



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

DIFERENTES CENÁRIOS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL PARA MESORREGIÃO SUL DO ESPÍRITO SANTO

Andre Dalla Bernardina Garcia

Monografia apresentada ao curso de
Introdução ao Sensoriamento Remoto –
SER 300, como requisito parcial a
aprovação no curso, sob orientação do Dr.
Antônio Miguel Vieira Monteiro.

INPE
São José dos Campos
2021

DIFERENTES CENÁRIOS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL PARA MESORREGIÃO SUL DO ESPÍRITO SANTO

RESUMO

Para realizar um bom planejamento frente a necessidade de preservação ambiental, faz-se necessário considerar os impactos do desenvolvimento sobre a fragilidade natural dada pelas características de relevo, solos, cobertura e clima da região. Para obter uma perspectiva acerca das condições de vulnerabilidade ou fragilidade do sistema/ambiente é necessário, realizar um estudo que integre os elementos que compõem o estrato geográfico e dão suporte a vida do homem, animal e plantas, os quais analisados e inter-relacionados geram como resultado um produto analítico-sintético que retrata a situação da área em estudo. Esta análise conjunta possibilita obter um diagnóstico das variadas categorias hierárquicas da fragilidade dos ambientes naturais, repercutindo na carta síntese de Fragilidade/Vulnerabilidade Ambiental. Nesse sentido, a realização do presente trabalho teve como objetivo a produção de diferentes cenários e cartas de fragilidade ambiental para a mesorregião sul Espírito-santense, utilizando três diferentes metodologias. Para realização do trabalho foi utilizado uma adaptação do “Modelo de Fragilidade Potencial Natural com apoio nas Classes de Declividade” proposto por Ross (1994). Este modelo é baseado em classes de declividade e propõe-se que as unidades de fragilidade dos ambientes naturais devem ser resultantes dos levantamentos básicos de solos, cobertura vegetal/uso do solo e clima. A partir da composição e das relações entre os quatro fatores declividade, solos, uso/cobertura e clima foi realizada uma álgebra de mapas para produção da carta de Fragilidade Potencial Natural. O Processamento de dados e execução de algoritmos foram realizados em software de Sistema de Informações Geográficas de código aberto, o Quantum GIS (QGIS), versão 3.10 La Coruña. Os métodos utilizados foram classificação por Média simples, AHP e Fuzzy Gama (0; 0,25; 0,30; 0,50; 0,60; 0,65; 0,75 e 0,90). Diante dos resultados obtidos considerou-se que a utilização dos métodos AHP e Fuzzy gama (0,5 e 0,6) tendem a gerar mapas de fragilidade menos restritivos com valores intermediários, enquanto o método de Média simples e valores de fuzzy gama acima de 0,65, produzem cartas de fragilidade mais restritivas, com maiores valores de fragilidade ambiental, para os métodos e condições aplicadas. Entretanto, a validação dos resultados por meio da obtenção de dados de campo faz-se necessária para ratificar a qualidade de informação e veracidade destes cenários.

Palavras-chave: Geoprocessamento, Fuzzy Gama, AHP.

1 INTRODUÇÃO

O Estado do Espírito Santo apresenta grandes variações em suas características ambientais dentro de curtas distâncias, bem como uma variedade de relevos, solos e climas dentro dos limites de suas mesorregiões. Como principais atividades desenvolvidas, destaca-se a agricultura e pecuária, principalmente em propriedades rurais de pequeno porte, constituintes da chamada agricultura familiar.

No Sul do Estado do Espírito Santo, incluindo a região do Caparaó, verifica-se uma grande presença da cafeicultura e da pecuária leiteira, de modo que a silvicultura vem ganhando espaço estimulada principalmente pelas indústrias de papel e celulose, que por meio de parcerias com pequenos produtores e custeio de produção incentivam a atividade (RIBEIRO, 2013).

De acordo com Almeida e Meira (2016), em 2006 foi dado início a um programa nomeado de “Espírito Santo 2025: plano de desenvolvimento”, por parte da Secretaria de Estado de Economia e Planejamento do Espírito Santo, que se trata de um documento elaborado por empresários de diversos setores produtivos em conjunto com a secretaria de Planejamento. O objetivo desse projeto é estabelecer um plano de metas até o ano de 2025, para desenvolvimento industrial e urbano para as regiões “menos desenvolvidas”, “vazias” e “atrasadas”. Devido a esse programa a partir dos anos 2000, uma série de medidas foram tomadas por meio de investimentos públicos e privados, e em alguns casos resultam em ameaças ao meio ambiente e comunidades.

Dessa forma, para realizar um bom planejamento frente a necessidade de preservação ambiental, faz-se necessário considerar os impactos do desenvolvimento sobre a fragilidade natural dada pelas características de relevo, solos, cobertura e clima da região. De acordo com a definição dada por Ross (2009) a fragilidade ambiental utilizada, na delimitação de uma determinada área é conceituada como sendo: “A quebra do potencial ecológico de um geossistema diretamente relacionada com as condições do ambiente físico-natural, principalmente com a cobertura vegetal, e revela o potencial de degradação provocada pelas atividades antrópicas.

No contexto do presente trabalho, adotou-se como conceito para a fragilidade as regiões que apresentam maior risco potencial natural a degradação como consequência de suas características de relevo, solos e clima, bem como devido ao uso e cobertura do solo, que tem direta influência nos processos de classificação para gerar mapas de fragilidade. Trabalho realizados por diversos autores indicam que esta abordagem tem demonstrado resultados satisfatórios na produção de cenários de fragilidade, vulnerabilidade e degradação ambiental (CABRAL et al., 2011; DA SILVA e COSTA, 2011; GOMES, 2013; VASCONCELLOS et al., 2016).

As pesquisas relativas à fragilidade ambiental dos ambientes são de grande importância para o planejamento territorial, uma vez que trata-se de um instrumento cujo a finalidade é analisar e identificar os ambientes em função dos seus diferentes níveis de vulnerabilidade, principalmente relacionado aos processos de degradação, erosão, assoreamento de cursos d'água e demais problemas ambientais (GOUVEIA e ROSS, 2019).

Para obter uma perspectiva acerca das condições de vulnerabilidade ou fragilidade do sistema/ambiente é necessário, realizar um estudo que integre os elementos que compõem o estrato geográfico e dão suporte a vida do homem, animal e plantas, os quais analisados e inter-relacionados geram como resultado um produto analítico-sintético que retrata a situação da área em estudo. Esta análise conjunta possibilita obter um diagnóstico das variadas categorias hierárquicas da fragilidade dos ambientes naturais, repercutindo na carta síntese de Fragilidade/Vulnerabilidade Ambiental (FAGUNDES e QUEIROZ FILHO, 2014).

2 OBJETIVO

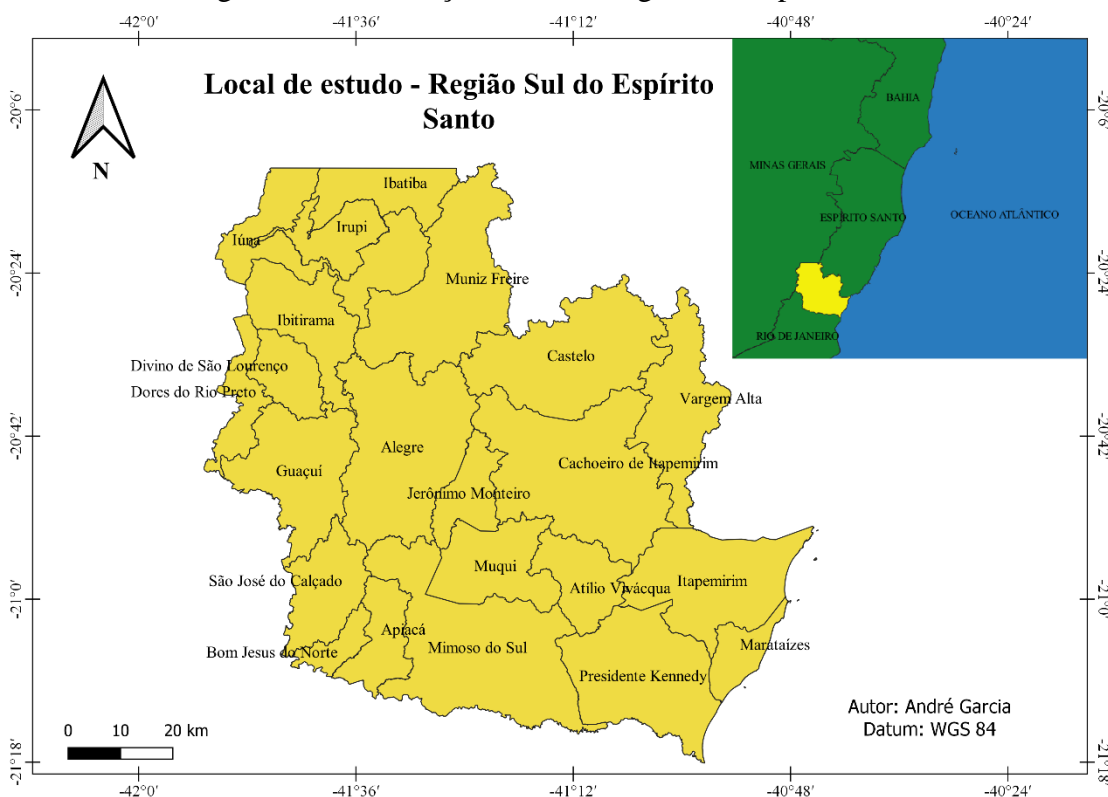
Diante das questões abordadas a realização do presente trabalho teve como objetivo a produção de diferentes cenários e cartas de fragilidade ambiental para a mesorregião sul Espírito-santense, utilizando três diferentes metodologias.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Região de estudo

A área em estudo compreende a Mesorregião sul do estado do Espírito Santo que possui uma área de 8843km², abrangendo 22 municípios, tendo como divisa Minas Gerais a oeste e o Rio de Janeiro ao Sul (Figura 1). A região é caracterizada por uma ampla produção agrícola e pecuária, tendo como principais produtos o café e o leite, de acordo com o Censo agro 2017 (IBGE, 2017). Além destas atividades o setor extração mineral para de rochas ornamentais e silvicultura para produção de papel e celulose, tem crescido cada vez mais na região, segundo dados levantados por Castro et al. (2012) e Ribeiro (2013), respectivamente.

Figura 1 – Localização da Mesorregião sul Espírito-santense.



Fonte: Adaptado de IJSN

3.2 Modelo de fragilidade

Para realização do trabalho foi utilizado uma adaptação do “Modelo de Fragilidade Potencial Natural com apoio nas Classes de Declividade” proposto por Ross (1994). Este modelo é baseado em classes de declividade e propõe-se que as unidades de fragilidade dos ambientes naturais devem ser resultantes dos levantamentos básicos de solos, cobertura vegetal/uso do solo e clima. Cada uma dessas variáveis é hierarquizada em cinco classes de acordo com sua

vulnerabilidade, variando de 1 (menor fragilidade) a 5 (maior fragilidade). Da combinação dos valores obtidos, é gerada uma classificação de fragilidade ambiental do local.

Dessa forma, a partir da composição e das relações entre os quatro fatores declividade, solos, uso/cobertura e clima foi realizada uma álgebra de mapas para produção da carta de Fragilidade Potencial Natural.

De forma a obedecer aos parâmetros estabelecidos no Plano de Desenvolvimento: Espírito Santo 2025, os cenários de fragilidade ambiental produzidos a partir desta metodologia poderão ser utilizados como guia na gestão de áreas fragilizadas, possibilitando atingir um dos objetivos estabelecidos no plano, que é assegurar o desenvolvimento de forma a causar o menor impacto, aos solos, vegetação nativa e recursos hídricos. Nesse sentido, como a região é caracterizada por relevo irregular (altas declividades), bem como agricultura e pecuária intensas, esses dois fatores foram considerados mais importantes na atribuição de pesos.

A partir dos mapas adquiridos, houve uma padronização e reamostragem dos pixels para a resolução espacial de 30x30, de modo garantiu-se a heterogeneidade de todos os fatores avaliados. Esse procedimento foi necessário, pois caso houvesse uma resolução muito elevada em algum dos mapas utilizados esse fator apresentaria uma supervalorização sobre os demais de menor resolução espacial, dessa forma influenciando diretamente nos resultados finais.

3.3 Fonte e classificação de dados

Os produtos deste trabalho foram gerados a partir de dados base obtidos no banco de dados de instituições públicas, como o Instituto Jones dos Santos Neves (IJSN), Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF) (Tabela 1). A representação cartográfica dos mapas é proporcional a escala 1:650000. O processamento de dados e execução de algoritmos foram realizados em software de Sistema de Informações Geográficas de código aberto, o Quantum GIS (QGIS), versão 3.10 La Coruña.

Tabela 1 - Fonte de dados cartográficos.

| Dado/Fator | Fonte | Formato |
|----------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Limites político administrativos | IJSN | Geobjeto (polígonos) |
| Modelo Digital de Elevação | TOPODATA/INPE | Geocampo |
| Solos | GEOINFO/EMBRAPA Solos | Geobjeto (polígonos) |
| Uso/Cobertura | IBGE | Geobjeto (polígonos) |
| Clima | IPEF | Geobjeto (polígonos) |

Fonte: Autor

A divisão das classes de declividade foi realizada conforme a classificação realizada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (1999), nas seis classes Plano, Suave Ondulado, Ondulado, Forte Ondulado, Montanhoso e Escarpado (Figura 2A). A classificação utilizada para gerar o mapa de solos, representado na Figura 2B, segue o formato padrão estabelecido pela EMBRAPA solos, seguindo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SIBCS).

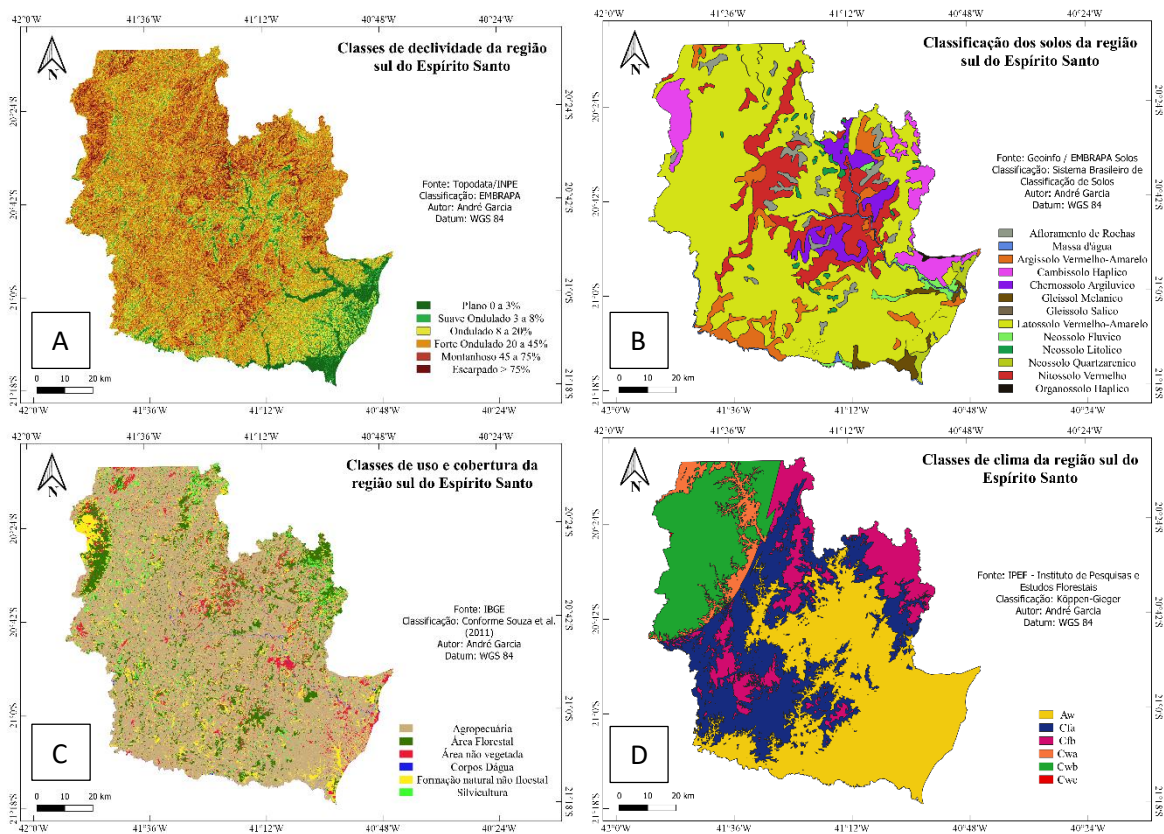
O mapa de uso/cobertura do solo (Figura 2C) foi gerado a partir da classificação realizada por Souza et al. (2011), que classifica como área florestal regiões que apresentam floresta ombrófila densa aluvial, associação de floresta ombrófila aberta com palmeiras com floresta ombrófila densa aluvial, floresta ombrófila aberta com cipós, floresta ombrófila aberta com palmeiras, associação de floresta ombrófila aberta com palmeiras com floresta ombrófila densa aluvial.

As áreas de formação natural não florestal são formações pioneiras com influência fluvial e/ou lacustre – arbustiva; vegetação secundária (capoeira) e pasto sujo. Áreas não vegetadas são regiões em que há presença de extração mineral, áreas urbanas, povoados, estruturas associadas e solo exposto. Enquanto as áreas classificadas como agropecuária são as que envolvem qualquer atividade de cultivo, criação e produção vegetal e/ou animal.

As classes de clima foram determinadas pelo sistema de classificação Köppen-Geiger, realizada por Alvares et al. (2013) (Figura 2D), em que locais com situação pluviométrica com distribuição anual desigual (mais chuvas no verão), com clima tropical e inverno seco recebem a classificação Aw. Enquanto para Cwc as condições são clima úmido subtropical, inverno seco e verão de período curto e frio.

As classes Cfa e Cfb indicam locais com clima úmido subtropical de clima oceânico sem estação seca, com verão quente (Cfa) e temperado (Cfb), respectivamente. Enquanto em Cwa e Cwb o clima caracteriza-se como clima úmido subtropical com inverno seco, e verão quente (Cwa) e temperado (Cwb), respectivamente.

Figura 2 – Classes de declividade, solos, uso/cobertura e clima para a Mesorregião Sul Espírito-santense.



Fonte: Adaptado de TOPODATA/INPE; EMBRAPA solos; IBGE e IPEF.

As classificações quanto a fragilidade ambiental, para os quatro fatores utilizados neste trabalho, foi realizada seguindo referências bibliográficas, considerando as características de cada um dos fatores e suas classes. Para o fator declividade foi adotado a categorização proposta por Franco et al. (2012). As classes de fragilidade para uso/cobertura e tipos de solos foram definidas conforme trabalho realizado por Souza et al. (2011). Para determinar as classes de fragilidade do fator clima baseou-se nos trabalhos realizados por Massa e Ross (2012) e Alvares et al. (2013). As categorias e seus respectivos valores para fragilidade ambiental podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação de fragilidade ambiental para os quatro diferentes fatores utilizados para o modelo aplicado à Mesorregião Sul Espírito-santense.

| Classes de declividade | Uso/Cobertura | Solo | Clima | Peso | Hierarquia de fragilidade |
|------------------------|--------------------------------|---|----------|------|---------------------------|
| 0 – 3% | Floresta | - | - | 1 | Muito Baixa |
| 3 – 8% | Formação natural não-florestal | Nitossolo Vermelho; Latossolo Vermelho-Amarelo | Cfa, Cfb | 2 | Baixa |
| 8 – 20% | Silvicultura | Argissolo Vermelho-Amarelo; Neossolo Quartzarênico; Chernossolo Argiluvico; | Cwa; Cwb | 3 | Moderada |
| 20 – 45% | Agropecuária | Cambissolo Háplico; Neossolo Flúvico; | Aw; | 4 | Alta |
| > 45% | Área não vegetada | Neossolo Litólico; Afloramento De Rochas, Gleissolo; Organossolo | Cwc | 5 | Muito Alta |

Fonte: Adaptado de Franco et al. (2012); Souza et al. (2011); Massa e Ross (2012); Alvares et al. (2013).

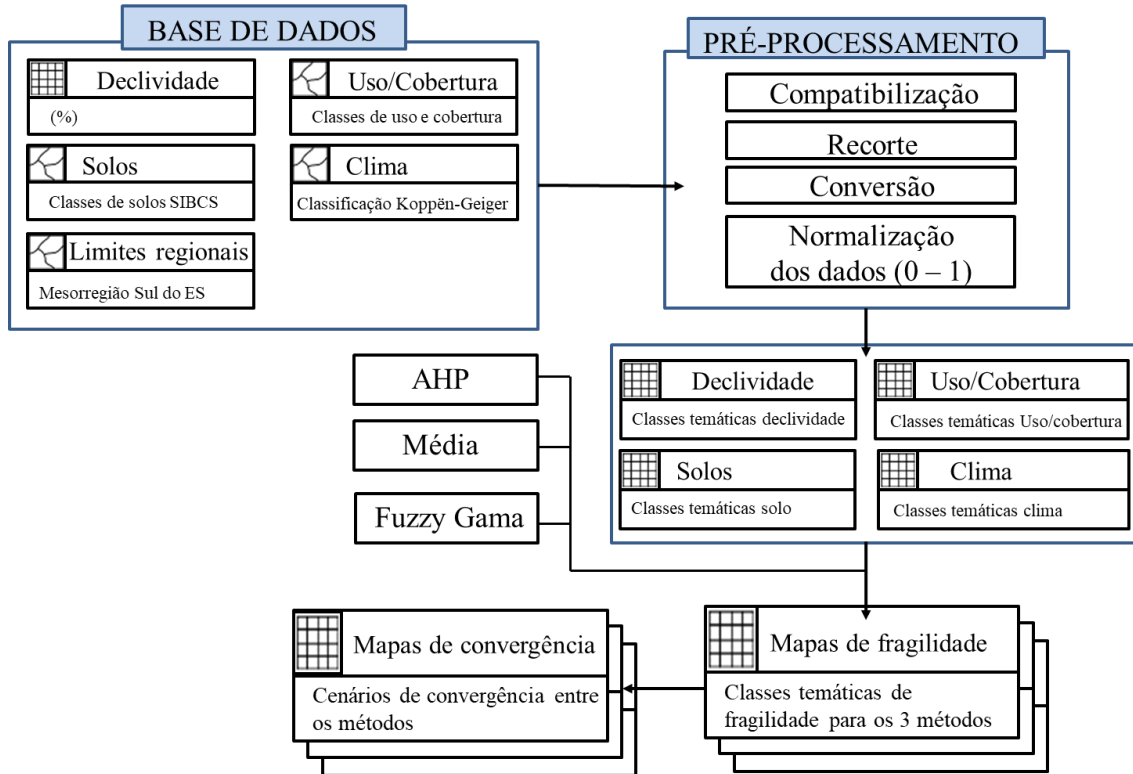
3.4 Processamento dos dados

Após a realização da classificação dos fatores, procedeu-se o processamento dos mesmos. Inicialmente foi certificado que todos os mapas utilizados estavam em um mesmo Sistema de Referência de Coordenadas (SRC), que para o presente trabalho foi o EPSG:4326 e Datum WGS 84.

Todos os mapas que estavam no formato shapefile ou geobjeto foram convertidos para raster ou geobjeto, normalizados para valores entre 0 e 1, pois, conforme a metodologia aplicada, a álgebra de mapas só é possível quando todos os fatores estão neste formato de arquivo ou representação, conforme diagrama da Figura 3.

Para produção de diferentes cenários de Fragilidade Ambiental da Mesorregião Sul Espírito-santense foram utilizados três métodos para álgebra de mapas e atribuição de pesos, sendo eles a cruzamento por média simples, o Processo Hierárquico Analítico (Analytic Hierarchy Process – AHP) e o Fuzzy gamma.

Figura 3. Diagrama simplificado (OMT-G) da metodologia executada.



Fonte: Autor

O método de cruzamento por média simples proposto por Crepani et al. (2001) e adaptado por Franco et al. (2012) consiste em utilizar os valores de fragilidade de cada fator sem atribuição de pesos a cada plano de informação. Dessa forma, o cálculo é realizado conforme a Equação 1.

$$FA_{Média} = \frac{\sum_{i=1}^n Pi}{n} \quad (1)$$

em que Pi é o plano de informação do fator 'i' e 'n' é o número de planos de informação ou fatores utilizados para geração do modelo.

O método AHP foi desenvolvido por Saaty (1980) e baseia-se em uma matriz quadrada na qual os diferentes fatores que influenciam a tomada de decisão são comparados dois-a-dois, e um critério de importância relativa é atribuído ao relacionamento entre estes fatores,

conforme uma escala pré-definida. Dada sua metodologia simples e importância esse método é atualmente é aplicado para a tomada de decisão em diversos cenários, inclusive vem sendo implantado em softwares de sistemas de informações geográficas para aplicação, por exemplo, em estudos de: risco a deslizamento de terras, zoneamento, análise de vulnerabilidade, entre outros (MIARA e OKA-FIORI, 2007).

Para comparação dos fatores baseou-se na Tabela 3, adaptada de Saaty (1980) que classifica os pesos quanto ao seu grau de importância em comparação ao outro fator.

Tabela 3 – Escala fundamental de valores de comparação.

| Importância | Definição |
|-------------|---------------------------------|
| 1 | Importância igual |
| 3 | Importância pequena |
| 5 | Importância grande ou essencial |
| 7 | Importância muito grande |
| 9 | Importância absoluta |
| 2, 4, 6, 8 | Valores intermediários |

Fonte: Adaptado de Saaty (1980)

Como o método utilizado baseia-se em uma adaptação do “Modelo de Fragilidade Potencial Natural com apoio nas Classes de Declividade”, deve-se ter como valor de maior peso a declividade, conforme Ross (1994). Assim, a tabela de comparação par a par (Tabela 4) foi elaborada seguindo a ordem de importância dos fatores declividade, uso/cobertura, solo e clima, com base em bibliografias e opinião de especialistas (GIMENES e AUGUSTO FILHO, 2013; SANTOS et al. 2015; GONÇALVES et al. 2016).

Tabela 4 – Comparação pareada e pesos dos fatores utilizados pelo método AHP.

| | Declividade | Uso/cobertura | Solos | Clima | Pesos | RC |
|---------------|-------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| Declividade | 1,00 | 3,00 | 5,00 | 6,00 | 0,521 | 0,048 |
| Uso/cobertura | 0,33 | 1,00 | 4,00 | 5,00 | 0,359 | |
| Solos | 0,20 | 0,25 | 1,00 | 2,00 | 0,120 | |
| Clima | 0,17 | 0,20 | 0,50 | 1,00 | 0,065 | |

Fonte: Autor

De forma geral o cálculo de fragilidade ambiental pelo método AHP pode ser descrito conforme a Equação 2. O cálculo da razão de consistência (RC) é necessário para validar os

pesos obtidos, de modo que são aceitáveis valores de RC menores que 0,1, indicando consistência nas notas atribuídas. Um método detalhado para elaboração da tabela de comparação pareada e suas fórmulas pode ser encontrada em Júnior e Rodrigues (2012).

$$FA_{AHP} = \sum_{i=1}^n P_i \times w_i \quad (2)$$

em que P_i é o plano de informação do fator 'i', e ' w_i ' é o peso atribuído por meio do processo AHP, ao fator 'i'.

O outro método escolhido para gerar cenários de fragilidade ambiental foi o fuzzy gamma. Na abordagem fuzzy as imprecisões caracterizam as classes que podem ter ou não fronteiras bem definidas. Dessa forma, Burrough (1998), recomenda a utilização dessas técnicas para tratar de fenômenos ambíguos, dúbios ou ambivalentes em modelos matemáticos ou conceituais.

Assim, diferentemente da teoria clássica de conjuntos, onde uma função de pertinência é definida como verdadeira ou falsa, ou seja, 1 ou 0, o grau de pertinência do conjunto fuzzy, é expresso em termos de escala que varia continuamente entre 0 e 1 (FRONZA, 2019).

Dentre os operadores fuzzy têm-se: and, or, soma algébrica, produto algébrico e operador gama. O produto algébrico tem a função de um produtório e possui a tendência de produzir valores muito pequenos devido a multiplicação de valores menores que 1. A soma algébrica pode-se dizer que seja operador complementar ao produto algébrico que causa um aumento do valor de pertinência (GONÇALVES et al., 2016).

Assim, o operador fuzzy gama integra a soma algébrica com o produto algébrico por meio de uma multiplicação e um expoente gama (γ) conforme Equação 3, onde o valor do gama pode variar entre 0 a 1. O cálculo dos valores fuzzy foi realizado por meio do algoritmo "Fuzzify" operacionalizado no sistema SAGA GIS. Para o presente estudo utilizou-se gama igual a 0; 0,25; 0,30; 0,50; 0,60; 0,65; 0,75 e 0,90.

$$FA_{fuzzy} = \left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right]^\gamma \times \left[\prod_{i=1}^n \mu_i \right]^{1-\gamma} \quad (3)$$

em que μ_i é o valor do membro fuzzy de plano de informação do fator 'i'.

De posse dos mapas de fragilidade ambiental produzidos utilizando cada um dos métodos, foi realizado um fatiamento de classes padrão, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Classificação de fragilidade conforme o valor dos pixels presentes no plano de informação.

| Valor dos pixels | Fatiamento/Classes de Fragilidade |
|------------------|-----------------------------------|
| 0 a 0,2 | Muito Baixa |
| 0,2 a 0,35 | Baixa |
| 0,35 a 0,6 | Moderada |
| 0,6 a 0,7 | Alta |
| 0,7 a 1,0 | Muito Alta |

Fonte: Autor

Após a produção dos mapas de fragilidade ambiental, para cada um dos métodos, foi realizada uma comparação pareada entre eles conforme o valor de convergência proposto por Spörl et al. (2011). De acordo com esse método, por comparação de pixel a pixel, após o fatiamento em classes de fragilidade ambiental, quando por subtração simples a diferença é igual a 0 existe concordância entre as áreas, enquanto para valores entre 0 a 1 ou 0 a -1 há uma leve concordância entre os pixels comparados. Valores maiores do que 1 ou menores do que -1 são discordantes entre si.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fragilidade ambiental para os fatores

A partir dos mapas base (Figura 2) foram gerados os mapas de classes de fragilidade para cada um dos fatores utilizados no modelo. O mapa de fragilidade ambiental para a declividade na região Sul Espírito-santense indica uma predominância das classes alta e moderada. Apenas no litoral, região mais a leste no mapa (Figura 4A) tem-se uma maior representação das classes de fragilidade “Muito Baixa” e “Baixa”.

Isso deve-se principalmente as características de relevo da região, em que municípios com maior declividade e altitude, localizam-se nas zonas mais interiores, enquanto os municípios litorâneos estão à nível do mar e dessa forma possuem uma menor declividade.

Para o fator uso/cobertura observa-se uma predominância da classe de fragilidade ambiental “Alta” (Figura 4B), principalmente, devido às atividades desenvolvidas na região de agropecuária (63,32% da área). De acordo com o Censo Agro (2017), dentre as principais atividades de cultivo estão a cefeicultura e cultivo de hortaliças, nos municípios localizados nas regiões central e noroeste da região, enquanto nas zonas mais litorâneas há maior presença no cultivo de abacaxi, banana e cana-de-açúcar. A produção de animais para abate e leite é bem distribuída e presente em toda a região, com maior dominância de pastagem para criação de bovinos, aproximadamente 48% da região.

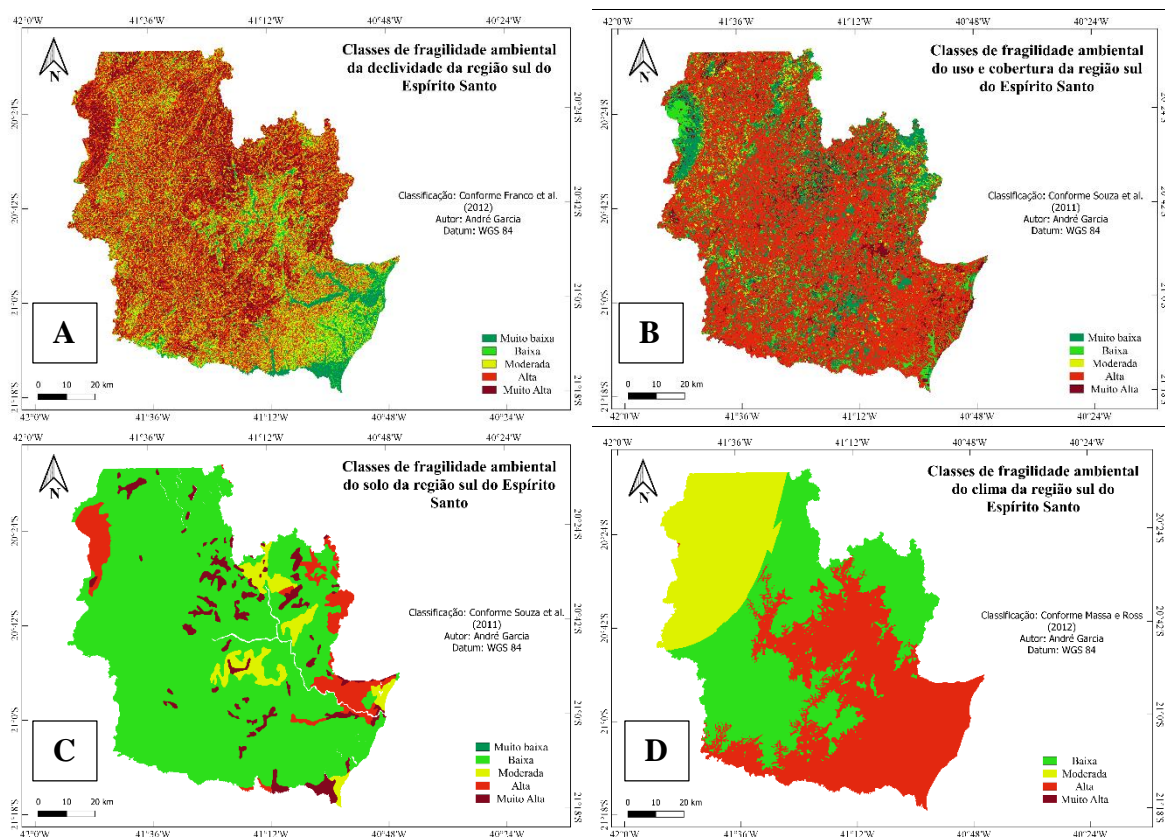
Observa-se ainda, na Figura 4B, a presença de manchas representativas das classes de fragilidade ambiental “Muito Baixa” e “Baixa”, o que indica a presença de áreas de preservação permanente (20% da área), principalmente na região mais ao noroeste onde fica localizada parte do Parque Nacional do Caparaó e o Pico da Bandeira (terceiro cume mais alto do Brasil) (NOVO et al. 2011).

Em relação ao mapa de fragilidade ambiental dos solos (Figura 4C), pode-se observar uma predominância da classe “Baixa”, algumas manchas de fragilidade “Moderada”, “Alta” e “Muito Alta”, entretanto há ausência de solos com fragilidade ambiental classificada como “Muito Baixa”.

O domínio da classe “Baixa” deve-se a presença dos solos Latossolo Vermelho-Amarelo na região. Esse tipo de solo, de acordo com Kawakubo et al. (2005) caracterizam-se como rasos e pouco desenvolvidos, assim, são menos propícios a degradação e erosão natural.

Para o fator clima (Figura 4D), há uma heterogeneidade da fragilidade ambiental na região em estudo, com predomínio das classes “Moderada” e “Alta” ao noroeste e centro-sul, respectivamente, e na faixa central um domínio da classe de fragilidade ambiental “Baixa”.

Figura 4 – Classes de fragilidade ambiental para os fatores utilizados no modelo para Mesorregião Sul Espírito-santense.



Fonte: Autor.

De acordo com Franco et al. (2012) os climas classificados como Aw e Cwc possuem elevada fragilidade ambiental devido a sua má distribuição de chuvas com Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com período seco entre 3 e 6 meses, alta concentração das chuvas no verão entre novembro e abril, quando ocorrem de 70 a 80% do total das chuvas. Enquanto os climas Cfa e Cfb possuem situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes anuais não muito superiores a 2000 mm/ ano, assim apresentam baixa fragilidade ambiental.

4.2 Fragilidade ambiental da Mesorregião Sul Espírito-santense

A partir do cruzamento dos planos de informação dos fatores declividade, uso/cobertura, solos e clima normalizados foram gerados os mapas de fragilidade apresentados na Figura 5

e Anexo. Junior e Rodrigues (2012) destacam que o método AHP tende a superestimar a fragilidade para fatores com maior peso atribuído, dessa forma, a normalização, precedida da ponderação contribui para imparcialidade do modelo.

A utilização do método AHP proporcionou uma classificação com maior predominância dos valores de Fragilidade Ambiental “Moderada”, cerca de 70,93% da região (Figura 5A e Tabela 6). Algumas manchas de classificadas como “Muito Baixa” ou “Baixa” (22,76%) foram formadas devido, principalmente, ao fator uso/cobertura em regiões com áreas de floresta preservada ou vegetação natural não florestal, evidenciando a importância de preservação destes ambientes.

Manchas com classificação de fragilidade “Alta” também foram observadas no método AHP (Figura 5A). Nessas localidades observou-se grande influência do fator solo combinado com o uso/cobertura, uma vez que, nas regiões dessas manchas o solo é classificado como Gleissolo, Organossolos e Afloramento Rochoso, dessa forma sendo altamente suscetíveis a degradação. Além disso, o fato de haver exploração agrícola e extração mineral coincidentes com esses tipos de solos amplia muito a fragilidade ambiental desses locais.

Tabela 6 – Área referente a cada uma das classes de Fragilidade Ambiental para a Mesorregião Sul Espírito-santense.

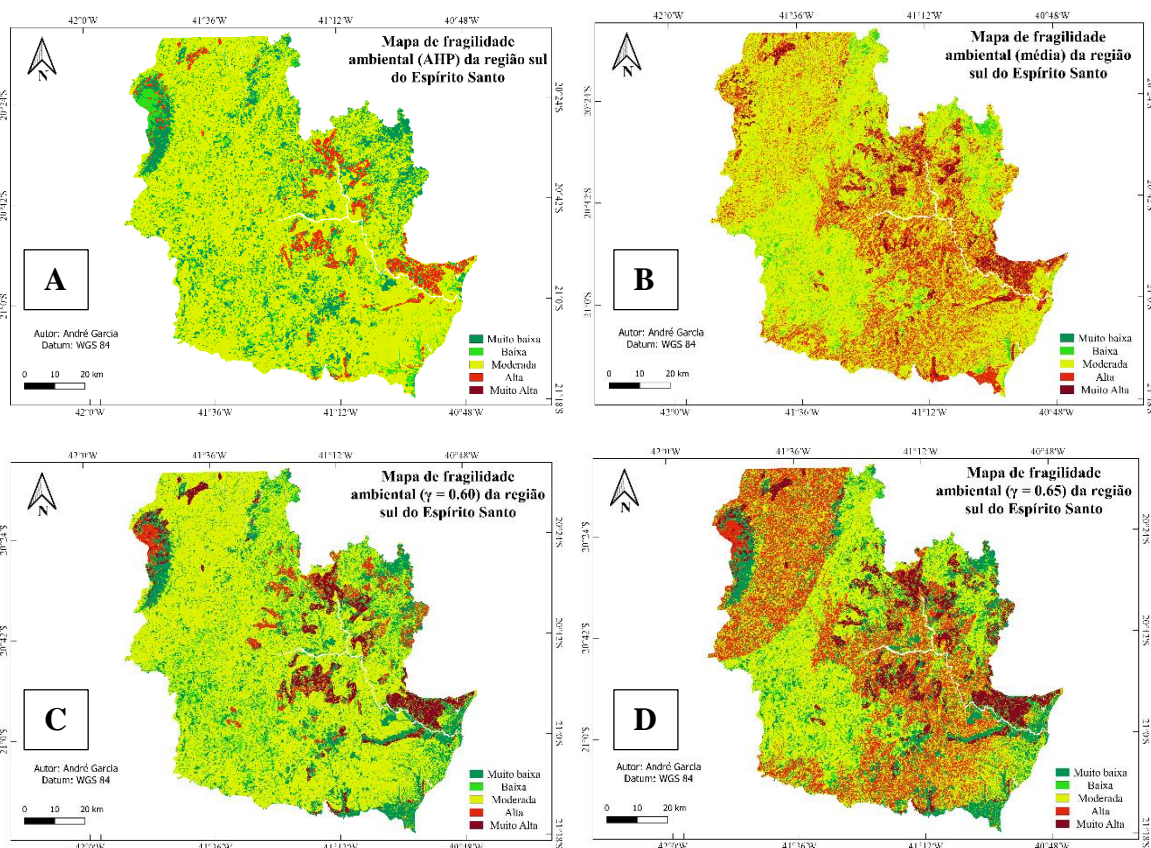
| Classe de fragilidade | Área (Km ²) | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------------------------|---------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | AHP | Média | $\gamma = 0$ | $\gamma = 25$ | $\gamma = 30$ | $\gamma = 50$ | $\gamma = 60$ | $\gamma = 65$ | $\gamma = 75$ | $\gamma = 90$ |
| Muito Baixa | 1253,67 | 21,38 | 5228,68 | 4564,23 | 3125,25 | 1842,24 | 1437,15 | 1307,43 | 826,78 | 34,43 |
| Baixa | 759,04 | 510,36 | 2846,48 | 1638,91 | 2666,79 | 2761,44 | 850,34 | 660,24 | 571,78 | 10,81 |
| Moderada | 6271,59 | 5973,86 | 228,39 | 2069,23 | 2506,97 | 3480,54 | 5595,93 | 3946,34 | 3274,93 | 1219,62 |
| Alta | 395,14 | 1871,2 | 47,2 | 45,27 | 39,1 | 183,21 | 359,36 | 2171,93 | 1394,6 | 379,81 |
| Muito Alta | 0 | 302,76 | 328,68 | 361,8 | 341,33 | 412,07 | 436,66 | 594,76 | 2612,6 | 7034,77 |
| TOTAL | 8679,44 | 8679,56 | 8679,43 | 8679,44 | 8679,44 | 8679,5 | 8679,44 | 8680,7 | 8680,69 | 8679,44 |

Fonte: Autor

Para o método de média simples, similar ao modelo proposto por Crepani et al. (2001), a fragilidade ambiental da região foi classificada principalmente como “Moderada” e “Alta” com 67,56 e 21,16% da área de estudo, respectivamente (Figura 5B e Tabela 6). Conforme relatam Spörl et al. (2011) neste modelo a utilização da média aritmética entre as variáveis pressupõe que todas elas têm a mesma importância para definir o grau de fragilidade, enquanto para o modelo AHP, similar ao proposto por Ross (1994) as variáveis têm diferentes

ponderações, sendo que o relevo tem uma importância muito superior às demais variáveis para definir o grau de fragilidade.

Figura 4 – Cenários de fragilidade utilizando diferentes métodos para a Mesorregião Sul Espírito-santense.



Fonte: Autor

Na Figura 5 pode-se também observar que os mapas gerados por fuzzy gama com $\gamma = 0,6$ e $\gamma = 0,65$ foram similares aos métodos de AHP e Média simples, respectivamente, sendo estes os cenários que mais aparecerem durante as análises. A concordância entre esses métodos pode ser verificada conforme apresentado na Figura 6.

Na comparação entre os métodos AHP e Média simples (Figura 6A), observou-se que os pixels apresentaram leve concordância para a região centro-sul e concordância excelente para a região norte-oeste. Esse resultado ocorre em virtude do baixo peso atribuído pelo fator clima no método AHP que proporciona valores de fragilidade classificados como “Moderado” para a região centro-sul, enquanto no método de média simples esses valores são classificados como “Alto”, devido a não utilização de pesos.

Em comparação dos métodos AHP e fuzzy gama ($\gamma = 0.6$) observa-se uma correlação excelente para maior parte do território em estudo (Figura 6B), exceto nas áreas em que há manchas de solo e declividades com fragilidade ambiental classificadas como “Muito Alta” e “Alta”, uma vez que esses fatores têm pesos somados igual a, aproximadamente, 64% para o método AHP, dessa forma sendo de grande importância.

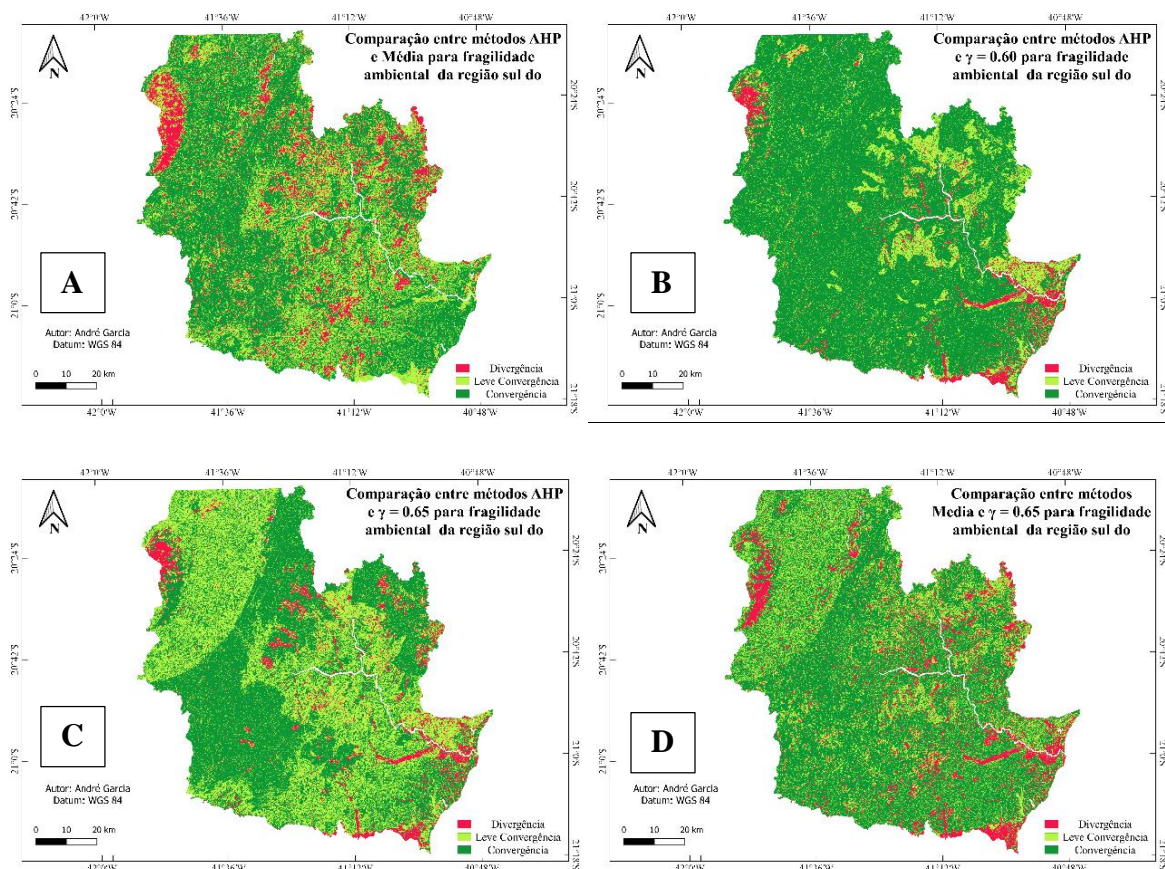
Gonçalves et al. (2016) em trabalho realizado para avaliar a fragilidade ambiental comparando os métodos AHP e Fuzzy Gama, na região Oeste de São Paulo, também obteve melhor correlação entre os métodos para o valor de gama igual a 0.6.

Na avaliação de similaridade entre os pixels entre os métodos de Média simples e fuzzy gama (Figura 6D) o valor de $\gamma = 0.65$ foi o que apresentou melhor concordância nas comparações entre estes métodos. Segundo Câmara et al. (2001) quando o gama for igual a 0, o resultado dependerá apenas do termo “Produto Algébrico Fuzzy”, portanto produzindo valores mais baixas, e quando gama for igual a 1, o resultado dependerá apenas do termo “Soma algébrica Fuzzy” gerando valores mais elevados de fragilidade.

Assim, pode-se verificar que os valores utilizados para média simples tendem a produzir valores de fragilidade alta, enquanto o método AHP tende a produzir valores moderados devido a ponderação dos fatores. Outro importante aspecto a ser observado é que as maiores divergências, para a maioria das comparações realizadas, ocorreram em regiões onde a fragilidade é classificada como “Muito Baixa” (Litoral) e “Muito Alta” (Região do Caparaó).

Essa divergência ocorre, pois, no “Modelo de Fragilidade Potencial Natural com apoio nas Classes de Declividade” proposto por Ross, a variável declividade tem uma importância muito superior às demais variáveis para definir o grau de fragilidade, enquanto as demais variáveis apenas hierarquizam nuances dessa fragilidade (SPÖRL et al. 2011).

Figura 6 – Concordância entre os métodos utilizados para Fragilidade Ambiental da Mesorregião Sul Espírito-santense.



Fonte: Autor

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos considerou-se que a utilização dos métodos AHP e Fuzzy gama (0,5 e 0,6) tendem a gerar mapas de fragilidade menos restritivos com valores intermediários, enquanto o método de Média simples e valores de fuzzy gama acima de 0,65, produzem cartas de fragilidade mais restritivas, com maiores valores de fragilidade ambiental, para os métodos e condições aplicadas. Entretanto, a validação dos resultados por meio da obtenção de dados de campo faz-se necessária para ratificar a qualidade de informação e veracidade destes cenários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., GONÇALVES, J. D. M., SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- BURROUGH, P. A. **Dynamic Modelling and GIS, Chapter 9**. In: P. LONGLEY, S. M. BROOKS, R. MACDONNEL, W. MACMILLAN (ed). *Geocomputation: a primer* (p.165-192). Wiley, 1998.
- CABRAL, J. B. P., DA ROCHA, I. R., MARTINS, A. P., DA ASSUNÇÃO, H. F., BECEGATO, V. A. Mapeamento da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Doce (GO), utilizando técnicas de geoprocessamento. **GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica**, n. 11, p. 51-69, 2011.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. INPE, São José dos Campos –SP. 2001.
- CASTRO, N. F., MARCON, D. B., FREIRE, L. C., LIMA, E. D. F., ALMEIDA, P. F. D. Impacto do APL de rochas ornamentais do Espírito Santo nas comunidades. Publicação no livro *APL's-Recursos Minerais Sustentabilidade Territorial*-p. 139-176, v. II, 2011.
- CREPANI, E., MEDEIROS, J. D., HERNANDEZ FILHO, P., FLORENZANO, T. G., DUARTE, V., BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: Inpe, 2001. 124 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos (1999). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 412p.
- DA SILVA, G. A., COSTA, R. A. Paisagem e fragilidade ambiental natural da bacia hidrográfica do Ribeirão São Lourenço, Ituiutaba/Prata - MG. **Caminhos de Geografia**, v. 12, n. 39, 2011.
- FAGUNDES, M. G.; DE QUEIROZ FILHO, A. P. A variação de escala nas metodologias de fragilidade e vulnerabilidade na bacia hidrográfica do rio Jundiá/SP. **Boletim Goiano de Geografia**. v. 34, n. 3, p. 585-605, 2014.
- FRANCO, G. B., BETIM, L. S., MARQUES, E. A. G., GOMES, R. L., CHAGAS, C. D. S. Relação qualidade da água e fragilidade ambiental da Bacia do Rio Almada, Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**. São Paulo, v. 1, n. 42, p.114-127, dez. 2012.
- FRONZA, J. G. Lógica fuzzy na avaliação ambiental e alocação otimizada de traçados de linhas de transmissão. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2019. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE: Santos – SP, 2019.
- GIMENES, F. B., AUGUSTO FILHO, O. Mapas de fragilidade ambiental utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação geográfica (SIG). **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 16, 2013. Anais XVI

Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE

GOMES, R. L. Avaliação da fragilidade ambiental e vulnerabilidade natural à perda de solo da bacia hidrográfica do rio Almada. **Boletim de Geografia**, v. 31, n. 3, p. 41-53, 2013.

GONÇALVES, S. R. A., DE ARAÚJO, R. R., IMAI, N. N. Mapeamento do grau de fragilidade com processo analítico hierárquico e operadores fuzzy gama na detecção áreas de fragilidade ambiental. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 2, 2016.

GOUVEIA, I. C. M. C.; ROSS, J. L. S. Fragilidade ambiental: uma proposta de aplicação de geomorphons para a variável relevo. **Revista do Departamento de Geografia**. v. 37, p. 123-136, 2019.

IBGE. **Censo Agropecuário 2017**. [Rio de Janeiro, 2018]. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>>. Acesso em: 20 mai. 2021.

JÚNIOR, J. F. P., RODRIGUES, S. C. 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 –USP**, v. 23, p. 4-26, 2012.

KAWAKUBO, F. S., MORATO, R. G., CAMPOS, K. C., LUCHIARI, A., ROSS, J. L. S. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil**, p. 16-21, 2005.

MASSA, E. M., ROSS, J. L. S. Aplicação de um modelo de fragilidade ambiental relevo-solo na Serra da Cantareira, bacia do Córrego do Bispo, São Paulo-SP. **Revista do Departamento de Geografia**. v. 24, p. 57-79, 2012.

MEIRA, A. C. H.; ALMEIDA, J. Mar de quem? Crítica, sentimentos de (in) justiça e justificações em um conflito ambiental: empreendimentos portuários vs. pesca artesanal no litoral sul do Espírito Santo, Brasil. **Desenvolvimento e Meio ambiente**. v. 39, 2016.

MIARA, M. A., OKA-FIORI, C. Análise por múltiplos critérios para a definição de níveis de fragilidade potencial-um estudo de caso: bacia hidrográfica do rio Cará-cará, Ponta Grossa/PR. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 13, 2007.

NOVO, T. A., NOCE, C. M., PEDROSA-SOARES, A. C., BATISTA, G. A. P. Rochas granulíticas da Suíte Caparaó na região do Pico da Bandeira: embasamento oriental do Orógeno Araçuai. **Geonomos**, 2011.

RIBEIRO, C. M. **Análise energética, econômica e ambiental da biodigestão de resíduos agropecuários gerados por pequenos e médios produtores rurais da região sul do Espírito Santo**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**. São Paulo, n.8, 1994.

ROSS, J. S. **Ecogeografia do Brasil: subsídios para o planejamento ambiental**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 208 p.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process: planning, priority setting, resource allocation**. New York: Mcgraw-hill, 1980. 287 p.

SANTOS, J. R. N., JUNIOR, C. H. L. S., PEREIRA, D. C. A. Zoneamento da fragilidade ambiental utilizando Lógica Fuzzy e Processo Analítico. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2015. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE

SOUZA, M. M., DA COSTA, L. H., DE CARVALHO, D. A. S. Utilização de ferramentas de geoprocessamento para mapear as fragilidades ambientais na área de influência direta da UHE de belo monte, no Estado do Pará. **Espaço Plural**. v. 12, n. 25, p. 73-85, 2011.

SPÖRL, C., CASTRO, E., LUCHIARI, A. Aplicação de redes neurais artificiais na construção de modelos de fragilidade ambiental. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 21, p. 113-135, 2011.

VASCONCELLOS S., B. N., HENTZ, Â. M. K., DALLA CORTE, A. P., SANQUETTA, C. R. Caracterização da fragilidade ambiental de uma bacia hidrográfica urbana no município de Santa Maria - RS. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 464-474, 2016.

ANEXO

Figura 7 – Mapas gerados pelo método fuzzy gama para $\gamma = 0$, $\gamma = 0,25$, $\gamma = 0,30$, $\gamma = 0,50$, $\gamma = 0,75$ e $\gamma = 0,90$.

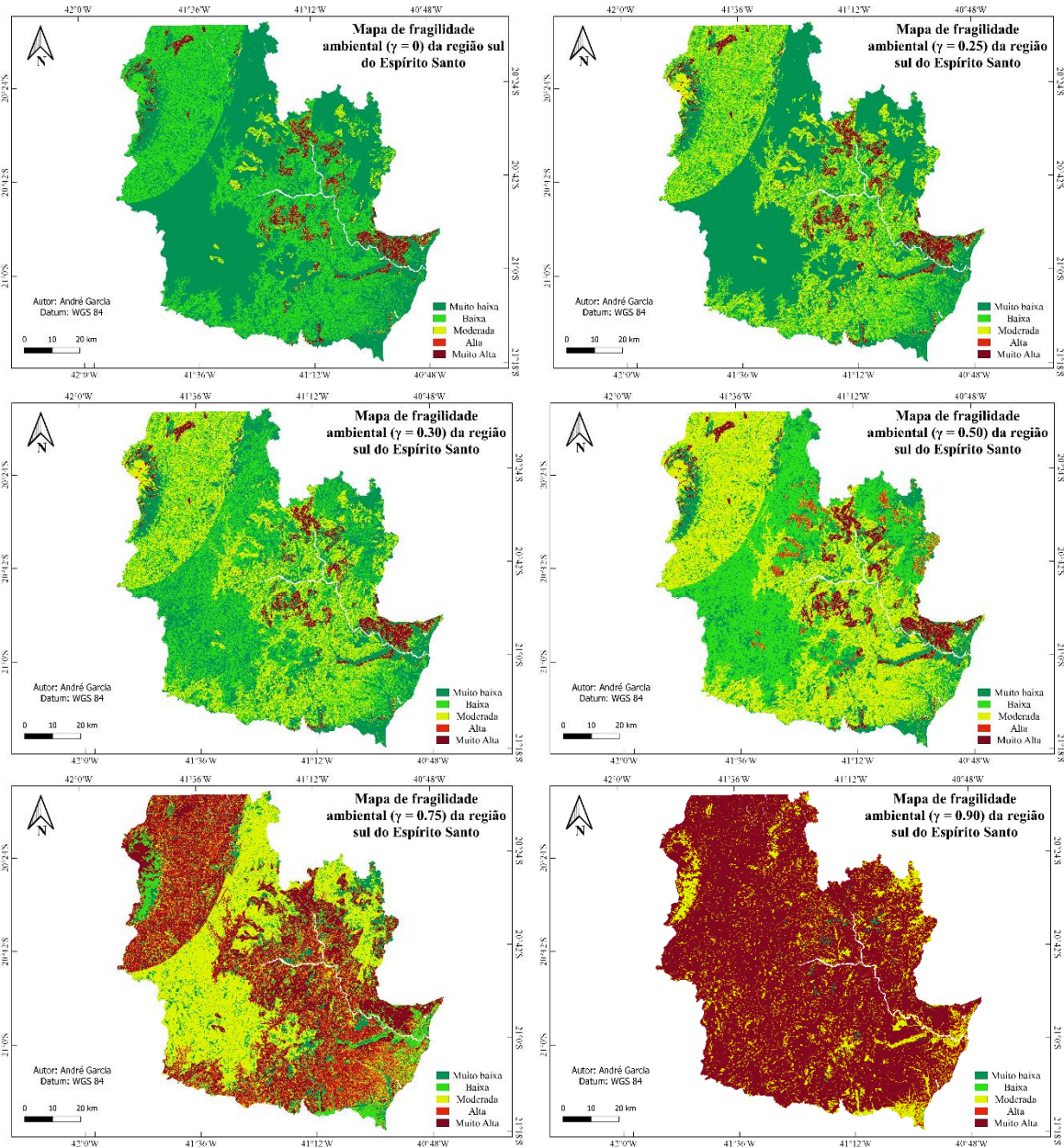


Figura 8 – Comparação de convergência entre métodos AHP e Fuzzy Gama.

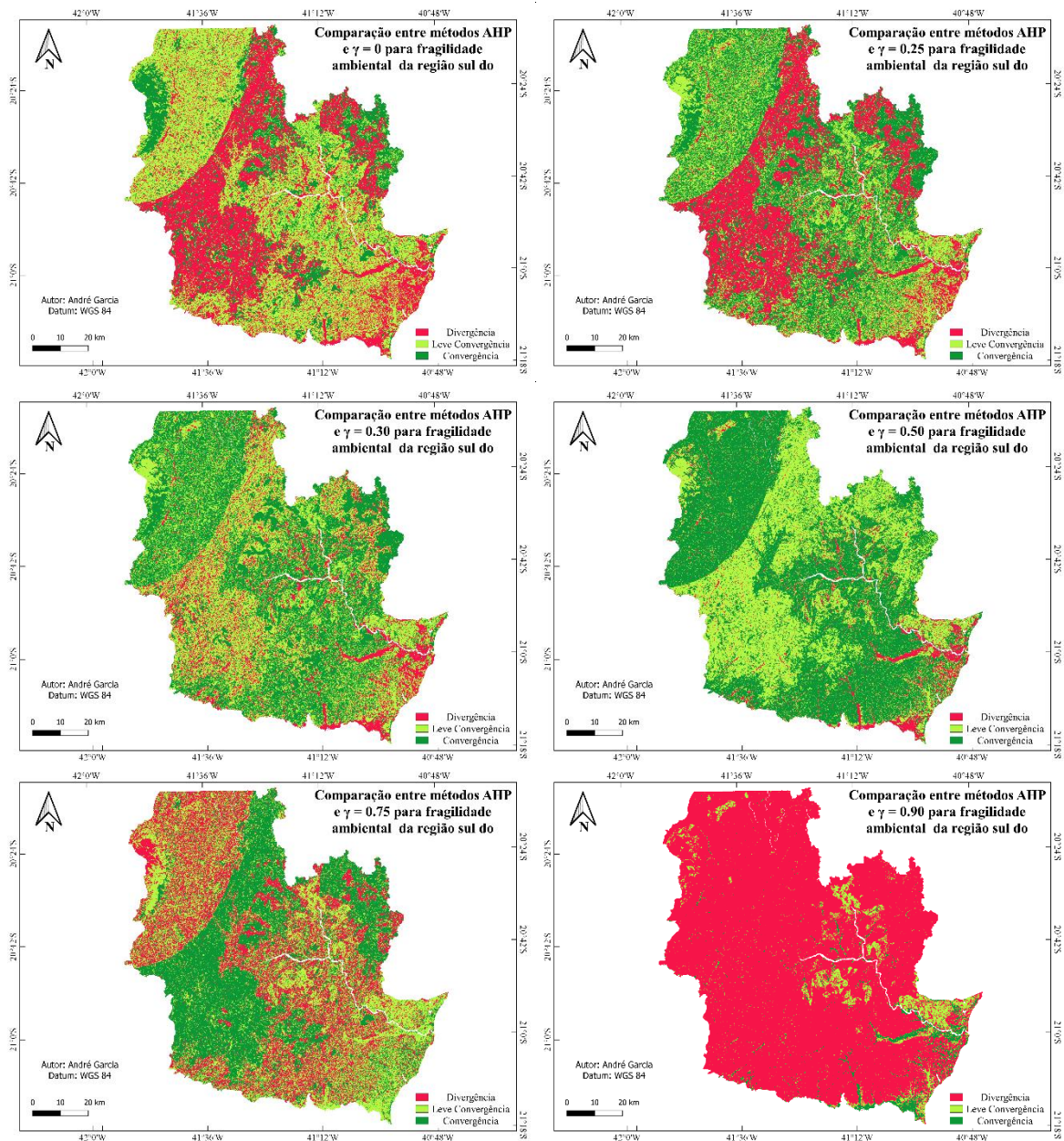


Figura 9 - Comparação de convergência entre métodos Média simples e Fuzzy Gama.

