

Artigo de Pesquisa

## Mapeamento Geomorfológico Regional Semiautomatizado por Descoberta e Modelagem do Conhecimento

### *Regional Semiautomatized Geomorphological Mapping Through Knowledge Discovery and Modeling*

Raphael e Silva Girão<sup>1</sup>; Raúl Sanchez Vicens<sup>2</sup>; Julio Cesar Horta de Almeida<sup>1</sup>; Pedro José Farias Fernandes<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Estudos Tectônicos (LET-TEKTOS) - Faculdade de Geologia – Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Rua São Francisco Xavier, 524 - Maracanã, Rio de Janeiro – RJ. CEP: 20550-900. E-mail: raphaelgirao@hotmail.com; jchalmeida@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4745-9797> / <https://orcid.org/0000-0001-5991-5457>

<sup>2</sup> Laboratório de Geografia Física (LAGEF) - Departamento de Geografia - Universidade Federal Fluminense - Av. Litorânea s/n - Campus da Praia Vermelha, Boa Viagem, Niterói - RJ, Brasil. CEP: 24030-346. E-mail: rvicens@gmail.com; pjf\_fernandes@yahoo.com.br

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4429-806X> / <http://orcid.org/0000-0002-1862-240>

Recebido: 03/09/2020; Aceito: 18/03/2021; Publicado: 01/10/2021

**Resumo:** O objetivo do presente estudo é a elaboração de um mapa geomorfológico do estado do Rio de Janeiro na escala 1:250.000, a partir do desenvolvimento de uma metodologia que envolva uma abordagem que minimize a subjetividade inerente à atividade de mapeamento geomorfológico, combinando diferentes dados quantitativos/qualitativos e utilizando procedimentos semiautomatizados de mapeamento. Para tal, foram utilizados um sistema de interpretação de imagens baseada em conhecimento e técnicas de descoberta de conhecimento em banco de dados - *Knowledge Discovery in Databases* (KDD). A partir desse estudo, conclui-se que: (i) a combinação da análise de imagens baseada em objetos geográficos (GEOBIA) com a KDD obteve bons resultados no mapeamento geomorfológico semiautomatizado, permitindo a utilização de uma grande diversidade de dados quantitativos e qualitativos, e, ainda assim, minimizando as subjetividades envolvidas no mapeamento; (ii) apesar dos avanços tecnológicos e metodológicos, o conhecimento do especialista sobre o que está sendo mapeado continua sendo imprescindível, uma vez que as etapas que mais impactaram nos resultados obtidos no mapeamento são diretamente influenciadas por tais conhecimentos: a segmentação e a seleção do conjunto amostral.

**Palavras-chave:** Mapeamento Geomorfológico; GEOBIA; Sensoriamento remoto.

**Abstract:** The objective of this study is to elaborate a geomorphological map of Rio de Janeiro state in 1: 250.000 scale, based on the development of a methodology that involves an approach that minimizes the subjectivity inherent to the geomorphological mapping activity; combining different quantitative and qualitative data and semi-automated mapping procedures. For this, an image interpretation system based on knowledge and knowledge discovery techniques in databases (KDD) were used. From this study, it is concluded that: (i) the combination of GEOBIA and KDD obtained good results in the semi-automated geomorphological mapping, allowing the use of a great diversity of quantitative and qualitative data, and, even so, minimizing the subjectivities involved in the mapping; (ii) despite technological and methodological advances, the expert's knowledge about what is being mapped remains essential, since the steps that most impacted the results obtained in the mapping are directly influenced by such knowledge: segmentation and sample set selection.

**Keywords:** Geomorphological mapping; GEOBIA; Remote sensing.

## 1. Introdução

De acordo com Bishop et al. (2012), o início da cartografia geomorfológica foi marcado pelo predomínio de metodologias qualitativas, que incorporam diferentes níveis de subjetividade, de forma que os mapeamentos geomorfológicos com abordagens mais quantitativas se resumiam a um caráter meramente descritivo da morfometria do relevo. Tal panorama ainda é predominante, de forma que a maior parte dos trabalhos recentes relacionados a mapeamento geomorfológico pode ser enquadrada em duas linhas metodológicas principais: a) abordagens qualitativas, com maior nível de subjetividade, que exigem mais tempo e baseadas em interpretações visuais; ou b) abordagens quantitativas, mais automatizadas, contudo muito simplificadas, no sentido de utilizarem predominantemente dados morfométricos para a caracterização do relevo, resultando em mapas de compartimentação geomorfométrica, que ignoram informações relevantes como gênese do relevo e o seu substrato geológico.

Nesse contexto, fica evidente que na cartografia geomorfológica há uma lacuna científica para o desenvolvimento de metodologias que combinem os pontos positivos das duas linhas metodológicas principais (quantitativa e qualitativa) de mapeamento geomorfológico, de forma que minimize a subjetividade, tempo de execução e trabalho empreendido, mas que, ainda assim, consiga apresentar um maior número de informações relevantes para a geomorfologia, não se limitando a dados morfométricos.

Segundo Bishop et al. (2012), até hoje, a interpretação humana ainda representa a abordagem mais sofisticada para produzir mapas geomorfológicos complexos em múltiplas escalas, embora as questões de subjetividade e reprodutibilidade permaneçam. Portanto, os maiores avanços para abordagens em mapeamento geomorfológico consistem nas tentativas de automatizar, simular e parametrizar computacionalmente as capacidades de interpretação humana. Nesse contexto, os sistemas de interpretação baseada em conhecimento possuem grande potencial para avanços metodológicos.

Os sistemas de interpretação baseada em conhecimento modelam em um ambiente computacional o conhecimento do fotointérprete, permitindo emular a capacidade do mesmo em combinar dados de diferentes fontes e formatos para o mapeamento temático (FEITOSA et al., 2005). Pinho (2005) destaca que os sistemas de interpretação baseada em conhecimento funcionam fundamentados na inserção do conhecimento do analista a respeito do que está a ser classificado, se tratando assim de uma formalização computacional da interpretação de um determinado indivíduo sobre a paisagem estudada. Dentre os sistemas de interpretação de imagens baseadas em conhecimento, aqueles que trabalham por meio de análise de imagens baseada em objetos geográficos (GEOBIA) são os mais populares e utilizados em estudos ambientais. A GEOBIA é a maneira mais completa e integrada de se representar em termos computacionais o conhecimento de um analista humano para a interpretação automática de imagens de sensoriamento remoto (NOVACK, 2009).

A GEOBIA se difere das técnicas convencionais de classificação de imagens de sensoriamento remoto, pois não possui como foco as análises baseadas nos *pixels*, já que sua unidade de processamento básica são os objetos oriundos dos algoritmos de segmentação (BENZ et al., 2004; BAATZ; SCHÄPE, 2000). Além disso, na GEOBIA, há a possibilidade de se gerar diferentes níveis de segmentação e classificação na abordagem multiresolução, o que permite a estruturação espacial e semântica do conteúdo de uma imagem pela inserção do conhecimento especialista em uma rede hierárquica de classificação (BENZ et al., 2004). Essa característica é uma das vantagens da GEOBIA no mapeamento geomorfológico, pois permite a classificação do relevo em diferentes níveis, adequando-se bem ao mapeamento geomorfológico taxonômico (DRAGUT; BLASCHKE, 2006).

Na literatura, uma série de trabalhos de mapeamento geomorfológico foram desenvolvidos a partir da utilização de GEOBIA: Dragut e Blaschke (2006), Asselen e Seijmonsbergen (2006), Anders, Seijmonsbergen e Boutten (2011), Camargo et al. (2009), Verhagen e Dragut (2012), Dragut e Eisank (2012), Pimenta et al. (2014), Girão, Mello e Fernandes (2016), Dekavalla e Argialas (2017), Chattaraj et al. (2017) e Fernandes e Girão (2018); contudo, nenhum deles explorou dados qualitativos e índices geomorfométricos como variáveis para classificação do relevo, uma vez que só consideraram variáveis geomorfométricas.

Outra técnica importante que pode ser associada à GEOBIA na classificação de imagens é a Descoberta de Conhecimento em Banco de Dados (*Knowledge Discovery in Databases* - KDD), que consiste em um processo aplicado em uma grande quantidade de dados para a identificação de padrões nos mesmos (FAYYAD et al., 1996). Dentre as etapas da KDD, a mineração de dados é onde ocorre, de fato, a extração de conhecimento proveniente de uma

base de dados, pois consiste na etapa da KDD no qual é selecionado o método para identificar padrões nos dados, assim como sua efetiva execução. Portanto, na GEOBIA, a mineração de dados pode ser utilizada para a descoberta dos atributos e limiares mais adequados e eficientes para distinguir classes diferentes.

Sendo assim, o objetivo desse trabalho é a elaboração de um mapa geomorfológico do estado do Rio de Janeiro na escala 1:250.000, a partir do desenvolvimento de uma metodologia que envolva uma abordagem que minimize a subjetividade inerente a atividade de mapeamento geomorfológico, combinando diferentes dados quantitativos/qualitativos e utilizando procedimentos semiautomatizados de mapeamento. Para tal, foi utilizado um sistema de interpretação de imagens baseada em conhecimento e técnicas de descoberta de conhecimento em banco de dados (KDD).

## 2. Área de Estudo

O estado do Rio de Janeiro está inserido na região sudeste do Brasil, sendo limitado pelos estados de São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo, e pelo oceano Atlântico (Figura 1). O estado possui regiões com cotas altimétricas próximas às do nível do mar, principalmente nas áreas litorâneas, e regiões com altitudes superiores a 2.000 metros, inseridas nas serras do Mar e da Mantiqueira.

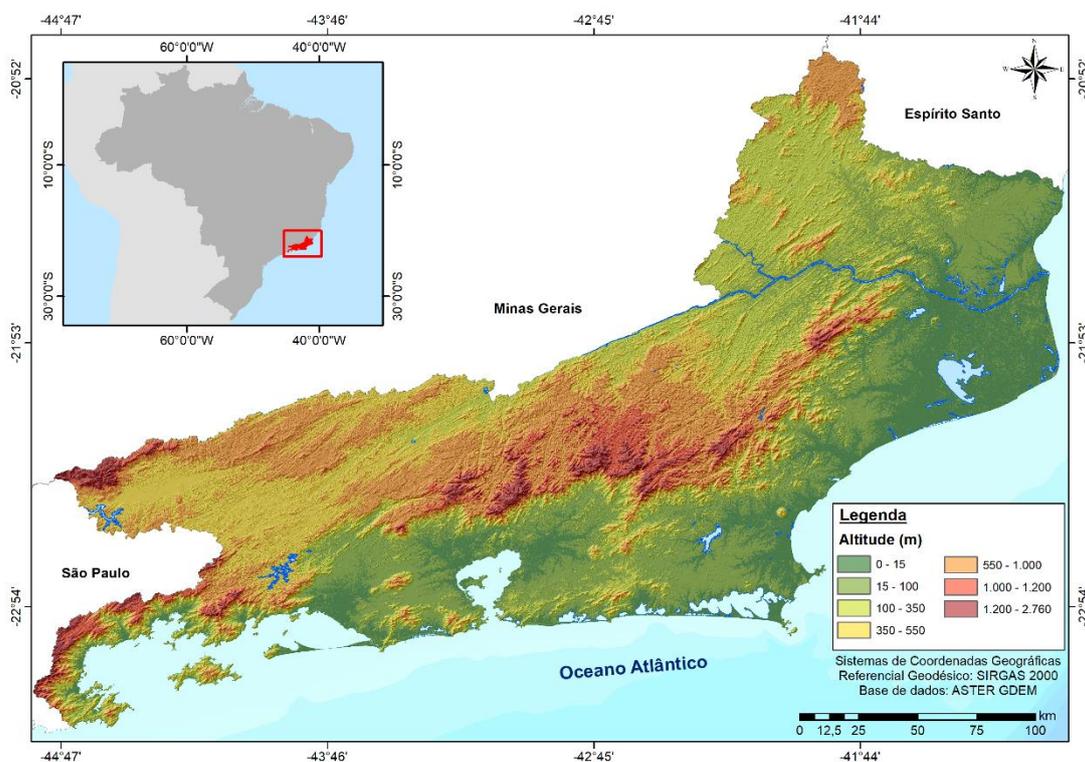


Figura 1. Mapa hipsométrico do estado do Rio de Janeiro.

A área de estudo está localizada no extremo leste do Rift Continental do Sudeste do Brasil - RCSB (RICCOMINI, 1989, 1995), se estendendo da região de serras e de depressões interplanálticas correspondente ao vale do rio Paraíba do Sul à região dos maciços litorâneos, colinas e terrenos quaternários da Baía de Guanabara, de Jacarepaguá, de Sepetiba, da Região dos Lagos e da planície costeira de Campos. Sua geomorfologia é caracterizada por um contraste significativo das formas de relevo, produto da complexa evolução geológica-geomorfológica meso-cenozóica do sudeste brasileiro e, ainda, do processo acentuado de alteração da paisagem resultante das condições do regime climático tropical úmido (SILVA, 2002). Portanto, tais características fazem do estado do Rio de Janeiro uma relevante área de estudo para avaliação da abordagem metodológica proposta no presente estudo.

A geologia do estado do Rio de Janeiro é composta, em sua maior parte, por um conjunto de rochas metamórficas de alto grau associadas a corpos graníticos intrusivos, que constituem parte integrante de um sistema orogênico conhecido como Faixa Ribeira (ALMEIDA et al., 1977, 1981). A evolução da Faixa Ribeira caracteriza-se por sucessivas convergências litosféricas que atuaram desde o Neoproterozoico até o Ordoviciano Inferior (ALMEIDA et al., 1977, 1981; HEILBRON; EIRADO; ALMEIDA, 2016). A geomorfologia do estado do Rio de Janeiro é sustentada, em grande parte, pelas rochas originadas por tais processos.

A partir do Mesozoico até o Cenozoico, um período de instabilidade tectônica, evento Sul-Atlântico (SCHOBENHAUS et al. 1984) ou Reativação Wealdeniana (ALMEIDA, 1967), referente ao mecanismo de separação das placas tectônicas Sul-Americana e Africana, resultou na formação do Oceano Atlântico e na tafrogênese que gerou um episódio de rifteamento, produzindo o Rift Continental do Sudeste do Brasil (RICCOMINI, 1989; 1995), resultando em depressões tectônicas, como a da Guanabara e Paraíba do Sul; e em terrenos elevados, como a Serra da Mantiqueira e a Serra do Mar. Nesse período, também ocorreu um magmatismo alcalino, que resultou em uma série de maciços alcalinos presentes atualmente na paisagem fluminense.

No RCSB, especificamente na porção do território fluminense, estão presentes importantes bacias sedimentares paleogênicas, as bacias de Resende e Volta Redonda, que compõem o denominado Segmento Central do RCSB, e as bacias de São José de Itaboraí e Macacu, localizadas no Segmento Oriental do RCSB (HEILBRON; EIRADO; ALMEIDA, 2016).

Por fim, a configuração geológica-geomorfológica da área de estudo é complementada por depósitos neogênicos e quaternários, originados e retrabalhados em um clima predominantemente tropical, mas com inúmeras variações paleoclimáticas (umidificação e aridez), resultando, por exemplo, nas colinas suavemente onduladas que caracterizam a morfologia de “mar de morros” do Planalto Sudeste do Brasil (SILVA, 2002). Na região da depressão da Baía da Guanabara e da área costeira no Norte Fluminense e Região dos Lagos, as variações dos paleoníveis marinhos, combinadas com o aporte de materiais provindos da região serrana adjacente, resultaram em um entulhamento generalizado da paisagem, originando as extensas planícies flúvio-marinhas, além das morfologias de terraços marinhos, restingas e lagunas costeiras (SILVA, 2002).

### 3. Materiais e Métodos

#### 3.1. Materiais

Para o presente estudo, foram utilizados os seguintes materiais: MDE ASTER GDEM, com resolução espacial de 1 arco-segundo, no formato GeoTIF; e o Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro (HEILBRON; EIRADO; ALMEIDA, 2016) em formato shape (shp).

#### 3.2. Preparação dos Planos de Informação (PIs)

A primeira etapa do presente estudo consistiu na preparação dos planos de informação (PIs) que são as variáveis utilizadas na diferenciação das classes geomorfológicas no mapeamento proposto (Figura 2). Os PIs iniciais consistem no MDE ASTER GDEM e no Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro (HEILBRON; EIRADO; ALMEIDA, 2016).

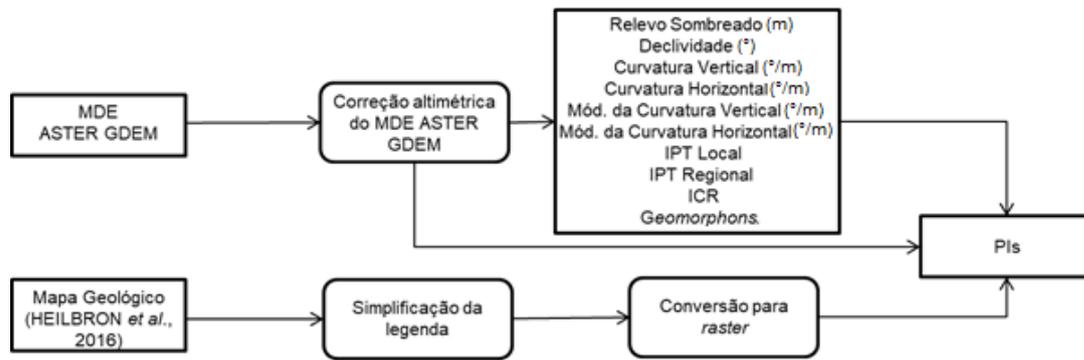


Figura 2. Fluxograma das etapas de elaboração dos PIs.

O MDE ASTER GDEM passou por um processo de correção altimétrica para melhoria da sua acurácia vertical por meio da utilização de uma superfície de compensação de erros criada por krigagem ordinária, maiores detalhes sobre esse procedimento são descritos em Girão, Vicens e Fernandes (2019). A partir do MDE ASTER GDEM corrigido, foram gerados os seguintes PIs: altimetria, relevo sombreado, declividade, curvatura vertical, curvatura horizontal, módulo da curvatura vertical, módulo da curvatura horizontal, índice de posição topográfica local (WEIS, 2001; SILVEIRA; SILVEIRA, 2017), índice de posição topográfica regional (WEIS, 2001; SILVEIRA; SILVEIRA, 2017), índice de concentração de rugosidade (SAMPAIO, 2008) e geomorphons (JASIEWICZ; STEPINSKI, 2013).

No que se refere ao Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro (HEILBRON; EIRADO; ALMEIDA, 2016), o mesmo teve sua legenda simplificada, reduzindo o número de classes pelo agrupamento de litologias semelhantes. Por fim, para ser implementado como um dos PIs para a classificação geomorfológica, o Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro (HEILBRON; EIRADO; ALMEIDA, 2016) passou por um processo de conversão de dados vetoriais para o formato raster, sendo que para cada classe de litologia foi definido um número para a sua representação em formato matricial (Figura 3), resultando em um raster com resolução espacial de 30 metros, mesma resolução do MDE ASTER GDEM.

LITOLOGIA	VALOR DO PIXEL	LITOLOGIA	VALOR DO PIXEL
Depósitos Antropogênicos	32	Granitoides Pós-Colisionais	17
Depósitos Eólicos Litorâneos	31	Granitoides Sin-Colisionais	16
Depósitos Pântanos e Mangues	30	Granitoides Pré-Colisionais	15
Depósitos Aluviais	29	Grupo Búzios - Palmital	14
Depósitos Litorâneos	28	Grupo Italva	12
Depósitos Flúvio-Marinhas	27	Grupo São Fidélis	11
Depósitos Gravacionais	26	Grupo Andrelândia	10
Depósitos Praiais Antigos	25	Grupo Raposos	9
Depósitos Aluvionares Antigos	24	Grupo Bom Jesus de Itabapoana	8
Grupo Barreiras	23	Grupo Embu	7
Formação Floriano	22	Grupo Paraíba do Sul	6
Bacia Itaboraí	21	Complexo Região dos Lagos	5
Formação Macacu	20	Complexo Juiz de Fora	4
Formação Resende	19	Complexo Mantiqueira	3
Complexos Alcalinos	18	Complexo Quirino	1

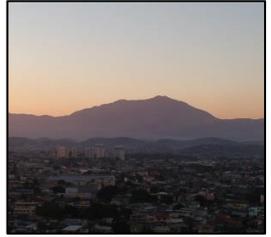
Figura 3. Valor de *pixel* definido para cada classe do Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro (HEILBRON; EIRADO; ALMEIDA, 2016).

3.3. Mapeamento geomorfológico

O mapeamento geomorfológico do presente estudo foi desenvolvido tendo como base metodológica os trabalhos de Ponçano et al. (1979) e de Ross (1992). O primeiro táxon consistiu nas unidades morfoestruturais, que se referem à influência da estrutura geológica na gênese do relevo (ROSS, 1992); o segundo táxon abrangeu as unidades morfoesculturais, vinculadas à ação do clima atual e pretérito no modelamento das formas do relevo (ROSS, 1992); e, por fim, no terceiro táxon seguiu-se a concepção de sistemas de relevo de Ponçano et al. (1979) na classificação das unidades de relevo, que se referem às formas simples, que ocorrem sobre um tipo de rocha ou depósito superficial. A tabela 1 apresenta as classes definidas para cada táxon, assim como a descrição de cada unidade de relevo.

**Tabela 1.** Classes geomorfológicas a serem mapeadas em cada um dos táxons.

Unidades Morfoestruturais	Unidades Morfoesculturais	Unidades de Relevo	Descrição	Fotografia
Cinturão Orogênico do Atlântico (1)	Escarpas Estruturo-Denudativas (1.1)	Escarpas Serranas (1.1.1)	Escarpas montanhosas festonadas com vertentes muito íngremes, côncavas a retilíneas e topos de cristas alinhadas e aguçadas. Alinhamento predominante de WSW-ENE e amplitudes altimétricas elevadas, superiores a 500 metros.	
		Escarpas de Degrau Estrutural (1.1.2)	Escarpas com vertentes mais suavizadas, topos arredondados e amplitudes topográficas predominantes entre 300 e 500 metros.	
	Planalto de Reverso Estruturo-Denudativo (1.2)	Domínio Montanhoso (1.2.1)	Relevo muito acidentado, com predominância de vertentes côncavas a retilíneas, topos de cristas alinhadas aguçadas a suavemente arredondadas e amplitudes altimétricas superiores a 400 metros. Há também a ocorrência pontual de morros ou colinas em planaltos elevados.	
		Cadeias Serranas Paralelas (1.2.2)	Feições paralelas na direção predominante WSW-ENE, caracterizadas por amplitudes altimétricas superiores a 400 metros, picos rochosos e cristas extensas.	
		Vales Intramontanos (1.2.3)	Vales que apresentam drenagem paralela e predominância de forma "V", encaixados nas feições das unidades de relevo Domínio Montanhoso e Cadeias Serranas Paralelas.	

Cinturão Orogênico do Atlântico (1)	Maciços Serranos Estruturo-Denudativos (1.3)	Maciços Costeiros (1.3.1)	Maciços alinhados sob a direção predominante de WSW-ENE, localizados por toda zona costeira. Vertentes íngremes, gradientes muito elevados, topos aguçados e/ou arredondados ou cristas alinhadas.	
		Maciços Pré-Montanhosos (1.3.2)	Pequenos maciços e morros com amplitudes altimétricas entre 100 e 300 metros, vertentes retilíneas e topos convexos. Adjacentes às escarpas serranas e aos maciços costeiros.	
	Maciços Intrusivos-Denudativos (1.4)	Pontões Graníticos (1.4.1)	Pontões de blocos graníticos (magmatismo pós-tectônico) que ocorrem, principalmente, em altas altitudes. Vertentes escarpadas, topos aguçados e ocorrência de diversos afloramentos rochosos.	
		Maciços Intrusivos Alcalinos (1.4.2)	Maciços sustentados por rochas alcalinas (magmatismo mesozoico-cenozoico). Forma dômica, drenagem radial e centrífuga, vertentes íngremes e topos aguçados em cristas.	
	Depressão Estruturo-Denudativa (1.5)	Serras Isoladas Residuais (1.5.1)	Serras isoladas, alinhadas, predominantemente, na direção WSW-ENE, com amplitude topográfica de 300 a 1.000 metros. Vertentes retilíneas a côncavas e topos em cristas alinhadas a levemente arredondadas.	
		Domínio de Morros e Colinas Dissecadas (1.5.2)	Conjunto de morros e colinas dissecadas, com vertentes convexo-côncavas a retilíneas, topos arredondados a aguçados e amplitude altimétrica entre 100 e 300 metros.	
	Superfícies Colinosas Residuais (1.6)	Domínio Colinoso (1.6.1)	Conjunto de colinas com topos arredondados, vertentes convexo-côncavas pouco inclinadas e amplitude altimétrica inferiores a 100 metros.	
		Domínio Suave Colinoso (1.6.2)	Conjunto de colinas suaves com topos arredondados a alongados, vertentes	

			convexas e amplitudes altimétricas inferiores a 50 metros.	
Planícies e Baixadas Sedimentares Cenozoicas (2)	Tabuleiros Sedimentares (2.1)	Tabuleiros Costeiros (2.1.1)	Tabuleiros e colinas suaves com topos tabulares e baixas amplitudes de relevo, formados por sedimentos neógenos da Formação Barreiras.	
		Tabuleiros Continentais (2.1.2)	Tabuleiros e colinas suaves e tabulares e com baixas amplitudes de relevo, presentes nas bacias sedimentares tafrogênicas. Formados por sedimentos neógenos e paleógenos.	
	Planícies Aluviais (2.2)	Planícies Aluviais (2.2.1)	Feições planas acumulativas continentais, caracterizada por sedimentação aluvial e declividades e amplitudes altimétricas muito baixas.	
	Planícies Costeiras (2.3)	Planícies Costeiras (2.3.1)	Superfícies subhorizontais com amplitudes altimétricas inferiores a 20 metros. É resultado de processos de sedimentação, predominantemente, marinha, mas também com ocorrências pontuais de processos de sedimentação eólica em áreas costeiras.	
Planícies e Baixadas Sedimentares Cenozoicas (2)	Planícies Fluviomarinhas e Fluviolagunares (2.4)	Planícies de Pântanos e Mangues (2.4.1)	Superfícies subhorizontais com amplitudes altimétricas inferiores a 20 metros, associados a lagunas e sistemas estuarinos.	
		Planícies Fluviomarinhas (2.4.2)	Superfícies subhorizontais com amplitudes altimétricas inferiores a 20 metros, associados aos baixos cursos de rios em planícies de maré. São ambientes de interdigitações de materiais fluviais e marinhos regressivos quaternários.	
	Planícies Antropogênicas (2.5)	Planícies Antropogênicas (2.5.1)	Superfícies subhorizontais com amplitudes altimétricas inferiores a 20 metros. Trata-se de depósitos sedimentares produzidos pela ação do homem (aterros urbanísticos).	

O mapeamento do relevo seguiu o fluxograma apresentado na figura 4.

3.3.1. Segmentação Multirresolução

A segmentação multirresolução foi aplicada a partir do nível mais geral de classificação (unidades morfoestruturais) até o nível mais detalhado de classificação (unidades de relevo), seguindo a hierarquia taxonômica proposta para as classes geomorfológicas a serem mapeadas. Portanto, uma vez segmentadas e classificadas no primeiro nível (unidades morfoestruturais), as classes mapeadas foram segmentadas separadamente para a classificação no segundo nível (unidades morfoesculturais), de forma, que o mesmo procedimento foi executado com as classes mapeadas no segundo nível para a classificação no terceiro e último nível (unidades de relevo).

Alguns parâmetros são necessários para a execução da segmentação multirresolução: (i) Escala, que é uma medida de heterogeneidade referente ao tamanho dos objetos, quanto maior seu valor, maior serão os objetos criados; (ii) Forma (*Shape*), que define o peso da forma na segmentação, assim, um valor baixo implica no maior peso no uso da cor, que é baseada nas características espectrais (ou valores de *pixels*) da imagem; e (iii) Compacidade (*Compactness*), que define o peso do critério de compacidade dos objetos, por exemplo, um valor baixo cria objetos mais alongados e com bordas suaves, enquanto um valor alto implica em objetos mais compactos e menores (BAATZ; SCHÄPE, 2000). Além disso, é necessário estabelecer pesos para cada PI utilizado, quanto maior for o peso atribuído, mais significativo será o PI para a segmentação.

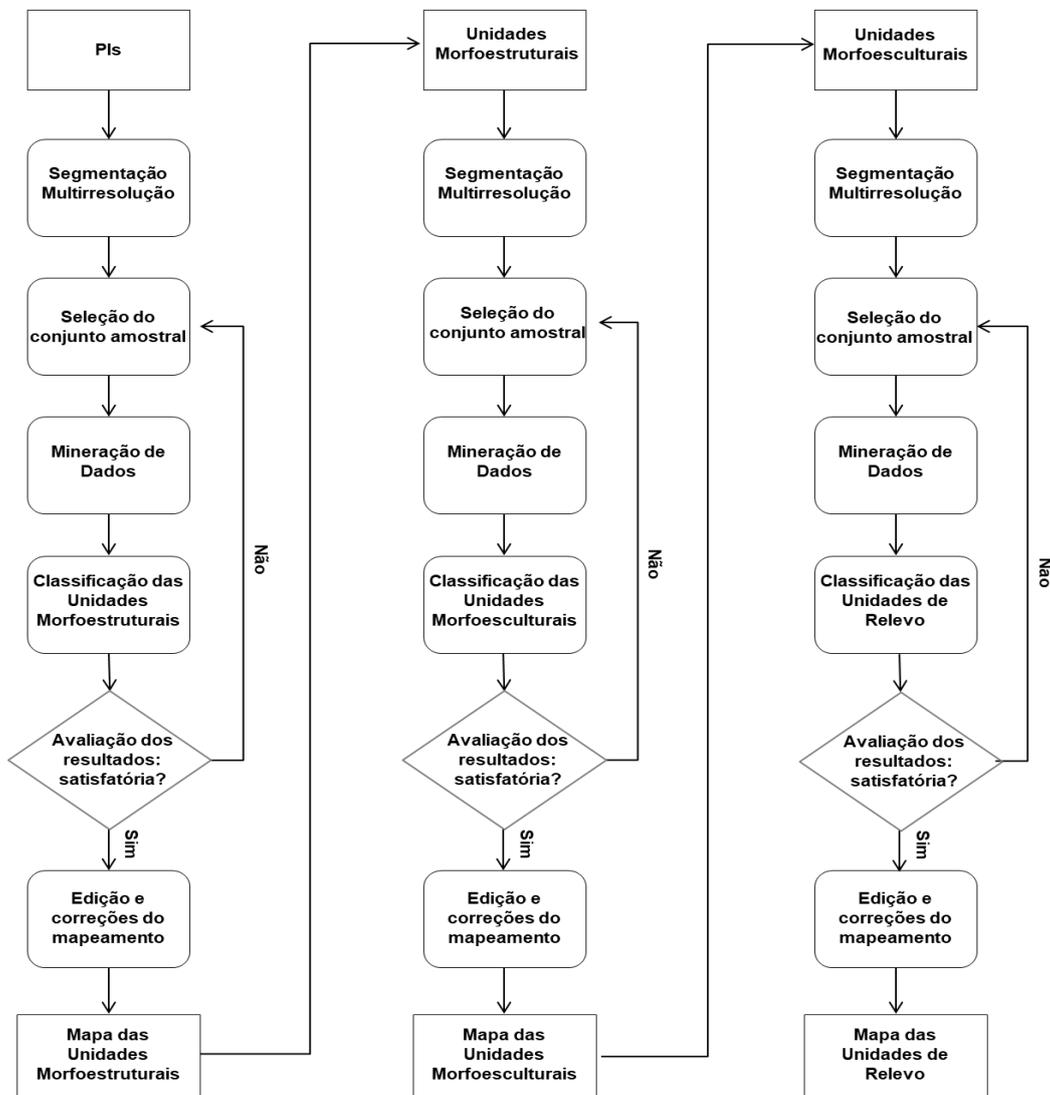


Figura 4. Fluxograma do mapeamento geomorfológico

Para a definição dos melhores valores para parametrização em cada um dos níveis de segmentação foi empregado diversos testes e escolhido os valores que obtiveram os melhores resultados fundamentados na análise visual. Nas Tabelas 2, 3 e 4 são apresentados os valores utilizados como parâmetros nos três níveis de segmentação. Vale destacar que, no terceiro nível de segmentação, algumas classes de unidades morfoesculturais, que originaram somente uma classe de unidade de relevo, não foram segmentadas.

**Tabela 2.** Parâmetros utilizados no primeiro nível de segmentação.

PI	Peso	Escala	Forma	Compacidade
Declividade	4	50	0,1	0,1
Altimetria (MDE)	1			

**Tabela 3.** Parâmetros utilizados no segundo nível de segmentação.

Classe Segmentada: Cinturão Orogênico do Atlântico				
PI	Peso	Escala	Forma	Compacidade
Declividade	4			
ICR	1	50	0,6	0,3
Altimetria (MDE)	2			
Classe Segmentada: Planícies e Baixadas Sedimentares Cenozoicas				
PI	Peso	Escala	Forma	Compacidade
Declividade	1	15	0,3	0,3
Litologia	4			

**Tabela 4.** Parâmetros utilizados no terceiro nível de segmentação.

Classe Segmentada: Escarpas Estruturo-Denudativas				
PI	Peso	Escala	Forma	Compacidade
Declividade	4	400	0,3	0,4
Altimetria (MDE)	2			
Classe Segmentada: Planalto de Reverso Estruturo-Denudativo				
PI	Peso	Escala	Forma	Compacidade
Declividade	2	90	0,4	0,4
Geomorphons	1			
Classe Segmentada: Maciços Serranos Estruturo-Denudativos				
PI	Peso	Escala	Forma	Compacidade
Declividade	2	300	0,4	0,3
Altimetria (MDE)	1			
Classe Segmentada: Maciços Intrusivos-Denudativos				
PI	Peso	Escala	Forma	Compacidade
Declividade	2	600	0,3	0,3
Altimetria (MDE)	1			
Classe Segmentada: Depressão Estruturo-Denudativa				
PI	Peso	Escala	Forma	Compacidade
Declividade	4	100	0,3	0,4
Altimetria (MDE)	3			
Classe Segmentada: Superfícies Colinosas Residuais				
PI	Peso	Escala	Forma	Compacidade
Declividade	4	150	0,3	0,3

Altimetria (MDE)	2			
IPT Local	1			
IPT Regional	1			
<b>Classe Segmentada: Tabuleiros Sedimentares</b>				
<b>PI</b>	<b>Peso</b>	<b>Escala</b>	<b>Forma</b>	<b>Compacidade</b>
Litologia	1	300	0,2	0,3
<b>Classe Segmentada: Planícies Fluvio-marinhas e Fluvio-lagunares</b>				
<b>PI</b>	<b>Peso</b>	<b>Escala</b>	<b>Forma</b>	<b>Compacidade</b>
Litologia	1	10	0,2	0,3

### 3.3.2. Seleção do conjunto amostral

A seleção de amostras foi feita com base na descrição das classes (Tabela 1), levando em consideração a interpretação visual dos PIs e levantamentos de campo. Foram selecionados os objetos de que não se tinha dúvidas quanto a sua classificação e, portanto, objetos duvidosos e de transição não foram selecionados para compor o conjunto amostral. É importante destacar que as amostras foram selecionadas por toda a área de estudo, no intuito de tornar o conjunto amostral o mais possivelmente representativo de cada classe.

Uma vez selecionado os objetos para cada classe, os mesmos foram exportados em formato de tabelas contendo os valores de média e de desvio padrão para cada PI.

### 3.3.3. Mineração de dados

Os conjuntos amostrais exportados no formato de tabela foram inseridos no software WEKA para a execução da mineração de dados, obtendo assim os modelos de conhecimento para serem usados na classificação geomorfológica.

Para a mineração de dados, utilizou-se o algoritmo C4.5, desenvolvido por Quinlan (1993). O algoritmo C4.5 é amplamente testado e validado e o mesmo já comprovou a sua capacidade de obter bons resultados em trabalhos de sensoriamento remoto aplicados a classificação geomorfológica (GIRÃO; MELLO; FERNANDES, 2016; FERNANDES; GIRÃO, 2018). O algoritmo C4.5 entrega como resultado uma árvore de decisão, o mesmo examina todos os atributos precursores candidatos, seleciona aquele que maximiza a taxa de ganho para rotular o nó atual da árvore e repete o processo sucessivamente para dar continuidade à construção da árvore de decisão até que todas as instâncias do conjunto de treinamento sejam classificadas (VIEIRA, 2010).

### 3.3.4. Classificação

A última etapa consistiu na classificação geomorfológica. Nessa etapa, as árvores de decisão resultantes da mineração de dados foram implementadas no *software* eCognition 8.9 com base em modelos booleanos e utilizadas nas classificações das feições geomorfológicas mapeadas. Por fim, os erros de classificação, verificados por interpretação visual dos PIs e levantamentos de campo, foram corrigidos com a utilização das ferramentas de correção e edição manual.

A classificação não editada e a classificação editada foram comparadas para validar os resultados obtidos com a metodologia proposta no presente trabalho. Tal comparação foi realizada com base em três indicadores quantitativos: matriz de confusão, índices de exatidão global e índice Kappa (COHEN, 1960; CONGALTON; GREEN, 1999).

As cartas, nas escalas 1:250.000 e 1:400.000, e os dados vetoriais (1:250.000) resultantes do mapeamento desenvolvido no presente estudo podem ser adquiridos por meio de download no seguinte endereço eletrônico:

<https://drive.google.com/drive/folders/1KmyyyRMoELIbCOOjwfcJHsQL3Kfw8gs-?usp=sharing>

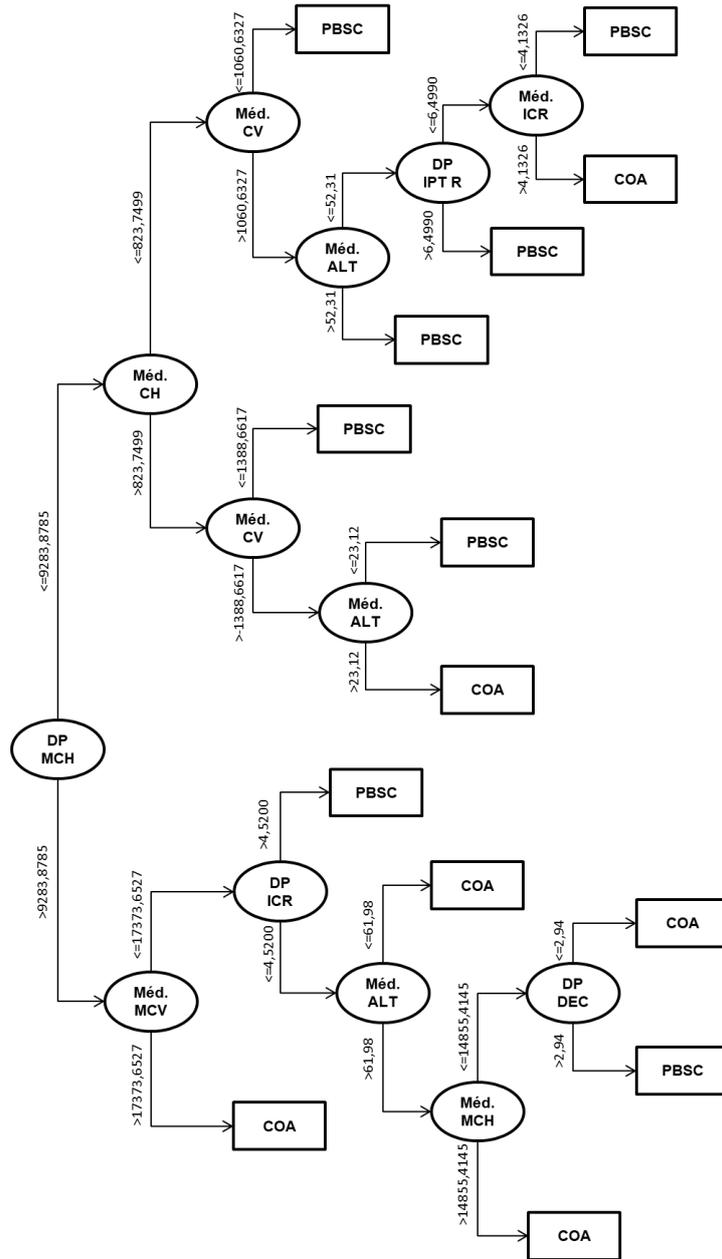
## 4. Resultados

### 4.1. Mapeamento das unidades morfoestruturais

No primeiro táxon, foram mapeadas as seguintes unidades morfoestruturais: Cinturão Orogênico do Atlântico, que compreende um conjunto de relevos sustentados por rochas metamórficas e ígneas com idades desde o Pré-Cambriano até o Eoceno, frutos de metamorfismo e intrusões magmáticas características da Faixa Ribeira (HEILBRON; EIRADO; ALMEIDA, 2016); e Planícies e Baixadas Sedimentares Cenozoicas, que consistem em feições sustentadas por rochas e depósitos sedimentares do Paleógeno, do Neógeno e do Quaternário.

Apesar de diferenciar somente duas classes nesse primeiro táxon, a mineração de dados gerou uma árvore de decisão significativamente complexa (Figura 5), de forma que quase todos os PIs foram utilizados na diferenciação das unidades morfoestruturais, com destaque para a altimetria, que foi o PI mais utilizado.

O comparativo entre a classificação não editada e a classificação editada (Tabela 5) (Figura 6) constatou que a classificação automática incidiu em poucos erros, alcançando um índice Kappa alto (0,8414) e demandando poucas edições manuais. A maior parte dos erros se concentrou na diferenciação entre as colinas mais suaves de embasamento cristalino e as colinas e tabuleiros de substrato sedimentar no Norte Fluminense e nas bacias sedimentares de Volta Redonda, Resende e Macacu. Essas feições possuem características morfométricas e morfológicas bem semelhantes, apesar do substrato geológico distinto, o que torna difícil sua diferenciação até mesmo por interpretação visual.



**Figura 5.** Árvore de decisão obtida para o primeiro nível taxonômico. Desvio Padrão (DP), Média (Méd.), Altimetria (ALT), Declividade (DEC), Curvatura Horizontal (CH), Curvatura Vertical (CV), Mód. da Curvatura Horizontal (MCH), Mód. da Curvatura Vertical (MCV), IPT Regional (IPT R), Cinturão Orogênico do Atlântico (COA) e Planícies e Baixadas Sedimentares Cenozoicas (PBSC).

**Tabela 5.** Matriz de confusão, exatidão global e índice Kappa da comparação entre a classificação não editada e a classificação editada.

CLASSES	REFERÊNCIA (Porcentagem)	
	COA	PBSC
Cinturão Orogênico do Atlântico (COA)	95,51	4,49
Planícies e Baixadas Sedimentares Cenozoicas (PBSC)	9,22	90,78
Exatidão Global (%)	94,49	
Índice Kappa	0,8414	

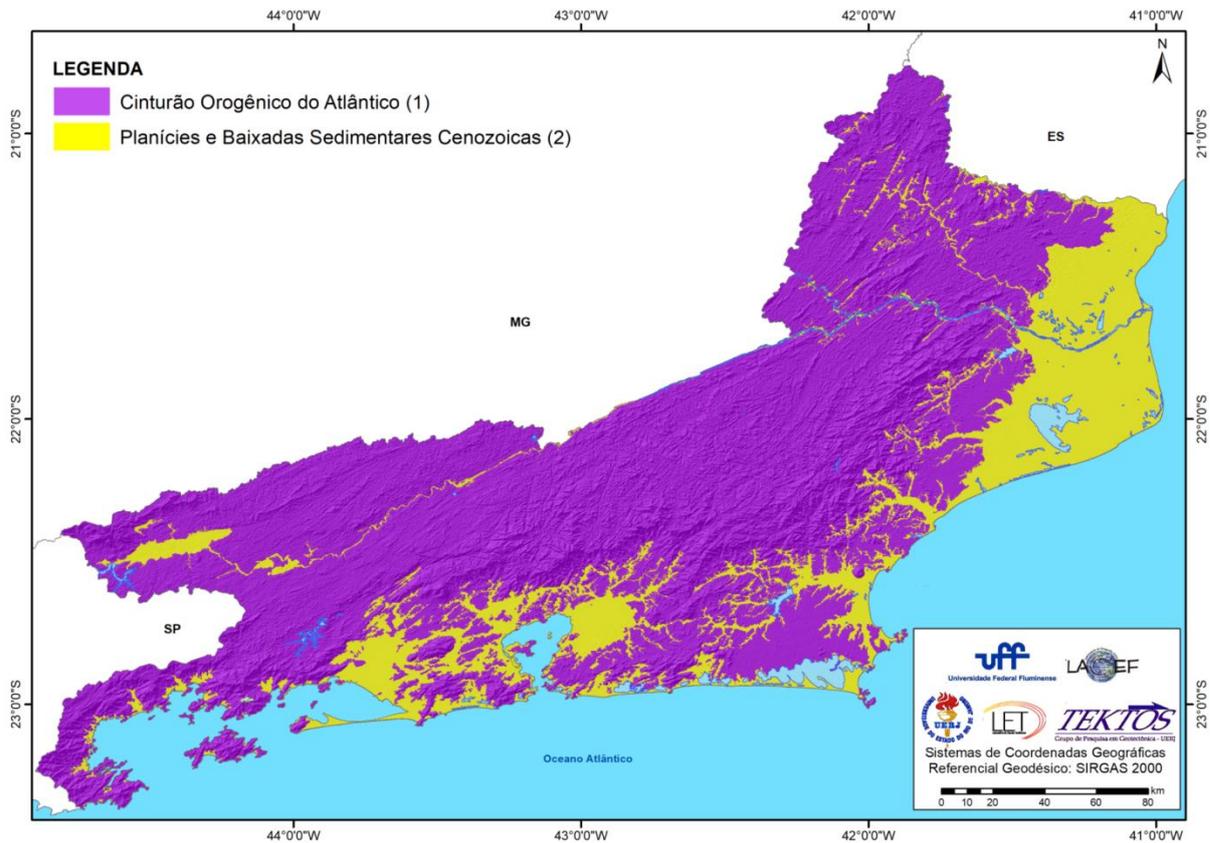


Figura 6. Mapa de unidades morfoestruturais do estado do Rio de Janeiro.

#### 4.2. Mapeamento das unidades morfoestruturais

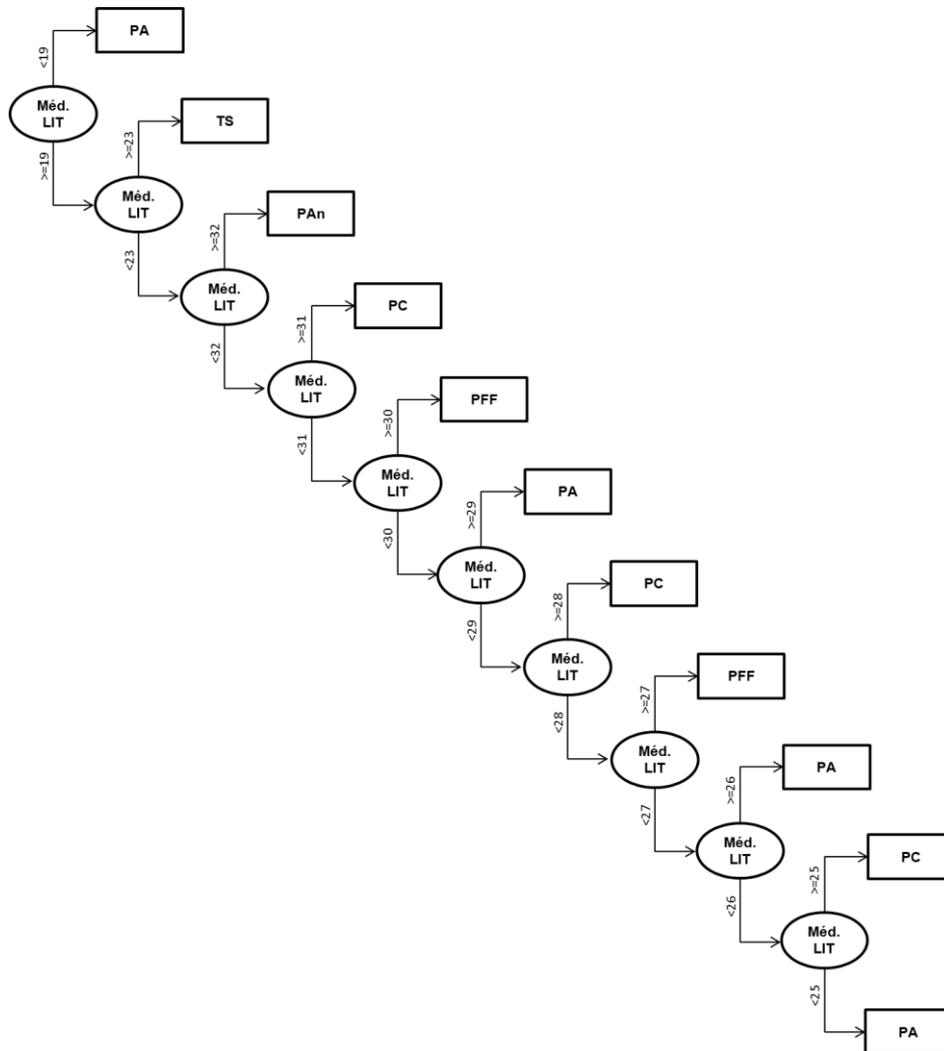
No segundo táxon, a partir da unidade morfoestrutural Cinturão Orogênico do Atlântico, foram mapeadas as seguintes unidades morfoestruturais: Escarpas Estruturo-Denudativas, que compreende um conjunto de escarpas associadas à transição entre áreas mais rebaixadas e relevos mais elevados; Planalto de Reverso Estruturo-Denudativo, que compreende áreas montanhosas e amorreadas em altitudes elevadas, resultantes da tectônica cenozoica responsável pelo soerguimento e basculamento de blocos escalonados na direção WSW-ENE no território fluminense (ASMUS; FERRARI, 1978); Maciços Serranos Estruturo-Denudativos, conjunto de maciços e morros soerguidos pela mesma tectônica cenozoica; Maciços Intrusivos-Denudativos, que abrange uma série de maciços sustentados por rochas intrusivas; Depressão Estruturo-Denudativa, que consistem em depressões interplanálticas resultantes de rebaixamentos tectônicos de blocos no Cenozoico (ASMUS; FERRARI, 1978); e Superfícies Colinosas Residuais, formado por um conjunto de terrenos colinosos de baixa amplitude, consistindo em feições residuais associadas a processos de aplainamento.

A árvore de decisão obtida para a classificação das unidades morfoestruturais derivadas da unidade morfoestrutural Cinturão Orogênico do Atlântico (Figura 7) caracteriza-se por uma alta complexidade, utilizando principalmente os PIs altimetria, ICR e litologia. Essa complexidade era esperada, uma vez que tal árvore de decisão foi a que diferenciou o maior número classes no presente estudo.

Também no segundo táxon, a partir da unidade morfoestrutural Planícies e Baixadas Sedimentares Cenozoicas, foram mapeadas as seguintes unidades morfoestruturais: Tabuleiros Sedimentares, que compreende um conjunto de tabuleiros e colinas tabulares de substrato sedimentar do Paleógeno e do Neógeno; Planícies Aluviais, que compreende feições planas acumulativas aluviais; Planícies Costeiras, que são feições planas acumulativas marinhas e eólicas; Planícies Fluviomarinhas e Fluviolagunares, que consiste em superfícies acumulativas subhorizontais presentes nos fundos de baía, no entorno das lagunas costeiras e nos baixos cursos de rios em planícies de maré; e Planícies Antropogênicas, que compreende superfícies subhorizontais formados por depósitos sedimentares produzidos pela ação do homem (aterros).



resultados, a classificação foi considerada satisfatória, em vista do número de classes mapeadas, assim como a complexidade da diferenciação de tais classes.



**Figura 8.** Árvore de decisão obtida para a classificação das unidades morfoestruturais derivadas da unidade morfoestrutural Planícies e Baixadas Sedimentares Cenozoicas. Média (MÉD), Litologia (LIT), Tabuleiros Sedimentares (TS), Planícies Aluviais (PA), Planícies Costeiras (PC), Planícies Fluviomarinhas e Fluviolagunares (PFF) e Planícies Antropogênicas (PAn).

**Tabela 6.** Matriz de confusão, exatidão global e índice Kappa da comparação entre a classificação não editada e a classificação editada do mapeamento das unidades morfoestruturais derivadas da unidade morfoestrutural Cinturão Orogênico do Atlântico.

CLASSES	REFERÊNCIA (Porcentagem)					
	EED	PRED	MSED	MID	DED	SCR
<b>Escarpas Estruturo-Denudativas (EED)</b>	64,12	11,43	8,83	1,11	14,44	0,06
<b>Planalto de Reverso Estruturo-Denudativo (PRED)</b>	14,99	75,08	0,93	3,3	5,7	0
<b>Maçiços Serranos Estruturo-Denudativos (MSED)</b>	12,41	3,75	63,92	3,39	12,41	4,13
<b>Maçiços Intrusivos-Denudativos (MID)</b>	9,69	6,86	2,63	74,49	6,16	0,18
<b>Depressão Estruturo-Denudativa (DED)</b>	12,39	5,87	2,13	0,21	79,26	0,13

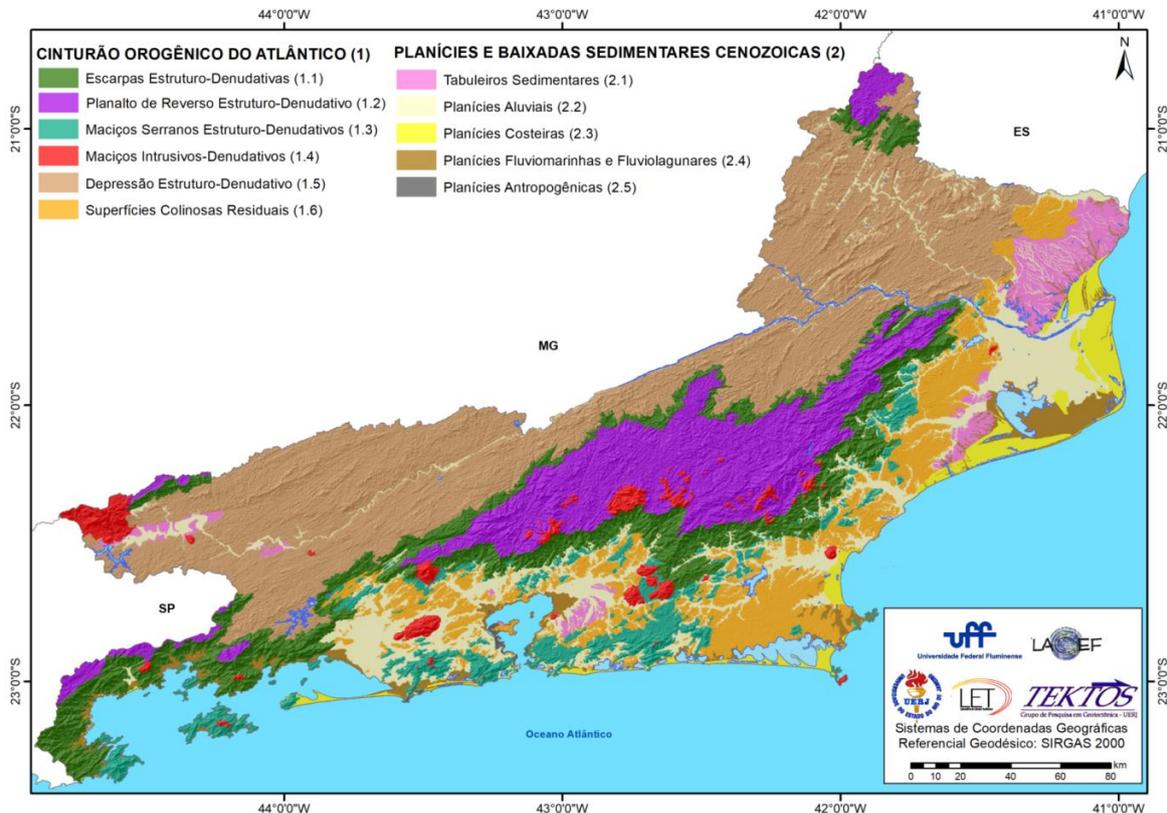
<b>Superfícies Colinosas Residuais (SCR)</b>	2,06	0	9,67	0,16	7,55	80,56
<b>Exatidão Global (%)</b>	75,75					
<b>Índice Kappa</b>	0,6745					

O comparativo entre a classificação não editada e a classificação editada das unidades morfoestruturais derivadas da unidade morfoestrutural Planícies e Baixadas Sedimentares Cenozoicas (Tabela 7) demonstrou uma alta assertividade. As diferenças de substrato sedimentar (PI litologia) foi o principal fator de diferenciação entre essas unidades morfoestruturais, destacando a relevância da utilização de variáveis qualitativas nos mapeamentos geomorfológicos automatizados e semiautomatizados.

**Tabela 7.** Matriz de confusão, exatidão global e índice Kappa da comparação entre a classificação não editada e a classificação editada do mapeamento das unidades morfoestruturais derivadas da unidade morfoestrutural Planícies e Baixadas Sedimentares Cenozoicas.

CLASSES	REFERÊNCIA (Porcentagem)				
	TS	PA	PC	PFF	PAn
<b>Tabuleiros Sedimentares (TS)</b>	92,49	7,14	0,28	0,08	0,01
<b>Planícies Aluviais (PA)</b>	0,16	93,22	5,93	0,33	0,37
<b>Planícies Costeiras (PC)</b>	0,00	0,83	96,53	2,44	0,20
<b>Planícies Fluviomarinhas e Fluviolagunares (PFF)</b>	0,06	9,09	0,50	90,23	0,12
<b>Planícies Antropogênicas (PAn)</b>	0,70	1,15	4,40	5,12	88,63
<b>Exatidão Global (%)</b>	93,18				
<b>Índice Kappa</b>	0,8899				

A classificação editada das unidades morfoestruturais é apresentada na figura 9.



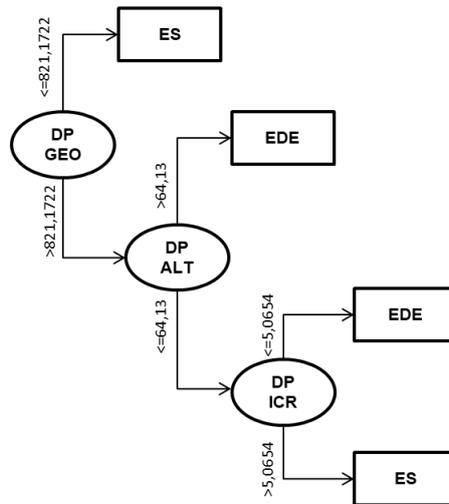
**Figura 9.** Mapa de unidades morfoestruturais do estado do Rio de Janeiro.

### 4.3. Mapeamento das unidades de relevo

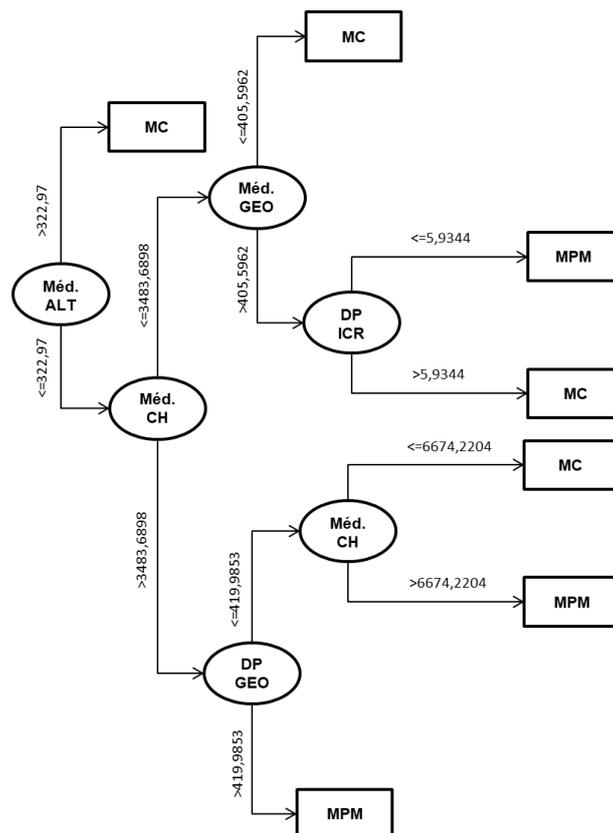
No terceiro táxon, foram mapeadas vinte unidades de relevo. Destaca-se que, as unidades morfoesculturais Planícies Aluviais, Planícies Costeiras e Planícies Antropogênicas derivaram uma só unidade de relevo cada uma, de forma, que tais unidades de relevo receberam os mesmos nomes das unidades morfoesculturais das quais se originaram.

A árvore de decisão mais complexa nesse táxon foi obtida para a classificação das unidades de relevo Cadeias Serranas Paralelas, Domínio Montanhoso e Vales Intramontanos (Figura 10). As árvores de decisão obtidas para a classificação das unidades de relevo derivadas das unidades morfoesculturais Escarpas Estruturo-Denudativas (Figura 11), Maciços Serranos Estruturo-Denudativos (Figura 12), Maciços Intrusivos-Denudativos (Figura 13) e Depressão Estruturo-Denudativa (Figura 14) se caracterizaram por uma média complexidade. Por fim, as demais árvores de decisão obtidas (Figuras 15, 16 e 17) foram as com menor nível de complexidade.

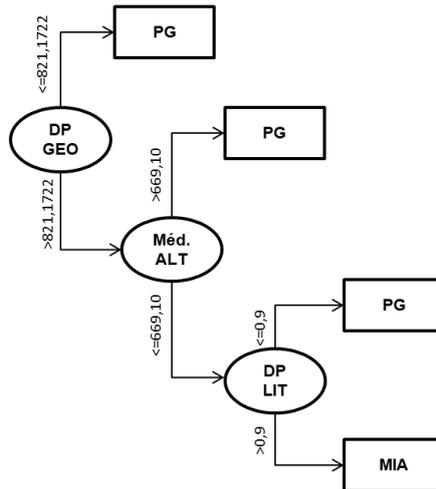




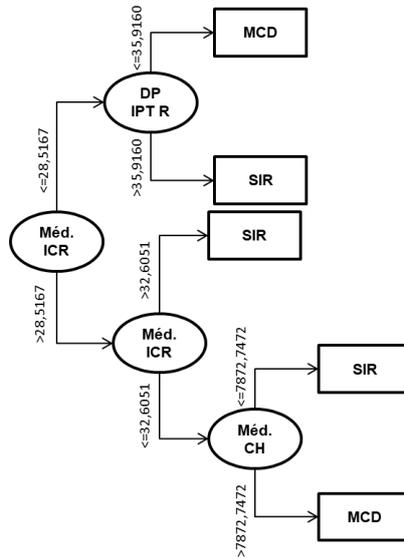
**Figura 11.** Árvore de decisão obtida para a classificação das unidades de relevo derivadas da unidade morfoescultural Escarpas Estruturo-Denudativas. Desvio Padrão (DP), Média (MÉD), Altimetria (ALT), Geomorphons (GEO), Litologia (LIT), Escarpas em Degrau Estrutural (EDE) e Escarpas Serranas (ES).



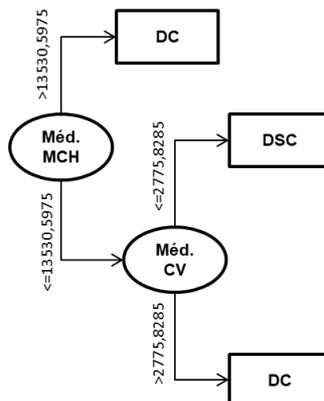
**Figura 12.** Árvore de decisão obtida para a classificação das unidades de relevo derivadas da unidade morfoescultural Maciços Serranos Estruturo-Denudativos. Desvio Padrão (DP), Média (MÉD), Altimetria (ALT), Curvatura Horizontal (CH), Geomorphons (GEO), Litologia (LIT), Maciços Costeiros (MC) e Maciços Pré-Montanhosos (MPM).



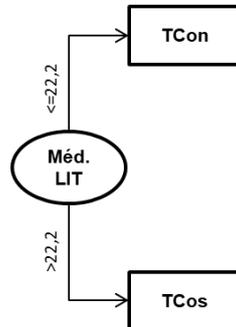
**Figura 13.** Árvore de decisão obtida para a classificação das unidades de relevo derivadas da unidade morfoescultural Maciços Intrusivos-Denudativos. Desvio Padrão (DP), Média (MÉD), Altimetria (ALT), Geomorphons (GEO), Litologia (LIT), Maciços Intrusivos Alcalinos (MIA) e Pontões Graníticos (PG).



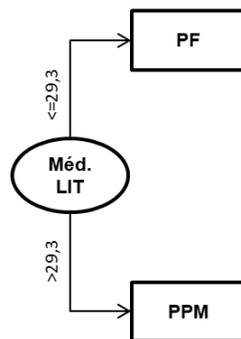
**Figura 14.** Árvore de decisão obtida para a classificação das unidades de relevo derivadas da unidade morfoescultural Depressão Estruturo-Denudativa. Desvio Padrão (DP), Média (MÉD), Curvatura Horizontal (CH), IPT Regional (IPT R), Serras Isoladas Residuais (SIR) e Morros e Colinas Dissecadas (MCD).



**Figura 15.** Árvore de decisão obtida para a classificação das unidades de relevo derivadas da unidade morfoescultural Superfícies Colinosas Residuais. Média (MÉD), Curvatura Vertical (CV), Mód. da Curvatura Horizontal (MCH), Domínio Colinoso (DC) e Domínio Suave Colinoso (DSC).



**Figura 16.** Árvore de decisão obtida para a classificação das unidades de relevo derivadas da unidade morfoescultural Tabuleiros Sedimentares. Média (MÉD), Litologia (LIT), Tabuleiros Continentais (TCon) e Tabuleiros Costeiros (TCos).



**Figura 17.** Árvore de decisão obtida para a classificação das unidades de relevo derivadas da unidade morfoescultural Planícies Fluvioamarinhas e Fluvioamarinhas. Média (MÉD), Litologia (LIT), Planícies de Pântanos e Mangues (PPM) e Planícies Fluvioamarinhas (PF).

No comparativo entre as classificações não editadas e as classificações editadas do terceiro táxon (Tabelas 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15) constatou-se um maior número de erros na classificação das unidades de relevo derivadas das unidades morfoesculturais Planalto de Reverso Estruturo-Denudativo, Maciços Serranos Estruturo-Denudativos e Depressão Estruturo-Denudativa. Em todos esses casos há uma forte semelhança morfométrica entre as classes mapeadas, o que explica tal resultado. Contudo, apesar de tais classificações demandarem um maior número de edições e correções, as mesmas classificaram mais de 85% da área total corretamente.

As classificações das unidades de relevo derivadas das unidades morfoesculturais Escarpas Estruturo-Denudativas, Superfícies Colinosas Residuais, Maciços Intrusivos-Denudativos, Tabuleiros Sedimentares e Planícies Fluvioamarinhas e Fluvioamarinhas obtiveram uma alta assertividade. O sucesso obtido nas duas primeiras é explicado pela grande diferença morfométricas e morfológica entre as classes mapeadas. Nos demais casos, mais uma vez a PI litologia foi o principal diferenciador, uma vez que são unidades de relevo com substratos geológicos distintos, o que reforça a relevância da utilização de variáveis qualitativas nos mapeamentos geomorfológicos automatizados e semiautomatizados.

**Tabela 8.** Matriz de confusão, exatidão global e índice Kappa da comparação entre a classificação não editada e a classificação editada do mapeamento das unidades de relevo derivadas da unidade morfoescultural Planalto de Reverso Estruturo-Denudativo.

CLASSES	REFERÊNCIA (Porcentagem)		
	CSP	DM	VI
Cadeias Serranas Paralelas (CSP)	71,37	27,39	1,24
Domínio Montanhoso (DM)	4,58	89,16	6,26
Vales Intramontanos (VI)	1,90	26,40	71,70
Exatidão Global (%)	85,58		
Índice Kappa	0,6018		

**Tabela 9.** Matriz de confusão, exatidão global e índice Kappa da comparação entre a classificação não editada e a classificação editada do mapeamento das unidades de relevo derivadas da unidade morfoescultural Maciços Serranos Estruturo-Denudativos.

CLASSES	REFERÊNCIA (Porcentagem)	
	MC	MPM
Maciços Costeiros (MC)	88,87	11,13
Maciços Pré-Montanhosos (MPM)	17,05	82,95
Exatidão Global (%)	85,65	
Índice Kappa	0,7128	

**Tabela 10.** Matriz de confusão, exatidão global e índice Kappa da comparação entre a classificação não editada e a classificação editada do mapeamento das unidades de relevo derivadas da unidade morfoescultural Depressão Estruturo-Denudativa.

CLASSES	REFERÊNCIA (Porcentagem)	
	SIR	MCD
Serras Isoladas Residuais (SIR)	75,05	24,95
Morros e Colinas Dissecadas (MCD)	7,60	92,40
Exatidão Global (%)	86,38	
Índice Kappa	0,6918	

**Tabela 11.** Matriz de confusão, exatidão global e índice Kappa da comparação entre a classificação não editada e a classificação editada do mapeamento das unidades de relevo derivadas da unidade morfoescultural Escarpas Estruturo-Denudativas.

CLASSES	REFERÊNCIA (Porcentagem)	
	EDE	ES
Escarpas em Degrau Estrutural (EDE)	72,23	27,77
Escarpas Serranas (ES)	3,38	96,62
Exatidão Global (%)	92,59	
Índice Kappa	0,7194	

**Tabela 12.** Matriz de confusão, exatidão global e índice Kappa da comparação entre a classificação não editada e a classificação editada do mapeamento das unidades de relevo derivadas da unidade morfoescultural Maciços Intrusivos-Denudativos.

CLASSES	REFERÊNCIA (Porcentagem)	
	MIA	PG
Maciços Intrusivos Alcalinos (MIA)	99,82	0,18
Pontões Graníticos (PG)	12,97	87,03
Exatidão Global (%)	94,23	
Índice Kappa	0,8811	

**Tabela 13.** Matriz de confusão, exatidão global e índice Kappa da comparação entre a classificação não editada e a classificação editada do mapeamento das unidades de relevo derivadas da unidade morfoescultural Superfícies Colinosas Residuais.

CLASSES	REFERÊNCIA (Porcentagem)	
	DC	DSC
Domínio Colinoso (DC)	96,05	3,95
Domínio Suave Colinoso (DSC)	13,69	86,31
Exatidão Global (%)	91,61	
Índice Kappa	0,8297	

**Tabela 14.** Matriz de confusão, exatidão global e índice Kappa da comparação entre a classificação não editada e a classificação editada do mapeamento das unidades de relevo derivadas da unidade morfoescultural Tabuleiros Sedimentares.

CLASSES	REFERÊNCIA (Porcentagem)	
	TCon	Tcos
Tabuleiros Continentais (TCon)	98,21	1,79
Tabuleiros Costeiros (TCos)	0,28	99,72
Exatidão Global (%)	99,45	
Índice Kappa	0,9810	

**Tabela 15.** Matriz de confusão, exatidão global e índice Kappa da comparação entre a classificação não editada e a classificação editada do mapeamento das unidades de relevo derivadas da unidade morfoescultural Planícies Fluvioamarinhas e Fluvioagulares.

CLASSES	REFERÊNCIA (Porcentagem)	
	PPM	PF
Planícies de Pântanos e Mangues (PPM)	99,94	0,06
Planícies Fluvioamarinhas (PF)	5,31	94,69
Exatidão Global (%)	97,71	
Índice Kappa	0,9527	

A classificação editada das unidades de relevo é apresentada na figura 18.

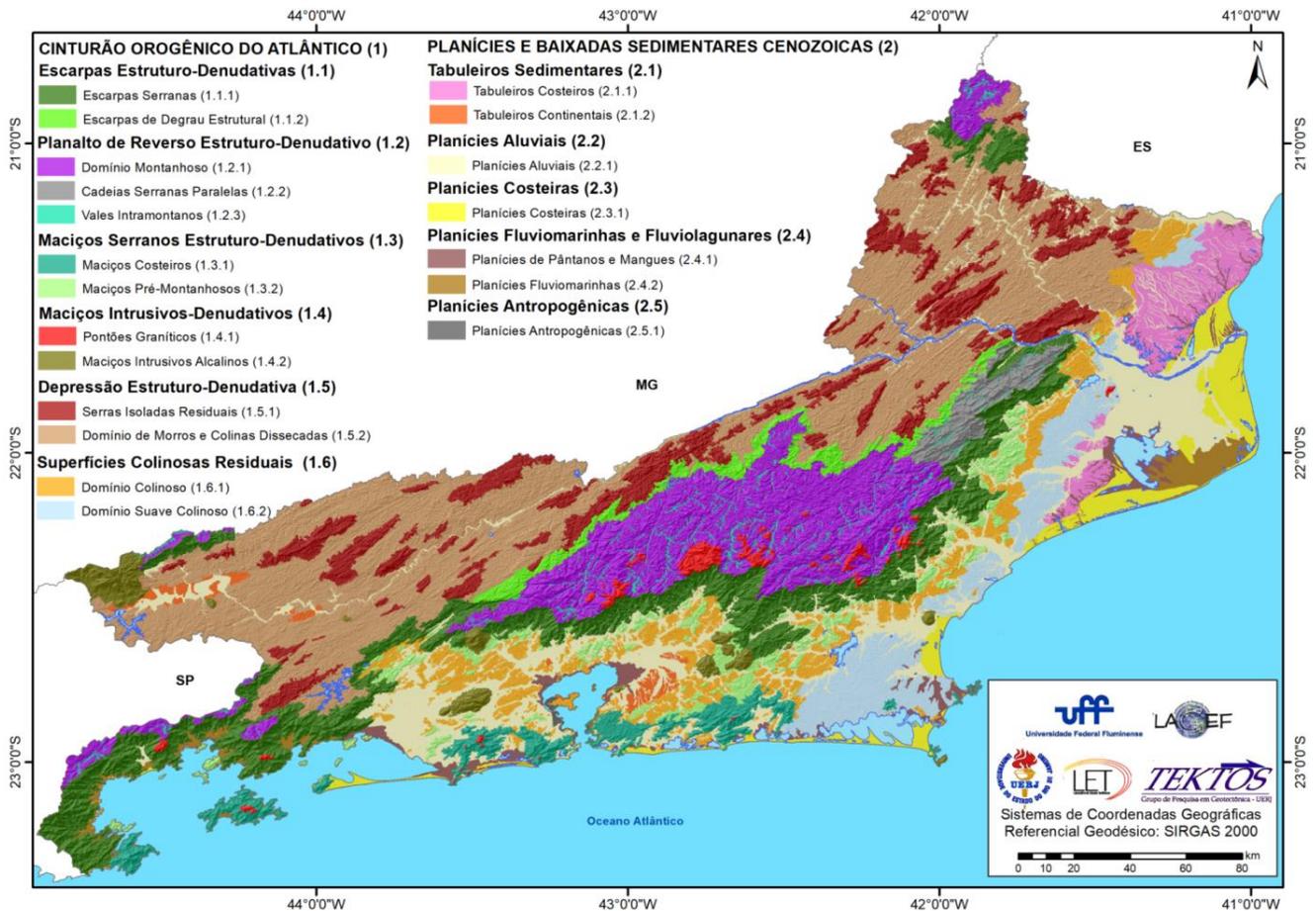


Figura 18. Mapa de unidades de relevo do estado do Rio de Janeiro

## 5. Conclusões

A combinação da GEOBIA com a KDD obteve bons resultados na classificação geomorfológica semiautomatizada do estado do Rio de Janeiro. Tal abordagem metodológica permitiu a utilização de uma grande diversidade de dados quantitativos e qualitativos, e, ainda assim, minimizou as subjetividades envolvidas no mapeamento, ao demonstrar de forma clara os limites de diferenciação utilizados para cada classe de relevo.

Dois fatores influenciaram fortemente os resultados: a segmentação e a seleção do conjunto amostral. A segmentação multiresolução possui uma diversidade de parâmetros que permite a elaboração de estratégias de segmentação mais adequadas aos PIs utilizados e às classes geomorfológicas mapeadas. É relevante destacar que cada classe possui parâmetros de configurações ideais para o delineamento das suas subclasses e o resultado da segmentação influencia diretamente em todas as etapas posteriores, desde a seleção do conjunto amostral até a classificação.

A seleção do conjunto amostral possui uma relação direta com a obtenção de árvores de decisão que resultem em classificações com altas taxas de assertividade, pois são as amostras que determinam os limites de diferenciação definidos pela mineração de dados. Dessa forma, essa etapa exige a interferência direta do conhecimento do especialista sobre o que está sendo mapeado, demonstrando que tal conhecimento ainda continua sendo imprescindível, apesar dos avanços tecnológicos e metodológicos.

A KDD permitiu a conversão do conhecimento da interpretação visual do relevo para limites bem definidos, reduzindo o nível de subjetividade na diferenciação das diversas formas de relevo mapeadas na área de estudo.

O mapa geomorfológico resultante no presente estudo possui uma forte abordagem morfogenética e morfotológica, de forma, que fica evidente que a legenda aplicada foi a principal responsável por tal característica. Na cartografia geomorfológica, as legendas utilizadas estão diretamente associadas às escolhas do agente

mapeador sobre o que o mesmo julga ser mais relevante para a representação do relevo em cada área de estudo. Portanto, no presente estudo, a morfogenética e a morfolitologia foram elencadas como fundamentais para a compreensão do relevo do estado do Rio de Janeiro, que é fortemente influenciado por uma complexa evolução geológica e geotectônica. Como sequência do presente estudo, pretende-se a publicação de um artigo voltado para a análise do mapa geomorfológico obtido para o estado do Rio de Janeiro, resultado da abordagem metodológica aqui apresentada.

Em estudos futuros, recomenda-se a avaliação da utilização de imagens espectrais combinados com as variáveis geomorfométricas para a classificação do relevo, uma vez que ficou evidente que tais variáveis, sozinhas, possuem grande dificuldade na diferenciação de relevos com características morfométricas semelhantes. Outro aspecto a ser melhor investigado consiste na avaliação de outros algoritmos de mineração de dados para a classificação supervisionada do relevo, como o random forest e redes neurais.

**Contribuições dos Autores:** Raphael e Silva Girão, como autor principal, foi o idealizador do tema do artigo, sendo responsável por sua escrita, pela pesquisa bibliográfica, pelos processamentos dos dados e análise dos resultados. Raúl Sánchez Vicens orientou e contribuiu no processamento de dados e revisou os resultados. Julio Cesar Horta de Almeida contribuiu na revisão dos resultados e na verificação do mapa final. Pedro José Farias Fernandes contribuiu no desenvolvimento dos algoritmos utilizados e nas validações estatísticas. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito".

**Financiamento:** Esta pesquisa não recebeu nenhum financiamento externo.

**Agradecimentos:** Agradecemos ao Laboratório de Estudos Tectônicos da Universidade do Estado do Rio de Janeiro e ao Laboratório de Geografia Física da Universidade Federal Fluminense.

**Conflito de Interesse:** Os autores declaram não haver conflito de interesse

## Referências

1. ALMEIDA, F. F. M. Origem e evolução da plataforma continental brasileira. **Boletim [da] Div. de Geologia e Mineralogia**, v. 241. p. 1-36. 1967.
2. ALMEIDA F. F. M. de; HASUI Y.; BRITO NEVES, B. B de; FUCK, R. A. As províncias estruturais do Brasil. In: SBG, Simp. Geol. Nordeste, 8, **Bol. Esp.**, 12 p. 1977.
3. ALMEIDA F. F. M. de; HASUI Y.; BRITO NEVES, B. B de; FUCK, R. A. Brazilian Structural Provinces: an introduction. **Earth Sciences Rev.**, v. 7817. p. 1-29. 1981.
4. ANDERS, N. S.; SEIJMONSBERGEN, A. C.; BOUTTEN, W. Segmentation optimization and stratified object-based analysis for semi-automated geomorphological mapping. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 12, p. 2976-2985, 2011. (<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.007>)
5. ASMUS, H. E.; FERRARI, A. L. Hipótese sobre a causa do tectonismo cenozóico na região Sudeste do Brasil. In: **PETROBRAS. Aspectos Estruturais da Margem Continental Leste e Sudeste do Brasil (Série Projeto REMAC, 4)**, Rio de Janeiro, p. 75-88. 1978.
6. ASSELEN, S.; SEIJMONSBERGEN, A. C. Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using a laser DTM. **Geomorphology**, v. 78, n. 3.4, p. 309-320, 2006. (<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.037>)
7. BAATZ, M.; SCHÄPE, A. **Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation**. 2000.
8. BENZ, U. C.; HOFMANN, P.; WIKKHAUCK, G.; LINGENFELDER, I.; HEYNEN, M. Multiresolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. **Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 58, p. 239-258. 2004. (<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2003.10.002>)
9. BISHOP, M. P.; JAMES, L. A.; SHRODER, JR; J. F.; WALSH, S. J. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research. **Geomorphology**, v. 137, n.1, p. 5-26. 2012. (<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.027>)

10. CAMARGO, F. F.; FLORENZANO, T. G.; ALMEIDA, C. M.; OLIVEIRA, C. G. Abordagens cognitivas para a identificação de unidades geomorfológicas por meio de dados ASTER/ Terra. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, n. 2, p. 276-288. 2009. (10.25249/0375-7536.2009392276288)
11. CHATTARAJ, S.; SRIVASTAVA, R.; BARTHWAL, A. K.; GIRI, J. D.; MOHEKAR, D. S.; OBI REDDY, G. P.; DARIPA, A.; CHATTERJI, S.; SINGH, S. K. Semi-automated object-based landform classification modelling in a part of the Deccan Plateau of central India, **International Journal of Remote Sensing**, v. 38. 2017. (<https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1333652>)
12. CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1999. 137p.
13. COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 37-40, 1960.
14. DEKAVALLA, M.; ARGIALAS, D. Object-based classification of global undersea topography and geomorphological features from the SRTM30\_PLUS data. **Geomorphology**, n. 288, p. 66-882, 2017. (<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.03.026>)
15. DRAGUT, L.; BLASCHKE, T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. **Geomorphology**, v. 81, n. 3-4, p.330-344. 2006. (<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.013>)
16. DRAGUT, L.; EISANK, C. Automated object-based classification of topography from SRTM data. **Geomorphology**, v. 141-142, n. 1, p. 21-33, 2012. (<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.001>)
17. FAYYAD, U.; PIATESKY-SHAPIRO, G.; SMYTH, P.; UTHURUSAMY, R. **Advances in knowledge discovery and Data mining**. Cambridge: MIT Press. 1996.
18. FEITOSA, R. Q.; MATTOS, C.; SANTOS, R.V.; REGO, L. F. G.; PEREIRA, A. A. C. Impacto de técnicas baseadas em conhecimento na análise de imagens de média resolução para mapeamento do desflorestamento na Amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12 (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE., 2005. p. 4065- 4072.
19. FERNANDES, P. J. F.; GIRÃO, R. S. Refinamento Semiautomático do Mapa Geomorfológico do RADAMBRASIL por Recuperação e Modelagem do Conhecimento. **Revista Tamoios**, v. 14, n. 2, p. 117-141. 2018. (<https://doi.org/10.12957/tamoios.2018.34292>)
20. GIRÃO, R. S.; MELLO, C. L.; FERNANDES, P. J. F. Mapeamento Geomorfológico da Bacia Hidrográfica do rio São João por Análise de Imagens Orientada a Objeto e Mineração de Dados. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 1, p. 3-21, 2016. (<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v17i1.731>)
21. GIRÃO, R.; VICENS, R. S.; FERNANDES, P. J. F. Correção Altimétrica do ASTER GDEM Através do Método de Superfícies de Compensação de Erros. RBC. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, p. 392-433, 2019. (<https://doi.org/10.14393/rbcv71n2-46882>)
22. HEILBRON, M.; EIRADO, L. G.; ALMEIDA, J. (Org) **Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro. Escala 1:400.000**. Programa Geologia do Brasil (PGB), Mapas Geológicos Estaduais. CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Superintendência Regional de Belo Horizonte. 2016.
23. JASIEWICZ, J.; STEPINSKI, T. F. Geomorphons a Pattern Recognition Approach to Classification and Mapping of Landforms. **Geomorphology**, v. 182. p. 147-156. 2013. (<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>)
24. NOVACK, T. **Classificação da cobertura da terra e do uso do solo urbano utilizando o sistema InterIMAGE e imagens do sensor QuickBird**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2009. 214 p.

25. PINHO, C. M. D. **Análise orientada a objetos de imagens de satélites de alta resolução espacial aplicada à classificação de cobertura do solo no espaço intra-urbano: o caso de São José dos Campos**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005. 180 p.
26. PIMENTA, M. L.; VICENS, R. S.; CRONEMBERGUER, F. M.; SEABRA, V. S. Mapeamento Geomorfológico por meio de classificação baseada em objetos: estudo de caso para a Bacia do Rio São João. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 66/2, p. 407-418. 2014.
27. PONÇANO, W. L.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, M. A.; PIRES NETO, A.G.; ALMEIDA, F. F. M. O conceito de sistemas de relevo aplicado ao mapeamento geomorfológico do estado de São Paulo. **SIMPÓSIO DE GEOLOGIA REGIONAL**, 2, Atas, Rio Claro, 1979. p. 253-262.
28. QUINLAN, R. **C4.5: programs for machine learning**. 316 p. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1993.
29. RICCOMINI, C. **O Rift Continental do Sudeste do Brasil**. Tese (Doutorado em Geologia) - Depto Geologia, IG/USP. 1989. 256 p.
30. RICCOMINI, C. **Tectonismo gerador e reformador dos depósitos sedimentares Pós-Gondwânicos da porção centro-ocidental do Estado de São Paulo e áreas vizinhas**. (Tese de Livre Docência, Depto Geologia, IG/USP). 1995. 198 p.
31. ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos Geomórficos e a questão da taxonomiada relevo. **Revista do Departamento de Geografia/FFLCH/USP**, n. 6, p. 17-29, 1992.
32. SAMPAIO, T. V. M. **Parâmetros morfométricos para melhoria da acurácia do mapeamento da rede de drenagem – uma proposta baseada na análise da Bacia Hidrográfica do Rio Benevente – ES**. Tese (Doutorado). IGC/UFMG. Belo Horizonte, 2008. 147 p.
33. SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; DERZE, G. R.; ASMUS, H. E. Geologia do Brasil. **Texto Explicativo do Mapa Geológico do Brasil e da Área Oceânica Adjacente incluindo Depósitos Minerais**. Brasília, DNPM-MME, escala 1:2.500.000, 1984. 501 p.
34. SILVA, T. M. **A Estruturação Geomorfológica do Planalto Atlântico no Estado do Rio de Janeiro**. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2002.
35. SILVEIRA, C. T.; SILVEIRA, R. M. P. Índice de Posição Topográfica (IPT) para a Classificação Geomorfométrica das Formas de Relevo no Estado do Paraná – Brasil. **Revista Ra`e Ga**. v. 41, p. 98-130. 2017. (<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v41i0.51674>)
36. VERHAGEN, P.; DRAGUT, L. Object-based landform delineation and classification from DEMs for archaeological predictive mapping. **Journal of Archaeological Science**, v. 39, n. 3, p. 608-703, 2012.
37. VIEIRA, M. A. **Análise de imagem orientada a objeto e mineração de dados aplicadas ao mapeamento da cultura da cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2010. 110 p. (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.11.001>)
38. WEISS, A. **Topographic Position and Landforms Analysis**. Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA, 2001.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.