimensura pela Universidade Federal de Viçosa – UFV- 7º período

Áreas de interesse: Sistema de informação geográfica, análise multicritério, geotecnia ambiental