



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Mapeamento de Sensibilidade Ambiental ao Desenvolvimento: estudo de caso na Região Hidrográfica VIII – RJ

Wilmar Wan-De-Rey de Barros Junior¹, José Augusto Ferreira da Silva²

¹Mestre em Engenharia Ambiental, Laboratório de Geomática, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense – (IFFluminense), Macaé/RJ - Brasil. E-mail: wilmarwjr@gmail.com ²Doutor em Geografia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense – (IFFluminense), Macaé/RJ - Brasil. E-mail: jasilva@iff.edu.br

Artigo recebido em 01/02/2018 e aceito em 02/04/2018

RESUMO

Buscou-se com a pesquisa a produção do mapeamento indicativo de sensibilidade ambiental para o desenvolvimento regional da Região Hidrográfica VIII (RH-VIII), no Estado do Rio de Janeiro, Brasil. O estudo desenvolveu-se com a utilização dos softwares SPRING 5.5.0 e QGIS 2.18.6. O método de pesquisa baseia-se na Análise por Múltiplos Critérios (AMC), visando mapeamento de sensibilidade ambiental para o desenvolvimento regional da RH-VIII. O resultado revelou que 46% do território da RH-VIII apresenta alguma aptidão ao desenvolvimento enquanto mais 6% da área aponta extrema sensibilidade ambiental.

Palavras-chaves: Geotecnologias; Uso das terras; Álgebra de mapas; Modelagem ambiental.

Mapping of Environmental Sensitivity do Development: case study at Hydrographic Region VIII – RJ

ABSTRACT

The research was carried out to produce the mapping of environmental sensitivity for the regional development of Hydrographic Region VIII (RH-VIII), in the State of Rio de Janeiro, Brazil. The study was developed using the software SPRING 5.5.0 and QGIS 2.18.6. The research method is based on Multi Criteria Analysis (AMC), aiming at mapping environmental sensitivity for the regional development of RH-VIII. The result showed that 46% of the territory of RH-VIII has some developmental aptitude while another 6% of the area indicates extreme environmental sensitivity.

Keywords: Geotechnology; Land use; Map Algebra; Environmental modeling.

Introdução

No contexto da gestão ambiental, a utilização adequada das terras é um dos grandes desafios atuais, visto que a sociedade a desconsidera na pretensão do desenvolvimento a qualquer custo. No entanto, para promover o uso adequado das terras, é necessária uma exploração relacionada à aptidão natural do ambiente, às questões legais, assim como ao interesse da sociedade.

O fomento ao planejamento ambiental efetua-se no desenvolvimento de metodologias que colaboram na tomada de decisão. Uma dessas metodologias é o desenvolvimento de mapas de vulnerabilidade ambiental, procedimento que consiste na avaliação das condições físico-ambientais de uma determinada unidade (Pinese Júnior e Rodrigues, 2012).

O desenvolvimento desse tipo de pesquisa está condicionado ao conhecimento das características do ambiente por um processo de modelagem espacial do meio, o que demanda um mapeamento preliminar com o intuito de produzir dados cartográficos de extrema importância, tanto para aplicação em pesquisas geográficas como para o planejamento ambiental (Barbosa et al., 2013).

Pretende-se com essa pesquisa apresentar procedimentos técnicos para o mapeamento de sensibilidade ambiental visando o desenvolvimento regional da Região Hidrográfica VIII (RH-VIII), por meio do método de Análise de Múltiplos Critérios (AMC) com apoio das Geotecnologias.

De acordo com Malczewski (2006), a AMC é um algoritmo matemático onde diferentes

alternativas são comparadas na presença de vários critérios, estabelecidos de acordo com os objetivos propostos pelo estudo para apoiar a tomada de decisão.

Esse tipo de pesquisa apoiado em Geotecnologias, é exequível a partir do Processo Analítico Hierárquico ou em inglês Analytic Hierarchy Process (AHP), método desenvolvido pelo matemático Thomas L. Saaty na década de 70 para ser aplicado em processos de tomada de decisão (Dias e Silva, 2014). Segundo Oliveira et al. (2009), esse método vem sendo amplamente utilizado em estudos relacionados ao planejamento ambiental, trazendo resultados satisfatórios que apoiam a tomada de decisão em diversas regiões do Brasil.

O método AHP em Sistema de Informações Geográficas (SIG) pode ser verificado em diversas aplicações no planejamento ambiental como: na avaliação da qualidade ambiental para gerar indicadores de sustentabilidade urbana, ordenamento territorial municipal, mapeamento de área de riscos, vulnerabilidade ambiental dentre outros (Moras Filho, 2015; Ribeiro et al., 2016; Biziak, 2017).

Nas análises envolvendo as questões ambientais, o método AHP apresenta um desempenho significativo devido à possibilidade de agrupar um grande número de variáveis dentro de uma única avaliação. A eficiência dos resultados deve-se ao fato de que o método aplica uma comparação par a par entre as variáveis, considerando assim as diferentes atuações de cada variável em relação às questões ambientais estudadas (Oliveira et al., 2009).

Esses estudos baseiam-se no princípio de que a natureza apresenta uma função intrínseca em relação as suas componentes físico-ambientais, método proposto por Ross (1994) para compreender a dinâmica de funcionamento do ambiente natural com ou sem as intervenções humanas, fundamentado pelo conceito de Unidade Ecodinâmica prescrito por Tricart (1977). Dessa forma, esses fundamentos consolidam o método, qualificando um processo capaz de subsidiar o planejamento ambiental.

O mapeamento de sensibilidade ambiental consiste na avaliação e verificação de uma determinada superfície com base nas suas características físico-ambientais, observando seus potenciais e limitações ao uso. Com a elaboração de uma base de dados de indicadores ambientais, torna-se possível um planejamento mais adequado ao desenvolvimento de atividades econômicas, bem como atividades de preservação e conservação ambiental.

Na presente pesquisa, utilizou-se o conceito de bacia hidrográfica como área de estudo. A bacia hidrográfica vem sendo amplamente utilizada como unidade territorial de planejamento por várias ciências, não apenas nas questões dos recursos hídricos, mas também em pesquisas que envolvem as interações dos elementos que a caracterizam (Costa et al., 2016).

A área de estudo está situada na RH-VIII, um importante manancial localizado na faixa costeira central-norte do Estado do Rio de Janeiro que além de abastecer toda região, seus recursos atendem boa parte das demandas hídricas das indústrias instaladas no local (Pinheiro, 2008; Benassuly, 2009).

O histórico do processo de degradação ambiental da RH-VIII é registrado desde o período colonial, e se considerarmos a tendência de desenvolvimento regional, a problemática tende a se agravar. No entanto, é constatado que na bacia há importantes remanescentes de Mata Atlântica a serem preservados, o que corrobora com a ideia de um planejamento territorial levando em consideração as questões ambientais (CBH Macaé/Ostras, 2012).

O mapeamento é um subsídio para organização da comunidade regional, gestão integrada das águas na unidade de gerenciamento de recursos hídricos RH-VIII e pode ser utilizado na promoção de políticas públicas de desenvolvimento local e regional.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

A área de estudo localiza-se na faixa costeira central-norte do Estado do Rio de Janeiro e situa-se entre dois polos de desenvolvimento: ao sul, o turístico-comercial e ao norte, o petrolífero-canavieiro. Compõe-se por um conjunto de bacias hidrográficas, a saber: bacia do Rio Macaé, bacia do Rio das Ostras e a bacia da Lagoa de Imboassica, drenando uma área aproximada de 2.013 km² (CBH Macaé/Ostras, 2012). Limita-se pelas coordenadas geográficas dos paralelos de latitude sul 22°07' e 22°33' e os meridianos de longitude oeste 41°38' e 42°35' em Datum Sirgas 2000 (Figura 1).

Devido a sua localização, a área apresenta uma diversidade de ambientes contando com uma porção serrana, no limite oeste - noroeste, passando por montanhas, morrotes, morros, colinas, planícies até os cordões litorâneos, no sentido sul - nordeste (Benassuly, 2009). De acordo com Marçal e Luz (2003), a região é constituída pelas seguintes unidades geomorfológicas: escarpas serranas, maciços costeiros e superfícies aplainadas do litoral leste

fluminense, planície aluvial, planície fluvio-

lagunar e planície costeira.

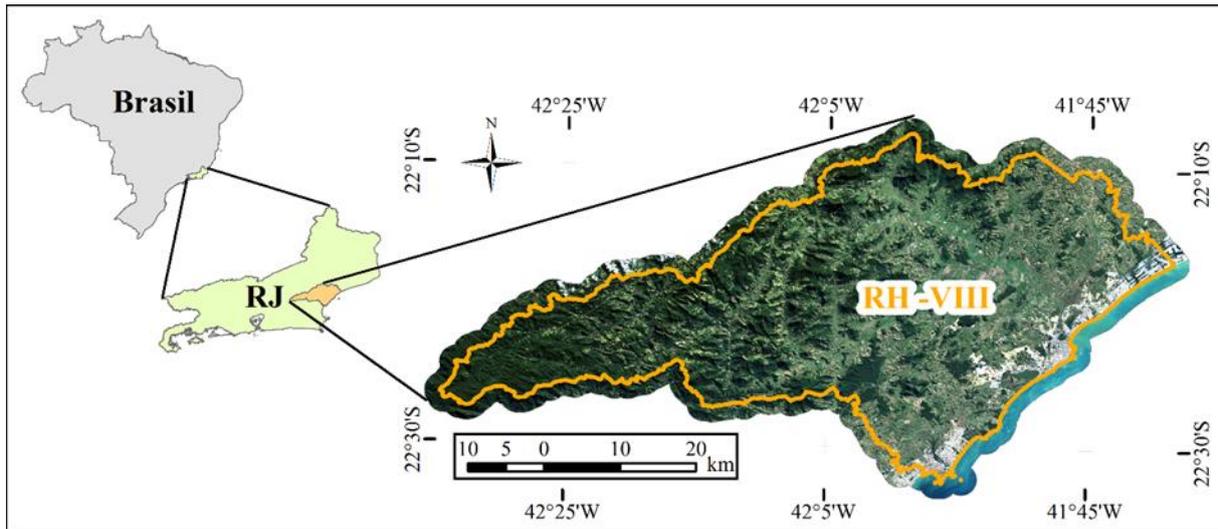


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Autores (2017).

A partir do avanço econômico no final dos anos 70, impulsionado pela indústria do petróleo que elegeu a cidade Macaé como base de apoio às atividades desenvolvidas na Bacia de Campos, houve uma transformação expressiva na paisagem da região, devido ao uso desordenado das terras provocado pelo crescimento populacional acelerado (Mote et al., 2006; Silva et al., 2012).

Quanto aos elementos ambientais, o destaque fica por conta da ocorrência de relevantes fragmentos de Mata Atlântica, em sua maior parte localizada na região serrana sob influência da Serra do Mar. E embora o processo de ocupação humana seja predominante na porção litorânea, ainda há remanescentes de manguezais e restingas na região. Entretanto apenas uma parte dessas áreas estão sob um regime de proteção pelos órgãos públicos, possibilitando o uso inconsequente devido à pressão do desenvolvimento a qualquer custo (Silva, 2015).

Material

Os materiais utilizados nessa pesquisa foram:

- Imagens orbitais RapidEye – Resolução espacial 5 m, Bandas: 1,2,3,5; Cenas: 2328725, 2328726, 2328727, 2328825, 2328826, 2328827, 2428702, 2428703, 2428802, 2428803 (disponibilizadas pelo Laboratório de Geomática do Instituto Federal Fluminense-IFF, licença acadêmica);
- Modelo Digital de Elevação (MDE) – Cenas: 27164se, 27172se, 27172so, 27173ne, 27173no, 27173se, 27173so, 27174ne, 27174no, 27174se, 27174so,

27181se, 27181so, 27181no, 27182so, 27183ne, 27183no, 27183se, 27183so, 27184no, 27472ne, 27481no (disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE);

- Base Cartográfica em formato Shapefile de UC – dados vetoriais das Unidades de Conservação (disponibilizados pelos órgãos públicos gestores);
- Base Cartográfica em formato Shapefile de RL – dados vetoriais das Reservas Legais propostas no Cadastro Ambiental Rural-CAR (disponibilizados pelo Sistema de Cadastro Ambiental Rural-SICAR);
- Base Cartográfica em formato Shapefile de Hidrografia – dados vetoriais da Rede Hidrográfica da área de estudo (disponibilizados pelo CBH Macaé Ostras);
- Software Spring versão 5.5.0 – SIG com funções de processamento de imagens (software de uso livre);
- Software QGIS versão 2.18.6-Las Palmas – SIG com módulo de extensão de AMC-Easy AHP (software de uso livre); e,
- Computador Laptop – Processador Intel i7 Quad Core 1,80 GHz, SSD 250 GB, Memória RAM 8,0 GB, Interface Gráfica NVIDIA GT 740M 2,0 GB (uso pessoal).

Procedimentos metodológicos

Para o desenvolvimento do estudo, inicialmente, realizou-se uma pesquisa de modo a

identificar as classes temáticas que contribuem para o mapeamento de sensibilidade ambiental ao desenvolvimento de atividades econômicas, a saber: uso das terras, unidades de conservação e restrições legais.

As classes temáticas constituíram uma base de dados que foi utilizada para a implementar um sistema de AMC fundamentado em matriz de comparação pareada AHP. Na Figura 2 apresenta-se o fluxograma dos procedimentos metodológicos do estudo.

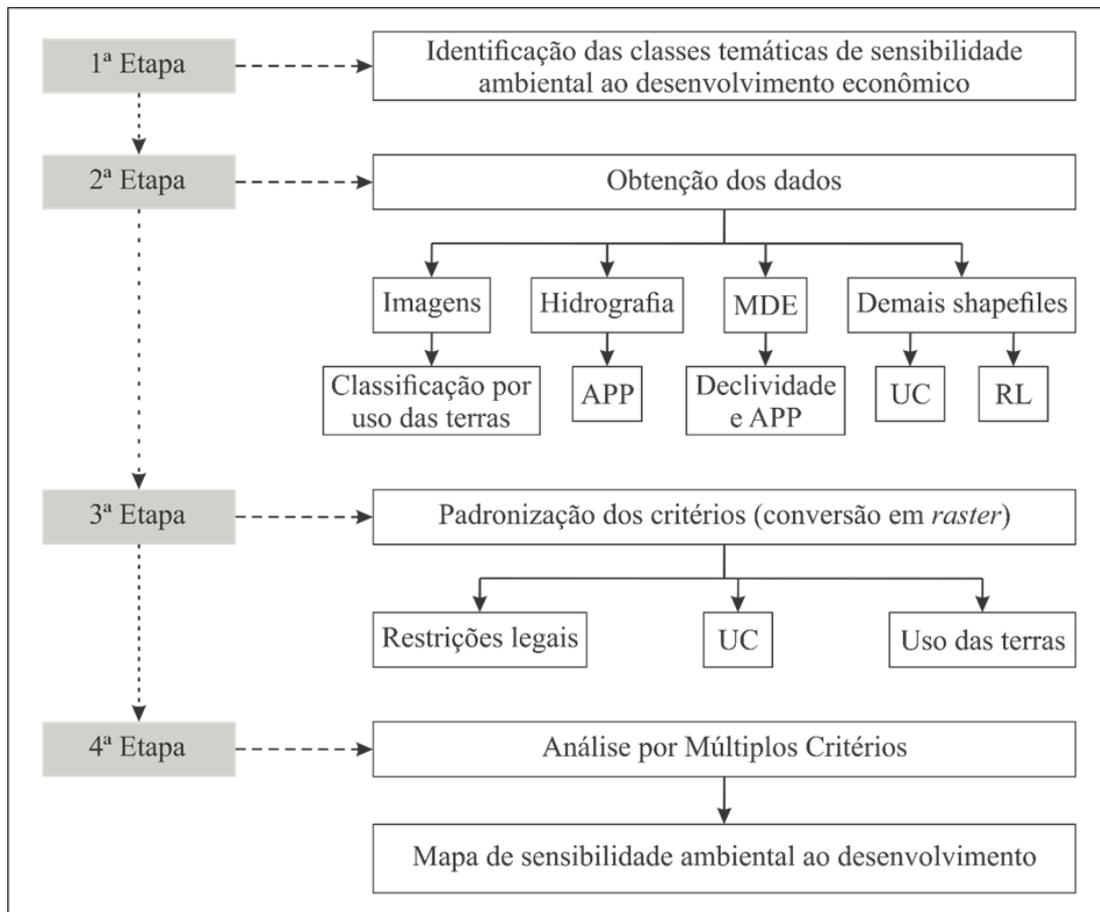


Figura 2. Fluxograma metodológico. Fonte: Autores (2017).

O processo de AMC é conhecido pela qualificação dos fatores (unidades que indicam algum grau de aptidão ou uma limitação relativa para os objetivos propostos inicialmente) e restrições (unidades que possuem uma limitação absoluta de espaços específicos) (Arend et al., 2011). Existem diversos dispositivos legais que restringem o uso de algumas áreas. Porém, não são limitações absolutas podendo ocorrer algum tipo de atividade ou até mesmo a possibilidade de outro dispositivo anular as restrições para atender os interesses da sociedade (Peruzzo et al., 2009). Portanto, nesse estudo, as classes temáticas serão tratadas somente como fatores para efeitos de avaliação.

Mapa de uso das terras

Para o mapeamento e a caracterização dos elementos que compõem a área de estudo em unidades foram utilizadas imagens do sistema RapidEye com resolução espacial de cinco

metros, sensoriadas no período de 03/03/2014 a 06/08/2014 (não foram disponibilizadas imagens mais recentes até o momento). As unidades utilizadas para classificação de uso das terras foram: área florestal, silvicultura, pastagem, águas, alagado, manguezal arbóreo, restinga, solo exposto, áreas urbanizadas, estradas, afloramento rochoso e sombras, tendo como base o manual técnico de mapeamento de uso das terras do IBGE (IBGE, 2013).

A escolha pelo sistema de sensores RapidEye foi motivada pela sua boa resolução espacial e as capacidades multiespectrais que viabilizam o processo de classificação digital (Guimarães, 2013). As imagens RapidEye foram cedidas pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) por meio de uma concessão de uso aos órgãos públicos e entidades de ensino e pesquisa. As características das imagens de satélite RapidEye estão no Quadro 1.

Quadro 1. Caracterização do sistema RapidEye.

Atributo	Descrição
Tipo do sensor	Multiespectral (pushbroom imager)
Bandas espectrais	5 (Red, Green, Blue, Red-Edge, Near IR)
Resolução temporal	Diariamente (off-nadir); 5,5 dias (nadir)
Resolução espacial	6,5 m (nadir)
Tamanho do pixel	5,0 m (imagem ortorretificada)
Resolução espectral	Banda 1 – Blue – 440-510 nm
	Banda 2 – Green – 520-590 nm
	Banda 3 – Red – 630-685 nm
	Banda 4 – Red-Edge – 690-730 nm
	Banda 5 – Near-IR – 760-850 nm
Resolução radiométrica	12 bits (4096 níveis de cinza)
Capacidade de coleta	4,5 milhões de km ² /dia

Fonte: Adaptado de Embrapa (2013).

Como recurso de software, foi utilizado o Spring versão 5.5.0, software de SIG desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) com funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais (INPE, 2017a).

As imagens adquiridas foram importadas para o ambiente Spring efetuando um recorte para a área de estudo – RH-VIII acrescida a um buffer

de 2,0 km, proposta produzida pelo entendimento de que o entorno poderá influenciar na etapa de AMC. Para as cenas com a mesma data de coleta de dados foi realizado um mosaico no intuito de otimizar o processo de classificação digital. Foram utilizadas as bandas 2, 3 e 5 com suas respectivas associações ao sistema Red, Green e Blue: 3R-5G-2B. Estas cenas estão representadas na Figura 3.

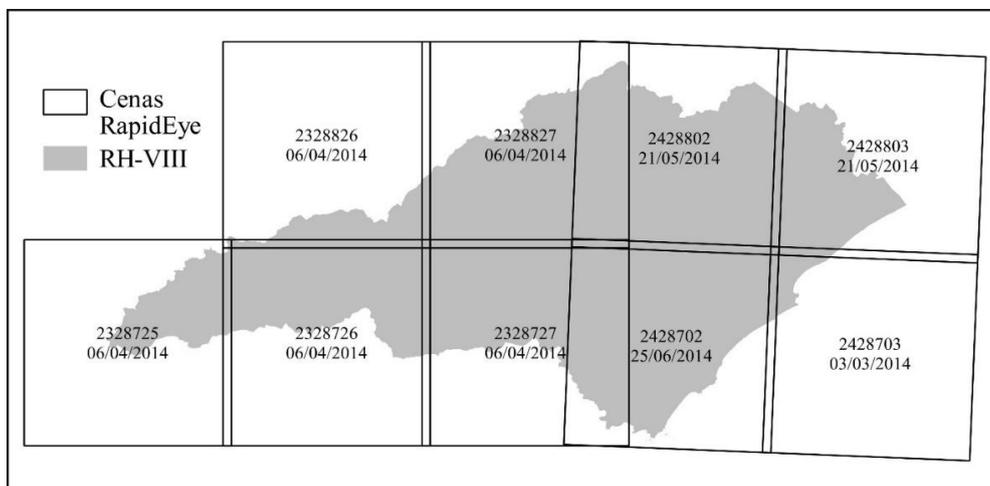


Figura 3. Representação das cenas utilizadas. Fonte: Autores (2017).

Para o mapeamento do meio físico foi necessário o pré-processamento das imagens de satélite para correções e equalizações. Foram feitas as correções geométricas (georreferenciamento e ortorretificação das imagens) e radiométricas (eliminação de ruídos e correção atmosférica), conforme procedimentos metodológicos de Costa et al. (2016).

Embora as imagens RapidEye sejam fornecidas georreferenciadas, ou seja, com

referência geográfica, uma correção é necessária por conta de eventuais deslocamentos entre cenas coletadas em datas distintas, exemplo demonstrado na Figura 4. Por isso, foi realizado o registro das imagens, conceituado como o processo que envolve a superposição de uma cena representada em duas ou mais imagens (cenas diferentes ou datas diferentes), tal que os pontos correspondentes nessas imagens coincidam espacialmente (Meneses e Almeida, 2012).



Figura 4. Demonstração do deslocamento entre cenas de datas diferentes. Fonte: Autores (2017).

Para a correção atmosférica, foi utilizado o método proposto por Antunes et al. (2014), que é uma adaptação para as imagens RapidEye do modelo de transferência radioativa utilizando o 6S (Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum). A correção é efetivada a partir dos seguintes parâmetros: i) tipo de modelo de atmosfera gasosa (espalhamento Rayleigh); ii) tipo de modelo de aerossóis (espalhamento Mie); e iii) visibilidade horizontal (concentração de aerossóis, em km).

Após o pré-processamento das imagens, foi executada a técnica de realce de contraste, a fim de melhorar a qualidade da imagem, com opção de equalizar o histograma. O processo modifica, através de funções matemáticas, os valores digitais da imagem alterando a amplitude de registro de informações, de modo a destacar determinada faixa espectral e melhorar a qualidade visual da imagem (Silva et al., 2009).

Após a aplicação da técnica de realce de contraste, foi salva uma imagem sintética com a composição 3R-5G-2B a fim de auxiliar posteriormente na fotointerpretação. A Fotointerpretação pode ser definida como a arte de examinar as imagens e deduzir a sua significação (Silva et al., 2009).

Para a classificação das imagens, optou-se pelo método supervisionado pixel-a-pixel utilizando o algoritmo classificador baseado por máxima verossimilhança (MaxVer). A utilização do método MaxVer em imagens RapidEye desenvolve um ótimo desempenho para classificação de imagens para o mapeamento temático de uso das terras (Demarchi et al., 2011; Caatani et al., 2013).

Dos métodos disponíveis para extração de informações da cobertura superficial da terra a partir dos produtos de sensoriamento remoto, o algoritmo de classificação supervisionado por

MaxVer continua a ser o algoritmo de classificação paramétrica mais utilizado pelos profissionais (Jensen, 2011).

O algoritmo MaxVer é baseado na ponderação das distâncias entre as médias dos níveis digitais das classes utilizando-se de parâmetros estatísticos. A técnica utiliza-se das informações de assinatura espectral de cada pixel isolado para identificar semelhanças entre as regiões homogêneas, traçando assim uma probabilidade de um determinado pixel analisado pertencer ou não a uma determinada classe (INPE, 2017b).

O MaxVer requer um conhecimento prévio da área de estudo para que sejam coletados pontos amostrais dos elementos de uso das terras a serem identificados na classificação automática (Guimarães, 2013). Sendo assim, no dia 26/05/2017, realizou-se uma visita na área de estudo para identificar as classes de uso e cobertura e também coletar pontos amostrais presentes na região.

O algoritmo MaxVer foi executado nas imagens realçadas de acordo com um conjunto de amostras obtidas no treinamento. Nesse tipo de classificação, o operador define o número de classes de acordo com o conhecimento da área. Portanto, a classificação através do MaxVer é realizada em duas etapas:

- a) Treinamento – onde são selecionadas amostras em áreas representativas de cada tipo de uso das terras. As amostras de cada classe foram selecionadas para treinamento com base na coleta de pontos amostrais da visita de campo e na fotointerpretação das imagens sintéticas. Ainda nesta etapa é realizada uma análise das amostras com base no histograma (comparação

da verdade terrestre com a classificação produzida a partir da matriz de confusão demonstrada na Tabela 1).

- b) Classificação – nesta etapa foi executado o algoritmo classificador MaxVer-ICM com limiar de aceitação de 99,9% onde foi calculada a probabilidade de um dado pixel pertencer a cada classe fornecida ao sistema na fase de

treinamento por exibir características comuns. O pixel é então associado à classe com maior probabilidade de pertencer.

A partir da matriz de confusão é possível qualificar a classificação da imagem pelo desempenho geral das amostras que foi de 95% de exatidão global, juntamente com o índice Kappa que foi calculado em 0,93 e de acordo com Landis e Koch (1977) representa uma classificação de excelente qualidade.

Tabela 1. Matriz de confusão das amostras produzidas.

Classes	Área florestal	Silvicultura	Pastagem	Águas	Solo exposto	Áreas urbanizadas	Afloramento rochoso	Estradas	Alagado
Área florestal	30152	2578	674	0	0	0	0	0	0
Silvicultura	561	1841	19	0	0	0	0	0	0
Pastagem	256	154	28228	0	0	0	364	38	325
Águas	13	0	0	33269	1	153	0	6	13
Solo exposto	0	0	1	0	5188	160	0	0	51
Áreas urbanizadas	0	0	2	0	48	2033	0	33	4
Afloramento rochoso	0	0	1	122	0	0	317	6	12
Estradas	0	0	0	84	0	190	0	138	0
Alagado	0	0	0	0	59	171	20	89	20315

Fonte: Autores (2017).

A pós-classificação de uma imagem classificada é um procedimento que tem por objetivo uniformizar os temas, ou seja, eliminar pontos isolados, classificados diferentemente de sua vizinhança (Santos et al., 2010). Realizou-se esse procedimento no intuito de gerar uma imagem com aparência menos ruidosa.

Após os resultados da pós-classificação, executou-se o mapeamento das classes de modo a quantificar o uso das terras. Esse procedimento é tipificado pela vetorização de cada uma das classes, sendo realizado na tarefa “Mapeamento” no próprio módulo “Classificação” do software Spring. Os arquivos vetoriais das classes de uso das terras foram migrados para o ambiente do software QGIS 2.18.6 para elaboração do mapa temático final.

Análise por Múltiplos Critérios – AMC

Para elaboração do mapa de sensibilidade ambiental ao desenvolvimento econômico foram analisados, simultaneamente, os fatores que de alguma forma limitam ou contribuem para o desenvolvimento de atividades econômicas. Estes fatores, serviram como dados de entrada para o módulo EASY AHP do software QGIS.

Para o estudo de sensibilidade ambiental, por meio de mapeamento, o método AHP possibilita a determinação do grau de importância das variáveis escolhidas através da comparação em pares, ou seja, avalia-se uma variável em relação à outra (Pinese Júnior e Rodrigues, 2012).

Após a definição temática e a seleção das classes a serem utilizadas no método, é necessário a determinação de importância relativa entre critérios. Para isso, utiliza-se a escala de pesos definida por Saaty (1977), o que pode ser observada no Quadro 2.

Quadro 2. Escala de comparadores de importância relativa.

Valores	Importância Mútua
1/9	Extremamente menos importantes que
1/7	Muito fortemente menos importante que
1/5	Fortemente menos importante que
1/3	Moderadamente menos importante que
1	Igualmente importante a
3	Moderadamente mais importante que
5	Fortemente mais importante que
7	Muito fortemente mais importante que
9	Extremamente mais importante que

Fonte: Adaptado de Saaty (1977).

Em virtude das classes e unidades naturais dos fatores utilizados nas rotinas de AMC serem diferentes, faz-se necessária a padronização desses fatores (Arend et al., 2011). Dessa forma foi definido que cada componente das classes fosse escalonado no intervalo de valor 0 a 1,0 de acordo

com o método geossistêmico. Quanto mais próximo do valor 0 (zero), menor será a contribuição à sensibilidade ambiental, e quanto mais próximo de 1,0 (um) maior será sua contribuição à sensibilidade ambiental, como demonstrado na Figura 05.

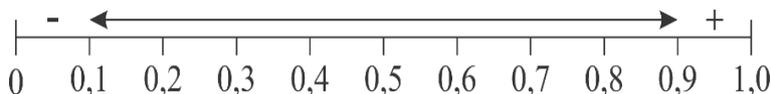


Figura 5. Representação gráfica da escala de sensibilidade ambiental. Fonte: Adaptado de Paula (2008).

Para o desempenho da AMC em ambiente SIG, é necessário que os dados espaciais estejam em formato raster (matricial). No processo de rasterização é possível fazer a classificação dos

pixels de acordo com a escala de sensibilidade ambiental. Na Tabela 2, exibe-se os valores de sensibilidade de cada unidade das classes temáticas.

Tabela 2. Valores atribuídos as unidades mapeadas da RH-VIII.

Componente Ambiental	Classes	Valores
Uso das terras	Área florestal	0,9
	Silvicultura	0,5
	Pastagem	0,4
	Restinga	1,0
	Manguezal arbóreo	1,0
	Águas	1,0
	Alagado	0,3
	Solo exposto	0,2
	Áreas urbanizadas	0,1
	Estradas	0,1
Unidades de conservação	Afloramento rochoso	0,8
	Proteção integral	1,0
	Uso sustentável	0,6
Restrições legais	APP	0,9
	Uso restrito	0,5
	Reserva legal	0,9

Fonte: Autores (2017).

Quanto à ponderação dos fatores, pode-se dizer que eles são comparados par a par para

determinação de uma importância relativa e regulados por uma compensação entre eles. Dessa

forma constrói-se a Matriz de Comparação Pareada (MCP), apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Matriz de comparação pareada.

Matriz de pesos	Uso das terras	UC	Restrições legais
Uso das terras	1	3	4
UC	1/3	1	2
Restrições legais	1/4	1/2	1

Fonte: Autores (2017).

Após alimentar o módulo AHP com os valores da MCP é possível realizar o cálculo dos indicadores de consistência do modelo AHP. No estudo foram obtidos os seguintes resultados: o valor resultante em λ (3,017), recomenda-se que fique próximo do número de fatores (3 variáveis); o valor de IC (Índice de Consistência) igual a 0,008, este deve estar o mais próximo possível de zero; e a RC (Razão de Consistência) igual a 0,014, este indicador deve ser inferior a 0,10.

Ressalta-se que os valores atendem à recomendação da metodologia Saaty (1977) para que a matriz seja considerada consistente.

A comparação pareada dos componentes ambientais possibilitou a construção da Tabela 4, que exhibe os valores dos pesos de cada componente, ou seja, quanto cada componente contribui para a sensibilidade ambiental da RH-VIII. O cálculo dos pesos foi realizado no módulo EASY AHP do QGIS.

Tabela 4. Peso das classes temáticas.

Classes	Pesos de compensação
Uso das terras	0,623
UC	0,239
Restrições legais	0,137

Fonte: Autores (2017).

A execução da rotina de AHP é finalizada pelo método de combinação linear ponderada, onde os fatores reescalados são agregados após serem multiplicados por seu peso correspondente; em seguida, somados e o resultado dessa soma, dividido pelo número de fatores. A combinação ponderada é calculada para cada pixel na imagem permitindo a compensação entre os fatores (Caxieta et al., 2012).

O resultado foi uma superfície de decisão que variou seus valores de sensibilidade ambiental entre 0,09 e 0,98. A superfície de decisão pode ser fragmentada de acordo com o objetivo do estudo, e após alguns testes, foi definido uma fragmentação em cinco classes para a superfície de decisão da RH-VIII, representadas na Tabela 5.

Tabela 5. Classes de fragmentação.

Classes	Intervalo
Fracamente sensível	de 0,09 até 0,2
Levemente sensível	acima de 0,2 até 0,4
Moderadamente sensível	acima de 0,4 até 0,6
Fortemente sensível	acima de 0,6 até 0,8
Extremamente sensível	acima de 0,8 até 0,98

Fonte: Autores (2017).

Resultados e discussão

Com os dados iniciais coletados, produziu-se os mapas preliminares que caracterizam a área de estudo, estruturando uma base de informações com indicações das potencialidades e restrições ao desenvolvimento econômico da RH-VIII.

Quanto ao uso das terras na RH-VIII, ainda há um predomínio das atividades Barros Junior, W.W.; Silva, J.A.F.

agropecuárias, apesar do desenvolvimento intenso das atividades da indústria de petróleo nas últimas décadas. O aspecto atual da região é um reflexo das transições históricas dos ciclos de ocupação e exploração da região, desde a introdução dos plantios da cana de açúcar, do café e da banana, da pecuária extensiva de corte, até mais recentemente, a expansão das áreas urbanas com a

introdução da indústria do Petróleo e do turismo (CBH Macaé/Ostras, 2012).

As restrições legais são unidades onde as limitações podem inviabilizar ou apresentar algum tipo risco ao desenvolvimento, sendo regida por instrumentos legais. Apenas uma pequena porção é coberta por UC na RH-VIII, concentrando-se na

região serrana, o que contribui consideravelmente para preservação nas áreas de incidência.

A partir de uma análise dos mapas preliminares relativos aos critérios, é possível extrair informações pertinentes à distribuição bem como a área de incidência de cada unidade que está sendo analisada, demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6. Representação da incidência de cada unidade.

Critério de análise	Unidades	Área ocupada (%)
Uso das terras	Área florestal	44,97
	Silvicultura	0,22
	Pastagem	46,19
	Restinga	0,58
	Manguezal arbóreo	0,10
	Águas	1,03
	Alagado	1,43
	Solo exposto	0,91
	Áreas urbanizadas	3,29
	Estradas	0,61
	Afloramento rochoso	0,46
	Sem representação	0,21
	UC	Proteção integral
Uso sustentável		24,58
Sem representação		71,50
Restrições legais	APP	9,44
	Uso restrito	23,15
	Reserva legal	9,09
	Sem representação	58,32

Fonte: Autores (2017).

Com as técnicas de análise e cruzamento de dados em geoprocessamento, torna-se possível a obtenção de um novo mapa, o de sensibilidade ambiental visando o desenvolvimento regional, obtido através da interpolação dos seguintes critérios: uso das terras, unidades de conservação e restrições legais.

Antes da geração do mapa de sensibilidade ambiental ao desenvolvimento econômico pelo método AMC, foi necessária uma caracterização das unidades mapeadas com o intuito de modelar os dados num padrão favorável ao processamento via AHP. Tendo como

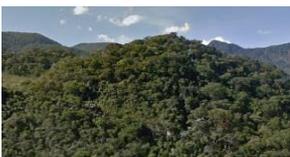
resultado um mapeamento em conformidade com os objetivos propostos.

Caracterização das unidades para padronização dos dados

A padronização dos dados preliminares em mapas de formato numérico teve como base as informações contidas na caracterização das unidades mapeadas, sendo essas unidades adotadas como fatores. Portanto, a descrição de cada unidade foi orientada de acordo com a sua sensibilidade ao desenvolvimento, proporcionando coerência aos valores atribuídos. O que pode ser observado no Quadro 3.

Quadro 3. Chave de caracterização das unidades mapeadas.

(continua)

Tipologia	Descrição	Fotografia ilustrativa
Área florestal	Área sob cobertura vegetal natural, representada por uma floresta homogênea ou até mesmo por fragmentos de médio porte. Suas características favorecem o funcionamento ideal dos ecossistemas.	
Silvicultura	Área cuja vegetação caracteriza-se por uma espécie predominante, as vezes classificada erroneamente como reflorestamento. Nessa classe foram identificadas também algumas culturas agrícolas.	
Pastagem	Área de cobertura vegetal predominantemente rasteira, usada exclusivamente para pecuária. A atividade representa uma alta degradação. Porém, é possível a recuperação ambiental de suas áreas.	
Restinga	Área situada em terrenos predominantemente arenosos, de origens marinha, fluvial ou lagunar, compreendendo comunidades vegetais que formam um complexo vegetacional edáfico e pioneiro.	
Manguezal arbóreo	Área que ocorre na transição entre a terra e o mar, formando um ecossistema costeiro que apresenta condições ideais para reprodução e desenvolvimento de várias espécies, dentre outras importantes funções ambientais.	
Águas	Unidades de representação dos reservatórios e cursos de água superficiais. O desenvolvimento sob essas áreas é bastante restrito; porém, o recurso natural pode ser captado para atender as demandas humanas.	
Alagado	Área de topografia plana, encharcada, localizada nas regiões de cabeceira ou em zonas de transbordamento de rio. O solo se apresenta sob baixa estabilidade e é impróprio para o desenvolvimento.	
Solo exposto	Área ausente de cobertura vegetal cuja exposição está sujeita à erosão e ao enfraquecimento do solo. Nessa classe, foram identificadas também as estradas não pavimentadas.	
Áreas urbanizadas	Áreas classificadas como “uso consolidado”. A reversão do impacto é problemática devido às questões sociais. Nesse caso, têm baixíssimas limitações quanto ao desenvolvimento.	
Estradas	Assim como a ocupação urbana, são áreas classificadas como “uso consolidado”. Considerada por muitos autores, como o principal vetor de contribuição para o desenvolvimento.	

Tipologia	Descrição	Fotografia ilustrativa
Afloramento rochoso	Área de baixa aptidão ao uso onde a camada rochosa se apresenta exposta na superfície. Em alguns casos, é permitido o uso direto do recurso natural. Porém, apresenta como uma atividade de significativo impacto ambiental.	
Unidades de Conservação de Uso Sustentável	Áreas que visam conciliar a conservação da natureza com o uso sustentável dos recursos naturais. O uso direto dos recursos naturais é permitido, desde que sejam garantidos a perenidade dos recursos ambientais.	
Unidades de Conservação de Proteção Integral	São unidades com regras e normas mais restritivas, pois o principal objetivo dessas unidades é a proteção da natureza. Nesse grupo é permitido apenas o uso indireto dos recursos naturais.	
APP (Área de Preservação Permanente)	Área que apresenta risco quanto ao uso. Quando protegida, exerce importantes funções ambientais. Seu uso está condicionado: à utilidade pública, ao interesse social ou à atividade baixo impacto ambiental.	
Áreas de uso restrito	Áreas de inclinação entre 25° a 45°, onde é permitido apenas o manejo sustentável e o exercício de atividades agrossilvipastoris. Os demais usos estão condicionados: à utilidade pública e interesse social.	
Reserva Legal	Área localizada no interior das propriedades rurais com objetivo de promover a conservação da biodiversidade. Nela é permitido o uso econômico de modo sustentável dos recursos naturais	

Fonte: Autores (2017).

A partir da caracterização das unidades frente às questões ambientais, foi possível atribuir valores de sensibilidade para cada fator (unidade) em relação ao desenvolvimento das atividades econômicas. Esta etapa assume uma função preponderante para alcançar os objetivos propostos, visto que esses valores serão utilizados no algoritmo de AMC e irão assumir o papel de indicadores de sensibilidade ambiental para cada unidade mapeada.

Mapa de sensibilidade ambiental

Para finalização do método proposto, realizou-se o cruzamento dos três mapeamentos preliminares contendo os fatores de sensibilidade ambiental. São eles: uso das terras, restrições legais e unidades de conservação. Nesse processo foi utilizado a ferramenta EASY AHP, um módulo de extensão ao software QGIS

desenvolvido para aplicação em estudos de abordagem de AMC em ambiente de SIG.

Esse procedimento em aplicativos de SIG caracteriza-se pela sobreposição dos mapas de fatores, permitindo a realização de operações matemáticas célula a célula ou pixel a pixel de acordo com a padronização das unidades e ponderação dos critérios feitas pelo usuário, tendo como produto um mapa de superfície contendo os resultados das operações matemáticas para cada célula ou pixel.

O mapa resultante apresentou valores entre 0,09 e 0,98, sendo que quanto mais próximo de zero menor é sensibilidade ambiental para desenvolvimento de atividades econômicas. Para uma melhor apresentação e quantificação do mapa final, a superfície foi fragmentada em cinco classes. O mapa final pode ser visualizado na Figura 6.

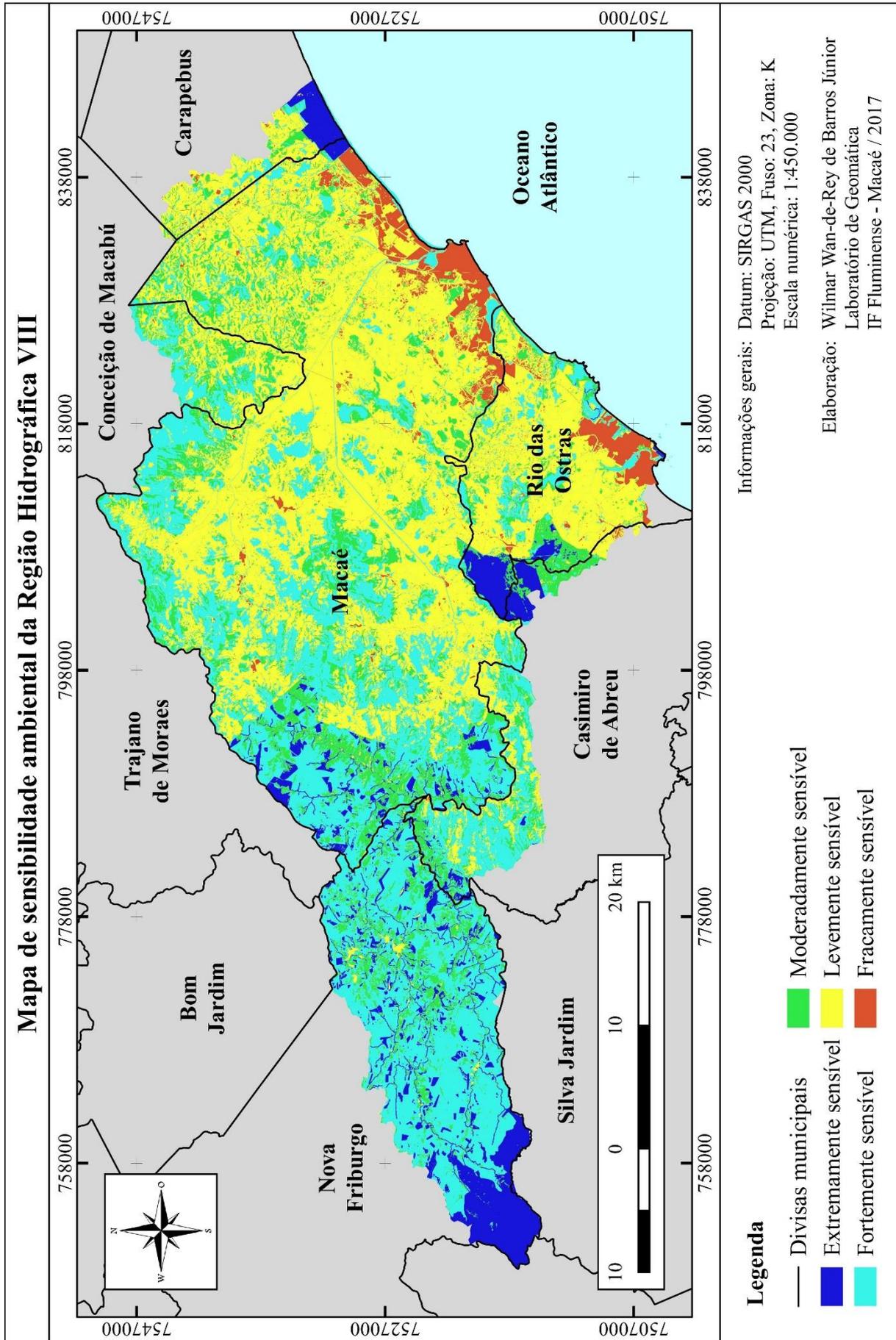


Figura 6. Mapa de sensibilidade ambiental da Região Hidrográfica VIII. Fonte: Autores (2017).

O mapa de sensibilidade ambiental apresenta diferentes potenciais ao desenvolvimento de atividades econômicas na RH-VIII. Um trabalho baseado em levantamento das características físico-ambientais para

apresentar diferentes níveis de vulnerabilidade à dinâmica geoambiental, considerado um produto de suporte na tomada de decisão. A quantificação das classes é exposta na Tabela 7.

Tabela 7. Quantificação das classes de sensibilidade ambiental.

Classes	Área (ha)	Área (km ²)	Representação (%)
Fracamente sensível	7.654,06	76,54	3,80
Levemente sensível	85.179,98	851,79	42,29
Moderadamente sensível	33.636,77	336,36	16,70
Fortemente sensível	61.176,57	611,76	30,37
Extremamente sensível	13.789,54	137,89	6,84
Total	201.436,92	2.014,36	100,00

Fonte: Autores (2017).

As áreas classificadas como “Fracamente sensível” são as que apresentam, em geral, baixas limitações quanto ao desenvolvimento. São áreas onde já se efetuou um desenvolvimento significativo. Caracteriza-se pelo uso antrópico consolidado (ocupação urbana e estradas) e sem a presença de restrições ambientais e ou unidades de conservação. Em alguns pontos isolados, essa classificação ocorreu em consequência das imagens utilizadas na etapa de mapeamento apresentarem algumas irregularidades que dificultaram tratamento, como a presença de nuvens.

A região indicada como “Levemente sensível” é a de maior expressividade no mapa (42,29%). Representa as áreas de uso intensivo das terras; porém, de baixa contribuição para consolidar o uso, e a sua qualificação é devido à inexistência de restrições ambientais e unidades de conservação em sua extensão.

A classe “Moderadamente sensível” representa as áreas localizadas sob alguma restrição ambiental e ou UC. Entretanto, houve uma alteração do ambiente por conta do uso antrópico de média intensidade. Permitindo ações de recuperação ambiental, dando retorno as características naturais, estruturais e funcionais próximas ao que era originalmente.

As áreas classificadas como “Fortemente sensível” representam as áreas onde o uso antrópico não é tão expressivo ou se encontram bem próximas as características naturais, e pelo fato de ter contemplado um dos critérios de restrições legais ou UC de uso sustentável, teve sua sensibilidade ao desenvolvimento elevada.

Por fim, a classe “Extremamente sensível” representa as áreas mais inadequadas ao desenvolvimento. Sua classificação é dada em razão das áreas não apresentarem algum tipo de uso antrópico significativo e por estarem sob

algum tipo de proteção, compartilhando os critérios de UC e ou restrições legais.

Cerca de 46,09 % da área possui alguma aptidão ao desenvolvimento, onde é necessária uma avaliação quanto ao tipo de atividade para indicar o melhor posicionamento. No entanto, observou-se que na RH-VIII, de modo geral as classes mais sensíveis apresentam uma baixa ocupação urbana, admitindo um potencial a recuperação as unidades que não possui algum tipo aptidão o desenvolvimento.

Conclusões

O uso das Geotecnologias é uma aplicação indispensável nas atividades de planejamento ambiental. Entretanto, buscou-se com a pesquisa uma proposta metodológica para determinação da sensibilidade ambiental ao desenvolvimento auxiliada pelo método AHP. Estudos dessa natureza expõem uma aplicação capaz de conciliar desenvolvimento econômico tendo a perspectiva da gestão ambiental.

Nos resultados expostos foi constatado que a RH-VIII possui 46,09% da sua superfície apresentando baixa sensibilidade ambiental, devido à inexistência de UC e restrições legais ao uso dessas áreas. Na região de maior sensibilidade o uso antrópico é de baixa intensidade, o que viabiliza a recuperação das áreas sob alguma limitação ambiental, representada por 16,70% da área total estudada.

É pertinente destacar que produto final desse estudo reproduz a interpretação dos autores, na padronização dos critérios e na construção da matriz de comparação pareada. Em trabalhos que dão suporte à tomada de decisão é fundamental que o produto apresente imparcialidade nos resultados, sendo assim, necessário a consulta de especialistas multidisciplinares, bem como consideração novos critérios.

Por fim, com o desenvolvimento da pesquisa foi possível gerar um mapeamento capaz de demonstrar a sensibilidade ambiental da RH-VIII, fornecendo aos gestores e profissionais da área, subsídios ao planejamento ambiental.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense (IFFluminense) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPEA), pelo apoio institucional.

Referencias

- Antunes, M.A.H., Debiassi, P., Siqueira, J.C.S., 2014. Avaliação espectral e geométrica das imagens RapidEye e seu potencial para o mapeamento e monitoramento agrícola e ambiental. *Revista Brasileira de Cartografia* 66, 101-113.
- Arend, M.R., Schultz, G., Eckhardt, R.R., Rempel, C., Goldmeyer, F., 2011. Múltiplos Critérios de Apoio à Decisão em SIG para a Promoção de Sistemas Orgânicos de Produção Agropecuária no Município de Arroio do Meio - RS. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto* 15, 423-430.
- Barbosa, M.E.F., Furrier, M., Lima, E.R.V., 2013. Mapeamento de adequação de uso das terras através da técnica de análise de multicritério em ambiente SIG: estudo de caso do município de conde - PB, Brasil. *Cuadernos de Geografía* 22, 13-23.
- Benassuly, C.C.L., 2009. Avaliação de redes de monitoramento de recursos hídricos: estudo aplicado às águas superficiais na bacia do Rio Macaé. *Dissertação (Mestrado)*. Campos dos Goytacazes, IFFluminense.
- Biziak, L.D., 2017. Sustentabilidade Urbana: avaliação da qualidade ambiental do setor central de Uberlândia-MG. *Dissertação (Mestrado)*. Uberlândia, UFU.
- Caxieta, P.R.C., Pimenta, D.F.N., Amaral, R.V., Schaefer, C.E., 2012. Análise Multi-Critério (MCE) aplicada ao mapeamento de áreas susceptíveis a movimentos de massa na área urbana de Viçosa-MG. *Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação* 4, 1-9.
- Cattani, C.E.V., Mercante, E., Souza, C.H.W., Wrublack, S.C., 2013. Desempenho de algoritmos de classificação supervisionada para imagens dos satélites RapidEye. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto* 16, 8005-8010.
- CBH MACAÉ/OSTRAS - Comitê de Bacia Hidrográfica dos Rios Macaé e das Ostras, 2012. *Elaboração do plano de recursos hídricos da região hidrográfica Macaé e das Ostras: Relatório de caracterização da região hidrográfica Macaé e das Ostras*. Macaé.
- Costa, E.M., Antunes, M.A.H., Debiassi, P., Anjos, L.H.C., 2016. Processamento de imagens RapidEye no mapeamento de uso do solo em ambiente de Mar de Morros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 51, 1417-1427.
- Costa, F.R., Souza, R.F., Silva, S.M.P., 2016. Análise comparativa de metodologias aplicadas à delimitação da bacia hidrográfica do Rio Doce – RN. *Sociedade & Natureza* 28, 429-442.
- Demarchi, J.C., Sartori, A.A.C., Zimback, C.R.L., 2011. Métodos de classificação de imagens orbitais para o mapeamento do uso do solo: estudo de caso na Sub-Bacia do Córrego das Três Barras. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto* 15, 2644-2651.
- Dias, V.S.B., Silva, A.B., 2014. AHP na modelagem da vulnerabilidade ambiental do mini corredor ecológico Serra das Onças (BA). *Revista Brasileira de Cartografia* 66, 1363-1377.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2013. RapidEye. Disponível: https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_rapideye.html. Acesso: 6 mar. 2017.
- Guimarães, C.C.B., 2013. Paisagens sertanejas: Uso e cobertura das terras e adequabilidade no sertão central do Ceará. *Dissertação (Mestrado)*. Fortaleza, UFC.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013. Manual técnico de uso da terra. Disponível: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv81615.pdf>. Acesso: 15 abr. 2017.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2017a. O que é o SPRING?. Disponível: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/index.html>. Acesso: 20 abr. 2017.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2017b. Classificação de Imagens: O que é classificação?. Disponível: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/classific.html>. Acesso: 20 abr. 2017.
- Jensen, J.R., 2011. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. 2. ed. Parêntese, São José dos Campos.
- Landis, J.R., Koch, G.G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33, 159-174.
- Malczewski, J., 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science* 20, 703-726.

- Marçal, M.S., Luz, L.M., 2003. Geomorfologia aplicada a classificação de unidade de paisagem na bacia do Rio Macaé – Litoral Norte Fluminense. Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada 10, 1-6.
- Meneses, P.R., Almeida, T., 2012. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. UNB, Brasília.
- Moras Filho, L.O., 2015. Método de inferência espacial para o ordenamento territorial de municípios de pequeno porte: o caso de Ijaci, MG. Dissertação (Mestrado). Lavras, UFLA.
- Moté, F.O., Marçal, M.S., Bonatto, G., 2006. Uso e Cobertura da Terra Associado as Unidades de Relevo e Problemas Ambientais na Bacia do Rio Macaé (RJ). Simpósio Nacional de Geomorfologia 6. 1-10.
- Oliveira, P.T.S., Rodrigues, D.B.B., Alves Sobrinho, T., Panachuki, E., 2009. Processo analítico hierárquico aplicado a vulnerabilidade natural a erosão. Geociências 24, 417-424.
- Paula, E.M.S., 2008. Geotecnologias aplicada à Compartimentação Ambiental da Bacia do Rio Ceará-CE. Dissertação (Mestrado). Fortaleza, UFC.
- Pinheiro, M.R.C. 2008. Avaliação de usos preponderantes e qualidade da água como subsídios para os instrumentos de gestão dos recursos hídricos aplicada à bacia hidrográfica do Rio Macaé. Dissertação (Mestrado). Campos dos Goytacazes, IFFluminense.
- Ribeiro, A.S., Mincato, R.L., Curi, N., Kawakubo, S., 2016. Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica pelo processo analítico hierárquico. Revista Brasileira de Geografia Física 9, 16-31.
- Saaty, T.L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal Of Mathematical Psychology 15, 234-281.
- Santos, A.R., Peluzio, T.M.O., Saito, N.S., 2010. SPRING 5.1.2: passo a passo: aplicações e práticas. CAUFES, Alegre.
- Silva, G.P., 2015. Comitês de bacias hidrográficas e vocalizações sociais por recursos hídricos no Município de Macaé - Rio de Janeiro. Seminário Internacional Sobre Desenvolvimento Regional 7, 1-17.
- Silva, L.C.N., Fernandes, A.L.V., Izippato, F.J., Oliveira, W., 2009. Uso do solo no manejo de bacias hidrográficas: o caso da microbacia Córrego Prata, Três Lagoas MS. Revista Brasileira de Geografia Física 2, 1-13.
- Silva, L.F.T.C., Bezerra, J.F.R., Guerra, A.J.T., 2012. Implicações da mudança na cobertura vegetal em relação à erosão na sub-bacia hidrográfica do rio São Pedro - RJ. Geonorte 6, 1-16.
- Peruzzo, A., Peruzzo, E.M.C., Dias, C., Nacke, H., Zenatti, R. 2009. Aspectos jurídicos sobre a reserva legal e a área de preservação permanente. Seminário Internacional de Ciência, Tecnologia e Ambiente 1, 1-8.
- Pinese Júnior, J.F., Rodrigues, S.C., 2012. O método de análise hierárquica – AHP – como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Piedade (MG). Revista do Departamento de Geografia 23, 4-26.
- Ross, J.L.S., 1994. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. Departamento de Geografia 8, 63-74.
- Tricart, J., 1977. Ecodinâmica. IBGE, Rio de Janeiro.