

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA (PRODUÇÃO
VEGETAL)

JENESCA FLORENCIO VICENTE DE LIMA

**FISIOGRAFIA DA REGIÃO MÉDIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
ITAPEMIRIM, ES**

ALEGRE/ES

2021

JENESCA FLORENCIO VICENTE DE LIMA

**FISIOGRAFIA DA REGIÃO MÉDIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
ITAPEMIRIM, ES**

Tese apresentada a Universidade Federal do Espírito Santo como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), para a obtenção do título de Doctor Scientiae em Agronomia (Produção Vegetal), na área de concentração em Solo e Água e Interação com Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Diego Lang Burak.

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos.

ALEGRE, ES

2021

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado
de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

L732f Lima, Jenessa Florencio Vicente de, 1981-
Fisiografia da região média da bacia hidrográfica do rio
Itapemirim, ES / Jenessa Florencio Vicente de Lima. - 2021.
131 f. : il.

Orientador: Diego Lang Burak.
Coorientador: Alexandre Rosa dos Santos.
Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e
Engenharias.

1. Fisiografia. 2. Análise multivariada. 3. Lógica nebulosa.
4. Análise de fatores. 5. Química do solo. 6. Física do solo. I.
Burak, Diego Lang. II. dos Santos, Alexandre Rosa. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências
Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU 63

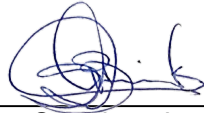
JENESCA FLORENCIO VICENTE DE LIMA

**FISIOGRAFIA DA REGIÃO MÉDIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
ITAPEMIRIM, ES**

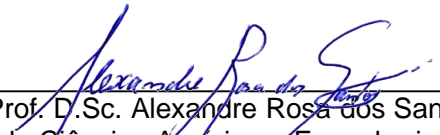
Tese apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), para a obtenção do título de Doctor Scientiae em Agronomia, na área de concentração em Solo e Água e Interação com Plantas.

Aprovada em 31 de agosto de 2021

Comissão examinadora:



Prof. Dr. Sc. Diego Lang Burak
Centro de Ciências Agrárias e Engenharias – UFES
Orientador



Prof. D.Sc. Alexandre Rosa dos Santos
Centro de Ciências Agrárias e Engenharias – UFES
Coorientador



Prof. D.Sc. Danilo de Lima Camelo
Centro de Ciências Agrárias e Engenharias – UFES
Examinador Interno



Prof. D.Sc. Mirna Aparecida Neves
Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde – UFES
Examinador Interno



(Chefe do Departamento de Petrologia e Geotectônica)
Prof. D.Sc. Artur Corval Vieira
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Examinador Externo

Artur Corval Vieira
Chefe
Dep. de Petrologia e Geotectônica
IA/UFRuralRJ - Slape: 1648928



Emitido em 31/08/2021

ATA DE DEFESA DE TESE Nº 287/2021 - DPETRO (11.39.40)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 27/10/2021 22:29)

ARTUR CORVAL VIEIRA

CHEFE DE DEPARTAMENTO - TITULAR

DPETRO (11.39.40)

Matricula: 1648928

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número: **287**, ano: **2021**, tipo: **ATA DE DEFESA DE TESE**, data de emissão: **27/10/2021** e o código de verificação: **b4e7e39d12**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
MIRNA APARECIDA NEVES - SIAPE 1546267
Departamento de Geologia - DG/CCENS
Em 08/11/2021 às 08:57

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/302956?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
DANILO DE LIMA CAMELO - SIAPE 1405706
Departamento de Agronomia - DA/CCAE
Em 09/11/2021 às 14:21

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/304574?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
DIEGO LANG BURAK - SIAPE 1792652
Departamento de Agronomia - DA/CCAE
Em 10/11/2021 às 08:44

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/305183?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
ALEXANDRE ROSA DOS SANTOS - SIAPE 1321632
Departamento de Engenharia Rural - DER/CCA
Em 10/11/2021 às 20:01

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/305984?tipoArquivo=O>

DEDICATÓRIA

À Deus.

À minha mãe, Erinéia.

Ao meu marido Cristiano e meus filhos Maria Luzia e Antônio (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Á Deus e Nossa Senhora por sempre estarem comigo e nunca me abandonarem. Á minha mãe Erinéa, meu marido Cristiano e meus filhos Maria Luzia e Antônio (in memoriam) que sempre me apoiaram e estão ao meu lado em todos os momentos da minha vida, desde o início de tudo, participando e trabalhando juntos.

Á Cecília, Josué (in memoriam) e todos da família por estarem sempre ao meu lado.

Á todos os familiares que contribuíram para que eu chegasse hoje até aqui.

Ao amigo Kargean, pelo apoio e grande companheirismo nesta caminhada.

Aos irmãos acadêmicos e do Laboratório de Análise Química e Ambiental Uliana, Raul, Rebysson, Rayssa e Camila pelo auxílio e amizade.

Ao grupo Jenesca e Cia formado por Gabriel, Caio e Vinícius que se tornaram meus filhos adotivos, que foram meus braços nas perfurações e fundamentais no progresso do trabalho, agradeço a amizade, os bons momentos, as subidas e descidas de morros, as eternas pontes caídas de São Vicente, pinguelas de madeiras quebradas, os caminhos sem saída de Araraí e as muitas risadas. Faz parte desse grupo um integrante especial, que também tem meu agradecimento, o Suzuki-kun, que foi nossa nave para nos transportar por tantos lugares distantes, lindos e peculiares do nosso querido Sul do ES, que foi nossas pernas onde não conseguiríamos chegar.

Ao Fabiano e demais colaboradores do Laboratório de Solos da Ufes, Camila Tayane, Ramon, Arlan e demais colaboradores dos laboratórios da Ufes pela enorme ajuda e contribuição para o trabalho.

Á Nicolý pela grande contribuição nas análises, campo e pela amizade.

Á Tamara e a todos da Casa da Derriçadeira que sempre estiveram dispostos a me ajudar e socorrer.

Ao Professor Artur Corval da UFRRJ pela amizade e orientação.

Ao Professor Danilo Lima Camêlo pelas análises magnéticas, ensinamentos e amizade.

Ao Professor Felipe Vaz Andrade pela ajuda e ensinamentos durante todo o processo.

Aos professores Eduardo de Sá Mendonça, Mirna Aparecida Neves pelo grande auxílio e orientação.

Ao Professor Éder Carlos Moreira por ter sido o ponto inicial desta jornada.

Á todos os professores, servidores e colaboradores pelos ensinamentos e apoio.

Ao meu coorientador Alexandre Rosa dos Santos pelos ensinamentos, paciência e amizade.

Ao meu orientador Diego Lang Burak pela amizade, ensinamentos e apoio.

Ao CNPq pelo apoio financeiro concedido (Processo 423460/2016-1) no âmbito do projeto "Metais Pesados em Solos da Região Sul do Estado do Espírito Santo: estabelecimento de valores de referência de qualidade e monitoramento de áreas agrícolas".

Finalmente agradeço a todos que fizeram parte, direta ou indiretamente deste trabalho e da minha vida.

"Meu Deus, graças Vos sejam dadas por nos guiardes para a luz da Vossa glória pela luz da Natureza. Realizei a tarefa que me destes e regozijo-me na Vossa criação, cujas maravilhas me permitistes que revelasse aos homens. Amém."

Oração de Johannes Kepler

Sumário	
1. Introdução Geral.....	17
2. Objetivos.....	18
3. Bibliografia.....	19
CAPÍTULO 1	21
1. Introdução	23
2. Materiais e métodos	25
2.1. Caracterização da área de estudo	25
2.2. Materiais e métodos	28
2.2.1. Banco de dados	29
2.2.2. Atributos morfométricos	29
2.2.3. Análises multivariadas e classificação supervisionada	32
3. Resultados	34
3.1. Classificação, delimitação e avaliação das unidades geomorfológica ...	34
4. Discussão.....	46
5. Conclusões	51
6. Bibliografia.....	51
CAPÍTULO 2	59
1. Introdução	60
2. Materiais e métodos	62
2.1. Caracterização da área de estudo	62
2.2. Visão geral da metodologia.....	64
2.3. Pluviometria.....	65
2.4. Relevo.....	66
2.4.1. Morfometria.....	66
2.5. Hidrografia	68
2.6. Solos.....	69
2.7. Processamento	69
3. Resultados	71
3.1. Reclassificação de dados	71
3.2. Processamento	73
4. Discussão.....	77
5. Conclusões	80
6. Bibliografia.....	81
CAPÍTULO 3	90
1. Introdução	92

2. Materiais e métodos	93
2.1. Caracterização da área de estudo	93
2.2. Visão geral da metodologia	96
2.2.1. Delimitação de áreas morfometricamente homogêneas	97
2.2.2. Hipercubo latino condicionado	98
2.2.3. Coleta de amostras de solo	99
2.2.4. Análises granulométricas e químicas	100
2.2.5. Análises de susceptibilidade magnética (SM)	101
2.2.6. Tratamento de dados	101
3. Resultados e discussão	102
3.1. Análises físicas, químicas e magnéticas	102
3.2. Análise de Fatores (AF)	106
3.3. Distribuição espacial dos Fatores	113
3.4. Análise de Fatores (AF) e fatores ambientais	117
4. Conclusão	122
5. Bibliografia	123
CONSIDERAÇÕES FINAIS	131

RESUMO GERAL

LIMA, Jenesca Florencio Vicente. **FISIOGRAFIA DA REGIÃO MÉDIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAPEMIRIM, ES.** Doutorado (Pós-Graduação em Prod) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre-ES. Orientador: Dr. Diego Lang Burak. Coorientador: Dr. Alexandre Rosa dos Santos

O Sul do Espírito Santo possui características morfológicas, hidrográficas e geológicas peculiares, que resultaram em grande diversidade de solos. Para tanto, se faz necessário a hierarquização de áreas geográficas, separando-as em unidade geomorfológicas. As unidades geomorfológicas são áreas que possuem atributos pedológicos, geológicos e geomorfológicos semelhantes. Diante disso, este trabalho teve como objetivo principal caracterizar as unidades geomorfológicas referentes aos solos da região média da bacia hidrográfica do rio Itapemirim por meio de análise física, química e magnética. Esta caracterização ocorreu em três capítulos. No Capítulo 1 se delimitou as unidades geomorfológicas mais detalhadas por meio de análises multivariadas de dados morfométricos e hidrológicos. No Capítulo 2 se realizou o mapeamento detalhado de áreas vulneráveis à risco de inundação utilizando a metodologia de lógica nebulosa. No Capítulo 3 foi realizada caracterização física, químicas e magnética da área de estudo. Como resultado, foram delimitadas oito unidades a saber: Planícies e terrações aluviais, Depressão de colinas e morros suaves, Patamar escalonado planalto estrutural I, Patamar escalonado planalto estrutural II, Patamar escalonado planalto intermediário; Patamar escalonado de pontões e maciços serranos; Patamar escalonado de morrotes e serras escarpadas, Patamar escalonado planalto remanescente. Os municípios de Alegre, Jerônimo Monteiro, Muniz Freire, Castelo e Cachoeiro de Itapemirim possuem áreas classificadas como muito alta vulnerabilidade às inundações, em todas as situações apresentadas, seja em caso de precipitação anual ou sazonal. Por meio da análise de fatores foi possível analisar a dinâmica ambiental dos parâmetros físicos, químicos e magnéticos na área em função do relevo e do material parental.

ABSTRACT

The south of Espírito Santo has peculiar morphological, hydrographic and geological characteristics, which resulted in a great diversity of soils. Therefore, it is necessary to hierarchize geographical areas, separating them into geomorphological units. Geomorphological units are areas that have similar pedological, geological and geomorphological attributes. Therefore, this work had as main objective to characterize the geomorphological units referring to the soils of the middle region of the Itapemirim river hydrographic basin through physical, chemical and magnetic analysis. This characterization took place in three chapters. In Chapter 1, more detailed geomorphological units were delimited through multivariate analysis of morphometric, hydrological and magnetic data. In Chapter 2, the detailed mapping of areas vulnerable to flood risk was carried out using the fuzzy logic methodology. In Chapter 3, the physical, chemical and magnetic characterization of the geomorphological units was performed. As a result, eight units were delimited, namely: alluvial plains and terraces, depressions of mounds and gentle hills, stepped level of structural plateau I, stepped level of structural plateau II, stepped level of intermediate plateau, stepped level of pantoons and mountain massifs, stepped level of hills and scarped mountains, stepped level of remnant plateau. The municipalities of Alegre, Jerônimo Monteiro, Muniz Freire, Castelo and Cachoeiro de Itapemirim have areas classified as very high vulnerability to flooding, in all situations presented, whether in case of annual or seasonal precipitation. Through factor analysis it was possible to analyze the environmental dynamics of physical, chemical and magnetic parameters in the area as a function of relief and parent material.

1. Introdução Geral

A fisiografia trata da análise da paisagem, sua gênese e evolução através dos solos existentes, considerando o solo e as coberturas de alteração intempérica como registros e testemunhos dos eventos geológicos, geomorfológicos e climáticos ao longo do tempo (MORAES; JIMÉNEZ-RUEDA, 2008).

É amplamente demonstrado que o padrão do solo e os elementos da paisagem estão intimamente relacionados. Embora os estudos fisiográficos tenham sido desenvolvidos originalmente para fins educacionais, eles também possuem alto valor para aplicações de planejamento de terras em áreas como engenharia civil, assentamentos urbanos, riscos naturais, agroecologia e pedologia, entre outros (ANDRIAMAMONJISOA; HUBERT-FERRARI, 2019; DE MORISSON VALERIANO; DE FÁTIMA ROSSETTI, 2020; EL BAROUDY, 2011; FATHOLOLOUMI *et al.*, 2020; KHAN *et al.*, 2021; ROY; DAS, 2021). O alto valor dos produtos fisiográficos se deve à sua clareza não apenas para especialistas de diferentes disciplinas, mas também para profissionais e leigos. Assim, os mapas fisiográficos oferecem uma grande oportunidade de cooperação entre as áreas de ciência e aplicação para estabelecer uma visão comum nas formas da paisagem. As legendas fisiográficas devem fornecer de maneira eficiente a visão geral dos principais acidentes geográficos de um território e a compreensão do desenvolvimento da paisagem (FANTAPPIÈ; PRIORI; COSTANTINI, 2016).

O Estado do Espírito Santo possui características peculiares devido à sua formação geológica, ao relevo e à proximidade do Oceano Atlântico, resultando em grande diversidade de solos. Além da diversidade física e morfológica, os solos capixabas apresentam padrões diversos quanto às suas naturezas mineralógicas e químicas. Estas dependem dos substratos rochosos que os deram origem e de fatores ambientais relacionados à sua pedogênese (COSTA; COSTA, 2015).

A investigação dos padrões geomorfológicos de uma região e suas relações com o substrato litológico-estrutural fornece informações cruciais para a compreensão da evolução geológica de uma área. A região sul do estado do Espírito Santo apresenta padrões geomorfológicos distintos, frutos dos processos geomorfológicos atuantes desde o Período Cretáceo, superpostos ao substrato geológico. Esta região abrange a Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim

(BHRI), que é dividida em setores ou macroambientes que condicionam o uso da terra, sendo caracterizados por diferentes tipos de solo, vegetação e condições climáticas (LANI; REZENDE; RESENDE, 2001).

O sul do Espírito Santo possui a necessidade de apoio à agricultura sustentável e à melhoria da qualidade da terra. A caracterização dos solos não se restringe somente a gerar dados de inventários e distribuição geográfica de classes de solos, mas, também promove a distribuição espacial quantitativa de propriedades dos solos (MESQUITA, 2011).

O surgimento da grande diversidade de solos encontrada no ambiente é resultado de diferentes intensidades e tipos de processos. Devem ser consideradas as diferentes escalas da organização espacial de um sistema pedológico para a consequente espacialização das classes de solos em uma região. Nesse sentido, a hierarquização das áreas geográficas se torna essencial para a avaliação dos solos e sua dinâmica ambiental. A abordagem com relação ao manejo e uso do solo cria a necessidade de separação em regiões mais homogêneas possíveis. A ocorrência de ambientes distintos torna fundamental o tratamento diferenciado com vista ao uso e manejo adequado do solo, facilitando a compreensão de suas potencialidades e limitações. Apesar da importância desse tipo de levantamento para certos objetivos como políticas públicas federais e estaduais, avaliações locais devem ser realizadas para melhor estratificação dos tipos de solos para fins de planejamento de uso do solo em propriedades rurais (BURAK; CUNHA; LANI, 2012).

2. Objetivos

Este trabalho teve como objetivo geral delimitar unidades geomorfológicas mais específicas da região média da bacia do rio Itapemirim, realizando a caracterização fisiográfica por meio de análise física, química, magnética e morfométricas. Esta tese teve como objetivos específicos:

- Estudar a morfometria e hidrografia das sub-bacias inseridas na bacia do rio Itapemirim e estratificar em unidades geomorfológicas;
- Realizar a avaliação dos atributos morfométricos e gerar produtos (mapas) e informações que auxiliem no gerenciamento de problemas ambientais (inundações e erosões);

- Realizar análises físicas, químicas e magnéticas das amostras de solos;
- Realizar a conexão entre dados físicos, químicos e magnéticos e dados geológicos, geomorfológicos, para melhor caracterização a bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

3. Bibliografia

- ANDRIAMAMONJISOA, S. N.; HUBERT-FERRARI, A. Combining geology, geomorphology and geotechnical data for a safer urban extension: Application to the Antananarivo capital city (Madagascar). **Journal of African Earth Sciences**, vol. 151, p. 417–437, Mar. 2019. DOI 10.1016/j.jafrearsci.2018.12.003. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1464343X18303716>.
- BURAK, D. L.; CUNHA, A. M.; LANI, J. L. Geomabientes, gênese e classificação dos solos do sul do estado do Espíritos Santo. *In*: PRATISSOLI, D.; W.C., J. J.; ZAGO, H. B.; ALVES, F. R.; VIANA, U. R.; SANTO, H. J. G.; RDRIGUES, C. (eds.). **Tópicos Especiais em Produção Vegetal III**. 3rd ed. Alegre: UFES, 2012. p. 769–799.
- COSTA, A. F. S.; COSTA, A. N. **Valores orientadores de qualidade de solos no Espírito Santo**. Vitória: [s. n.], 2015.
- DE MORISSON VALERIANO, M.; DE FÁTIMA ROSSETTI, D. Delineation of main relief subdomains of central Amazonia for regional geomorphometric mapping with SRTM data. **Journal of South American Earth Sciences**, vol. 104, p. 102842, Dec. 2020. DOI 10.1016/j.jsames.2020.102842. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0895981120303850>.
- EL BAROUDY, A. A. Monitoring land degradation using remote sensing and GIS techniques in an area of the middle Nile Delta, Egypt. **CATENA**, vol. 87, no. 2, p. 201–208, Nov. 2011. DOI 10.1016/j.catena.2011.05.023. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0341816211001135>.
- FANTAPPIÈ, M.; PRIORI, S.; COSTANTINI, E. Physiography of the Sicilian region (1:250,000 scale). **Journal of Maps**, vol. 12, no. 1, p. 111–122, 1 Jan. 2016. DOI 10.1080/17445647.2014.984785. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17445647.2014.984785>.
- FATHOLOLOUMI, S.; VAEZI, A. R.; ALAVIPANAH, S. K.; GHORBANI, A.; SAURETTE, D.; BISWAS, A. Improved digital soil mapping with multitemporal remotely sensed satellite data fusion: A case study in Iran. **Science of The Total Environment**, vol. 721, p. 137703, Jun. 2020. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.137703. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969720312146>.
- KHAN, F.; DAS, B.; RAM KRISHNA MISHRA, S.; AWASTHY, M. A review on the

Feasibility and Application of Geospatial Techniques in Geotechnical Engineering Field. **Materials Today: Proceedings**, Mar. 2021. DOI 10.1016/j.matpr.2021.02.108. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785321011706>.

LANI, J. L.; REZENDE, S. B. de; RESENDE, M. Estratificação de ambientes com base nas classes de solos e outros atributos na Bacia do Rio Itapemirim, Espírito Santo. **Revista CERES**, v48, n276, Viçosa, MG, , p. 239–261, 2001. .

MESQUITA, L. F. **Caracterização de solos sob diferentes coberturas vegetais da sub-bacia hidrográfica do Rio Alegre – ES**. 2011. 61 f. Universidade Federal do Espírito Santo, 2011.

MORAES, F. T.; JIMÉNEZ-RUEDA, J. R. Fisiografia da região do planalto de Poços de Caldas, MG/SP. **Revista Brasileira de Geociências**, vol. 38, no. 1, p. 196–208, 1 Mar. 2008. DOI 10.25249/0375-7536.2008381196208. Available at: <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/7577/7004>.

ROY, L.; DAS, S. GIS-based landform and LULC classifications in the Sub-Himalayan Kaljani Basin: Special reference to 2016 Flood. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, Jul. 2021. DOI 10.1016/j.ejrs.2021.06.005. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1110982321000442>.

CAPÍTULO 1

COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOMÉTRICA DA PORÇÃO MÉDIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAPEMIRIM

RESUMO

A hierarquização das áreas geográficas se torna essencial para o reconhecimento e a avaliação dos ambientes. Essa hierarquização pode indicar regiões mais homogêneas, as quais podem ser segmentadas e estudadas por meio de microbacias, topossequências e perfis representativos. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi delimitar, classificar e avaliar unidades geomorfológicas dentro da região média da bacia hidrográfica do rio Itapemirim, considerando sua complexidade geológico-estrutural. Foi realizada análise discriminante por mínimos quadrados parciais (DA-PLS) associada a análise de agrupamento de atributos morfométricos e hidrográficos, com auxílio do mapeamento geomorfológico. Estas análises resultaram na determinação de oito unidades geomorfológicas: planícies e terraços aluviais, depressão de colinas e morros suaves, patamar escalonado planalto estrutural I, patamar escalonado planalto estrutural II, patamar escalonado planalto intermediário; patamar escalonado de pontões e maciços serranos; patamar escalonado de morrotes e serras escarpadas, patamar escalonado planalto remanescente. A unidade geomorfológica de planícies e terraços aluviais possuem como principal característica ser constituído por ambiente fluvial e de baixada, acarretando maior vulnerabilidade à inundação. A unidade geomorfológica depressão de colinas e morros suaves se localiza predominantemente no município de Cachoeiro de Itapemirim e constitui região de depressão, ou seja, abatimento do relevo. As unidades chamadas de patamar escalonado possuem como característica em comum maior controle estrutural, onde a dissecação do relevo reflete lineamentos geológicos, apresentando vales em V com maiores altitudes e declividades e maiores probabilidades de erosão. Esta metodologia pode ser utilizada para estratificação de ambientes e outros atributos que possam ser úteis para o gerenciamento ambiental.

ABSTRACT

The hierarchy of geographic areas becomes essential for the recognition and assessment of environments. This hierarchy can indicate more homogeneous regions, which can be segmented and studied through micro-basins, toposequences and representative profiles. In this context, the objective of this work was to delimit, classify and evaluate geomorphological units within the middle region of the Itapemirim river basin, considering its geological-structural complexity. Discriminant analysis by partial least squares (DA-PLS) associated with cluster analysis of morphometric and hydrographic attributes was performed, with the aid of geomorphological mapping. These analyzes resulted in the determination of eight geomorphological units: alluvial plains and terraces, depressions of mouns and gentles hills, stepped level of structural plateau I, stepped level of structural plateau II, stepped level of intermediate plateau, stepped level of pontoons and mountain massifs, stepped level of hills and scarped mountains, stepped level of remnant plateau. The geomorphological unit of plains and alluvial terraces have as main characteristic being constituted by a fluvial and lowland environment, causing greater vulnerability to flooding. The geomorphological unit depression of gentle hills and hills is located predominantly in the municipality of Cachoeiro de Itapemirim and constitutes a region of depression, where geological structures were responsible for lowering the relief. The units called stepped level have as common characteristic greater structural control, where the relief dissection reflects geological lineaments, presenting V-shaped valleys with higher altitudes and slopes, with greater probability of erosion. This methodology can be used to stratify environments and other attributes that can be useful for environmental management.

1. Introdução

O relevo, que constitui o objeto de estudo da Geomorfologia, sempre foi notado pelo ser humano, não só por sua beleza, imponência ou forma, mas também pela necessidade humana de convivência e adaptação. Algumas das necessidades mais comuns são assentamento de moradias, estabelecimento de caminhos para locomoção, desenvolvimento da agricultura, criação de rebanhos ou definição de domínios. A evolução do conhecimento do relevo tem buscado ir além, procurando entender como os processos se relacionam entre si, como evoluem os grandes conjuntos de relevo, qual o significado do relevo no contexto ambiental, como prever o comportamento dos processos catastróficos bem como suas formas de relevo resultantes. Neste contexto, existe a necessidade de compreender as relações entre o ser humano, a natureza e a sociedade, criando novos enfoques para as questões ambientais (MARQUES, 2008). Assim, o mapeamento geomorfológico tem como base a ordenação de fenômenos, permitindo o agrupamento de unidades geomorfológicas, resultando em regiões geomorfológicas. Estas regiões dão origem aos grandes domínios morfoestruturais, cuja caracterização está ligada aos aspectos geotectônicos dos grandes arranjos estruturais e eventualmente com a predominância de litologias definidas, prevalecendo as características geológicas, onde o clima é um fator importante (ARGENTO, 2008).

Com o desenvolvimento e os avanços das discussões sobre o meio ambiente, diversos instrumentos de planejamento e de gestão ambiental foram criados para as mais diversas finalidades. Tais instrumentos contemplam aspectos dos meios físico, biótico e antrópico, onde a Geomorfologia, que se encontra inserida no meio físico, estabelece relações interdisciplinares com os outros dois meios. Diversos instrumentos de planejamento e gestão ambiental (estudos de impacto ambiental, licenciamento ambiental, perícia ambiental, auditoria ambiental, zoneamento ambiental, plano de manejo de unidades de conservação, etc.) contemplam os conhecimentos geomorfológicos, sendo que a demanda por esses conhecimentos é resultante do objeto de estudo e/ou do ambiente sujeito à ocupação (GUTIERRES *et al.*, 2020).

As aplicações da Geomorfologia na gestão ambiental evoluíram ao longo do tempo e continuam a agregar especialização técnica e ferramentas que permitem melhor a abordagem de questões ambientais. Por meio dos avanços

tecnológicos atuais, houve maior disponibilidade de ferramentas para dados preditivos, frequentemente decorrentes de modelagem de terreno com tecnologia SIG (Sistemas de Informações Geográficas), sendo possível avaliar cenários alternativos de gestão, aumentando assim a visibilidade e transparência das soluções (DOWNS; BOOTH, 2011). Socialmente, houve aumento da relevância da Geomorfologia na resolução de problemas, levando maior número de cientistas a interagir com políticas públicas (KNUEPFER; PETERSEN, 2002).

A análise morfométrica é uma medição quantitativa e análise matemática das formas de relevo, sendo um importante indicador de sua estrutura e dos processos hidrogeológicos, perdas de materiais de uma bacia hidrográfica, propriedades físicas do solo, processos pedológicos e características erosivas (ASFAW; WORKINEH, 2019; KABITE; GESSESSE, 2018; KAUR *et al.*, 2014; KHARE, 2014; VAIDYA; KUNIYAL; CHAUHAN, 2013). Recentemente, com o avanço do sensoriamento remoto e da tecnologia espacial, a análise de vários terrenos e características hidromorfométricas de bacias de drenagem foram simplificadas (KABITE; GESSESSE, 2018; APARNA *et al.*, 2015). Vários pesquisadores realizaram estudos de análises morfométricas implementando métodos geoespaciais e obtiveram êxito na geração sistemática de informações detalhadas e atualizadas (ASFAW; WORKINEH, 2019; KABITE; GESSESSE, 2018; FARHAN *et al.*, 2017; FENTA *et al.*, 2017; PANDE; MOHARIR, 2017; RAI *et al.*, 2017; SONI, 2017; SINGH; SARANGI; KAUR *et al.*, 2014; SHARMA, 2008).

Ainda relação aos avanços computacionais, a análise discriminante se destaca como ferramenta para estratificar parâmetros ambientais, gerando produtos importantes para o gerenciamento ambiental, principalmente de riscos ambientais, envolvendo a tomada de decisão por parte de agentes públicos. WANG; CHEN; CHEN (2020) aplicou a análise discriminante linear em atributos de relevo para avaliação de susceptibilidade a deslizamentos de terra na área de Nanchuan, China. SINOWSKI; AUERSWALD (1999) utilizou a análise discriminante para separar estratos geológicos dentro de um perfil de solo usando sua relação com o relevo. A análise discriminante também é utilizada em outras aplicações, como mapeamento de nascentes de água subterrânea (NAGHIBI; MORADI DASHTPAGERDI, 2017), estudos sobre qualidade do solo (WANG, Xiumei *et al.*, 2018), classificação geomórfica (MITHAN; HALES; CLEALL, 2019), riscos naturais (KONSOER; KITE, 2014).

O estado do Espírito Santo possui uma grande diversidade de ambientes resultantes de processos cumulativos, alguns deles iniciados a bilhões de anos; outros mais recentes de centenas a milhares de anos. Isso cria um mosaico de áreas com padrões de relevo, material de origem e clima diferenciados que influenciam a disponibilidade de radiação, água, nutrientes e energia afetando os sistemas naturais e produtivos (ESPÍRITO SANTO, 2008).

Segundo PEIXOTO-OLIVEIRA et al. (2018), o complexo padrão geomorfológico da bacia hidrográfica do rio Itapemirim (BHRI) é fruto de uma trama litológica e estrutural complexa, gerada por eventos tectônicos compressoriais que afetaram a região entre o Neoproterozóico Superior e o Paleozoico Inferior; e extensionais, responsáveis pela ruptura do supercontinente Gondwana e pela abertura do Oceano Atlântico a partir do Mesozoico. Os traços gerais dos principais eventos tectônicos ficaram registrados no relevo do Sul do Espírito Santo. A investigação dos padrões geomorfológicos de uma região e suas relações com o substrato litológico-estrutural fornece informações cruciais para a compreensão da evolução geológica de uma área.

Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi descrever, comparar e classificar unidades geomorfológicas homogêneas com o uso de parâmetros morfométricos e análises multivariadas com base em informações geomorfológicas pré-existentes.

2. Materiais e métodos

2.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo corresponde a região média da bacia hidrográfica do rio Itapemirim. Está localizada no Sul do estado do Espírito Santo, abrangendo a área de aproximadamente 3.715 km², que inclui os municípios de Alegre, Jerônimo Monteiro, Cachoeiro do Itapemirim, Muqui, Castelo, Conceição do Castelo, Venda Nova do Imigrante e Domingos Martins. As sub-bacias hidrográficas inseridas na área de estudo pertencem à bacia hidrográfica do rio Itapemirim sendo elas as do: rio Alegre, rio Braço Norte Esquerdo, rio Castelo, rio São João de Viçosa, rio Caxixe, rio da Prata e partes da sub-bacia do rio Fruteira, rio Braço Norte Direito e sub-bacia do Itapemirim. A importância dessa

região está relacionada às áreas destinadas à pecuária e produção de café, regiões com cultivos de olerícolas, às regiões de recarga de aquíferos que alimentam a bacia do rio Itapemirim, assim como a crescente instalação de indústrias do setor de rochas e de mineração (Figura 1). O clima e temperatura são variáveis, devido à grande amplitude altimétrica, que varia de 8 a 2009 metros de altitude.

Em relação à geologia, a área em estudo está geotectonicamente inserida no Orógeno Araçuaí (ou orógeno Araçuaí - Oeste do Congo), no qual faz parte da Província Mantiqueira (HEILBRON *et al.*, 2004). A Província Mantiqueira representa um sistema orogênico Neoproterozóico situado no sul e sudeste do Brasil. O orógeno Araçuaí é um dos muitos orógenos Brasileiro/Pan-Africano que se desenvolveram durante a junção do Gondwana Ocidental. Este orógeno foi dividido no Mesozoico, devido à abertura do Atlântico Sul, onde o orógeno Araçuaí se situa a leste do Brasil e o cinturão do Congo Ocidental se encontra a oeste, na costa da África central. Significativamente, na época se formou, o orógeno Araçuaí foi delimitado a oeste, norte e leste pelo cráton São Francisco-Congo, um bloco crustal que tinha a forma de um 'U'. Assim, o orógeno foi "parcialmente confinado" durante o tectonismo, no sentido de que ocupou um enclave cercado em três lados pela crosta cratônica (PEDROSA-SOARES *et al.*, 2001; ALMEIDA; BRITO NEVES; DAL RÉ CARNEIRO, 2000; NEVES; NETO; FUCHS, 1999; TROMPETTE, 1997, 2020).

De acordo com o modelo de ALKIMIN *et al.* (2006), a formação do orógeno Araçuaí resultou da deformação cinematicamente complexa, encurtamento crustal substancial e produção de um grande volume de magma. O orógeno Araçuaí se formou em resposta ao fechamento da bacia do Macaúbas, onde a formação do orógeno se assemelha ao processo de esmagamento intitulado "quebra-nozes". Inicialmente, porções internas do orógeno fluíram para o norte. Em seguida, um espessamento crustal substancial ocorreu no interior do orógeno, e a frente de deformação migrou para fora, produzindo cintos de impulso que se sobrepujam às margens internas do Cráton. Com o fechamento contínuo, espaço no enclave tornou-se restrito e o interior do orógeno sofreu fuga lateral para o sul. O colapso extensional de estágio final desencadeou ambas as produções de granitos tardios a pós-colisionais e exumação de rochas de alto grau de níveis médios da crosta terrestre.

De acordo com (VIEIRA; MENEZES, 2015), a porção estudada do orógeno Araçuaí possui a seguinte sequência litoestratigráfica:

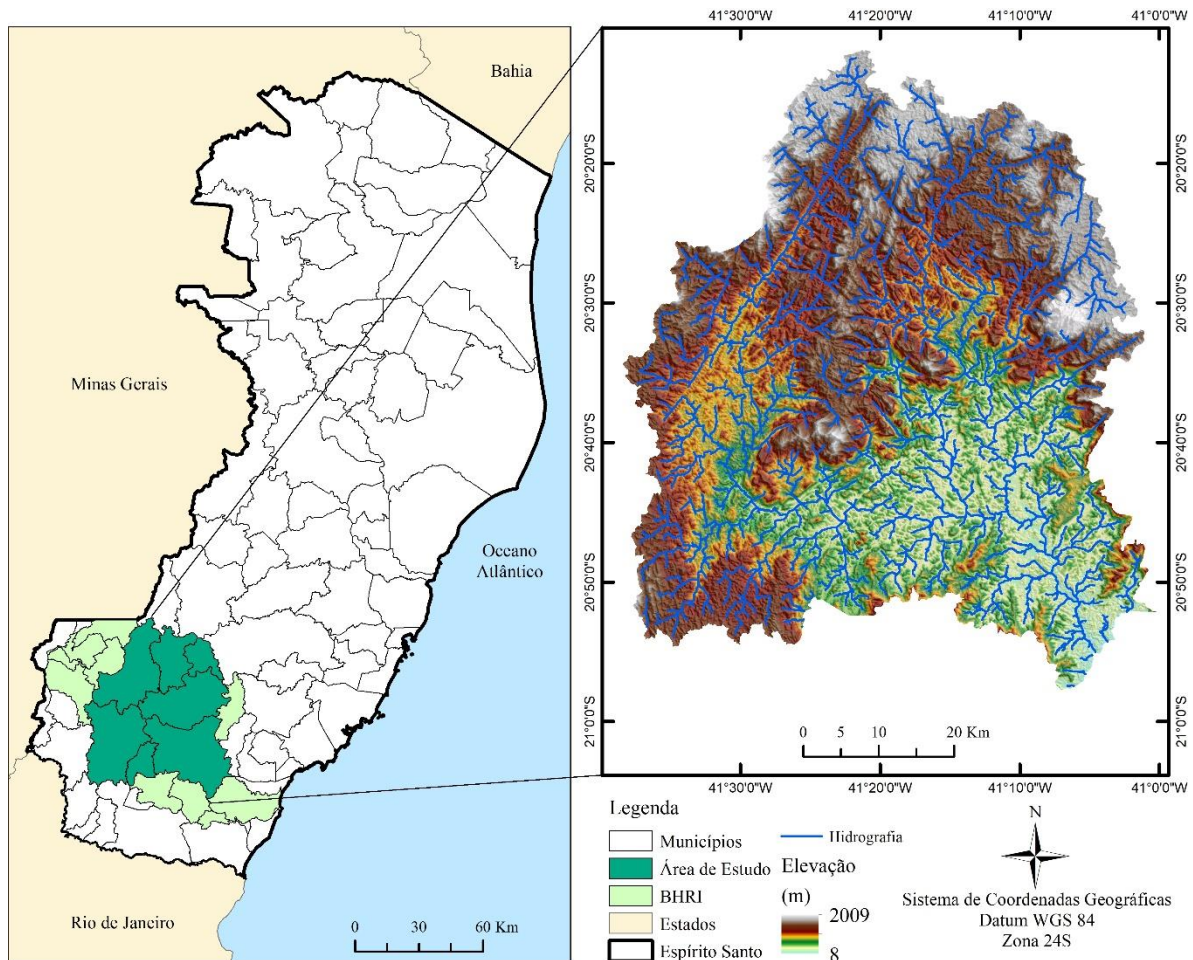
a) Rochas Paleoproterozóicas – correspondem a rochas do embasamento complexo. São compostas por rochas do Complexo Serra do Valentim (noritos e charno-enderbitos) e do Complexo Juiz de Fora (ortognaisses migmatíticos e metabasitos).

b) Rochas Neoproterozóica – Estágio pré-orogênico: correspondem às rochas metamórficas de origem sedimentar e vulcânica. As bacias sedimentar de ante arco são compostas por rochas metassedimentares e metavulcânicas do Grupo Rio Doce (Formação Palmital do Sul) e Grupo Bom Jesus do Itabapoana (Unidade Bom Jesus do Itabapoana). A bacia sedimentar de retro arco é composta por rochas metavulcanossedimentares do Complexo Nova Venécia, Grupo Italva (Unidade São, Unidade e Unidade Serra da Prata) e Grupo São Fidélis.

c) Rochas Proterozoica – Estágio pré a sin orogênico: corresponde aos granitoides gnáissicos predominantemente metaluminosos, calcialcalinos tipo I. Pertencem a este conjunto de rochas a Unidade Raposo, os Ortognaisses (Muniz Freire, Santa Helena, Cachoeiro, Estrela, Muqui), Granodiorito Santa Maria de Baixo, Tonalitos (Jequitibá e Alto Guandu) e Granito Brejetuba.

d) Rochas Proterozóicas – Estágio pós-orogênico: corresponde aos corpos graníticos associados ao estágio de colapso extensional do Orógeno Araçuaí, representado pela Suíte G5. Fazem parte desse conjunto de rochas os Maciços Santa Angélica, Alto Chapéu, Venda Nova e Castelo.

CALEGARI (2015) faz um relato da situação tectonoestrutural da área de estudo. Com relação aos grandes lineamentos, o padrão NE-SW com inflexão para NNE-SSW a N-S está relacionado a colisão continental do evento Brasileiro/Panafricano que gerou o orógeno Araçuaí. O colapso do orógeno e sua fase extensional gerou falhas de transferência que possuem direção predominante NW-SE. Este esforço distensivo que atuou no sudeste do Brasil com direção NW-SE a NNW-SSE deu origem ao Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). Devido à mudança no tensor distensivo imposto pela rotação da placa Sul-americana para oeste, foram geradas estruturas com direções E-W.



*BHR1: Bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Figura 1 - Localização da área de estudo.

2.2. Materiais e métodos

A metodologia, de forma resumida, foi dividida em seis etapas principais (Figura 2):

- a) Formação de banco de dados da área de estudo;
- b) Geração de atributos morfométricos a partir do modelo digital de elevação (MDE);
- c) Utilização da análise discriminante por mínimos quadrados parciais (DA-PLS-1) e do Mapeamento Geomorfológico do estado do Espírito Santo (IBGE, 2017) para diminuição de dimensionalidade e avaliação dos componentes principais associados a DA-PLS (escores);
- d) Análise de agrupamento por meio da distância euclidiana e método de Ward dos componentes principais (escores);

e) Filtragem de pixels, refinamento e delimitação dos grupos separados na etapa anterior;

f) Classificação supervisionada por funções discriminantes geradas na DA-PLS-2 com subconjunto de dados morfométricos e processamento pós-classificação (definição das unidades geomorfológicas).

2.2.1. Banco de dados

Os dados morfométricos e hidrográficos da área foram extraídos do modelo digital de elevação (MDE) obtido pela *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* fornecido pela USGS (United States Geological Survey), com resolução espacial de 30 m. O MDE passou por cinco etapas de pré-processamento, que incluem geração de mosaico das imagens, recorte da área de estudo, correção dos valores negativos, preenchimento dos pixels sem dados e remoção de depressões espúrias. Os dados de geomorfologia foram adquiridos no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017). Os dados de geologia foram adquiridos no Serviço Geológico do Brasil (VIEIRA *et al.*, 2018)

2.2.2. Atributos morfométricos

Após correção do modelo digital de elevação (MDE), esses dados foram tratados com ferramentas de geoprocessamento, onde foram adquiridos 34 atributos morfométricos e hidrológicos por meio das ferramentas do programa computacional QGIS (QGIS.ORG, 2021). Os atributos criados estão dispostos na Tabela 1.

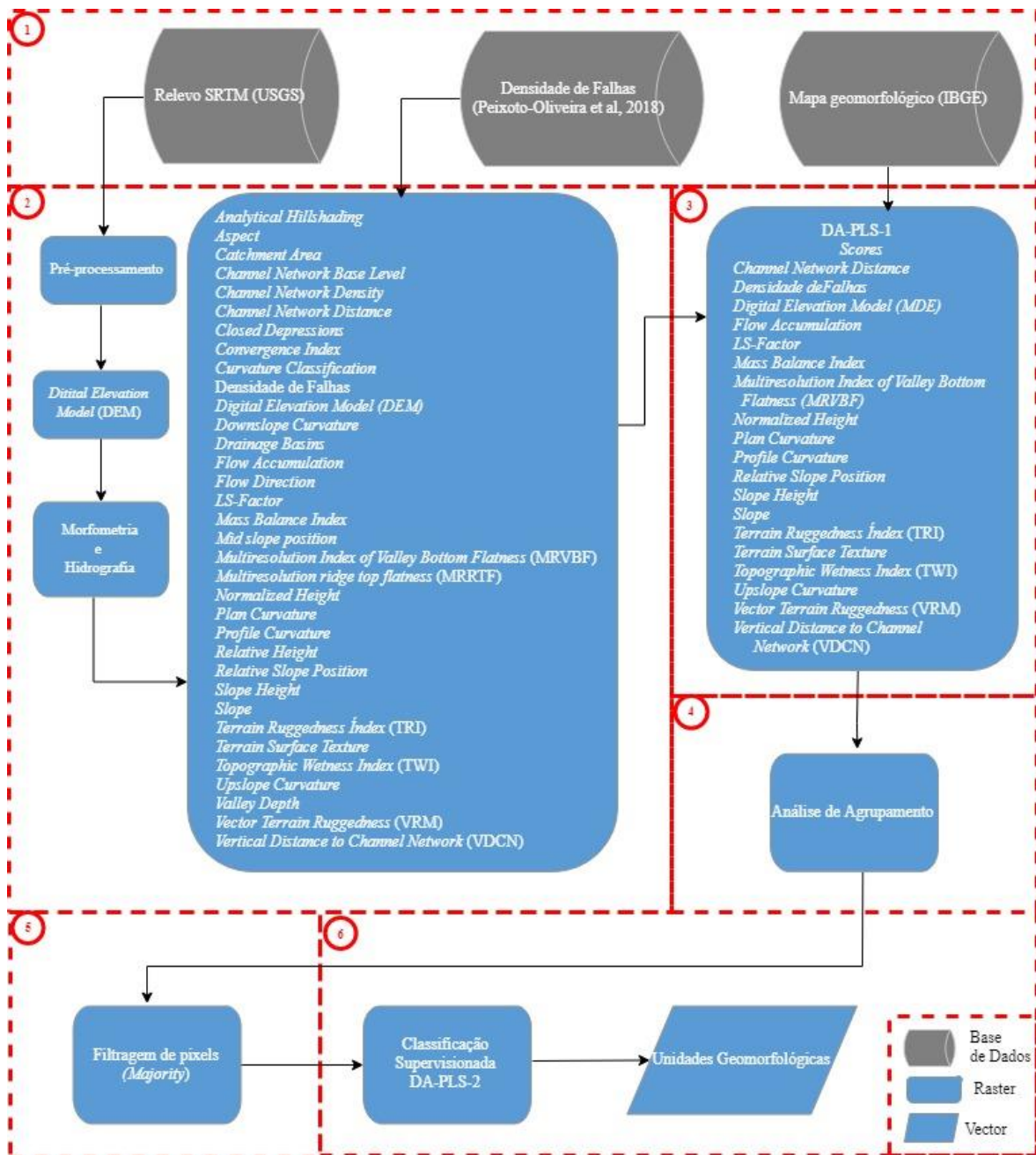


Figura 2 - Etapas metodológicas para separação das unidades geomorfológicas na Região Média da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim.

Tabela 1 – Atributos morfométricos e hidrológicos da área de estudo.

Atributo Morfométrico	Unidade	Autor (Base do Método)	Autor do Algoritmo
<i>Analytical Hillshading*</i>	Graus	TARINI; CIGNONI; MONTANI, (2006)	O.Conrad, V.Wichmann (c) 2003-2013
<i>Aspect</i>	Graus	ZEVENBERGEN; THORNE (1987)	O.Conrad (c) 2001
<i>Catchment Area</i>	m ²	O'CALLAGHAN; MARK (1984)	O.Conrad (c) 2001-2014, T.Grabs portions (c) 2010
<i>Channel Network Base Level</i>	m	O'CALLAGHAN; MARK (1984)	O.Conrad (c) 2001-2016, Portions by T.Grabs (c) 2010
<i>Channel Network Density</i>	m/m ²	O'CALLAGHAN; MARK (1984)	O.Conrad (c) 2001-2016, Portions by T.Grabs (c) 2010
<i>Channel Network Distance *</i>	m	O'CALLAGHAN; MARK (1984)	O.Conrad (c) 2001-2016, Portions by T.Grabs (c) 2010
<i>Closed Depressions</i>	m ²	O'CALLAGHAN; MARK (1984); FREEMAN (1991)	O.Conrad (c) 2001-2016, Portions by T.Grabs (c) 2010
<i>Convergence Index</i>	Adm	KÖTHE; LEHMEIER (1993)	O.Conrad (c) 2001
<i>Curvature Classification</i>	Adm	DIKAU (1988)	O.Conrad (c) 2001
Densidade de Falhas*	m/m ²	PEIXOTO-OLIVEIRA et al. (2018)	Peixoto-Oliveira et al. (2018)
<i>Digital Elevation Model (DEM)*</i>	m	(USGS, 2017)	SRTM (USGS)
<i>Downslope Curvature</i>	Graus	FREEMAN (1991)	P.Gandelli, O.Conrad (c) 2015
<i>Drainage Basins</i>	m ²	O'CALLAGHAN; MARK (1984)	O.Conrad (c) 2001-2016, Portions by T.Grabs (c) 2010
<i>Flow Accumulation*</i>	m ²	O'CALLAGHAN; MARK (1984)	O.Conrad (c) 2001-2016, Portions by T.Grabs (c) 2010
<i>Flow Direction</i>	Graus	O'CALLAGHAN; MARK (1984)	O.Conrad (c) 2001-2016, Portions by T.Grabs (c) 2010
<i>LS-Factor*</i>	Adm	DESMET; GOVERS (1996)	O.Conrad (c) 2003
<i>Mass Balance Index*</i>	g/m ²	MÖLLER et al. (2008)	O.Conrad (c) 2008
<i>Mid slope position</i>	Adm	BÖHNER; SELIGE (2006)	J.Boehner, O.Conrad (c) 2008
<i>Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness (MRVBF)*</i>	Adm	WILSON; GALLANT (1999)	O.Conrad (c) 2006
<i>Multiresolution ridge top flatness (MRRTF)</i>	Adm	WILSON; GALLANT (1999)	O.Conrad (c) 2006
Normalized Height*	m	BÖHNER; SELIGE (2006)	J.Boehner, O.Conrad (c) 2008
<i>Plan Curvature*</i>	°/m	ZEVENBERGEN; THORNE (1987)	O.Conrad (c) 2001
<i>Profile Curvature*</i>	°/m	ZEVENBERGEN; THORNE (1987)	O.Conrad (c) 2001
<i>Relative Height</i>	m	BÖHNER; SELIGE (2006)	J.Boehner, O.Conrad (c) 2008
<i>Relative Slope Position*</i>	Adm	BÖHNER; SELIGE (2006)	O.Conrad (c) 2005
<i>Slope Height*</i>	m	BÖHNER; SELIGE (2006)	J.Boehner, O.Conrad (c) 2008
<i>Slope*</i>	%	ZEVENBERGEN; THORNE (1987)	O.Conrad (c) 2001
<i>Terrain Ruggedness Index (TRI)*</i>	Adm	RILEY; DEGLORIA; ELLIOT (1999)	O.Conrad (c) 2010

Atributo Morfométrico	Unidade	Autor (Base do Método)	Autor do Algoritmo
<i>Terrain Surface Texture*</i>	Adm	IWAHASHI; PIKE (2007)	O.Conrad (c) 2012
<i>Topographic Wetness Index (TWI)*</i>	Adm	BEVEN; KIRKBY (1979)	O.Conrad (c) 2003
<i>Upslope Curvature*</i>	Graus	FREEMAN (1991)	P.Gandelli, O.Conrad (c) 2015
<i>Valley Depth</i>	Km	BÖHNER; SELIGE (2006)	J.Boehner, O.Conrad (c) 2008
<i>Vector Terrain Ruggedness (VRM)*</i>	Adm	RILEY; DEGLORIA; ELLIOT (1999)	O.Conrad (c) 2010
<i>Vertical Distance to Channel Network (VDCN)*</i>	m	BEVEN; KIRKBY (1979)	O.Conrad (c) 2002

Adm: adimensional. * Atributos morfométricos usados somente na análise discriminante por mínimos quadrados parciais modelo 2 (DA-PLS-2)

2.2.3. Análises multivariadas e classificação supervisionada

Os atributos morfométricos obtidos (Tabela 1) foram usados como variáveis independentes na análise discriminante por mínimos quadrados parciais (DA-PLS) por meio do programa computacional R (R Core Team, 2013). O DA-PLS é um caso especial de regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR) para variáveis categóricas (PÉREZ-ENCISO; TENENHAUS, 2003) e foi utilizada para agrupar os atributos que melhor explicam a variância dos dados, gerando *scores* para cada componente principal. Neste método, o efeito de colinearidade dos dados pode ser reduzido de forma mais eficaz, e a correlação entre as variáveis maximizada (MEVIK; CEDERKVIST, 2004). A regressão de mínimos quadrados parcial é descrita por equações (X e Y) que correspondem aos dados independentes (atributos de relevo – equação X) e às variáveis dependentes (unidades geomorfológicas – equação Y) (YE *et al.*, 2008; GELADI; KOWALSKI, 1986).

A regressão DA-PLS é robusta para conjuntos de dados com variáveis explicativas fortemente correlacionadas. Combinando as informações dependentes em muitas variáveis explicativas inter-correlacionadas em alguns componentes principais, o risco de *overfitting* do modelo é reduzido no DA-PLS. Foram avaliados dois modelos para classificação supervisionada com a matriz de variáveis explicativas dos atributos morfométricos. No modelo 1 (DA-PLS-1), foram usados 34 atributos morfométricos (Tabela 1). Para o modelo 2 (DA-PLS-2), foi usado um subconjunto de dados com os atributos morfométricos com VIP maior 0,83 (19 atributos morfométricos), a partir do modelo do conjunto total de dados (34 atributos morfométricos). Os valores dos pixels, com resolução de 240

m (reamostragem com valores das médias de pixels - banco de dados com resolução 30 m), foram convertidos em dados matriciais e processados no programa Statistica (STATSOFT, 2011) no pacote PLS (MEVIK; WEHRENS, 2007) do programa R (R CORE TEAM, 2013). Um número crescente de componentes principais normalmente melhora as predições e a percentagem de explicação da variância, contudo o número ideal de componentes precisa ser identificado com o objetivo de diminuição da dimensionalidade.

Os dois modelos (PLS-DA-1 e PLS-DA-2) foram usados para a classificação supervisionada a partir das funções discriminantes geradas. A qualidade da redução de dimensionalidade foi avaliada pelo método de Kaiser, onde foram usados somente componentes principais com autovalores maiores que 1 e/ou variância explicada acumulada mínima de 70% das variáveis independentes (MEVIK; WEHRENS, 2007). Para avaliar a capacidade preditiva dos modelos foi realizada a validação cruzada, com o método *leave-one-out*. Para o modelo da DA-PLS-1 buscou-se a maior redução de dimensionalidade e no modelo DA-PLS-2 buscou-se maior capacidade preditiva para classificação supervisionada.

Com os scores gerados no DA-PLS-1 foi realizada a análise de agrupamento, com o objetivo de agrupar de forma não supervisionada padrões morfométricos do relevo, a partir de variáveis (componentes principais) que apresentam maior relação e que explicam a variância das classes usadas no DA-PLS-1 (Unidades geomorfológicas, IBGE (2017)). Foi realizada a análise de agrupamento, usando a distância euclidiana e método da variância mínima de Ward. O número de grupos foi estabelecido por meio dos valores de *Cubic Clustering Criterion* (CCC) e a estatística Pseudo T^2 de *Hotelling* para determinar os números prováveis de agrupamentos, ou seja, os grupos com menor variância dentro dos grupos. O CCC é obtido comparando o R^2 observado (proporção de variância com a qual cada cluster contribui) com o R^2 esperado (em uma amostra de distribuição uniforme); valores positivos do CCC indicam a presença de clusters (SAS INSTITUTE INC, 1983). O cálculo da Pseudo T^2 auxilia na escolha de grupos mais homogêneos durante sua formação. Valores semelhantes entre dois grupos subsequentes não indica diminuição da variância dentro do grupo e valores mais altos indicam que o número de grupos separados não foi eficiente (SAS Institute Inc, 1983).

Os grupos formados por meio da análise de agrupamento foram melhor delimitados por meio da filtragem dos pixels do arquivo matricial, onde foram agrupadas as células mais próximas (filtro *Majoriry*) por meio do programa computacional ArcGIS (ESRI INC, 2014), de forma a tornar os dados mais contíguos. Para classificação supervisionada por meio da DA-PLS-2, delimitou-se amostras de treinamento gerando polígonos que representam novas unidade geomorfológicas, com auxílio da análise de agrupamento e da expertise prática (avaliação das assinaturas morfométricas e interpretação visual do relevo). Com o método de classificação supervisionada, o modelo DA-PLS encontra e reagrupa classes com mesmas assinaturas morfométricas. O produto das classificações pode conter ruídos aleatórios e regiões inválidas e para melhorar a delimitação das novas unidades geomorfológicas, foi feita limpeza no *raster* produzido, com procedimentos de suavização de limites, filtragem e remoção de pequenas regiões isoladas.

3. Resultados

3.1. Classificação, delimitação e avaliação das unidades geomorfológica

Os dados morfométricos foram usados em modelos de DA-PLS, gerando dois modelos. Na DA-PLS-1 onde foram avaliados os atributos que melhor separam regiões geomorfologicamente, o total de 9 componentes principais explicaram a variação de 34 % das variáveis dependentes (R^2Y) e explicaram 71% das variáveis preditoras (R^2X), como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo do resultado da DA-PLS realizados nos dados morfométricos e hidrológicos.

CP	R^2X	R^2X (Cumul.)	R^2Y	R^2Y (Cumul.)	Autovalores
1	0,22	0,22	0,12	0,12	8,43
2	0,16	0,38	0,04	0,16	5,93
3	0,10	0,48	0,06	0,22	3,36
4	0,05	0,53	0,05	0,27	2,01
5	0,06	0,59	0,02	0,28	2,16
6	0,05	0,63	0,02	0,30	1,69
7	0,03	0,66	0,01	0,32	1,00
8	0,03	0,69	0,01	0,33	0,99
9	0,02	0,71	0,01	0,34	0,88

Na matriz de confusão oriunda da validação cruzada (Tabela 3), derivada da DA-PLS-1 baseada na classificação geomorfológica do IBGE (IBGE, 2017), se nota baixa taxa de acerto para algumas unidades geomorfológicas, apresentando acurácia global de 42,98%. O mapa geomorfológico (Figura 3) tem maior grau de generalização; as regiões apresentam maior heterogeneidade, possivelmente sendo a causa do maior erro quando usados atributos morfométricos para quantificar as unidades geomorfológicas.

Tabela 3 – Matriz de validação cruzada pelo método *one-leave-out* pelas funções discriminantes gerada na DA-PLS e sua percentagem de acerto dentro da cada unidade geomorfológica (IBGE, 2017).

Unid. Geomorf.		1	2	3	4	5	6	7	Total %	Acurácia do Usuário %	Pe
1	% acerto	36,90	10,32	11,65	13,20	19,15	0,50	8,27	49,79	36,90	0,12
2	% acerto	5,24	77,28	0,19	9,71	1,94	4,47	1,17	0,83	77,28	0,00
3	% acerto	9,52	12,68	46,09	9,76	5,19	0,55	16,22	8,59	46,09	0,01
4	% acerto	9,33	22,06	8,77	43,68	3,51	6,31	6,34	24,05	43,68	0,05
5	% acerto	22,33	6,75	8,02	7,49	50,65	0,30	4,47	6,37	50,65	0,01
6	% acerto	1,12	5,37	0,12	15,23	2,75	75,03	0,37	1,29	75,03	0,00
7	% acerto	10,04	6,71	13,26	5,54	5,48	0,59	58,38	9,08	58,38	0,01
Total	% acerto	23,83	13,29	13,59	19,17	14,60	2,90	12,63			
Acurácia do Produtor	%	77,12	4,84	29,14	54,79	22,09	33,54	41,95			
Acurácia Global	%	42,98									

1 – Pontões da Bacia do rio Doce e Itapemirim; 2 - Colina e Maciços Costeiros Capixabas; 3 - Patamar Escalonado da Serra do Caparaó; 4 – Depressão do rio Itapemirim; 5 – Morros e Montanhas do centro sul capixaba; 6 - Planícies e terraços aluviais; 7 - Planalto Pedra Azul Capixaba; Pe: probabilidade de concordância.

Considerando a acurácia do produtor, a unidade geomorfológica 2, chamada Colinas e Maciços Costeiros Capixabas possuem o menor valor (4,84%) e o maior valor (77,12%) está associado a unidade geomorfológica 1, chamada de Pontões da Bacia do rio Doce e Itapemirim. Considerando a acuraria do usuário, o menor valor (36,90%) está associado a unidade geomorfológica 1 e o maior valor (77,28%) está associado a unidade geomorfologia 2. A acurácia global foi de 42,98% de acerto, demonstrando média taxa de acerto. A unidade geomorfológica 1 (Pontões da Bacia do rio Doce e Itapemirim) é a maior região do mapa e a mais heterogênea do relevo (Figura 3) com grandes variações de declividades e com predominância de zonas de cisalhamento e falhas. A unidade geomorfológica 2 (Colinas e Maciços Costeiros

Capixabas) possui corresponde a menor região do mapa e rugosidade diferenciada.

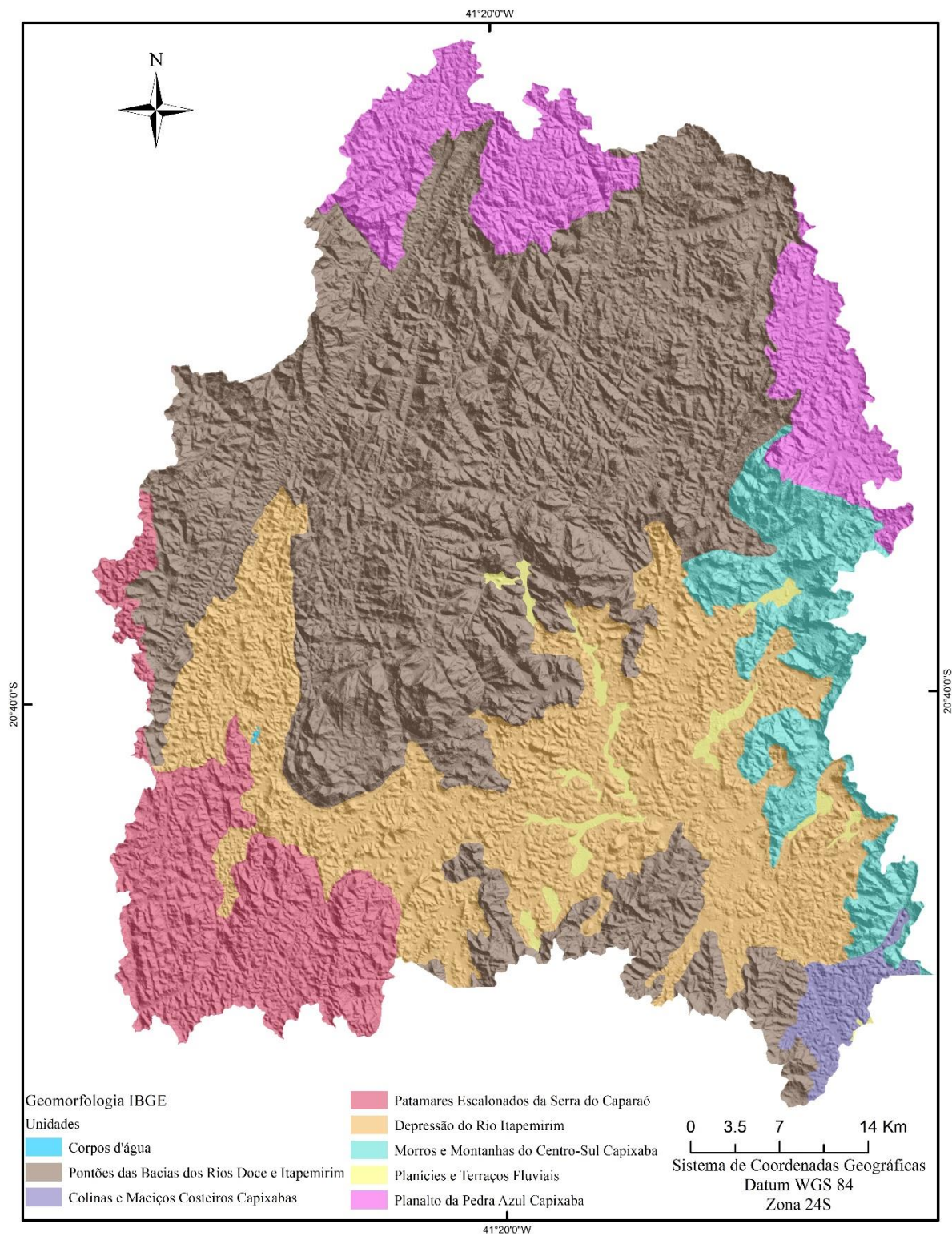


Figura 3 – Mapa geomorfológico na região média da bacia hidrográfica do rio Itapemirim (IBGE, 2017).

A análise de agrupamentos utilizando-se os escores dos 9 componentes principais obtidos na DA-PLS-1 foi feito usando a distância euclidiana (Tabela 2). Os clusters escolhidos foram os que possuíam menor *Pseudo T²* seguido de um aumento entre níveis de agrupamento e maior CCC (Figura 4), indicando 2, 3, 8 e 11 prováveis agrupamentos (DUDA; HART, 1973). Foram selecionados 8 grupos, dentro dos quais, espera-se uma maior homogeneidade dentro do grupo dos atributos morfométricos. Após agrupamento, delimitou-se regiões homogêneas e as unidades geomorfológicas foram separadas para formação dos grupos para o segundo modelo da DA-PLS-2, usado para a etapa de classificação supervisionada.

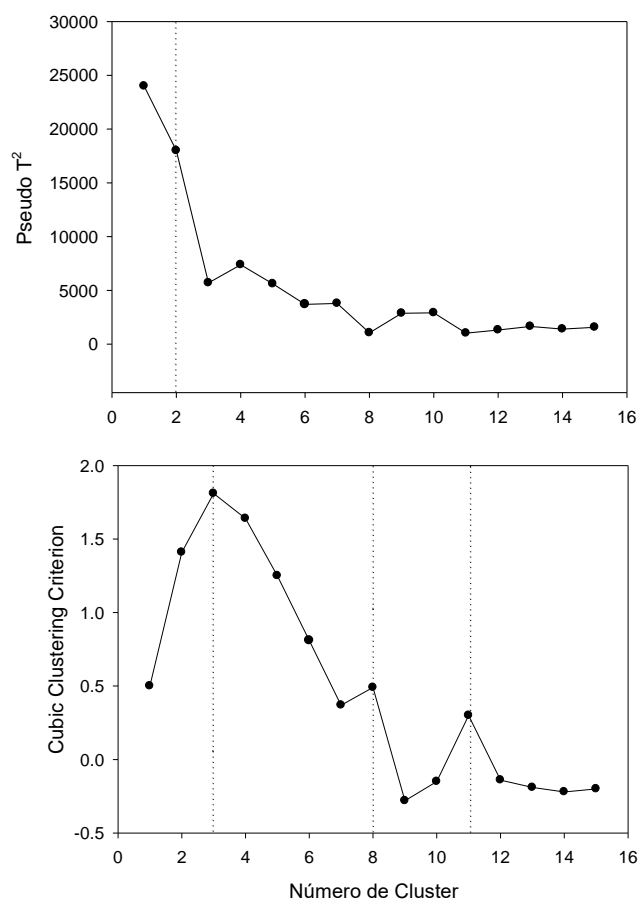


Figura 4 – Estatística do Pseudo T² e Cubic clustering criterion (CCC) em função do número de agrupamento. Os picos nos gráficos CCC e as depressões no gráfico Pseudo T² indicam prováveis agrupamentos e usados para definição dos grupos.

Os resultados da DA-PLS-2 (Tabela 4) obteve variação acumulada de 72% para variáveis independentes e 26% para as variáveis dependentes. Observa-se melhor predição das classes com as funções discriminantes do DA-PLS-2.

Tabela 4 – Resumo do resultado da DA-PLS-2 nos clusters obtidos no CCC.

CP	R ² X	R ² X(Cumul.)	R ² Y	R ² Y(Cumul.)	Autovalores
1	0,42	0,42	0,07	0,07	9,44
2	0,11	0,53	0,06	0,13	2,03
3	0,09	0,62	0,05	0,18	2,02
4	0,06	0,68	0,05	0,22	1,34
5	0,04	0,72	0,04	0,26	1,01

Ao avaliar o desempenho da delimitação das unidades geomorfológicas com a validação cruzada (Tabela 5), se nota melhora da porcentagem de acerto, que em geral, ficou acima dos 70%, demonstrando melhor desempenho que a validação cruzada da DA-PLS-1.

Tabela 5 – Matriz de confusão das amostras preditas pelo método validação cruzada leave-one-out entre as unidades geomorfológicas delimitados e os preditos pela DA-PLS-2.

Unid. Geromorf.		1	2	3	4	5	6	7	8	Total (%)	Acurácia do Usuário (%)	Pe
1	% acerto	73,18	3,28	0,05	1,08	3,15	2,76	7,32	9,18	15,35	73,18	0,02
2	% acerto	0,07	91,45	2,89	0,00	0,81	0,00	0,00	4,78	18,42	91,45	0,04
3	% acerto	0,00	26,21	73,30	0,00	0,36	0,00	0,00	0,13	4,88	73,30	0,00
4	% acerto	0,00	0,00	0,22	92,74	0,00	0,00	7,04	0,00	8,90	92,74	0,01
5	% acerto	6,85	0,54	0,14	0,00	74,29	6,62	0,93	10,62	8,32	74,29	0,01
6	% acerto	0,65	1,61	1,40	0,75	4,24	71,78	9,63	9,92	14,41	71,78	0,02
7	% acerto	8,42	0,00	0,56	6,70	0,00	7,36	76,13	0,84	14,49	76,13	0,02
8	% acerto	4,25	2,14	0,25	0,27	3,05	15,12	3,16	71,77	15,22	3,16	0,02
Total	% acerto	13,78	19,23	4,47	9,54	7,91	14,68	14,73	15,65			
Acurácia do Produtor	%	81,54	87,58	80,02	86,52	78,19	70,43	74,90	77,00			
Acurácia Global	%	78,39										

1 - Planícies e Terrações Aluviais; 2 - Depressão de colinas e morros suaves; 3 - Patamar escalonado planalto estrutural I; 4 - Patamar escalonado planalto estrutural II; 5 - Patamar escalonado planalto intermediário; 6 - Patamar escalonado de pontões e maciços serranos; 7 - Patamar escalonado de morrotes e serras escarpadas; 8 - Patamar escalonado planalto remanescente; Pe: probabilidade de concordância.

Considerando a acurácia do usuário, a unidade geomorfológica 2 e 4 (Depressão de colinas e morros suaves e Patamar escalonado planalto estrutural II) obtiveram maiores valores (91,45% e 92,74%, respectivamente). Com relação a a acurácia do produtor, as mesmas unidades geomorfológicas também possuíram os maiores valores (87,58% e 86,52%, respectivamente). Estas regiões possuem menores densidades de lineamentos e maior homogeneidade na textura do relevo. A acurácia global aumentou significativamente para 78,39%.

A avaliação da contribuição das variáveis nos componentes principais foi realizada por meio das cargas fatoriais, sendo considerado moderados entre 0,5 e 0,7 e fortes quando acima de 0,7 (Tabela 6 e Figura 5).

Para o PC1, que contribuiu com 42% da variância das variáveis independentes, observa-se elevada contribuição (>0.7) de *LS factor*, *Relative Slope Position*, *Slope Height*, *DEM*, *TRI*, *TWI* e *Slope*. As variáveis *Flow Accumulation*, *MRVB*, *Normalized Height*, *MDE* e *VDCN* tiveram uma contribuição moderada no PC1 (>0.5 e <0.7). Destaca-se os menores escores para unidade geomorfológicas Planícies e terrações aluviais e Depressão de colunas suaves e maior escores para a unidade Patamar escalonado de pontões e maciços serranos. O PC1 teve uma contribuição na separação das unidades geomorfológicas Patamar escalonado planalto estrutural I, Patamar escalonado planalto estrutural II, Patamar escalonado planalto intermediário, Patamar escalonado de morrotes e serras escarpadas e Patamar escalonado planalto remanescente (Figura 5). Os atributos se referem a influência da hidrologia e relevo na morfogênese do solo, indicando que quanto maior a altitude, declividade e fluxo, maior a perda de solo, sendo inversamente proporcional às regiões de baixada e a umidade do terreno.

No PC2 (11% de explicação das variáveis independentes e 6% das dependentes) existe forte contribuição *Plan Curvature* e *Profile Curvature* e contribuição moderada do *Mass Balance Index* e *Normalized Height*. A relação de menor *Normalized Height*, menor *Mass Balance Index*, menor *Plan* e *Profile Curvature* estão relacionados às unidades geomorfológicas Planícies e terrações aluviais e Depressão de colinas e morros suaves. Estes atributos relacionam principalmente a forma do relevo com ganho ou perdas de solo por sedimentação e formas do relevo.

O PC3 (9% das variáveis independentes e 5% das variáveis dependentes) possui forte contribuição do DEM (altitude), explicando pequena parte da variação dos dados, contudo, essa variação consegue distinguir as unidades geomorfológicas Patamar escalonado planalto estrutural II, Patamar escalonado de morrotes e serras escarpadas e Patamar escalonado planalto remanescente (Figura 5).

O PC4 (6% das variáveis independentes e 5% das variáveis dependentes) possui forte contribuição de densidade de falhas, e o PC5 (4% das

variáveis independentes e 4% das variáveis dependentes) fraca contribuição do MRVB. Para o PC4, destaca-se a unidade geomorfológica Patamar escalonado planalto intermediário, e no PC5 há uma forte contribuição da unidade geomorfológica Planícies e terrações aluviais (Figura 5).

Tabela 6 – Contribuição das componentes principais determinados na DA-PLS-2 com relação às unidades geomorfológicas.

Atributos	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Densidade Falhas	0,37	0,43	-0,05	0,78*	0,04
<i>LS-Factor</i>	0,84*	0,21	0,38	-0,12	-0,07
<i>Mass Balance Index</i> (MBI)	0,73*	-0,61*	-0,11	0,14	-0,07
Flow Accumulation	0,66*	-0,07	0,07	-0,23	0,38
<i>Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness</i> (MRVBF)	-0,63*	-0,01	-0,03	0,05	0,58*
<i>Normalized Height</i>	0,58*	-0,69*	-0,24	0,11	-0,10
<i>Plan Curvature</i>	0,31	-0,72*	-0,20	0,33	0,04
<i>Profile Curvature</i>	0,42	-0,72*	-0,31	0,14	0,09
<i>Relative Slope Position</i>	0,75*	-0,31	-0,26	-0,14	0,18
<i>Slope Height</i>	0,76*	-0,30	0,12	-0,03	0,37
<i>Digital Elevation Model</i> (DEM)	0,55*	0,34	-0,71*	-0,13	0,02
<i>Terrain Ruggedness Index</i> (TRI)	0,75*	0,20	-0,03	0,07	-0,27
<i>Topographic Wetness Index</i> (TWI)	-0,75*	0,37	0,03	-0,04	0,38
<i>Vertical Distance to Channel Network</i> (VDCN)	0,66*	-0,01	-0,04	-0,26	0,43
<i>Slope</i>	0,86*	0,05	0,36	-0,07	0,00

*Valores significantes acima de 0,5.

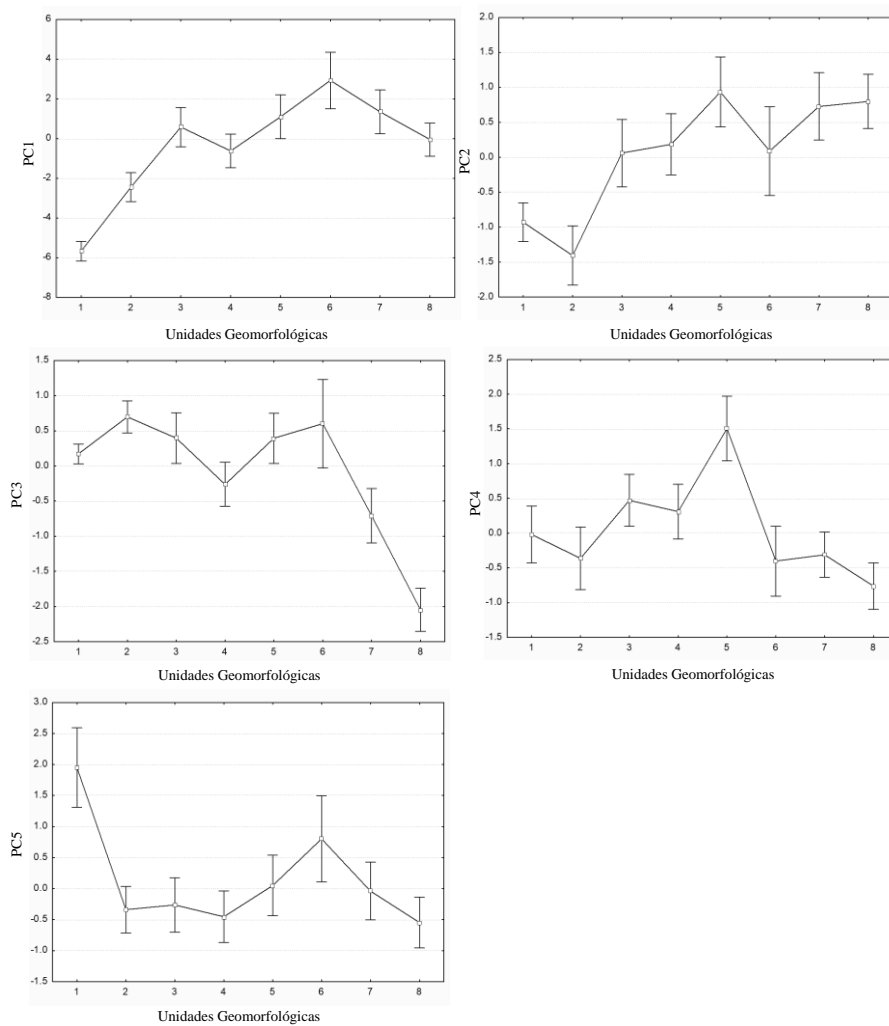


Figura 5 – Gráficos referentes a cada componente principal (Y) em relação as unidades geomorfológicas (X). 1 - Planícies e Terrações Aluviais; 2 - Depressão de colinas e morros suaves; 3 - Patamar escalonado planalto estrutural I; 4 - Patamar escalonado planalto estrutural II; 5 - Patamar escalonado planalto intermediário; 6 - Patamar escalonado de pontões e maciços serranos; 7 - Patamar escalonado de morrotes e serras escarpadas; 8 - Patamar escalonado planalto remanescente.

Como resultado obteve-se unidades geomorfológicas com menor grau de generalização e maior homogeneidade em relação aos atributos morfométricos (Figura 6 e 7).

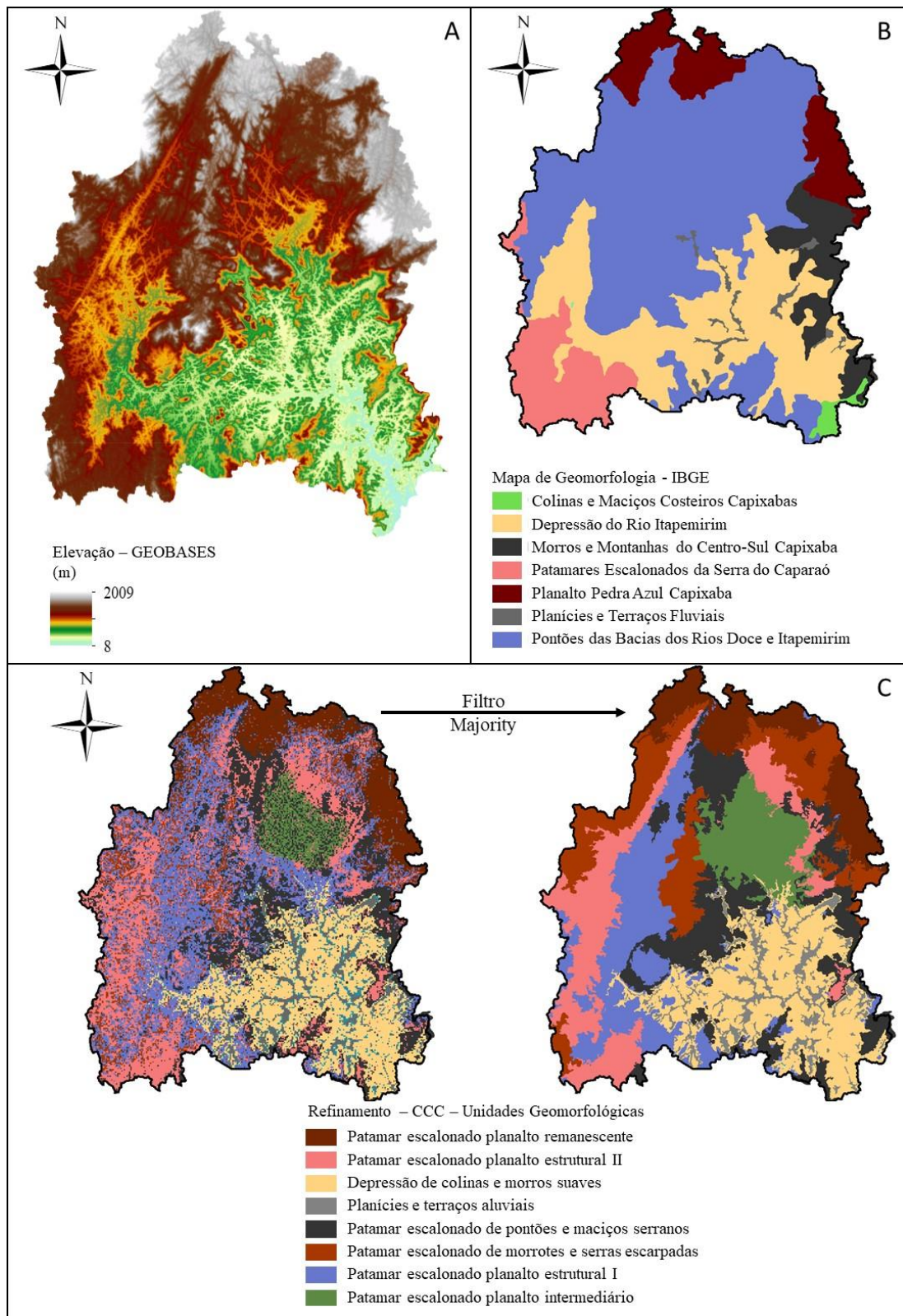


Figura 6 – Representação da utilização do filtro *Majority* agrupando as unidades geomorfológicas preliminar realizada pela DA-PLS-2 da região média da bacia hidrográfica do rio Itapemirim. A: Mapa de elevação; B: Mapa geomorfológico (IBGE, 2017); C: Refinamento na delimitação preliminar das unidades geomorfológicas.

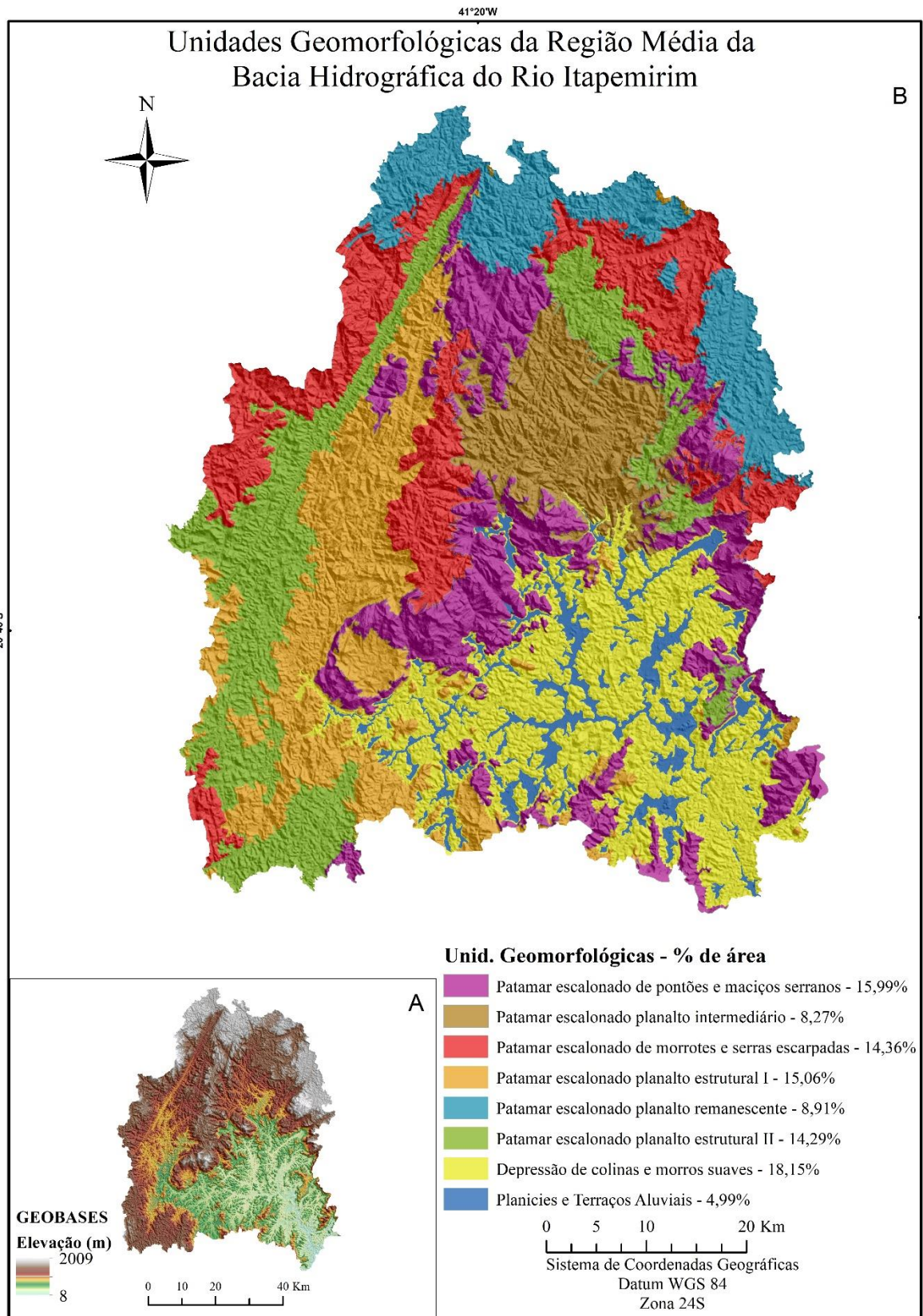


Figura 7 – Unidades geomorfológicas da Região Média da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim. A: Mapa de elevação; B: Mapa geomorfológico final.

A Unidade Geomorfológica Planícies e terraços aluviais é constituída por ambiente fluvial e de baixada, compostos por depósitos de areias quartzosas grossas, de grãos angulosos mal selecionados, conglomeráticas, micáceas, com

intercalações argilo-sílticas e argilosas, relacionados com planícies de inundação (VIEIRA; MENEZES, 2018).

A unidade geomorfológica Depressão de colinas e morros suaves se localiza predominantemente no município de Cachoeiro de Itapemirim. Possui altitudes entre 15 e 450 metros e está em região de depressão, com presença de poucas colinas dissecadas (AB'SÁBER, 2003), com relevo predominantemente suave e vales em forma de U. O abatimento do relevo em forma de depressão se deve ao encontro de pelo menos três (3) lineamentos de grande porte. A Zona de Cisalhamento Guaçuí atravessa a região de estudo em sua porção W, onde se encontra encaixado o Rio Braço Norte Esquerdo (BAYER *et al.*, 1987), compondo um feixe de lineamentos NNE-SSW. O Lineamento Alegre, de direção NNW-SSE, atravessa todo o sul capixaba e penetra na Bacia de Campos, onde controla altos e baixos estruturais (CALEGARI *et al.*, 2016). O Lineamento Piúma, que compõe um trend de direção NW-SE que delimita altos estruturais na parte sul da área de estudo (PEIXOTO-OLIVEIRA *et al.*, 2018; LOURENÇO *et al.*, 2016; FÉBOLI, 1993). Inclusive é possível observar outras estruturas que auxiliam na compartimentação do relevo não mapeadas. As unidades geológicas do embasamento cristalino têm sua origem vinculada aos eventos tectônicos que criaram o Orógeno Araçuá. São compostos por rochas metamórficas orto e para derivadas de idade Neoproterozoica (1000 a 630 Ma), com variadas composições químicas (gnaisses com intercalações de anfibolitos, quartzitos, rochas calcissilicáticas e mármore; gnaisses quartzosos; gonditos; kinzingitos; xistos com intercalações de rochas metavulcânicas; charnoquitos; e ortognaisses granodioríticos, graníticos e tonalíticos) (PEIXOTO-OLIVEIRA *et al.*, 2018).

As próximas unidades geomorfológicas possuem como característica estarem na região com maior controle estrutural, onde a dissecação do relevo reflete lineamentos geológicos, gerando patamares escalonados. Apresentam vales em V predominantemente, com maiores altitudes e declividades e predominância de rochas metamórficas orto derivadas e ígneas.

O Patamar escalonado planalto estrutural II está localizado com predominância de vales de forma de V, em geral, foi amplamente estudado por AB'SÁBER (2003) sendo classificado como domínio morfoclimático. Esta unidade compreende a região dentro da Zona de Cisalhamento Guaçuí no qual

corre o Rio Braço Esquerdo. Se destacam três lineamentos principais em formato de “leque”, nos quais esta unidade se encaixa, demonstrando pertencer ao processo extensional de separação dos continentes do final do Ciclo Brasileiro/Pan-Africano. Possui grande variação altimétrica (170 a 950 metros), com relevo apresentando dissecções mais profundas e maior rugosidade. Possui interface com a região próxima ao Maciço do Caparaó (lado esquerdo). A litologia predominante está associada a rochas Paleo a Neoproterozoicas (2.300 a 650 Ma), com predominância de rochas para derivadas (anfíbolitos, para e ortognaisses, charnoquitos, etc).

A unidade geomorfológica Patamar escalonado planalto estrutural I possui variação altimétrica entre 30 e 1500 metros e grandes declividades. Está situado em região ao lado esquerdo do Rio Braço Esquerdo e do Feixe de Lineamento Guaçuí, entre dois (2) grandes lineamentos. Possui rugosidade menor que o Patamar escalonado planalto estrutural II, porém com maior presença de lineamentos menores. As rochas predominantes são Paleo e Neoproterozoicas (1000 a 650 Ma), com predominância de ortognaisses (Ortognasse Muniz Freire – Granitoides Pré Colisionais) gnaisses para derivados (Bacia de Antearco).

A unidade geomorfológica Patamar escalonado de morrotes e serras escarpadas, se inicia aproximadamente 300 m acima da altitude da unidade anterior (350 a 1600 metros), ou seja, ocorre em patamar mais alto, sendo caracterizado por escarpas de falha. São regiões com grandes declividades e rugosidade menor, com presença de lineamentos de menor extensão. Esta região está ao lado do Maciço do Caparaó, abrangendo o degrau mais alto Zona de Cisalhamento Guaçuí e próximo ao Planalto Pedra Azul, em regiões típicas de colagem de terrenos do Ciclo Brasileiro/Pan-Africano. As rochas predominantes são Paleo a Neoproterozoicas (2300 a 630 Ma), sendo compostas principalmente pelas unidades mais antigas da área de estudo (Ortognaisses e metabasitos do embasamento) e também por ortognaisses.

A unidade geomorfológica Patamar escalonado planalto intermediário, possui variação altimétrica entre 100 e 950 metros e grande declividade. Esta região possui menor rugosidade, porém possui estruturas de grande porte, que recortam toda a unidade. Isto ocorre pelo encontro de duas grandes estruturas: lineamentos pertencentes ao Feixe de lineamento Guaçuí e Lineamento Piúma.

As rochas predominantes são Neoproterozoicas (650 Ma), onde estão presentes os ortognaisses Muniz Freire (Granitoides Pré Colisionais).

O unidade geomorfológica Patamar escalonado planalto remanescente está em região de altitude elevada (850 a 1400 metros aproximadamente), limitada na parte mais alta pelo Feixe de Lineamentos Guaçuí, Lineamento Piúma e Lineamento e outros lineamentos que não foram ainda descritos, porém possuem são paralelos ao Lineamento Batatal (ALKIMIN *et al.*, 2006). Apresenta rochas do embasamento (ortognaisses) e rochas intrusivas mais recentes (granitos e tonalitos).

A unidade geomorfológica Patamar escalonado de pontões e maciços serranos é a região que possui a maior amplitude altimétrica (50 a 2009 metros), no qual se localiza as regiões mais altas e resistentes do relevo. Esta unidade está associada principalmente a borda granítica dos maciços rochosos pós-colisionais e rochas metamórficas mais resistentes de composição granítica dentro e ao redor da bacia. As rochas predominantes são Neoproterozóica a Cambrianas (1000 a 540 Ma), correspondentes aos orto e para gnaisses mais antigos e as suítes graníticas pós-colisionais mais recentes (VIEIRA; MENEZES, 2018; VIEIRA, 1997). A maior resistência destes litotipos ocorre pela maior presença de quartzo, mineral resistente ao intemperismo.

4. Discussão

A densidade de lineamentos (Figura 8) é maior no Patamar escalonado planalto intermediário, onde os lineamentos influenciaram a forma do relevo e na sua dissecação, bem como no padrão de drenagem, no qual a litologia predominante é de ortognaisses. As regiões mais baixas do relevo apresentam menor densidade de falhas. O *LS Factor*, bem como o *Flow Accumulation*, *Profile Curvature*, *Relative Slope Position*, *Height Slope*, *VDCN* e *Slope* é maior na unidade geomorfológica Patamar escalonado de pontões e maciços serranos. Todas as outras unidades geomorfológicas referentes aos patamares escalonados (predominância de rochas gnáissicas de vários tipos) seguem com os segundos maiores valores. O *LS Factor* (índice topográfico de erosão hídrica) alto é resultado dos atributos declividade e fluxo acumulado para seu cálculo. As regiões de grandes altitudes possuem lineamentos que provocam grandes

sulcamentos do relevo, sendo acentuados pelo clima, gerando altos valores de declive. Os ambientes de patamares escalonados também possuem os maiores valores de *Mass Balance Index* (MBI) bem como de altitude normalizada, plano de curvatura e rugosidade do terreno. Valores BMI positivos indicam áreas de rede erosão, como encostas convexas (MÖLLER *et al.*, 2012), confirmando a vulnerabilidade dessas regiões à erosão.

Em contrapartida, a unidade geomorfológica Planícies e Terraços Aluviais é o inverso das unidades geomorfológicas de patamares escalonados, possuindo os menores valores para LS Factor, *Flow Accumulation*, *Profile Curvature*, *Relative Slope Position*, *Height Slope*, VDCN, *Slope*, MBI, *Normalized Height Terrain Roughness Index* (Figura 8). Essa unidade geomorfológica é dominada pela dinâmica fluvial (VIEIRA; MENEZES, 2018) em regiões de baixada (baixas declividades e altitudes). Valores de MBI próximos a 0, como é o caso deste unidade geomorfológica, se referem a áreas com um equilíbrio entre erosão e deposição (não ocorre deposição nem erosão de solos e sedimentos) como áreas com área mais planas (MÖLLER *et al.*, 2012).

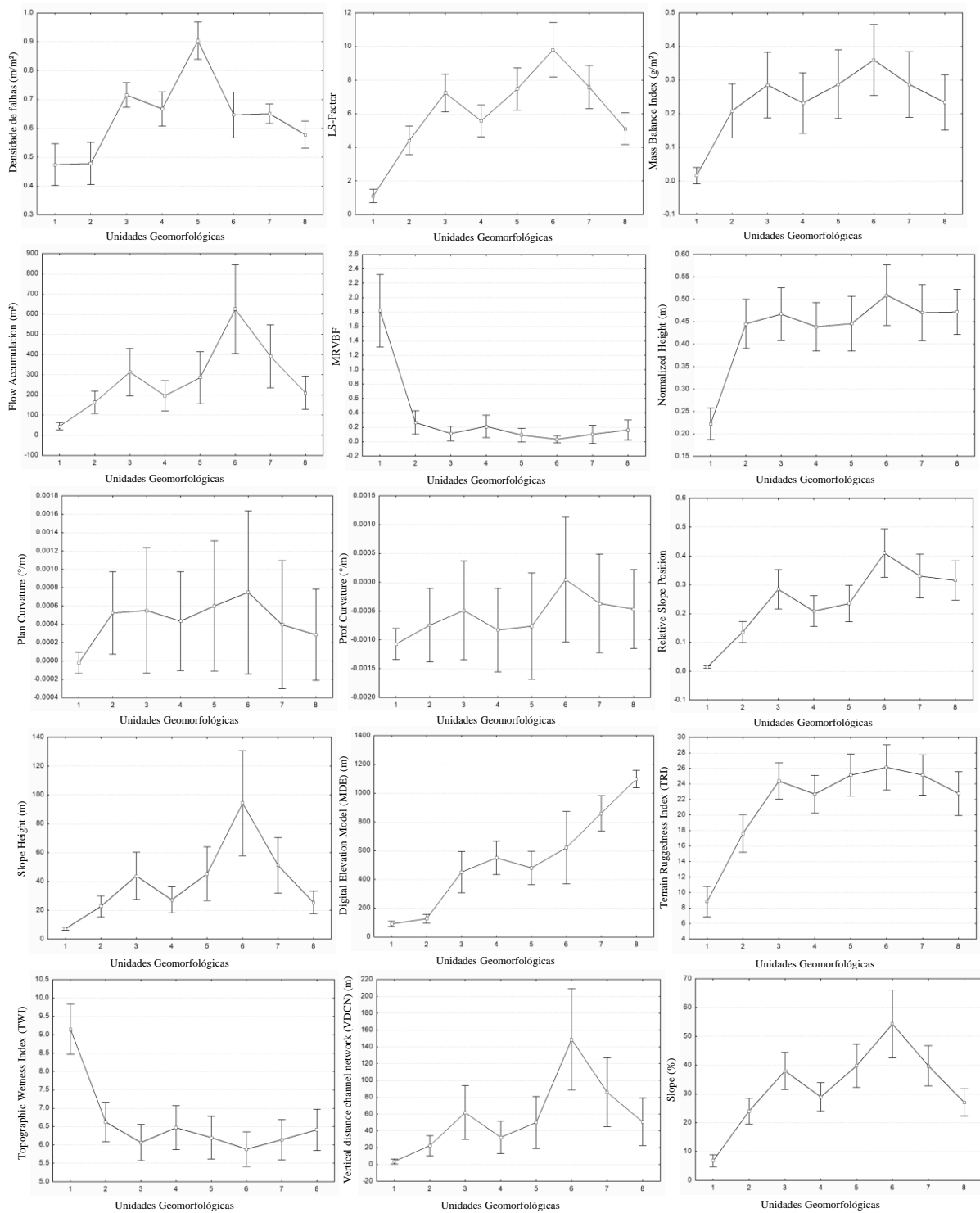


Figura 8 - Gráficos dos atributos de relevo (média \pm desvio padrão) x unidades geomorfológicas. 1 - Planícies e Terrações Aluviais; 2 - Depressão de colinas e morros suaves; 3 - Patamar escalonado planalto estrutural I; 4 - Patamar escalonado planalto estrutural II; 5 - Patamar escalonado planalto intermediário; 6 - Patamar escalonado de pontões e maciços serranos; 7 - Patamar escalonado de morrotes e serras escarpadas; 8 - Patamar escalonado planalto remanescente.

É possível observar a correspondência das unidades geomorfológicas, geologia e estruturas geológicas (CPRM, 2018), nos quais os atributos de relevo foram eficientes em representar esta correspondência (Figura 9). Poucos

trabalhos (BURGOS, 2009; CURCIO, 2006) demonstram a importância e a eficiência da determinação de compartimentos para explicar a distribuição espacial de parâmetros como atributos do solo, geologia, estruturas e vegetação.

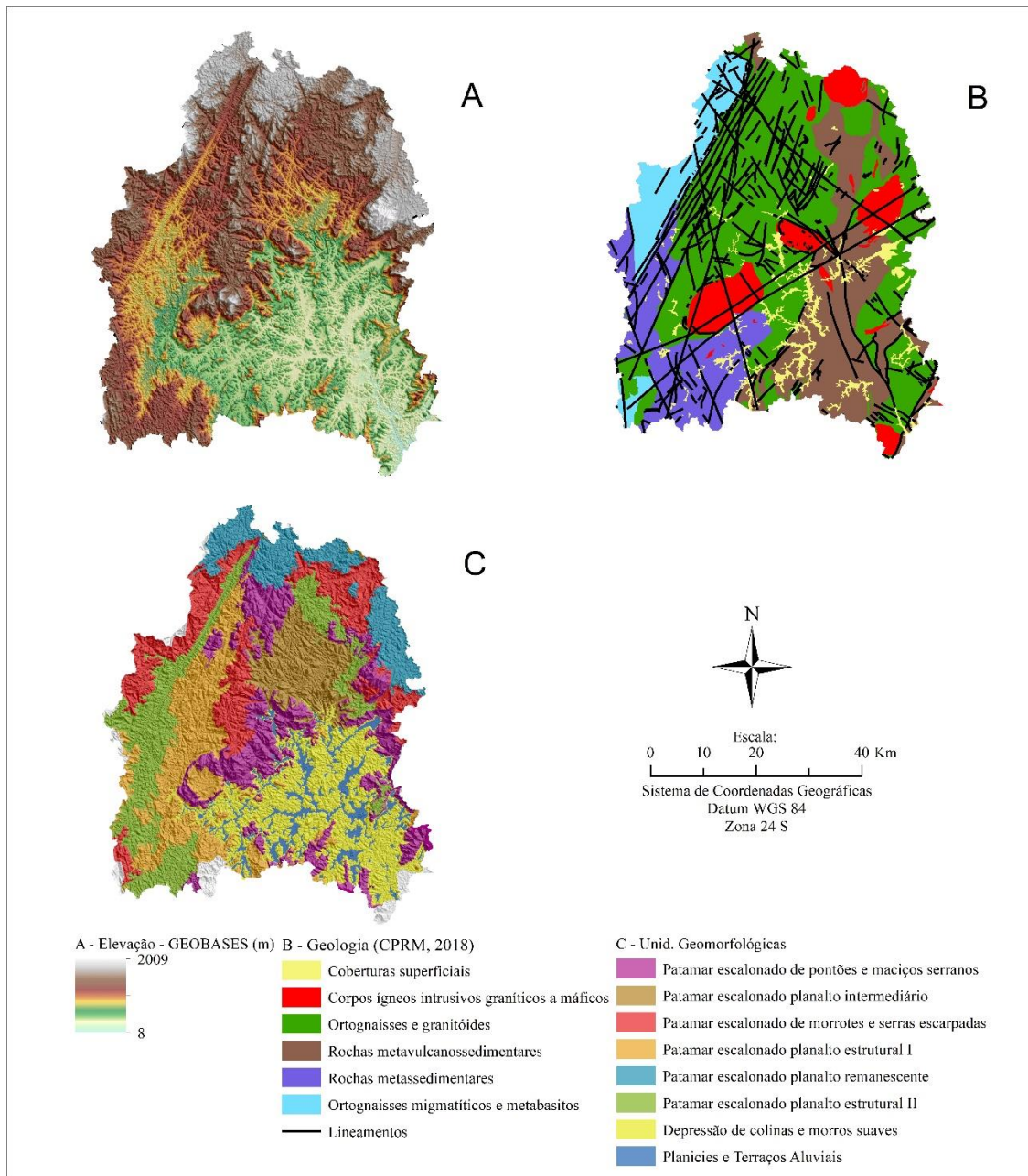


Figura 9 – Unidades geomorfológicas, modelo digital de elevação, idades das rochas e geologia da Região Média da Bacia do Rio Itapemirim.

Ao se analisar os dados obtidos, se nota a importância da história geológico-estrutural e a grande heterogeneidade litológica na dissecação e alteração do relevo em função do clima. Assim, tendências morfoestruturais e morfoclimáticas agem em conjunto. (PACHECO, 2011), ao estudar parte da área

de estudo, descreve a região relatando padrões de drenagem densos e influenciados por estruturas e geologia da área.

De acordo com os estudos acima, podemos notar claramente a relação das estruturas geológicas com a delimitação das unidades geomorfológica e influência na compartimentação do relevo (PEIXOTO-OLIVEIRA *et al.*, 2018; GOMES, 2016; LOURENÇO *et al.*, 2016). As estruturas com direção NE-SE a N-S (sin a pós-colisional), correspondem as zonas de cisalhamento e falhas de empurrão da área de estudo (Zona de Cisalhamento Guaçuí, Lineamento Batatal, dentre outros não descritos), referentes aos processos orogênicos do Ciclo Brasileiro/Pan-Africano, tem idade Neoproterozoica a Paleozoica, da época da aglutinação do Gondwana Ocidental. As estruturas com direção NW-SE a W-E estão associadas ao evento extensional ligados a ruptura do Gondwana, com abertura continental, que se referem aos lineamentos Piúma, Colatina e Alegre (CALEGARI, 2015; ALKIMIN *et al.*, 2006). Os processos distensivos referentes a separação dos continentes foram mais relevantes para a área de estudo pois levou grandes lineamentos a se cruzarem e formarem abatimentos do relevo. O formato em “leque” do feixe de lineamentos Guaçuí bem como os locais de encontro de lineamentos geraram ambientes diversificados, que puderam ser delimitados pela DA-PLS realizadas na área de estudo.

A metodologia de análise discriminante é eficiente para determinar as unidades geomorfológicas, como comprovado por SOARES *et al.* (2018) ao aplicar em variáveis morfométricas. Porém, a utilização do método DA-PLS aliada à análise de agrupamento constitui uma inovação, pois ainda não foram encontrados trabalhos publicados com tal uso da metodologia. A DA-PLS é mais utilizada em classificação de imagens, ou seja, levando em consideração somente um atributo (GUTIERRES *et al.*, 2020; LOTTERING *et al.*, 2020; MITHAN; HALES; CLEALL, 2019; MÖCKEL *et al.*, 2014).

Trabalhos como os de LANI; REZENDE; RESENDE (2001) e PEIXOTO-OLIVEIRA *et al.* (2018) realizaram estratificações do relevo, demonstrando a relevância do estudo geológico-estrutural na compartimentação do relevo no sul do ES e melhor entendimento dos processos ambientais da área de estudo.

5. Conclusões

A conjugação dos métodos de DA-PLS e análise de agrupamento foi eficiente em estratificar oito (8) unidades geomorfológicas a saber: Planícies e terraços aluviais, Depressão de colinas e morros suaves, Patamar escalonado planalto estrutural I, Patamar escalonado planalto estrutural II, Patamar escalonado planalto intermediário, Patamar escalonado de pontões e maciços serranos, Patamar escalonado de morrotes e serras escarpadas, Patamar escalonado planalto remanescente.

Cada unidade possui características peculiares, principalmente de acordo a influência de lineamentos e história geológica.

6. Bibliografia

- AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. Available at: https://www.academia.edu/36477295/RESENHA_-_ABSÁBER_Aziz_Nacib._Os_domínios_de_natureza_no_Brasil_potencialidades_paisagísticas._São_Paulo_Ateliê_Editorial_2003.
- ALKIMIN, F. F.; MARSHAK, S.; WHITTINGTON, A.; & PREDROSA-SOARES, A. C. Extensional collapse in the Neoproterozoic Araçuaí orogen, eastern Brazil: A setting for reactivation of asymmetric crenulation cleavage. **Journal Structural Geology**, vol. 28, p. 129–147, 2006. .
- ALMEIDA, F. F. M. de; BRITO NEVES, B. B. de; DAL RÉ CARNEIRO, C. The origin and evolution of the South American Platform. **Earth-Science Reviews**, vol. 50, no. 1–2, p. 77–111, May 2000. DOI 10.1016/S0012-8252(99)00072-0. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0012825299000720>.
- APARNA, P.; NIGEE, K.; SHIMNA, P.; DRISSIA, T. K. Quantitative analysis of geomorphology and flow pattern analysis of Muvattupuzha River Basin using geographic information system. **Aquatic Procedia**, vol. 4, p. 609–616, 2015. DOI 10.1016/j.aqpro.2015.02.079. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214241X15000802>.
- ARGENTO, M. S. F. Mapeamento geomorfológico. *In*: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Orgs. . (eds.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008. p. 365–391.
- ASFAW, D.; WORKINEH, G. Quantitative analysis of morphometry on Ribb and Gumara watersheds: Implications for soil and water conservation. **International Soil and Water Conservation Research**, vol. 7, no. 2, p. 150–157, Jun. 2019. DOI 10.1016/j.iswcr.2019.02.003. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2095633918301527>.
- BAYER, P.; SCHMIDT-THOMÉ, R.; WEBER-DIEFENBACH, K.; HORN, H. A.

Complex concentric granitoid intrusions in the coastal mobile belt, Espírito Santo, Brazil: The Santa Angélica Pluton — an example. **Geologische Rundschau**, vol. 76, no. 2, p. 357–371, Jun. 1987. DOI 10.1007/BF01821080. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/BF01821080>.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. **Hydrological Sciences Bulletin**, vol. 24, no. 1, p. 43–69, Mar. 1979. DOI 10.1080/02626667909491834. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02626667909491834>.

BÖHNER, J.; SELIGE, T. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. **SAGA - Analysis and Modelling Applications**, vol. 115, p. 13–27, 2006. .

BURGOS, D. C. **Mapeamento geomorfológico aplicado a análise ambiental: estudo de caso Serra da Jaqueçaba e seu entorno (Espírito Santo - Brasil)**. 2009. 96 f. Universidade Federal do Espírito Santo, 2009.

CALEGARI, S. S. **Significado e influência do lineamento alegre na evolução tectônica da bacia de campos e margem continental adjacente, sudeste do Brasil**. 2015. Universidade de Brasília, Brasília, 2015. DOI 10.26512/2015.08.D.19846. Available at: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/19846>.

CALEGARI, S. S.; NEVES, M. A.; GUADAGNIN, F.; FRANÇA, G. S.; VICENTELLI, M. G. C. The Alegre Lineament and its role over the tectonic evolution of the Campos Basin and adjacent continental margin, Southeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, vol. 69, p. 226–242, Aug. 2016. DOI 10.1016/j.jsames.2016.04.005. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0895981116300451>.

CURCIO, G. R. **Relações entre geologia, geomorfologia, pedologia e fitossociologia nas planícies fluviais do Rio Iguaçu, Paraná, Brasil**. 2006. 511 f. Universidade Federal do Paraná, 2006.

DESMET, P.; GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, vol. 51, p. 427–433, 1996. .

DIKAU, R. Entwurf einer geomorphographisch-analytischen Systematik von Reliefeinheiten. **Heidelberger Geographische Bausteine**, vol. 5, p. 1–45, 1988. .

DOWNS, P. W.; BOOTH, D. B. Geomorphology in environmental management. **The SAGE Handbook of Geomorphology**. 1 Oliver's Yard, 55 City Road, London EC1Y 1SP United Kingdom: SAGE Publications Ltd, 2011. p. 78–104. DOI 10.4135/9781446201053.n5. Available at: http://sk.sagepub.com/reference/hdbk_geomorphology/n5.xml.

DUDA, R. O.; HART, P. E. **Pattern classification and scene analysis**. [S. l.]: Wiley, 1973. Available at: <https://books.google.com.br/books?id=POMGRAACAAJ>.

- ESPÍRITO SANTO, E. do. **Atlas de ecossistemas do Espírito Santo**. Vitória. ES: Secretaria de Estado para Assuntos do Meio Ambiente - SEAMA, 2008.
- ESRI INC. ArcGis Desktop. 2014. .
- FARHAN, Y.; ANBAR, A.; AL-SHAIKH, N.; MOUSA, R. Prioritization of semi-arid agricultural watershed using morphometric and principal component analysis, remote sensing, and GIS techniques, the Zerqa River Watershed, Northern Jordan. **Agricultural Sciences**, vol. 08, no. 01, p. 113–148, 2017. DOI 10.4236/as.2017.81009. Available at: <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/as.2017.81009>.
- FÉBOLI, W. L. **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil: Piúma. Folha SF.24-V-A-VI. Estado do Espírito Santo. Escala 1:100.000**. Brasília: [s. n.], 1993.
- FENTA, A. A.; YASUDA, H.; SHIMIZU, K.; HAREGEWEYN, N.; WOLDEAREGAY, K. Quantitative analysis and implications of drainage morphometry of the Agula watershed in the semi-arid northern Ethiopia. **Applied Water Science**, vol. 7, no. 7, p. 3825–3840, 7 Nov. 2017. DOI 10.1007/s13201-017-0534-4. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s13201-017-0534-4>.
- FREEMAN, T. G. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. **Computers & Geosciences**, vol. 17, no. 3, p. 413–422, Jan. 1991. DOI 10.1016/0098-3004(91)90048-I. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/009830049190048I>.
- GELADI, P.; KOWALSKI, B. R. Partial least-squares regression: a tutorial. **Analytica Chimica Acta**, vol. 185, p. 1–17, 1986. DOI 10.1016/0003-2670(86)80028-9. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0003267086800289>.
- GOMES, B. L. **Lineamento lúna: origem, significado e reativações**. 2016. 114 f. Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, 2016.
- GUTIERRES, H. E. P.; RODRIGUES, J. D. O. N.; SANTOS, C. J. da S.; PEREIRA, V. D. A abordagem da geomorfologia nos estudos de impacto ambiental para fins de licenciamento no Estado da Paraíba. **Geografia Ensino & Pesquisa**, vol. 24, p. 57, 31 Dec. 2020. DOI 10.5902/2236499448365. Available at: <https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/48365>.
- HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; CAMPOS NETO, M. da C.; SILVA, L. C. da; TROUW, R. A. J.; JANASI, V. de A. **Província Mantiqueira. Geologia do continente sul-americano:: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. [S. l.]: Beca, 2004.
- IBGE, I. de G. e E. Mapa geomorfológico do Estado do Espírito Santo. 2017. .
- IWAHASHI, J.; PIKE, R. J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. **Geomorphology**, vol. 86, no. 3–4, p. 409–440, May 2007. DOI 10.1016/j.geomorph.2006.09.012. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X06004375>.

- KABITE, G.; GESSESSE, B. Hydro-geomorphological characterization of Dhidhessa River Basin, Ethiopia. **International Soil and Water Conservation Research**, vol. 6, no. 2, p. 175–183, Jun. 2018. DOI 10.1016/j.iswcr.2018.02.003. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2095633917302496>.
- KAUR, M.; SINGH, S.; VERMA, V. K.; PATERIYA, B. Quantitative geomorphological analysis & Land Use/ Land Cover Change Detection of Two Sub-Watersheds in NE region of Punjab, India. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, vol. XL–8, p. 371–375, 28 Nov. 2014. DOI 10.5194/isprsarchives-XL-8-371-2014. Available at: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-8/371/2014/>.
- KHARE, D. Morphometric analysis for prioritization using remote sensing and GIS techniques in a Hilly Catchment in the State of Uttarakhand, India. **Indian Journal of Science and Technology**, vol. 7, no. 10, p. 1650–1662, 20 Oct. 2014. DOI 10.17485/ijst/2014/v7i10.18. Available at: <https://indjst.org/articles/morphometric-analysis-for-prioritization-using-remote-sensing-and-gis-techniques-in-a-hilly-catchment-in-the-state-of-uttarakhand-india>.
- KNUEPFER, P. L. K.; PETERSEN, J. F. Geomorphology in the public eye: policy issues, education, and the public. **Geomorphology**, vol. 47, no. 2–4, p. 95–105, Oct. 2002. DOI 10.1016/S0169-555X(02)00089-2. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X02000892>.
- KONSOER, K. M.; KITE, J. S. Application of LiDAR and discriminant analysis to determine landscape characteristics for different types of slope failures in heavily vegetated, steep terrain: Horseshoe Run watershed, West Virginia. **Geomorphology**, vol. 224, p. 192–202, Nov. 2014. DOI 10.1016/j.geomorph.2014.06.030. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X14003663>.
- KÖTHE, R.; LEHMEIER, F. SARA - Ein System zur automatischen Relief-Analyse. **Z. Angew. Geogr.**, vol. 4, p. 11–21, 1993. .
- LANI, J. L.; REZENDE, S. B. de; RESENDE, M. Estratificação de ambientes com base nas classes de solos e outros atributos na Bacia do Rio Itapemirim, Espírito Santo. **Revista CERES**, v48, n276, Viçosa, MG, , p. 239–261, 2001. .
- LOTTERING, R. T.; GOVENDER, M.; PEERBHAY, K.; LOTTERING, S. Comparing partial least squares (PLS) discriminant analysis and sparse PLS discriminant analysis in detecting and mapping *Solanum mauritianum* in commercial forest plantations using image texture. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 159, p. 271–280, Jan. 2020. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2019.11.019. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924271619302795>.
- LOURENÇO, F. S.; ALKMIM, F. F. de; ARAÚJO, M. N. C. de; ROMEIRO, M. A. T.; MATOS, G. C. de; CRÓSTA, A. P. The Piúma lineament, southern Espírito Santo: structural expression and tectonic significance. **Brazilian Journal of Geology**, vol. 46, no. 4, p. 531–546, Dec. 2016. DOI

10.1590/2317-4889201620150038. Available at:
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2317-48892016000400531&lng=en&tlng=en.

MARQUES, S. M. Ciência geomorfológica. *In*: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Orgs.). (eds.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008. p. 23–50.

MEVIK, B. H.; CEDERKVIST, H. R. Mean squared error of prediction (MSEP) estimates for principal component regression (PCR) and partial least squares regression (PLSR). **Journal of Chemometrics**, vol. 18, no. 9, p. 422–429, Sep. 2004. DOI 10.1002/cem.887. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cem.887>.

MEVIK, B. H.; WEHRENS, R. The pls Package: Principal Component and Partial Least Squares Regression in R. **Journal of Statistical Software**, vol. 18, no. 2, 2007. DOI 10.18637/jss.v018.i02. Available at: <http://www.jstatsoft.org/v18/i02/>.

MITHAN, H. T.; HALES, T. C.; CLEALL, P. J. Supervised classification of landforms in Arctic mountains. **Permafrost and Periglacial Processes**, , p. ppp.2015, 11 Jul. 2019. DOI 10.1002/ppp.2015. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ppp.2015>.

MÖCKEL, T.; DALMAYNE, J.; PRENTICE, H.; EKLUNDH, L.; PURSCHKE, O.; SCHMIDTLEIN, S.; HALL, K. Classification of grassland successional stages using airborne hyperspectral imagery. **Remote Sensing**, vol. 6, no. 8, p. 7732–7761, 20 Aug. 2014. DOI 10.3390/rs6087732. Available at: <http://www.mdpi.com/2072-4292/6/8/7732>.

MÖLLER, M.; KOSCHITZKI, T.; HARTMANN, K.-J.; JAHN, R. Plausibility test of conceptual soil maps using relief parameters. **CATENA**, vol. 88, no. 1, p. 57–67, Jan. 2012. DOI 10.1016/j.catena.2011.08.002. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0341816211001597>.

MÖLLER, M.; VOLK, M.; FRIEDRICH, K.; LYMBURNER, L. Placing soil-genesis and transport processes into a landscape context: A multiscale terrain-analysis approach. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, vol. 171, no. 3, p. 419–430, Jun. 2008. DOI 10.1002/jpln.200625039. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jpln.200625039>.

NAGHIBI, S. A.; MORADI DASHTPAGERDI, M. Evaluation of four supervised learning methods for groundwater spring potential mapping in Khalkhal region (Iran) using GIS-based features. **Hydrogeology Journal**, vol. 25, no. 1, p. 169–189, 16 Feb. 2017. DOI 10.1007/s10040-016-1466-z. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10040-016-1466-z>.

NEVES, B. B. de B.; NETO, M. da C. C.; FUCK, R. A. From Rodinia to Western Gondwana: An approach to the Brasiliano-Pan African Cycle and orogenic collage. **Episodes**, vol. 22, no. 3, p. 155–166, 1 Sep. 1999. DOI 10.18814/epiiugs/1999/v22i3/002. Available at: <http://www.episodes.org/journal/view.html?doi=10.18814/epiiugs/1999/v22i3/002>.

- O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, vol. 28, no. 3, p. 323–344, Dec. 1984. DOI 10.1016/S0734-189X(84)80011-0. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734189X84800110>.
- PACHECO, A. A. **Pedogênese e distribuição espacial dos solos da bacia hidrográfica do rio Alegre-ES**. 2011. 148 f. Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2011.
- PANDE, C. B.; MOHARIR, K. GIS based quantitative morphometric analysis and its consequences: a case study from Shanur River Basin, Maharashtra India. **Applied Water Science**, vol. 7, no. 2, p. 861–871, 23 May 2017. DOI 10.1007/s13201-015-0298-7. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s13201-015-0298-7>.
- PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; WIEDEMANN, C. M.; PINTO, C. P. The Araçuaí-West-Congo Orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. **Precambrian Research**, vol. 110, no. 1–4, p. 307–323, 1 Aug. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00174-7](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00174-7).
- PEIXOTO-OLIVEIRA, J.; NEVES, M. A.; CALEGARI, S. S.; GUADAGNIN, F. Compartimentação morfoestrutural da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim, sul do estado do Espírito Santo. **Geologia USP. Série Científica**, vol. 18, no. 2, p. 57–70, 24 Jul. 2018. DOI 10.11606/issn.2316-9095.v18-134749. Available at: <https://www.revistas.usp.br/guspsc/article/view/148391>.
- PÉREZ-ENCISO, M.; TENENHAUS, M. Prediction of clinical outcome with microarray data: A partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) approach. **Human Genetics**, vol. 112, no. 5–6, p. 581–592, 2003. <https://doi.org/10.1007/s00439-003-0921-9>.
- QGIS.ORG. QGIS Geographic Information System. 2021. .
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Viena, 2013. Available at: <http://www.r-project.org/>.
- RAI, P. K.; MOHAN, K.; MISHRA, S.; AHMAD, A.; MISHRA, V. N. A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India. **Applied Water Science**, vol. 7, no. 1, p. 217–232, 7 Mar. 2017. DOI 10.1007/s13201-014-0238-y. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s13201-014-0238-y>.
- RILEY, S.; DEGLORIA, S.; ELLIOT, S. D. A Terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. **Internation Journal of Science**, vol. 5, p. 23–27, 1999. .
- SAS INSTITUTE INC. **Technical Report A-108 Cubic Clustering Criterion**. Cary: [s. n.], 1983.
- SINGH, O.; SARANGI, A.; SHARMA, M. C. Hypsometric integral estimation methods and its relevance on erosion status of North-Western Lesser Himalayan Watersheds. **Water Resources Management**, vol. 22, no. 11, p. 1545–1560, 16 Nov. 2008. DOI 10.1007/s11269-008-9242-z. Available

at: <http://link.springer.com/10.1007/s11269-008-9242-z>.

- SINOWSKI, W.; AUERSWALD, K. Using relief parameters in a discriminant analysis to stratify geological areas with different spatial variability of soil properties. **Geoderma**, vol. 89, no. 1–2, p. 113–128, Apr. 1999. DOI 10.1016/S0016-7061(98)00127-X. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001670619800127X>.
- SOARES, M. R. G. de J.; OKA-FIORI, C.; SILVEIRA, C. T. da; KAVISKI, E. Avaliação do método de levantamento morfométrico em bacias hidrográficas através da estatística multivariada. **Geosul**, vol. 33, no. 68, p. 83–97, 19 Sep. 2018. DOI 10.5007/2177-5230.2018v33n68p83. Available at: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/geosul/article/view/2177-5230.2018v33n68p83>.
- SONI, S. Assessment of morphometric characteristics of Chakrar watershed in Madhya Pradesh India using geospatial technique. **Applied Water Science**, vol. 7, no. 5, p. 2089–2102, 29 Sep. 2017. DOI 10.1007/s13201-016-0395-2. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s13201-016-0395-2>.
- STATSOFT, I. STATISTICA (data analysis software system), version 10. 2011. Available at: www.statsoft.com.
- TARINI, M.; CIGNONI, P.; MONTANI, C. Ambient occlusion and edge cueing for enhancing real time molecular visualization. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, vol. 12, no. 5, p. 1237–1244, Sep. 2006. DOI 10.1109/TVCG.2006.115. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4015487/>.
- TROMPETTE, R. **Geology of Western Gondwana (2000 - 500 Ma)**. [S. I.]: CRC Press, 2020. DOI 10.1201/9781003077664. Available at: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781000099690>.
- TROMPETTE, R. Neoproterozoic (~600 Ma) aggregation of Western Gondwana: a tentative scenario. **Precambrian Research**, vol. 82, no. 1–2, p. 101–112, Mar. 1997. DOI 10.1016/S0301-9268(96)00045-9. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301926896000459>.
- USGS, U. S. G. S. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Non-Void Filled. 2017. <https://doi.org/10.5066/F7PR7TFT>.
- VAIDYA, N.; KUNIYAL, J. C.; CHAUHAN, R. Morphometric analysis using Geographic Information System (GIS) for sustainable development of hydro power projects in the lower Satluj river catchment in Himachal Pradesh, India. **INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOMATICS AND GEOSCIENCES**, 2013. .
- VIEIRA, V. S. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil. Projeto mapeamento geológico/metalogenético sistemático. Cachoeiro do Itapemirim. Folha SF.24.Z-V-A. Brasília, , p. 110, 1997. .
- VIEIRA, V. S.; MENEZES, R. G. de. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Espírito Santo: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais**. CPRM. Belo Horizonte: [s. n.], 2015.

- VIEIRA, V. S.; MENEZES, R. G. de. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Espírito Santo: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2018.
- VIEIRA, V. S.; SILVA, M. A.; CORRÊA, T. R.; LOPES, N. H. B. Mapa Geológico do Estado do Espírito Santo. **CPRM**, Belo Horizonte, 2018. .
- WANG, G.; CHEN, X.; CHEN, W. Spatial prediction of landslide susceptibility based on GIS and discriminant functions. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, vol. 9, no. 3, p. 144, 29 Feb. 2020. DOI 10.3390/ijgi9030144. Available at: <https://www.mdpi.com/2220-9964/9/3/144>.
- WANG, X.; LI, X.; MA, R.; LI, Y.; WANG, W.; HUANG, H.; XU, C.; AN, Y. Quadratic discriminant analysis model for assessing the risk of cadmium pollution for paddy fields in a county in China. **Environmental Pollution**, vol. 236, p. 366–372, May 2018. DOI 10.1016/j.envpol.2018.01.088. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749117338587>.
- WILSON, J.; GALLANT, J. Primary topographic attributes. **Terrain Analysis: Principles and Applications**. New York: John Wiley & Sons, 1999. p. 51–85. Available at: https://www.researchgate.net/publication/303543730_Primary_topographic_attributes/stats.
- YE, X.; SAKAI, K.; SASAO, A.; ASADA, S. Potential of airborne hyperspectral imagery to estimate fruit yield in citrus. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, vol. 90, no. 2, p. 132–144, Feb. 2008. DOI 10.1016/j.chemolab.2007.09.002. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169743907001724>.
- ZEVENBERGEN, L. W.; THORNE, C. R. Quantitative analysis of land surface topography. **Earth Surface Processes and Landforms**, vol. 12, no. 1, p. 47–56, Jan. 1987. DOI 10.1002/esp.3290120107. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.3290120107>.

CAPÍTULO 2

LÓGICA NEBULOSA APLICADA AO ESTUDO DA VULNERABILIDADE A INUNDAÇÃO NA REGIÃO MÉDIA DA BACIA DO RIO ITAPEMIRIM

RESUMO

O presente estudo apresenta o mapeamento de áreas vulneráveis ao risco de inundação na Região Média da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim utilizando o método de lógica nebulosa em conjunto com o método AHP (Analytic Hierarchy Process), baseado em Sistemas de Informações Geográficas na região média bacia hidrográfica do rio Itapemirim. Foram utilizados cinco grupos de dados: precipitações máximas e acumuladas, relevo, morfometria de microbacias, hidrografia e solos. Cada camada de informação foi classificada de acordo com sua importância relativa pelo método AHP. Posteriormente ocorreu a sobreposição de camadas por meio da lógica nebulosa. Assim foram gerados mapas de vulnerabilidade à inundação para os períodos anual, seco e chuvoso. Os mapas resultantes indicam que para o período anual, 64,71% da área estudada se encontra em alto risco de inundação e 34,16% em muito alto risco. Para o período seco, 77,02% da área estudada se encontra em alto risco de inundação e 20,17% em muito alto risco. Para o período chuvoso, 62,24% da área estudada se encontra em alto risco de inundação e 36,68% em muito alto risco. Em todos os casos, as áreas classificadas como muito alto risco predominam na região dos municípios de Alegre, Muniz Freire, Jerônimo Monteiro e Cachoeiro de Itapemirim. Esta metodologia pode ser utilizada em outras áreas e diferentes situações no mundo.

ABSTRACT

The present study presents the detailed mapping of areas vulnerable to flood risk using the nebulous logic methodology in conjunction with the AHP (Analytic Hierarchy Process) method based on a geographic information system located in the Middle Region of the Itapemirim River Basin. Five data groups were used: maximum and accumulated precipitations, relief, morphometry of microbasins, hydrography and soils. Each layer of information was classified according to its relative importance by the AHP method. Later, layers were superimposed using fuzzy logic. Thus, flood vulnerability maps were generated for the annual, dry and rainy periods. The resulting maps indicate that for the annual period, 64.71% of the studied area is at high risk of flooding and 34.16% at very high risk. For the dry period, 77.02% of the studied area is at high risk of flooding and 20.17% at very high risk. For the rainy season, 62.24% of the studied area is at high risk of flooding and 36.68% at very high risk. In all cases, areas classified as very high risk predominate in the region of the municipalities of Alegre, Muniz Freire, Jerônimo Monteiro and Cachoeiro de Itapemirim. This methodology can be used in other areas and different situations on the planet.

1. Introdução

As inundações geram grandes desastres naturais e são fonte de inúmeros estudos que utilizam métodos e parâmetros variados. Estes estudos possuem como objetivo principal identificar as áreas de maior risco para posterior prevenção de desastres (CONCEIÇÃO; SIMÕES; DANTAS, 2019; CUNHA et al., 2017; MAGALHÃES; ZHU et al., 2016; THIAGO, 2011; RENYI; NAN, 2002).

Vários estudos evidenciam a importância da ocupação do solo pelo homem, e utilizam dados de hidrografia e relevo como parâmetros determinantes no aumento do risco das áreas sujeitas à inundação (HU et al., 2017; ; WU et al., 2017; WALSH; POMEROY; BURIAN, 2014). Sendo o clima o fator mais importante para a ocorrência de inundações, vários estudos foram realizados para avaliar como as mudanças climáticas interferem no regime de chuvas (IPCC, 2013; MENDELSON et al., 2012; ; PEDUZZI et al., 2012; MORITA, 2011).

A integração dos dados para delimitação das áreas vulneráveis às inundações deve ser realizada por métodos computacionais robustos. Para estudos com grandes quantidades de dados, maior quantidade de parâmetros, a escolha do método é algo determinante para o sucesso do estudo. Dessa forma, a lógica nebulosa se destaca pela sua eficiência em diversos trabalhos sobre o tema em estudo (HONG et al., 2018; JUN et al., 2013; ZOU et al., 2012; JIANG et al., 2009). A lógica nebulosa também foi aplicada de forma eficiente em outras aplicações como uso da terra (AL-JUBOURY; AL-RUBAYE, 2021; HAN, 2014), planejamento florestal (ABEDI GHESHLAGHI; FEIZIZADEH; BLASCHKE, 2020; DOS SANTOS *et al.*, 2020, 2017), risco de erosão (FAUZI *et al.*, 2017), risco geotécnico (ARBABSIAR; EBRAHIMI FARSANGI; MANSOURI, 2020), planejamento urbano (SADEGHI; EILDOROMI; FARAMARZI, 2019), planejamento energético (OLUFISAYO *et al.*, 2021), entre outros. Na lógica nebulosa a parametrização dos critérios é alcançada de forma complexa por meio de ajuste sigmoidal, ambos linear e gaussiana, entre outras técnicas, para melhor representam o comportamento dos fenômenos envolvidos. Outra vantagem de usar a lógica nebulosa é que a opinião do analista interfere menos, já que os pesos do variáveis não são definidas, mas apenas seus máximos e mínimos valores para que seja aceitável em um modelo (DOS SANTOS *et al.*, 2017).

O método AHP (Analytic Hierarchy Process) permite a resolução de problemas com critérios conflitantes permitindo soluções que envolvam decisões com diversos critérios e múltiplas alternativas e consequências. O método AHP também é indicado para mensurar critérios tangíveis com intangíveis, por meio de uma escala de razão, podendo o problema ser dividido em diversas partes, relacionando-as e conectando os juízos de comparação com o objetivo final da aplicação (EUGENIO et al., 2016; BRIOZO; MUSETTI, 2015; VARGAS, 1990). O método AHP não pode capturar a subjetividade (ou imprecisão) dos julgamentos humanos. A utilização combinada dos métodos lógica nebulosa e AHP se consegue obter as vantagens de ambos (ISHIZAKA, 2014), e vem sendo utilizada em diversos estudos como risco a inundação (SEPEHRI *et al.*, 2020), risco de deslizamento de terra, (POURGHASEMI; PRADHAN; GOKCEOGLU, 2012), potencial hídrico (RAJASEKHAR *et al.*, 2019), entre outros.

Segundo relatado pela DEFESA CIVIL (2009), o passivo histórico materializado pela construção de cidades inteiras às margens de importantes rios ou nas íngremes encostas das montanhas faz do Espírito Santo um estado com muitas áreas de risco. E a situação de risco tem se comprovado em diversas oportunidades ao longo da história capixaba, principalmente em eventos relacionados a deslizamentos de terra e inundações provocados por chuvas. As inundações são provocadas por precipitações pluviométricas intensas e pela intensificação do regime de chuvas sazonais, mas podem ter outras causas, como: assoreamento do leito dos rios; compactação e impermeabilização do solo; precipitações intensas com marés elevadas; rompimento de barragens; drenagem deficiente de áreas a montante de aterros e estrangulamento de rios provocado por desmoronamento.

Além dos danos causados pela ação direta da água, as enxurradas também podem provocar deslizamentos de terra, que potencializam seu efeito destruidor. Dessa forma, ocorrem danos ambientais, materiais, econômicos e sociais, relacionados a destruição do ambiente, construções, mercadorias, mão de obra, de vias públicas para livre circulação, geração de desabrigados/desalojados, interrupção de aulas, serviços de coleta de lixo e fornecimento e água etc.

Embora existam estudos sobre inundações na região de estudo, existe a necessidade de compreender melhor os motivos de sua ocorrência. O governo

do Estado do Espírito Santo realizou estudo detalhado em 17 municípios de todo o estado (Alegre, Afonso Cláudio, Bom Jesus do Norte, Castelo, Domingos Martins, Guaçuí, Ibatiba, Iconha, João Neiva, Marechal Floriano, Mimoso do Sul, Rio Novo do Sul, Santa Leopoldina, Santa Maria de Jetibá, Santa Teresa, Vargem Alta, Viana), abrangendo alguns municípios da região sul do ES (SEDURB, 2013). Outros órgãos federais como a UFES (Universidade Federal do Espírito Santo) e CPRM (Serviço Geológico do Brasil) contribuíram com pesquisas e trabalhos detalhados referentes às inundações em áreas urbanas do sul do ES (DALFI et al., 2013; CPRM, 2012; FREGOLENTE; ELLDORF; SILVEIRA, 2012; LAZARETTI; SILVEIRA, 2012; PLASTER et al., 2008). Todos os estudos detalhados abrangeram as áreas urbanas das cidades. É necessário estudo de toda a área do município, pois as áreas rurais também são afetadas severamente.

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar as áreas dentro da região média da bacia hidrográfica do rio Itapemirim com maior vulnerabilidade à inundação através da combinação dos métodos AHP e lógica nebulosa, utilizando dados de precipitação, relevo, morfometria, hidrografia e solos. Os resultados deste estudo auxiliarão nas tomadas de decisão dos órgãos governamentais, contribuindo para o gerenciamento de riscos e prevenção de acidentes através de metodologias em sistemas de informações geográficas.

2. Materiais e métodos

2.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo corresponde a região média da bacia hidrográfica do rio Itapemirim. Está localizado no Sul do estado do Espírito Santo, abrangendo a área de aproximadamente 3.715 Km², que inclui os municípios de Alegre, Jerônimo Monteiro, Cachoeiro do Itapemirim, Muqui, Castelo, Conceição do Castelo, Venda Nova do Imigrante e Domingos Martins. As sub-bacias hidrográficas inseridas na área de estudo pertencem à bacia hidrográfica do rio Itapemirim sendo elas as do: rio Alegre, rio Braço Norte Esquerdo, rio Castelo, rio São João de Viçosa, rio Caxixe, rio da Prata e partes da sub-bacia do rio Fruteira, rio Braço Norte Direito e sub-bacia do Itapemirim. A importância dessa região está relacionada às áreas destinadas à pecuária e produção de café,

regiões com cultivos de olerícolas, às regiões de recarga de aquíferos que alimentam a bacia do rio Itapemirim, assim como a crescente instalação de indústrias do setor de rochas e de mineração (Figura 1). O clima e temperatura são variáveis, devido à grande amplitude altimétrica, que varia de 8 a 2009 metros de altitude.

A área em estudo está geotectonicamente inserida na Província Mantiqueira, na porção chamada Orógeno Araçuaí. A Província Mantiqueira representa um sistema orogênico Neoproterozóico situado no sul e sudeste do Brasil. O Orógeno Araçuaí é caracterizado como um sistema de dobramentos de idade brasileira, que passou por diversos processos e estágios, sendo eles pré-colisional, sin-colisional e pós-colisional, os quais geraram diversas rochas características. De acordo com SILVA (1993), o embasamento da região de estudo é composto, de forma geral, por gnaisses de composições variadas com presença locais de mármore. No estágio pós-colisional ocorreram processos deformacionais (ALKIMIN *et al.*, 2006; ALKIMIM *et al.*, 2006) e plutonismo relacionados ao colapso gravitacional (extensional) do Orógeno Araçuaí (DE CAMPOS *et al.*, 2004; PEDROSA-SOARES *et al.*, 2001; PEDROSA-SOARES; WIEDEMANN-LEONARDOS, 2000), constituídos por corpos ígneos intrusivos.

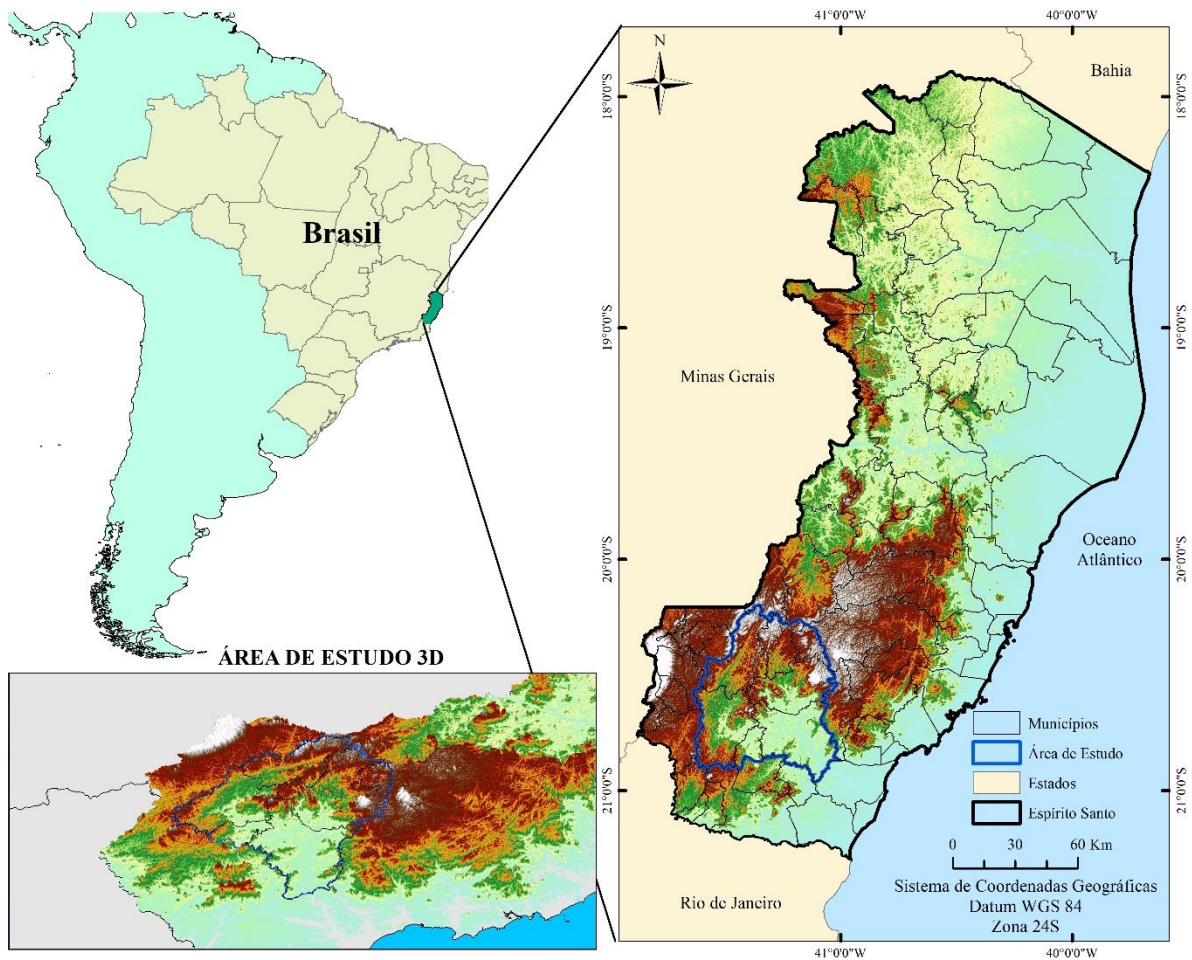


Figura 1 - Localização da área de estudo.

2.2. Visão geral da metodologia

A metodologia deste trabalho foi dividida em seis etapas principais (Figura 2), resumidas abaixo:

- 1) Aquisição e processamento de dados de máximos e acumulados pluviométricos anuais e sazonais (períodos secos e chuvosos);
- 2) Aquisição e processamento de dados referentes ao relevo;
- 3) Aquisição e processamento dos dados de morfometria;
- 4) Aquisição e processamento de dados de hidrografia e corpos d'água;
- 5) Aquisição e processamento de dados de uso e ocupação do solo e tipos de solo da região de estudo;
- 6) Análise dos dados em ambiente de sistema de informações geográficas através das metodologias AHP (Analytic Hierarchy Process) aliado com a Lógica Nebulosa, gerando como resultados mapas de Vulnerabilidade ao Risco de Inundações.

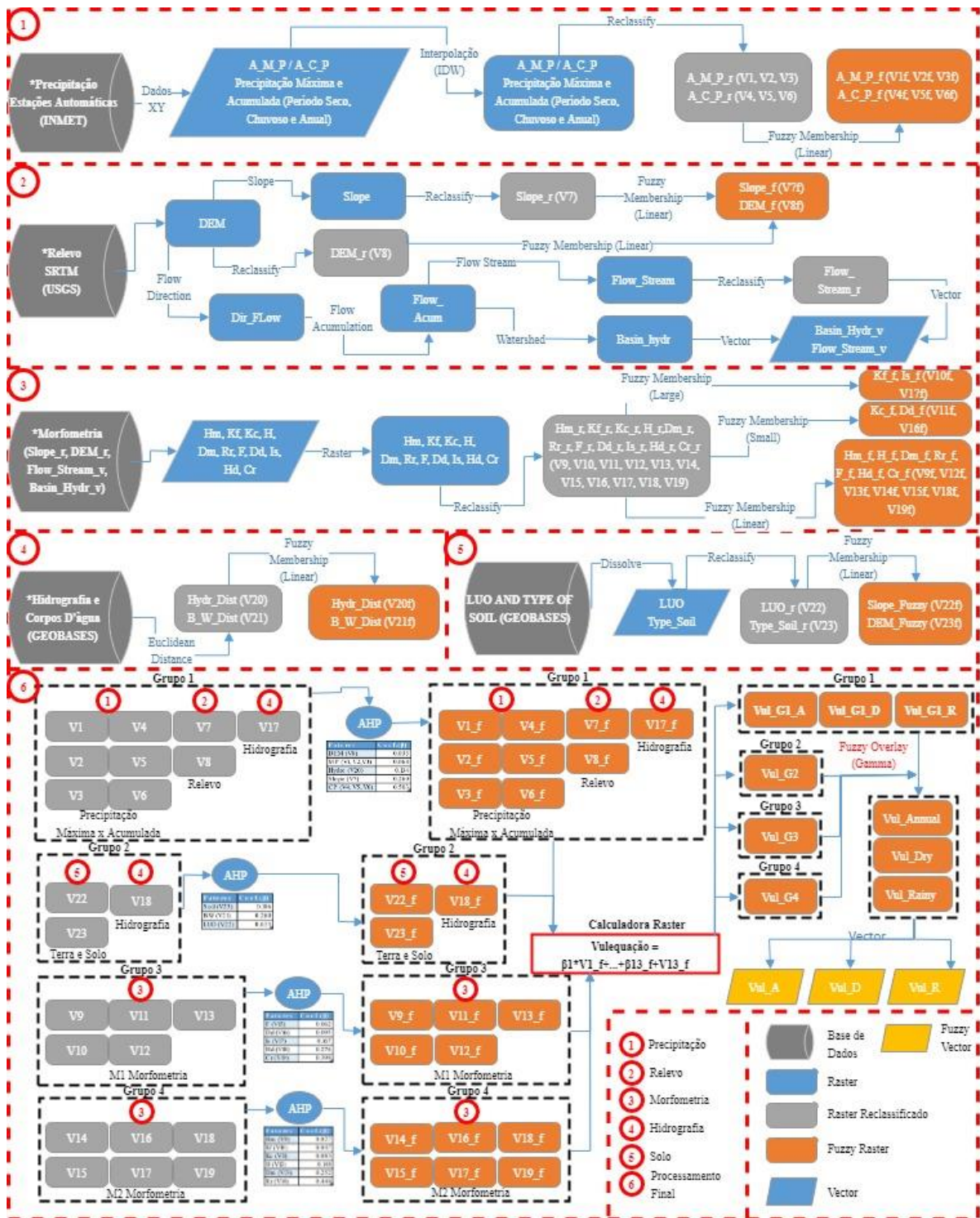


Figura 2 - Etapas metodológicas para análise da Vulnerabilidade do Risco à Inundação na Região Média da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim.

2.3. Pluviometria

Os dados referentes a precipitações máximas e acumuladas anuais e sazonais de períodos secos e chuvosos da região de estudo foram adquiridos

no banco de dados no INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), e corresponde a série histórica do período entre 1971-1999. Estes dados foram interpolados pelo método IDW (Ponderação do Inverso da Distância) gerando no total 6 mapas que posteriormente foram reclassificados pelo método de Jenkins dando origem aos mapas A_M_P_r – Precipitação Máxima Anual (V1), D_M_P_r - Precipitação Máxima Seca (V2), R_M_P_r - Precipitação Máxima Chuvosa (V3), A_C_P_r - Precipitação Acumulada Anual (V4), D_C_P_r - Precipitação Acumulada Seca (V5), R_C_P_r - Precipitação Acumulada Chuvosa (V6).

2.4. Relevo

Os dados de relevo foram adquiridos através do modelo digital de elevação fornecido pela USGS (United States Geological Survey), com resolução espacial de 1 arcosegundo (USGS, 2017). Ocorreu a correção de depressões espúrias desses dados.

Após a correção do modelo digital de elevação, foi realizada sua reclassificação, dando origem aos mapas DEM_r (V7). O modelo digital de elevação corrigido foi processado através do cálculo da declividade com posterior reclassificação, dando origem ao mapa Slope_r (V8).

2.4.1. Morfometria

Os dados de morfometria foram adquiridos através de processamentos e cálculos realizados no modelo digital de elevação. O modelo digital de elevação foi tratado de forma a indicar as direções e locais de acúmulo de fluxo, onde foram delimitadas microbacias hidrográficas prioritariamente acima de 15 km² de área. Foram delimitadas o total de 138 microbacias hidrográficas, nos quais foram aplicados cálculos matemáticos para obtenção dos parâmetros morfométricos a seguir:

a) Amplitude altimétrica (H) - diferença de altitudes entre o ponto mais baixo da bacia (H_{máx} – foz) e o ponto de maior altitude (H_{min}) (STRAHLER, 1952), indicando a declividade da bacia, calculada de acordo com a equação (1).

$$H = H_{máx} - H_{min}$$

(1)

b) Coeficiente de compacidade (K_c) - Consiste na relação entre o perímetro (P) e a raiz da área da bacia (A), calculada de acordo com a equação (2). Quanto

mais irregular for a bacia, maior o coeficiente de compacidade e menos sujeita à inundação será ($K_c = 1 - 1,25$ redondas para ovaladas; $K_c = 1,25 - 1,50$ ovaladas; $K_c = 1,50 - 1,70$ longas (VILLELA; MATTOS, 1975).

$$K_c = 2,08 * (P/\sqrt{A}) \quad (2)$$

c) Densidade de drenagem (D_d) - Relação entre o comprimento da rede de drenagem (C_{rd}) e a área da bacia (A) (HORTON, 1945), calculada de acordo com a equação (3). Este índice constitui um indicativo muito importante do escoamento superficial da água, o que reflete uma maior ou menor intensidade dos processos erosivos na esculturação dos canais, sendo também um indicativo da natureza, da litologia e dos solos. Para a definição de classes de densidade de drenagem os limites seriam para alta densidade valores superiores a 2,50, média densidade valores entre 1,25-2,50 e baixa densidade de drenagem abaixo de 1,25 (HIRUMA; PONÇANO, 1994).

$$D_d = C_{rd}/A \quad (3)$$

d) Fator de forma (K_f) – Relação entre a área da bacia (A) e o comprimento do rio mais longo da bacia (L), calculada de acordo com a equação (4). valores entre 1 e 0,75 indicam bacia sujeita à inundação, enquanto entre 0,75 e 0,50 indicam tendência mediana (VILLELA; MATTOS, 1975). Os valores menores que 0,50 significam que a bacia não é sujeita à inundação. Este índice deve ser utilizado na comparação de bacias de áreas semelhantes (FRITZSONS; MONTAVANI, 2011).

$$K_f = A/L^2 \quad (4)$$

e) Frequência de rios (F) - Relação entre o número de segmentos de rios (N_t) e a área da bacia (A) (HORTON, 1945), calculada de acordo com a equação (5). Índice que expressa as características estruturais e geológicas do ambiente, onde rochas mais homogêneas tendem a ter menos seguimentos por área.

$$F = N_t/A \quad (5)$$

f) Razão de relevo (R_r) - Relação entre a amplitude altimétrica (H) e o maior comprimento da bacia paralela a linha de drenagem (L_d) (SCHUMM, 1956), calculada de acordo com a equação (6).

$$R_r = H/L_d \quad (6)$$

g) Índice de sinuosidade (I_s) – Relaciona o comprimento verdadeiro do canal (C_{vc}) (projeção ortogonal) com a distância vetorial (dv), ou seja, comprimento

em linha reta entre os dois pontos extremos do canal principal (SCHUMM, 1963), calculada de acordo com a equação (7). Valores próximos a 1,0 indicam que o canal tende a ser retilíneo. Já os valores superiores a 2,0 sugerem canais tortuosos e os valores intermediários indicam formas transicionais, regulares e irregulares (LANA; ALVES; CASTRO, 2001).

$$I_s = C_{vc}/dv \quad (7)$$

h) Índice de rugosidade (Hd) – Produto entre a amplitude altimétrica (H) e a densidade de drenagem (Dd) (STRAHLER, 1958), calculada de acordo com a equação (8). Os valores extremamente altos do índice de rugosidade ocorrem quando ambos os valores são elevados, isto é, quando as vertentes são íngremes e longas (CAMPANHARO, 2010).

$$H_d = H * D_d \quad (8)$$

i) Coeficiente de rugosidade (Cr) – Produto entre a densidade de drenagem (Dd) e a declividade média da microbacia (Dm) (ROCHA, 1997), calculada de acordo com a equação (9).

$$C_r = D_d * D_m \quad (9)$$

j) Altitude média da bacia (Hm) – Valor médio de cota altimétrica da bacia hidrográfica obtido através do modelo digital de elevação (MDE).

k) Declividade média da bacia (Dm) – Declividade média da microbacia determinada através do modelo digital de elevação (MDE).

Após os cálculos dos dados de morfometria, foram reclassificados de acordo com o método de Jenkis, dando origem aos mapas Hm_r – Altitude média (V9), Kf_r – Fator de forma (V10), Kc_r – Coeficiente de compacidade (V11), H_r – Amplitude altimétrica (V12), Dm_r – Declividade média (V13), Rr_r – Razão de relevo (V14), F_r – Frequência de rios (V15), Dd_r – Densidade de drenagem (V16), Is_r – Índice de sinuosidade (V17), Hd_r – Índice de rugosidade (V18), Cr_r – Coeficiente de rugosidade (V19).

2.5. Hidrografia

Os dados de hidrografia foram adquiridos no banco de dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), originado do levantamento do projeto Radam Brasil de 1974. Os dados de corpos d'água foram retirados do mapa de uso e ocupação do solo, obtido no banco de dados do Geobases (Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo)

gerenciado pelo IJSN (Instituto Jones dos Santos Neves), confeccionado pelo Incaper (Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural) no ano de 2015. Os dados adquiridos foram tratados e suas inconsistências foram corrigidas. EM seguida foi calculada a distância euclidiana de ambos, gerando os mapas Hydro_dist (V20) e BW (V21), respectivamente.

2.6. Solos

Os dados de uso do solo e tipos de solo foram adquiridos no banco de dados do Geobases do ano de 2015 supracitado. Estes dados foram reclassificados e foram gerados os mapas LUO_r (V22) e Soil (V23), respectivamente.

2.7. Processamento

Após a reclassificação de todos os mapas como citando anteriormente, em seguida ocorreu a normalização (fuzzyficação) dos dados entre os valores 0 (sem inundação) e 1 (alto potencial de inundação) de acordo com funções nebulosas de pertinência (Figura 3) e cálculo de suas respectivas frequências. Essa normalização gerou mapas de V1_f a V23_f, na mesma sequência, como descrito nas etapas anteriores.

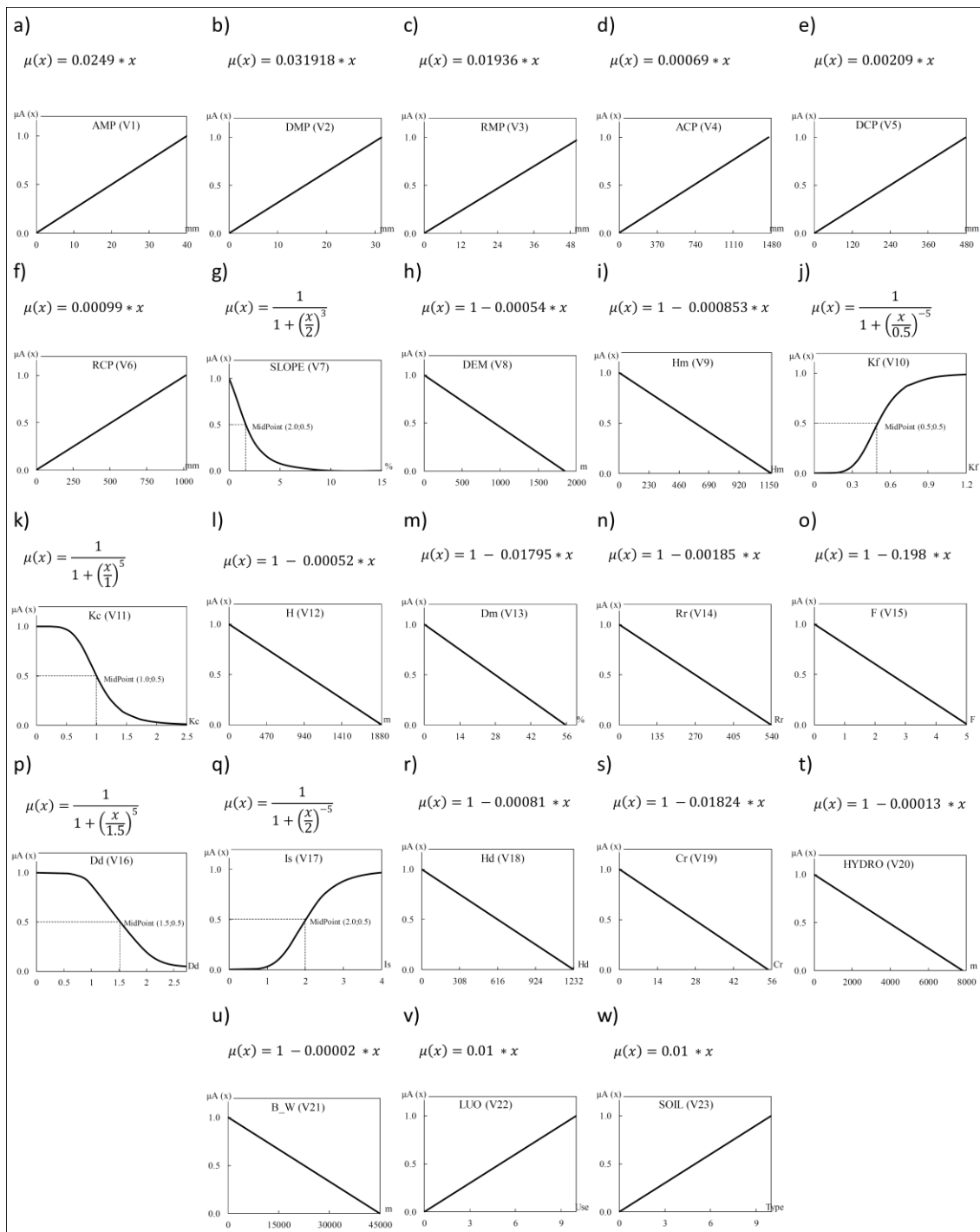


Figura 3 - Funções de pertinência da lógica nebulosa.

Para aplicação do método AHP, estes dados foram separados em 4 grupos, onde o primeiro grupo (G1) foi composto pelos dados de precipitação máxima e acumulada anual e sazonais, de relevo e hidrografia; o segundo grupo (G2) foi composto pelos dados de uso do solo e hidrografia; o terceiro grupo (G3) foi composto pelos dados de morfometria ligados ao relevo; o quarto grupo (G4) foi composto pelos dados de morfometria ligados à hidrografia. Foram atribuídos

pesos a cada dados nos grupos. De posse dos pesos, foram gerados mapas através do método AHP de acordo com a equação (10):

$$\text{Vul equação} = \beta_1 * V1_f + \dots + \beta_{13}_f + V13_f \quad (10)$$

No G1 foram gerados 3 mapas, referentes aos dados anuais, períodos secos e chuvosos. Os grupos G2, G3 e G4, cada um gerou 1 mapa como resultado.

Em seguida, cada mapa resultante do método AHP referente ao grupo G1 referente aos dados anuais, períodos secos e chuvosos foram unidos aos mapas resultantes dos grupos G2, G3 e G4 através da lógica nebulosa, pela equação (11) gamma:

$$\mu(x) = \{1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)\}^y * \{\prod_{i=1}^n \pi_i\}^{1-y} \quad (11)$$

Ao final desse processamento, foram obtidos o total de 3 mapas de vulnerabilidade: Mapa de Vulnerabilidade à inundação Anual, Mapa de Vulnerabilidade à Inundação para Período Seco e Mapa de Vulnerabilidade à Inundação para Período Chuvoso.

3. Resultados

3.1. Reclassificação de dados

Após correção e tratamento dos dados de precipitação, relevo, morfometria, hidrografia e solos, foram gerados mapas e estes foram reclassificados de acordo com a Figura 4. A reclassificação dos mapas em categorias ajuda a demonstrar a contribuição das variáveis para o aumento da vulnerabilidade à inundação. As regiões em cores frias possuem menor vulnerabilidade à inundação e em cores quentes são as com maior vulnerabilidade.

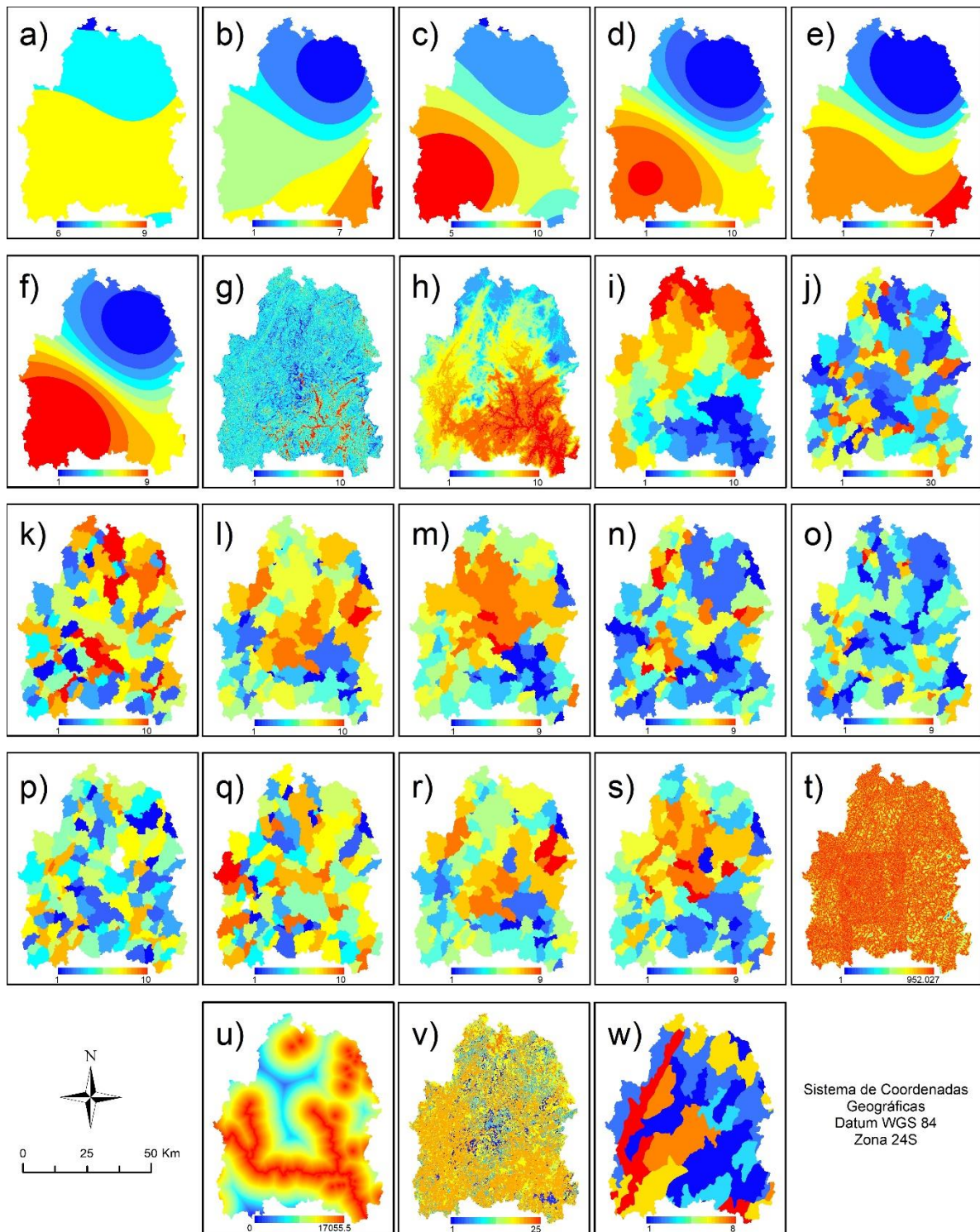


Figura 4 - Mapas dos dados reclassificados. a) AMP – Precipitação máxima anual (V1); b) DMP – Precipitação máxima período seco (V2); c) RMP – Precipitação máxima período chuvoso (V3); d) ACP – Precipitação acumulada anual (V4); e) DCP – Precipitação acumulada período seco (V5); f) RCP – Precipitação acumulada período chuvoso (V6); g) Slope – Declividade (V7); h) DEM – Modelo digital de elevação (V8); i) Hm – Altitude média (V9); j) Kf – Fator de forma (V10); k) Kc – Coeficiente de compacidade (V11); l) H – Amplitude altimétrica (V12); m) Dm – Declividade média (V13); n) Rr – Razão de relevo (V14); o) F – Frequência de rios (V15); p) Dd – Densidade de drenagem (V16); q) Is – Índice de sinuosidade (V17); r) Hd – Índice de Rugosidade (V18); s) Cr – Coeficiente de rugosidade (V19); t) Hydro – Distância euclidiana da hidrografia (V20); u) BW – Distância euclidiana dos corpos d’água (V21); v) LUO – Uso e ocupação do solo (V22); w) Soil – Tipo de solo (V23).

3.2. Processamento

A normalização através das funções de pertinência da lógica nebulosa é mostrada na Figura 5, onde a maioria das funções utilizadas foram lineares. As funções *small* e *large* foram utilizadas nos casos em que havia conhecimento do valor no qual o atributo influenciaria efetivamente no evento de inundação. Foi adotada a prerrogativa que quanto mais próximo de zero (0), menor vulnerabilidade à inundação em cores frias e quanto mais próximo de um (1) maior vulnerabilidade em cores quentes.

O cálculo frequências dos mapas normalizados são mostrados nas Figuras 6 e 7, onde os valores de 0 – 0.25 representam baixa vulnerabilidade à inundação, 0.25 – 0.50 representam média vulnerabilidade à inundação, 0.50 – 0.75 representam alta vulnerabilidade à inundação, 0.75 – 1.00 representam muito alta vulnerabilidade à inundação. Dentre os 23 atributos analisados, 17 deles, principalmente os que são influenciados diretamente pela precipitação e relevo, estão entre a categoria de alta a muito alta vulnerabilidade a inundação.

Os mapas de Vulnerabilidade ao Risco de Inundações Anuais, Períodos Secos e Chuvosos são mostrados na Figura 8. A grande parte da área de estudo se encontra em área de alta vulnerabilidade às inundações. Não foram detectadas regiões com as categorias muito baixa a baixa vulnerabilidade ao risco de inundações. Os municípios de Alegre, Jeronimo Monteiro, Muniz Freire, Castelo e Cachoeiro de Itapemirim possuem áreas classificadas como muito alta vulnerabilidade ao risco de inundações, em todas as situações apresentadas, seja em caso de precipitação anual ou sazonal.

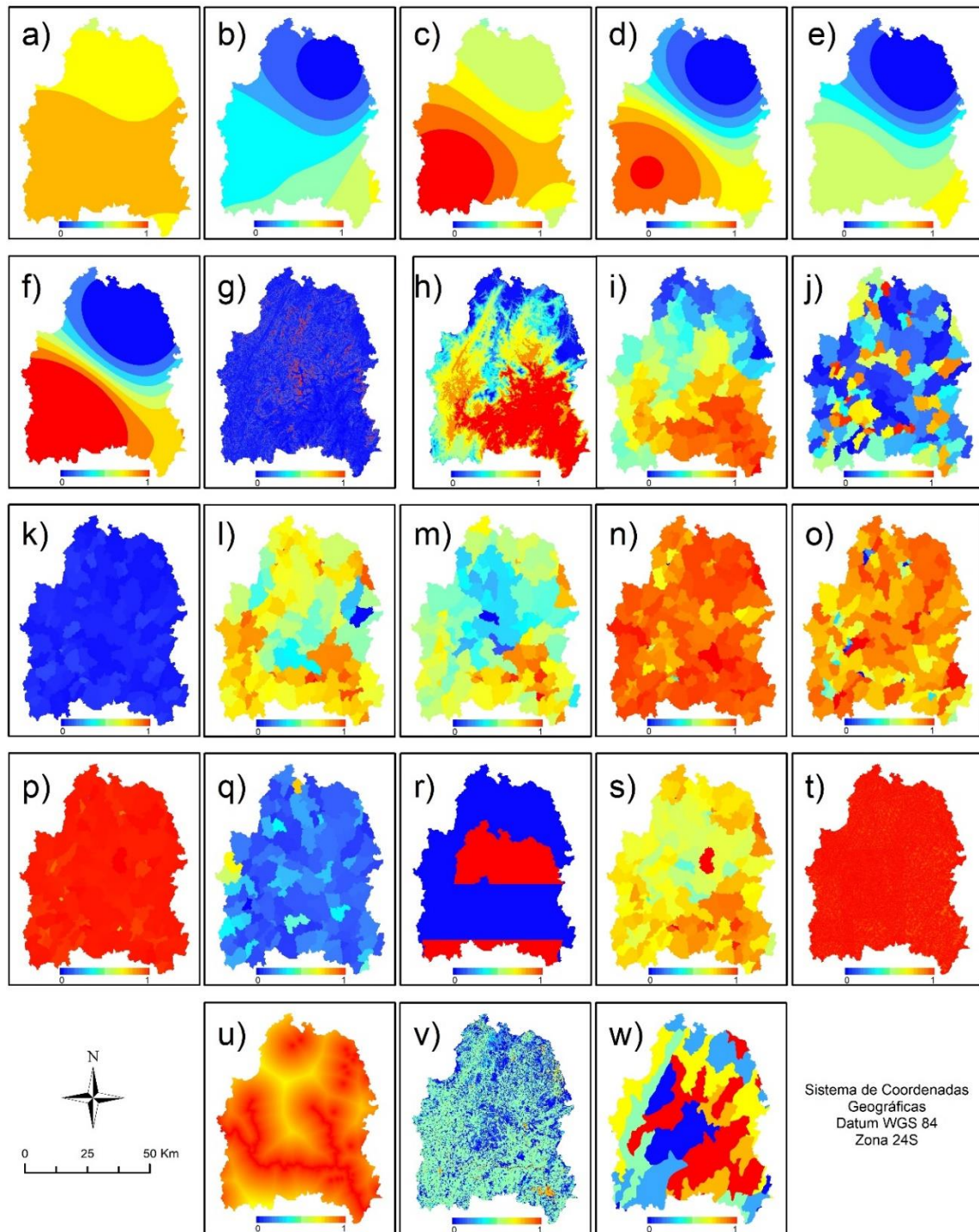


Figura 5- Mapas dos dados normalizados segundo a lógica nebulosa. a) AMP – Precipitação máxima anual (V1); b) DMP – Precipitação máxima período seco (V2); c) RMP – Precipitação máxima período chuvoso (V3); d) ACP – Precipitação acumulada anual (V4); e) DCP – Precipitação acumulada período seco (V5); f) RCP – Precipitação acumulada período chuvoso (V6); g) Slope – Declividade (V7); h) DEM – Modelo digital de elevação (V8); i) Hm – Altitude média (V9); j) Kf – Fator de forma (V10); k) Kc – Coeficiente de compacidade (V11); l) H – Amplitude altimétrica (V12); m) Dm – Declividade média (V13); n) Rr – Razão de relevo (V14); o) F – Frequência de rios (V15); p) Dd – Densidade de drenagem (V16); q) Is – Índice de sinuosidade (V17); r) Hd – Índice de Rugosidade (V18); s) Cr – Coeficiente de rugosidade (V19); t) Hydro – Distância euclidiana da hidrografia (V20); u) BW – Distância euclidiana dos corpos d’água (V21); v) LUO – Uso e ocupação do solo (V22); w) Soil – Tipo de solo (V23).

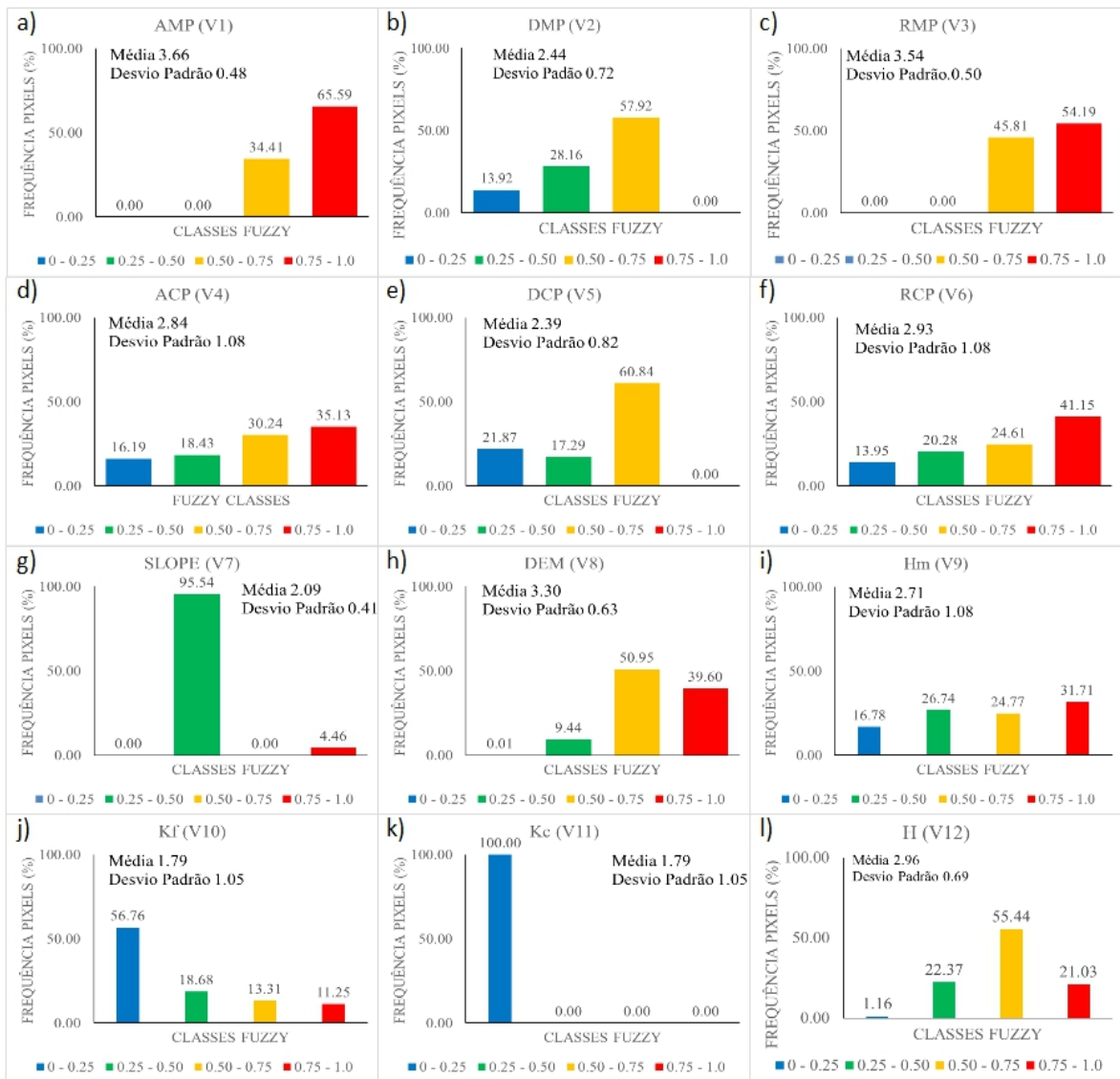


Figura 6 – Frequência dos dados normalizados segundo a lógica nebulosa. a) AMP – Precipitação máxima anual (V1); b) DMP – Precipitação máxima período seco (V2); c) RMP – Precipitação máxima período chuvoso (V3); d) ACP – Precipitação acumulada anual (V4); e) DCP – Precipitação acumulada período seco (V5); f) RCP – Precipitação acumulada período chuvoso (V6); g) Slope – Declividade (V7); h) DEM – Modelo digital de elevação (V8); i) Hm – Altitude média (V9); j) Kf – Fator de forma (V10); k) Kc – Coeficiente de compacidade (V11); l) H – Amplitude altimétrica (V12).

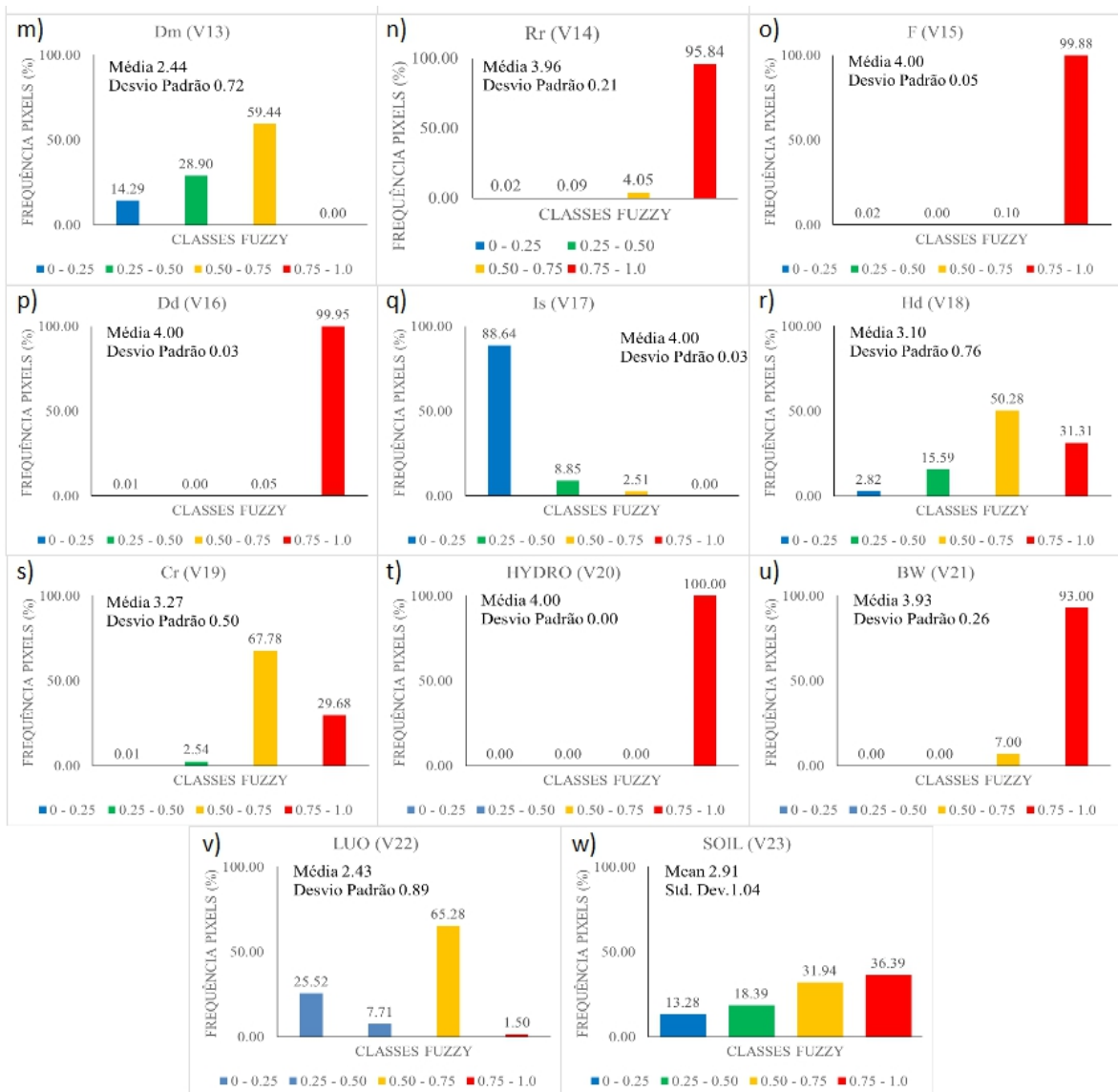


Figura 7 – Continuação da frequência dos dados normalizados segundo a lógica nebulosa. m) Dm – Declividade média (V13); n) Rr – Razão de relevo (V14); o) F – Frequência de rios (V15); p) Dd – Densidade de drenagem (V16); q) Is – Índice de sinuosidade (V17); r) Hd – Índice de Rugosidade (V18); s) Cr – Coeficiente de rugosidade (V19); t) Hydro – Distância euclidiana da hidrografia (V20); u) BW – Distância euclidiana dos corpos d’água (V21); v) LUO – Uso e ocupação do solo (V22); w) Soil – Tipo de solo (V23).

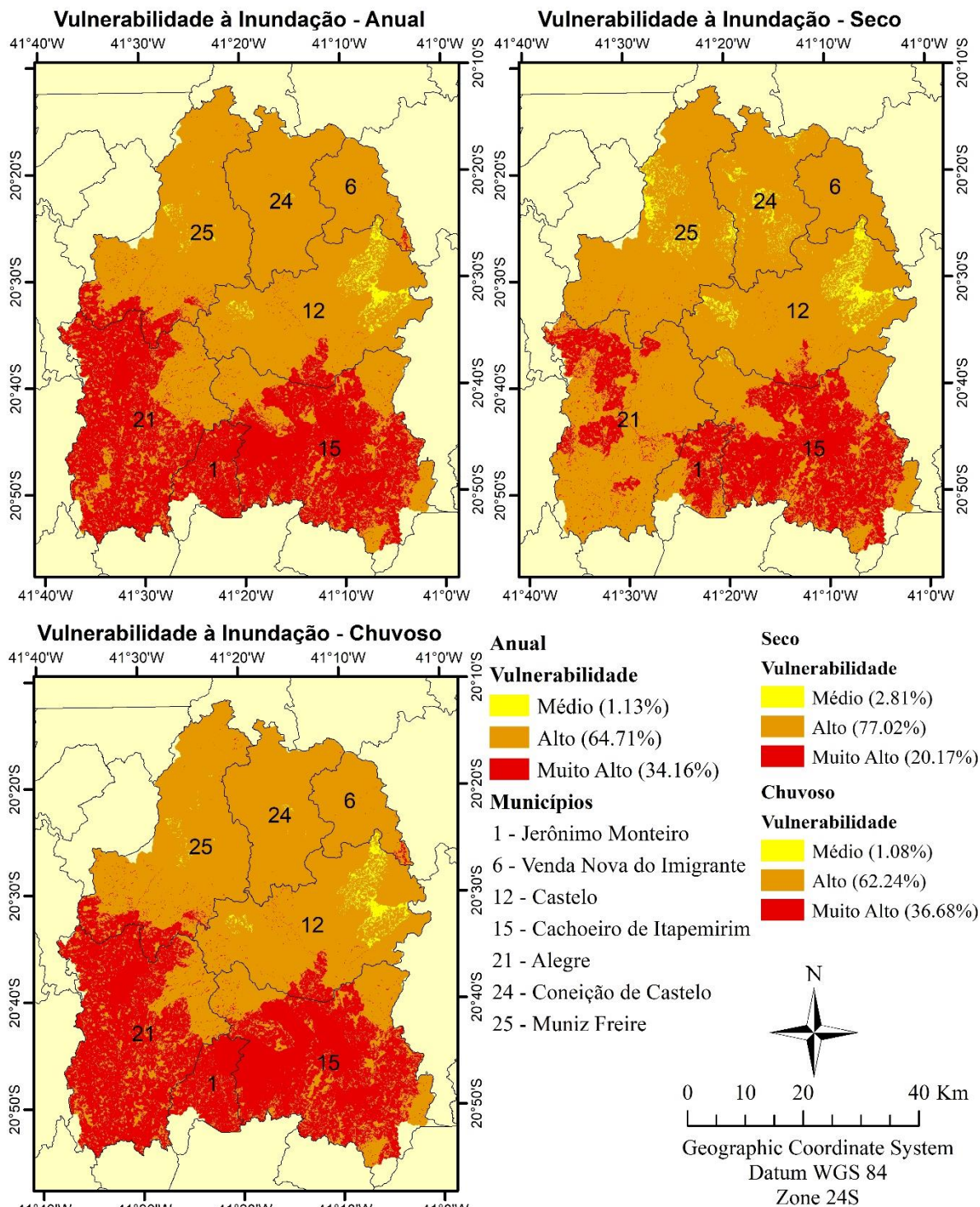


Figura 8 - Mapas de Vulnerabilidade à Inundação.

4. Discussão

Os resultados dos mapas de Vulnerabilidade a Inundação indicam que a maior parte das áreas possuem alta vulnerabilidade à inundação. Os municípios de Alegre, Jerônimo Monteiro e Cachoeiro de Itapemirim possuem a

maior parte dos municípios classificados como muito alta vulnerabilidade independente da sazonalidade.

As regiões classificadas como mais alta vulnerabilidade tendem a coincidir com as áreas menores altitudes, menores declividades e com predominância de vales em U, referentes aos unidade geomorfológicas Cachoeiro de Itapemirim e Celina, de acordo com o escalonamento do relevo proposto por LANI; REZENDE; RESENDE (2001). Este trabalho descreve que os unidade geomorfológicas refletem as condições geológico/estruturais da região, nos quais influenciaram diretamente na altitude, clima, relevo e solos no Sul do Estado do Espírito Santo. Este fato também demonstra a favorabilidade de ambientes hidromórficos no Sul do ES, de acordo com sua geomorfologia.

Considerando as frequências dos dados gerados através das funções de pertinência, os dados de pluviometria, hidrografia, altitude e solos (DEM – modelo digital de elevação, Hm – Altitude média, H – Amplitude altimétrica, Dm – Declividade média, F – Frequência de rios, Dd – Densidade de drenagem, Hd – Índice de Rugosidade, Cr – Coeficiente de rugosidade, Hydro - Hidrografia, BW - Corpos d'água, LUO – uso e ocupação do solo, Soil – Tipo de solo) possuem maiores frequências para riscos altos a muito altos. BENSON (1963) descreve em detalhe como os fatores climáticos, morfométricos, hidrológicos e de uso do solo influenciam na ocorrência de inundações. CUNHA et al. (2017) obtiveram sucesso em estudos sobre inundações, utilizando informações morfométricas, de uso do solo e hidrografia, reforçando a importância dos parâmetros supracitados. O estudo realizado por CONCEIÇÃO; SIMÕES; DANTAS (2019) comprovou a importância do estudo do relevo na determinação de áreas inundáveis na área costeira do sul do Estado do Espírito Santo, ressaltando a diversidade de ambientes associados ao relevo e como influenciam no risco à inundação. ZHENG et al. (2016) ressaltam que na China ocorrem problemas com a impermeabilização do solo e perda dos corpos d'água naturais, que agravaram os riscos de inundação. Estes problemas são semelhantes aos da nossa área de estudo e são frequentes em todo o território brasileiro, principalmente pela ocupação urbana desordenada, sem planejamento estratégico.

É inegável que a ocupação do solo influencia no aumento do risco à inundação, principalmente no que se refere a mudanças morfométricas e hidrológicas ocasionadas pelo ser humano. E o aspecto socioeconômico

influencia na ocupação e no uso do solo diretamente, onde pessoas com maior vulnerabilidade econômica geralmente moram nos locais com maior risco e são afetadas negativamente, como relatam vários estudos (LECHOWSKA, 2018; BRODY; KANG; BERNHARDT, 2010; APEL *et al.*, 2009; THIEKEN *et al.*, 2005).

O trabalho realizado pelo Corpo de Bombeiros (CORPO DE BOMBEIROS MILITAR *et al.*, 2006) obteve resultados semelhantes, porém subestimados, com grande parte das áreas sendo classificadas como baixo a médio risco à inundação. Observou-se diferenças na metodologia, no qual foram utilizados poucos parâmetros para a análise de risco à inundação (apenas quatro parâmetros), desconsiderando a morfometria das bacias hidrográficas e outros parâmetros de relevo.

O estudo sistemático do clima no Brasil teve início em 1909, com o monitoramento da precipitação e da temperatura através da Diretoria de Meteorologia e Astronomia, vinculado ao Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio, hoje chamado de INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Frequentemente estes registros possuem inconsistências como falta de continuidade na coleta dos dados. Existem poucos registros antes de 1900 (“INMET, Instituto Nacional de Meteorologia”, 2020). No início de 2020, o sul do ES passou pela maior inundação de todos os tempos, onde não foram achados registros da magnitude da precipitação ocorrida. Os municípios mais atingidos estão incluídos no mapa final categorizados como muito alta vulnerabilidade à inundação.

O evento de máxima supracitado demonstra que existem eventos extremos que ocorrem com grandes intervalos (acima dos intervalos já estudados), onde a normal de 30 anos não é capaz de prever tais eventos (BOHUSHENKO; STEPANENKO; KHOMENKO, 2021; FRAME *et al.*, 2021; MUKHOPADHYAY *et al.*, 2020; BARTHOLY; PONGRÁCZ, 2019; APEL *et al.*, 2009). São necessários mais estudos de longo prazo para aumentar a confiabilidade dos dados previstos. Com a evolução computacional, a modelagem do clima se tornou muito estudada, porém ainda necessitará de mais dados para a previsão de eventos de máxima e mínima. Alguns trabalhos mostram que existem eventos com longo tempo de ciclicidade (estudos a partir

de 1000 anos) e sua importância (ZHAO et al., 2021; HO; KIEM; VERDON - KIDD, 2015; STAGER et al., 2013; RASPOPOV et al., 2011).

Vários trabalhos utilizam imagens orbitais, como modelos digitais de elevação (DEM) para análise de risco à inundação e seus vários subprodutos que podem ser gerados, dada a importância do relevo (CORREIA; RIBEIRO; BAPTISTA, 2015; ZHANG; PAN, 2014; MAGALHÃES; THIAGO, 2011).

Este trabalho é pioneiro ao utilizar a combinação do método AHP e lógica nebulosa para analisar dados detalhados das microbacias da região média da Bacia do Rio Itapemirim.

Recomenda-se o estudo detalhado dos municípios, incluindo as zonas rurais com o objetivo de providenciar ações preventivas a desastres naturais por parte das prefeituras e governo do estado do Espírito Santo.

5. Conclusões

Os resultados obtidos permitem concluir que grande parte da região média da bacia hidrográfica do Rio Itapemirim possui predominantemente alta vulnerabilidade à inundação. Não foram detectadas regiões enquadradas nas categorias muito baixo a baixo risco de inundação. Considerando períodos secos, 77,07% da área de estudo possui alta vulnerabilidade à inundação e 20,17% possuem muito alta vulnerabilidade à inundação. Considerando períodos chuvosos 62,24% da área de estudo possui alta vulnerabilidade e 36,68% possuem muito alta vulnerabilidade à inundação. Considerando todo o ano, 64,71% da área de estudo possui alta vulnerabilidade a inundação e 34,16% possuem muito alta vulnerabilidade à inundação.

O aumento da pluviosidade, referente ao período chuvoso, aumenta a área enquadrada na categoria de muito alta vulnerabilidade à inundação.

Os resultados são essenciais para auxiliar a tomada de decisão da gestão pública de forma a minimizar os riscos e consequências de inundações. Além disso, o zoneamento permite a formulação de políticas públicas para um melhor planejamento urbano e investimentos em educação ambiental.

A metodologia empregada apresenta potencial para uso e adaptação a outras áreas do mundo.

6. Bibliografia

- ABEDI GHESHLAGHI, H.; FEIZIZADEH, B.; BLASCHKE, T. GIS-based forest fire risk mapping using the analytical network process and fuzzy logic. **Journal of Environmental Planning and Management**, vol. 63, no. 3, p. 481–499, 23 Feb. 2020. DOI 10.1080/09640568.2019.1594726. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09640568.2019.1594726>.
- AL-JUBOURY, I. A. M.; AL-RUBAYE, S. A. J. Integration Satellite Imagery with Fuzzy Logic for Potential Change Detection in Land Use/Land Cover. **Journal of Physics: Conference Series**, vol. 1804, no. 1, p. 012036, 1 Feb. 2021. DOI 10.1088/1742-6596/1804/1/012036. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1804/1/012036>.
- ALKIMIN, F. F.; MARSHAK, S.; WHITTINGTON, A.; & PREDROSA-SOARES, A. C. Extensional collapse in the Neoproterozoic Araçuaí orogen, eastern Brazil: A setting for reactivation of asymmetric crenulation cleavage. **Journal Structural Geology**, vol. 28, p. 129–147, 2006. .
- ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S.; PEDROSA-SOARES, A. C.; PERES, G. G.; CRUZ, S. C. P.; WHITTINGTON, A. Kinematic evolution of the Araçuaí-West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. **Precambrian Research**, vol. 149, no. 1–2, p. 43–64, Sep. 2006. DOI 10.1016/j.precamres.2006.06.007. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301926806001483>.
- APEL, H.; ARONICA, G. T.; KREIBICH, H.; THIEKEN, A. H. Flood risk analyses - How detailed do we need to be? **Natural Hazards**, vol. 49, no. 1, p. 79–98, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9277-8>.
- ARBABSIAR, M. H.; EBRAHIMI FARSANGI, M. A.; MANSOURI, H. Fuzzy logic modelling to predict the level of geotechnical risks in rock tunnel boring machine (TBM) tunnelling. **Rudarsko-geološko-naftni zbornik**, vol. 35, no. 2, p. 1–14, 2020. DOI 10.17794/rgn.2020.2.1. Available at: https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=344626&lang=en.
- BARTHOLY, J.; PONGRÁCZ, R. Global and regional climate change, extreme events. **International Climate Protection**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 21–28. DOI 10.1007/978-3-030-03816-8_4. Available at: http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-03816-8_4.
- BENSON, M. A. **Factors influencing the occurrence of floods in a humid region of diverse terrain**. [S. l.: s. n.], 1963. DOI 10.3133/wsp1580B. Available at: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp1580B>.
- BOHUSHENKO, A.; STEPANENKO, S.; KHOMENKO, I. Detecting climate change in Ukraine: trends, prediction and extreme events. 2021. [S. l.: s. n.], 2021. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-6197>.
- BRIOZO, R. A.; MUSETTI, M. A. Método multicritério de tomada de decisão: aplicação ao caso da localização espacial de uma Unidade de Pronto Atendimento – UPA 24 h. **Gestão & Produção**, vol. 22, no. 4, p. 805–819, 29 Sep. 2015. DOI 10.1590/0104-530X975-13. Available at:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2015000400805&lng=pt&tlng=pt.

- BRODY, S. D.; KANG, J. E.; BERNHARDT, S. Identifying factors influencing flood mitigation at the local level in Texas and Florida: the role of organizational capacity. **Natural Hazards**, vol. 52, no. 1, p. 167–184, 26 Jan. 2010. DOI 10.1007/s11069-009-9364-5. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s11069-009-9364-5>.
- CAMPANHARO, W. A. **Diagnostico físico da bacia do Rio Santa Maria do Doce-ES**. 2010. 72 f. Universidade Federal do Espírito Santo, 2010.
- CONCEIÇÃO, R. A.; SIMÕES, P.; DANTAS, M. Using relief patterns and quartile deviation for modeling of flood susceptibility maps: examples from Presidente Kennedy and Conceição do Castelo, Espírito Santo, Brazil. **Journal of the Geological Survey of Brazil**, vol. 2, no. 1, p. 75–86, 2019. <https://doi.org/10.29396/jgsb.2019.v2.n1.5>.
- CORPO DE BOMBEIROS MILITAR, D. E. S.; DEFESA CIVIL, C. E. DE; IPES, I. D. A. À. P.; IPES, D. J. D. S. N. **ARES - Atlas das Áreas com Potencial de Riscos do Estado do Espírito Santo**. Vitória. ES: DIO/ES, Departamento de Imprensa Oficial, 2006. Available at: http://www.mundogeomatica.com.br/Livro_Atlas_ARES (editado).pdf.
- CORREIA, E. F. G.; RIBEIRO, G. P.; BAPTISTA, A. C. Revista Brasileira de Cartografia. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, vol. 67, no. 6, p. 1183–1202, 17 Feb. 2015. Available at: <http://lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/955>. Accessed on: 4 Jul. 2018.
- CPRM, S. G. do B. **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes e movimentos de massa: Castelo, Espírito Santo**. [S. l.: s. n.], 2012. Available at: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/19462>.
- CUNHA, N. S.; MAGALHÃES, M. R.; DOMINGOS, T.; ABREU, M. M.; KÜPFER, C. The land morphology approach to flood risk mapping: An application to Portugal. **Journal of Environmental Management**, vol. 193, p. 172–187, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.077>.
- DALFI, R. L.; SANTOS, A. R.; CAMPOS, R. F.; MOREIRA, T. R.; EUGENIO, F. C.; SANTOS, G. M. A. D. A. Cenários Distintos no Mapeamento de áreas de inundação nos bairros do município de Alegre, ES. **Cadernos de Geociências**, vol. 10, p. 76–86, 2013. .
- DE CAMPOS, C. P.; CEZAR MENDES, J.; LUDKA, I. P.; DE MEDEIROS, S. R.; DE MOURA, J. C.; WALLFASS, C. A review of the Brasiliano magmatism in southern Espírito Santo, Brazil, with emphasis on post-collisional magmatism. **Journal of the Virtual Explorer**, vol. 17, 2004. <https://doi.org/10.3809/jvirtex.2004.00106>.
- DEFESA CIVIL, E. do E. S. Histórico De Desastres Do Estado Do Espírito Santo 2000-2009. , p. 114, 2009. Available at: http://www.defesacivil.es.gov.br/files/pdf/historico_de_desastres.pdf.

- DOS SANTOS, A. R.; ARAÚJO, E. F.; BARROS, Q. S.; FERNANDES, M. M.; DE MOURA FERNANDES, M. R.; MOREIRA, T. R.; DE SOUZA, K. B.; DA SILVA, E. F.; SILVA, J. P. M.; SANTOS, J. S.; BILLO, D.; SILVA, R. F.; NASCIMENTO, G. S. P.; DA SILVA GANDINE, S. M.; PINHEIRO, A. A.; RIBEIRO, W. R.; GONÇALVES, M. S.; DA SILVA, S. F.; SENHORELO, A. P.; ... DE ALMEIDATELLES, L. A. Fuzzy concept applied in determining potential forest fragments for deployment of a network of ecological corridors in the Brazilian Atlantic Forest. **Ecological Indicators**, vol. 115, p. 106423, Aug. 2020. DOI 10.1016/j.ecolind.2020.106423. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1470160X20303605>.
- DOS SANTOS, A. R.; PATERLINI, E. M.; FIEDLER, N. C.; RIBEIRO, C. A. A. S.; LORENZON, A. S.; DOMINGUES, G. F.; MARCATTI, G. E.; DE CASTRO, N. L. M.; TEIXEIRA, T. R.; DOS SANTOS, G. M. A. D. A.; JUVANHOL, R. S.; BRANCO, E. R. F.; MOTA, P. H. S.; DA SILVA, L. G.; PIROVANI, D. B.; DE JESUS, W. C.; SANTOS, A. C. de A.; LEITE, H. G.; IWAKIRI, S. Fuzzy logic applied to prospecting for areas for installation of wood panel industries. **Journal of Environmental Management**, vol. 193, p. 345–359, May 2017. DOI 10.1016/j.jenvman.2017.02.049. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479717301676>.
- EUGENIO, F. C.; DOS SANTOS, A. R.; FIEDLER, N. C.; RIBEIRO, G. A.; DA SILVA, A. G.; DOS SANTOS, Á. B.; PANETO, G. G.; SCHETTINO, V. R. Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil. **Journal of Environmental Management**, vol. 173, p. 65–71, May 2016. DOI 10.1016/j.jenvman.2016.02.021. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479716300627>.
- FAUZI, M.; SUPRAYOGI, I.; SUTIKNO, S.; SANDHYAVITRI, A.; RIYAWAN, E. Development of erosion risk map using fuzzy logic approach. **MATEC Web of Conferences**, vol. 101, p. 04021, 9 Mar. 2017. DOI 10.1051/mateconf/201710104021. Available at: <http://www.matec-conferences.org/10.1051/mateconf/201710104021>.
- FRAME, J.; KRATZERT, F.; KLOTZ, D.; GAUCH, M.; SHELEV, G.; GILON, O.; QUALLS, L.; GUPTA, H.; NEARING, G. Deep learning rainfall-runoff predictions of extreme events. 2021. <https://doi.org/10.5194/hess-2021-423>.
- FREGOLENTE, A.; ELLDORF, B.; SILVEIRA, M. C. D. M. **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes e movimentos de massa: Alegre, Espírito Santo**. [S. l.: s. n.], 2012. Available at: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/19447.1>.
- FRITZSONS, E.; MONTAVANI, L. E. Os Substratos Geológicos e os Coeficientes Morfométricos em Bacias Hidrográficas do Carste Dolomítico no Estado do Paraná (The Geological Substrates and Morphometric Coefficients in Dolomitic Karst in State of Paraná). **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol. 3, no. 3, p. 181, 16 Feb. 2011. DOI 10.26848/rbgf.v3i3.232662. Available at: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/232662>.
- HAN, R. Land use and land cover mapping using fuzzy logic. [S. l.: s. n.], 2014. p. 129–146. DOI 10.1007/978-3-319-03449-2_14. Available at: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-03449-2_14.

- HIRUMA, S. T.; PONÇANO, W. . Densidade de drenagem e sua relação com fatores geomorfológicos na área do alto rio Pardo, SP e MG. **Revista do Instituto Geológico**, vol. 15, no. 1/2, p. 49–57, 1994. .
- HO, M.; KIEM, A. S.; VERDON-KIDD, D. C. A paleoclimate rainfall reconstruction in the Murray-Darling Basin (MDB), Australia: 1. Evaluation of different paleoclimate archives, rainfall networks, and reconstruction techniques. **Water Resources Research**, vol. 51, no. 10, p. 8362–8379, 23 Oct. 2015. DOI 10.1002/2015WR017058. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2015WR017058>.
- HONG, H.; TSANGARATOS, P.; ILIA, I.; LIU, J.; ZHU, A. X.; CHEN, W. Application of fuzzy weight of evidence and data mining techniques in construction of flood susceptibility map of Poyang County, China. **Science of the Total Environment**, vol. 625, p. 575–588, 1 Jun. 2018. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.12.256. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969717336902>. Accessed on: 13 Feb. 2020.
- HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **GSA Bulletin**, vol. 56, no. 3, p. 275–370, 1 Mar. 1945. DOI 10.1130/0016-7606(1945)56[275:edosat]2.0.co;2. Available at: <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article-abstract/56/3/275/4075/erosional-development-of-streams-and-their?redirectedFrom=fulltext>. Accessed on: 25 Apr. 2019.
- HU, M.; SAYAMA, T.; ZHANG, X.; TANAKA, K.; TAKARA, K.; YANG, H. Evaluation of low impact development approach for mitigating flood inundation at a watershed scale in China. **Journal of Environmental Management**, vol. 193, p. 430–438, 2017. DOI 10.1016/j.jenvman.2017.02.020. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.020>.
- INMET, INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. 2020. Available at: http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=sobre_inmet. Accessed on: 11 Feb. 2020.
- IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas. *In*: F., S. T.; D., Q.; G., P.; B., T. M. M.; K., A. S.; J., B.; A., N.; Y., X.; V., B.; M., M. P. (eds.). **Resumo para Decisores**. Cambridge, Reino Unido e Nova Iorque: Painel Intergovernamental Sobre Alterações Climáticas 2013, 2013. p. 210.
- ISHIZAKA, A. Comparison of fuzzy logic, AHP, FAHP and hybrid fuzzy AHP for new supplier selection and its performance analysis. **International Journal of Integrated Supply Management**, vol. 9, no. 1/2, p. 1, 2014. DOI 10.1504/IJISM.2014.064353. Available at: <http://www.inderscience.com/link.php?id=64353>.
- JIANG, W.; DENG, L.; CHEN, L.; WU, J.; LI, J. Risk assessment and validation of flood disaster based on fuzzy mathematics. **Progress in Natural Science**, vol. 19, no. 10, p. 1419–1425, Oct. 2009. DOI

10.1016/j.pnsc.2008.12.010. Available at:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1002007109002081>. Accessed
on: 13 Feb. 2020.

JUN, K. S.; CHUNG, E. S.; KIM, Y. G.; KIM, Y. A fuzzy multi-criteria approach to flood risk vulnerability in South Korea by considering climate change impacts. **Expert Systems with Applications**, vol. 40, no. 4, p. 1003–1013, Mar. 2013. DOI 10.1016/j.eswa.2012.08.013. Available at:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957417412009748>. Accessed
on: 13 Feb. 2020.

LANA, C. E.; ALVES, J. M. de P.; CASTRO, P. de T. A. Análise morfométrica da bacia do Rio do Tanque, MG - Brasil. **Revista Escola de Minas**, vol. 54, no. 2, p. 121–126, Jun. 2001. DOI 10.1590/S0370-44672001000200008. Available at: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672001000200008&lng=pt&tlng=pt.

LANI, J. L.; REZENDE, S. B. de; RESENDE, M. Estratificação de ambientes com base nas classes de solos e outros atributos na Bacia do Rio Itapemirim, Espírito Santo. **Revista CERES**, v48, n276, Viçosa, MG, , p. 239–261, 2001. .

LAZARETTI, A. F.; SILVEIRA, M. C. de M. **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes e movimentos de massa: Jerônimo Monteiro, Espírito Santo**. [S. l.: s. n.], 2012.

LECHOWSKA, E. What determines flood risk perception? A review of factors of flood risk perception and relations between its basic elements. **Natural Hazards**, vol. 94, no. 3, p. 1341–1366, 25 Dec. 2018. DOI 10.1007/s11069-018-3480-z. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s11069-018-3480-z>.

MAGALHÃES, I.; THIAGO, C. Uso de Geotecnologias Para Mapeamento De Áreas De Risco De Inundação Em Guaçuí, Es: Uma Análise Comparativa Entre Dois Métodos. **Cadernos de ...**, vol. 8, no. 1993, p. 63–70, 16 Dec. 2011. Available at: <https://rigs.ufba.br/index.php/cadgeoc/article/view/5288>. Accessed on: 4 Jul. 2018.

MENDELSON, R.; EMANUEL, K.; CHONABAYASHI, S.; BAKKENSEN, L. The impact of climate change on global tropical cyclone damage. **Nature Climate Change**, vol. 2, no. 3, p. 205–209, 2012. DOI 10.1038/nclimate1357. Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1357>.

MORITA, M. Quantification of increased flood risk due to global climate change for urban river management planning. **Water Science and Technology**, vol. 63, no. 12, p. 2967–2974, Jun. 2011. DOI 10.2166/wst.2011.172. Available at: <https://iwaponline.com/wst/article/63/12/2967/14583/Quantification-of-increased-flood-risk-due-to>. Accessed on: 13 Feb. 2020.

MUKHOPADHYAY, P.; KRISHNAN, R.; NANJUNDIAH, R. S.; MOHAPATRA, M. Prediction of extreme events: current status and future pathways against the backdrop of climate change. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 101, no. 7, p. E1137–E1141, 1 Jul. 2020. DOI 10.1175/BAMS-D-20-0037.1. Available at:

<https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/101/7/bamsD200037.xml>.

- OLUFISAYO, A.-I. O.; OLATUNBOSUN, A. M.; OLUWAFEMI, O. A.; OLUWOLE, A. H. Fuzzy logic approach to energy planning in Nigeria. **Journal of Engineering Studies and Research**, vol. 26, no. 4, p. 86–96, 8 Jan. 2021. DOI 10.29081/jesr.v26i4.240. Available at: <http://jesr.ub.ro/1/article/view/240>.
- PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; WIEDEMANN, C. M.; PINTO, C. P. The Araçuaí-West-Congo Orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. **Precambrian Research**, vol. 110, no. 1–4, p. 307–323, 1 Aug. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00174-7](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00174-7).
- PEDROSA-SOARES, A. C.; WIEDEMANN-LEONARDOS, C. M. Evolution of Araçuaí Belt and its connection to the Ribeira Belt, eastern Brazil. *In*: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; FILHO, A. T.; CAMPOS, D. de A. (eds.). **Tectonic evolution of South America**. [S. l.]: Sociedade Brasileira de Geologia, 2000. p. 265–285. <https://doi.org/10.13140/2.1.3802.5928>.
- PEDUZZI, P.; CHATENOUX, B.; DAO, H.; DE BONO, A.; HEROLD, C.; KOSSIN, J.; MOUTON, F.; NORDBECK, O. Global trends in tropical cyclone risk. **Nature Climate Change**, vol. 2, no. 4, p. 289–294, 2012. DOI 10.1038/nclimate1410. Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1410>.
- PLASTER, O. B.; SILVA, K. R.; PEREIRA, D. P.; VIERIA, E. H. F.; BOLZAN, H. M. R.; FIEDLER, N. C.; SANTOS, A. R. Risco de inundação para o município de Jerônimo Monteiro, ES. **XII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica**, São José dos Campos, , p. 1–4, 2008. .
- POURGHASEMI, H. R.; PRADHAN, B.; GOKCEOGLU, C. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. **Natural Hazards**, vol. 63, no. 2, p. 965–996, 26 Sep. 2012. DOI 10.1007/s11069-012-0217-2. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s11069-012-0217-2>.
- RAJASEKHAR, M.; SUDARSANA RAJU, G.; SREENIVASULU, Y.; SIDDI RAJU, R. Delineation of groundwater potential zones in semi-arid region of Jilledubanderu river basin, Anantapur District, Andhra Pradesh, India using fuzzy logic, AHP and integrated fuzzy-AHP approaches. **HydroResearch**, vol. 2, p. 97–108, Dec. 2019. DOI 10.1016/j.hydres.2019.11.006. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2589757819300204>.
- RASPOPOV, O. M.; DERGACHEV, V. A.; OGURTSOV, M. G.; KOLSTRÖM, T.; JUNGNER, H.; DMITRIEV, P. B. Variations in climate parameters at time intervals from hundreds to tens of millions of years in the past and its relation to solar activity. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, vol. 73, no. 2–3, p. 388–399, Feb. 2011. DOI 10.1016/j.jastp.2010.02.012. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136468261000060X>. Accessed on: 12 Feb. 2020.
- RENYI, L.; NAN, L. Flood area and damage estimation in Zhejiang, China. **Journal of Environmental Management**, vol. 66, no. 1, p. 1–8, 2002.

<https://doi.org/10.1006/jema.2002.0544>.

- ROCHA, J. S. M. da. **Manual de projetos ambientais**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1997. Available at: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=764743&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22ROCHA,J.S.M.da%22&qFacets=autoria:%22ROCHA,J.S.M.da%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1>.
- SADEGHI, S. H.; EILDOROMI, A.; FARAMARZI, M. New application of fuzzy logic algorithm in GIS for land classification. **Forum geografic**, vol. XVIII, no. 2, p. 161–169, 30 Dec. 2019. DOI 10.5775/fg.2019.068.d. Available at: <http://forumgeografic.ro/2019/2587/>.
- SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy. **GSA Bulletin**, vol. 67, no. 5, p. 597–646, 1 May 1956. DOI 10.1130/0016-7606(1956)67[597:eodsas]2.0.co;2. Available at: <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article-abstract/67/5/597/4811/evolution-of-drainage-systems-and-slopes-in?redirectedFrom=fulltext>.
- SCHUMM, S. A. Sinuosity of alluvial rivers on the great plains. **GSA Bulletin**, vol. 74, no. 9, p. 1089–1100, 1 Sep. 1963. DOI 10.1130/0016-7606(1963)74[1089:soarot]2.0.co;2. Available at: <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article-abstract/74/9/1089/5653/sinuosity-of-alluvial-rivers-on-the-great-plains?redirectedFrom=fulltext>. Accessed on: 25 Apr. 2019.
- SEDURB, S. de S. H. e D. U. Plano de Redução de Risco. 2013. Available at: <https://sedurb.es.gov.br/plano-de-reducao-de-risco-2>.
- SEPEHRI, M.; MALEKINEZHAD, H.; JAHANBAKHSHI, F.; ILDOROMI, A. R.; CHEZGI, J.; GHORBANZADEH, O.; NAGHIPOUR, E. Integration of interval rough AHP and fuzzy logic for assessment of flood prone areas at the regional scale. **Acta Geophysica**, vol. 68, no. 2, p. 477–493, 28 Apr. 2020. DOI 10.1007/s11600-019-00398-9. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s11600-019-00398-9>.
- SILVA, J. N. da (Org) C. Cachoeiro de Itapemirim: folha SF.24-V-A-V. 1993. .
- STAGER, J. C.; RYVES, D. B.; KING, C.; MADSON, J.; HAZZARD, M.; NEUMANN, F. H.; MAUD, R. Late Holocene precipitation variability in the summer rainfall region of South Africa. **Quaternary Science Reviews**, vol. 67, p. 105–120, 1 May 2013. DOI 10.1016/j.quascirev.2013.01.022. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0277379113000310>. Accessed on: 12 Feb. 2020.
- STRAHLER, A. N. Dimensional analysis applied to fluvially eroded landforms. **GSA Bulletin**, vol. 69, no. 3, p. 279–300, 1 Mar. 1958. DOI 10.1130/0016-7606(1958)69[279:daatfe]2.0.co;2. Available at: <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article-abstract/69/3/279/4980/dimensional-analysis-applied-to-fluvially-eroded?redirectedFrom=fulltext>.

- STRAHLER, A. N. Hypsometric analysis of erosional topography. **GSA Bulletin**, vol. 63, no. 11, p. 1117–1142, 1 Nov. 1952. DOI 10.1130/0016-7606(1952)63[1117:haoet]2.0.co;2. Available at: <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article-abstract/63/11/1117/4477/hypsometric-area-altitude-analysis-of-erosional?redirectedFrom=fulltext>.
- THIEKEN, A. H.; MÜLLER, M.; KREIBICH, H.; MERZ, B. Flood damage and influencing factors: New insights from the August 2002 flood in Germany. **Water Resources Research**, vol. 41, no. 12, Dec. 2005. DOI 10.1029/2005WR004177. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/2005WR004177>.
- USGS, U. S. G. S. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Non-Void Filled. 2017. <https://doi.org/10.5066/F7PR7TFT>.
- VARGAS, L. G. An overview of the analytic hierarchy process and its applications. **European Journal of Operational Research**, vol. 48, no. 1, p. 2–8, Sep. 1990. DOI 10.1016/0377-2217(90)90056-H. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/037722179090056H>.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: Mc Graw Hill, 1975. Available at: https://books.google.com.br/books?id=CJQ6HAAACAAJ&dq=Hidrologia+aplicada+villela+mattos&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwjD5_TV5OvhAhVPs1kKHcSWDXMQ6AEIKTAA.
- WALSH, T. C.; POMEROY, C. A.; BURIAN, S. J. Hydrologic modeling analysis of a passive, residential rainwater harvesting program in an urbanized, semi-arid watershed. **Journal of Hydrology**, vol. 508, p. 240–253, 2014. DOI 10.1016/j.jhydrol.2013.10.038. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.038>.
- WU, X.; WANG, Z.; GUO, S.; LIAO, W.; ZENG, Z.; CHEN, X. Scenario-based projections of future urban inundation within a coupled hydrodynamic model framework: A case study in Dongguan City, China. **Journal of Hydrology**, vol. 547, p. 428–442, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.020>.
- ZHANG, S.; PAN, B. An urban storm-inundation simulation method based on GIS. **Journal of Hydrology**, vol. 517, p. 260–268, Sep. 2014. DOI 10.1016/j.jhydrol.2014.05.044. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169414004089>.
- ZHAO, C.; CHENG, J.; WANG, J.; YAN, H.; LENG, C.; ZHANG, C.; FENG, X.; LIU, W.; YANG, X.; SHEN, J. Paleoclimate significance of reconstructed rainfall isotope changes in Asian Monsoon Region. **Geophysical Research Letters**, vol. 48, no. 12, 28 Jun. 2021. DOI 10.1029/2021GL092460. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021GL092460>.
- ZHENG, Z.; GAO, J.; MA, Z.; WANG, Z.; YANG, X.; LUO, X.; JACQUET, T.; FU, G. Urban flooding in China: Main causes and policy recommendations. **Hydrological Processes**, vol. 30, no. 7, p. 1149–1152, 2016. <https://doi.org/10.1002/hyp.10717>.

ZHU, Z.; CHEN, Z.; CHEN, X.; HE, P. Approach for evaluating inundation risks in urban drainage systems. **Science of the Total Environment**, vol. 553, p. 1–12, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.025>.

ZOU, Q.; ZHOU, J.; ZHOU, C.; GUO, J.; DENG, W.; YANG, M.; LIAO, L. Fuzzy risk analysis of flood disasters based on diffused-interior-outer-set model. **Expert Systems with Applications**, vol. 39, no. 6, p. 6213–6220, May 2012. DOI 10.1016/j.eswa.2011.12.008. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957417411016794>. Accessed on: 13 Feb. 2020.

CAPÍTULO 3

SOLOS DA REGIÃO MÉDIA DA BACIA DO RIO ITAPEMIRIM: FERTILIDADE E RELAÇÃO COM FATORES AMBIENTAIS

RESUMO

O Sul do Espírito Santo desperta interesse especial por múltiplas razões. De acordo com a sua história geológico/estrutural, apresenta grandes estruturas como zonas de cisalhamento, falhas e fraturas que geraram escalonamento do relevo, permitindo que a geomorfologia e litologia sejam diferenciadas. Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo principal analisar os parâmetros físicos, químicos e magnéticos dos solos da área de estudo, para melhor entendimento de sua dinâmica ambiental. A metodologia constituiu inicialmente da determinação de áreas homogêneas com relação da morfometria e hidrografia. O hipercubo latino condicionado foi utilizado para determinar os locais mais representativos para coleta de amostras de solo. As coletas foram realizadas nos locais pré-determinados, compostas por duas amostras, referentes a duas profundidades (0-20 cm e 60-80 cm). Foram realizadas análises granulométricas, químicas e magnéticas do solo. Estes dados foram submetidos a estatística descritiva, análise de fatores e análise geoestatística para melhor entendimento da distribuição espacial e caracterização ambiental. A determinação das unidades geomorfológicas e posterior utilização do algoritmo hipercubo latino foi eficiente em determinar os locais mais representativos para coleta dos solos, pois permitiu fazer análises de forma satisfatória da relação dos fatores de formação e dos atributos dos solos por meio de análise multivariada. A análise de fatores permitiu diferenciar 4 fatores para a profundidade de 0-20 cm e cinco fatores para a profundidade de 60-80 cm. Os quatro fatores referentes a 0-20 cm de profundidade estão associados a soma de bases, magnetismo dos solos, textura/nutriente e metais no solo. Os cinco fatores referentes a 60-80 cm de profundidade estão associados a soma de bases, associação P e Zn, atividade da argila, magnetismo e translocação de argila. Os fatores estudados mostraram correlação significativa com o clima, índices de vegetação, relevo e geologia, demonstrando a dinâmica ambiental dos atributos estudados.

ABSTRACT

The south of Espírito Santo arouses special interest for multiple reasons. According to its geological/structural history, it presents large structures such as shear zones, faults and fractures that generated a staggering of the relief, allowing the geomorphology and lithology to be differentiated. Given the above, the present work has as main objective to analyze the physical, chemical and magnetic parameters of the soils in the study area, in order to better understand their environmental dynamics. The methodology initially consisted of determining homogeneous areas in relation to morphometry and hydrography. The conditioned Latin hypercube was used to determine the most representative locations for collecting soil samples. The collections were carried out in predetermined places, consisting of two samples, referring to two depths (0-20 cm and 60-80 cm). Particle size, chemical and magnetic analyzes of the soil were carried out. These data were submitted to descriptive statistics, factor analysis and geostatistical analysis for a better understanding of the spatial distribution and environmental characterization. The determination of geomorphological units and subsequent use of the Latin hypercube algorithm was efficient in determining the most representative locations for soil collection, as it allowed for satisfactory analyzes of the relationship between formation factors and soil attributes through multivariate analysis. The factor analysis allowed to differentiate 4 factors for the 0-20 cm depth and five factors for the 60-80 cm depth. The four factors referring to 0-20 cm depth are associated with the sum of bases, soil magnetism, texture/nutrient and metals in the soil. The five factors referring to 60-80 cm depth are associated with the sum of bases, P and Zn association, clay activity, magnetism and clay translocation. The studied factors showed a significant correlation with climate, vegetation indices, relief and geology, demonstrating the environmental dynamics of the studied attributes.

1. Introdução

O Sul do Espírito Santo desperta interesse pedológico especial por múltiplas razões. De acordo com a sua história geológico/estrutural, apresenta grandes estruturas como zonas de cisalhamento, falhas e fraturas que geraram escalonamento do relevo, permitindo que a geomorfologia e litologia sejam diferenciadas. Nesta região ocorrem rochas máficas/ultramáficas (básicas), que por sua vez, originaram solos com textura mais argilosa, cores avermelhadas e maior fertilidade natural (VIDAL-TORRADO *et al.*, 2006). Também ocorrem rochas ácidas que possuem minerais ricos em SiO₂, chamados de minerais félsicos (apresentam cores claras). Dentre eles destacam-se o quartzo e os feldspatos, assim originando solos de textura com tendência arenosa, cores amareladas e baixa fertilidade natural (PEREIRA *et al.*, 2019).

A importância da Geomorfologia é reconhecida pois é responsável pelo controle de toda dinâmica dos fluxos de água na paisagem, como lixiviação de solutos, atuação de processos erosivos e condições de drenagem (ANJOS *et al.*, 1998).

A susceptibilidade magnética do solo (k) é um atributo que, nos últimos tempos, tem sido melhor estudado, pois possui potencial para ser usada como um indicador pedoambiental a partir do qual a mineralogia, processos pedogeoquímicos, pedogeomorfológicos e pedogênicos podem ser inferidos (MENDES *et al.*, 2021; CÉSAR DE MELLO *et al.*, 2020).

A relação entre solos e fatores ambientais foi documentada inicialmente por (DOKUCHAEV, 1883) e aperfeiçoada por (JENNY, 1941), e atualmente é abordada no contexto da pedometria (MCBRATNEY; MENDONÇA SANTOS; MINASNY, 2003). Os tradicionais fatores de formação do solo como material de origem, clima, relevo, organismos e suas variações ao longo do tempo são os principais responsáveis pela herança das características físicas e químicas dos solos. O ser humano, através do uso e manejo do solo, é responsável por modificar seus atributos (CAPOANE *et al.*, 2018; NASCIMENTO *et al.*, 2014; GILLER *et al.*, 2006). SCHOENHOLTZ; MIEGROET; BURGER (2000) ressaltam a necessidade de avaliar os atributos do solo e mapeá-la devido ao crescente interesse quanto aos seus diferentes serviços ambientais. A espacialização desses atributos é abordada dentro dos conceitos de mapeamento digital de

solos (YANG et al., 2020; MA et al., 2019; SILVA et al., 2018; MCBRATNEY; MENDONÇA SANTOS; MINASNY, 2003).

Os efeitos danosos da agricultura intensiva são amplamente documentados e reconhecidos (CAPOANE et al., 2018; TIECHER et al., 2017; ZAFAR et al., 2017; ZHANG et al., 2017; OBOUR; STAHLMAN; HOLMAN, 2016). Assim, o direcionamento de práticas conservacionistas do solo se faz necessário e, como primeira etapa, deve-se conhecer, diagnosticar e espacializar os atributos do solo para entender sua gênese e auxiliar no seu manejo.

A história da colonização no Espírito Santo é baseada na retirada da mata nativa para a plantação de cafezais. Este cenário se estendeu até a década de 1960, quando houve a erradicação do café e a pecuária bovina surgiu como alternativa (DADALTO *et al.*, 2016). O Estado do Espírito Santo sofreu um processo acelerado e indiscriminado de desmatamento, restando cerca de 11% de remanescentes florestais dispersos. Este fato, aliado ao uso do solo, resultou em prejuízos para o setor econômico e ambiental capixaba evidenciados pela degradação do solo em área cultivadas, assoreamento e poluição dos recursos hídricos, redução do potencial produtivo e da área agricultável, aumento na necessidade de fertilizantes e irrigação, destruição de estradas, entre outros (BARRETO; SARTORI, 2012).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo principal analisar os atributos físicos, químicos e magnéticos dos solos da região média da bacia hidrográfica do rio Itapemirim para melhor entender sua dinâmica ambiental.

2. Materiais e métodos

2.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo corresponde a região média da bacia hidrográfica do rio Itapemirim. Está localizada no Sul do estado do Espírito Santo, abrangendo a área de aproximadamente 3.715 km², que inclui os municípios de Alegre, Jerônimo Monteiro, Cachoeiro do Itapemirim, Muqui, Castelo, Conceição do Castelo, Venda Nova do Imigrante e Domingos Martins. As sub-bacias hidrográficas inseridas na área de estudo pertencem à bacia hidrográfica do rio Itapemirim sendo elas as do: rio Alegre, rio Braço Norte Esquerdo, rio Castelo,

rio São João de Viçosa, rio Caxixe, rio da Prata e partes da sub-bacia do rio Fruteira, rio Braço Norte Direito e sub-bacia do Itapemirim. A importância dessa região está relacionada às áreas destinadas à pecuária e produção de café, regiões com cultivos de olerícolas, às regiões de recarga de aquíferos que alimentam a bacia do rio Itapemirim, assim como a crescente instalação de indústrias do setor de rochas e de mineração (Figura 1). O clima e temperatura são variáveis, devido à grande amplitude altimétrica, que varia de 8 a 2009 metros de altitude.

Em relação à geologia, a área em estudo está geotectonicamente inserida no Orógeno Araçuaí (ou orógeno Araçuaí - Oeste do Congo), no qual faz parte da Província Mantiqueira (HEILBRON *et al.*, 2004). A Província Mantiqueira representa um sistema orogênico Neoproterozóico situado no sul e sudeste do Brasil. O orógeno Araçuaí é um dos muitos orógenos Brasileiro/Pan-Africano que se desenvolveram durante a junção do Gondwana Ocidental. Este orógeno foi dividido no Mesozoico, devido à abertura do Atlântico Sul, onde orógeno Araçuaí se situa a leste do Brasil e o cinturão do Congo Ocidental se encontra a oeste, na costa da África central. Significativamente, na época se formou, o orógeno Araçuaí foi delimitado a oeste, norte e leste pelo Cráton São Francisco-Congo, um bloco crustal que tinha a forma de um 'U'. Assim, o orógeno foi "parcialmente confinado" durante o tectonismo, no sentido de que ocupou um enclave cercado em três lados pela crosta cratônica (PEDROSA-SOARES *et al.*, 2001; ALMEIDA; BRITO NEVES; DAL RÉ CARNEIRO, 2000; NEVES; NETO; FUCK, 1999; TROMPETTE, 1997, 2020).

De acordo com o modelo de ALKIMIN *et al.* (2006), a formação do orógeno Araçuaí resultou da deformação cinematicamente complexa, encurtamento crustal substancial e produção de um grande volume de magma. O orógeno Araçuaí se formou em resposta ao fechamento da bacia do Macaúbas, onde a formação do orógeno se assemelha ao processo de esmagamento intitulado "quebra-nozes". Inicialmente, porções internas do orógeno fluíram para o norte. Em seguida, um espessamento crustal substancial ocorreu no interior do orógeno, e a frente de deformação migrou para fora, produzindo cintos de impulso que se sobrepunham às margens internas do Cráton. Com o fechamento contínuo, espaço no enclave tornou-se restrito e o interior do orógeno sofreu fuga lateral para o sul. O colapso extensional de estágio final desencadeou ambos

produção de granitos tardios a pós-colisionais e exumação de rochas de alto grau de níveis médios da crosta terrestre.

De acordo com (VIEIRA; MENEZES, 2015), a porção estudada do orógeno Araçuaí possui a seguinte sequência litoestratigráfica:

e) Rochas Paleoproterozóicas – correspondem a rochas do embasamento complexo. São compostos por rochas do Complexo Serra do Valentim (noritos e charno-enderbitos) e do Complexo Juiz de Fora (ortognaisses migmatíticos e metabasitos).

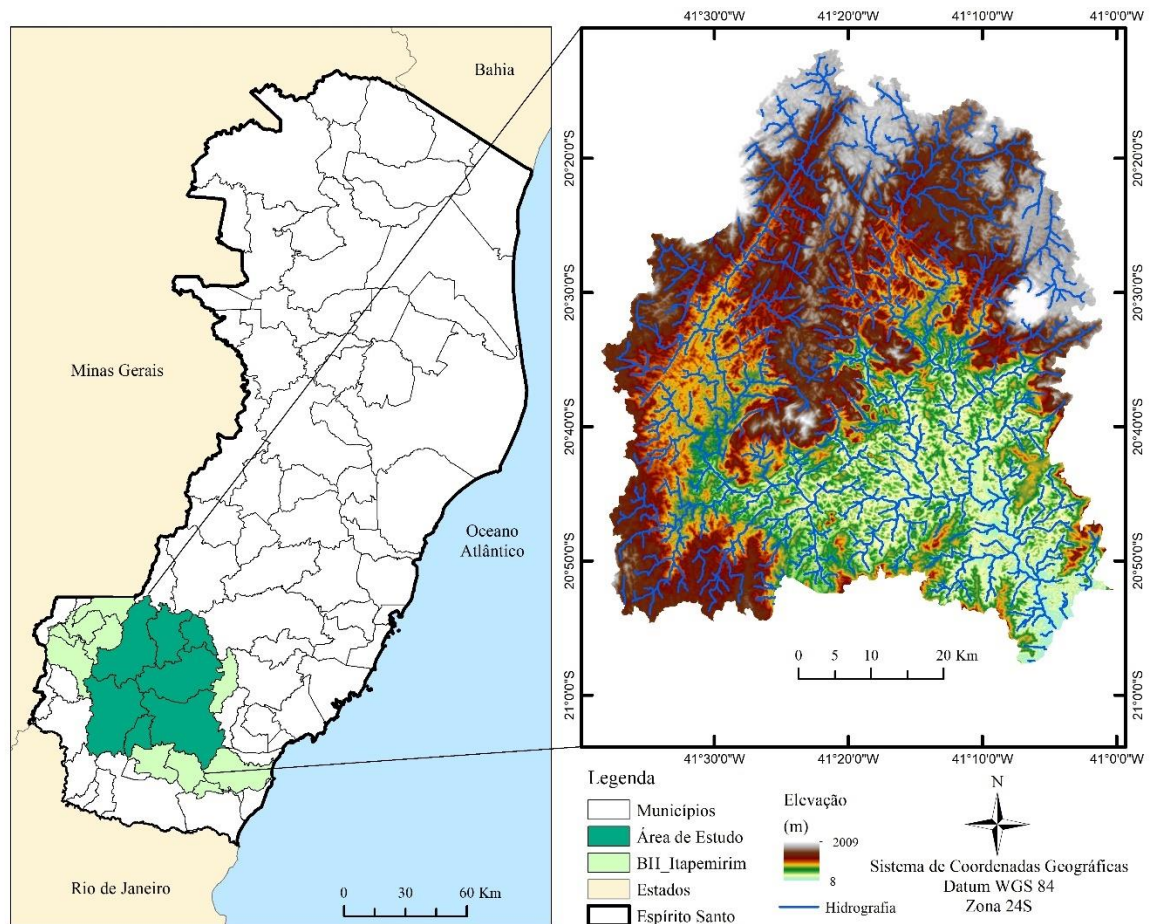
f) Rochas Neoproterozóica – Estágio pré-orogênico: correspondem às rochas metamórficas de origem sedimentar e vulcânica. A bacias sedimentar de ante arco são compostas por rochas metassedimentares e metavulcânicas do Grupo Rio Doce (Formação Palmital do Sul) e Grupo Bom Jesus do Itabapoana (Unidade Bom Jesus do Itabapoana). A bacia sedimentar de retro arco é composta por rochas metavulcanossedimentares do Complexo Nova Venécia, Grupo Itálva (Unidade São, Unidade e Unidade Serra da Prata) e Grupo São Fidélis.

g) Rochas Proterozoica – Estágio pré a sin orogênico: corresponde aos granitoides gnáissicos predominantemente metaluminosos, calcialcalinos tipo I. Pertencem a este conjunto de rochas a Unidade Raposo, os Ortognaisses (Muniz Freire, Santa Helena, Cachoeiro, Estrela, Muqui), Granodiorito Santa Maria de Baixo, Tonalitos (Jequitibá e Alto Guandu) e Granito Brejetuba.

h) Rochas Proterozoicas – Estágio pós-orogênico: corresponde aos corpos graníticos associados ao estágio de colapso extensional do Orógeno Araçuaí, representado pela Suíte G5. Fazem parte desse conjunto de rochas os Maciços Santa Angélica, Alto Chapéu, Venda Nova e Castelo.

CALEGARI (2015) faz um relato da situação tectonoestrutural da área de estudo. Com relação aos grandes lineamentos, o padrão NE-SW com inflexão para NNE-SSW a N-S está relacionado a colisão continental do evento Brasileiro/Panafricano que gerou o orógeno Araçuaí. O colapso do orógeno e sua fase extensional gerou falhas de transferência que possuem direção predominante NW-SE. Este esforço distensivos que atuou no sudeste do Brasil com direção NW-SE a NNW-SSE deu origem ao Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). Devido à mudança no tensor distensivo imposto pela rotação

da placa Sul-americana para oeste, foram geradas estruturas com direções E-W.



*BHRI: Bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Figura 1 - Localização da área de estudo.

2.2. Visão geral da metodologia

A metodologia deste trabalho foi dividida em seis etapas principais (Figura 2), resumidas abaixo:

- 1) Determinação de áreas homogêneas – Unidades geomorfológicas (Capítulo 1);
- 1) Utilização do hipercubo latino condicionado;
- 2) Coleta das amostras de campo;
- 3) Análises granulométricas, químicas e magnéticas;
- 4) Tratamento dos dados.

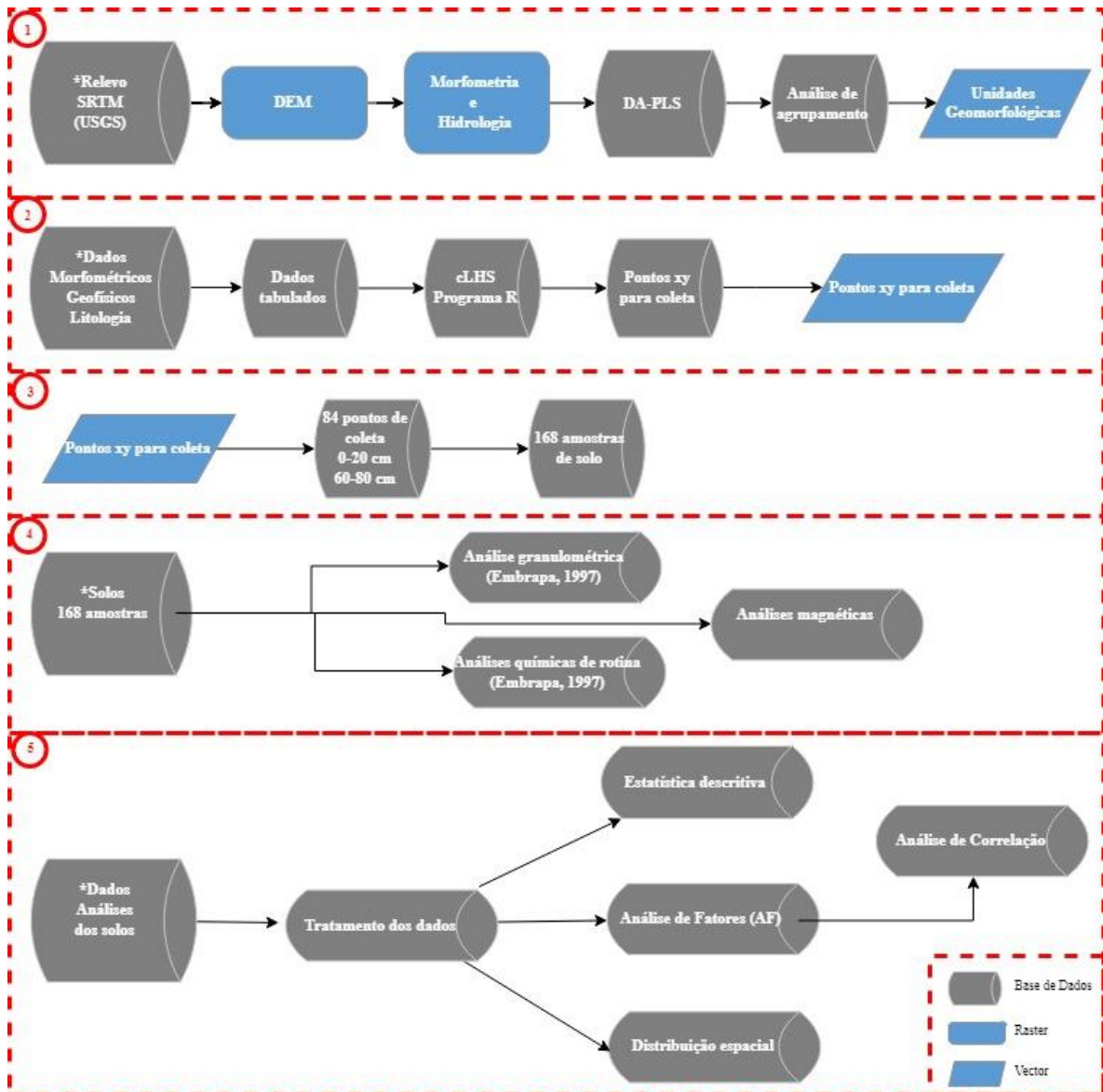


Figura 2 - Etapas metodológicas para separação dos unidades geomorfológicas na região média da bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

2.2.1. Delimitação de áreas morfometricamente homogêneas

Como citado no Capítulo 1, foi realizada análise discriminante por mínimos quadrados parciais (DA-PLS) em conjunto com análise de agrupamento em dados morfométricos e hidrológicos, onde foram estratificadas 8 unidades geomorfológicas. A amostragem foi realizada em 4 unidades geomorfológicas: Planícies e terraços aluviais, Depressão de colinas e morros suaves, Patamar escalonado planalto estrutural II e Patamar escalonado de pontões e maciços serranos (Figura 3).

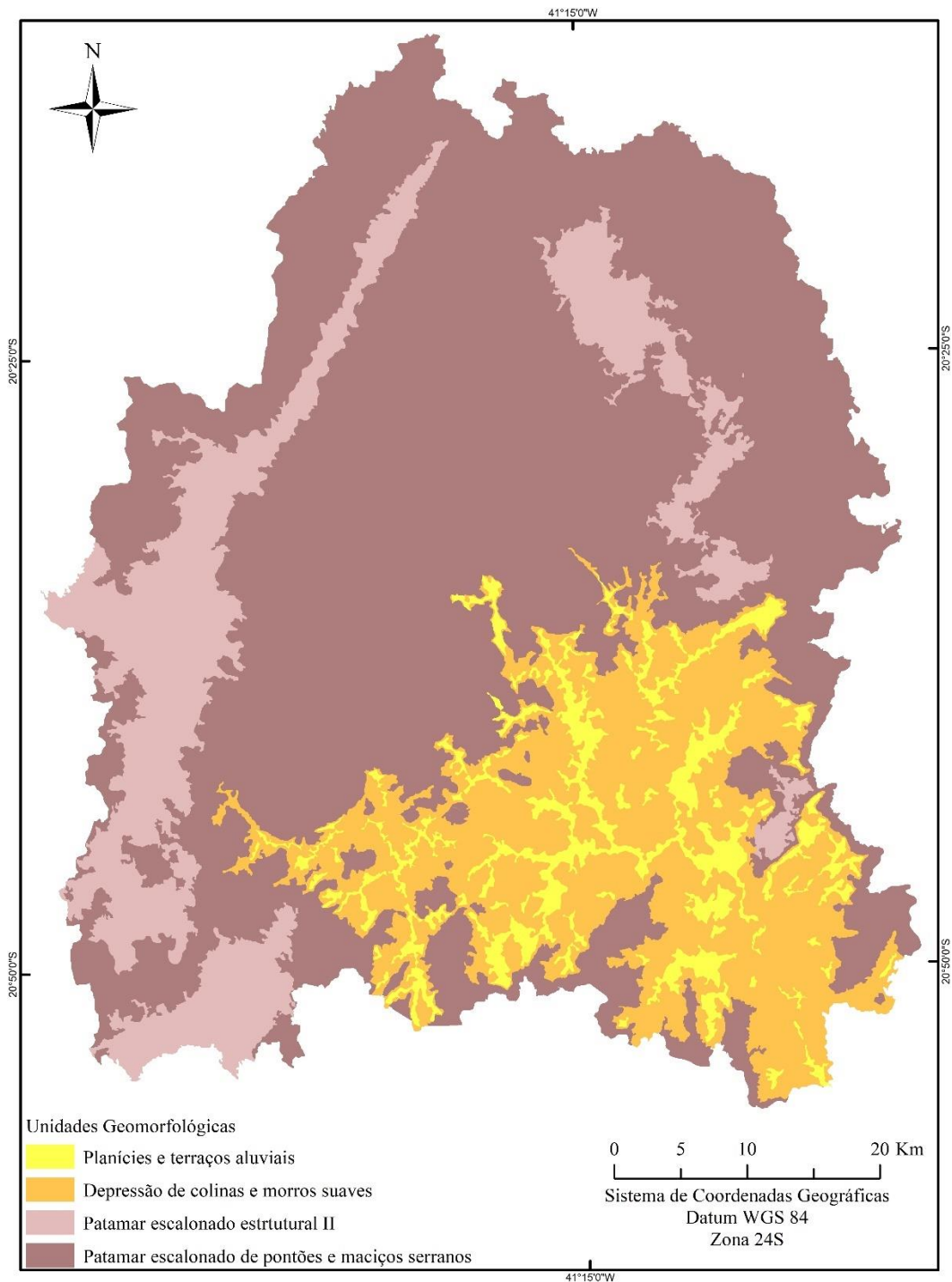


Figura 3 - Unidades geomorfológicas delimitadas pelo estudo na região média da bacia hidrográfica do rio Itapemirim, gerado no primeiro capítulo deste trabalho.

2.2.2. Hiper-cubo latino condicionado

Foram usadas informações do relevo, clima e geologia para o processo de amostragem. Para o relevo foram usados os atributos morfométricos: declive, *topographic wetness index*, forma do relevo (concauidade e convexidade) e classificação do relevo com base nos elementos do algoritmo Geomorphons

(JASIEWICZ; STEPINSKI, 2013) com auxílio do software Saga 2.3.2 e derivados do Modelo Digital de Elevação (MDE), providos da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) com resolução de 30 m.

Com relação aos dados climáticos, foi calculada a diferença entre Precipitação Anual e Evapotranspiração Potencial (P-ETP), a partir dos dados de precipitação e temperatura média do ar, sendo calculada a evapotranspiração potencial pelo método proposto por THORNTHWAITE; MATHER (1955) com auxílio do programa "BHnorm" (ROLIM; SENTELHAS; BARBIERI, 1998).

Os dados geológicos foram obtidos do mapa geológico (VIEIRA *et al.*, 2018) e do levantamento gamaespectrométrico (canais do K, Th e U) do Espírito Santo (CPRM, 2009). Após codificação das informações qualitativas foi utilizado a amostragem aleatória estratificada através do método do hipercubo latino condicionado - cLHS (MINASNY; MCBRATNEY, 2006), através do programa computacional R. Estes parâmetros foram escolhidos por serem reconhecidos pela literatura como os mais representativos para a realização de levantamentos de solos de média escala (PINHEIRO, 2015; CARVALHO JUNIOR *et al.*, 2011; CHAGAS *et al.*, 2010). A metodologia do hipercubo latino foi aplicada a cada unidade geomorfológica determinada na etapa anterior, selecionando os locais mais representativos para amostragem, totalizando 84 locais de amostragem (Figura 4).

2.2.3. Coleta de amostras de solo

Foram amostrados 84 locais por meio de trado holandês de aço inox. Para cada local de amostragem foram obtidas duas amostras de profundidades diferentes (0 – 20 cm e 60 – 80 cm). Na profundidade de 0-20 cm foi realizada amostragem composta de 6 a 8 amostras simples. A profundidade de 60-80 cm foi realizada amostragem composta de 3 amostras simples. As coletas totalizaram 168 amostras de solo (Figura 3). As coletas foram realizadas predominantemente em locais de pastagem.

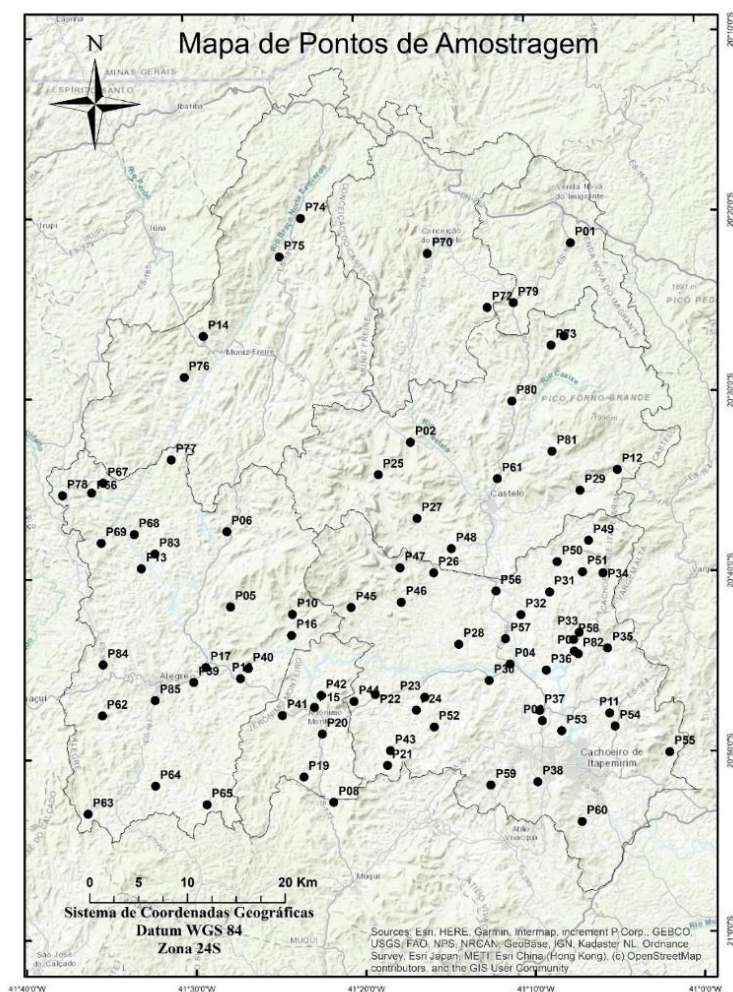


Figura 4 - Localização dos pontos de amostragem de solo na Região Média da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim.

2.2.4. Análises granulométricas e químicas

Foi realizada análise granulométrica e química de acordo com o método da pipeta proposto pela (TEIXEIRA et al., 2017). Dessa forma, análise de pH foi realizada com relação solo-água 1:2,5; o fósforo (P) foi analisado por meio do extrator Mehlich 1 e determinado por colorimetria; o potássio, sódio, ferro, cobre e zinco e manganês (K, Na, Fe, Cu, Zn e Mn) foi analisado por meio do extrator Mehlich-1 e determinado por espectrofotometria de chama; o cálcio e magnésio (Ca e Mg) foi analisado por meio do extrator KCl 1 mol/L e determinado por espectrometria de absorção atômica; o alumínio trocável (Al) foi analisado através do extrator KCl 1 mol/L e determinado por titulometria. A acidez potencial (H+Al) foi analisado através do extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L a pH 7,0 e determinado por titulometria. O carbono orgânico total (COT) foi analisado de

acordo com YEOMANS; BREMNER (1988), adaptado por MENDONÇA; MATOS (2005).

2.2.5. Análises de susceptibilidade magnética (SM)

A medida de SM foi realizada utilizando um sistema Bartington MS3 acoplado a um sensor MS2B, onde a amostra foi inserida em recipiente plástico de 10 cm³ para medir a suscetibilidade magnética volumétrica (K, adimensional) em baixa (K_{bf} = 0,47 kHz) e alta (K_{af} = 4,70 kHz) frequências. De posse destes resultados, foi calculada a suscetibilidade magnética por unidade de massa (X_{bf}) e a frequência dependente da suscetibilidade magnética (X_{fd}) conforme (DEARING, 1999).

A X_{bf} pode ser explicada como a suscetibilidade magnética de uma amostra em termos da soma dos valores de susceptibilidade magnética dos minerais e materiais individuais. A X_{fd} é usada para detectar a presença de minerais ferrimagnéticos superparamagnéticos ultrafinos (< 0,03 µm) ocorrendo como cristais produzidos em grande parte por processos bioquímicos no solo (DEARING, 1999).

A composição do material de origem e conseqüentemente a mineralogia das rochas e sedimentos que formaram os solos, são os parâmetros principais que influenciam as propriedades magnéticas (AYOUBI; ABAZARI; ZERAATPISHEH, 2018). No entanto, existem muitas variáveis ambientais atuando na susceptibilidade magnética da pedosfera, como o estágio de evolução da paisagem, processos de formação do solo, material de origem, atividade biológica, hidrologia do solo, propriedades físico-químicas e atividades humanas (SPASSOV *et al.*, 2004).

2.2.6. Tratamento de dados

Todos os resultados analíticos foram avaliados através estatística descritiva, considerando os parâmetros de posição (média e mediana) e de dispersão, valores mínimos e máximos, desvio padrão e coeficiente de variação. A distribuição normal foi avaliada pela assimetria, curtose e teste de normalidade Komogorov-Smirnov. Quando a distribuição normal não foi alcançada foram efetuadas transformações logarítmicas ou quadráticas a fim de adequar os

dados à distribuição normal. Também foram realizadas Análise de Fatores (AF) e correlação de Pearson. A Análise de fatores foi realizada a partir do método dos Componentes Principais, resultando em autovalores, autovetores, cargas fatoriais e grupos de variáveis inter-relacionadas. Foram selecionados os fatores com autovalor maior que 1 e foi realizada a rotação dos fatores pelo método ortogonal Varimax (HAIR, 2009). Utilizou-se os escores da Análise de Fatores (AF) para ajuste dos semivariogramas e interpolação por krigagem ordinária. Para avaliação do ajuste dos semivariogramas se utilizou do coeficiente de determinação (R^2) e da soma do quadrado dos resíduos (RSS). Também foi avaliado o grau de dependência espacial (GDE), segundo (ZIMBACK, 2001): dependência espacial fraca ($< 25\%$); moderada ($25\% \leq e < 75\%$) e forte ($\geq 75\%$).

A Análise de Fatores foi realizada por meio do software R (R CORE TEAM, 2013). Os semivariogramas e krigagem ordinária foram realizados através do software GS+ versão de teste (ROBERTSON, 2008). Os mapas interpolados foram elaborados a partir do software ArcGIS (ESRI Inc, 2014).

Correlação de Pearson foi realizada com os fatores de formação clima (precipitação e temperatura), organismos (representados pelo NDVI – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, obtido através do satélite MODIS dos anos 2000, 2010 e 2020), relevo (geomorfologia, declividade, altitude, concavidade e *topographic wetness index*) e material de origem (geologia) para melhor entendimento da dinâmica dos atributos do solo por meio dos fatores de formação.

3. Resultados e discussão

3.1. Análises físicas, químicas e magnéticas

A partir dos resultados das análises físicas, químicas e magnéticas (Tabelas 1 e 2) destaca-se grande variação, o que é esperado para dados ambientais (SABINO; LAGE; ALMEIDA, 2014). Os dados foram comparados com níveis de fertilidade sugeridos por (PREZOTTI; GUARÇONI, 2013) e (SOBRAL *et al.*, 2015) (Tabelas 1 e 2).

Com relação a profundidade de 0-20 cm, a maior parte dos atributos (silte, P, K, Ca, Mg, Al, SB, t, T, m, Fe, Cu, Zn, Mn, Xbf) não seguem a distribuição normal conforme estatística Kolmogorov-Smirnov e este fato é confirmado pelos

valores de assimetria e curtose (Tabela 1). Quanto a fertilidade, valores com níveis altos de fertilidade foram detectados para os atributos Fe, Zn e Mn, valores médios para a maioria dos parâmetros COT, pH, K, Ca, Mg, H+Al, SB, t, T e Cu e valores baixos foram detectados para P, V e m.

Com relação a profundidade de 60-80 cm, vários atributos (silte, P, K, Ca, Mg, Al; H+Al, SB, t, T, m, Fe, Cu, Mn, Xbf) não seguem a distribuição normal e este fato é confirmado pelos valores de assimetria e curtose (Tabela 2). Quanto a fertilidade, valores médios altos foram detectados para os atributos Fe, Zn e Mn, valores médios para os atributos pH, Ca, Mg, H+Al, SB, t, T e Cu e valores baixos foram detectados para P, K, Al, V e m.

Em geral, ambas as profundidades possuem predominância de textura argilosa. A média de COT (em torno de 14,5 g/Kg) apresentou nível intermediário. Valores dentro da mesma magnitude foram encontrados por SILVA (2021). MONTEIRO (2015) avaliou a matéria orgânica em solos da região Sul do Espírito Santo, onde estes valores foram reportados como áreas degradadas. Apesar disso, em ambas as profundidades, os demais atributos referentes aos macronutrientes e micronutrientes possuem valores considerados altos, conferindo fertilidade aos solos. Este fato pode ser explicado pelo material parental (rochas), principalmente de caráter máfico, que pode contribuir com altos teores de macro e micronutrientes encontrados em algumas amostras (VIEIRA; MENEZES, 2018; OLIVEIRA, 1996). Especificamente sobre o Fe, sua disponibilidade está relacionada com o teor de carbono no solo, como observado em outros estudos (MIELKI, 2014; SOUMARÉ; TACK; VERLOO, 2003; SHARMA et al., 2000). MIELKI (2014) concluiu que quanto mais intemperizados e argilosos forem os solos, maior proporção do Fe deve estar associada aos oxihidróxidos cristalinos. DA SILVA; MENDONÇA (2007) explica que Fe^{+3} tem maior afinidade que Fe^{+2} com a matéria orgânica do solo (MOS) para formação de quelatos. As reações de complexação e quelação de metais pela MOS têm papel importante em vários processos no solo, a saber: no intemperismo, na disponibilidade de nutrientes (especialmente micronutrientes catiônicos) e de outros metais e nos aspectos ambientais do solo. Quando a relação substância húmica/metálico é alta, o complexo é solúvel em água. Dessa forma, por meio da dissolução da fração mineral, há liberação de mais íons metálicos. Outra

consequência pode ser o aumento da disponibilidade de determinado metal. Contudo, quando a relação substância húmica/metalo é baixa, o complexo não fica solúvel em água, diminuindo sua disponibilidade para as plantas (DA SILVA; MENDONÇA, 2007).

Os valores de susceptibilidade magnética X_{bf} e X_{fd} foram semelhantes em ambas as profundidades. Os valores baixos de X_{bf} (0,85 e 0,84 $10^{-6}m^3/Kg$), demonstra a predominância de minerais antiferromagnéticos, sendo estes valores compatíveis com goethita e hematita (DEARING, 1999). CÉSAR DE MELLO et al. (2020) também encontrou valores relativamente baixos de X_{bf} mesmo em área de diabásio, porém ele ressalta que além do material de origem, os processos pedogenéticos podem influenciar na susceptibilidade magnética dos solos. De acordo com (DEARING, 1999), os valores encontrados na área entre 4 e 5% de X_{fd} , indicam presença de partículas de multidomínios e domínios simples. RANGANAI; MOIDAKI; G. KING, (2015) obteve valores de $X_{fd} < 4\%$ em rochas sedimentares. MAHER (1998) e MAHER (1986) fazem maiores distinções de X_{fd} , onde de 3% a 5% corresponde a uma mistura de dependente da frequência e grãos independentes. Valores de X_{fd} entre 5% e 10%, indicam quantidades consideráveis de grãos superparamagnéticos (DEARING, 1999).

Tabela 1 - Estatística descritiva e padrões de fertilidade da área de estudo, profundidade 0-20 cm.

0-20 cm												
Atributos	N de amostras	\bar{X}	DP	Md	Min	Max	Var	CV (%)	Cs	Ck	Sobral et al, (2015); Prezotti e Guarçoni (2013)	K-S (p valor)
ArGR (dag/Kg)	84	32,85	13,51	33,69	1,41	59,17	182,56	0,41	-0,18	-0,17		p > 0.20
ArF (dag/Kg)	84	16,16	7,11	14,91	4,75	38,57	50,59	0,44	0,85	1,05		p > 0.20
ArT (dag/Kg)	84	49,02	13,88	48,94	19,45	78,36	192,68	0,28	0,02	-0,71		p > 0.20
Sil (dag/Kg)	84	12,39	7,34	10,58	1,99	40,23	53,82	0,59	1,53	2,94		p < 0.05*
Arg (dag/Kg)	84	38,60	12,33	39,27	15,06	72,73	152,08	0,32	0,21	-0,05		p > 0.20
COT (g/Kg)	84	14,50	5,30	13,48	6,20	36,54	28,12	0,37	1,75	4,35	médio	p < 0.10
pH	84	5,60	0,76	5,58	4,05	7,62	0,58	0,14	0,50	0,11	médio	p > 0.20
P (mg/dm ³)	84	13,86	71,59	2,35	0,20	654,50	5125,27	5,16	8,85	79,95	médio	p < 0.01*
K (mg/dm ³)	84	68,54	83,44	33,50	5,00	523,00	6962,13	1,22	2,77	10,68	alto	p < 0.01*
Ca (cmolc/dm ³)	84	4,10	4,33	2,61	0,07	23,75	18,78	1,06	2,10	5,35	alto	p < 0.01*
Mg (cmolc/dm ³)	84	1,62	1,90	0,94	0,01	9,08	3,61	1,17	2,37	5,71	alto	p < 0.01*
Al (cmolc/dm ³)	84	0,27	0,44	0,00	0,00	1,80	0,20	1,63	1,67	1,81	baixo	p < 0.01*
H+Al (cmolc/dm ³)	84	4,54	2,51	4,00	0,00	13,28	6,30	0,55	0,79	1,70	médio	p > 0.20
SB (cmolc/dm ³)	84	5,90	5,99	3,73	0,20	28,32	35,86	1,02	1,91	3,57	alto	p < 0.01*
t (cmolc/dm ³)	84	6,17	5,81	3,99	1,24	28,32	33,79	0,94	2,02	3,95	alto	p < 0.01*
T (cmolc/dm ³)	84	10,44	5,38	8,70	4,25	28,32	28,94	0,52	1,75	2,81	alto	p < 0.01*
V (%)	84	49,27	27,91	49,87	3,01	100,00	778,89	0,57	0,15	-0,92	baixo	p > 0.20
m (%)	84	12,89	23,19	0,00	0,00	87,50	537,85	1,80	1,92	2,62	baixo	p < 0.01*
Fe (mg/dm ³)	84	218,83	239,80	117,02	9,50	1279,00	57506,30	1,10	2,00	4,67	alto	p < 0.01*
Cu (mg/dm ³)	84	2,33	2,55	1,50	0,30	17,30	6,52	1,10	3,56	16,21	alto	p < 0.01*
Zn (mg/dm ³)	84	5,12	4,42	4,30	0,60	33,40	19,55	0,86	3,61	20,08	alto	p < 0.02*
Mn (mg/dm ³)	84	118,72	198,13	79,12	2,70	1320,10	39255,88	1,67	4,27	20,57	alto	p < 0.03*
Xbf (10E-6m ³ /Kg)	84	0,85	1,07	0,44	0,11	5,40	1,15	1,26	2,72	7,92		p < 0.04*
Xfd (%)	84	4,20	4,85	4,17	-16,09	13,99	23,54	1,15	-1,03	3,90		p < 0.05*

ArGR: areia grossa; ArF: areia fina; ArT: areia total; Sil: silte; Arg: argila; COT: carbono orgânico total; SB : Soma de bases trocáveis; t: Capacidade de troca catiônica efetiva; m: Índice de saturação em alumínio; T : Capacidade de troca catiônica a pH 7 (CTC); V : Índice de saturação em bases; Xbf: susceptibilidade magnética por unidade de massa; Xfd: frequência dependente da susceptibilidade magnética; \bar{X} = média; Md = Mediana; Min = Mínimo; Max = Máximo; Var = Variância; DP = Desvio padrão; CV (%) = Coeficiente de variação; Cs: coeficiente de assimetria; Ck: coeficiente de curtose; K-S: teste de normalidade Komogorov-Smirnov, (*): valor p significativo, ou seja, rejeita-se H0, não seguindo a distribuição normal. Parâmetros de fertilidade de acordo com PREZOTTI; GUARÇONI (2013) e SOBRAL *et al.* (2015).

Tabela 2 - Estatística descritiva e padrões de fertilidade da área de estudo, profundidade 60-80 cm.

60-80 cm												
Atributos	N de amostras	\bar{X}	DP	Md	Min	Max	Var	CV (%)	Cs	Ck	Sobral et al, (2015); Prezotti e Guarçoni (2013)	K-S (p valor)
ArGR (dag/Kg)	84	28,71	11,30	27,20	1,17	59,10	127,72	0,39	0,29	0,31		p > 0.20
ArF (dag/Kg)	84	14,58	7,58	13,18	2,98	40,89	57,40	0,52	1,33	2,36		p > 0.20
ArT (dag/Kg)	84	43,29	12,49	42,26	20,29	77,46	155,91	0,29	0,51	-0,39		p > 0.20
Sil (dag/Kg)	84	11,60	7,45	10,39	0,26	36,95	55,57	0,64	1,43	2,68		p < 0.05*
Arg (dag/Kg)	84	45,11	13,41	46,91	13,88	71,16	179,79	0,30	-0,32	-0,64		p > 0.20
pH	84	5,67	0,85	5,57	4,38	7,97	0,72	0,15	0,68	0,04	médio	p > 0.20
P (mg/dm ³)	84	8,00	30,82	1,50	0,20	272,20	949,74	3,85	7,93	67,23	médio	p < 0.01*
K (mg/dm ³)	84	42,74	88,75	17,50	2,00	596,00	7876,94	2,08	4,47	22,79	médio	p < 0.01*
Ca (cmolc/dm ³)	84	3,81	4,92	2,24	0,04	30,60	24,23	1,29	2,94	11,16	alto	p < 0.01*
Mg (cmolc/dm ³)	84	1,54	2,27	0,76	0,00	11,16	5,17	1,48	2,72	7,56	alto	p < 0.01*
Al (cmolc/dm ³)	84	0,28	0,42	0,00	0,00	1,60	0,18	1,50	1,31	0,35	baixo	p < 0.01*
H+Al (cmolc/dm ³)	84	4,04	3,04	3,38	0,00	22,03	9,22	0,75	2,74	14,12	médio	p > 0.20
SB (cmolc/dm ³)	84	5,45	6,79	3,19	0,06	41,78	46,07	1,24	2,75	10,00	alto	p < 0.01*
t (cmolc/dm ³)	84	5,73	6,64	3,21	0,40	41,78	44,12	1,16	2,85	10,63	médio	p < 0.01*
T (cmolc/dm ³)	84	9,49	6,35	7,61	3,63	43,84	40,35	0,67	2,66	9,94	médio	p < 0.01*
V (%)	84	48,26	30,40	46,89	0,40	100,00	924,13	0,63	0,20	-1,00	baixo	p > 0.20
m (%)	84	16,07	27,55	0,00	0,00	95,32	759,00	1,71	1,70	1,57	baixo	p < 0.01*
Fe (mg/dm ³)	84	153,66	151,42	95,95	3,10	776,30	22928,25	0,99	1,92	3,98	alto	p < 0.01*
Cu (mg/dm ³)	84	2,46	2,62	1,70	0,30	14,70	6,88	1,07	2,83	9,94	alto	p < 0.01*
Zn (mg/dm ³)	84	3,03	2,35	2,35	0,10	12,60	5,51	0,77	1,44	2,78	alto	p < 0.02*
Mn (mg/dm ³)	84	67,82	85,92	42,47	1,98	550,40	7382,72	1,27	3,30	14,43	alto	p < 0.03*
Xbf (10E-6m ³ /Kg)	84	0,84	0,99	0,42	0,12	5,43	0,98	1,18	2,44	6,67		p < 0.04*
Xfd (%)	84	5,36	4,90	5,04	-18,47	14,82	23,97	0,91	-1,01	5,46		p < 0.05*

ArGR: areia grossa; ArF: areia fina; ArT: areia total; Sil: silte; Arg: argila; SB : Soma de bases trocáveis; t: Capacidade de troca catiônica efetiva; m: Índice de saturação em alumínio; T : Capacidade de troca catiônica a pH 7 (CTC); V : Índice de saturação em bases; Xbf: susceptibilidade magnética por unidade de massa; Xfd: frequência dependente da susceptibilidade magnética; \bar{X} = média; Md = Mediana; Min = Mínimo; Max = Máximo; Var = Variância; DP = Desvio padrão; CV (%) = Coeficiente de variação; Cs: coeficiente de assimetria; Ck: coeficiente de curtose; K-S: teste de normalidade Komogorov-Smirnov, (*): valor p significativo, ou seja, rejeita-se H0, não seguindo a distribuição normal. Parâmetros de fertilidade de acordo com PREZOTTI; GUARÇONI (2013) e SOBRAL *et al.* (2015).

3.2. Análise de Fatores (AF)

Para a melhor avaliação de grupos de variáveis inter-relacionadas e sua relação com relevo foi realizada a Análise de Fatores (AF) (Tabela 3 e 4). Os atributos H+Al, SB, V, m, t não foram inseridos na Análise de Fatores pelas suas altas colinearidades.

Em relação aos resultados da AF na profundidade de 0-20 cm, foram avaliados os quatro primeiros fatores que explicaram 68,2% da variabilidade total dos dados (Tabela 3) e que apresentaram autovalores maiores que 1 (HAIR, 2009). Dessa forma, o Fator 1 reteve 33,58% da variabilidade dos dados originais. As maiores cargas fatoriais positivas estão relacionadas aos atributos Ca, Mg,

Mn e pH. Os atributos Zn e T obtiveram cargas positivas menos significativas. A relação entre valores ideais de pH, Ca, disponibilidade de nutrientes e CTC é conhecida e amplamente buscada para melhora da fertilidade dos solos (BATISTA *et al.*, 2018; KER *et al.*, 2012; PAVINATO; ROSOLEM, 2008). Dessa forma, se pode nomear o Fator 1 como “soma de bases”. Os ambientes geomorfológicos de menor altitude possuem as maiores cargas fatoriais, bem como nas litologias de Corpos ígneos intrusivos e Rochas metavulcanossedimentares, que são litologias que possuem consideráveis quantidades de rochas máficas (Figuras 5 e 6). O Fator 2 reteve 13,84% da variância dos dados, onde o atributo Xfd foi responsável pela maior carga fatorial positiva. O Fe foi responsável pela carga fatorial negativa. DEARING (1999) explica a relação sobre o Fe, suas formas disponíveis, tamanho dos grãos e sua relação com a susceptibilidade magnética dos solos. Dessa forma, podemos nomear o Fator 2 como “frações magnéticas do solo”. As cargas fatoriais maiores se concentraram na unidade geomorfológica de Patamar escalonado de pontões e maciços serranos e nas litologias Corpos ígneos intrusivos e Rochas metavulcanossedimentares, que são litologias que possuem consideráveis quantidades de rochas máficas. As menores cargas fatoriais estão associadas a regiões de planícies aluviais (coberturas sedimentares) (Figuras 5 e 6). O Fator 3 foi responsável por 13,34% da variância dos dados, onde os Fatores AT e Arg respondem pela maior carga positiva fatorial. A relação entre areia e argila nos solos é forte e utilizada inclusive em estimativa de outros atributos associados como areia total, argila, fósforo e óxidos (LIMA *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2010), logo, este Fator pode ser chamado de “textura do solo”. As maiores cargas fatoriais estão associadas a unidade Patamar escalonado de pontões e maciços serranos e Corpos ígneos intrusivos (Figura 5 e 6). O Fator 4 foi menos relevante e reteve 7,44% da variância dos dados, onde os atributos P, K, Zn e Xbf obtiveram as maiores cargas fatoriais positivas. Por concentrar elementos de adubação, este Fator 4 será chamado de “nutrientes e metais no solo”. Em geral, os solos possuem valores de P e K baixos. Logo, este fato provavelmente se deve a presença de outliers. A presença de Zn em valores relativamente altos na região indica sua origem em material parental (rochas). VIEIRA; MENEZES (2015) aponta possibilidade de jazimentos de Zn e outros metais na litologia de Rochas metavulcanossedimentares, dessa forma também possibilitando o

aumento do magnetismo nos solos. As maiores cargas fatoriais estão associadas a unidade Patamar escalonado de pontões e maciços serranos (Figuras 5 e 6).

Os resultados encontrados pela AF da profundidade de 60-80 cm (Tabela 4) indicaram retenção de 69,87% nos cinco primeiros Fatores. O Fator 1 reteve 32,31% da variância dos dados. A maior carga fatorial positiva está relacionada aos atributos pH, Ca, Mg e Mn, e associado a “soma de bases”. Seu comportamento é semelhante ao Fator 1 de 0 – 20 cm, onde os ambientes geomorfológicos de menor altitude possuem as maiores cargas fatoriais, bem como nas litologias Corpos ígneos intrusivos e Rochas metavulcanossedimentares (Figuras 5 e 6). O Fator 2 reteve 15,90% da variância dos dados, com a maior carga fatorial positiva relacionada a relação P e Zn e a maior carga fatorial negativa está associada a relação areia grossa/areia fina (AG/AF). Assim, este Fator pode ser chamado de “associação P e Zn”. Em geral as cargas fatoriais são altas, com exceção da unidade Depressão de colinas e morros suaves e litologias de Ortognaisses e granitoides e Rochas metavulcanossedimentares (Figuras 5 e 6). O Fator 3 reteve 8,25% da variância dos dados. Os atributos ArT e CTC da fração argila (CTCArg) obtiveram as maiores cargas positivas e Arg obteve a maior carga negativa. Este Fator pode ser chamado de “atividade da fração argila”. Os Fatores 4 e 5 obtiveram as menores cargas fatoriais (7,42% e 5,99%). É possível observar que as cargas fatoriais são mais altas no relevo mais baixo e diminuem em direção a cotas mais altas. As litologias com as maiores cargas fatoriais são as Coberturas sedimentares, Rochas metavulcanossedimentares, Ortognaisses e metabasitos do embasamento. O Fator 4 está associado ao magnetismo dos solos, onde as maiores cargas fatoriais aumentam com o relevo e ocorrem em litologias mais máficas como Copos Ígneos Intrusivos, as Rochas metassedimentares e metavulcanossedimentares, Ortognaisses e metabasitos do embasamento (Figuras 5 e 6). Fator 5 está associado a translocação de argila, referente a relação textural argila (RT) e presença de Cu, onde as maiores cargas fatoriais estão associadas a unidade mais alta, Patamar escalonado de pontões e maciços serranos e litologia máfica, como os Copos Ígneos Intrusivos e Rochas metavulcanossedimentares (Figura 5 e 6).

Tabela 3 - Variância explicada pelos Fatores após o método de rotação ortogonal Varimax e cargas fatoriais dos atributos na profundidade de 0-20 cm nos solos da Região Média da Bacia do Rio Itapemirim, ES.

0-20 cm					
	FATOR1	FATOR2	FATOR3	FATOR4	
Autovalor	5,37	2,21	2,13	1,19	
Proporção	33,58%	13,84%	13,34%	7,44%	
Cumulativo	33,58%	47,42%	60,76%	68,20%	
Cargas Fatoriais					
	FATOR1	FATOR2	FATOR3	FATOR4	Comunaliades
AGAF	-0,48	0,12	-0,20	-0,08	0,54
ArT	-0,01	0,06	-0,92*	0,02	0,93
ARG	-0,14	0,09	0,94*	-0,06	0,92
pH	0,73*	0,47	-0,09	0,17	0,79
P	0,37	-0,39	-0,11	0,68*	0,77
K	0,22	0,04	-0,12	0,69*	0,65
Ca	0,92*	-0,09	-0,01	0,18	0,89
Mg	0,88*	-0,19	-0,03	0,16	0,84
T	0,68*	-0,42	0,12	0,17	0,75
Fe	0,08	-0,69*	-0,21	-0,12	0,73
Cu	0,34	0,34	-0,03	0,27	0,63
Zn	0,51*	0,04	-0,09	0,64*	0,75
Mn	0,76*	-0,01	-0,2	0,05	0,64
Xbf	-0,12	0,38	0,22	0,62*	0,62
Xfd	-0,11	0,84*	-0,08	-0,02	0,73
COT	0,07	-0,16	0,21	0,11	0,70

AGAF: relação areia grossa e areia fina; ArT: areia total; Arg: argila; COT: carbono orgânico total; Xbf: susceptibilidade magnética por unidade de massa; Xfd: frequência dependente da susceptibilidade magnética. (*) Fatores relevantes.

Tabela 4 - Variância explicada pelos Fatores após o método de rotação ortogonal Varimax e cargas fatoriais dos atributos na profundidade de 60-80 cm nos solos da Região Média da Bacia do Rio Itapemirim, ES.

60-80 cm						
	FATOR1	FATOR2	FATOR3	FATOR4	FATOR5	
Autovalor	5,49	2,70	1,40	1,26	1,02	
Proporção	32,31%	15,90%	8,25%	7,42%	5,99%	
Cumulativo	32,31%	48,20%	56,45%	63,88%	69,87%	
Cargas Fatoriais						
	FATOR1	FATOR2	FATOR3	FATOR4	FATOR5	Comunaliades
ArT	0,12	-0,09	0,95*	-0,05	0,04	0,93
AGAF	-0,24	-0,75*	0,17	0,01	0	0,64
Arg	-0,09	-0,33	-0,89*	0,20	-0,1	0,95
pH	0,78*	0,19	0,10	0,30	0,06	0,75
P	0,32	0,68*	0,15	-0,05	-0,02	0,58
K	0,28	0,53	0,04	0,28	0,13	0,46
Ca	0,87*	0,26	0,12	-0,09	-0,06	0,86
Mg	0,81*	0,3	0,01	-0,08	0,05	0,76
Fe	-0,1	0,36	0,4	-0,50*	0,21	0,58
Cu	0,22	0,02	0,03	0,26	0,71*	0,63
Zn	0,25	0,67*	0,26	0,13	0,33	0,70
Mn	0,68*	0,07	0,03	-0,01	0,46	0,68
Xbf	0,02	0,19	-0,16	0,66*	0,27	0,56
Xfd	-0,04	-0,05	-0,05	0,75*	-0,07	0,57
RT	0,13	-0,23	-0,17	0,39	-0,66*	0,68
SilArg	0,02	0,71	0,39	-0,3	0,12	0,76
CTCArg	0,47	0,42	0,50*	-0,39	0,00	0,79

ArT: areia total; Arg: argila; AGAF: relação areia grossa e areia fina; SilArg: relação silte e argila; RT: relação textura argila; CTCArg: relação CTC e argila; Xbf: susceptibilidade magnética por unidade de massa; Xfd: frequência dependente da susceptibilidade magnética. (*) Fatores relevantes.

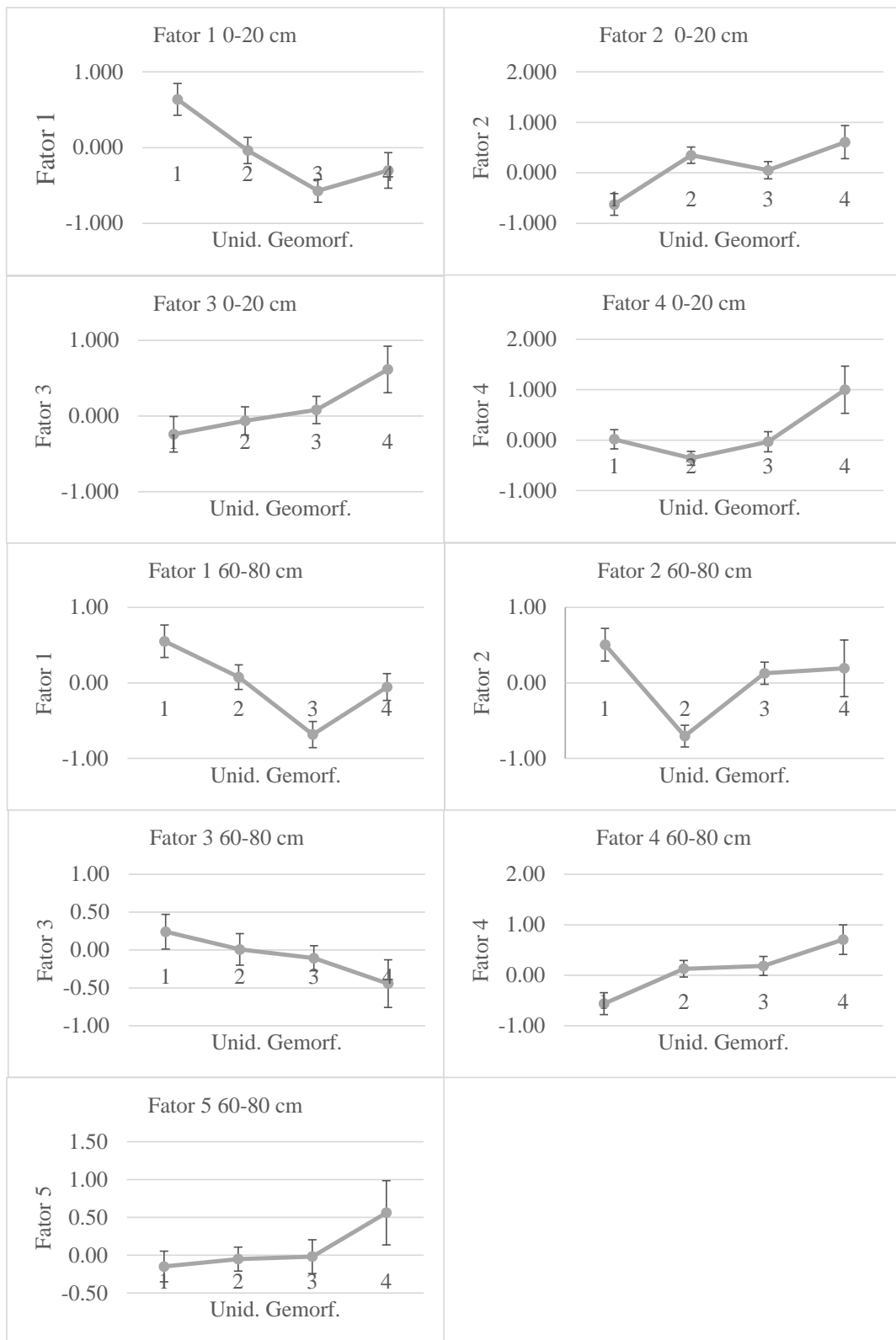


Figura 5 - Gráficos referentes carga fatorial nas diversas unidades geomorfológicas da Região Média da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim. 1 - Planícies e Terraços Aluviais; 2 - Depressão de colinas e morros suaves; 3 - Patamar escalonado planalto estrutural II; 4 - Patamar escalonado de pontões e maciços serranos.

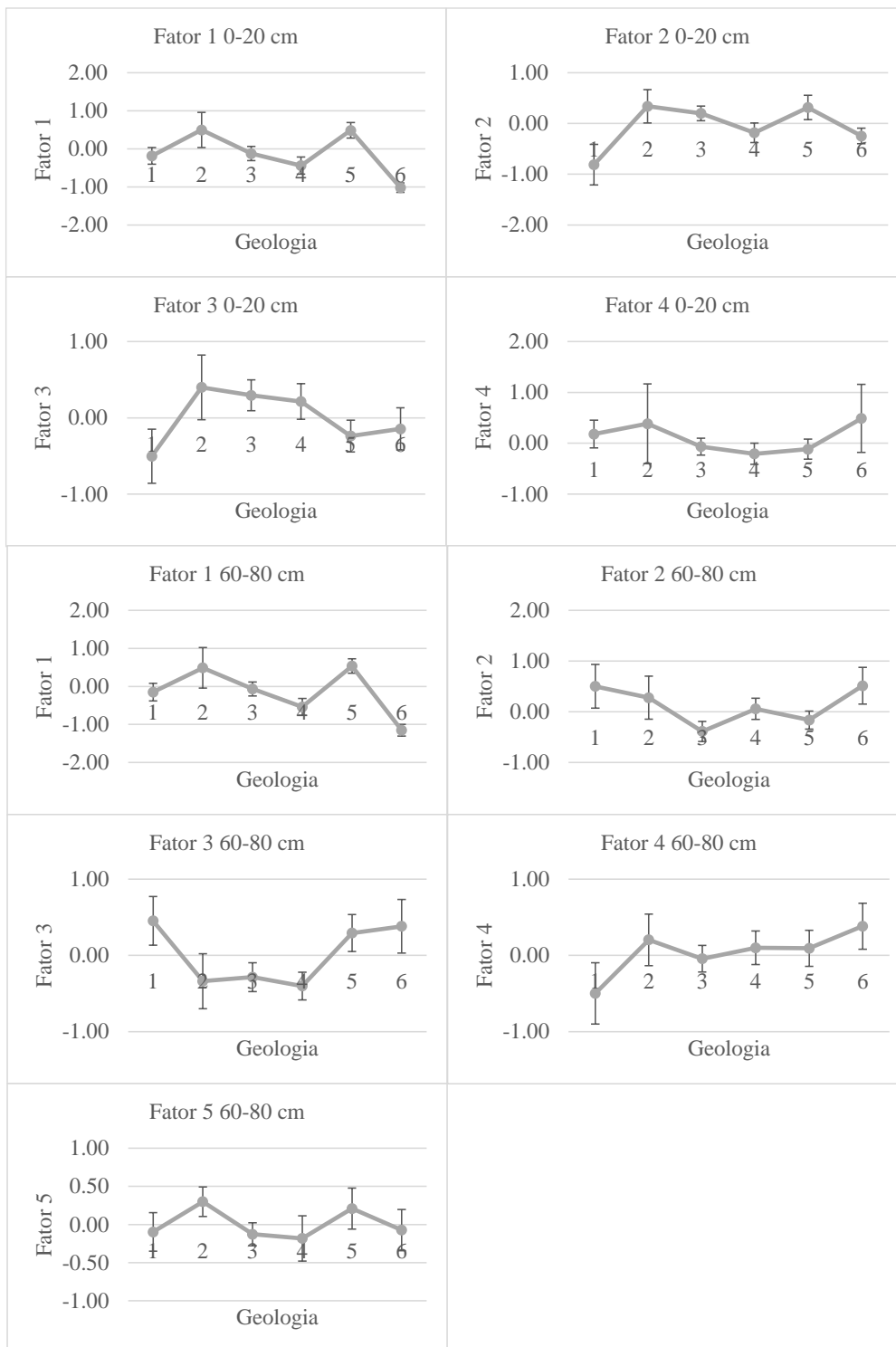


Figura 6 - Gráficos referentes carga fatorial nas diversas litologias da Região Média da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim. 1- Coberturas superficiais; 2 - Corpos ígneos intrusivos; 3 – Ortognaisses e granitoides; 4 – Rochas metassedimentares; 5 – Rochas metavulcanossedimentares; 6 – Ortognaisses e metabasitos do embasamento.

3.3. Distribuição espacial dos Fatores

A análise geoestatística foi conduzida utilizando-se escores fatoriais atribuídos aos primeiros quatro Fatores (para a profundidade de 0-20 cm) e cinco primeiros Fatores (para a profundidade de 60-80 cm). Com relação a profundidade de 0-20 cm (Tabela 6), a maioria dos Fatores se ajustaram ao modelo exponencial, apenas o Fator 3 se ajustou ao modelo esférico. Todos apresentaram baixos valores de alcance ($<0,4$ m). Os Fatores 1 e 4 apresentaram médio grau de dependência espacial (GDE), enquanto os Fatores 2 e 3 apresentaram alto GDE. O efeito pepita (Co) de todos são maiores que zero.

Os dados referentes a profundidade de 60-80 cm (Tabela 6), os Fatores 1 e 2 se ajustaram ao modelo exponencial, os Fatores 3 e 4 se ajustaram ao modelo esférico e o Fator 5 se ajustou ao modelo gaussiano. Também foi obtido valores baixos de alcance ($<1,13$ m). Os Fatores 1 e 3 apresentaram médio GDE, enquanto os Fatores 2, 4 e 5 apresentaram alto GDE. O efeito pepita (Co) também são diferentes de zero.

Os alcances indicam a distância na qual existe a continuidade espacial, de característica inerente ao atributo avaliado. Os baixos valores de alcance, como os encontrados no estudo, podem ser atribuídos a fatores extrínsecos relacionados ao manejo do solo (CAMBARDELLA *et al.*, 1994). O uso intensivo, excesso de capina (deixando o solo exposto), entre outros tipos de manejo podem acarretar maior lixiviação e modificar rapidamente os atributos do solo, aumentando a variabilidade espacial dos dados. Isso é confirmado pelos valores de efeito pepita maiores que zero, indicando efeito aleatório da variabilidade espacial (BURAK; SANTOS; PASSOS, 2016). Vale salientar que a área de estudo naturalmente possui grande complexidade geológica, não favorecendo a continuidade dos dados.

Tabela 5 - Atributos dos semivariogramas dos Fatores estudados para ambas as profundidades.

0-20 cm							
Parâmetro	Modelo	Co (m)	Co+C (m)	Ao (m)	r ²	RSS	GDE
Fator 1	Exponencial	0,65	1,31	0,38	0,98	1,14E-03	50,04
Fator 2	Exponencial	0,17	1,07	0,03	0,68	0,011	84,64
Fator 3	Esférico	0,10	1,08	0,07	0,57	0,0219	90,84
Fator 4	Exponencial	0,67	1,48	0,32	0,62	2,00E-01	54,93
60-80 cm							
Fator 1	Exponencial	0,52	1,55	0,48	0,81	0,0859	66,54
Fator 2	Exponencial	0,16	1,07	0,03	0,86	2,83E-03	84,80
Fator 3	Esférico	0,30	1,08	0,06	0,57	0,167	71,89
Fator 4	Esférico	0,08	1,05	0,06	0,32	0,0279	92,50
Fator 5	Gaussiano	0,78	4,57	1,13	0,43	1,82	82,93

Co = efeito pepita; Co+C = patamar; Ao = alcance; GDE = grau de dependência espacial $(C/(Co + C)) \times 100$ (ZIMBACK, 2001).

Após os ajustes dos semivariogramas foi realizada a krigagem ordinária dos Fatores (Figuras 7 e 8). Com relação a profundidade de 0-20 cm (Figura 7), o Fator 1 ou “soma de bases” mostra cargas fatoriais mais altas na região de Cachoeiro de Itapemirim, com tendência quase N-S. Em direção a NO as cargas vetoriais diminuem, indicando menor disponibilidade de nutrientes. O Fator 2 ou “magnetismo do solo” também apresenta tendência em faixas na direção N-S, onde a parte central apresenta baixas cargas vetoriais, demonstrando menores intensidades do magnetismo. O Fator 3 ou “granulometria do solo” apresenta padrão mais disseminado, porém com cargas fatoriais mais altas na região SO. O Fator 4 ou “adubação do solo” em geral mostra maiores cargas fatoriais a NO e menores cargas fatoriais na região S do mapa.

Com relação a profundidade 60-80 cm (Figura 8), o Fator 1 de disponibilidade de nutrientes possui padrão muito semelhante ao Fator 1 de 0-20, com as altas cargas fatoriais ocorrendo na região de Cachoeiro de Itapemirim e menores cargas na região NO do mapa. O Fator 2 ou “associação P e Zn” apresenta maior disseminação, porém ocorre tendência de diminuição das cargas vetoriais na direção da região de Cachoeiro de Itapemirim. O Fator 3 ou “CTC do solo” apresenta regiões disseminadas de maiores cargas vetoriais, com tendência de concentração na região SO do mapa. O Fator 4 ou “magnetismo do solo” apresenta tendência de baixas cargas fatoriais na parte S com faixas na região central N-S, semelhante ao

Fator 2 da profundidade anterior. O Fator 5 ou “associação argila e Cu” apresenta cargas fatoriais altas ao N e baixas cargas fatoriais a O.

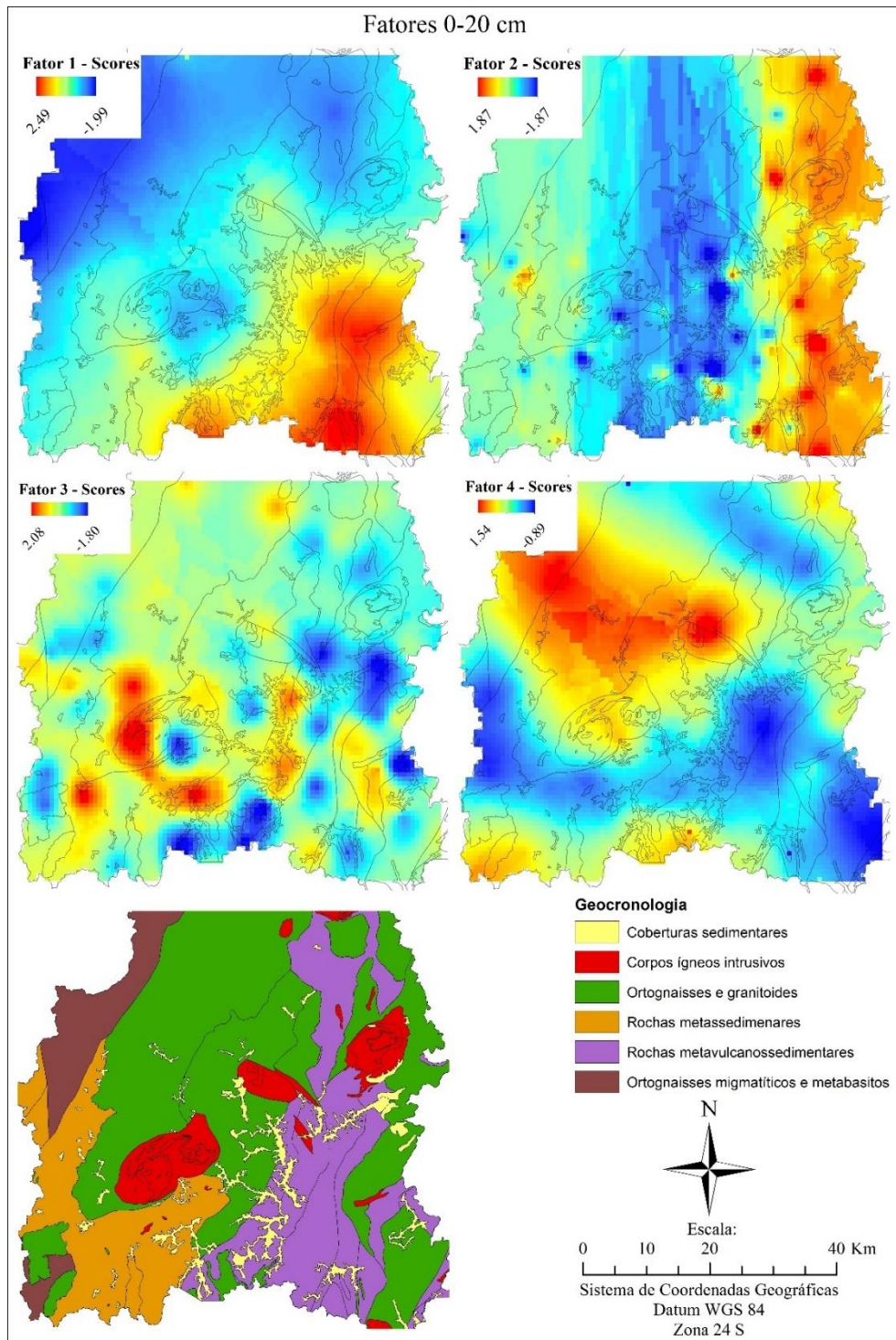


Figura 7 - Distribuição espacial dos Fatores na profundidade de 0-20 cm da Região Média da Bacia do Rio Itapemirim. Fator 1 - soma de bases; Fator 2 - magnetismo dos solos; Fator 3 - textura e nutriente; Fator 4 - metais no solo.

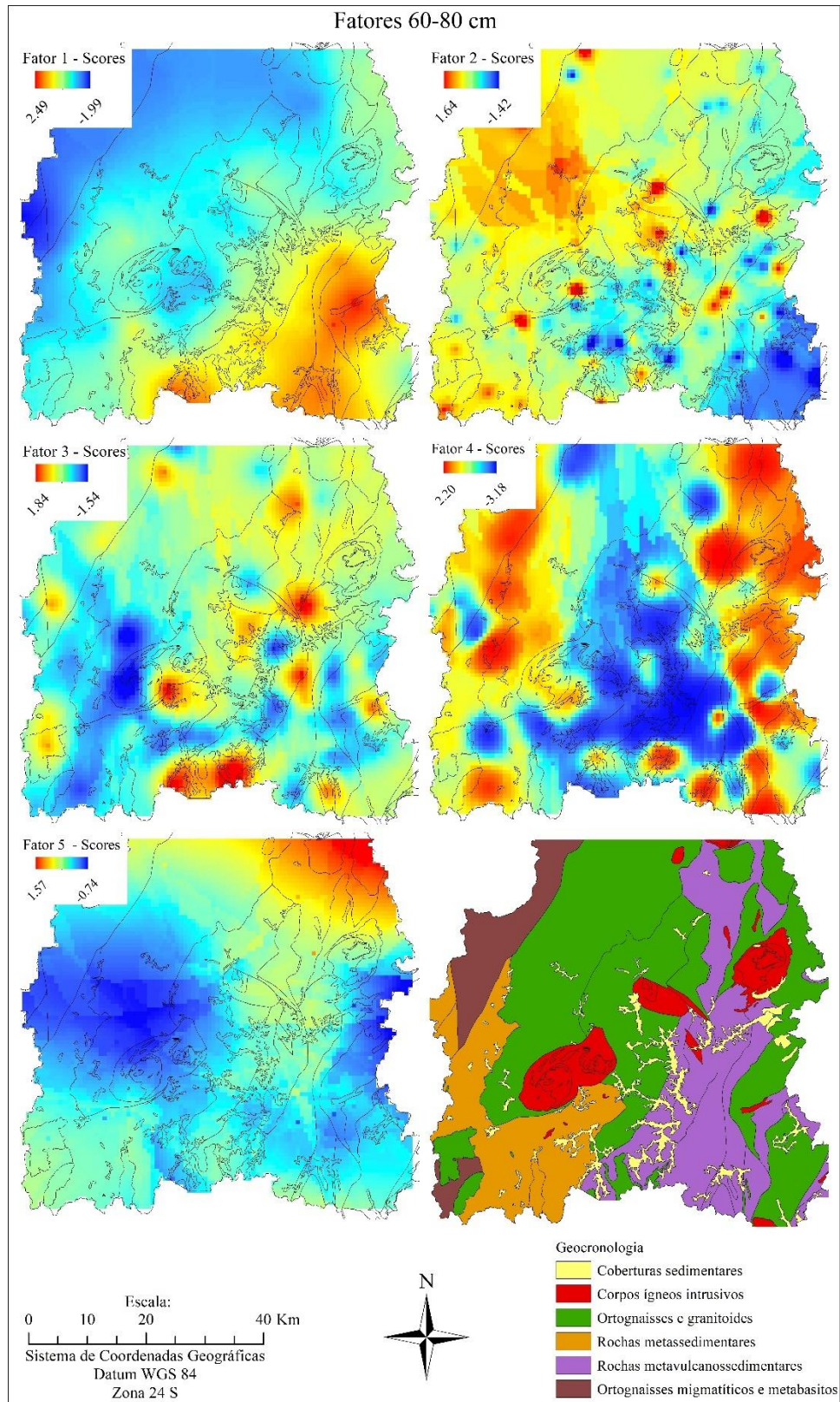


Figura 8 - Distribuição espacial dos Fatores na profundidade de 0-20 cm da Região Média da Bacia do Rio Itapemirim. Fator 1 - soma de bases; Fator 2 - associação P e Zn; Fator 3 - atividade da argila; Fator 4 - magnetismo; Fator 5 - translocação de argila.

3.4. Análise de Fatores (AF) e fatores ambientais

Foi realizada correlação de Pearson com alguns atributos morfométricos, Geologia, Geomorfologia e dados de temperatura e precipitação (Tabela 6) com os escores da Análise de Fatores. Segundo (ANDRIOTTI, 2003), a correlação é considerada fraca quando menor que 0,3, regular entre 0,3 e 0,6 e forte quando maior que 0,6. A maioria das correlações significantes obtidas são consideradas fracas a regulares.

O Fator 1 “soma de bases” na profundidade de 0-20 cm possui relações significativas regulares com o relevo (MRVBF, Altitude, TRI) e com a temperatura, indicando principalmente sua relação com o relevo rebaixado (Depressão de colinas e morros suaves). Logo, o fator soma de bases está relacionado com locais de baixadas, com maior temperatura, menor precipitação e menor densidade de falhas, sendo assim conservadas nos solos. As maiores cargas fatoriais estão localizadas na região de Cachoeiro de Itapemirim, local onde possui grande incidência de mármore (rocha rica em Ca). Estes mármore fazem parte das litologias referentes a Rochas metavulcanossedimentares (Figura 9), que possuem abundância de minerais como plagioclásios, anfibólios e micas (ricos em Ca, Mg, Mn, Fe, Zn) (CPRM, 2015). Esta região ainda possui menor precipitação e maior temperatura média anual (Figura 9). Foi observado que a região de Itaoca (Cachoeiro de Itapemirim) é uma área de mineração de mármore para rocha ornamental. Em coletas de campo, foram relatadas regiões com alto teor de Ca, mesmo distantes de Itaoca. Ao consultar o Atlas Eólico da região (AMARANTE *et al.*, 2009), consta que a direção predominante dos ventos é N para S e NE para SO, coincidente com a tendência de maiores valores de Ca no solo. O Fator 1 “soma de bases” da profundidade de 60-80 cm também obteve comportamento semelhante, com correlações significativas regulares com declividade, altitude, temperatura média anual e precipitação acumulada anual.

O Fator 2 “frações magnéticas” da profundidade de 0-20 cm também possui relação com o relevo e a litologia. Áreas mais baixas e com predomínio da litologia Rocha metavulcanossedimentares possuem menores cargas fatoriais. As maiores cargas fatoriais se encontram nas regiões de relevo mediano (a leste do mapa,

Figura 7), e predominância da litologia Ortognaisses e granitoides. Foram encontradas correlações significativas regulares com a positivas com declividade e negativas com MRVBF, TRI e TWI, envolvendo as regiões de Depressões de colinas e morros suaves e Patamar escalonado de pontões e maciços serranos (Figura 9). As regiões de baixada (em geral com textura arenosa) possuem, em geral, valores mais baixos de Xbf que as regiões dominadas por rochas cristalinas (que tendem a possuir textura mais argilosa na área de estudo). Esta relação foi observada por vários autores (CÉSAR DE MELLO *et al.*, 2020; AYOUBI; ABAZARI; ZERAATPISHEH, 2018; SHENGGAO, 2000).

É importante ressaltar que os valores Xbf (susceptibilidade magnética medidos em baixa frequência) refletem a susceptibilidade magnética da mineralogia presente no solo estudado (DEARING, 1999).

O Fator 3 da profundidade de 0-20 cm, chamado de “textura do solo” obteve correlação positiva significativa fraca com a declividade. Possui maior carga fatorial em regiões que possuem a litologia Corpos ígneos intrusivos e Rochas metassedimentares (região SO do mapa) e entre as unidades geomorfológicas Patamar escalonado de pontões e maciços serranos e Depressão de colinas e morros suaves.

O Fator 4 da profundidade de 0-20 cm se refere a “nutrientes e metais do solo”, possuindo correlações significativas fracas com a densidade de falhas. Possui maior presença de P e K. Essa região possui como litologia Ortognaisses e granitoides e as cargas maiores cargas fatoriais seguem a tendência do Lineamento Piúma (LOURENÇO *et al.*, 2016) (Tabela 6 e Figuras 9).

O Fator 2 da profundidade de 60-80 cm, que possui a relação P e Zn, obteve correlações significativas fracas com a geomorfologia e TWI, indicando talvez uma associação com a umidade do solo e relevo. As maiores cargas fatoriais estão na região da unidade Patamar escalonado de pontões e maciços serranos, de maiores altitudes, clima mais ameno e presença de gnaisses. As menores cargas fatoriais estão associadas a região de baixada, Depressão Cachoeiro, com maior presença de Coberturas sedimentares.

O Fator 3 “atividade da fração argila” da profundidade de 60-80 cm, obteve correlação significativa regular com geologia e NDVI. Embora o padrão seja mais disseminado, as maiores cargas fatoriais ocorrem em regiões de baixada, com maior influência sedimentar e mais próximo aos Corpos ígneos intrusivos. As menores cargas fatoriais estão a SO do mapa, na área baixada da região da zona de cisalhamento Guaçuí, que possui litologia predominante de Rochas metassedimentares.

O Fator 4 “magnetismo do solo” obteve correlações significativas regulares com a declividade, concavidade e TWI. Possui comportamento semelhante com o Fator 2 de 0-20 cm, porém com menores cargas fatoriais.

O Fator 5 “translocação de argila” da profundidade de 60-80 cm obteve correlação significativa fraca com a precipitação. Possui a maior carga fatorial na região mais alta a NE de clima mais ameno com maiores precipitações na região de Patamar escalonado de pontões e maciços serranos na região das Rocha metavulcanossedimentares, com incidências de acumulações de metais (CPRM, 2015). Essa unidade possui veios pegmatíticos que podem formar sulfetos contendo Cu. A região de menor carga fatorial está associada a baixada da zona de cisalhamento Guaçuí, na região de litologia de Rochas metassedimentares (Tabela 6 e Figura 8). Isto pode indicar que a água pode ser o principal agente da variação de textura dos solos, com remoção da argila dos horizontes superiores.

Tabela 6 – Correlações de Pearson dos Fatores com os fatores de formação dos solos para as profundidades de 0-20 e 60-80 cm.

0-20 cm									
	Declividade	Densidade de Falhas	MRVBF	Altitude	TRI	TWI	VDCN	Temp. Média Anual	PPT Acum Anual
FATOR1	-0.30	-0.38	0.42*	-0.48*	-0.35*	0.30	-0.06*	0.43*	-0.28*
FATOR2	0.36*	0.02	-0.49*	0.09	0.40*	-0.41*	0.25	-0.12	-0.06
FATOR3	0.17*	0.10	-0.14	0.05	0.26	-0.04	0.14	-0.03	-0.04
FATOR4	0.04	0.11*	0.05	0.18	0.07	0.00	0.18	-0.17	-0.03
60-80 cm									
	Geologia	Geomorfologia	Declividade	Altitude	Concavidade	TWI	Temp. Média Anual	PPT Acum Anual	NDVI (Modis)
FATOR1	-0.26	-0.34	0.36*	-0.48*	-0.29	0.22	0.43*	-0.23*	-0.21
FATOR2	-0.19	-0.04*	0.33*	0.13	-0.25	0.24*	-0.08	0.09	0.11
FATOR3	-0.08*	-0.01	0.15	-0.02	-0.17	0.08	0.01	-0.08	0.21*
FATOR4	0.34	0.15*	-0.43*	0.22*	0.36*	-0.42*	-0.22*	0.05	0.06
FATOR5	0.14	0.05	-0.10	0.13	0.17	0.05	-0.13	-0.19*	0.01

(*) Valores significantes a $p < 0.1$. *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness* (MRVBF); *Terrain Ruggedness Index* (TRI); *Topographic Wetness Index* (TWI); *Vertical Distance to Channel Network* (VDCN).

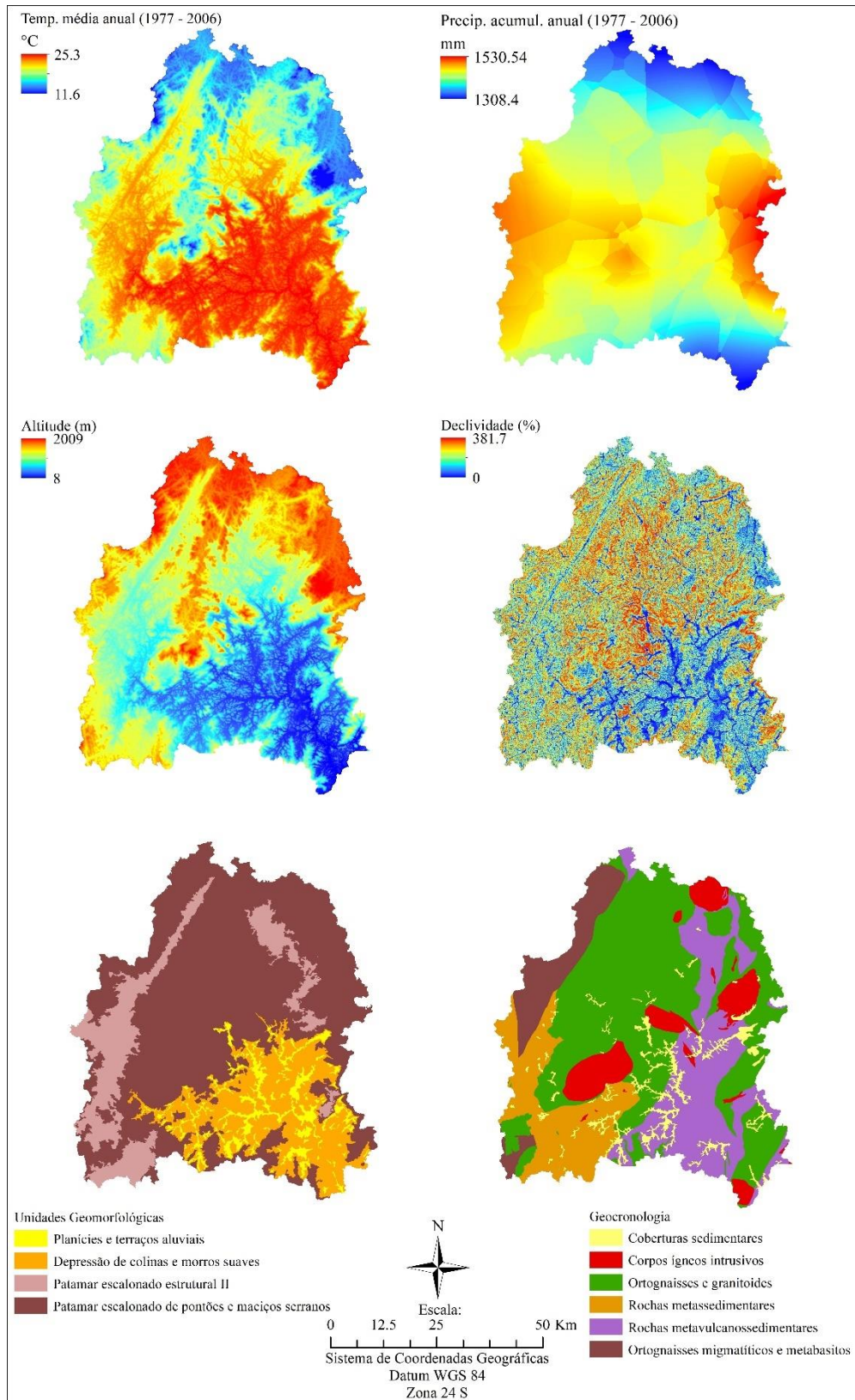


Figura 9 - Temperatura média anual, precipitação média anual, relevo (elevação e declividade), unidades geomorfológicas e geologia da Região Média da Bacia do Rio Itapemirim.

4. Conclusão

A determinação das unidades geomorfológicas e posterior utilização do algoritmo hipercubo latino foi eficiente em determinar os locais mais representativos para coleta dos solos, pois permitiu fazer análises de forma satisfatória da relação dos fatores de formação e dos atributos dos solos por meio de análise multivariada.

A análise de fatores permitiu diferenciar 4 fatores para a profundidade de 0-20 cm e cinco fatores para a profundidade de 60-80 cm, correlacionando os atributos para melhor conhecimento da dinâmica ambiental dos solos. Os quatro fatores de 0-20 cm de profundidades estão associados a soma de bases, frações magnéticas, textura e nutrientes e metais. Os cinco fatores de 60-80 cm de profundidade estão associados a soma de bases, associação P e Zn, atividade da fração argila, magnetismo e translocação de argila. As cargas fatoriais tiveram correlações positivas com clima, relevo, NDVI, geologia e a geomorfologia, demonstrando a dinâmica ambiental dos atributos do solo.

A metodologia empregada apresenta potencial para uso e adaptação a outras áreas do mundo.

5. Bibliografia

- ALKIMIN, F. F.; MARSHAK, S.; WHITTINGTON, A.; & PREDROSA-SOARES, A. C. Extensional collapse in the Neoproterozoic Araçuaí orogen, eastern Brazil: A setting for reactivation of asymmetric crenulation cleavage. **Journal Structural Geology**, vol. 28, p. 129–147, 2006. .
- ALMEIDA, F. F. M. de; BRITO NEVES, B. B. de; DAL RÉ CARNEIRO, C. The origin and evolution of the South American Platform. **Earth-Science Reviews**, vol. 50, no. 1–2, p. 77–111, May 2000. DOI 10.1016/S0012-8252(99)00072-0. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0012825299000720>.
- AMARANTE, O. A. C. do; SILVA, F. de J.; DA, L.; ANDRADE, P. E. P. de. **Atlas eólico : Espírito Santo**. Vitória: [s. n.], 2009.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. [S. l.]: Editora UNISINOS, 2003. Available at: <https://books.google.com.br/books?id=Q2--HAAACAAJ>.
- ANJOS, L. H.; FERNANDES, M. R.; PEREIRA, M. G.; FRANZMEIER, D. P. Landscape and pedogenesis of an oxisol-inceptisol-ultisol sequence in southeastern Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, vol. 62, no. 6, p. 1651–1658, Nov. 1998. DOI 10.2136/sssaj1998.03615995006200060024x. Available at: <http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj1998.03615995006200060024x>.
- AYOUBI, S.; ABAZARI, P.; ZERAATPISHEH, M. Soil great groups discrimination using magnetic susceptibility technique in a semi-arid region, central Iran. **Arabian Journal of Geosciences**, vol. 11, no. 20, p. 616, 18 Oct. 2018. DOI 10.1007/s12517-018-3941-4. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s12517-018-3941-4>.
- BARRETO, P.; SARTORI, M. **Levantamento de áreas agrícolas degradadas no Estado do Espírito Santo**. Vitória. ES: [s. n.], 2012.
- BATISTA, M. A.; INOUE, T. T.; ESPER NETO, M.; MUNIZ, A. S. Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. **Hortaliças-fruto**. [S. l.]: EDUEM, 2018. p. 113–162. DOI 10.7476/9786586383010.0006. Available at: <http://books.scielo.org/id/bv3jx/pdf/brandao-9786586383010-06.pdf>.
- BURAK, D. L.; SANTOS, D. A.; PASSOS, R. R. Variabilidade espacial de atributos físicos: relação com relevo, matéria orgânica e produtividade em café conilon. **Coffee Science**, Lavras, , p. 455–466, 2016. .
- CALEGARI, S. S. **Significado e influência do lineamento alegre na evolução tectônica da bacia de campos e margem continental adjacente, sudeste do Brasil**. 2015. Universidade de Brasília, Brasília, 2015. DOI 10.26512/2015.08.D.19846. Available at: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/19846>.

- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, vol. 58, no. 5, p. 1501–1511, Sep. 1994. DOI 10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x. Available at: <http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>.
- CAPOANE, V.; BURROW, R. A.; TICHER, T.; RHEINHEIMER DOS SANTOS, D.; ZAFAR, M. Efeito das atividades antrópicas na geoquímica do solo em topossequências do Planalto do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol. 11, no. 7, p. 2315–2334, 2018. DOI 10.26848/rbgf.v11.07.p2315-2334. Available at: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/237853>.
- CARVALHO JUNIOR, W. de; CHAGAS, C. da S.; FERNANDES FILHO, E. I.; VIEIRA, C. A. O.; SCHAEFER, C. E. G.; BHERING, S. B.; FRANCELINO, M. R. Digital soilscape mapping of tropical hillslope areas by neural networks. **Scientia Agricola**, vol. 68, no. 6, p. 691–696, Dec. 2011. DOI 10.1590/S0103-90162011000600014. Available at: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162011000600014&lng=en&tlng=en.
- CÉSAR DE MELLO, D.; DEMATTÊ, J. A. M.; SILVERO, N. E. Q.; DI RAIMO, L. A. D. L.; POPPIEL, R. R.; MELLO, F. A. O.; SOUZA, A. B.; SAFANELLI, J. L.; RESENDE, M. E. B.; RIZZO, R. Soil magnetic susceptibility and its relationship with naturally occurring processes and soil attributes in pedosphere, in a tropical environment. **Geoderma**, vol. 372, p. 114364, Aug. 2020. DOI 10.1016/j.geoderma.2020.114364. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706119329581>.
- CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; ROCHA, M. F.; DE CARVALHO JÚNIOR, W.; SOUZA NETO, N. C. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 14, no. 2, p. 218–226, 2010. DOI 10.1590/S1415-43662010000200014. Available at: <http://www.agriambi.com.br>.
- CPRM, S. G. do B. **Levantamento Aerogeofísico Espírito Santo**. [S. l.: s. n.], 2009.
- DA SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. de S. V - Matéria Orgânica do Solo. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (eds.). **Fertilidade do Solo**. Sociedade. Viçosa: [s. n.], 2007. p. 1017.
- DADALTO, G. G.; SILVA, A. E. S. da; COSTA, E. B. da; GALVÊAS, P. A. O.; LOSS, W. R.; TÉC., E. **Transformações da agricultura capixaba: 50 anos**. Cedagro; I. Vitória. ES: [s. n.], 2016.
- DEARING, J. A. **Environmental magnetic susceptibility: using the Bartington MS2 system**. Second Edi. Kenilworth: Chi Publishing, 1999.

- DOKUCHAEV, V. V. **Russkii Chernozem-Report to the Free Economic Society.** St.Petersburg: [s. n.], 1883.
- ESRI INC. ArcGis Desktop. 2014. .
- GILLER, K. E.; ROWE, E. C.; DE RIDDER, N.; VAN KEULEN, H. Resource use dynamics and interactions in the tropics: Scaling up in space and time. **Agricultural Systems**, vol. 88, no. 1, p. 8–27, Apr. 2006. DOI 10.1016/j.agsy.2005.06.016. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308521X05000867>.
- HAIR, J. F. **Análise multivariada de dados.** 6th ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; CAMPOS NETO, M. da C.; SILVA, L. C. da; TROUW, R. A. J.; JANASI, V. de A. Província Mantiqueira. **Geologia do continente sul-americano:: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.** [S. l.]: Beca, 2004.
- JASIEWICZ, J.; STEPINSKI, T. F. Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. **Geomorphology**, vol. 182, p. 147–156, Jan. 2013. DOI 10.1016/j.geomorph.2012.11.005. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X12005028>.
- JENNY, H. **Factors of Soil Formation, A System of Quantitative Pedology.** New York: [s. n.], 1941.
- KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. **Pedologia : Fundamentos.** [S. l.: s. n.], 2012.
- LIMA, J. S. S.; BONA, D. A. O.; FIEDLER, N. C.; PEREIRA, D. P. Distribuição espacial das frações granulométricas argila e areia total em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Árvore**, vol. 38, no. 3, p. 513–521, Jun. 2014. DOI 10.1590/S0100-67622014000300014. Available at: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622014000300014&lng=pt&tlng=pt.
- LOURENÇO, F. S.; ALKMIM, F. F. de; ARAÚJO, M. N. C. de; ROMEIRO, M. A. T.; MATOS, G. C. de; CRÓSTA, A. P. The Piúma lineament, southern Espírito Santo: structural expression and tectonic significance. **Brazilian Journal of Geology**, vol. 46, no. 4, p. 531–546, Dec. 2016. DOI 10.1590/2317-4889201620150038. Available at: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2317-48892016000400531&lng=en&tlng=en.
- MA, Y.; MINASNY, B.; MALONE, B. P.; MCBRATNEY, A. B. Pedology and digital soil mapping (DSM). **European Journal of Soil Science**, vol. 70, no. 2, p. 216–235, 25 Mar. 2019. DOI 10.1111/ejss.12790. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ejss.12790>.
- MAHER, B.A. Characterisation of soils by mineral magnetic measurements. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, vol. 42, no. 1–2, p. 76–92, Feb.

1986. DOI 10.1016/S0031-9201(86)80010-3. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0031920186800103>.
- MAHER, Barbara A. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, vol. 137, no. 1–2, p. 25–54, Feb. 1998. DOI 10.1016/S0031-0182(97)00103-X. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S003101829700103X>.
- MCBRATNEY, A. B.; MENDONÇA SANTOS, M. L.; MINASNY, B. **On digital soil mapping**. [S. l.: s. n.], 2003. vol. 117, . [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).
- MENDES, W. de S.; DEMATTÊ, J. A. M.; SILVERO, N. E. Q.; RABELO CAMPOS, L. Integration of multispectral and hyperspectral data to map magnetic susceptibility and soil attributes at depth: A novel framework. **Geoderma**, vol. 385, p. 114885, Mar. 2021. DOI 10.1016/j.geoderma.2020.114885. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706120326409>.
- MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. **Matéria Orgânica do Solo: Métodos de Análises**. 1st ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005. Available at: https://www.researchgate.net/publication/323613044_Materia_Organica_do_Solo_Metodos_de_Analises.
- MIELKI, G. F. **Disponibilidade de ferro em solos tropicais e sua absorção para pela planta**. 2014. 35 f. Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2014.
- MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. **Computers & Geosciences**, vol. 32, no. 9, p. 1378–1388, Nov. 2006. DOI 10.1016/j.cageo.2005.12.009. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S009830040500292X>. Accessed on: 25 Apr. 2019.
- MONTEIRO, E. de C. **Degradação de solos sob pastagens na bacia do rio Alegre-ES: cobertura do solo e indicadores de qualidade**. 2015. 78 f. Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, 2015.
- NASCIMENTO, P. C. do; BISSANI, C. A.; LEVIEN, R.; LOSEKANN, M. E.; FINATO, T. Uso da terra e atributos de solos do estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 18, no. 9, p. 920–926, Sep. 2014. DOI 10.1590/1807-1929/agriambi.v18n09p920-926. Available at: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662014000900007&lng=pt&tlng=pt.
- NEVES, B. B. de B.; NETO, M. da C. C.; FUCK, R. A. From Rodinia to Western Gondwana: An approach to the Brasiliano-Pan African Cycle and orogenic collage. **Episodes**, vol. 22, no. 3, p. 155–166, 1 Sep. 1999. DOI 10.18814/epiugs/1999/v22i3/002. Available at: <http://www.episodes.org/journal/view.html?doi=10.18814/epiugs/1999/v22i3/002>.

- OBOUR, A. K.; STAHLMAN, P. W.; HOLMAN, J. D. Soil chemical properties as influenced by long-term glyphosate-resistant corn and soybean production in the central Great Plains, USA. **Geoderma**, vol. 277, p. 1–9, Sep. 2016. DOI 10.1016/j.geoderma.2016.04.029. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706116301902>.
- OLIVEIRA, T. S. **Metais pesados como indicadores de materiais de origem dos solos**. 1996. 128 f. Universidade Federal de Viçosa, 1996.
- PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 32, no. 3, p. 911–920, Jun. 2008. DOI 10.1590/S0100-06832008000300001. Available at: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832008000300001&lng=pt&tlng=pt.
- PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; WIEDEMANN, C. M.; PINTO, C. P. The Araçuaí-West-Congo Orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. **Precambrian Research**, vol. 110, no. 1–4, p. 307–323, 1 Aug. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00174-7](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00174-7).
- PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. dos; JUNIOR, C. R. P.; PINTO, L. A. da S. R.; NETO, E. C. da S.; FONTANA, A. **Formação e caracterização de solos. Formação, classificação e cartografia dos solos**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019. p. 1–20. DOI 10.22533/at.ed.348192309. Available at: <https://www.atenaeditora.com.br/arquivos/ebooks/formacao-classificacao-e-cartografia-dos-solos>.
- PINHEIRO, H. S. K. **Métodos de mapeamento digital aplicados na predição de classes e atributos dos solos da bacia hidrográfica do Rio Guapi Macacu, RJ**. 2015. 166 f. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2015.
- PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, M. A. **Guia de interpretação de análise de solo e foliar**. Vitória. ES: Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural - Incaper, 2013.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Viena, 2013. Available at: <http://www.r-project.org/>.
- RANGANAI, R. T.; MOIDAKI, M.; G. KING, J. Magnetic susceptibility of soils from Eastern Botswana: A reconnaissance survey and potential applications. **Journal of Geography and Geology**, vol. 7, no. 4, p. 45, 2 Dec. 2015. DOI 10.5539/jgg.v7n4p45. Available at: <http://ccsenet.org/journal/index.php/jgg/article/view/54025>.
- ROBERTSON, G. P. **GS+ : Geostatistics for the Environmental Sciences**. Michigan, 2008. .
- ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de

- produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, vol. 6, p. 133–137, 1998. .
- SABINO, C. V. S.; LAGE, L. V.; ALMEIDA, K. C. de B. Uso de métodos estatísticos robustos na análise ambiental. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, vol. 19, no. spe, p. 87–94, 2014. DOI 10.1590/S1413-41522014019010000588. Available at: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522014000500087&lng=pt&tlng=pt.
- SCHOENHOLTZ, S. .; MIEGROET, H. V.; BURGER, J. . A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, vol. 138, no. 1–3, p. 335–356, Nov. 2000. DOI 10.1016/S0378-1127(00)00423-0. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112700004230>.
- SHARMA, B. .; MUKHOPADHYAY, S. .; SIDHU, P. .; KATYAL, J. . Pedospheric attributes in distribution of total and DTPA-extractable Zn, Cu, Mn and Fe in Indo-Gangetic plains. **Geoderma**, vol. 96, no. 1–2, p. 131–151, May 2000. DOI 10.1016/S0016-7061(00)00008-2. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706100000082>.
- SHENGGAO, L. Lithological factors affecting magnetic susceptibility of subtropical soils, Zhejiang Province, China. **CATENA**, vol. 40, no. 4, p. 359–373, Aug. 2000. DOI 10.1016/S0341-8162(00)00092-8. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0341816200000928>.
- SILVA, A. G. **Compartimentos de C, P e N em solos sob pastagens degradadas na região sul do Estado do Espírito Santo**. 2021. 51 f. Universidade Federal do Espírito Santo -UFES, 2021.
- SILVA, B. A.; MARTINS, V. M.; MACEDO, R. S.; HAYAKAWA, E. H.; SANCHEZ, R. M.; DANZER, M. Mapeamento digital de solos e os atributos topográficos das vertentes no alto curso da sub-bacia hidrográfica do córrego Quatro Pontes, PR–Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, vol. 19, no. 4, 2018. <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i4.1385>.
- SILVA, S. de A.; LIMA, J. S. de S.; SOUZA, G. S. de; OLIVEIRA, R. B. de; SILVA, A. F. da. Spatial variability of the phosphorus and granulometric fractions of a red-yellow oxiso. **REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA**, vol. 41, no. 1, 2010. DOI 10.5935/1806-6690.20100001. Available at: <http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/1806-6690.20100001>.
- SOBRAL, L. F.; BARRETTO, M. C. V.; SILVA, A. J.; ANJOS, J. L. **Guia prático para interpretação de resultados de análises desolos**. Aracaju, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015.
- SOUMARÉ, M.; TACK, F. M. G.; VERLOO, M. G. Distribution and availability of iron, manganese, zinc, and copper in four tropical agricultural soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, vol. 34, no. 7–8, p. 1023–1038, 24 Apr. 2003. DOI 10.1081/CSS-120019107. Available at:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1081/CSS-120019107>.

SPASSOV, S.; EGLI, R.; HELLER, F.; NOURGALIEV, D. K.; HANNAM, J. Magnetic quantification of urban pollution sources in atmospheric particulate matter. **Geophysical Journal International**, vol. 159, no. 2, p. 555–564, Nov. 2004. DOI 10.1111/j.1365-246X.2004.02438.x. Available at: <https://academic.oup.com/gji/article-lookup/doi/10.1111/j.1365-246X.2004.02438.x>.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª Edição. Brasília, DF: [s. n.], 2017.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. . **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. vol. VIII, . DOI 10.2307/210739. Available at: <https://www.jstor.org/stable/210739?origin=crossref>.

TIECHER, T.; CANER, L.; MINELLA, J. P. G.; PELLEGRINI, A.; CAPOANE, V.; RASCHE, J. W. A.; SCHAEFER, G. L.; RHEINHEIMER, D. dos S. Tracing sediment sources in two paired agricultural catchments with different riparian forest and wetland proportion in southern Brazil. **Geoderma**, vol. 285, p. 225–239, Jan. 2017. DOI 10.1016/j.geoderma.2016.10.008. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706116306000>.

TROMPETTE, R. **Geology of Western Gondwana (2000 - 500 Ma)**. [S. I.]: CRC Press, 2020. DOI 10.1201/9781003077664. Available at: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781000099690>.

TROMPETTE, R. Neoproterozoic (~600 Ma) aggregation of Western Gondwana: a tentative scenario. **Precambrian Research**, vol. 82, no. 1–2, p. 101–112, Mar. 1997. DOI 10.1016/S0301-9268(96)00045-9. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301926896000459>.

VIDAL-TORRADO, P.; MACIAS, F.; CALVO, R.; DE CARVALHO, S. G.; SILVA, A. C. Gênese de solos derivados de rochas ultramáficas serpentizadas no sudoeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 30, no. 3, p. 523–541, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000300013>.

VIEIRA, V. S.; MENEZES, R. G. de. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Espírito Santo: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais**. CPRM. Belo Horizonte: [s. n.], 2015.

VIEIRA, V. S.; MENEZES, R. G. de. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Espírito Santo: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2018.

VIEIRA, V. S.; SILVA, M. A.; CORRÊA, T. R.; LOPES, N. H. B. Mapa Geológico do Estado do Espírito Santo. **CPRM**, Belo Horizonte, 2018. .

YANG, H.; ZHANG, X.; XU, M.; SHAO, S.; WANG, X.; LIU, W.; WU, D.; MA, Y.; BAO, Y.; ZHANG, X.; LIU, H. Hyper-temporal remote sensing data in bare soil period

and terrain attributes for digital soil mapping in the Black soil regions of China. **CATENA**, vol. 184, p. 104259, Jan. 2020. DOI 10.1016/j.catena.2019.104259. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0341816219304011>.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, vol. 19, no. 13, p. 1467–1476, 11 Oct. 1988. DOI 10.1080/00103628809368027. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00103628809368027>.

ZAFAR, M.; TIECHER, T.; CAPOANE, V.; TROIAN, A.; DOS SANTOS, D. R. Characteristics, lability and distribution of phosphorus in suspended sediment from a subtropical catchment under diverse anthropic pressure in Southern Brazil. **Ecological Engineering**, vol. 100, p. 28–45, Mar. 2017. DOI 10.1016/j.ecoleng.2016.12.008. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857416307224>.

ZHANG, Y.; DE VRIES, W.; THOMAS, B. W.; HAO, X.; SHI, X. Impacts of long-term nitrogen fertilization on acid buffering rates and mechanisms of a slightly calcareous clay soil. **Geoderma**, vol. 305, p. 92–99, Nov. 2017. DOI 10.1016/j.geoderma.2017.05.021. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706116309077>.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Universidade Estadual Paulista, 2001.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A região média da bacia do rio Itapemirim precisa de estudos mais detalhados visando analisar o meio ambiente para seu melhor gerenciamento, pois é uma região importante do estado do Espírito Santo com vocação agropecuária.

Devem ser realizados estudos mais detalhados sobre a Geomorfologia e estruturas geológicas, com o objetivo de melhor compreender como estas estruturas compartimentaram o relevo. Ainda existem grandes lineamentos e regiões abatidas e/ou soerguidas do relevo que não foram estudados em detalhe.

Com relação a vulnerabilidade à inundação, o foco das análises sempre está voltado para as áreas urbanas. São necessários estudos mais detalhados dos municípios como um todo, visando a análise da sub-bacia hidrográfica, ou seja, também das áreas rurais, de forma a gerenciar melhor o risco à inundação. Uma inundação não é iniciada na área urbana e sim na região de cabeceira dos rios na área rural, em função de alta precipitação. Logo, o gerenciamento da sub-bacia hidrográfica auxilia na tomada de decisão governamental. Obras de engenharia auxiliam na solução das inundações na área urbana, mas não são a única solução para o problema.

Foi observado que os atributos do solo são fortemente condicionados por parâmetros do relevo como altitude e declividade. As regiões mais baixas tendem a possuir maior fertilidade, onde a água auxilia no transporte dos macronutrientes e micronutrientes das partes mais altas para as regiões mais baixas do relevo. As rochas também são parâmetros importantes, pois a química do solo é herança do material parental. O relevo rege a dinâmica de circulação da água e erosão do solo, bem como é um fator que influencia no clima da região. Regiões mais altas tendem a ter clima mais ameno e regiões mais baixas tendem a climas mais quentes. Mais estudos detalhados devem ser realizados com o objetivo de contribuir para o contínuo entendimento da dinâmica ambiental da distribuição dos atributos dos solos na região média da bacia do rio Itapemirim.