

**UFRRJ**

**INSTITUTO DE AGRONOMIA**

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA  
CIÊNCIA DO SOLO**

**DISSERTAÇÃO**

**Mapeamento Digital de Solos por Redes Neurais  
Artificiais da Bacia Hidrográfica do Rio Guapi-  
Macacu, RJ**

**Helena Saraiva Koenow Pinheiro**

**2012**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE AGRONOMIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA  
CIÊNCIA DO SOLO**

**MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS POR REDES NEURAIAS  
ARTIFICIAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GUAPI-  
MACACU, RJ**

**HELENA SARAIVA KOENOW PINHEIRO**

*Sob orientação da Professora*  
**Lúcia Helena Cunha dos Anjos**

*e Co-orientação do Pesquisador*  
**César da Silva Chagas**

Dissertação submetida como Requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Ciência do Solo

Seropédica, RJ  
**Março de 2012**

631.4798153

P654m

T

Pinheiro, Helena Saraiva Koenow, 1985-

Mapeamento digital de solos por redes neurais artificiais da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, RJ / Helena Saraiva Koenow Pinheiro – 2012.

166 f. : il.

Orientador: Lúcia Helena Cunha dos Anjos.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Agronomia.

Bibliografia: f. 123-131.

1. Mapeamento do solo - Guapi-Macacu, Rio, Bacia (RJ) – Teses. 2. Mapeamento digital - Guapi-Macacu, Rio, Bacia (RJ) – Teses. 3. Mapeamento geomorfológico - Guapi-Macacu, Rio, Bacia (RJ) – Teses. I. Anjos, Lúcia Helena Cunha dos, 1957-. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta dissertação, desde que seja citada a fonte.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE AGRONOMIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO**

**HELENA SARAIVA KOENOW PINHEIRO**

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra em Ciências**, no Curso de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração em Ciência do Solo

**TESE APROVADA EM 30/03/2012**

---

Lúcia Helena Cunha dos Anjos. Ph.D. Purdue University  
(Orientador)

---

Elpídio Inácio Fernandes Filho. Dr. UFV

---

Gustavo de Mattos Vasques. Ph.D. University of Florida

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeira instância, ao comitê de orientação (Lúcia Helena Cunha dos Anjos e César da Silva Chagas) que proporcionou a oportunidade de trabalhar com ferramentas e métodos, que propiciam novos rumos ao levantamento de solos no Brasil e no mundo, e ainda pelos ensinamentos e paciência.

Aos amigos da Embrapa Solos, Waldir de Carvalho Júnior, Nilson Rendeiro Pereira e Sílvio Barge Bhering, pelas experiências compartilhadas e o apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos órgãos financiadores da pesquisa: CAPES, FAPERJ, CPGA-CS/UFRRJ e Embrapa Solos, RJ.

Aos meus pais (José Henrique e Maria Gorete), familiares (principalmente à minha irmã Isabela e minha tia Alice) e ancestrais, que mesmo indiretamente, desempenharam papel fundamental através de apoio, paciência e compreensão.

A UFRRJ, que por tantos anos despertou meu interesse pela ciência e que propiciou a realização de mais uma conquista. Ao CPGA-CS e todos os professores e funcionários, pela estrutura de pesquisa e conhecimentos transmitidos.

A Embrapa Solos, pela oportunidade de contato com profissionais experientes que contribuíram para minha capacitação profissional e humana, além do apoio à divulgação do trabalho e participação em atividades profissionais relacionadas com a temática do estudo.

## RESUMO GERAL

PINHEIRO, Helena Saraiva Koenow. **Mapeamento digital de solos por redes neurais artificiais da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, RJ.** 2012. 138f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

O mapeamento de solos compreende a descrição das características morfológicas, físicas e químicas dos solos em uma determinada área, abrangendo descrição técnica e informações de cunho interdisciplinar, podendo ser utilizado para diversas finalidades. O mapeamento digital de solos possibilita aperfeiçoar os produtos dos levantamentos pedológicos através do uso de ferramentas de sistemas de informações geográficas (SIG), conhecimentos em gênese, morfologia e classificação de solos, no que diz respeito à escolha de atributos consistentes que representem com maior aproximação a realidade, e buscando produzir levantamento de solos com precisão e eficiência (custo x tempo). O objetivo geral desse estudo foi caracterizar os componentes da paisagem como subsídio a predição das classes de solos, usando redes neurais artificiais (RNA's), para produzir o mapa digital de solos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, no Estado do Rio de Janeiro. O mapeamento envolveu 100 pontos amostrais onde foram realizadas análises químicas, físicas e feita descrição morfológica, segundo métodos padrões de levantamento de solos no Brasil. O mapeamento digital de solos envolveu a aquisição de base cartográfica, criação de modelos digitais que representam atributos da paisagem relevantes para pedogênese e classificação de solos, análise das relações solo-paisagem e por fim, classificação supervisionada por RNA's e posterior validação do mapeamento realizado. Diante da abordagem empregada e das ferramentas de processamento de dados disponíveis foi feita a análise de modelos digitais de elevação (MDE's), quanto à resolução espacial e forma de obtenção, para selecionar o MDE adequado para derivar os atributos morfométricos. As análises evidenciaram a qualidade superior do MDE com resolução espacial adequada o tamanho de célula de 30m, obtido por interpolação dos dados de elevação, curvas de nível e pontos cotados, dados do sensor SRTM. Após a definição do MDE e derivação dos atributos, foi feito estudo para reconhecimento dos padrões geomórficos e caracterização dos pedodomínios, que envolveu coleta de amostras e descrição de perfis em locais pré-definidos através do programa *Hypercube Latin Conditioned Sampling* (cLHS). Os solos predominantes foram: Latossolos, Argissolos, Cambissolos, Gleissolos e Neossolos. O uso de ferramentas de geoprocessamento permitiu a seleção das variáveis para compor os conjuntos de discriminantes utilizados na etapa da classificação por RNA's. As variáveis selecionadas foram: altimetria, declividade, curvatura, índice topográfico combinado, distancia euclidiana, minerais de argila, óxidos de ferro, NDVI e geologia. Foram treinados onze conjuntos de RNA's, com combinações distintas quanto às variáveis discriminantes (camada de entrada). Os critérios utilizados na avaliação do desempenho das RNA's foram os índices de exatidão global e Kappa, considerando a generalização das classes de saída. Foi realizada a validação utilizando 120 pontos de controle correspondentes à perfis de solo não utilizados para o treinamento da RNA. Após análise do erro médio quadrático dos diferentes conjuntos, optou-se pela arquitetura com 10 neurônios na camada oculta. Os critérios de avaliação da classificação permitiram destacar melhor desempenho das redes dos conjuntos 1, 7 e 10, correspondentes a todas as variáveis, excluindo a geologia e excluindo o índice NDVI, os quais não diferiram entre si. A generalização e validação indicaram o conjunto 10 como o que permitiu o melhor produto final da classificação.

**Palavras-chave:** Modelagem digital. Pedologia. Pedometria.

## GENERAL ABSTRACT

PINHEIRO, Helena Saraiva Koenow. **Digital soil mapping by artificial neural network of the Guapi-Macacu watershed, RJ.** 2012. 138p Dissertation (Master Science in Agronomy, Soil Science) Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

The soil survey includes a description of the morphological, physical and chemical properties of soils in a given area, including technical description and interdisciplinary information, and supporting various purposes. The digital soil mapping makes possible to improve the products of pedological surveys through the use of geographic information system (GIS) tools, and knowledge of the soil genesis, morphology and classification, in regards the choice of attributes that represent a consistent approach to the reality, and seeking to produce a precise soil survey with efficiency (cost x time). The overall objective of this study was to characterize the landscape components to subsidize the prediction of soil classes, using artificial neural networks (ANN's), to produce the digital soil map of the Rio Guapi-Macacu watershed, located in Rio de Janeiro State. The mapping involved 100 sample points which were analysed for chemical and physical properties and morphological described, according to standard soil surveys methods in Brazil. The digital soil mapping involved the acquisition of cartographic database, creating digital models that represent landscape attributes relevant to pedogenesis and soil classification, analysis of soil-landscape relationships, and ultimately supervised classification by ANN and validation of the mapping result. Given the approach used and the processing tools of the data available, the digital elevation models (DEM's) were analysed, for the spatial resolution and how to acquire the model, to select the appropriate DEM to derive the morphometric attributes. The analyses showed as having superior quality the DEM with appropriate spatial resolution of 30m cell size, obtained by interpolation of elevation data, contour lines and elevation points, SRTM sensor data. After defining the MDE and derivation of attributes, a study was made for recognition of patterns and geomorphic characterization of pedoenvironment involving sample collection and description of profiles in predefined locations, through the program Hypercube Latin Conditioned Sampling (cLHS). The predominant soils were: Oxisols, Ultisols, Inceptisols, Aquents and other Entisols. The usage of GIS tools allowed the selection of variables to compose sets of discriminants used in the classification stage by ANN. The selected variables were: altimetry, slope, curvature, combined topographic index, euclidean distance, clay minerals, iron oxide, NDVI and geology. There were trained eleven sets of ANN's, with different combinations as to the discriminating variables (input layer). The criteria used in evaluating the performance of the ANN were the rates of overall accuracy and Kappa, considering the generalization of output classes. Validation was performed using 120 control points corresponding to the soil profiles that were not used for ANN training. After the analysis of the mean square error of the different sets, the architecture with 10 hidden nodes was chosen. The evaluation criteria of classification underlined the best networks performance of the sets 1, 7 and 10, corresponding to all variables, excluding the geology, and excluding the index NDVI, which did not differ. The generalization and validation showed that the set 10 allowed the best final classification.

**Keywords:** Digital modelling. Pedology. Pedometry.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localização da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, com destaque para a rugosidade do relevo.....	8
<b>Figura 2.</b> Localização dos pontos cotados utilizados na interpolação para gerar os MDE's. .	11
<b>Figura 3.</b> Esquema simplificado dos procedimentos para seleção do MDE (adaptado de Carvalho Júnior, 2005). .....	13
<b>Figura 4.</b> Monitoramento da raiz do quadrado médio da declividade em função da resolução. ....	15
<b>Figura 5.</b> Distribuição relativa em classes, para os atributos primários derivados dos quatro MDE's. A) Elevação (m); B) Declividade (%); C) Curvatura (adimensional); D) Aspecto (graus). .....	19
<b>Figura 6.</b> Visualização comparativa entre curvas de nível originais e derivadas dos MDE's, para os quatro modelos gerados.....	21
<b>Figura 7.</b> Comparação entre drenagem da base de dados original e derivadas dos MDE's, para os quatro modelos gerados.....	22
<b>Figura 8.</b> Bacias de contribuição derivadas dos MDE's para os quatro modelos gerados.....	23
<b>Figura 9.</b> Classificação da superfície de curvatura (Adaptado de Ruhe, 1975) .....	28
<b>Figura 10.</b> Esquema bi-dimensional simplificado das principais unidades de solos em áreas montanhosas (adaptado de Dalrymple et al., 1968; Christofolletti, 1999 e Carvalho Júnior, 2005). .....	30
<b>Figura 11.</b> Precipitação mensal e anual para o período comum de 1976-1980. Fonte: Projeto Macacu (2010).....	32
<b>Figura 12.</b> Dados de insolação diária, temperatura e umidade relativa (valores médios anuais para as normais climáticas), para três cidades nas proximidades da bacia hidrográfica em estudo. Fonte: Projeto Macacu (2010).....	33
<b>Figura 13.</b> Mapa da precipitação média anual (mm/ano). Fonte: Ecologus-Agrar (2006).....	34
<b>Figura 14.</b> Mapa da rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu. ....	35
<b>Figura 15.</b> Perfil geológico na porção central do Gráben da Guanabara. Fonte: Ecologus-Agrar (2003). .....	37
<b>Figura 16.</b> Mapa das unidades litológicas da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu (Fonte: compilado a partir das cartas do DRM, em escala 1:50.000). .....	38
<b>Figura 17.</b> Mapa da geomorfologia da bacia hidrográfica. Fonte: adaptado CPRM (2001)...	40
<b>Figura 18.</b> Mapa de Solos da Bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, (Fonte: adaptado de Carvalho Filho et al., 2003). .....	41
<b>Figura 19.</b> Mapa dos tipos de uso do solo para as bacias hidrográficas dos rios Guapi-Macau e Caceribu (Fonte: Embrapa, 2009). .....	45
<b>Figura 20.</b> MDE selecionado para representar a altimetria da bacia hidrográfica. ....	48
<b>Figura 21.</b> Modelo da declividade para a bacia hidrográfica. ....	49
<b>Figura 22.</b> Modelo gerado para aspecto ou orientação da vertente. ....	50
<b>Figura 23.</b> A) Mapa da curvatura, B) Mapa do perfil de curvatura, C) Mapa do plano de curvatura. ....	52
<b>Figura 24.</b> Modelo gerado para índice topográfico combinado (CTI). ....	53
<b>Figura 25.</b> Modelo gerado para distância euclidiana da hidrografia. ....	54
<b>Figura 26.</b> Modelo gerado para radiação solar. ....	55
<b>Figura 27.</b> Histogramas dos atributos do terreno na área da bacia e no <i>buffer</i> selecionado....	57
<b>Figura 28.</b> Localização dos pontos de coleta de amostras e descrição de perfis. ....	58
<b>Figura 29.</b> Distribuição relativa da quantidade de perfis por ordem de solos. ....	62

<b>Figura 30.</b> a) Perfil e paisagem de ARGISSOLO AMARELO; b) Perfil e paisagem de ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO .....	64
<b>Figura 31.</b> Perfil e paisagem de CAMBISSOLO HÁPLICO;.....	66
<b>Figura 32.</b> a) Perfil e paisagem de ocorrência de GLEISSOLO HÁPLICO; b) Perfil e paisagem de ocorrência de GLEISSOLO MELÂNICO.....	68
<b>Figura 33.</b> a) Perfil e paisagem de ocorrência de LATOSSOLO AMARELO; b) Perfil e paisagem de ocorrência de LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO .....	71
<b>Figura 34.</b> a) Perfil e paisagem de ocorrência de NEOSSOLO LITÓLICO; b) Perfil e paisagem de ocorrência de NEOSSOLO FLÚVICO .....	73
<b>Figura 35.</b> Padrão geomórfico dos diferentes pedodomínios.....	75
<b>Figura 36.</b> Variação da altimetria nos pedodomínios considerados.....	76
<b>Figura 37.</b> Variação da declividade nos pedodomínios considerados.....	76
<b>Figura 38.</b> Variação da curvatura nos pedodomínios considerados.....	77
<b>Figura 39.</b> Variação do índice topográfico combinado (CTI) nos pedodomínios considerados .....	77
<b>Figura 40.</b> Variação da distancia euclidiana nos pedodomínios considerados.....	78
<b>Figura 41.</b> Esquema de rede neural artificial com uma camada oculta (Fonte: University of Stirling).....	85
<b>Figura 42.</b> Análise do erro quadrático médio (EQM).....	91
<b>Figura 43.</b> Comparação do desempenho das RNA's nos sistemas de relevo: A) Sistema agradacional, B) Sistema degradacional.....	103
<b>Figura 44.</b> Mapa digital de solos inferido pela classificação da RNA obtido pelo conjunto 1. ....	105
<b>Figura 45.</b> Mapa digital de solos inferido pela classificação da RNA obtido pelo conjunto 7. ....	106
<b>Figura 46.</b> Mapa digital de solos inferido pela classificação da RNA obtido pelo conjunto 10. ....	107

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Parâmetros hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu* .....	9
<b>Tabela 2.</b> Parâmetros descritivos dos modelos digitais de elevação gerados .....	14
<b>Tabela 3.</b> Descrição das depressões espúrias dos modelos gerados a partir das diferentes fontes de dados e resoluções espaciais testadas.....	16
<b>Tabela 4.</b> Estatística descritiva dos MDE's dos grupos de dados avaliados. ....	17
<b>Tabela 5.</b> Número de depressões espúrias e de células envolvidas e relação com a área total da bacia para os quatro MDE's avaliados. ....	20
<b>Tabela 6.</b> Área e perímetro das bacias derivadas dos diferentes modelos gerados. ....	23
<b>Tabela 7.</b> Precipitação, em milímetros, segundo postos pluviométricos da área de estudo ....	33
<b>Tabela 8.</b> Unidades de conservação na bacia do rio Guapi-Macacu .....	36
<b>Tabela 9.</b> Tipos de uso do solos para a bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu.....	46
<b>Tabela 10.</b> Distribuição da elevação em classes.....	49
<b>Tabela 11.</b> Distribuição da declividade em classes, conforme Embrapa (2006).....	50
<b>Tabela 12.</b> Distribuição da área da bacia em classes de aspecto. ....	51
<b>Tabela 13.</b> Distribuição dos temas curvatura, plano e perfil de curvatura, nas classes: côncava, planar, convexa.....	53
<b>Tabela 14.</b> Distribuição do índice topográfico combinado em classes.....	54
<b>Tabela 15.</b> Distribuição da distância euclidiana da hidrografia em classes.....	54
<b>Tabela 16.</b> Distribuição da radiação solar (KWH/m2/ano) .....	55
<b>Tabela 17.</b> Estatística descritiva para elevação e declividade, para toda bacia, área dos buffers e pontos amostrais coletados nos buffers. ....	56
<b>Tabela 18.</b> Parâmetros descritivos para os atributos do terreno na bacia do rio Guapi-Macacu .....	56
<b>Tabela 19.</b> Distribuição dos perfis nas unidades litológicas da bacia hidrográfica. ....	59
<b>Tabela 20.</b> Ordens de solos observadas nos domínios geomorfológicos e sistemas de relevo	60
<b>Tabela 21.</b> Unidades geomorfopedológicas de relevo de degradação.....	61
<b>Tabela 22.</b> Unidades geomorfopedológicas de relevo agradacionais.....	61
<b>Tabela 23.</b> Características morfológicas e físicas de perfis de Argissolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ. ....	63
<b>Tabela 24.</b> Características químicas de perfis de Argissolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ. ....	63
<b>Tabela 25.</b> Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Argissolos Amarelos. ....	64
<b>Tabela 26.</b> Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Argissolos Vermelho-Amarelos.....	65
<b>Tabela 27.</b> Características morfológicas e físicas de perfis completos de Cambissolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu. ....	65
<b>Tabela 28.</b> Características químicas de perfis de Cambissolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ. ....	66
<b>Tabela 29.</b> Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Cambissolos Háplicos. ....	66
<b>Tabela 30.</b> Características morfológicas e físicas de perfis de Gleissolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ. ....	67
<b>Tabela 31.</b> Características químicas de perfis de Gleissolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ. ....	68
<b>Tabela 32.</b> Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Gleissolos Háplicos. ..	69
<b>Tabela 33.</b> Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Gleissolos Salinos e Tiomórficos. ....	69

<b>Tabela 34.</b> Características morfológicas e físicas de perfis Latossolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ. ....	70
<b>Tabela 35.</b> Características químicas de perfis de Latossolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ. ....	70
<b>Tabela 36.</b> Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Latossolos Amarelos. ....	71
<b>Tabela 37.</b> Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Latossolos Vermelho-Amarelo. ....	72
<b>Tabela 38.</b> Características morfológicas e físicas de perfis de Neossolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ. ....	72
<b>Tabela 39.</b> Características químicas de perfis de Neossolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ. ....	73
<b>Tabela 40.</b> Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Neossolos Flúvicos....	74
<b>Tabela 41.</b> Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Neossolos Litólicos. ...	74
<b>Tabela 42.</b> Fatores de formação dos solos e variáveis ambientais correspondentes. ....	87
<b>Tabela 43.</b> Classes de solos identificadas na bacia do rio Guapi-Macacu.....	88
<b>Tabela 44.</b> Conjuntos de variáveis discriminantes testados.....	89
<b>Tabela 45.</b> Resultados dos índices obtidos das matrizes de confusão das RNA's dos conjuntos avaliados. ....	92
<b>Tabela 46.</b> Matriz de confusão da RNA do conjunto 1. ....	93
<b>Tabela 47.</b> Matriz de confusão da RNA do conjunto 2. ....	94
<b>Tabela 48.</b> Matriz de confusão da RNA do conjunto 3. ....	95
<b>Tabela 49.</b> Matriz de confusão da RNA do conjunto 4. ....	96
<b>Tabela 50.</b> Matriz de confusão da RNA do conjunto 5. ....	96
<b>Tabela 51.</b> Matriz de confusão da RNA do conjunto 6. ....	97
<b>Tabela 52.</b> Matriz de confusão da RNA do conjunto 7. ....	98
<b>Tabela 53.</b> Matriz de confusão da RNA do conjunto 8. ....	98
<b>Tabela 54.</b> Matriz de confusão da RNA do conjunto 9. ....	99
<b>Tabela 55.</b> Matriz de confusão da RNA do conjunto 10. ....	100
<b>Tabela 56.</b> Matriz de confusão da RNA do conjunto 11. ....	100
<b>Tabela 57.</b> Matriz de significância entre as RNA's dos conjuntos testados.....	101
<b>Tabela 58.</b> Comparação entre os pontos de referência e os mapas obtidos pelos conjuntos selecionados.....	108

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL .....	1
2. CAPÍTULO I - AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO PARA FINS DE MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS .....	3
2.1. RESUMO .....	4
2.2. ABSTRACT .....	5
2.3. INTRODUÇÃO.....	6
2.4. MATERIAL E MÉTODOS.....	8
2.4.1. Caracterização da Área de Estudo .....	8
2.4.2. Programas Utilizados para Computação dos Dados.....	9
2.4.3. Base de Dados .....	9
2.4.4. Procedimentos para Obtenção dos Modelos.....	10
2.4.5. Critérios para a Avaliação da Qualidade dos MDE's.....	13
2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	14
2.5.1. Definição da Resolução Espacial para os MDE's Obtidos por Interpolação .....	14
2.5.2. Avaliação dos MDE's Quanto à Fonte de Dados e Forma de Obtenção.....	17
2.6. CONCLUSÕES .....	24
3. CAPÍTULO II - RECONHECIMENTO DE PADRÕES GEOMÓRFICOS E CARACTERIZAÇÃO DOS PEDODOMÍNIOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GUAPI-MACACU, RJ.....	25
3.1. RESUMO .....	26
3.2. ABSTRACT .....	27
3.3. INTRODUÇÃO.....	28
3.4. MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.4.1. Aspectos do Meio Físico .....	32
3.4.2. Atributos Morfométricos .....	42
3.4.3. Seleção dos Locais de Coleta de Amostras e Descrição de Perfis .....	44
3.4.4. Reconhecimento dos Padrões Geomórficos .....	47
3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	48
3.5.1. Descrição dos Atributos Morfométricos .....	48
3.5.2. Definição do Conjunto Amostral.....	55
3.5.3. Relações Geomorfopedológicas .....	59
3.5.4. Caracterização dos Pedodomínios .....	62
3.5.5. Análise Conjunta dos Atributos Morfométricos nos Pedodomínios .....	74
3.6. CONCLUSÕES .....	79
4. CAPÍTULO III - PREDIÇÃO DE CLASSES DE SOLOS ATRAVÉS DE CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA POR REDES NEURAI ARTIFICIAIS .....	80
4.1. RESUMO .....	81
4.2. ABSTRACT .....	82
4.3. INTRODUÇÃO.....	83
4.4. MATERIAL E MÉTODOS.....	87
4.4.1. Seleção das Variáveis Discriminantes.....	87
4.4.2. Classificação pelas Redes Neurais Artificiais .....	88
4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	91

4.5.1. Avaliação do Desempenho da Classificação por Redes Neurais Artificiais .....	91
4.5.2. Obtenção dos Mapas Digitais de Solos e Validação dos Resultados .....	104
4.6. CONCLUSÕES .....	109
5. CONCLUSÕES GERAIS .....	110
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	112
7. ANEXOS .....	121

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Os levantamentos de solos, nos dias atuais, contam com novas experiências quanto aos métodos de mapeamento e ferramentas. A Pedometria, ciência reconhecida recentemente, traz novo paradigma para o mapeamento de solos, introduzindo novas possibilidades quanto à caracterização espacial dos atributos dos solos e unidades de mapeamento e principalmente a obtenção de estimativas do erro, intrínsecas a qualquer processo de amostragem.

As técnicas de mapeamento digital buscam atender a demanda crescente de informações a respeito dos solos e suas características, usadas nos mais diferentes ramos de estudo. Através da análise das relações entre solo e paisagem é possível identificar padrões de ocorrência de diferentes tipos de solos em função das diferentes formas e atributos do terreno que exercem influência direta na pedogênese. O uso de técnicas computacionais modernas para manipulação e análise de dados espaciais tem contribuição fundamental para maior rapidez e menor custo de execução dos levantamentos de solos, quando comparados aos métodos tradicionais, tornando-os mais quantitativos e possibilitando avaliar as incertezas associadas aos produtos gerados. Neste sentido, a execução do mapeamento torna-se mais rápida e barata, rica em informações, podendo conter grande volume de dados quantitativos e qualitativos de aspectos do meio físico, além de conferir maior facilidade às interpretações e qualidade às apresentações das informações.

A análise de sistemas ambientais consiste no entendimento da forma em que se expressam os padrões de paisagem, tentando conceber a estrutura e funcionamento dos fenômenos da natureza. O principal conceito do modelo solo-paisagem, segundo Hudson (1990), envolvem: unidades naturais com forma dimensionável na superfície, resultante dos fatores de formação do solo, com relacionamento espacial previsível com outras unidades. O conceito de paisagem é subjacente à ação dos fatores do clima, geologia, geomorfologia, hidrologia, pedologia e biologia, sendo considerado produto destas interações no espaço-tempo, podendo ser decomposta em elementos que interagem em diferentes intensidades. De acordo com Hole & Campbell (1985), paisagem é uma região distinta o suficiente para ser definida por um observador instruído, a partir da análise de características observadas ou medidas, que podem ser: número, tamanho, forma, declividade, idade, entre outros.

Entre os fatores de formação de solos, o relevo tem influência direta nos processos pedogenéticos, condicionando características como profundidade, drenagem, cor dos horizontes, entre outras. O estudo do relevo busca compreender a atuação diferenciada dos mecanismos de formação, favorecendo ou não a remoção, adição, transformação e translocação de material de solo ou de origem em uma determinada condição de paisagem. Ainda, o estudo da topografia é considerado de grande importância no subsídio à tomada de decisões no que diz respeito ao estudo de ecossistemas complexos (Dixon, 1995).

A ocorrência de determinada classe de solos em uma área está ligada aos processos geomórficos, que condicionam a formação de distintas unidades de paisagem (IBGE, 2007). Sendo assim, o estudo das características da paisagem através de dados topográficos e de sensores remotos, em conjunto com observações *in situ* e análises laboratoriais, tem grande importância no mapeamento de solos para o reconhecimento da variabilidade dos atributos da paisagem, auxiliando a delimitação dos diferentes tipos de solos (Estados Unidos, 1993).

A geomorfologia tem grande importância no exame dos processos de origem, ocorrência e evolução dos solos e paisagens, representando as formas da superfície da terra no tempo. A interpretação geomorfológica consiste na decomposição da paisagem e observação de características da superfície do terreno, forma e associação com outras feições (Hole & Campbell, 1985). A parametrização dos atributos geomorfológicos é necessária, uma vez

que as inter-relações existentes condicionam a gênese de solos e, conseqüentemente, a distribuição das diferentes classes na paisagem.

Os objetivos específicos do presente estudo compreendem: a avaliação de modelos digitais de elevação e definição do modelo que melhor representa a variação da altitude na bacia hidrográfica em questão; identificação e descrição dos atributos do terreno derivados do modelo digital de elevação, relevantes para a gênese e diferenciação dos solos na área, e por fim, elaboração do mapa digital de solos da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu por abordagem de redes neurais artificiais (RNA's).

Para alcançar os objetivos propostos, a dissertação foi executada em três etapas. A primeira etapa consistiu na definição do modelo de elevação para representação da altimetria e posterior derivação dos atributos do terreno, que por sua vez serviram de subsídio para seleção dos locais de coleta de amostras e descrição dos solos e como variáveis ambientais discriminantes na classificação supervisionada por RNA's. A segunda etapa envolveu o estudo das relações entre a distribuição dos solos e os atributos do terreno que representam os fatores relevantes para a formação dos solos da bacia, através da identificação de seus padrões geomórficos caracterizando os diferentes pedodomínios. A terceira etapa consistiu na predição das classes de solos através da classificação supervisionada por simuladores de redes neurais artificiais. O desenvolvimento deste estudo obedeceu à sequência de procedimentos das etapas, que foram retratadas em capítulos, que são, portanto, interdependentes.

O primeiro capítulo trata da avaliação de modelos digitais de elevação, no que tange à a resolução espacial e a fonte dos dados e forma de obtenção. A primeira etapa da avaliação tratou da definição do tamanho de célula mais adequado para utilizar nas etapas posteriores do estudo, a partir de MDE's obtidos por interpolação de dados primários. Em um segundo momento foi feita uma comparação entre quatro grupos distintos de modelos, sendo dois gerados por interpolação de dados primários de elevação (pontos cotados, curvas de nível e dados do sensor SRTM convertidos em pontos cotados), o terceiro obtido por dados de sensor remoto (SRTM/Topodata) e o quarto por processamento fotogramétrico analítico. Os resultados nesse capítulo serviram para subsidiar a escolha do modelo mais adequado para a representação da altimetria e derivação de atributos morfométricos, importantes para alcançar os objetivos propostos nos Capítulos II e III.

O segundo capítulo envolve a compreensão dos fatores morfométricos relevantes para a pedogênese na área de estudo. Nesta etapa, foi percorrida a área e descritos perfis, com coleta de amostras, para caracterizar a distribuição dos tipos de solo, condições de paisagem e fatores pedogenéticos atuantes. A seleção dos locais de amostragem baseou-se em método estatístico para casualização, representatividade quanto aos atributos da superfície (elevação, declividade e curvatura) e viabilidade de acesso, em função da malha rodoviária existente. Os resultados analíticos dos perfis descritos, em conjunto com estudo da variabilidade dos atributos morfométricos, serviram de subsídio para a identificação padrões geomórficos de ocorrência das classes de solo de maior expressão na bacia hidrográfica. A caracterização dos pedodomínios foi baseada na análise da variação conjunta dos atributos do terreno nas classes de solos, e serviu de arcabouço para a seleção das variáveis discriminantes utilizadas como na predição das classes de solo por RNA's, assunto discutido no Capítulo III.

O terceiro capítulo trata da obtenção do mapa digital de solos através da classificação supervisionada por simuladores de redes neurais artificiais. Em síntese, esse procedimento compila os dados dos capítulos anteriores, no que tange à seleção das variáveis discriminantes para a classificação e mapeamento dos solos, de forma a subsidiar a definição de uma estrutura de rede neural adequada para a classificação supervisionada das classes de solos da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, no Estado do Rio de Janeiro.

## **2. CAPÍTULO I**

### **AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO PARA FINS DE MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS**

## 2.1. RESUMO

A análise das formas da superfície do terreno envolve a decomposição da paisagem em partes ou componentes. Modelos solo-paisagem quantitativos para predição de padrões naturais representam nova tendência no mapeamento de solos. Quando estruturados em sistemas de informação geográfica permitem o reconhecimento de variáveis com potencial para uso em mapeamento digital de solos. A partir de modelo numérico contínuo dos dados altimétricos é possível derivar outros atributos topográficos, muito importantes para levantamentos pedológicos, como, por exemplo, a superfície de curvatura, declividade, índice de umidade, entre outros. Quando a avaliação tem como base métodos e técnicas de geoprocessamento, primordialmente torna-se necessário a definição do modelo digital de elevação (MDE) que melhor represente a variabilidade da altimetria na área de estudo. A qualidade e acurácia dos MDE's dependem diretamente da precisão dos dados de elevação, forma de obtenção dos mesmos e da resolução espacial utilizada no modelo. Diante da importância do MDE para a derivação de atributos da paisagem e caracterização dos diversos padrões da superfície, este capítulo trata da avaliação de modelos de elevação quanto à resolução espacial adequada, fonte de dados e formas de obtenção. A avaliação e seleção do MDE foram efetuadas em duas etapas. A primeira teve como objetivo a definição da resolução adequada para representação do modelo digital de elevação e derivação dos atributos morfométricos da paisagem. Para tanto, foram gerados MDE's por interpolação de dados primários de elevação, em oito tamanhos de células diferentes (15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50 m). Os modelos foram avaliados através da comparação entre curvas de nível originais e derivadas dos modelos, e pelo índice representado pela raiz do quadrado da declividade média. Considerando os critérios e dados utilizados nesta etapa, foi possível indicar tamanho de célula adequado entre 20 e 30m. Foi possível identificar o efeito da adição de dados de sensores para aperfeiçoar os modelos gerados por interpolação, onde a equidistância das curvas de nível, equivalente à 20m, mostrou insuficiência para representação das áreas em cotas inferiores a 20m. Optou-se por adotar o tamanho de célula de 30m, em razão da compatibilidade com outros temas utilizados nas etapas posteriores do mapeamento digital de solos, como por exemplo, dados do sensor TM do Landsat 5. A partir da definição da resolução espacial adequada, foi iniciada a segunda etapa da avaliação, consistindo da definição da fonte de dados e forma de obtenção que melhor representasse a variação da altimetria na bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu (RJ). Os objetivos da segunda etapa do estudo compreenderam a avaliação de MDE's, obtidos de quatro formas, dois por interpolação de dados primários de elevação, um obtido do projeto SRTM, e um modelo obtido por aero-restituição. Os dados primários utilizados nos modelos gerados por interpolação (MDE CARTA e MDE HÍBRIDO) foram: curvas de nível, drenagem, pontos cotados (escala 1:50000) e dados de sensor remoto transformados em pontos (equidistantes 30m). Utilizou-se na comparação MDE's obtidos por sensor remoto e por aero-restituição (MDE SRTM e MDE IBGE). Todos os modelos foram gerados em resolução espacial de 30m. A avaliação foi baseada na estatística descritiva dos dados dos MDE's e dos atributos: declividade, aspecto, curvatura e índice topográfico composto; análise das depressões espúrias; comparação entre feições derivadas a partir dos modelos e originais oriundas das cartas planialtimétricas; e análise das bacias de contribuição. Os resultados indicaram que o MDE HÍBRIDO apresentou qualidade superior, portanto, foi selecionado para as etapas subseqüentes do estudo.

## 2.2. ABSTRACT

The analysis of the ground surface forms involves decomposition of the landscape in parts or components. Quantitative soil-landscape models to predict natural patterns represent a new trend in soil survey. When structured in geographic information systems they allow for the recognition of variables with potential for use in digital soil mapping. From a numerical model altimetric continuous data can be derived from other attributes topographical very important for pedological surveys, such as the surface curvature slope, moisture content among others. When the evaluation is based in methods and GIS techniques, primarily it is necessary to define the digital elevation model (DEM), which best represent the variability of the altimetry in the study area. The quality and accuracy of the DEMs directly depend on the accuracy of elevation data, how to obtain them and the spatial resolution used in the model. Given the importance of the DEM for derivation of landscape attributes and characteristics of the various surface patterns, this chapter deals with evaluation of models of high spatial resolution on the right, obtained by different sources and data density. The evaluation and selection of the DEM had two steps. The first stage had as objective the definition of the resolution for the digital elevation model representation, and derivation of landscape morphometric attributes. To do so, there were generated DEM's by interpolation of primary data elevation in eight different cell sizes (15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, and 50m). The models were evaluated by comparing contours of the original and derived models, and the index rate represented by the square root of the slope. Considering the criteria and data used, the spatial resolutions best suited to represent the altimetry of the study area were 20 and 30m. It was possible to identify the effect of addition of sensor data to refine the models generated by interpolation, where the equidistance of contour lines, equivalent to 20m, failed to represent areas of lower levels in this dimension. The cell size equivalent to 30m was selected due to the compatibility with other themes used later in the digital soil mapping, such as sensor data from the Landsat 5 TM. From the definition of adequate spatial resolution, it began the second stage of the evaluation, which consisted in defining the data source and means of obtaining it that best represented the river basin Guapi-Macacu (RJ) variation of altimetry. The objectives of this second study stage comprised the evaluation of DEM's, obtained in four ways, two primary data by interpolation of elevation, the third from the project SRTM, and the fourth model obtained by aero-refund. The primary data used in models generated by interpolation (DEM CARTA and DEM HYBRID) were: contour, drainage, elevation points (scale 1:50000) and remote sensor data converted into points (equidistant 30m). It was used in the comparison the DEMs obtained by remote sensor and aero-refund (SRTM MDE and MDE IBGE). All models were generated at a spatial resolution of 30m. The evaluation was based on descriptive statistics of data from DEM's, and the attributes: slope, aspect, curvature and topographic compound; analysis of depressions spurious; comparison of features derived from the templates and documents originating from the altimetric maps; and analysis of the basins contribution. The results indicated the highest quality for the DEM HYBRID; therefore, it was selected for the subsequent steps of the study.

## 2.3. INTRODUÇÃO

O uso de técnicas computacionais modernas para manipulação, análise e distribuição de dados espaciais tem contribuído para maior rapidez e menor custo de execução dos levantamentos de solos, quando comparados aos métodos tradicionais, tornando-os mais quantitativos e possibilitando avaliar as incertezas associadas a esses estudos. Dados de sensoriamento remoto orbital e atributos do terreno derivados de modelos digitais de elevação (MDE's) vêm sendo usados para compreensão das relações espaciais e temporais entre classes de solos e diferentes variáveis ambientais (Dobos et al., 2000; McBratney et al., 2003; Minasny e McBratney, 2007).

O MDE é uma representação contínua da topografia do terreno em formato digital, sendo largamente usado na análise do terreno e em outras aplicações (Lin e Oguchi, 2006). Os MDE's podem ser obtidos pela interpolação de feições vetoriais (pontos cotados, curvas de nível e hidrografia) ou diretamente de sensores remotos, por várias técnicas (Hutchinson e Gallant, 2000; Carvalho Júnior, 2005). Os MDE's obtidos por sensoriamento remoto orbital estão disponíveis em nível mundial, com grande cobertura de área por cena e baixo custo de processamento, porém a qualidade das informações depende da rugosidade e da declividade do terreno. Segundo Florinsky (1998) e Thompson et al. (2001), a acurácia do MDE e dos atributos topográficos derivados depende da: qualidade e densidade dos dados primários, estrutura dos dados originais (matricial, vetorial), resolução espacial, complexidade topográfica da área e dos algoritmos utilizados na interpolação. Os dados obtidos por sensoriamento remoto, como por exemplo, SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) podem apresentar erros, que são atribuídos aos ruídos na aquisição e transferência dos dados e à geometria da órbita. Ainda, os MDE's oriundos destes dados podem ser influenciados pelas características do terreno, apresentando comumente qualidade superior em áreas de relevo pouco movimentado e declive suave (Jarvis et al., 2004; Chagas, 2006).

A avaliação de modelos de elevação é importante no mapeamento digital de solos devido à relação direta entre a variabilidade dos atributos do terreno e a pedogênese, condicionada pelo fluxo das águas, temperatura, vegetação e remoção e deposição de material. Em razão da importância do MDE como fonte primordial de dados espaciais para caracterização das diferentes formas da paisagem e das implicações para a qualidade final dos produtos derivados deste, foi realizada análise detalhada das possíveis fontes de variação na obtenção dos MDE's (resolução espacial, fonte de dados, método de obtenção do modelo).

Várias são as maneiras de se avaliar a qualidade do MDE, sendo o método tradicional o de confrontar uma amostra de pontos de elevação do MDE produzido contra pontos de elevação provenientes de fonte de dados de maior acurácia (valores considerados reais). O grau de concordância entre estes MDE's é então referido como a raiz quadrada do erro médio quadrático da elevação (RMSE). No entanto, segundo Wise (2000) esse variável quantitativo não é eficiente para julgar a qualidade dos MDE's e que a avaliação deve contemplar métodos de análise de caráter qualitativo. Hutchinson e Gallant (2000) e Wise (2000) propõem medidas não clássicas como critérios para avaliação de MDE's, como a comparação visual entre as feições vetoriais derivadas e originais e a análise das bacias de contribuição.

O objetivo deste capítulo compreende a avaliação de modelos digitais de elevação, a fim de selecionar o MDE adequado para utilização nas etapas posteriores do mapeamento digital de solos da bacia hidrográfica. Para contemplar os aspectos de qualidade da representação do modelo de elevação, optou-se por realizar a análise em duas etapas.

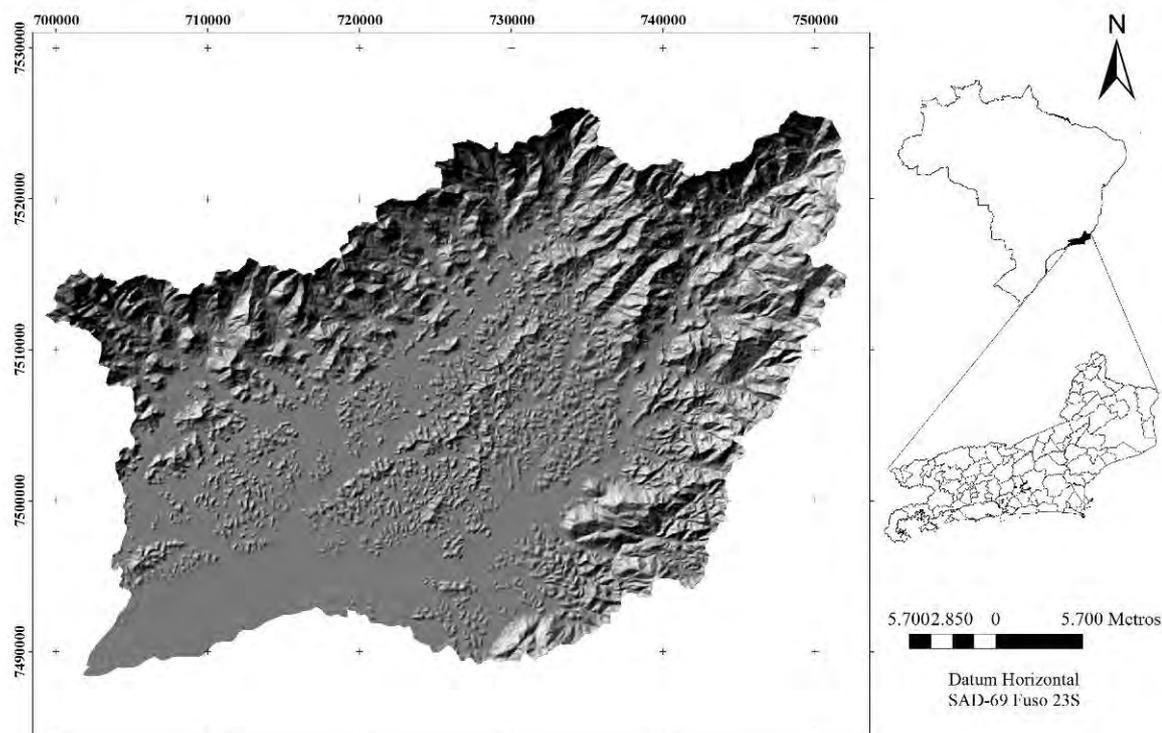
A primeira etapa compreendeu a definição da resolução espacial, onde foram testados três grupos de MDE's obtidos por interpolação de pontos cotados e curvas de nível, em oito

resoluções espaciais distintas. Após a definição da resolução espacial, foi efetuada análise detalhada das formas de obtenção e fonte de dados, baseada em quatro modelos distintos, sendo dois por interpolação de dados altimétricos primários (curvas de nível, hidrografia e pontos cotados), um oriundo de dados do SRTM e outro obtido por aerorestituição fotogramétrica. Os critérios adotados têm por finalidade subsidiar a escolha de um MDE adequado para a derivação de atributos do terreno que serão utilizados no mapeamento digital de solos da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, no Estado do Rio de Janeiro.

## 2.4. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.4.1. Caracterização da Área de Estudo

A área estudada compreende a bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, que por sua vez, faz parte da região hidrográfica da Baía de Guanabara, no Estado do Rio de Janeiro (Figura 1). A designação Guapi-Macacu foi dada depois da construção do Canal de Imunana, que drenou as áreas de baixada constantemente inundadas pela confluência dos rios Macacu e Guapi-Açu. Após a operação de drenagem o curso natural do rio Macacu foi alterado, unindo-se ao Guapimirim, que atualmente é afluente da margem direita do rio Guapi-Macacu. Os meandros naturais dos rios foram substituídos por canais retilíneos, profundos e largos. Essa intervenção também condicionou a desembocadura independente do rio Caceribu na Baía de Guanabara, que anteriormente era afluente pela margem esquerda do rio Macacu, porém ainda hoje as áreas que recebem as águas do Caceribu são conhecidas como rio Macacu.



**Figura 1.** Localização da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, com destaque para a rugosidade do relevo.

A bacia do rio Guapi-Macacu tem área de contribuição de 1250,78 km<sup>2</sup>, perímetro da ordem de 199,2 km e extensão de 72,68 km, abrangendo os municípios de Cachoeira de Macacu, Guapimirim e Itaboraí, que juntamente com a bacia do rio Caceribu correspondem a 31% do total da área continental de contribuição à Baía de Guanabara (Ecologus-Agrar, 2003). Os divisores topográficos da bacia ao Norte e Noroeste são representados pela Serra dos Órgãos e seus contrafortes; a Nordeste, pela Serra de Macaé de Cima; a Leste, pelas Serras da Botija e de Monte Azul e ao Sul, pela Serra do Sambé dos Garcias. Os principais núcleos urbanos que se encontram na bacia são a sede do município de Cachoeiras de

Macacu, Japuíba, Papucaia e Sambaetiba, sendo o núcleo urbano de Cachoeiras de Macacu mais expressivo e os demais com características de ocupação rural. A bacia do Guapi-Macacu é responsável pelo abastecimento de cerca de 2,5 milhões de habitantes dos municípios de Cachoeira de Macacu, Guapimirim, Itaboraí, São Gonçalo e Niterói, sendo também utilizado para a irrigação e piscicultura (Projeto Macacu, 2010).

A Tabela 1 apresenta alguns parâmetros hidrológicos que caracterizam a bacia hidrográfica em estudo.

**Tabela 1.** Parâmetros hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu\*

<b>Parâmetros (unidades)</b>	<b>Valor</b>
Área (km <sup>2</sup> )	1250,78
Perímetro (km)	199,19
Extensão (km)	72,68
Índice de compacidade	1,577
Índice de forma	0,237
Declividade média (m/km)	14,859
Tempo de Concentração (min)	547
Coefficiente médio de escoamento	0,34

\*Fonte: Projeto Macacu, 2010

#### **2.4.2. Programas Utilizados para Computação dos Dados**

Os programas de computação utilizados no estudo foram disponibilizados pelo Laboratório de GeoInformação da Embrapa Solos (RJ), e são eles: ArcGIS e Arc INFO versão 10 (ESRI, 2010).

#### **2.4.3. Base de Dados**

A base cartográfica digital em formato vetorial foi obtida do IBGE (IBGE, 1971, 1974, 1979a, 1979b, 1983 e BRASIL, 1997), com curvas de nível equidistantes 20 metros, hidrografia e pontos cotados, na escala de 1:50.000. Complementarmente, foram também utilizados dados do SRTM, que originalmente, são disponibilizados gratuitamente pelo *United States Geological Survey* (USGS, 2005), com resolução espacial de 90 metros. No entanto, para permitir, entre outras coisas, a comparação com os MDE's interpolados optou-se por utilizar os dados disponibilizados pelo Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2009), com resolução espacial de 30m (Topodata). Os modelos disponibilizados pelo INPE passaram por etapas de pós-processamento para correção de erros, conforme descrito em Valeriano e Albuquerque (2010). A aquisição destes dados é descrita em detalhes por Valeriano (2004). A utilização destes dados nos modelos interpolados contou com a conversão dos modelos em pontos cotados em grade de 30m. Além destes, foram também utilizadas cartas topográficas na escala de 1:10.000, disponibilizadas pela antiga Fundação CIDE (1996), atual Fundação CEPERJ, para complementar os testes de avaliação dos modelos gerados por interpolação.

Na segunda etapa da avaliação dos MDE's, cujo objetivo consistiu na definição da fonte de dados e forma de obtenção, foram utilizados dois modelos gerados por interpolação dos dados primários de elevação supracitados, e dois outros modelos obtidos por medidas diretas, sendo um deles correspondente ao modelo original SRTM, com resolução espacial de 30m (Topodata), e o outro modelo obtido por processamento fotogramétrico analítico, oriundo do projeto RJ-25, do mapeamento sistemático brasileiro realizado pela Fundação

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (Diretoria de Geociências/Coordenação de Cartografia - DGC/CCAR), disponível originalmente em resolução espacial de 20m.

Todos os dados foram projetados em sistema *Universal Transversa de Mercator* (UTM), *Datum* horizontal SAD-69, Zona 23S.

#### 2.4.4. Procedimentos para Obtenção dos Modelos

Uma vez que o principal objetivo deste estudo foi a escolha de um modelo de elevação adequado para representar a variação da altimetria na bacia hidrográfica, foram avaliados MDE's obtidos por diferentes formas, fontes de dados e resolução espacial.

No caso dos MDE's obtidos por interpolação, inicialmente, os dados foram pré-processados, etapa que envolveu: a) a união das cartas topográficas para as feições vetoriais de curvas de nível, hidrografia e pontos cotados; b) definição da projeção cartográfica para Universal Transversa de Mercator (UTM), *Datum* horizontal SAD-69 Zona 23S; e c) checagem da coerência das informações dos pontos cotados, curvas de nível e drenagem, corrigindo erros de posicionamento, valores, sentido, continuidade e preenchimento.

A interpolação dos dados primários resulta em uma grade (*grid*) contínua, onde as células recebem um valor que representa a elevação local. O limite da área é dado pelo arquivo vetorizado dos divisores topográficos da bacia hidrográfica, e a coerência hidrológica do modelo advém da utilização da rede de drenagem, em arquivo vetorial previamente editado conectando e direcionando a drenagem e fluxo, de forma a evitar incoerências e futuros erros na interpolação dos dados para gerar o MDE (ESRI, 1994).

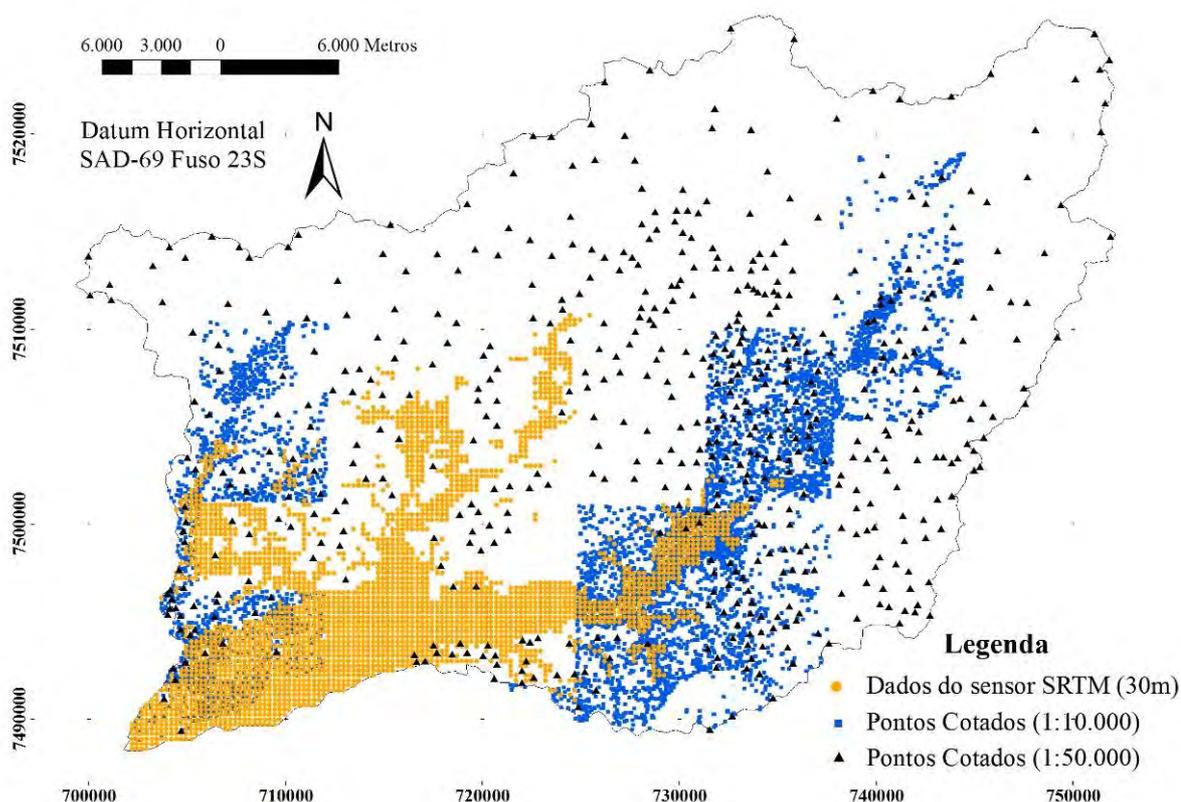
Pontos cotados adicionais foram extraídos do SRTM através da conversão do arquivo matricial, com 30m de resolução, para um arquivo vetorial de pontos, com posterior seleção dos pontos com elevação abaixo da curva de nível de 20m. Este artifício foi aplicado para avaliar os efeitos da carência de dados de elevação (curvas de nível e/ou pontos de elevação) nas áreas mais baixas da bacia, próximas a Baía da Guanabara, que poderiam interferir no processo de interpolação, como destacado por Wise (2000). Para complementar as avaliações quanto à resolução espacial, terceiro grupo de modelos contou ainda com pontos cotados oriundos das cartas topográficas na escala de 1:10.000 (Fundação CIDE, 1996). Os procedimentos foram efetuados no ArcGIS Desktop v.10 (ESRI, 2010).

A Figura 2 apresenta a localização dos pontos cotados utilizados na elaboração dos modelos gerados por interpolação.

A primeira etapa envolveu a avaliação do tamanho ideal da célula do *grid* (*pixel*) para os MDE's obtidos por interpolação. Para tanto, foram avaliadas oito resoluções espaciais (15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50m), para três combinações de fontes de dados, da seguinte forma: Grupo I - curvas de nível e pontos cotados (1:50.000) extraídos de cartas planialtimétricas do IBGE; Grupo II - curvas de nível, pontos cotados (1:50.000) extraídos de cartas planialtimétricas do IBGE + 2719 pontos cotados extraídos do SRTM para áreas da bacia com cota inferior a 20m; Grupo III - curvas de nível, pontos cotados (1:50.000) extraídos de cartas planialtimétricas do IBGE + 2719 pontos cotados extraídos do SRTM para áreas da bacia com cota inferior a 20m + 5672 pontos cotados extraídos das cartas topográficas disponibilizadas pela antiga Fundação CIDE, na escala de 1:10.000.

A segunda etapa da definição do modelo de elevação envolveu comparação de diferentes fontes de dados e formas de obtenção. Para tanto, foram gerados MDE's de quatro formas distintas, a saber: I) MDE CARTA (correspondente ao Grupo I, da primeira etapa da análise) - a partir da interpolação de curvas de nível com equidistância de 20 metros, hidrografia e pontos cotados extraídos de cartas planialtimétricas do IBGE (1:50.000); II) MDE HÍBRIDO (correspondente ao Grupo II, da primeira etapa da análise) - por interpolação usando as fontes de dados do MDE CARTA + 2719 pontos de elevação extraídos do SRTM (INPE, 2009), para áreas da bacia com cotas inferiores à 20m; III) MDE SRTM - dados do

*Topodata*, com 30m de resolução espacial; e IV) MDE IBGE - por processamento fotogramétrico analítico, originalmente disponível em resolução espacial de 20m (IBGE, 2008) e reamostrado para 30m. Os dois últimos modelos são considerados MDE's como obtidos por medidas diretas. Através desta análise buscou-se identificar os efeitos da fonte de dados e forma de obtenção dos modelos, na qualidade do produto final que representa a altimetria da bacia e nos atributos e feições derivadas.



**Figura 2.** Localização dos pontos cotados utilizados na interpolação para gerar os MDE's.

Os MDE's CARTA e HÍBRIDO foram gerados com a ferramenta *Topo to Raster* do ArcGIS Desktop v.10, que implementa um método de interpolação específico para a criação de modelo digital de elevação hidrológicamente consistente, a partir da combinação de métodos de interpolação local e global, baseado no programa ANUDEM desenvolvido por Hutchinson (1993).

Os dados do SRTM (USGS, 2005), são disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2009) na forma de modelo digital de elevação para todo o território brasileiro com resolução espacial de 30m. Após a aquisição destes dados foram unidas as diferentes cenas (ou quadrantes), com posterior adequação do sistema de projeção e seleção da área correspondente à bacia hidrográfica em estudo.

O MDE IBGE é um produto do projeto RJ-25, do mapeamento sistemático brasileiro realizado pela Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (Diretoria de Geociências/Coordenação de Cartografia - DGC/CCAR) e encontra-se disponível em <ftp://geofp.ibge.gov.br/>. Os modelos de elevação neste projeto, foram derivados de processamento fotogramétrico analítico a partir de aerolevantamento (escala aproximada de 1:30.000 e resolução de 0,7m), e algoritmos de extração altimétrica por correlação de imagens (aero-restituição espacial), com exatidão variável em função das características da região

(IBGE, 2008). Os dados originais com resolução espacial de 20m foram reamostrados para 30m, usando o algoritmo de reamostragem por atribuição dos vizinhos mais próximos (*nearest neighbor*) no ArcGIS Desktop v.10, possibilitando a comparação com os demais MDE's. A resolução espacial de 30m foi escolhida após as análises descritas na primeira etapa da avaliação dos MDE's, e em função da compatibilidade com outras variáveis ambientais, como por exemplo, imagens do sensor TM do Landsat 5.

A obtenção de um modelo hipsométrico tem como subproduto indesejado células com valores incoerentes, denominadas depressões espúrias (*sink*), que devem ser corrigidas tornando-os concordantes com a hidrografia da área, através de processo iterativo que assume valores coerentes para as células *sink* ou “buracos” (Dobos et al., 2000; Hickey et al., 1994). Assim, para todos os modelos gerados (interpolados, de dados de sensores remotos e obtidos por processamento fotogramétrico analítico) foram removidas as depressões espúrias (células *sink*). A remoção destas depressões requer uma sequência de operações, executadas no módulo “*Raster Calculator*”, do ArcGIS Desktop v.10, que devem ser repetidas até que todas as células *sink* sejam devidamente corrigidas. Tais operações intermediárias compreendem o cálculo do sentido do fluxo (*FlowDirection*) e outros temas, que tem como arquivo de *input* o modelo digital de elevação, conforme apresentado na sintaxe básica abaixo, descrita por Ribeiro (2003):

$$\begin{aligned}
 d1 &= \text{flowdirection}(mde) \\
 s1 &= \text{sink}(d1) \\
 a1 &= \text{watershed}(d1, s1) \\
 b1 &= \text{zonalfill}(a1, mde) \\
 p1 &= \text{con}(mde > b1, mde, b1) \\
 mdecorrigido &= \text{con}(isnull(a1), mde, p1)
 \end{aligned}$$

Esta seqüência de procedimentos é simplificada pelo comando “*Fill Sinks*”, no módulo “*Hidrology*” do programa ArcGIS Desktop v.10. Assim, os procedimentos para derivação das feições vetoriais dos MDE's (curvas de nível, drenagem e bacias de contribuição) foram realizados nos MDE's livres de depressões espúrias. No cálculo do escoamento acumulado para a obtenção da rede de drenagem numérica é atribuído um valor numérico associado ao número de células que fluem para uma determinada célula. Dessa forma, as células com valores superiores a 500 foram identificadas como pertencentes à drenagem numérica e possuem aproximadamente o mesmo nível de detalhe da rede de drenagem mapeada (Chagas et al., 2010a). Através de uma operação de álgebra de mapas e posterior transformação do tema matricial para vetorial, foi possível realizar a comparação entre as drenagens numéricas derivadas e a original. Todos estes procedimentos foram realizados no ArcGIS Desktop v.10.

As bacias de contribuição derivadas foram obtidas pela função *Watershed* no módulo “*Spatial Analyst Tools*” no ArcGIS Desktop v.10 e avaliadas em função de sua área e perímetro. Análises complementares foram realizadas através da derivação de atributos primários: declividade, aspecto e curvatura, e o atributo secundário índice topográfico combinado (CTI). O índice CTI foi calculado no ArcINFO, de acordo com a equação:

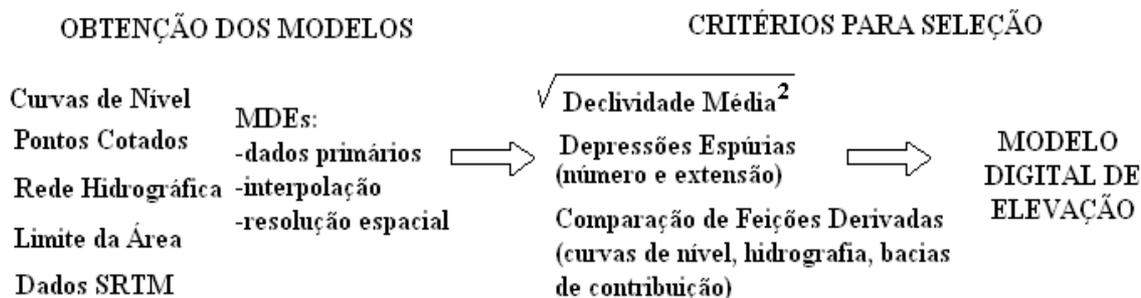
$$\text{CTI} = \ln (As/ \tan \beta)$$

Onde,  $\alpha$  corresponde a área de contribuição específica, obtida através da razão entre a área de contribuição e a largura do fluxo, e  $\beta$  corresponde a declividade, expressa em radianos. A partir da seleção do modelo de elevação corrigido, foram definidos os atributos topográficos importantes para o entendimento da variação dos mecanismos e fatores fundamentais para a formação dos solos no local de estudo, os quais serão detalhados no capítulo subsequente.

### 2.4.5. Critérios para a Avaliação da Qualidade dos MDE's

A seleção do MDE a ser utilizado para representação altimétrica da bacia hidrográfica envolveu duas etapas: 1) Avaliação dos modelos de elevação gerados por interpolação com diferentes resoluções espaciais; e 2) Comparação dos MDE's gerados por diferentes formas de obtenção e fontes de dados.

A avaliação na primeira etapa é feita com base na comparação dos modelos gerados nas diferentes resoluções espaciais quanto ao número e extensão das depressões espúrias, complementado pelo índice que representa a variação topológica do terreno. O cálculo deste índice é baseado na raiz do valor médio do mapa que corresponde ao modelo da declividade elevado ao quadrado. Este processo envolveu a criação de mapa da variação topológica do terreno (quadrado da declividade) e posterior obtenção da raiz do valor médio dos temas resultantes desta operação, organizados de forma crescente em função do tamanho da célula, evidenciando inflexão sutil no comportamento deste índice, que indica o intervalo ótimo do tamanho de célula mais adequado para usar no modelo. Segundo Hutchinson & Gallant (2000) e Carvalho Júnior (2005), este procedimento pode subsidiar a escolha do tamanho da célula mais adequado. A Figura 3 sintetiza os procedimentos necessários para a escolha da resolução espacial adequada para representação da altitude na área.



**Figura 3.** Esquema simplificado dos procedimentos para seleção do MDE (adaptado de Carvalho Júnior, 2005).

Na segunda etapa, os quatro MDE's oriundos das diferentes fontes de dados e formas de obtenção foram avaliados com base na representação dos aspectos da superfície, conforme sugerido por Hutchinson e Gallant (2000) e Wise (2000). Os autores propõem como critérios: a) análise do número e extensão das depressões espúrias; b) comparação entre as curvas de nível derivadas e as curvas de nível originais; c) comparação entre a drenagem mapeada e a drenagem numérica derivada pelos diferentes MDE's; e d) análise das bacias de contribuição derivadas.

## 2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.5.1. Definição da Resolução Espacial para os MDE's Obtidos por Interpolação

A avaliação da resolução espacial adequada para representar a altimetria da bacia hidrográfica, baseou-se no índice calculado em função da declividade observando o comportamento nas diferentes resoluções, conforme explicitado anteriormente.

Analisando os parâmetros descritivos da Tabela 2, é possível constatar que os modelos obtidos pela interpolação das curvas de nível e pontos cotados oriundos das cartas planialtimétricas do IBGE, na escala de 1:50.000, independente da resolução espacial são insuficientes para representação coerente da elevação, principalmente nas áreas de planícies, em cotas inferiores, fato que pode ser observado pelos valores mínimos apresentados nestes modelos.

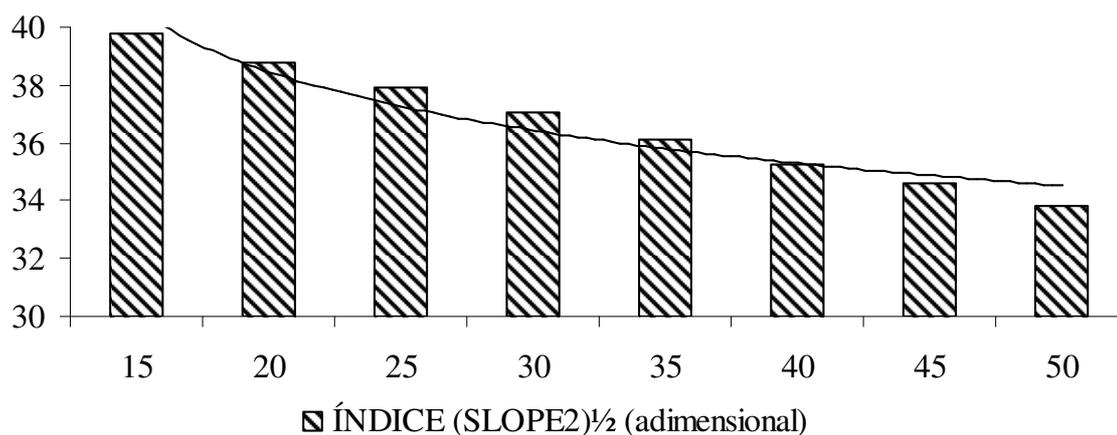
**Tabela 2.** Parâmetros descritivos dos modelos digitais de elevação gerados

Fonte de Dados	Resolução Espacial	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
Grupo I	15	-27,694	266,595	2272,601	372,226
	20	-23,476	266,797	2271,324	372,735
	25	-27,694	266,968	2271,542	373,328
	30	-37,177	266,883	2265,686	373,895
	35	-21,452	267,019	2261,586	374,318
	40	-20,271	267,363	2259,942	374,767
	45	-18,514	267,465	2260,091	375,109
	50	-20,704	268,259	2260,095	375,213
Grupo II	15	-0,023	266,303	2272,593	372,357
	20	-0,001	266,600	2271,321	372,812
	25	-0,134	267,001	2271,513	373,265
	30	-0,076	267,280	2265,820	373,579
	35	0,004	267,554	2261,578	373,920
	40	-0,215	267,862	2259,934	374,375
	45	-0,182	268,083	2260,062	374,645
	50	-0,019	268,369	2260,052	375,108
Grupo III	15	-0,001	266,210	2272,618	372,420
	20	-0,007	266,484	2271,324	372,891
	25	-0,015	266,884	2271,520	373,343
	30	-0,306	267,144	2265,657	373,667
	35	0,000	267,402	2261,575	374,022
	40	0,000	267,680	2259,930	374,497
	45	-0,158	267,891	2260,070	374,775
	50	-0,043	268,188	2260,032	375,230

Grupo I - curvas de nível e pontos cotados (1:50.000) extraídos de cartas planialtimétricas do IBGE; Grupo II - curvas de nível e pontos cotados (1:50.000) extraídos de cartas planialtimétricas do IBGE + pontos cotados extraídos do SRTM (<20m); e Grupo III - curvas de nível e pontos cotados (1:50.000) extraídos de cartas planialtimétricas do IBGE + pontos cotados extraídos do SRTM (<20m) + pontos cotados extraídos de cartas topográficas (1:10.000) da Fundação CEPERJ.

De modo geral, as médias apresentaram comportamento similar para as três fontes de dados, variando de forma crescente, com o aumento do tamanho da célula. O desvio padrão da média mostrou o padrão esperado, uma vez que a natureza da variável envolve grande amplitude de valores, já que a bacia hidrográfica possui em sua foz cotas ao nível do mar e cotas superiores a 2.000 metros, nos divisores de água.

O gráfico que mostra exemplo do comportamento do índice calculado a partir da declividade, para os modelos do Grupo I, utilizado para subsidiar a escolha da resolução espacial é apresentado na Figura 4.



**Figura 4.** Monitoramento da raiz do quadrado médio da declividade em função da resolução.

Observando a Figura 4 é possível constatar que comportamento do índice calculado apresenta relação inversa com o aumento do tamanho da célula. Todos os três grupos de modelos apresentaram o mesmo padrão de comportamento. O tamanho da célula considerado adequado para a grade de elevação da bacia hidrográfica compreende valores entre 20 a 30 m, uma vez que esta faixa de valores coincide com a inflexão sutil da curva que representa o comportamento dos índices calculados em função da declividade. O gráfico apresentado corrobora os resultados obtidos em Carvalho Júnior (2005), embora o autor tenha utilizado aumento exponencial no tamanho das células (7,5; 15; 30; 60 e 120m) tornando mais notável o comportamento do índice em função da resolução espacial.

A princípio, admite-se que o modelo com menor tamanho de célula, ou seja, maior resolução possibilite um melhor detalhamento da área. Porém, é possível que devido ao reduzido tamanho da célula tais modelos demandem maior tempo e capacidade de processamento do computador no processo de interpolação, nem sempre conferindo qualidade superior ao mesmo. Vale destacar que na definição da resolução espacial é importante considerar a escala em que são obtidos os dados primários de elevação.

As depressões espúrias geradas durante o processo de interpolação constituem uma fonte significativa de erros na modelagem de paisagens, principalmente em relação aos fenômenos hidrológicos (Chagas, 2006). Sendo assim, a análise do número e extensão destas depressões pode constituir um modo eficiente para detectar erros na fonte de dados e de avaliar a qualidade geral da estrutura de drenagem do MDE (Hutchinson e Gallant, 2000).

Os dados relevantes para análise da qualidade dos modelos em função das depressões espúrias, número e extensão, são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Descrição das depressões espúrias dos modelos gerados para os diferentes grupos de dados e resoluções espaciais testadas.

Resolução Espacial	Grupo I			Grupo II			Grupo III		
	Número Absoluto	Extensão (ha)	% da Área Total	Número Absoluto	Extensão (ha)	% da Área Total	Número Absoluto	Extensão (ha)	% da Área Total
<b>15</b>	1530	68,6	0,055	2407	109,3	0,087	3002	134,4	0,107
<b>20</b>	1476	117,4	0,094	2084	165,8	0,133	2564	206,6	0,165
<b>25</b>	1324	164,7	0,132	2020	253,4	0,203	2345	292,1	0,234
<b>30</b>	1205	216,9	0,173	1731	312,5	0,250	1964	353,4	0,283
<b>35</b>	1104	269,1	0,215	1620	398,6	0,319	1813	448,1	0,358
<b>40</b>	964	311,0	0,249	1449	463,4	0,370	1519	485,6	0,388
<b>45</b>	870	351,3	0,281	1275	516,8	0,413	1358	550,0	0,440
<b>50</b>	858	438,5	0,351	1160	579,5	0,463	1229	612,5	0,490

Grupo I - curvas de nível e pontos cotados (1:50.000) extraídos de cartas planialtimétricas do IBGE; Grupo II - curvas de nível e pontos cotados (1:50.000) extraídos de cartas planialtimétricas do IBGE + pontos cotados extraídos do SRTM (<20m); e Grupo III - curvas de nível e pontos cotados (1:50.000) extraídos de cartas planialtimétricas do IBGE + pontos cotados extraídos do SRTM (<20m) + pontos cotados extraídos de cartas topográficas (1:10.000) da Fundação CEPERJ.

A análise dos dados obtidos para as depressões espúrias em função da resolução espacial evidencia que o número absoluto de *sinks* tem comportamento inverso ao tamanho da célula, porém a extensão de cada depressão tem relação direta. Sendo assim nos modelos com células maiores, onde o número absoluto de depressões é menor, estas possuem maior área. De forma análoga, modelos com células menores têm elevado número de depressões, porém de menor área, conforme observado na Tabela 3. Resultados similares foram obtidos por Hutchinson e Gallant (2000) e Carvalho Júnior (2005). No que tange às depressões espúrias, o menor tamanho de célula testado (15m), apresentou melhores resultados para os três grupos de modelos utilizados, quando comparados às demais resoluções testadas.

O acréscimo dos pontos cotados extraídos do SRTM nos modelos dos Grupos II e III conferiu maior qualidade a estes, que por sua vez não mostraram grande diferença entre si. Contudo os modelos do Grupo III, gerados com a adição de pontos cotados extraídos do SRTM e de cartas topográficas na escala de 1:10.000, apresentaram valores maiores para depressões espúrias (alcançando aproximadamente 0,5% da área total da bacia). Portanto, foi possível inferir que a densidade de dados primários nem sempre confere melhor qualidade aos modelos gerados por interpolação, uma vez que os modelos do Grupo II apresentaram qualidade superior aos demais grupos testados. Não obstante, a escala original em que os dados de elevação são obtidos, também representa fonte de variação e interfere no produto final, conforme observado nos modelos do Grupo III, onde parte dos pontos cotados utilizados foi derivada de cartas topográficas em escala 1:10.000, que apresentaram qualidade inferior aos modelos do Grupo II, para os critérios utilizados.

Para a segunda etapa de seleção do MDE, quanto à análise detalhada da diferença entre fontes de dados e forma de obtenção, foi selecionado a resolução de 30m como tamanho de célula adequado. Já que foi a faixa ideal indicada pelas avaliações supracitadas (20 a 30

metros), além de apresentar compatibilidade com outros tipos de informações utilizadas nos levantamentos ambientais, como exemplo imagens do sensor TM do satélite Landsat 5.

### 2.5.2. Avaliação dos MDE's Quanto à Fonte de Dados e Forma de Obtenção

A segunda etapa da avaliação constou da comparação de quatro modelos gerados de três formas diferentes (dois por interpolação de curvas de nível e pontos cotados, um oriundo de dados de um sensor remoto e um obtido por processamento fotogramétrico analítico). Nessa etapa foi considerado o número e extensão de depressões espúrias, atributos derivados (primários e secundários) e a comparação de feições vetoriais derivadas dos MDE's e originais da base de dados utilizada. A análise dos efeitos decorrentes da qualidade dos modelos é mais bem observada quando os atributos do terreno são derivados. No mapeamento digital, que utiliza estes atributos para a predição das classes de solos, é relevante este tipo de análise, uma vez que a distribuição inferida das classes de solos é dependente da variação espacial de tais atributos.

A estatística descritiva dos quatro MDE's para os respectivos atributos derivados são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Estatística descritiva dos MDE's dos grupos de dados avaliados.

Atributos	MDE	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
Elevação	CARTA	-37,17	266,88	2265,68	373,89
	HÍBRIDO	-0,07	267,28	2265,82	373,57
	SRTM	-1,34	270,56	2236,57	371,46
	IBGE	-163,00	272,99	4362,00	376,74
Declividade	CARTA	0,00	27,76	252,07	24,55
	HÍBRIDO	0,00	27,45	252,09	24,82
	SRTM	0,00	27,87	252,20	26,33
	IBGE	0,00	29,27	3042,07	31,24
Curvatura	CARTA	-6,57	0,00	8,15	0,44
	HÍBRIDO	-5,56	0,00	7,97	0,45
	SRTM	-5,59	0,00	7,99	0,45
	IBGE	-109,66	-2,85	174,11	1,32
Aspecto	CARTA	-1,00	185,48	359,99	97,62
	HÍBRIDO	-1,00	184,16	359,99	98,25
	SRTM	-1,00	184,77	359,99	98,17
	IBGE	-1,00	179,40	359,99	100,83
Índice Topográfico Combinado (CTI)	CARTA	2,54	7,14	79,75	2,48
	HÍBRIDO	2,54	7,21	34,64	2,60
	SRTM	1,69	7,07	28,02	2,79
	IBGE	0,01	7,11	34,60	2,88

O desvio padrão para os valores de elevação teve o comportamento esperado diante da natureza da variável, com grande amplitude de valores, desde o nível do mar (foz da bacia hidrográfica) até cotas superiores a 2.000 metros, nos divisores de água. Os valores mínimos do MDE CARTA indicaram carência de dados em alguns locais, principalmente nas áreas planas de baixada próximas à baía de Guanabara. Neste aspecto, o MDE HÍBRIDO e MDE SRTM promoveram melhor representação para estas áreas rebaixadas, sendo mais coerentes com a superfície do terreno. A declividade mostrou valores próximos para os modelos CARTA, HÍBRIDO e SRTM, embora todos os modelos apresentem valores máximos muito elevados, relativos à áreas escarpadas com declives superiores à 200% ('ângulo negativo'). O

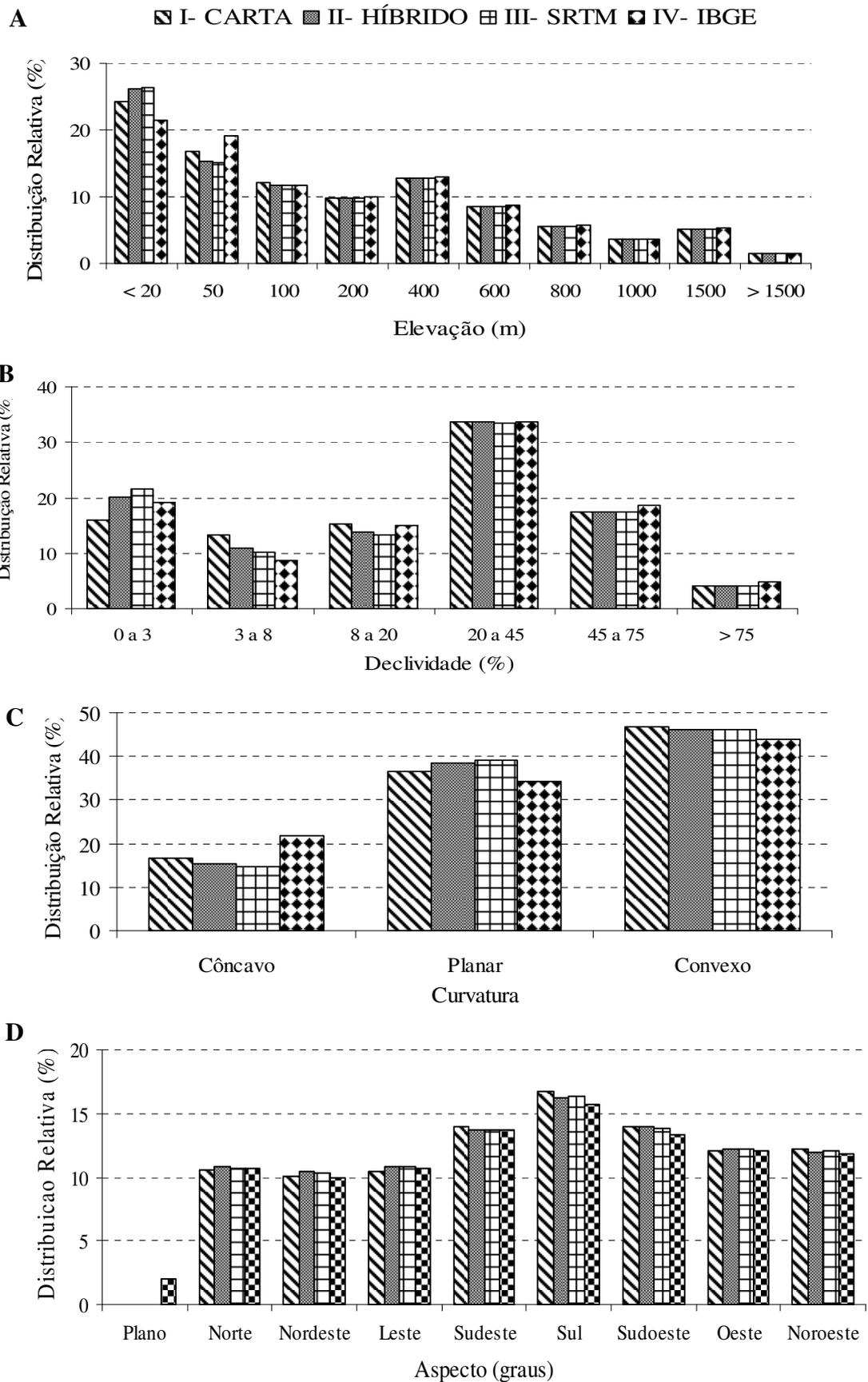
MDE IBGE evidenciou com clareza os erros envolvidos na obtenção deste modelo, que foram potencializados na derivação deste atributo, que atribuiu valores incoerentes para declividade máxima. O atributo Aspecto, por sua vez, apresentou grande similaridade entre os quatro modelos de elevação utilizados nesta etapa da avaliação. Isso indica que possivelmente não represente um bom indicador para avaliação da qualidade de MDE's e dos produtos derivados. Observando-se os valores do Índice Topográfico Combinado (CTI), usado para caracterizar a distribuição espacial de zonas de saturação e teor de água no solo (Moore et al., 1991), o MDE CARTA apresentou os maiores valores para esse atributo, uma vez que este modelo carece de dados altimétricos em cotas inferiores à 20m, ocasionado uma generalização dos valores do índice CTI em razão da localização dos drenos que são abundantes nestas áreas. No MDE IBGE os parâmetros descritivos apresentaram coerência com os demais modelos, apesar dos valores mínimos inferiores.

A estatística descritiva dos modelos e dos atributos do terreno derivados mostra, em geral, que o MDE HÍBRIDO e MDE SRTM apresentaram valores coerentes com a verdade terrestre, carecendo outros critérios de avaliação para eleger modelo adequado. Em contrapartida, o MDE IBGE apresentou as incoerências mais expressivas, com os valores mínimos e máximos para a elevação, declividade e curvatura, superiores aos obtidos pelos demais modelos, o que sugere qualidade inferior deste, provavelmente decorrente do processo de obtenção do mesmo (aero-restituição). Alguns estudos, como por exemplo, Chagas et al. (2010a), observaram qualidade superior em modelos gerados por interpolação de dados primários quando comparados com modelos obtidos diretamente por sensores remotos, em razão dos ruídos intrínsecos aos processo de obtenção dos dados.

Os erros presentes em um MDE podem confundir as relações esperadas entre os modelos e as condições locais da paisagem, e podem ser amplificados quando atributos do terreno, principalmente os secundários são derivados (Bolstad e Stowe, 1994). A derivação de atributos a partir de modelos inconsistentes pode gerar informações truncadas relacionadas, principalmente, a fenômenos hidrológicos e de transporte de material, como a ocorrência de áreas alagadas, zonas de oxidação e redução, remoção e deposição, e conseqüentemente, na classificação dos diferentes tipos de solos.

A avaliação dos modelos com base na análise dos atributos primários derivados torna-se mais compreensível quando estes são reclassificados em intervalos de classes (Figura 5), permitindo identificar as principais diferenças entre os modelos e as implicações do uso destes atributos no mapeamento digital de solos. Com relação à altimetria, as principais diferenças entre os modelos ocorreram nas áreas com cotas inferiores a 50m (Figura 5A), que representam cerca de 40% da área da bacia, que correspondem às planícies. Neste caso, o MDE IBGE tende a subestimar as áreas com elevação inferior à 20m e a superestimar as áreas entre 20 e 50m. O mesmo comportamento foi verificado para o MDE CARTA, porém de forma menos expressiva. Os estudos de Chagas (2006) sobre avaliação de MDE's apontaram discordâncias na representação das partes baixas e planas da paisagem, entre o modelo obtido por sensor remoto (SRTM) e o gerado por interpolação de dados primários.

A avaliação do comportamento da declividade mostrou relação direta com a altimetria, onde as maiores diferenças foram observadas para as classes de declive inferiores a 20%, que estão associadas às áreas com elevações inferiores a 50m (Figura 5B). O MDE CARTA estimou a menor área para a classe de declive inferior a 3%, corroborando a expectativa de carência de dados de elevação devido aos erros relativos às áreas de planícies da bacia.



**Figura 5.** Distribuição relativa em classes, para os atributos primários derivados dos quatro MDE's. A) Elevação (m); B) Declividade (%); C) Curvatura (adimensional); D) Aspecto (graus).

De modo geral, os modelos mostraram semelhanças na derivação das classes de curvatura (Figura 5C). Entretanto, o MDE IBGE apresentou valores para a classe de curvatura côncava ligeiramente superior aos demais, e para a classe de curvatura planar inferior. As diferenças detectadas para esses atributos entre os modelos são importantes, pois afetam diretamente a predição e delimitação dos solos de várzea e entornos (como os Argissolos Amarelos, Planossolos, Gleissolos e Neossolos Flúvicos), e também de áreas de relevo movimentado (Cambissolos Háplicos, Latossolos e Argissolos Vermelho-Amarelos).

Apesar da semelhança do aspecto entre os modelos, que evidencia a dominância das encostas com orientação sul, sudeste e sudoeste, a divisão em classes mostrou que o MDE IBGE (Figura 5D) classificou mais áreas como perfeitamente planas, ou seja, sem faces orientadas para nenhum lado, diferente da realidade do terreno. Destaca-se que áreas planas não têm direção preferencial para orientação da vertente, assim como curvatura, uma vez que as diferenças nessas áreas são muito sutis, e por isso atribuídas à variações do micro relevo.

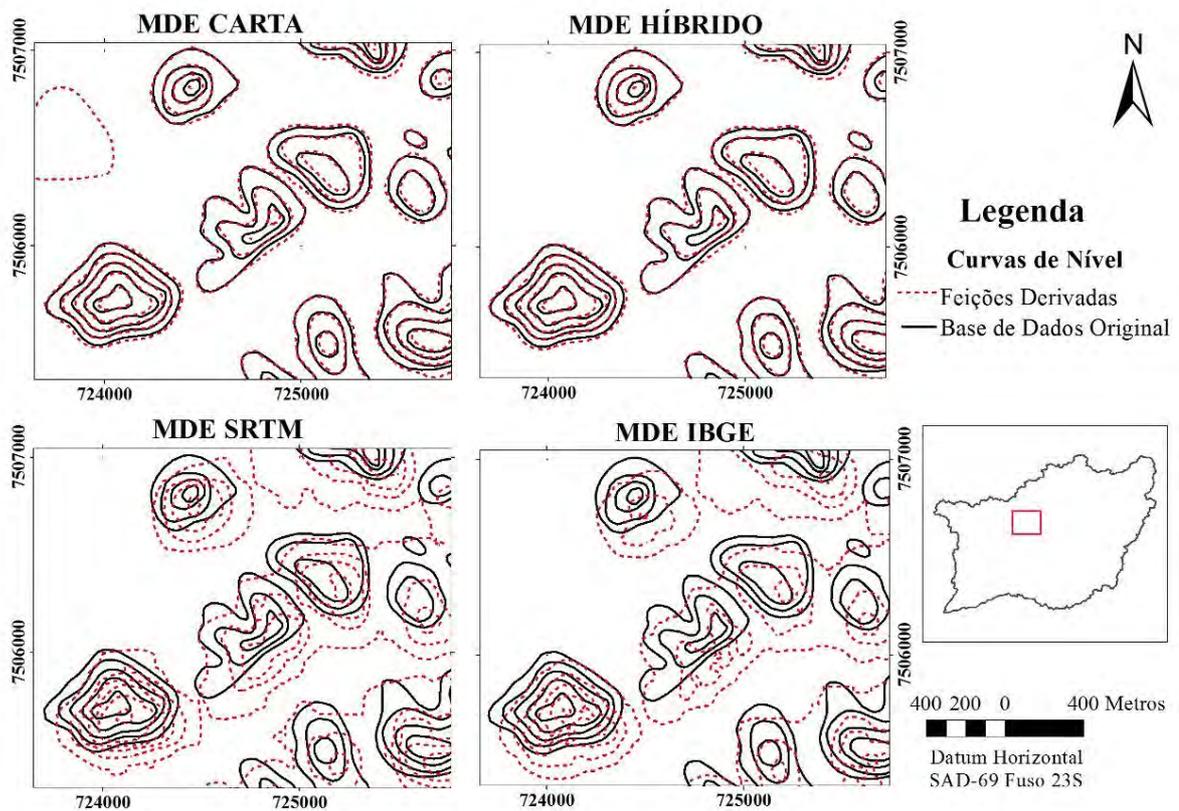
Os resultados da avaliação do número absoluto de depressões espúrias, número de *pixels* envolvidos e relação com área total da bacia hidrográfica são apresentados na Tabela 5. Foram necessárias de quatro a seis repetições da seqüência de operações para remoção completa das depressões espúrias. A avaliação da qualidade dos modelos, no que tange ao número e extensão de depressões espúrias, destaca a diferença entre as formas de aquisição dos modelos. Foi observado que os modelos obtidos por interpolação de dados primários possuem menor número e extensão de células de depressões espúrias, quando comparados com os MDE's SRTM e IBGE.

**Tabela 5.** Número de depressões espúrias e de células envolvidas e relação com a área total da bacia para os quatro MDE's avaliados.

MDE	Número de Depressões	Número de Células Envolvidas	Relação com a Área Total (%)
CARTA	1205	3037	0,17
HÍBRIDO	1731	3472	0,25
SRTM	6826	14591	1,05
IBGE	5089	26233	1,88

Observou-se ligeiro aumento no número de depressões espúrias do MDE CARTA para o MDE HÍBRIDO, porém em relação à área total, em ambas essas células não ultrapassaram 0,3%. Estes dados mostram coerência, uma vez que método de interpolação utilizado para gerar estes dois modelos (TopotoRaster) foi desenvolvido de forma a considerar a consistência hidrológica do MDE. Os MDE's SRTM e IBGE apresentaram maior número de depressões espúrias com valores aproximadamente três vezes maiores do que os obtidos pelos MDE's CARTA e HÍBRIDO, destacando os efeitos da forma de obtenção de dados. Foi possível observar que entre os MDE's SRTM e IBGE existiu uma relação inversa entre o número de células de depressões e a extensão em que estas se agruparam.

Visto que as aplicações dos MDE's dependem da representação da forma da superfície e estrutura de drenagem, valores absolutos de erros não fornecem avaliação completa da qualidade do MDE, sendo necessária complementação da análise com critérios qualitativos (Wise, 2000). A comparação visual entre curvas de nível derivadas dos MDE's e originais das cartas planialtimétricas é representada, em parte, na Figura 6.



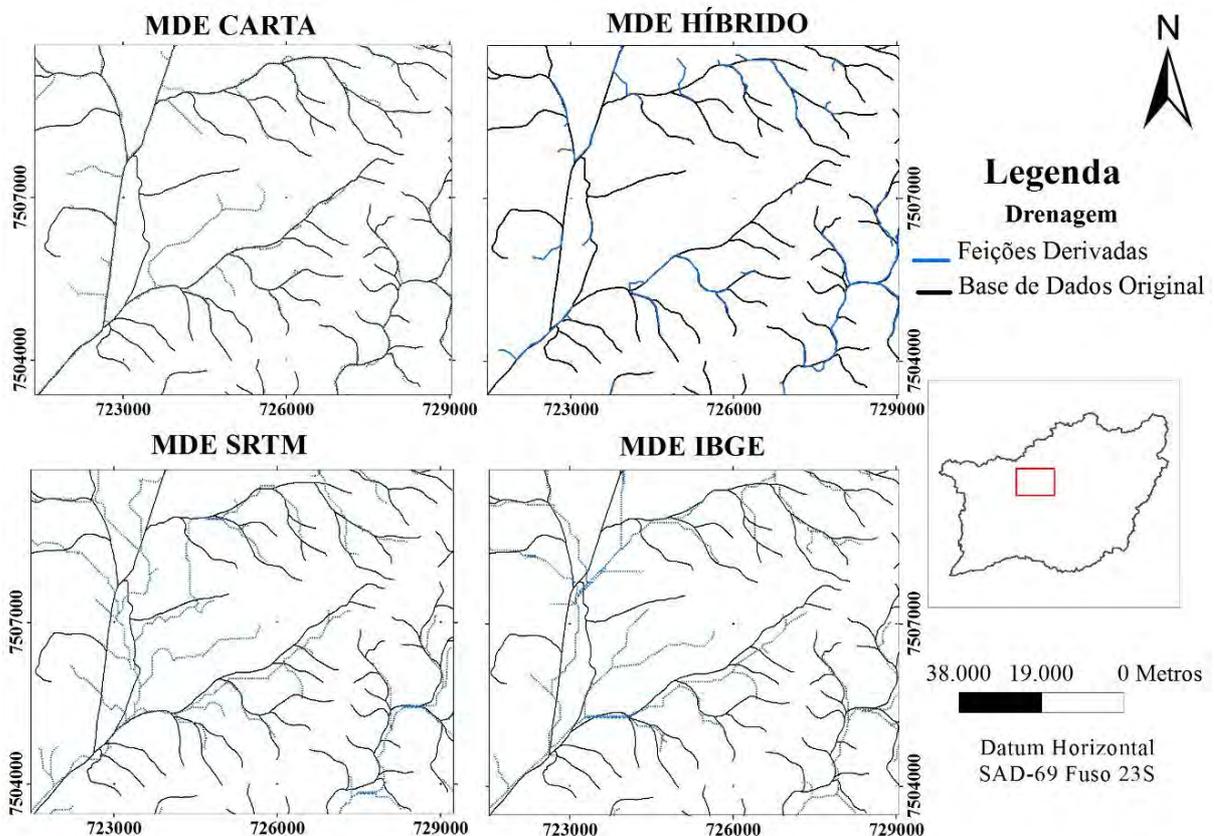
**Figura 6.** Visualização comparativa entre curvas de nível originais e derivadas dos MDE's, para os quatro modelos gerados

A melhor concordância entre curvas de nível derivadas e originais foi observada nos modelos gerados por interpolação, MDE's CARTA e HÍBRIDO. Os topos de morros apresentaram pouca variação em relação às linhas originais, porém na baixada o MDE CARTA apresentou feições incompatíveis com a base original de dados. Os MDE's SRTM e IBGE mostraram maior incoerência e deslocamento, quando comparados com as feições originais das cartas topográficas originais. Vale destacar que estes dois modelos não foram gerados a partir desta base de dados, diferentemente dos dois primeiros, gerados por interpolação. Artefatos foram criados, devido a ruídos na obtenção pelos sensores remotos e ao processo de extração, no caso do processamento analítico, como por exemplo, áreas de sombra. Estas anomalias são representadas por desníveis ou descontinuidades e tabuleiros de forma triangular ou quadrangular, e representam padrões incompatíveis com feições naturais do relevo. Observações similares foram relatadas por Chagas et al. (2010a).

A comparação visual entre a drenagem numérica derivada e a drenagem original da carta topográfica também mostra os efeitos das diferentes formas de obtenção dos modelos (Figura 7). Foi observada, além da presença de falhas, a criação de feições inexistentes, deslocamento e retificação de cursos d'água, principalmente nos modelos obtidos por medidas diretas. Os dados do SRTM não são previamente editados e podem ter erros provenientes de ruídos e falhas, principalmente em áreas íngremes (Chagas, 2006). As feições derivadas dos modelos gerados por interpolação apresentaram maior concordância com a base de dados original, destacando-se o MDE HÍBRIDO, de qualidade superior a dos demais modelos avaliados, que apresentaram deslocamentos sistemáticos, erros de posicionamento e artefatos,

A análise das bacias de contribuição derivadas permitiu detectar diferenças sutis, porém relevantes, na qualidade dos modelos, corroborando observações de Wise (2000). Foi

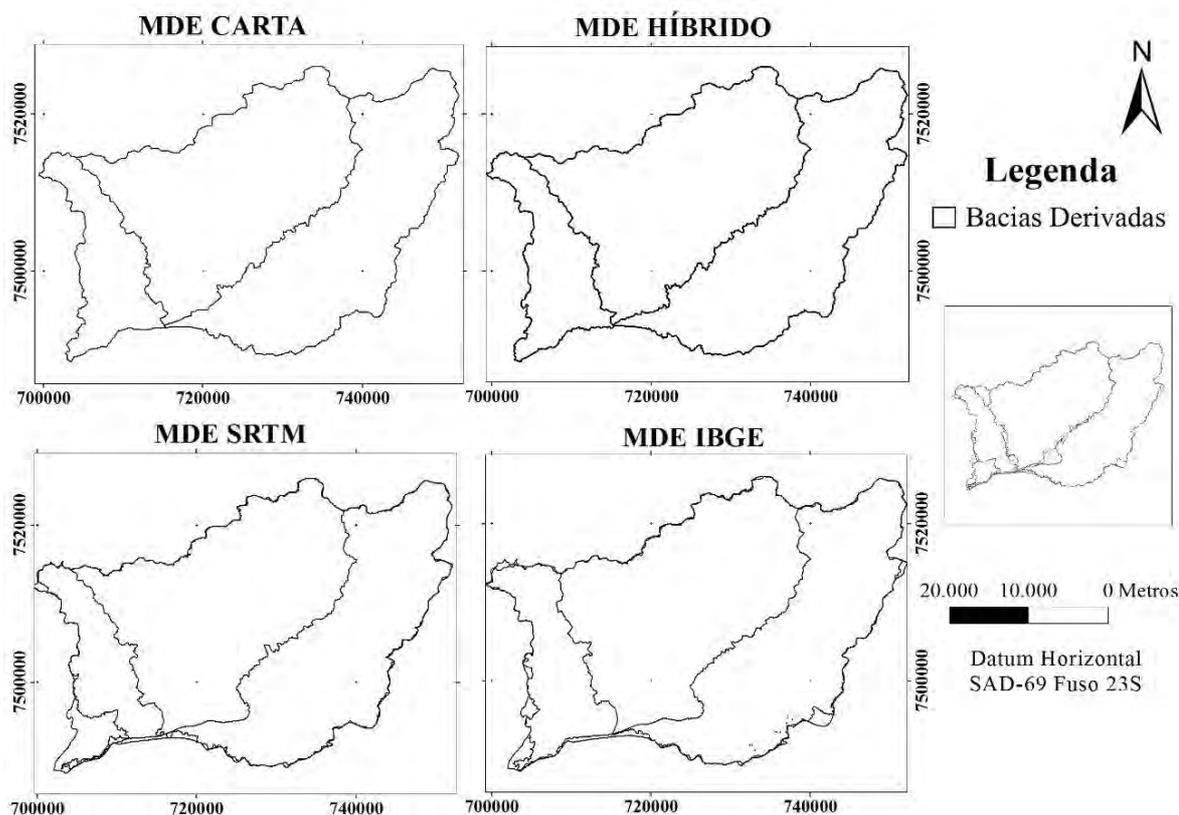
constatado grande número de bacias criadas nos limites da área e próximas aos principais drenos, em maior expressão nos MDE's SRTM e IBGE.



**Figura 7.** Comparação entre drenagem da base de dados original e derivadas dos MDE's, para os quatro modelos gerados

Já os modelos interpolados (MDE's CARTA e HÍBRIDO) foram mais sensíveis às direções de fluxo, com maior aproximação na área total da bacia hidrográfica. Algumas das feições incoerentes dos MDE's SRTM e IBGE podem ser devidas ao pós-processamento dos dados disponíveis, como o corte e mosaico das imagens. Os MDE's CARTA e HÍBRIDO apresentaram padrões similares, porém no primeiro foram criadas feições mais destoantes dos limites, em especial nas partes mais baixas, próximas ao exutório da bacia hidrográfica. Todos os grupos de dados reconheceram as três grandes sub-bacias que correspondem aos principais cursos d'água e zonas hidrológicas (rios Guapimirim e Macacu, e foz na Baía de Guanabara), e em geral, não apresentaram diferenças visuais entre os modelos, além das já citadas.

A Figura 8 destaca os delineamentos das bacias de contribuição derivadas dos modelos usados nessa etapa. Na avaliação das bacias de contribuição foram comparados a área e o perímetro derivados de cada modelo com a feição vetorial que delimita a área de estudo. Em todos os modelos, a área de contribuição da bacia derivada foi menor que a do limite pré-determinado, o inverso para o perímetro (Tabela 6). O que é explicado pelos artefatos criados nos limites da bacia, representados por reentrâncias irregulares, levando ao aumento do perímetro decorrente da derivação automatizada das bacias de contribuição. O MDE SRTM, dentre os modelos testados, foi o que mostrou as maiores diferenças com relação ao limite original para área e perímetro da bacia. O MDE IBGE apresentou o mesmo padrão, porém as diferenças foram menores ao anterior. Os demais modelos (MDE's CARTA e HÍBRIDO) produziram valores semelhantes, embora com relação inversa entre área e perímetro, podendo indicar deformações como reentrâncias nas proximidades do limite da bacia hidrográfica.



**Figura 8.** Bacias de contribuição derivadas dos MDE's para os quatro modelos gerados.

**Tabela 6.** Área e perímetro das bacias derivadas dos diferentes modelos gerados.

Modelos	Área (ha)	Diferença Relativa (%)	Perímetro (m)	Diferença Relativa (%)*
CARTA	123.977,93	0,79	198.229,66	3,44
HÍBRIDO	124.250,61	0,58	199.416,18	4,06
SRTM	120.019,73	3,96	223.566,59	16,67
IBGE	121.793,51	2,54	213.872,97	11,61
Total Bacia**	124.972,01		191.622,00	

\*Valores negativos para diferença; \*\*Limite previamente definido.

Em geral, os resultados da avaliação dos MDE's para a bacia Guapi-Macacu corroboram estudos de Chagas et al. (2010a) e Carvalho Júnior (2005), que observaram qualidade superior em modelos por interpolação de dados de elevação, comparados com os obtidos por sensores remotos. As imperfeições dos modelos obtidos por medidas diretas, como por exemplo, elevado número de depressões espúrias e incoerências nas feições derivadas, foram atribuídas aos próprios métodos de coletas de dados, de acordo com Hengl e Heuvelink (2004).

Após analisar os diferentes modelos, o MDE HÍBRIDO foi selecionado para representar a variação da altimetria da bacia, e derivar os demais atributos da paisagem. Este modelo foi gerado a partir da combinação dos dados altimétricos de curvas de nível, pontos cotados (1:50.000), extraídos das cartas topográficas do IBGE na escala de 1:50.000, acrescidos de pontos cotados extraídos do SRTM (Topodata), na resolução espacial de 30m. Os atributos topográficos gerados serão descritos em detalhe, no capítulo subsequente.

## 2.6. CONCLUSÕES

As análises quantitativas não foram suficientes para detectar diferenças entre os MDE's testados para os fins deste estudo, carecendo do uso de métodos e critérios qualitativos. As análises efetuadas na primeira etapa da avaliação, que teve como objetivo principal a seleção da resolução espacial para representar a altimetria da bacia e derivar os atributos, permitiram indicar como adequado o tamanho de células de 30m. A resolução espacial foi definida considerando índice derivado a partir da declividade, e principalmente, a compatibilidade com outros temas a serem utilizados nas etapas posteriores do mapeamento digital de solos, como dados do sensor TM do Landsat 5.

A segunda etapa da avaliação destacou os efeitos das formas de obtenção dos modelos e densidade de dados de elevação, mostrando qualidade superior nos modelos gerados por interpolação de dados primários.

O emprego de métodos qualitativos, através da comparação de feições originais e derivadas, permitiu detectar diferenças entre os modelos e identificar maior compatibilidade entre as feições derivadas dos MDE's obtidos por interpolação de dados primários de elevação (MDE's CARTA e HÍBRIDO). A adição de pontos cotados ao MDE CARTA conferiu maior qualidade final, principalmente para áreas da baixada, conforme observado nas feições derivadas do MDE HÍBRIDO.

Os MDE's CARTA e IBGE apresentaram qualidade inferior na avaliação que usou os atributos primários do terreno. A avaliação do índice CTI (atributo secundário) permitiu identificar problemas no MDE CARTA, que tende a superestimar as áreas de baixada (células com valores elevados do índice CTI). A análise com atributos do terreno derivados ressaltou a importância da avaliação de MDE's para o mapeamento digital de solos, onde a predição de padrões de ocorrência de classes de solos é feita através da correlação com os atributos do terreno. Considerando os critérios utilizados, o MDE HÍBRIDO foi selecionado como modelo adequado para representar a superfície e ser utilizado nas etapas seguintes visando o mapeamento digital de solos da bacia hidrográfica.

### **3. CAPÍTULO II**

## **RECONHECIMENTO DE PADRÕES GEOMÓRFICOS E CARACTERIZAÇÃO DOS PEDODOMÍNIOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GUAPI-MACACU, RJ**

### 3.1. RESUMO

A geomorfologia tem notável importância para o exame dos processos de origem, distribuição e evolução dos solos e paisagens, através da representação das formas da superfície da terra. A atuação de processos geomorfológicos envolve os principais agentes que moldam a paisagem, como água, geleiras, ventos, intemperismo, entre outros, imprimindo feições características no relevo. A partir da decomposição dos componentes da paisagem, na forma de atributos morfométricos, torna-se possível interpretar a dimensão e intensidade dos processos pedogenéticos. O objetivo deste capítulo compreende o reconhecimento de padrões de variação conjunta de certos atributos morfométricos, servindo de base para a caracterização dos pedodomínios de maior expressão na área de estudo. Para tanto, o estudo consistiu das seguintes etapas: descrição dos atributos morfométricos derivados do modelo digital de elevação; seleção dos locais para coleta de amostras de solos, através de ferramenta específica para seleção do conjunto amostral, descrição de perfis e observações em campo; reconhecimento dos padrões geomórficos e caracterização dos pedodomínios através da análise dos parâmetros estatísticos dos atributos e da variação conjunta dos mesmos, para as distintas classes de solos identificadas. Baseado na aleatoriedade e representatividade conferida pelo uso do “*Conditioned Latin Hypercube Sampling – cLHS*” (Minasny e McBratney, 2006), foram coletados 100 pontos amostrais. As ordens de solos de maior expressão na área de estudo foram os Latossolos (28%), Cambissolos (18%), Gleissolos (15%), Argissolos (24%) e Neossolos (6%). Os domínios geomorfológicos foram utilizados na pré-estratificação das unidades de paisagem de acordo com os sistemas de relevo (degradacional e agradacional). A litologia da área contribuiu para a caracterização dos distintos pedodomínios, indicando uma importante variável condicionadora da ocorrência de algumas classes de solos. O pedodomínio dos ARGISSOLOS AMARELOS ocorreu em declives suaves e em baixas cotas altimétricas, enquanto os ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS, associados predominantemente a rochas alcalinas, ocorrem em cotas elevadas em condições de declividade mais acentuada. No pedodomínio dos CAMBISSOLOS HÁPLICOS predominam formas côncavas, declive forte ondulado a escarpado e elevadas cotas altimétricas, de forma similar às unidades de paisagem dos NEOSSOLOS LITÓLICOS e Afloramentos de Rocha. Os Gleissolos ocorrem em cotas baixas, em declives suaves e curvatura planar, sendo subdivididos no pedodomínio dos GLEISSOLOS HÁPLICOS e MELÂNICOS e no dos GLEISSOLOS SÁLICOS e TIOMÓRFICOS. A diferença entre eles se dá principalmente pela altimetria e pelo índice topográfico combinado (CTI), em que o domínio dos Sállicos e Tiomórficos apresentam valores superiores para o índice CTI, e inferiores para altimetria, quando comparado aos outros Gleissolos. Os LATOSSOLOS AMARELOS e VERMELHO-AMARELOS ocorrem preferencialmente em formas convexas, com valores reduzidos para o índice CTI, em distintas condições de declive. Por fim, o pedodomínio dos NEOSSOLOS FLÚVICOS mostrou valores elevados de CTI e ocorreu em áreas planas, nas proximidades dos principais drenos, como os rios Macacu e Guapi-Açu. Entre os atributos morfométricos avaliados, a altimetria, a declividade, a curvatura, o índice CTI e a distância euclidiana das drenagens, exerceram mais influência na distribuição das classes de solos, auxiliando o entendimento das relações geomorfopedológicas na área de estudo. As análises realizadas e resultados obtidos neste capítulo serviram como subsídio para a definição das variáveis ambientais discriminantes utilizadas na classificação supervisionada por redes neurais artificiais, usada para obtenção do mapa digital dos solos da bacia hidrográfica, assunto que será tratado no capítulo subsequente.

### 3.2. ABSTRACT

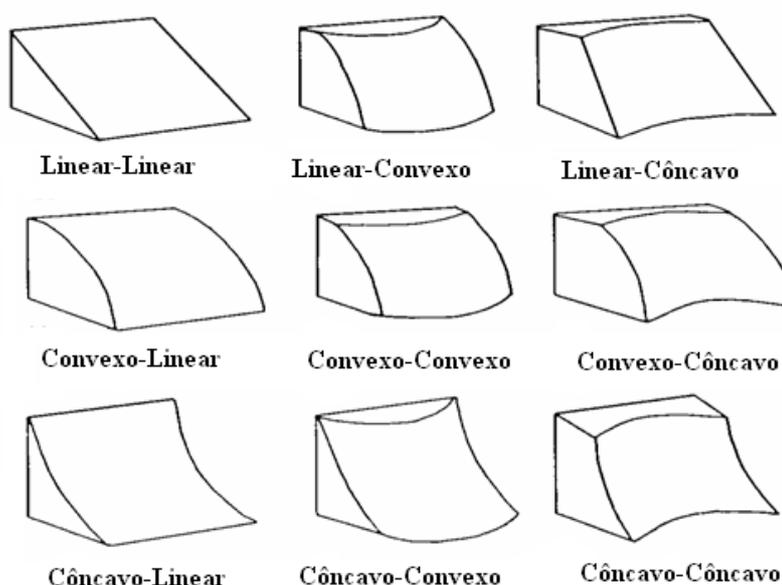
The geomorphology has considerable importance for the examination of processes of origin, distribution and evolution of soils and landscapes, through the representation of the forms of the earth's surface. The role of geomorphologic processes involves the main landscape agent shapers, such as water, glaciers, wind, weathering, among others, imprinting distinctive features in the relief characteristics. From the decomposition of the landscape, in the form of morphometric attributes, it becomes possible to consider the size and intensity of pedogenetic processes. The purpose of this chapter was the recognition of variation patterns of certain morphometric attributes, to provide the basis for characterization of pedoenvironments with highest expression in the study area. Thus, the study consisted of the following steps: description of the morphometric attributes derived from digital elevation model, selection of sites for soil sampling, through a specific tool for selecting the sample set, description of profiles and field observations, geomorphic pattern recognition, and characterization of pedoenvironments by analyzing statistical parameters of the attributes and their variation for the different soil classes identified. Based on the randomness and representation allowed by the use of the Conditioned Latin Hypercube Sampling - cLHS (Minasny and McBratney, 2006), 100 sampling points were collected. The soil orders most expressive in the studied area were Ferralsols (28%), Cambisols (18%), Gleysols (15%), Acrisols (24%), and Regosols (6%). Geomorphologic domains were used in the pre-stratification of landscape units in accordance with the relief systems (degradational and gradational). The area lithology contributed to the characterization of different pedodomínios, indicating an important variable that determines the occurrence of some soils. The Acrisols pedoenvironments were characterized by gentle slopes and in low altitudes, while the Haplic Acrisols (Chromic) predominantly associated with alkaline rocks, and occurred in higher altitudes and with steep slopes. The Haplic Cambisols predominated in this domain with concave forms, strongly undulated to steep slopes and with high altitudes, much like the landscape units of Regosols and the rock outcrops. The Gleysols pedoenvironments occurred in downlands, on very gentle slopes and of planar curvature, being subdivided in the domain of Haplic Gleysols and Endosalic Gleysols. The difference these domains were mainly due to topographic elevation and the combined index (CTI), where the Endosalic Gleysols had greatest CTI and lower altimetry than the Haplic Gleysols. The Haplic Ferralsols (Xanthic) and Haplic Ferralsols (Dystric) occurred preferentially in convex forms, with reduced values for the index CTI, in different slope conditions. Finally, the domain Fluvisols had high values of CTI and occurred in the plain areas, near the main drainage ways, such as the rivers Macacu and Guapi-Açu. Among the morphometric attributes evaluated, the altimetry, slope, curvature, index CTI, and the Euclidean distance of the drainages, exerted the most influence on the distribution of soil classes, helping to understand the pedogeomorphologic relationships in the study area. The analyzes and results obtained in this chapter served as input for definition of environmental variables to be used in the discriminant supervised classification by artificial neural networks, applied to the digital mapping of soils in the catchment area, a subject that will be discussed in the subsequent chapter.

### 3.3. INTRODUÇÃO

O conceito de paisagem é subjacente a ação dos fatores do clima, geologia, geomorfologia, hidrologia, pedologia e biologia, sendo considerada como produto destas interações no espaço-tempo, podendo ser decomposta em elementos que interagem em maior ou menor grau e em diferentes escalas. A relevância da geomorfologia no estudo da gênese do solo se dá pela sua relação com as formas da superfície e a evolução de paisagens no tempo. A quantificação de atributos morfométricos é necessária, pois sua interação determina a expressão dos processos pedogenéticos, logo a distribuição dos diferentes solos na paisagem.

Para estudo do solo como constituinte da paisagem são aplicados modelos solo/geomorfológicos. Os modelos devem ser sensíveis às variações da paisagem, distinguindo os principais componentes que definem a organização implícita na aparente desordem da natureza. A caracterização de sistemas pedológicos e a análise das relações solo-paisagem através de modelos digitais é ciência em desenvolvimento e se baseia nos preceitos inicialmente derivados de Dokuchaev, em 1883, depois estabelecidos por Jenny, em 1941 (Hole & Campbell, 1985). Estes conceitos são usados para a estratificação de uma área em unidades menores e mais homogêneas, segundo modelo baseado nos fatores de formação do solo. Embora de caráter teórico e generalizado, viabiliza o mapeamento dos segmentos de solos, com poucas amostras em relação à grande variabilidade de características.

A interpretação geomorfológica de determinada área consiste na decomposição da paisagem e observação de características da superfície do terreno, forma e associação com outras feições (Hole e Campbell, 1985). Dentre os termos usados na geomorfologia de solos, destacam-se as superfícies geomórficas ou superfícies de curvatura, que consistem de plano bidimensional, com largura e comprimento, e representam a resultante dos eventos sucessivos de desenvolvimento de paisagem no espaço-tempo. As superfícies geomórficas podem favorecer o processo erosivo (remoção) ou a deposição (acúmulo), sendo classificadas em função das combinações possíveis entre perfil e plano de curvatura, em côncavos, convexos ou lineares (Hall e Olson, 1991). A Figura 9 mostra as principais feições geomórficas.



**Figura 9.** Classificação da superfície de curvatura (Adaptado de Ruhe, 1975)

O solo como unidade tridimensional é denominado *pedon*. Os solos são examinados pelos pedólogos a partir da superfície, em suas seções relativamente paralelas distintas entre si devido à atuação dos mecanismos de perdas, transformação, adição e translocação, constituindo os diferentes processos de formação (Fanning e Fanning, 1989). Estes corpos são limitados lateralmente por outros solos, afloramentos de rocha, corpos hídricos e obras humanas. Na superfície, são delimitados pela interface com a atmosfera, e abaixo nem sempre se tem conhecimento, porém grande parte ocorre sobre embasamento rochoso. Embora os solos estejam distribuídos continuamente na paisagem, a ocorrência não aleatória das classes de solos e a variação conjunta destas, em função das descontinuidades notáveis na paisagem, evidenciam os limites entre tipos de solos com certa precisão, possibilitando caracterizar uma área através de número limitado de observações (Hudson, 1990; Estados Unidos, 1993).

As descrições morfológicas comumente são feitas em perfil que representem áreas relativamente homogêneas. Os limites entre tipos de paisagem são divisores topográficos, litologia, gradiente de declividade, entre outros. O dimensionamento dos solos em um mapa está mais ligado a processos geomórficos do que *pedons* individuais, constituindo uma unidade de paisagem o mais homogênea possível, de forma compatível com a escala de trabalho (IBGE, 2007).

Os principais conceitos do modelo solo-paisagem, segundo Hudson (1990), envolvem: unidades naturais com forma dimensionável na superfície, resultante dos fatores de formação do solo, com relacionamento espacial previsível com outras unidades, em área onde normalmente poucas unidades ocorrem repetidas. Vale destacar que quanto maior a diferença na atuação dos fatores de formação entre duas unidades, mais abrupta e notável é a distinção entre elas, com limites que podem ser observados e mapeados com certa precisão. Normalmente, uma cobertura heterogênea em uma unidade de paisagem tende a revelar unidades pedogenéticas diferentes, separadas facilmente devido a descontinuidade observada na vegetação, de forma análoga, solos similares alocados em uma mesma unidade e condição de paisagem e possuem limites pouco distintos e separados com dificuldade.

Os fenômenos que ocorrem dentro de uma bacia são dependentes da forma das superfícies, assim em estudos pedológicos é muito importante uma maior veracidade na representação das geoformas. Atributos relacionados à formação dos solos, servem de subsídio para predição da distribuição dos solos na paisagem devido a relação das características climáticas, relevo e processos geológicos e geomorfológicos, com os fatores de formação envolvidos nos processos pedogenéticos (Birkeland, 1984).

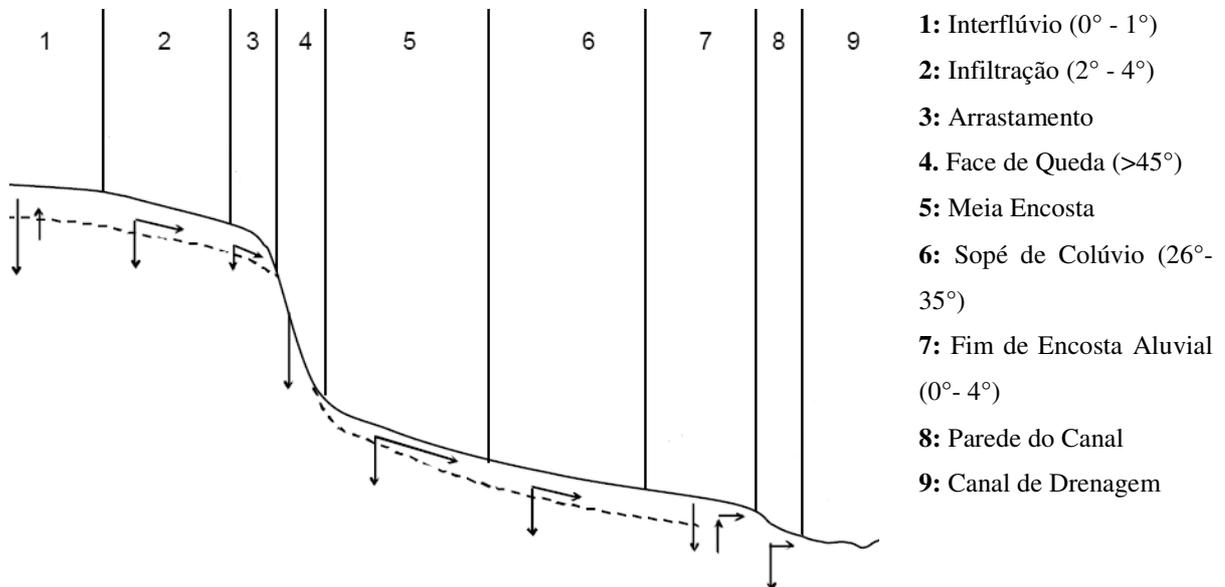
Alguns atributos adequadamente examinados por um especialista são capazes de indicar os processos de formação e o grau de expressão destes em determinado solo, como por exemplo, a espessura do *solum*, teor de argila e a variação deste ao longo do perfil, relação silte/argila, saturação por bases, entre outros. Alguns solos podem ser diferenciados quanto à origem como formados *in situ* (autóctones), ou a partir de depósitos de sedimentos, aluviais, eólicos, coluviais ou fluviais (alóctones), e esta distinção é estritamente ligada à localização destes na paisagem (Oliveira e Moniz, 1975; Varajão et al., 2009, Figueiredo et al., 2004).

A geomorfologia da paisagem, no que tange ao estudo de solos, se baseia na compreensão dos padrões de relacionamento entre o conjunto de atributos do terreno e as propriedades dos solos, e em geral, seguem o modelo Catena (Dalrymple et al, 1968; Sommer et al, 2000). O conjunto de atributos descritivos pode englobar a declividade, superfície de curvatura, aspecto, forma, entre outros (Zhu et al, 2001; Hall e Olson, 1991).

A quantificação das feições geomórficas das superfícies servem de base para inferência sobre os processos físicos, químicos e biológicos nos solos. Onde o uso de técnicas de geoprocessamento tem fundamental importância para análise mais eficiente da variação destes componentes, resultando em representação coerente às feições da superfície, e contribuindo para maior precisão das análises e inferências posteriores (Câmara et al., 1996).

O conceito de Catena, derivado dos estudos de Milne na década de 30, é amplamente utilizado na diagnose de solos e suas propriedades, especialmente em áreas montanhosas. Esse conceito constitui modelo solo-paisagem muito útil para avaliação dos fatores atuantes na formação do solo nos pedoambientes, onde a variação é evidenciada por características como: espessura do horizonte superficial, cor, profundidade do solo, entre outras. A Figura 10 apresenta modelo genérico das diferentes condições de relevo, nos principais sistemas existentes na bacia hidrográfica em estudo.

O estudo das relações solo-paisagem usando técnicas de geoprocessamento, necessita de variáveis quantificáveis representados pelos modelos contínuos das formas da superfície. Estas relações podem ser compreendidas através do conjunto de medidas de componentes que descrevem a forma topográfica de maneira a possibilitar a distinção entre padrões da paisagem e, conseqüentemente, auxiliando na delimitação dos diferentes tipos de solos. Tais componentes devem ser sensíveis aos processos geomorfológicos e pedogenéticos, considerando a escala do trabalho.



**Figura 10.** Esquema bi-dimensional simplificado das principais unidades de solos em áreas montanhosas (adaptado de Dalrymple et al., 1968; Christofolletti, 1999 e Carvalho Júnior, 2005).

Os solos estão inseridos em diversos setores geomorfológicos da paisagem e possuem características distintas em conseqüência da atuação dos fatores litológicos, climáticos, do relevo e de organismos, com destaque para a vegetação. De acordo com Hole e Campbell (1985), a estrutura pedológica em uma paisagem, possui propriedades como tamanho, disposição dos componentes e área mapeável, podendo ser distinguida e delimitada em um terreno em função do conhecimento do observador. Sendo assim, a variação de alguma qualidade inerente da paisagem é resultante da diferença no tempo-espaço em algum dos fatores que a compõe, como o solo, por exemplo, considerando ainda a covariação existente entre alguns desses fatores, tal como solo e litologia.

A representação planificada de diversos fenômenos, através de mapas, surge neste contexto, buscando transmitir informações sobre a perspectiva da realidade em determinado espaço-tempo. Para caracterizar as unidades de paisagem, podem ser derivados valores para diferentes propriedades dos solos de caráter físico, químico, mineralógico, assim como, as características da paisagem (por exemplo, relevo, declividade, aspecto). A mensuração destes

atributos obedece aos propósitos do trabalho, tempo, custo, entre outros, podendo apresentar diferentes níveis de detalhamento e acurácia, em função da escala e precisão requerida.

Em função dos objetivos finais deste estudo, que se baseia na quantificação das relações solo-paisagem, torna-se necessária a obtenção de atributos das feições geomórficas que sejam passíveis de mensuração, através da elaboração de modelos numéricos contínuos de superfície (Wood, 2000). Tratando da geomorfologia de solos, estes atributos morfométricos (ou do terreno), consistem em conjunto de medidas que caracterizam e distinguem quantitativamente diferentes formas e padrões da superfície. As formas da paisagem, por sua vez, refletem a ação dos processos decorrentes do fluxo de água e sedimentos, distribuição das formas de vida (principalmente, vegetais e animais), e processos geológicos, geomorfológicos, e pedológicos.

A interpretação destas informações quando realizadas em ambiente de sistemas de informações geográficas (SIG's) é baseada no agrupamento de dados com padrões semelhantes, onde a maior dificuldade consiste na definição e estruturação dos padrões a serem reconhecidos, classificados e mapeados (Burrough, 1986). Padrão geomórfico é um conceito utilizado em processamento de imagens, similar ao "padrão espectral", sendo definido por um conjunto de medidas que descreve a forma topográfica, possibilitando a distinção de paisagens (Brown et al., 1998).

O objetivo deste capítulo envolve a compreensão dos fatores morfométricos relevantes para a pedogênese dos solos da área em estudo, através de visitas em campo, coleta de amostras, descrição dos solos e caracterização dos diferentes pedodomínios. Os métodos utilizados buscaram a casualização e representatividade do conjunto amostral, identificação da variabilidade dos atributos morfométricos em cada pedodomínio através de parâmetros estatísticos e análise da variação conjunta dos atributos considerados. Os resultados obtidos no presente capítulo serviram de arcabouço para a elaboração do mapa digital de solos através da classificação supervisionada por RNA's, apresentada no capítulo subsequente.

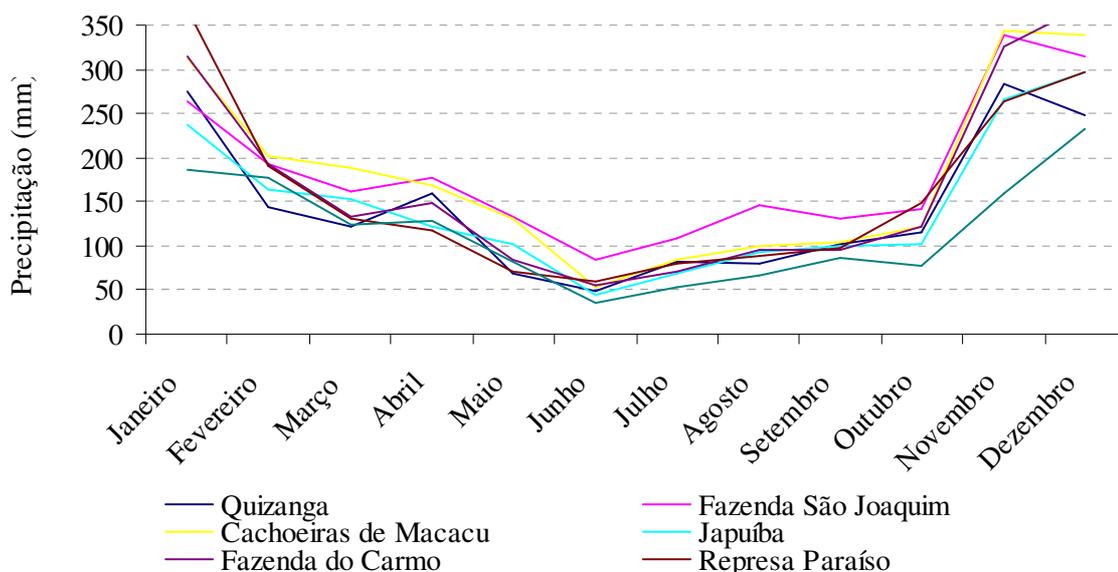
### 3.4. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.4.1. Aspectos do Meio Físico

Esse capítulo trata da identificação de padrões geomorfométricos e caracterização dos pedodomínios, onde a descrição dos aspectos do meio físico com base na literatura, busca complementar as informações e embasar as discussões sobre os aspectos pedogenéticos, que serão relevantes para se alcançar os objetivos finais da dissertação.

##### a) Clima

O clima da região é classificado como tropical chuvoso com inverno seco (Aw) segundo Köppen (1948), apresentando casualmente baixas temperaturas no inverno. A temperatura média da região é de 23 graus Celsius, a precipitação média anual supera 1.200 mm podendo atingir 2.600 mm em alguns pontos da bacia (Ecologus-Agrar, 2003, Dantas et al., 2008). A Figura 11 apresenta os dados para precipitação mensal e anual de seis postos pluviométricos existentes na área de estudo. Os valores correspondem ao período comum de 1976-1980, para as estações pluviométricas consideradas.



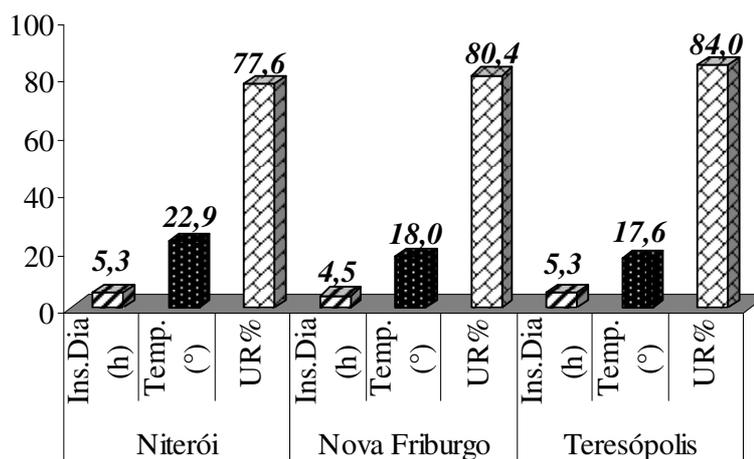
**Figura 11.** Precipitação mensal e anual para o período comum de 1976-1980. Fonte: Projeto Macacu (2010)

Os dados de precipitação média anual e a série temporal de alguns postos meteorológicos na bacia hidrográfica são apresentados na Tabela 7 (adaptado de Projeto Macacu, 2010).

**Tabela 7.** Precipitação, em milímetros, segundo postos pluviométricos da área de estudo

ID	Município	Posto pluviométrico	Período	Altitude(m)	Total (ano)
2242011		Estação de Imunana	1967-2005	10	1.353,9
2242012	Magé	Represa Paraíso	1967-2005	60	1.908,8
2242093		Quizanga (P-43R)	1976-1994	10	1.669,5
2242013		Fazenda do Carmo	1967-2005	40	2.009,9
2242014	Cachoeiras	Japuiba	1967-2005	50	1.753,1
2242015	de Macacu	Cachoeiras de Macacu	1942-1980	30	2.143,3
2242016		São Joaquim	1967-2005	275	2.195,0

A Figura 12 apresenta os dados médios mensais para temperatura média, umidade relativa, insolação, relativos às cidades limítrofes, Niterói, Nova Friburgo e Teresópolis (adaptado de Projeto Macacu, 2010).



**Figura 12.** Dados de insolação diária, temperatura e umidade relativa (valores médios anuais para as normais climáticas), para três cidades nas proximidades da bacia hidrográfica em estudo. Fonte: Projeto Macacu (2010).

A temperatura e a umidade constituem importantes aspectos da variável clima. A umidade está envolvida diretamente nos processos físicos, químicos e biológicos, e onde determinam a taxa em que os processos ocorrem. O mapa de precipitação (Figura 13) foi gerado pela interpolação (krigagem) das isoietas de precipitação, em malha contínua com células de 30m, realizado no ArcGIS Desktop v.10. O arquivo vetorial das isoietas foi adaptado do Plano Diretor de Recursos Hídricos do Programa de Despoluição da Baía da Guanabara - PDBG, RJ (Ecologus-Agrar, 2006).

Conforme observado na Figura 13, as áreas com maior aporte pluviométrico (acima de 2.000mm) correspondem às regiões onde ocorrem os contrafortes serranos, com altitudes superiores à 1000m do nível do mar.

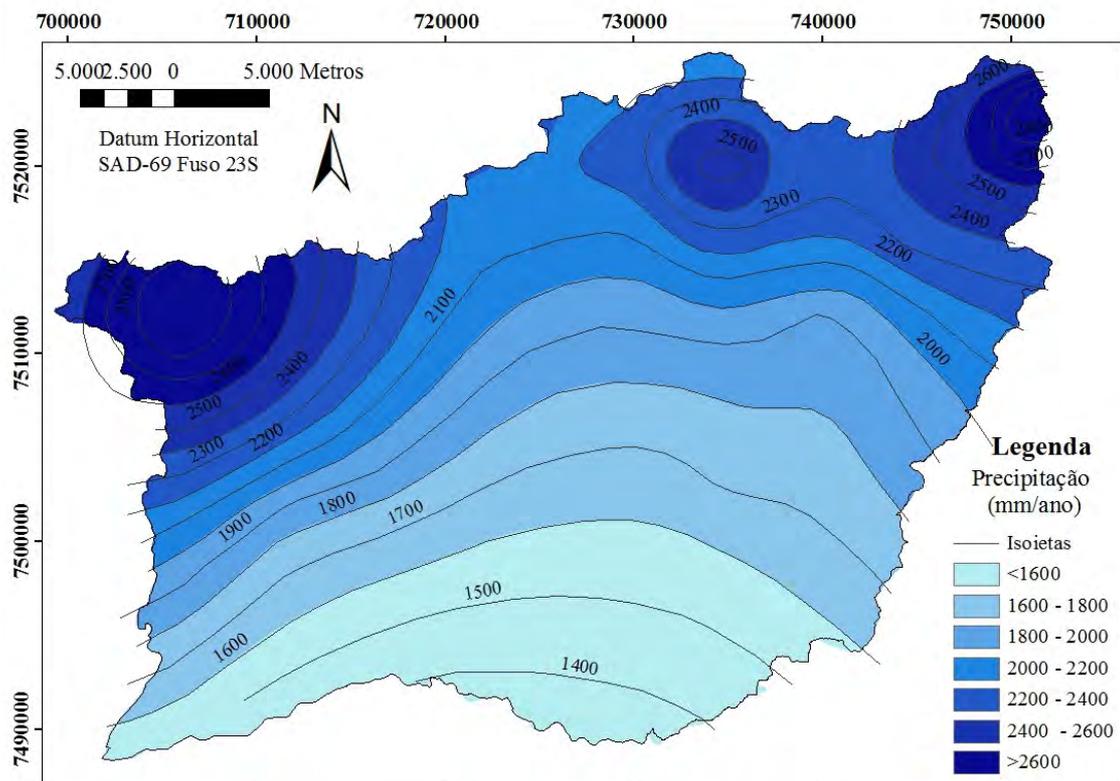


Figura 13. Mapa da precipitação média anual (mm/ano). Fonte: Ecologus-Agrar (2006)

## b) Hidrografia

A Baía de Guanabara, no estado do Rio de Janeiro, é dividida em 39 regiões hidrográficas, divisão que é composta por 12 bacias de grande relevância com contribuição direta para a baía (Côrtes et al., 2010). A bacia hidrográfica do Guapi-Macacu corresponde a aproximadamente 31% do total da área continental de contribuição e juntamente com a bacia hidrografia do rio Caceribu-Macacu representam cerca de 50% do total da área drenante à Baía de Guanabara, podendo ser consideradas como as mais relevantes (Ecologus-Agrar, 2003; Projeto Macacu, 2010).

Os principais cursos de água da bacia hidrográfica são os rios Macacu, Guapi-Açu e Guapimirim. As nascentes do rio Macacu estão dentro dos limites do Parque Estadual dos Três Picos, na Serra da Boa Vista, em cotas que atingem valores superiores a 1.5000m e relevo escarpado, e sua foz encontra-se na área da APA de Guapimirim. As nascentes do rio Guapimirim, por sua vez, localiza-se em cotas superiores a 2.000 metros de altitude, nos terrenos escarpados da serra dos órgãos, drenando os maciços rochosos e percorrendo posteriormente a maior parte do seu curso, em relevo suave, formado por colinas e morrotes, entremeando as planícies aluvionares e fluvio-marinhas com densidade de drenagem baixa.

O rio Guapi-Açu é receptor de outros rios (Orindi-Açu e Iconha e Rabelo) que drenam os contrafortes e espigões da Serra do Mar. A margem esquerda do rio Macacu recebe as águas drenadas dos Maciços alcalinos de Tanguá, Rio Bonito, Soarinho e adjacências, pelos rios Caceribu, Rio Bonito e Bengala, Soarinho, Imbuí, respectivamente.

O terço médio dos rios Macacu e Guapi-Mirim, formam extensa planície aluvionar onde predominam relevos suaves na maior extensão do percurso, com colinas ou tabuleiros delimitando a planície de inundação (Projeto Macacu, 2010).

As intervenções de engenharia, através da retificação e drenagem de áreas do médio e baixo curso do rio, marcam de forma notável a morfologia atual da drenagem. Ao longo do

terreno colinoso a drenagem é baixa com um padrão irregular dendrítico e vales entulhados de sedimentos de origem fluvial ou coluviais. De forma geral, o padrão de drenagem destes rios varia entre dendrítica a paralela, ou treliça a retangular e nos perfis transversais destes rios é evidenciada a ruptura contrastante entre os terrenos escarpados, relativos a serra do Mar e a extensa área de relevo suavizado das colinas e planícies, aluvionares e fluviomarinhas (Ecologus-Agrar, 2003, Projeto Macacu, 2010).

Os rios que compõe a bacia hidrográfica de Guapi-Macacu foram muito modificados ao longo dos anos, por processos de drenagem e retificação das calhas, como também pela própria ocupação urbana, acentuada nas últimas décadas (Dantas et al., 2008). Tais intervenções foram diretamente responsáveis pelo desaparecimento de brejos, pântanos e grande parte dos manguezais. A transformação destas paisagens naturais pode acarretar diversas consequências prejudiciais ao ecossistema que envolve dinâmica das águas estuárias, salinidade, sedimentação, entre outras. A interferência antrópica na drenagem dos terrenos marginais, através do desmatamento e conseqüentemente da erosão, tendem a prejudicar a recarga do sistema de aquíferos naturais, diminuindo a vazão dos rios principalmente em períodos de estiagem (Villela e Mattos, 1975). A Figura 14 apresenta a malha hidrográfica da área de estudo, baseada nos dados do IBGE (escala 1:50.000).

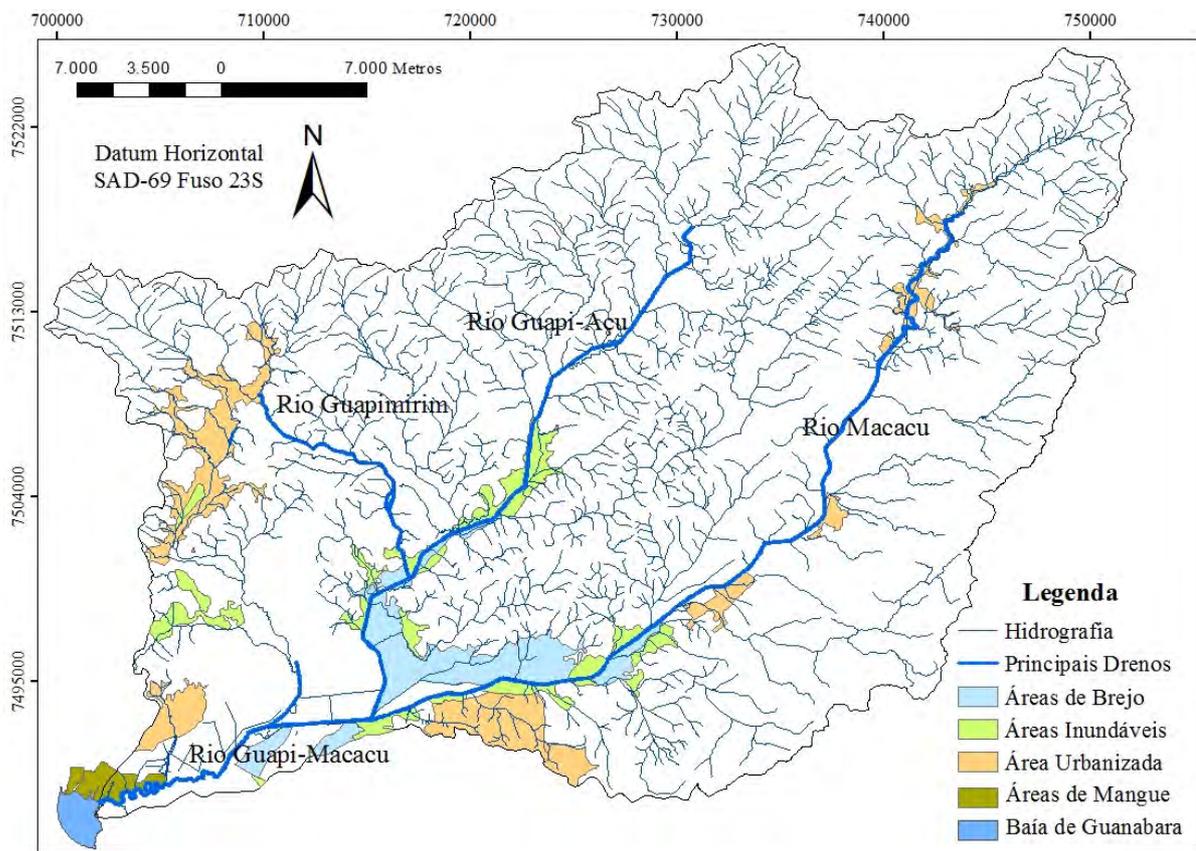


Figura 14. Mapa da rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu.

### c) Vegetação

A bacia hidrográfica Guapi-Macacu, pertencente ao bioma da Mata Atlântica, possui formações vegetais de campos de altitude, manguezais, brejos, rios e estuários. Nas últimas décadas, as intervenções para drenagem e retificação dos rios, causaram grande impacto nas formações hidrófilas (brejos, pântanos e mangues), diminuindo a recarga dos aquíferos e na

vazão dos rios em períodos de estiagem mais severa, embora a pluviosidade seja considerada elevada para a região (Fundação SOS Mata Atlântica, 2002).

A formação vegetal de mangue localiza-se na foz do rio Macacu, na confluência da bacia do rio Macacu com a baía da Guanabara, inclusas em Área de Preservação Permanente (APP), e nas unidades de conservação: Área de Proteção Ambiental de Guapimirim e na Estação Ecológica da Guanabara (Pedreira et al., 2009). A bacia hidrográfica abrange algumas áreas de preservação de relevância para o estado do Rio de Janeiro, como a APA de Guapimirim, APA de Macacu e parte do Parque Estadual dos Três Picos.

As formações de campos de altitude são típicas de ambiente montanhoso e alto-montanos, onde também ocorre associada a formações florestais densas e de maior porte (IBGE, 1991). A Tabela 8 apresenta algumas informações relevantes sobre as principais formações vegetais encontradas nas unidades de conservação (UC's).

**Tabela 8.** Unidades de conservação na bacia do rio Guapi-Macacu

Unidade de Conservação	Área		Classificação da Vegetação Original**	Principais rios nas unidades de conservação
	(ha)	(%)*		
APA de Guapimirim	13,825	100	Vegetação sob influência fluvio-marinha (manguezal)	Foz dos rios Suruí, Suruí-Mirim, Iriri, Guapi, Guaraí, Caceribu, Guaxindiba/ Alcântara
APA de Macacu	24,500	100	Floresta Ombrófila Densa Aluvial (mata ciliar)	Rios Macacu e Guapi-Açu
Parque Estadual dos Três Picos	46,350	53	Floresta Ombrófila Densa Submontana, Montana e Alto-Montana	Rio Macacu e tributários do rio Guapi-Açu

\*Porcentagem da área da unidade inclusa na bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu

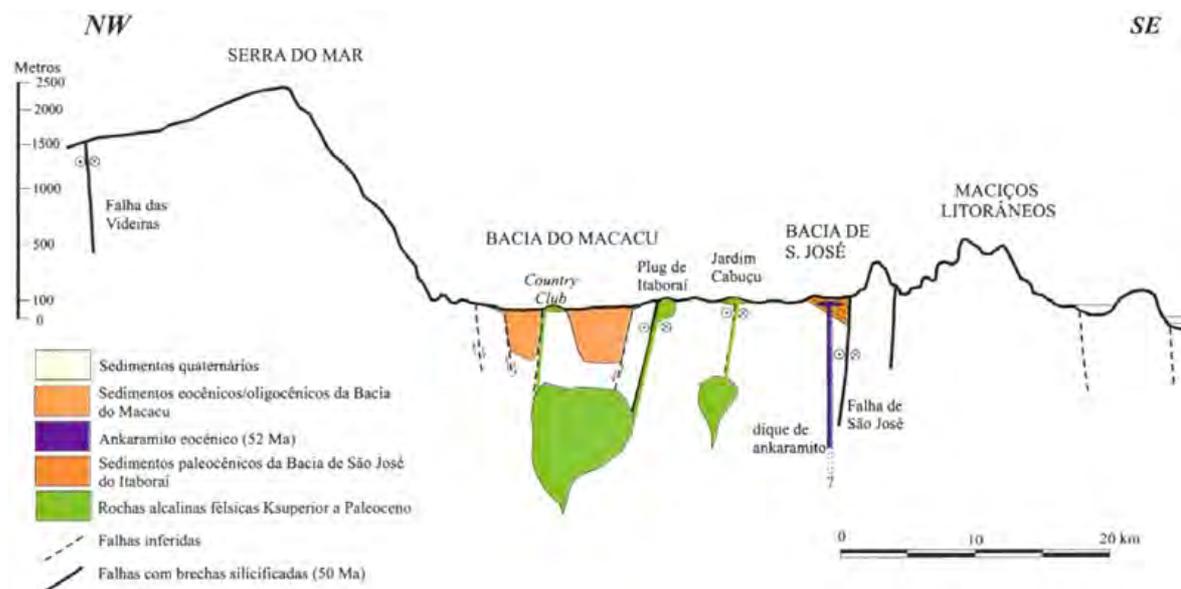
\*\*A classificação da vegetação original está de acordo com IBGE (1991)

#### d) Geologia

A região estudada, definida como Bacia Sedimentar de Macacu, ocupa a parte central do Gráben Guanabara e foi formada por diversas sequências deposicionais a partir dos eventos tectônicos no início do Terciário, que desencadearam a implantação do Gráben Guanabara. Sendo assim a bacia de Macacu é composta pela Formação Macacu, capeada por depósitos marinhos, fluvio-marinhos e coluvio-aluvionares, todos do Quaternário, de sedimentos oriundos das unidades litológicas adjacentes, retrabalhados por processos deposicionais relativamente recentes (Projeto Macacu, 2010).

Os estudos de Ferrari (2001) sobre a evolução e consequências dos eventos geológicos que deram origem ao Gráben Guanabara, a partir de evidências sedimentares das formações Macacu e São José do Itaboraí, descrevem as características dos eventos deposicionais na paisagem, variando de leques aluvionares a depósitos fluviais e lacustres, com presença de conglomerados, junto às fácies sedimentares da Formação Macacu. Alguns autores estimam a espessura do pacote sedimentar da ordem de 100 metros até atingir o embasamento cristalino, este composto por paragneisses e rochas alcalinas (Projeto Macacu, 2010, CPRM, 2001, Dantas, 2000). Os sedimentos são de caráter afossilífero, com coloração amarela, avermelhada e arroxeadas em sucessões descontínuas, laterais e verticais de caráter não degradacional. As feições estruturais dos sedimentos se devem a um curto transporte, seguido por retrabalhamento (Projeto RADAMBRASIL, 1983). A Figura 15 ilustra o perfil topográfico do Gráben da Guanabara na Sub-Bacia do Rio Macacu.

O Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2001), subdivide a região da bacia hidrográfica em dois dos três domínios que envolvem Estado do Rio de Janeiro: o Domínio Juiz de Fora/Paraíba do Sul e o Domínio Serra do Mar.



**Figura 15.** Perfil geológico na porção central do Gráben da Guanabara. Fonte: Ecologus-Agrar (2003).

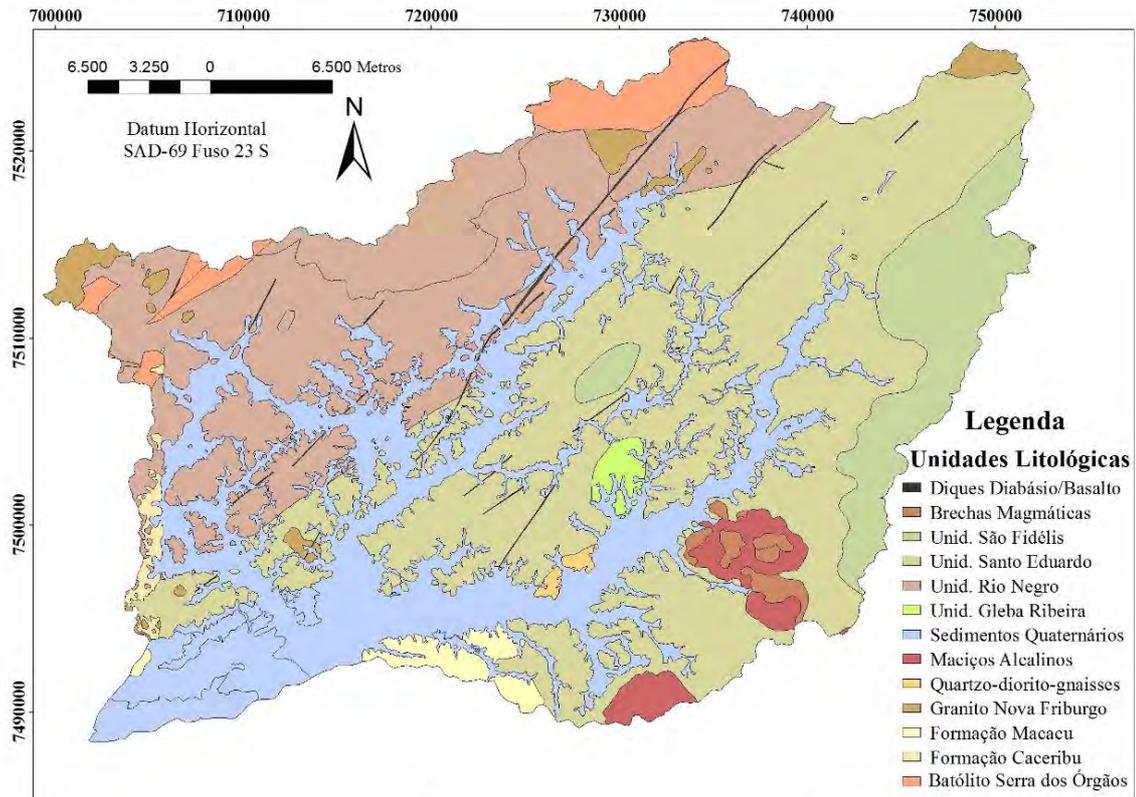
O Domínio Juiz de Fora/Paraíba do Sul ocupa faixa com orientação nordeste na porção central da área de estudo, sendo constituído por rochas do Complexo Paraíba do Sul, de idade mesoproterozóica. O Domínio Serra do Mar ocupa a região centro-oriental do estado correspondendo geograficamente à microplaca da Serra do Mar, composta por sucessão de arcos magmáticos referentes a diversos corpos granitóides de composição variando de granítica, granodiorítica a tonalítica, representadas pelo Complexo Rio Negro, Suíte Serra dos Órgãos, entre outras.

Uma revisão detalhada da geologia da área foi realizada com base em cartas na escala de 1:50.000, elaboradas pelo Projeto Carta Geológica do Rio de Janeiro, do Departamento de Recursos Minerais (DRM 1979, 1980a, 1980b, 1980c, 1981a, 1981b, 1984) indicou a predominância das seguintes unidades litológicas na região em estudo: Unidade Santo Eduardo, Unidade Rio Negro, Granito Nova Friburgo, Rochas Alcalinas, Formação Macacu, Sedimentos Paludais, Sedimentos Marinheiros, Sedimentos Litorâneos e Sedimentos Fluviais.

A Figura 16 apresenta o mapa da geologia da área, obtido a partir da união das cartas supracitadas. Algumas informações foram complementadas com base no texto explicativo e mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro, em escala 1:400.000 (CPRM, 2001).

O Complexo Rio Negro engloba as Unidades Santo Aleixo e Binger (Penha et al., 1979), que para os fins deste estudo, serão tratadas como Unidade Rio Negro. A Unidade Rio Negro também apresenta grande expressividade de área na bacia estudada e ocorre na porção norte e parte central, com direção NE-SW, relacionada com as unidades geomorfológicas Escarpas Serranas, Maciços Costeiros e Interioranos. Esta unidade é constituída por migmatitos variegados, com paleosoma de biotita-gnaiss, anfibólio-gnaiss e neosoma de rocha granitóide com granulometria fina a média contendo muscovita.

Associada a Unidade Rio Negro na porção norte da bacia está a unidade caracterizada como Batólito Serra dos Órgãos formada por Leucogranito e Granito/Granodiorito e em alguns pontos por migmatitos básicos. Formada por rochas granitóides de estrutura homófona e fluidal de composição quartzodiorítica a granítica a Unidade Granito Nova Friburgo está presente principalmente nas Escarpas Serranas na parte norte da bacia, constituindo maciços.



**Figura 16.** Mapa das unidades litológicas da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu (Fonte: compilado a partir das cartas do DRM, em escala 1:50.000).

A Unidade Santo Eduardo está localizada principalmente na porção Leste e Sul da área, formando uma faixa de direção NE-SO, constituída por gnaisses, predominantemente do tipo biotita-gnaisse, com textura variada e estrutura bandeada, com inclusões de granada. É possível a ocorrência de faixas de anfibólio-gnaisse e anfibolitos, e pequenos corpos (*boudins*) de anfibolitos e de rochas calcossilicáticas, podendo favorecer o aparecimento de inclusões de tipos de solos distintos da classe predominante em unidades de mapeamento localizadas sobre tais tipos litológicos. Esta unidade possui contato na parte leste com a Unidade São Fidélis, e na parte central com a Unidade Gleba Ribeira, de mineralogia de caráter máfico, além de apresentar inclusão de quartzo-diorito-gnaisses (Penha et al., 1979).

Todas estas seqüências de rochas pré-cambrianas e cambrianas foram injetadas por diques de rochas básicas, como Microbrechas magmáticas de matriz fonolítica, Microgabro e Diques de diabásio/basalto. Estas rochas são referentes ao magmatismo básico do Mesozóico, correlacionado ao episódio de abertura do Atlântico Sul. Importantes corpos intrusivos de Rochas Alcalinas ocorrem na porção centro-leste da área e estão relacionados com o magmatismo Meso-Cenozóico correspondente final do episódio supracitado. Estas rochas são constituídas predominantemente por sienitos e nefelina-sienitos, com destaque para o Complexo Alcalino de Rio Bonito que engloba três corpos (Rio Bonito, Soarinho e Tanguá). Brechas magmáticas com matriz de traquito e/ou fonolito também são encontradas associadas com estes corpos de Rochas Alcalinas.

Na porção oeste limítrofe com a Baía de Guanabara ocorre uma série de ambientes de sedimentação quaternária, associados a sistemas deposicionais de origem continental e transicional/marinho. Este conjunto faz contato com rochas do embasamento, principalmente, das Unidades Rio Negro, Santo Eduardo e com a Formação Macacu.

As coberturas cenozóicas relacionadas com a Formação Macacu são expressivas na porção central e leste. A Formação Macacu é formada por uma sucessão de lentes de

cascalhos finos e angulosos, em camadas pouco espessas de sedimentos predominantemente arenosos, arredondados e pouco consolidados, de idade plio-pleistocênica. Esses sedimentos são intercalados com materiais arenosos ou areno-argilosos compondo camadas ricas em fragmentos de feldspatos, podendo apresentar predominância sobre o quartzo quando associado com transporte de regolitos pouco intemperizados, durante evento tectônico com movimentação de blocos no terciário (Projeto RADAMBRASIL, 1983). Estes depósitos aparecem de forma descontínua, relacionados às formações aluviais do baixo e médio curso dos rios da bacia e das planícies fluvio-marinhas, possuem textura areno-silto-argilosa e níveis de cascalheiras associados a depósitos de talús, sedimentos lacustres e manguezais (Ecologus-Agrar, 2003). As camadas de materiais argilo-arenosos marcadas por linhas de quartzo anguloso, sugerem que a deposição foi ligada a fluido de alta densidade, enquanto que a deposição de materiais argilo-sílticos demonstra ambientes de baixa energia e transporte em suspensão (Projeto Macacu, 2010).

Os Sedimentos Quaternários englobam diferentes tipos de materiais, sendo reflexos da posição dentro da bacia. Estes são divididos em Sedimentos Paludais, Sedimentos Litorâneos e Sedimentos Fluviais. Os Sedimentos Paludais são depósitos de turfa de coloração acastanhada a negra, localizados nas bordas da Baía de Guanabara e com forte influência marinha (manguezais). Os Sedimentos Marinhos compreendem argilas e argilas arenosas de caráter marinho de fundo de baía. Os Sedimentos Litorâneos são formados por areias quartzosas de coloração esbranquiçada, podendo conter traços de feldspatos (CPRM, 2001).

Mais expressivos nas bacias estudadas são os Sedimentos Fluviais caracterizados por formação de areias quartzosas e feldspáticas com estratificações cruzadas de origem nos canais fluviais, exibem cores esbranquiçadas, amareladas, acastanhadas, acinzentadas e azuladas, geralmente com matriz argilosa a siltosa que podem conter mica e traços de máficos, com granulometria fina a conglomerática. A matriz de argilas e siltes micáceos, em geral mal selecionados com grãos angulares a subangulares de origem aluvial, podendo apresentar coloração cinzenta, amarelada ou azulada de planície de inundação.

Outras unidades (Cassorotiba, Tinguí, São Fidélis, Gleba Ribeira), têm pouca expressão na área, sendo assim, informações adicionais sobre estas unidades devem ser buscadas nas citações relacionadas acima.

#### **e) Geomorfologia**

A bacia hidrográfica situa-se em região de transição entre relevos degradacional e agradacional, onde abrigam a porção mediana e distal do curso das drenagens principais, rios Macacu e Guapi-Mirim. Os relevos agradacionais são representados pelas Planícies Aluviais, terrenos com declives suaves, compostos por leques alúvio-colúviais, terraços fluviais e/ou planícies de inundação na transição para os canais principais para Planícies Colúvio-Alúvio-Marinhas. Os terrenos muito mal drenados ocorrem na transição dessas planícies com Sistema Depositional Costeiro Marinho, condicionando canais meandantes influenciados pelas marés, na porção distal da bacia. Nas planícies de inundação, os sedimentos compreendem argilas e siltes micáceos com estratificação cruzada, de canais fluviais, com depósitos aluvionares.

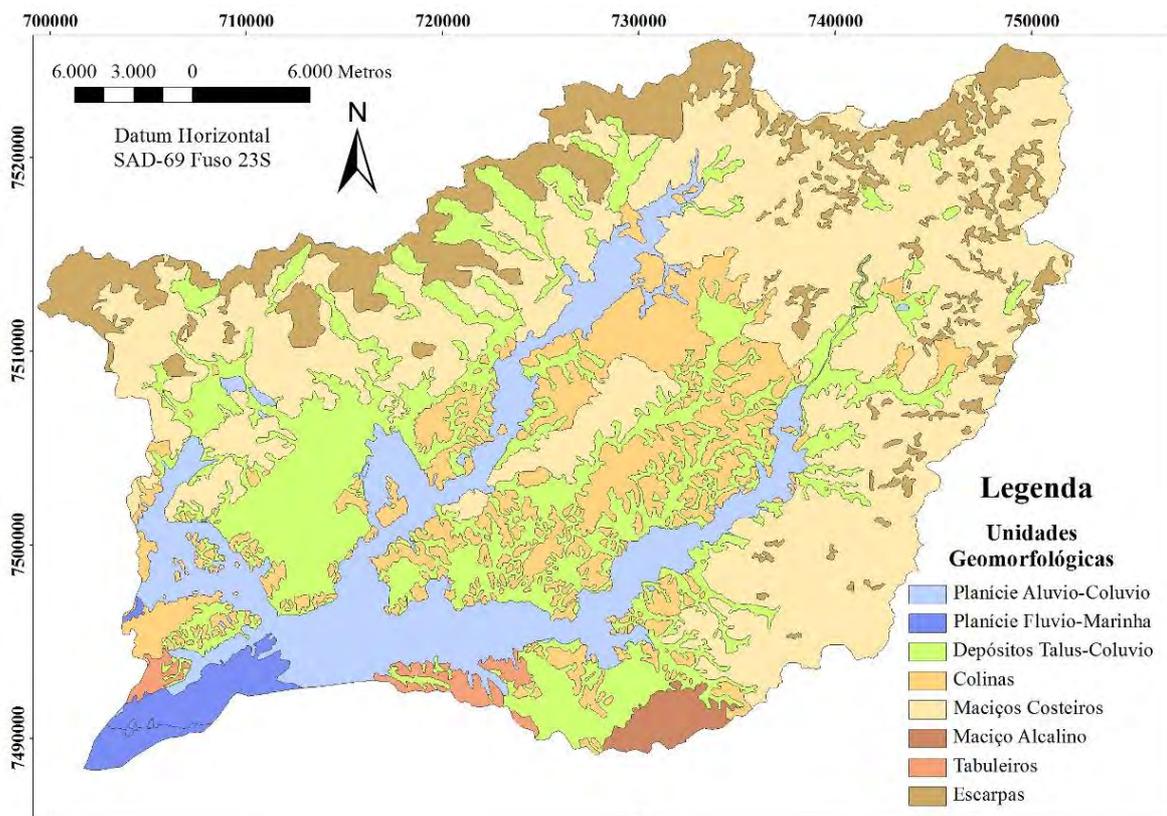
A porção mediana da bacia dos rios Macacu, Aldeia, Caceribu e Iguá, com pouca amplitude topográfica (menor que 50 metros) e baixa densidade de drenagem, ocasiona declives suaves a ondulados e solos com sedimentação de colúvio e alúvio, provenientes dos Tabuleiros da Formação Macacu dissecados pelos rios (Projeto Macacu, 2010).

À montante dos tabuleiros, tem-se o domínio Suave Colinoso, com densidade de drenagem de média a baixa, pouca amplitude topográfica (até 100 metros), declive suave e solos colúviais e aluviais. Entremendo a baixada no relevo de degradação, no domínio de

Colinas Isoladas, ocorrem solos com sedimentação de colúvio e eventuais vales onde a drenagem é imperfeita (Ecologus-Agrar, 2003).

Na porção proximal destes rios, ocorre relevo montanhoso e extremamente acidentado relativo ao Maciço Costeiro, com densidade alta de drenagem e amplitudes topográfica superiores a 300 metros, assim como o declive condicionando solos rasos com afloramento de rocha e depósitos de talús e colúvio. Colinas Dissecadas e Morros Baixos ocorrem associados ao alto curso dos rios dos Duques e Tanguá, com densidade de drenagem de média a alta e amplitudes topográficas de 100 e 200 metros, condicionando declives suaves a moderados e solos sobre sedimentos coluviais e aluviais (Projeto Macacu, 2010).

A Figura 17 mostra o mapa de geomorfologia, que foi adaptado do levantamento existente para o Estado do Rio de Janeiro, em escala 1:250.000 (CPRM, 2001). O procedimento para obtenção do mapa envolveu a vetorização das distintas unidades de mapeamento, através das ferramentas de edição do ArcGIS Desktop v.10.



**Figura 17.** Mapa da geomorfologia da bacia hidrográfica. Fonte: adaptado CPRM (2001).

#### f) Solos

A caracterização dos solos da bacia teve como base para conhecimento prévio, o trabalho de Carvalho Filho et al. (2003) para o Estado do Rio de Janeiro (escala 1:250.000).

A Figura 18 apresenta o mapa de solos, adaptado para as dimensões da bacia em estudo. A classificação dos solos respeitou a utilizada pelos autores (Embrapa, 1999). Sendo assim, a simbologia utilizada na legenda corresponde às respectivas classes: SGd- PLANOSSOLO HIDROMÓRFICO; RUbd- NEOSSOLO FLÚVICO, RLd- NEOSSOLO LITÓLICO, PVAd- ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO, PAd- ARGISSOLO AMARELO, LVAd- LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO, GXbd + GMa- GLEISSOLO

HÁPLICO + GLEISSOLO MELÂNICO, GJi- GLEISSOLO TIOMÓRFICO, CXbd- CAMBISSOLO HÁPLICO, AR- AFLORAMENTO DE ROCHAS.

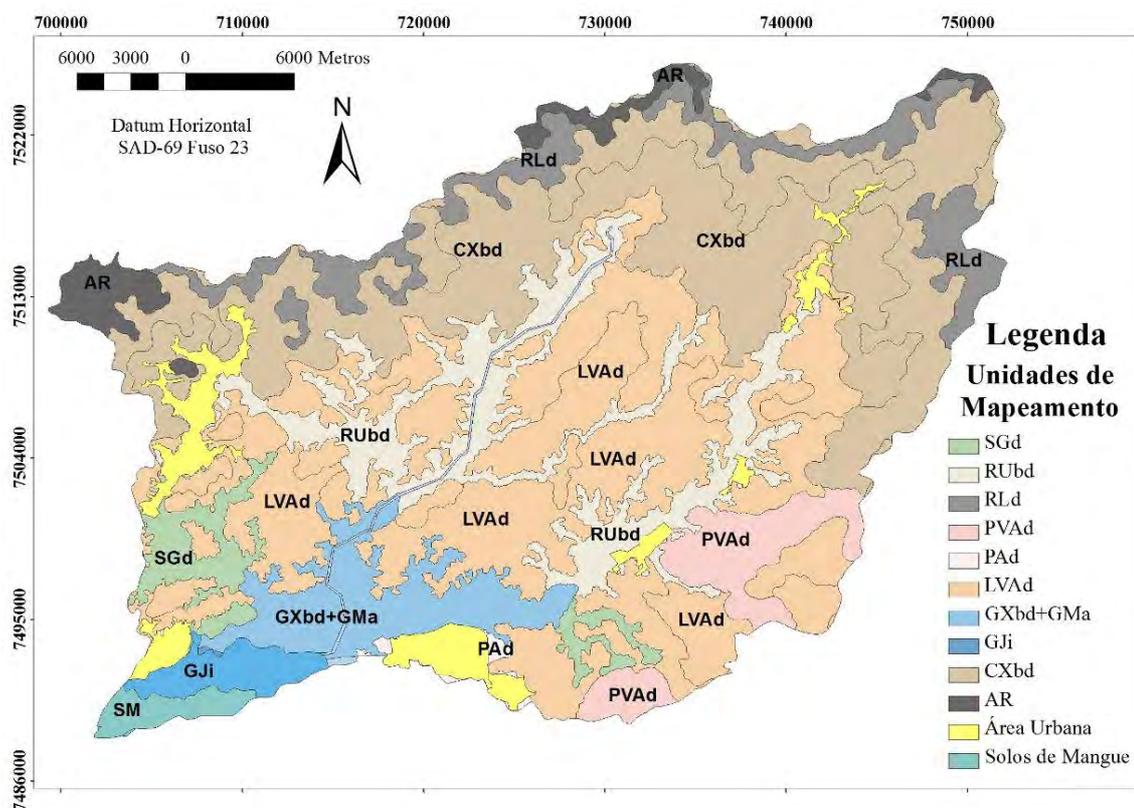


Figura 18. Mapa de Solos da Bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, (Fonte: adaptado de Carvalho Filho et al., 2003).

De acordo com o mapa de solos adaptado do ‘Levantamento de Reconhecimento de Baixa Intensidade dos Solos do Estado do Rio de Janeiro’, observa-se dominância das classes dos LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS e CAMBISSOLOS HÁPLICOS. A primeira classe predomina na parte central da bacia, no domínio geomorfológico de colinas e morrotes, e a segunda nas áreas de escarpas serranas, juntamente com os NEOSSOLOS LITÓLICOS e afloramentos de rocha. Os ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS têm ocorrência restrita na parte sul-sudeste da bacia hidrográfica, ligada aos maciços alcalinos e brechas magmáticas. Os ARGISSOLOS AMARELOS possuem pouca expressão na área e encontram-se sob áreas urbanizadas, assim como parte dos PLANOSSOLOS HÁPLICOS.

Nas áreas rebaixadas da bacia hidrográfica, ocorrem os tipos pedogenéticos influenciados por processos hidromórficos, como os NEOSSOLOS FLÚVICOS e GLEISSOLOS. Os primeiros ocorrem predominantemente nos limiares dos principais drenos (rios Macacu e Guapi-Açu) em relevo plano, em sua maioria sendo intensamente utilizados para agricultura. A outra classe de solos hidromórficos contempla os GLEISSOLOS HÁPLICOS, MELÂNICOS e TIOMÓRFICOS. Os GLEISSOLOS HÁPLICOS e MELÂNICOS estão localizados na parte central-sul da bacia e são usados predominantemente para pastagem. Já os GLEISSOLOS TIOMÓRFICOS ocorrem próximos à foz da bacia, no entorno da Baía de Guanabara, associado aos ORGANOSSOLOS e GLEISSOLOS SÁLICOS, ambos sob vegetação de mangue, tolerante às limitações ambientais destes locais. Tais solos, embora impróprios para desenvolvimento urbano, são colonizadas por população de baixa renda, devido à densidade de pessoas e expansão das cidades do entorno da baía.

### 3.4.2. Atributos Morfométricos

Os atributos derivados de MDE's, representados por modelos numéricos contínuos são classificados como primários, como a declividade, aspecto e curvatura, ou secundários, como o índice topográfico combinado ou índice de umidade, e a radiação solar (Moore et al., 1993; Zhu et al., 2001; Smith et al., 2006; Chagas, 2006). Atributos do terreno como o índice topográfico combinado (CTI, sigla em inglês), usado na caracterização de zonas de saturação e teor de água no solo, são úteis para o estudo de solos hidromórficos (Moore et al., 1991). Atributos do terreno (plano de curvatura e CTI) foram usados para prever características como profundidade do horizonte A e espessura do *solum* (Gessler et al., 1995).

Sendo assim, a partir do MDE corrigido, foram derivados atributos do terreno (atributos primários e secundários) importantes para entendimento da variação dos mecanismos e fatores de formação dos solos mais importantes na paisagem. Os atributos do terreno, ou parâmetros morfométricos da superfície, considerados neste estudo, são representados por modelos matriciais e caracterizados nos itens subsequentes.

#### a) Altimetria

O modelo digital de elevação é representado por uma grade regular (formato matricial) com tamanho de célula pré-definido, cujo valor corresponde à cota de elevação local. A grade que representa a variação da altimetria da área foi definida após as avaliações descritas no Capítulo I. O MDE selecionado foi gerado com resolução espacial de 30 m, a partir da interpolação de dados primários de elevação na forma vetorial, representados por curvas de nível, pontos cotados, dados do sensor SRTM convertidos para forma de pontos cotados e selecionados apenas os de cotas inferiores à 20m de altitude, e hidrografia. A interpolação foi restrita ao limite da bacia hidrográfica.

#### b) Declividade

A declividade é a expressão do potencial de movimento de massa, velocidade do fluxo de água e outros agentes erosivos. Por essa razão, merece destaque entre os atributos topográficos utilizados no mapeamento digital de solos, devido a influência direta na pedogênese, condicionando o teor de água que um solo pode reter, o potencial de erosão ou deposição, entre outros processos fundamentais (Gallant e Wilson, 2000).

O declive representa a taxa máxima de mudança no valor de uma célula em relação às células vizinhas, calculado a partir da primeira derivada direcional em x e y, gerada pelo modelo de elevação. Usualmente é expressa em porcentagem, mas pode ser apresentada em graus. Segundo Hickey et al. (1994), uma das limitações em se calcular a distância de declive, a partir do modelo digital de elevação, consiste na baixa resolução na qual os modelos são gerados, onde pequenas feições com escoamento mais lento são perdidas. Maiores resoluções (menores que 30 m) permitem melhor acurácia na modelagem destes atributos.

Diante da importância da declividade, como agente modelador e também resultante dos processos de formação das paisagens, este atributo é primordialmente usado para análise do terreno, sendo importante para verificar a coerência do MDE (Carvalho Júnior, 2005).

O mapa de declividade foi derivado do modelo digital de elevação, elaborado pelo método do ajustamento da superfície, utilizando o módulo "*Spatial Analyst Tools: Surface: Slope*" do programa ArcGIS Desktop v.10. Detalhes sobre o algoritmo específico para o cálculo da declividade podem ser obtidos em Burrough (1986).

#### c) Aspecto

O aspecto pode ser entendido como a direção da declividade, representado por valores em graus variando de 0 a 360°, medidos a partir do norte em sentido horário (ESRI, 1994). Importante para interpretações quanto à face de exposição ao sol, temperatura, umidade, entre outros atributos do terreno. Este atributo pode ser subdividido em quatro ou mais classes, de

direções das vertentes de exposição, sendo usualmente indicado pelo azimute (em graus) ou de acordo com a direção cardeal (por exemplo, SW- sudoeste).

O tema que corresponde ao Aspecto ou face de orientação da vertente de exposição foi obtido no módulo “*Spatial Analyst Tools: Surface: Aspect*”. O aspecto é importante atributo em estudos onde a radiação solar é relevante e tem seu efeito acentuado em terrenos montanhosos com relevo movimentado (Carvalho Júnior, 2005). Juntamente com a declividade e a curvatura, o aspecto é classificado como atributo primário, derivado diretamente do modelo digital de elevação.

### **c) Superfícies de curvatura**

A superfície de curvatura é gerada a partir de uma grade de altitude, o valor de uma célula (central) é calculado a partir de uma vizinhança de 3x3 células. Valores positivos representam superfície convexa, negativos uma superfície côncava e valores iguais ou próximos a zero indicam superfícies planas. Valores considerados razoáveis, para áreas de relevo moderado variam de -0,5 a 0,5, porém em áreas de relevo movimentado podem variar entre -4 e 4 (ESRI, 1994). O processamento da curvatura, em função da grade de elevação gera duas grades, uma para perfil e outra para plano de curvatura, que auxiliam na interpretação das características morfológicas da paisagem como susceptibilidade à erosão, escoamento superficial e fluxo, entre outros (Hall e Olson, 1991).

Tratando-se de geomorfologia, a curvatura traduz o conceito de superfície geomórfica, que envolve um plano bidimensional (largura e comprimento), no espaço e no tempo. Representa a forma resultante da evolução da paisagem, que pode ser construcional ou erosional, côncava ou convexa, plana ou declivosa, ou linear (Daniels e Hammer, 1992). Sua importância no estudo de solos deve-se à identificação de áreas propícias a remoção ou adição de sedimentos, através das combinações entre perfil e plano de curvatura, resultando em formas côncavas, convexas ou planares (Hall e Olson, 1991; Carvalho Júnior, 2005).

O modelo que representa as superfícies de curvatura foi gerado no módulo “*Spatial Analyst Tools: Curvature*”, do ArcGIS Desktop v.10, onde é possível obter opcionalmente as grades contínuas que representam o perfil e plano de curvatura, através das opções “Profile Curvature” e “Plan Curvature”, respectivamente.

### **d) Índice topográfico combinado (CTI)**

O índice de umidade ou índice topográfico combinado (CTI, sigla em inglês) é classificado como atributo topográfico secundário, definido em função da declividade e área de contribuição por unidade de largura ortogonal à direção do fluxo. A morfologia de um solo reflete diretamente as condições de umidade e da dinâmica do fluxo da água, presente ou pretérita. Sendo assim índices de umidade são de grande importância para compreensão dos processos pedogenéticos. O índice CTI é muito utilizado para caracterizar a distribuição espacial de zonas de saturação e teor de água no solo (Moore et al., 1991). Entretanto a aplicação deste índice em áreas planas pode não apresentar confiabilidade, uma vez que foi desenvolvido para ser utilizado em áreas declivosas.

O índice topográfico combinado foi obtido a partir de sequência de comandos efetuados no módulo “*grid*” do ArcINFO v.10.

### **e) Distancia euclidiana da hidrografia**

Descrita por uma função de linhas de distancias diretas, que traduz a relação de cada célula com uma fonte ou conjunto de fontes. A grade (*grid*) que representa a distância euclidiana da hidrográfica mostra a distância de cada célula à célula mais próxima da rede de drenagem (vetorial). O cálculo da distância euclidiana pode fornecer opcionalmente três grades, sendo a primeira e mais importante, utilizada neste estudo. Os dois temas opcionais, identificam a fonte para qual os valores foram calculados e o sentido da linha de distancia (ESRI, 1994). Quanto a importância deste tema para o estudo de solos, o cálculo da distância

euclidiana possibilita caracterizar as áreas com maior influência da rede de drenagem, e/ou susceptíveis a inundações e alagamentos.

A distância euclidiana da hidrografia foi calculada pela ferramenta “*Distance*” na opção “*Euclidean distance*” do ArcGIS Desktop v.10.

#### **f) Radiação solar**

A radiação solar é fonte de energia primária para a realização dos processos físicos e biológicos que ocorrem em um sistema natural. A radiação solar exerce grande influência sobre o microclima estabelecido no solo, condicionado pela quantidade e intensidade de radiação direta que recebe que, por sua vez, depende diretamente do aspecto e da declividade. Dessa forma, a orientação da encosta e a declividade são utilizadas, juntamente com o modelo digital de elevação, no cálculo deste atributo, classificado como secundário.

A topografia do terreno é responsável pela incidência de radiação solar em determinada área, e conseqüentemente, sobre o regime de temperatura e umidade do solo que se estabelece em função da latitude, declividade, orientação da encosta, entre outros parâmetros (Wilson e Gallant, 2000). Sendo o aspecto considerado uma medida robusta e simplificada da radiação solar incidente.

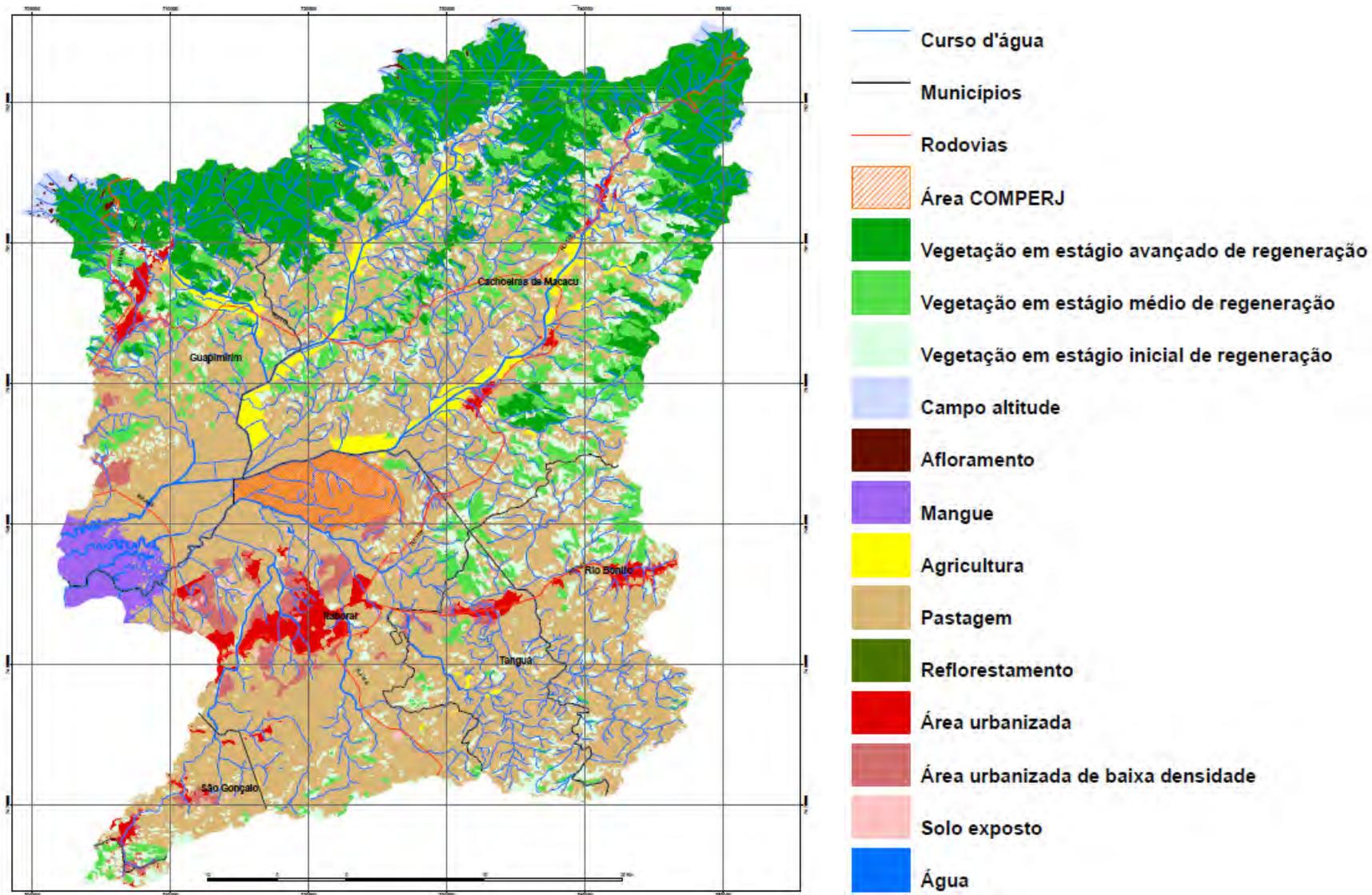
A radiação solar foi obtida no módulo “*Spatial Analyst Tools*”, pela opção “*Solar Radiation: Área Solar Radiation*”, que utiliza como dados de entrada o modelo digital de elevação, o aspecto e declividade derivados do mesmo, e ainda nesta mesma caixa de diálogo foram configurados os parâmetros de latitude e opção de cálculo baseado no ano de 2011, com intervalo mensal. Optou-se por manter as demais variáveis (uniformidade do céu, intervalo de hora) de acordo com a sugestão (*default*) do programa.

#### **3.4.3. Seleção dos Locais de Coleta de Amostras e Descrição de Perfis**

De posse dos modelos dos atributos topográficos derivados do MDE (incluindo o próprio), foram definidos os locais para a coleta e classificação dos solos através de esquema de amostragem de solos em função da casualização das amostras e representatividade de algumas características da paisagem (altimetria, declividade, curvatura e uso do solo). Com o uso do programa “*Conditioned Latin Hypercube Sampling*” (cLHS), pretendeu-se atingir um efeito aleatório e simultaneamente com melhor distribuição da variação das propriedades dos solos, considerando ainda a viabilidade de execução. O programa cLHS (Minasny e McBratney, 2006) foi utilizado para definir a localização dos pontos que compõe o conjunto amostral. Ainda neste procedimento, foi utilizado programa ENVI v. 4.5 (ITT Visual Information Solutions, Inc.), para gerar o mapa de uso do solo. Este mapa tem um importante papel na etapa de seleção do conjunto amostral, devido à necessidade de restrição da casualização dos pontos de coletas de amostras nas áreas urbanizadas, incompatíveis com objetivos deste estudo, que trata da caracterização de unidades pedogenéticas.

O mapa de Uso do Solo da bacia foi originado da classificação supervisionada de imagens do sensor TM do satélite Landsat 5 e gerado no programa ENVI v. 4.5, pela combinação das bandas 1 (0,45 0,52  $\mu\text{m}$ ), 2 (0,53 0,61  $\mu\text{m}$ ), 3 (0,63 0,69  $\mu\text{m}$ ), 4 (0,76 0,90  $\mu\text{m}$ ), 5 (1,55 1,75  $\mu\text{m}$ ) e 7 (2,08 2,35  $\mu\text{m}$ ), referentes ao ano de 2007. As diferentes combinações destas faixas espectrais destacam diferentes tipos de uso da superfície, servindo de subsídio para diversas aplicações nos estudos ambientais (Rios et al., 2010).

O mapa de uso do solo da bacia hidrográfica (Figura 19) foi adaptado de Embrapa (2009) e divide as áreas segundo o uso atual e a cobertura vegetal, nas seguintes classes: afloramento rochoso, área agrícola, campo de altitude e inundável, mangue, pastagem, solo exposto, vegetação em estágio de regeneração inicial, médio e avançado e área urbana.



**Figura 19.** Mapa dos tipos de uso do solo para as bacias hidrográficas dos rios Guapi-Macau e Caceribu (Fonte: Embrapa, 2009).

A Tabela 9 apresenta a distribuição relativa dos tipos de uso do solo na bacia hidrográfica.

**Tabela 9.** Tipos de uso do solo para a bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu

Classe de Uso	Área (%)
Água	0,16
Urbano	1,18
Urbano (Baixa Densidade)	1,41
Área Agrícola	4,41
Pastagem	42,10
Mangue	0,48
Campos de Altitude	1,15
Afloramento Rochoso	0,27
Solo Exposto	0,01
Mata Secundária em Estágio Inicial	11,94
Mata Secundária em Estágio Médio	7,96
Mata Secundária em Estágio Avançado	28,93

Observando a Tabela 9 e a Figura 19 foi possível constatar que grande parte da área da bacia é utilizada para atividade pecuária (aproximadamente 42%). Embora o uso do solo para pastagem seja extensivo, os remanescentes florestais existentes e matas secundárias em diferentes estágios de regeneração representam 48,84% da área total da bacia. As áreas de produção agrícola estão concentradas ao longo de rodovias e das principais drenagens da bacia, em locais de mais fácil acesso, e as baixadas são comumente cultivadas com olerícolas e tubérculos (Pedreira et al., 2009). Neste estudo os autores também constataram o uso de terras para fruticultura e plantio de coco.

A operação de casualização dos pontos de amostragem necessitou da conversão do modelo digital de elevação (formato *raster*) em arquivo de pontos, adicionando as coordenadas e os valores dos atributos utilizados (altimetria, declividade, curvatura e uso do solo), também foram excluídas áreas identificadas como urbanizadas. O cálculo utiliza como arquivo de entrada a tabela de pontos inclusos no limite do acesso definido mediante análises preliminares para definição do tamanho adequado da distância do acesso por estrada. No procedimento de casualização foram especificados: o arquivo de entrada que contém a tabela, número de variáveis (no caso 4; x e y não são consideradas como variáveis), o número de amostras (100), e as interações (20000) desejadas.

A seleção do tamanho adequado para a restrição do acesso envolveu a comparação das variáveis do terreno entre os pontos obtidos pelo cLHS, os pontos inclusos na área total limitada por diferentes distâncias de acesso das estradas (50, 100 e 200m) e os pontos contidos na área total da bacia hidrográfica.

A descrição dos perfis e a coleta de amostras para determinação dos atributos físicos e químicos obedeceram às normas descritas em Santos et al. (2005) e a classificação dos solos foi realizada até o quarto nível categórico, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006).

Nas amostras de solo foram feitas as seguintes análises: composição granulométrica (cascalho, areia grossa, areia fina, silte e argila), argila dispersa (ADA), grau de floculação (GF), relação silte/argila, densidade do solo (Ds) coletadas com anéis Kopeck e tipo Uhland, densidade das partículas (Dp), pH em H<sub>2</sub>O e em KCL 1N, bases trocáveis (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>), componentes da acidez (Al<sup>3+</sup>, H<sup>+</sup>), fósforo assimilável, carbono orgânico, nitrogênio total; e foram calculados os índices: soma de bases (S), percentagem de saturação por bases

(V), capacidade de troca de cátions (T), porcentagem de saturação por alumínio (m), porcentagem de saturação por sódio (n), relação C/N, relação silte/argila e porosidade. Em casos específicos, foram também determinados os teores dos óxidos por ataque sulfúrico ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ), e calculadas as relações moleculares  $K_i$ ,  $K_r$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Os métodos para obtenção dos dados supracitados foram baseados em Embrapa (1997).

#### 3.4.4. Reconhecimento dos Padrões Geomórficos

O estudo dos padrões geomórficos é baseado nos modelos gerados para as variáveis ambientais (MDE e atributos derivados), e nas informações previamente obtidas, as quais incluem, mapa de geologia e dados do sensor TM do satélite Landsat 5, utilizados como base para obtenção do mapa de uso do solo. Optou-se por considerar as variáveis climáticas através da resultante destes componentes nos atributos morfométricos que representam a evolução das feições topográficas decorrentes dos processos físico-químicos.

Para caracterizar os padrões e tendência da variação dos atributos morfométricos foi coletado um conjunto amostral de 500 células (*pixels*) para cada pedodomínio, de forma compatível com as características dos pontos de observação (perfis e amostras extras) das classes de solos de maior expressão na bacia hidrográfica.

O reconhecimento dos padrões geomórficos foi baseado na estatística descritiva utilizada para caracterização da variação dos atributos morfométricos nos diferentes pedodomínios representados pelas respectivas classes de solos. Dessa forma, os parâmetros estatísticos (média e desvio padrão) são relativos aos atributos: altimetria, declividade, aspecto, curvatura, plano de curvatura, perfil de curvatura, índice topográfico combinado (CTI), distância euclidiana da hidrografia e radiação solar.

Para facilitar a identificação dos padrões geomórficos relativos aos pedodomínios considerados foi realizado o reescalonamento dos temas de forma a possibilitar a análise conjunta da variabilidade dos atributos morfométricos, buscando identificar as tendências em cada pedodomínio. O procedimento de reescalonamento, consiste em atribuir um intervalo de variação dos valores dos atributos que ocorrem em limite pré-definido, variando de 0 a 1. A operação consiste em cálculo de álgebra de mapas, no módulo “*Raster Calculator*”, no programa ArcGIS Desktop v.10, conforme a equação abaixo:

$$\text{Grade Re-escalada} = (\text{Grade de entrada-valor mínimo}) / (\text{valor máximo-valor mínimo})$$

Os mapas de geologia e de geomorfologia foram utilizados para complementar o conjunto de informações que auxiliaram na caracterização dos diferentes pedodomínios.

### 3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.5.1. Descrição dos Atributos Morfométricos

A seguir, são descritos os resultados obtidos para os atributos morfométricos derivados do modelo digital de elevação, utilizados como base para reconhecimento dos padrões geomórficos.

##### a) Altimetria

A Figura 20 mostra o modelo digital de elevação selecionado para representar a altimetria da bacia e derivar os atributos.

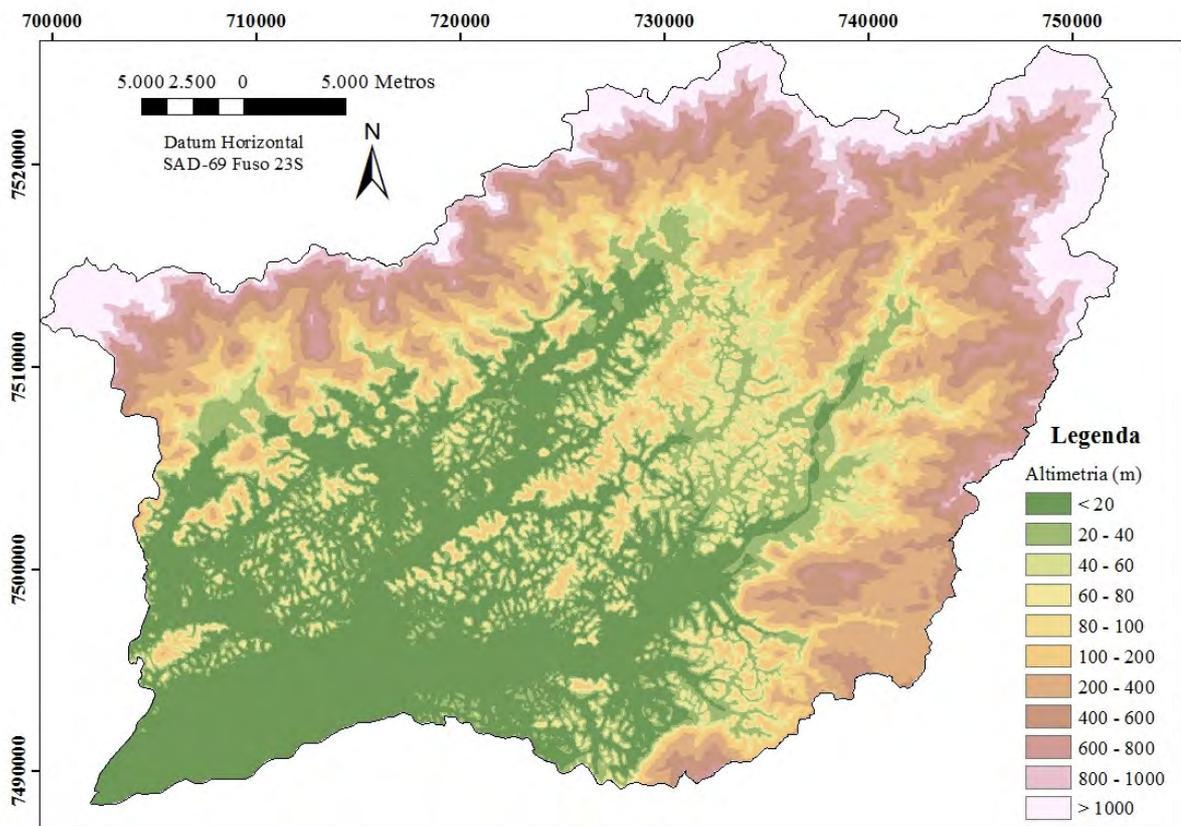


Figura 20. MDE selecionado para representar a altimetria da bacia hidrográfica.

A Tabela 10 apresenta a distribuição relativa das classes altimétricas conforme apresentado na Figura 20.

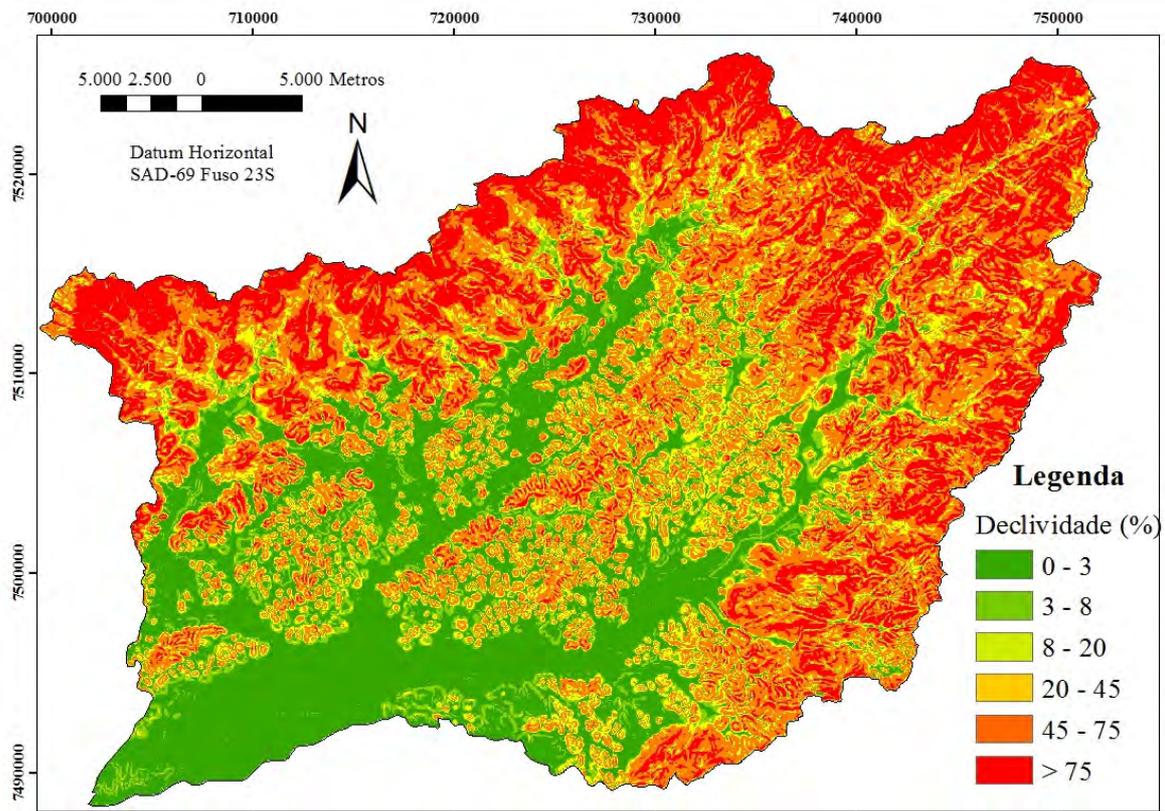
A distribuição em classes facilita a interpretação das condições do relevo da bacia hidrográfica. A tabela mostra que cerca de metade da bacia hidrográfica se encontra em áreas com cotas inferiores à 100m. Por outro lado, nota-se a amplitude de variação, que apresenta cerca de 10 por cento da área em elevação superior a 1000m de altitude. Tais fatos explicam o elevado coeficiente de variação deste atributo.

**Tabela 10.** Distribuição da elevação em classes

Classe	Área (%)
<20	26,27
50	15,31
100	11,61
200	9,85
400	12,74
600	8,59
800	5,63
> 1000	9,98

### b) Declive

O modelo que representa a declividade em termos de porcentagem (Figura 21) está de acordo com Embrapa (2006), nas classes de declive: plano (0 a 3%), suave ondulado (3 a 8%), ondulado (8 a 20%), forte ondulado (20 a 45%), montanhoso (45 a 75%) e escarpado (>75%).



**Figura 21.** Modelo da declividade para a bacia hidrográfica.

A Tabela 11 apresenta a distribuição da área da bacia em classes de declividade (expressa em termos de porcentagem).

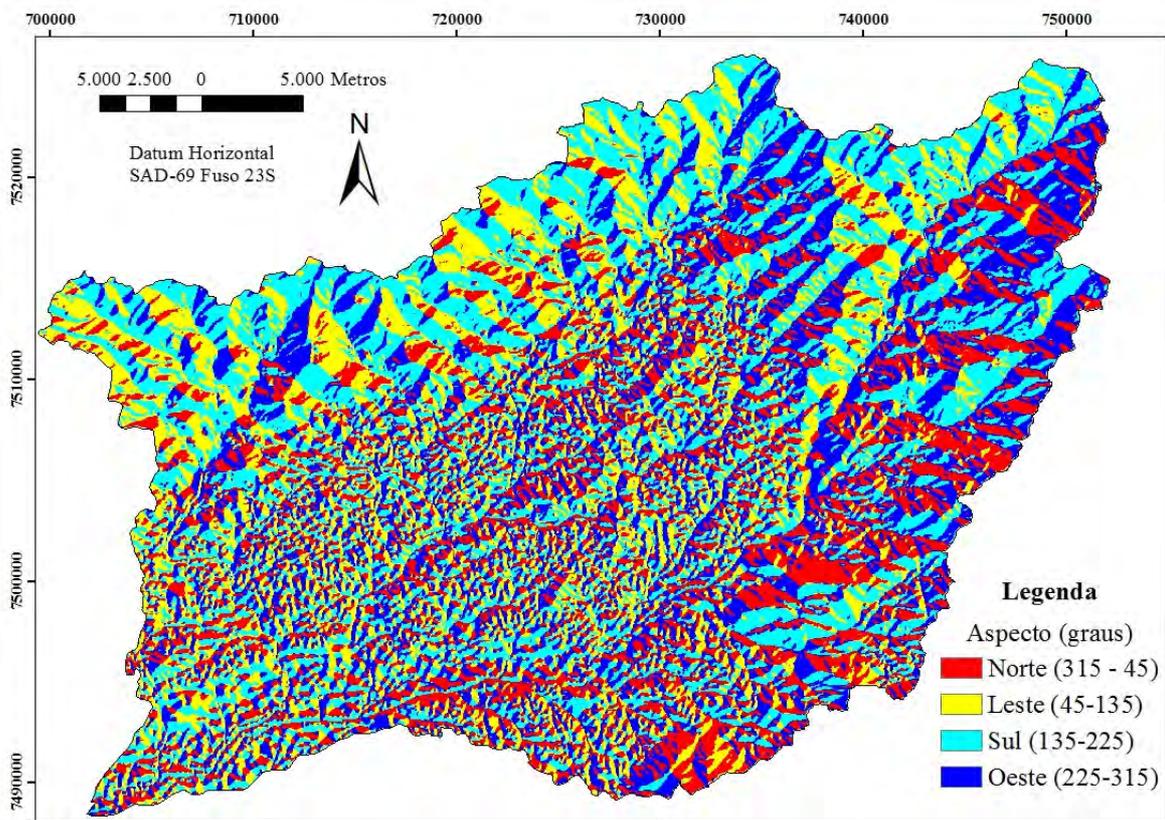
Os dados da tabela corroboram as observações feitas para os dados de elevação, mostrando que um quinto da bacia hidrográfica, encontra-se em declive plano. Em contrapartida, foi possível destacar a ocorrência de grande parte da bacia, sob declive acentuado, cerca de metade da área encontra-se nas classes Forte Ondulado a Montanhoso.

**Tabela 11.** Distribuição da declividade em classes, conforme Embrapa (2006)

Classe	Área (%)
Plano (0 a 3)	20,08
Suave Ondulado (3 a 8)	10,87
Ondulado (8 a 20)	13,78
Forte Ondulado (20 a 45)	33,60
Montanhoso (45 a 75)	17,43
Escarpado (> 75)	4,22

### c) Aspecto da Vertente

O produto derivado para representar aspecto ou orientação da vertente é apresentado na Figura 22. Visando facilitar a compreensão do comportamento deste atributo foi realizada a reclassificação de acordo com os pontos cardeais principais, portanto, a classe que corresponde às faces orientadas para norte, é representada pela soma da primeira e última classe de inclinação ( $0^{\circ}$ - $45^{\circ}$  e  $315^{\circ}$ - $0^{\circ}$ , respectivamente).



**Figura 22.** Modelo gerado para aspecto ou orientação da vertente.

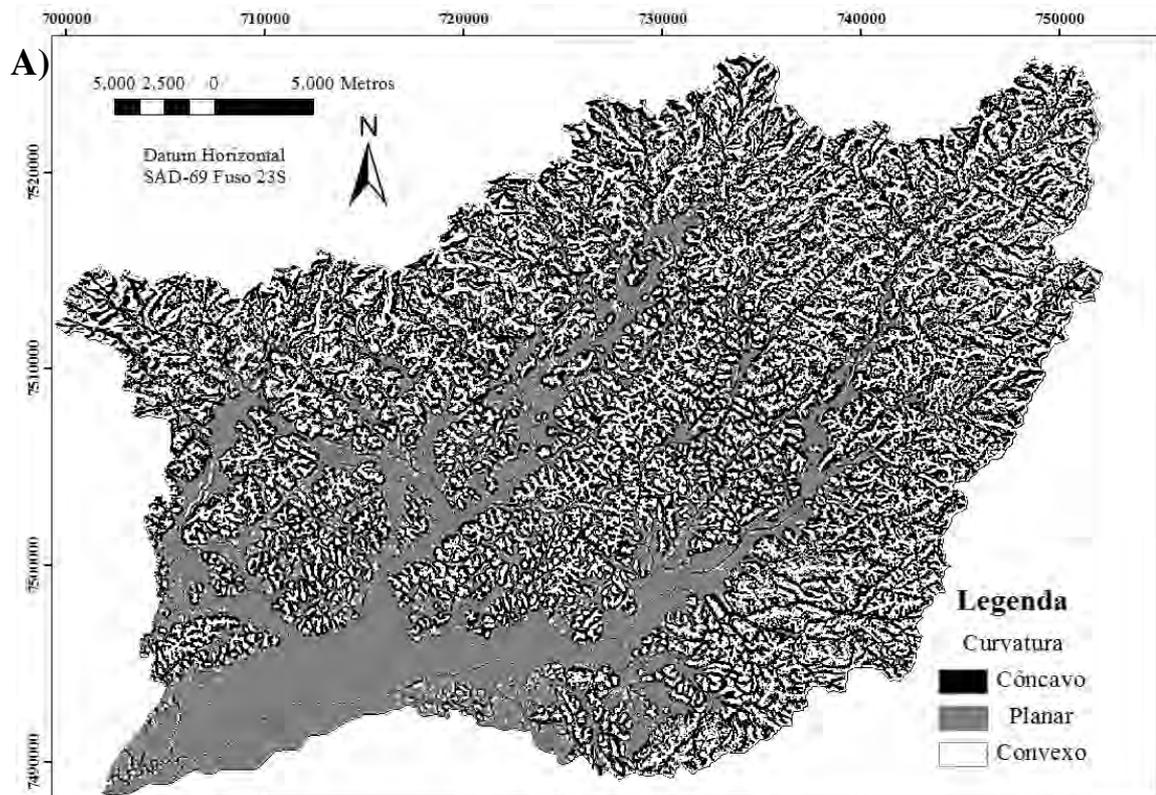
A Tabela 12 apresenta a distribuição da área da bacia hidrográfica em classes de orientação da vertente (distribuição relativa em porcentagem), conforme apresentado na Figura 22. A vertente predominante correspondente à face norte, com aproximadamente 37% da área da bacia hidrográfica. A classe Sul tem grande expressão na área (aproximadamente 24%) e estão localizadas, em sua maioria, nos maciços rochosos com declives acentuados.

**Tabela 12.** Distribuição da área da bacia em classes de aspecto.

Classe	Área (%)
Norte	36,98
Leste	18,87
Sul	23,92
Oeste	20,22

#### d) Superfícies de Curvatura

Para simplificar a apresentação dos resultados e interpretações posteriores foi realizada a reclassificação do produto final em três classes principais: superfícies convexas (valores superiores a 0,05), superfícies planares (valores entre -0,05 e 0,05) e superfícies côncavas (valores inferiores a -0,05). Os mapas que representam a curvatura e os seus componentes (perfil e plano de curvatura) são apresentados na Figura 23 A, B e C, respectivamente.



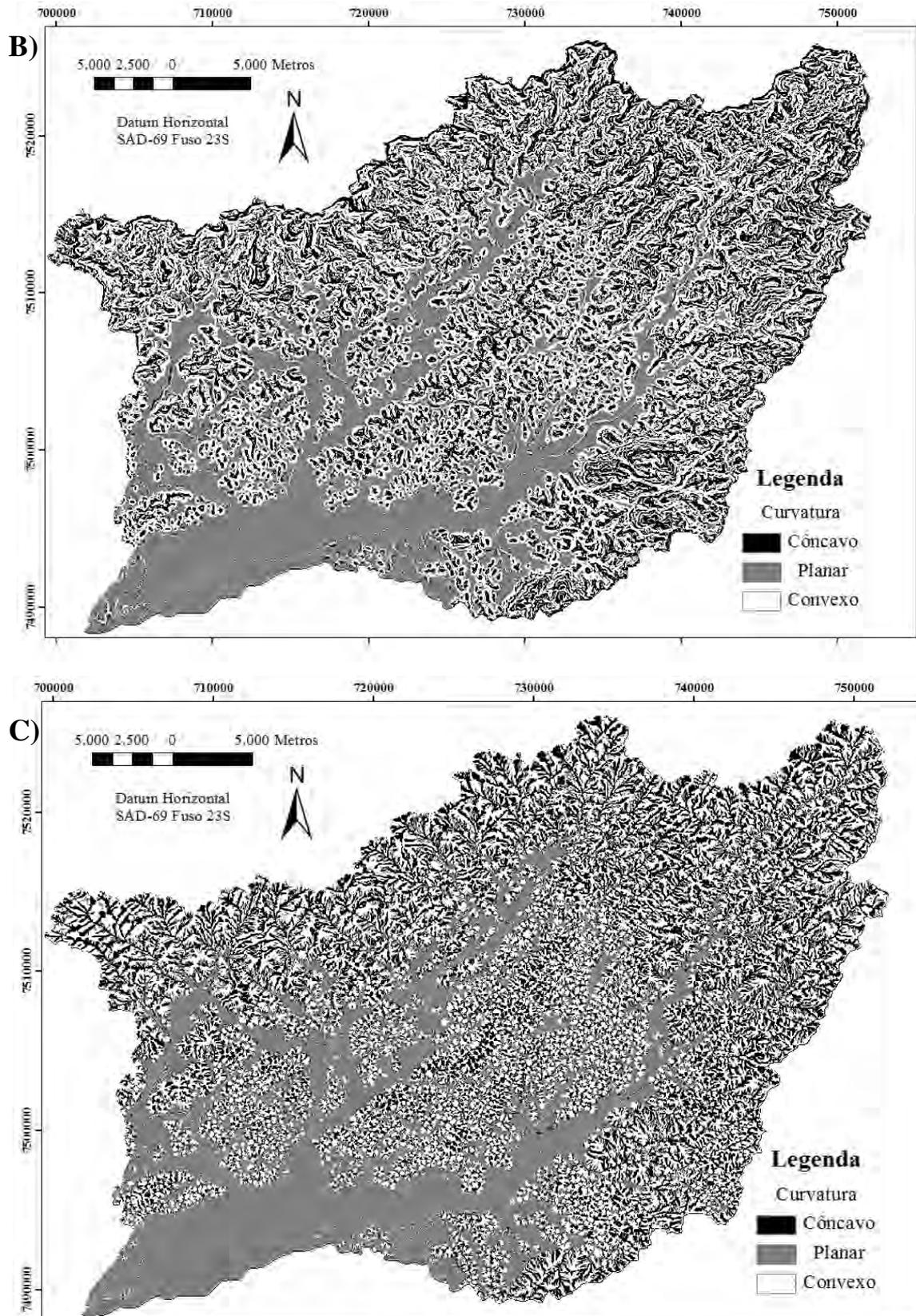


Figura 23. A) Mapa da curvatura, B) Mapa do perfil de curvatura, C) Mapa do plano de curvatura.

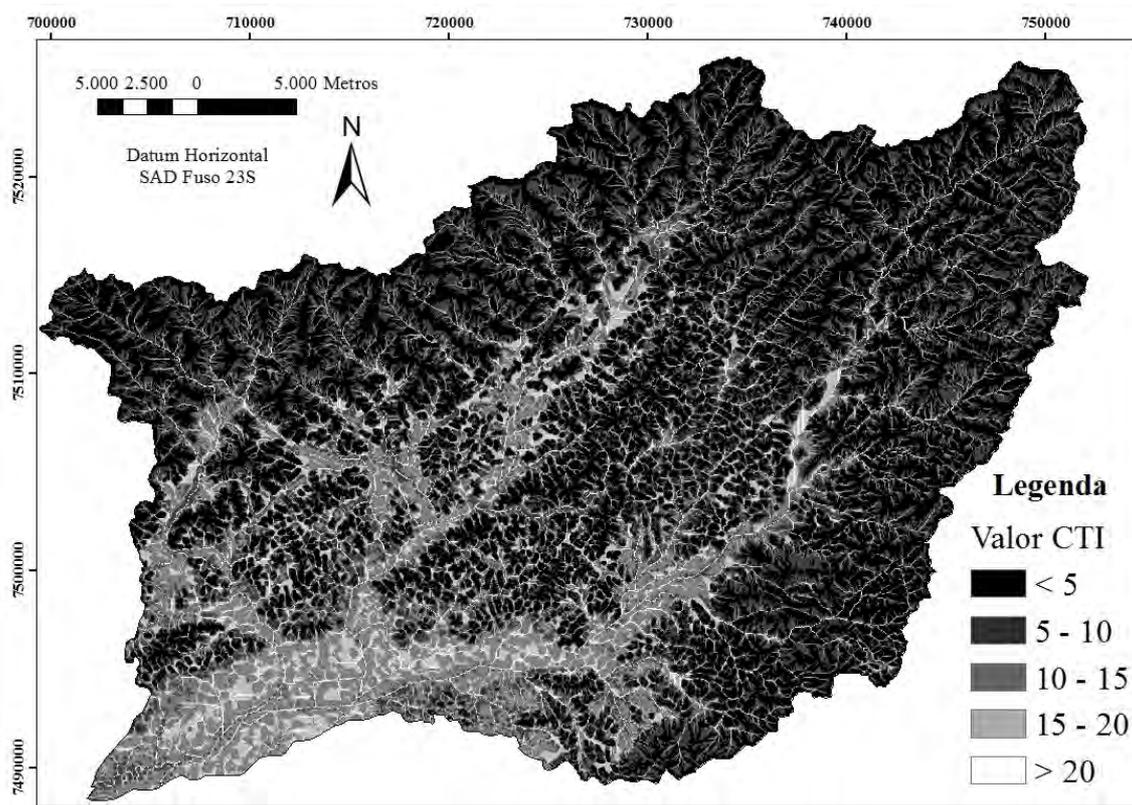
A Tabela 13 mostra os resultados para a curvatura e seus componentes (perfil e plano). Pode-se observar que a maior parte da área tem superfície convexa, cerca de 46%. Também foi possível verificar a expressão da curvatura Planar nos componentes perfil e plano de curvatura, embora quando considerados os dois componentes conjuntamente, no atributo Curvatura, a maior expressão em área foi observada para classe de superfície convexa.

**Tabela 13.** Distribuição dos temas curvatura, plano e perfil de curvatura, nas classes: côncava, planar, convexa.

Atributo	Área (%)			Valores	
	Côncava	Planar	Convexa	Mín.	Max.
Curvatura	15,52	38,39	46,09	-5,56	7,98
Perfil	11,56	66,27	22,17	-6,52	4,89
Plano	10,47	71,74	17,78	-3,39	4,18

### e) Índice Topográfico Combinado (CTI)

O mapa do índice topográfico combinado (CTI) na área da bacia hidrográfica é apresentado na Figura 24.



**Figura 24.** Modelo gerado para índice topográfico combinado (CTI).

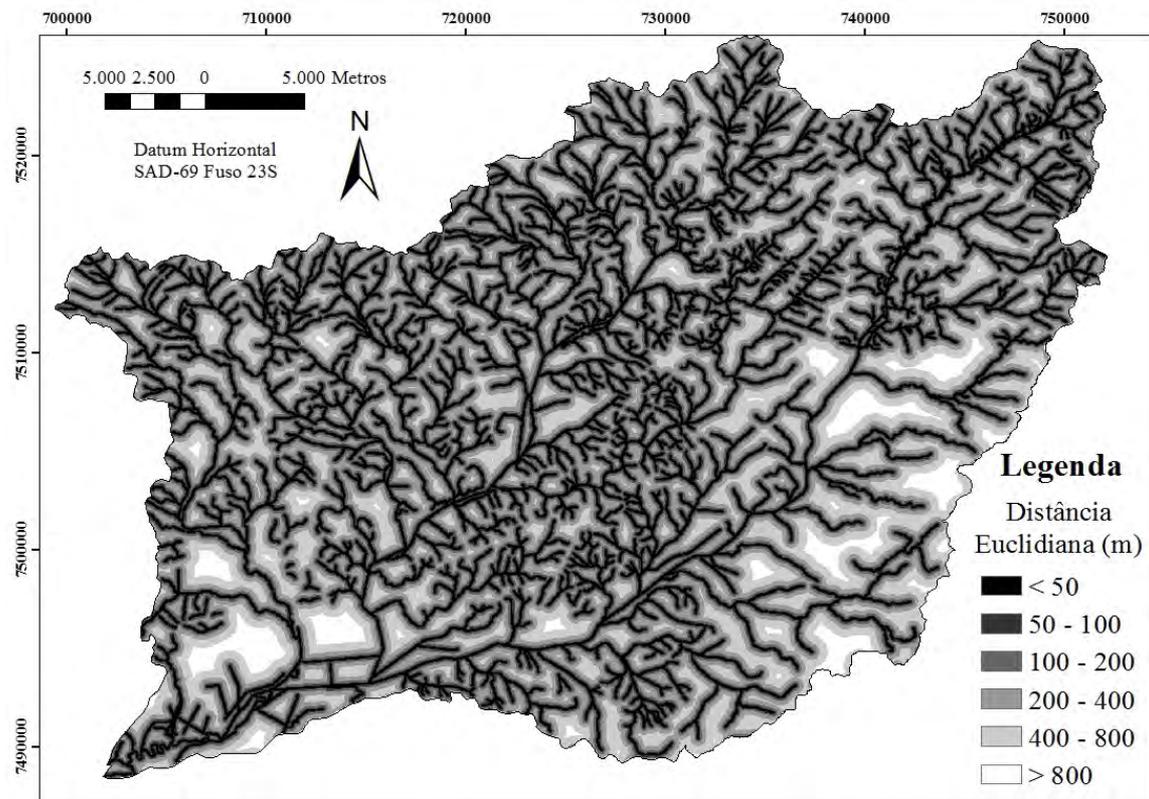
A Tabela 14 apresenta a descrição da distribuição da área da bacia hidrográfica em função das classes do índice topográfico combinado (CTI), conforme a Figura 24. Da tabela é possível inferir que as duas primeiras classes correspondem às áreas que drenam as colinas, maciços e contrafortes serranos, em diferentes sistemas de relevo, englobando cerca de 90 por cento da área. As três classes restantes (15, 20 e valores maiores que 20), representam os sopés de elevação, planícies sazonalmente alagadas, depressões e a foz da bacia hidrográfica.

**Tabela 14.** Distribuição do índice topográfico combinado em classes.

Classes	Área (%)
<5	13,33
10	75,97
15	9,17
20	1,32
>20	0,19

#### f) Distância euclidiana

O mapa resultante do cálculo da distância euclidiana da hidrografia é apresentado na Figura 25.



**Figura 25.** Modelo gerado para distância euclidiana da hidrografia.

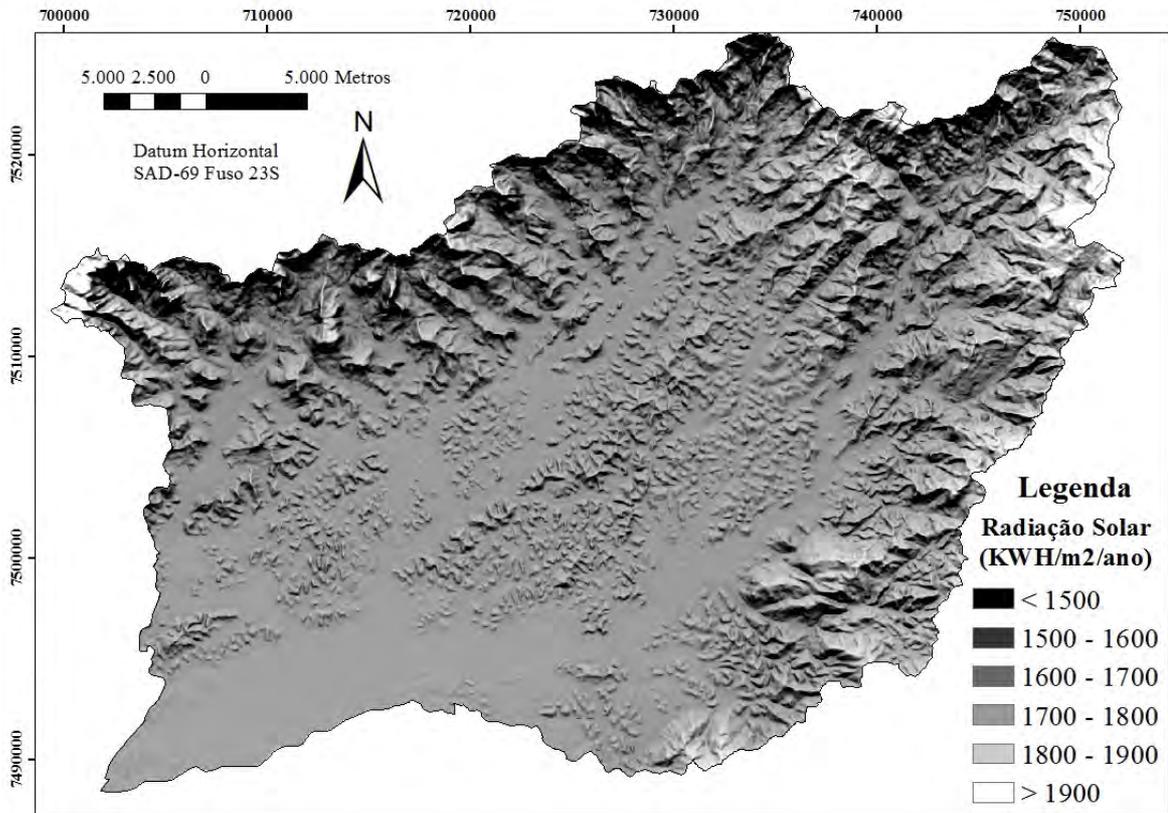
A Tabela 15 apresenta a distribuição relativa das classes definidas para o tema distancia euclidiana

**Tabela 15.** Distribuição da distância euclidiana da hidrografia em classes

Classes (m)	Área (%)
< 50	16,20
100	14,14
200	22,55
400	29,32
800	15,06
> 800	2,73

### g) Radiação solar

O mapa que representa a variabilidade da radiação solar, em (kWH/m<sup>2</sup>/ano), é apresentado na Figura 26.



**Figura 26.** Modelo gerado para radiação solar.

A Tabela 16 apresenta a distribuição relativa das classes definidas para o tema de radiação solar.

**Tabela 16.** Distribuição da radiação solar (KWH/m<sup>2</sup>/ano)

Classes	Área (%)
< 1500	24,42
1500 – 1600	24,80
1600 – 1700	46,28
1700 – 1800	3,50
1800 – 1900	0,63
> 1900	0,37

### 3.5.2. Definição do Conjunto Amostral

Os pontos selecionados de acordo com os limites de acesso testados foram sugeridos pelo programa *Conditioned Latin Hypercube Sampling - cLHS* (Minasny e McBratney, 2006), para se obter um conjunto de amostras representativas quanto a variabilidade dos atributos utilizados (altimetria, declividade, curvatura e uso de solos). A estatística descritiva para os atributos elevação e declividade considerando a totalidade da bacia, a largura dos *buffers* em função das distâncias das malhas viárias testadas (50, 100 e 200m) e dos 100 pontos amostrais sugeridos para cada um destes três *buffers* é apresentada na Tabela 17.

**Tabela 17.** Estatística descritiva para elevação e declividade, para toda bacia, área dos *buffers* e pontos amostrais coletados nos *buffers*.

Fontes de Dados	Máximo		Média		Mínimo		Desvio Padrão	
	Atitude (m)	Declive (%)	Atitude (m)	Declive (%)	Atitude (m)	Declive (%)	Atitude (m)	Declive (%)
Bacia Hidrográfica	2265,82	252,09	267,28	27,45	-0,08	0	373,57	24,82
<i>Buffer de 50m</i>	1290,34	134,65	86,05	13,19	1,568	0	159,08	15,48
<i>Buffer de 100m</i>	1335,81	135,41	88,68	14,15	1,542	0	160,62	16,15
<i>Buffer de 200m</i>	1397,76	135,41	94,90	15,81	1,542	0	164,92	17,13
Pontos casualizados em <i>Buffer de 50m</i>	993,96	74,08	84,41	14,63	3,228	0	148,30	16,27
Pontos casualizados em <i>Buffer de 100m</i>	801,85	65,45	74,22	16,69	3,955	0	127,73	16,71
Pontos casualizados em <i>Buffer de 200m</i>	993,96	74,81	91,81	16,56	3,463	0	163,16	16,98

Observando a tabela, nota-se que os valores para toda a bacia são superiores, tanto para a elevação quanto para a declividade, uma vez que esta inclui maciços e regiões serranas extremamente acidentadas sem condições de acesso viário, em sua maioria correspondente às áreas de preservação. O *buffer* que delimita o acesso não abrange estas áreas, ocasionando a discrepância dos valores que quando comparados à totalidade da bacia são subestimados.

Os valores obtidos para os diferentes *buffers* não apresentaram diferenças entre si indicando que a largura destes *buffers* exerceu pouca influência sobre as variáveis morfométricas quando comparadas com os dados descritivos da totalidade da bacia hidrográfica. O mesmo pode ser observado nos dados dos pontos amostrais, onde os valores obtidos são semelhantes, não apresentando diferenças entre si, porém com valores bem próximos aos dos *buffers*, evidenciando a representatividade proporcionada pela abordagem utilizada no processo de casualização e representatividade do conjunto amostral.

Optou-se por utilizar o valor de 100m para cada lado da hidrografia como acesso viável para coleta de amostras e descrição de perfis, uma vez que dentro dos 50m ainda são observados os efeitos antrópicos em razão da proximidade das vias de acesso. Por outro lado, a partir de 100m nem sempre é viável o caminhamento, principalmente em áreas declivosas como nos divisores topográficos da bacia. Os dados descritivos do *buffer* selecionado e da bacia hidrográfica são apresentados na Tabela 18.

**Tabela 18.** Parâmetros descritivos para os atributos do terreno na bacia do rio Guapi-Macacu

Atributo do Terreno		Estatística Descritiva			
		Máximo	Média	Mínimo	Desvio Padrão
Elevação (metros)	Bacia	2265,82	267,28	-0,08	373,57
	<i>Buffer</i>	1335,81	88,68	1,54	160,62
Declividade (%)	Bacia	252,09	27,45	0	24,82
	<i>Buffer</i>	135,41	14,15	0	16,15
Curvatura (adimensional)	Bacia	7,97	0	-5,56	0,45
	<i>Buffer</i>	6,68	-0,07	-6,27	0,42

Verifica-se que os valores dos atributos do terreno para a área da bacia são discrepantes dos valores da área do *buffer*, com exceção da curvatura que apresenta valores muito próximos. Estas discrepâncias ocorrem porque a bacia engloba áreas de difícil acesso onde inexistente a malha viária, em função da condição geomorfológica (escarpas).

Através dos histogramas que apresentam o padrão de variação dos atributos morfométricos utilizados (elevação, declividade e curvatura), torna-se possível a comparação do comportamento e a distribuição espacial destas variáveis na área da bacia e na área de acesso condicionada pelo *buffer* de 100m (Figura 27).

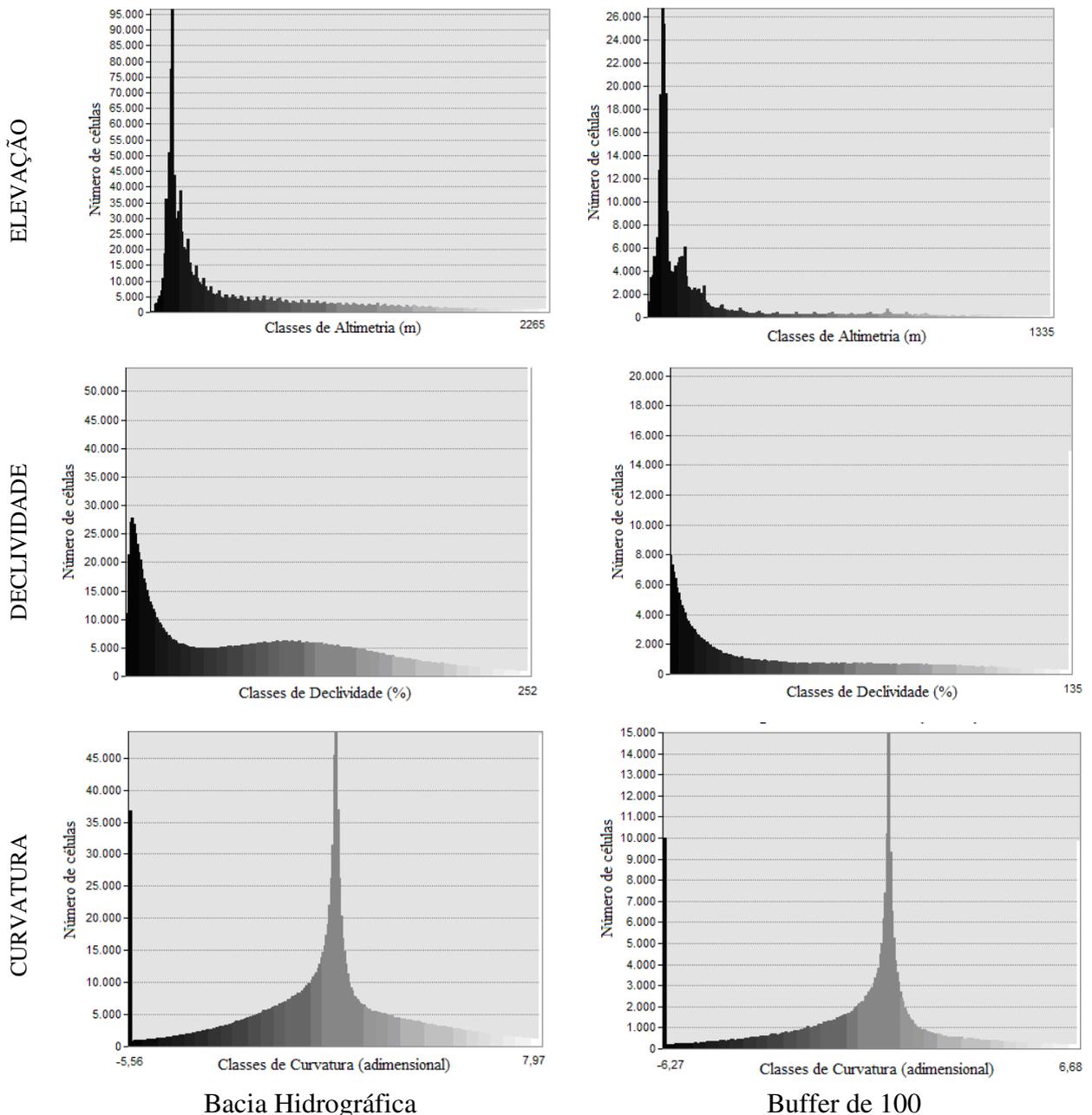


Figura 27. Histogramas dos atributos do terreno na área da bacia e no *buffer* selecionado

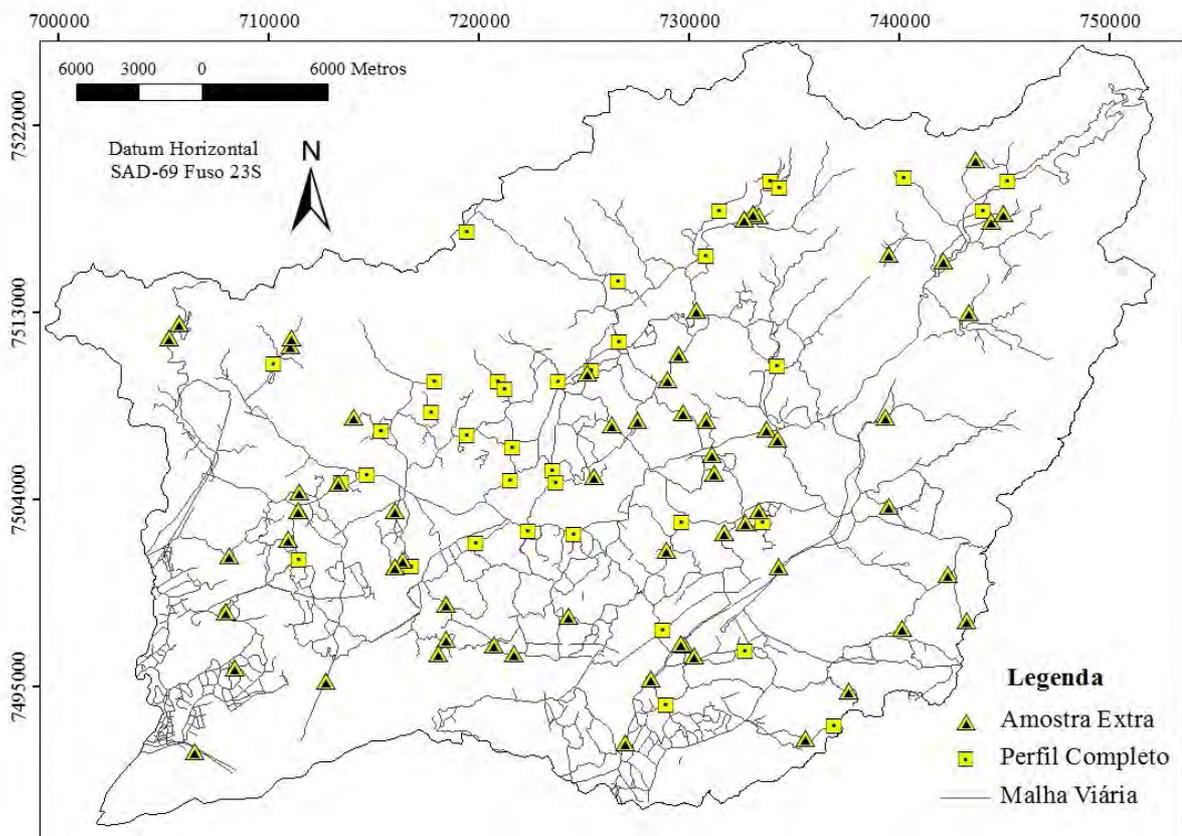
Observando a Figura 27, é possível verificar a similaridade no comportamento dos histogramas que representam a bacia hidrográfica e o *buffer* que delimita a área de acesso. No que tange ao atributo elevação, embora os valores para toda a bacia apresentem uma maior amplitude de variação, em razão do elevado número de células (*pixels*) quando comparados

ao número de células que compõem o *buffer*, a distribuição foi similar entre eles, evidenciando que em ambas as situações predominam as baixas altitudes, sendo as diferenças decorrentes do número de células.

Os histogramas da declividade para as áreas da bacia e do *buffer* também mostram boa semelhança de comportamento, com as discrepâncias ocorrendo apenas na faixa de declividade entre 25 e 50%, que corresponde em sua maior parte, a áreas mais íngremes que não fazem parte da área do *buffer*. O mesmo comportamento é evidenciado nos histogramas da curvatura, que inclusive apresentam a maior semelhança dentre os atributos de terreno considerados, corroborando os resultados obtidos para a estatística descritiva do *buffer* de acesso selecionado. De maneira geral, os resultados evidenciam boa consistência nos dados obtidos, já que estes possuem um comportamento muito semelhante quanto à distribuição espacial dos valores dos atributos do terreno observados na área da bacia.

A abordagem utilizada possibilitou a alocação de pontos amostrais levando-se em conta a variabilidade espacial de alguns atributos do terreno que exercem influencia direta na distribuição dos solos de uma área (Moore et al., 1993; Klingebiel et al., 1987).

Após a importação dos dados gerados pelo cLHS foi possível visualizar no ArcGIS Desktop v.10, a distribuição dos pontos amostrais na área, estando estes contidos dentro dos perímetros determinados pela distância das vias de acesso (Figura 28). Estes pontos foram transferidos para o GPS de navegação utilizado na etapa de coleta de amostras e descrição de perfis, servindo como referência para a localização em campo dos pontos pré-selecionados.



**Figura 28.** Localização dos pontos de coleta de amostras e descrição de perfis.

Alguns casos de discordância entre as informações originais dos pontos pré-selecionados e as observações de campo, envolveram o uso do solo, devido a intervenções recentes na área. Em situações onde a coleta de amostras nas proximidades dos pontos

previamente definidos foi inviável, realizou-se a realocação do mesmo, executando a amostragem e descrição em local com condições semelhantes as das variáveis utilizadas. A Figura 28 mostra a localização dos perfis e amostras extras.

Com base nas análises realizadas foi então adotado como limite para a utilização do cLHS a área do *buffer* de 100m. Em função do tempo e equipe disponíveis, foram descritos e coletados 100 pontos amostrais, dos quais 42 perfis completos e 58 amostras extras, em quatro campanhas de campo ao longo dos anos de 2010 e 2011, com o apoio de pesquisadores da Embrapa Solos (RJ).

### 3.5.3. Relações Geomorfopedológicas

A relação entre os perfis de solos coletados e a litologia encontrada na bacia é apresentada na Tabela 19.

**Tabela 19.** Distribuição dos perfis nas unidades litológicas da bacia hidrográfica.

Unidade Litológica	Características	Classes de Solos Predominantes (SiBCS)	Número de Perfis Descritos (%*)
Sedimentos do Quaternário	Depósitos Aluviais Coluviais, Flúvio-Marinhos	Neossolo Flúvico, Gleissolos, Argissolo Amarelo	28
Unidade Santo Eduardo**	Migmatitos diatexíticos e metatexíticos, Gnaisses	Cambissolo Háptico, Latossolo Amarelo e Vermelho-Amarelo	49
Unidade Rio Negro**	Migmatitos, Gnaisses xistosos	Cambissolo Háptico, Latossolo Amarelo e Vermelho-Amarelo	17
Granito Nova Friburgo**	Composição quartzodiorítica a granítica	Latossolo Amarelo	3
Maçiços Alcalinos**	Granitos, granodioritos, gabros, noritos e melanoritos	Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo Háptico	3
Total			100

\* Número absoluto e relação com total de perfis descritos; \*\* Formações rochosas de origem no Pré-Cambriano, SiBCS- Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (2006)

Os domínios geomorfológicos são caracterizados, em primeira instância em dois sistemas de relevo: degradacional (contrafortes serranos, maciços) e agradacional (planícies e colinas isoladas). Os sistemas de relevo degradacionais compreendem predominantemente as superfícies de remoção, lixiviação e perda de material. Em contrapartida, os sistemas considerados agradacionais, tendem a receber o material removido das partes mais elevadas ou de locais mais distantes. Na sequência, é apresentada a caracterização da geomorfologia da área e a sua relação com os pedodomínios dos solos.

Alguns solos podem ser diferenciados quanto à origem como formados *in situ* (autóctones), ou a partir de material carreado de outros locais (sedimentos), sejam eles de origem eólica, coluvial ou fluvial (alóctones). Esta distinção é estritamente ligada à localização destes na paisagem (Oliveira & Moniz, 1975; Figueiredo et al., 2004; Varajão et al., 2009). Assim, na Tabela 20 é apresentada uma relação entre as classes de solos identificadas e os Sistemas de Relevo e Domínios geomorfológicos, de acordo com o mapa geomorfológico do Estado do Rio de Janeiro, na escala de 1:250.000 (Dantas, 2000).

**Tabela 20.** Ordens de solos observadas nos domínios geomorfológicos e sistemas de relevo

Sistemas de Relevo	Domínio Geomorfológico (CPRM)	Número de Perfis Descritos (%)*	Classes de Solos Predominantes (SiBCS)
Agradacional	Planície Aluvial <sup>(1)</sup>	20	Argissolo Amarelo Gleissolos, Neossolo Flúvico
	Planície Colúvio-Alúvio-Marinha e Terrenos argilo-arenosos da baixada <sup>(2)</sup>	5	Neossolo Flúvico, Organossolo, Gleissolos
Degradacional	Colinas Isoladas, Alinhamento Serrano Isolado; Morrotes e Morros Baixos Isolados <sup>(3)</sup>	42	Latossolo Amarelo e Vermelho-Amarelo, Argissolo Amarelo
	Escarpas Serranas Degradadas e Degraus de Borda de Planalto e Escarpas Serranas <sup>(5)</sup>	30	Latossolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo Háptico, Neossolo Litólico
	Maçiços Intrusivos e Tabuleiros <sup>(4,6)</sup>	3	Argissolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo Háptico
Total		100	

<sup>(1)</sup> Relevo de agradação continental, <sup>(2)</sup> Relevo de agradação litorâneo, <sup>(3)</sup> Relevo de degradação entremeado na baixada, <sup>(4)</sup> Relevo de degradação sustentado por litologia específica, <sup>(5)</sup> Relevo de degradação em áreas montanhosas, <sup>(6)</sup> Relevo de degradação sobre depósitos sedimentares, \* Número absoluto e relação com total de perfis descritos, SiBCS- Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (2006)

#### a) Sistemas de relevo degradacionais

Os LATOSSOLOS constituem a ordem de maior expressão na área da bacia do rio Guapi-Macacu (RJ), ocorrendo em diversas condições de paisagem. Geralmente, os LATOSSOLOS AMARELOS ocorrem em locais de declives suaves a forte ondulado, sob pastagem ou vegetação de mata, apresentando textura franca à muito argilosa. Os LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS ocorrem em geral no terço médio a superior de encostas, em cotas altimétricas superiores à 60 metros, em condições variadas de paisagem e tipos de uso, mas principalmente sob pastagem, em associação com CAMBISSOLOS HÁPLICOS. Os LATOSSOLOS VERMELHOS têm ocorrência pouco expressiva na área, relacionada com litologia de rochas alcalinas, em corpos rochosos na forma de diques. Os CAMBISSOLOS são bastante expressivos na área de estudo, ocorrendo principalmente no Domínio Geomorfológico dos Alinhamentos Serranos, Escarpas Serranas e Maçiços Intrusivos, principalmente relacionados aos relevos mais movimentados, em cotas elevadas. Os CAMBISSOLOS HÁPLICOS estão comumente associados com NEOSSOLOS LITÓLICOS e com LATOSSOLOS, diferenciando-se dos últimos pela menor espessura do *solum*, maiores quantidades de minerais primários intemperizáveis e fragmentos de rocha no perfil, além de formas predominantemente côncavas.

Nos limites entre os relevos de degradação e agradacional, correspondentes ao Domínio das Colinas Isoladas, Morrotes e Morros Baixos Isolados são encontrados, nas encostas com declives suaves a forte ondulado, os ARGISSOLOS AMARELOS e LATOSSOLOS AMARELOS. Os vales formados entre os morros possuem baixa densidade de drenagem, de padrão dendrítico e classe de drenagem imperfeita, onde ocorrem ARGISSOLOS AMARELOS associados à PLANOSSOLOS e GLEISSOLOS HÁPLICOS, geralmente todos distróficos, alumínicos, com alto teor de argila e silte em profundidade.

A Tabela 21 mostra as tendências no comportamento dos atributos morfométricos para os pedodomínios identificados nos sistemas de relevo de degradação.

**Tabela 21.** Unidades geomorfopedológicas de relevo de degradação

Pedodomínio	Altimetria (m)	Declividade	Curvatura	Orientação	Material de Origem
Latossolos Vermelho-Amarelos	> 60	Ondulado a forte ondulado	Convexos	Independente	Migmatitos, Gnaisses Granitos
Latossolos Amarelos	> 20	Ondulado a forte ondulado	Convexos	Independente	Granitos, Gnaisses
Argissolos Vermelho-Amarelos	> 200	Plano a ondulado	Planar a convexo	Independente	Rochas Alcalinas
Cambissolos Háplicos	> 450	Escarpado	Côncavo	Sul, sudeste e sudoeste	Granitos, Gnaisses
Neossolos Litólicos	> 850	Escarpado	Côncavo	Sul, sudeste e sudoeste	Granitos, Gnaisses

#### b) Sistemas de relevo agradacionais

A Tabela 22 indica as feições geomórficas predominantes nas unidades pedológicas dos sistemas de relevo de agradação.

Os GLEISSOLOS HÁPLICOS ocorrem de forma expressiva na bacia do rio Guapi-Macacu. As condições de relevo de agradação propiciam o acúmulo de sedimentos e a drenagem lenta, contribuindo para a formação desses solos, principalmente nos vales entre colinas com pouca amplitude topográfica. Alguns GLEISSOLOS MELÂNICOS foram descritos em relevo suave sob pastagens alagadas e em terrenos muito mal drenados da Planície Fluvio-Marinha, juntamente com ORGANOSSOLOS. Os últimos, com reduzida expressão geográfica na área da bacia.

Os PLANOSSOLOS ocorrem em condições de transição entre paisagens, no limiar dos morrotes, em relevo plano ou suave ondulado. Geralmente em cotas altimétricas inferiores a 20 metros, caracterizando relevo agradacional. Eles ocorrem associados com GLEISSOLOS e ARGISSOLOS AMARELOS.

**Tabela 22.** Unidades geomorfopedológicas de relevo agradacionais

Pedodomínio	Altimetria (m)	Declividade	Curvatura	Orientação	Material de Origem
Gleissolos*	< 10	Plano	Planar	Independente	Sedimentos Fluvio/marinhos
Gleissolos Háplicos	< 20	Plano/Suave ondulado	Planar	Independente	Sedimentos Aluviais
Argissolos Amarelos	< 50	Suave ondulado	Planar	Independente	Depósitos Tálus/colúvio
Neossolos Flúvicos	< 20	Plano	Planar	Independente	Sedimentos Aluviais

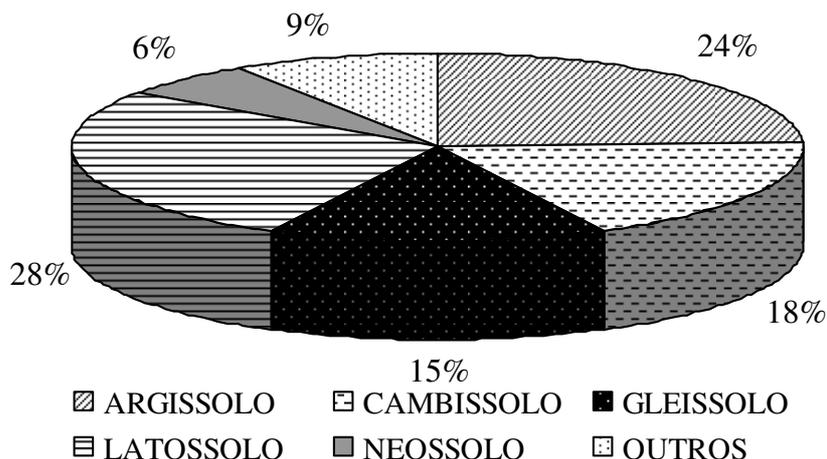
\* Inclui as classes dos Gleissolos Melânicos, Sállicos e Tiomórficos

Os NEOSSOLOS FLÚVICOS possuem grande importância para a região, pois ocupam as áreas de planícies, onde o uso agrícola é favorecido pela fácil mecanização. Ocorrem nos limiares dos maiores drenos, inclusive nos cursos principais da bacia, como o rio

Guapi-Açu, onde a mudança de fluxo, densidade de drenagem e vazão do rio ao longo dos tempos, favoreceu a deposição de materiais de granulometrias distintas, originando as/os camadas/ horizontes.

### 3.5.4. Caracterização dos Pedodomínios

A Figura 29 mostra a distribuição relativa dos perfis descritos, em primeiro nível categórico da classificação taxonômica.



**Figura 29.** Distribuição relativa da quantidade de perfis por ordem de solos.

\*A classe 'Outros' inclui: Espodossolo Ferrihumilúvico (1), Nitossolo Háplico (2), Nitossolo Bruno(1), Organossolo Háplico (3), Planossolo Háplico (2) e Neossolo Quartzarênico (1).

As ordens de solos que predominam na bacia hidrográfica são Latossolos (28%), Cambissolos (18%), Gleissolos (15%), Argissolos (24%), Neossolos (6%). Neste tópico são descritas as características distintivas das classes de solos identificadas na área, com referência aos ambientes em que ocorrem de forma mais expressiva e alguns aspectos relacionados ao uso do solo. Na caracterização dos pedodomínios foram utilizadas as informações observadas em campo, juntamente com dados analíticos das amostras. Em anexo são apresentados para cada pedodomínio a descrição morfológica e os resultados analíticos de perfis considerados representativos. O reconhecimento do padrão geomórfico associado a cada pedodomínio baseou-se na estatística descritiva dos atributos morfométricos do conjunto amostral de 500 *pixels*, adquirido para representar a variabilidade dos atributos em cada unidade pedogenética considerada.

#### a) Pedodomínio dos ARGISSOLOS

Os ARGISSOLOS AMARELOS ocorrem em geral, em formas de declive suave e no terço inferior de encosta, no relevo de colinas e morrotes. Próximo das baixadas, ocorrem em associação à GLEISSOLOS e PLANOSSOLOS, porém em áreas que permitam condições de drenagem um pouco melhores. Em alguns casos, apresentam quantidade relativamente alta de minerais primários intemperizáveis e fragmentos de rocha ao longo do perfil.

Os PLANOSSOLOS HÁPLICOS ocorrem em condições de transição entre paisagens, no limite inferior de morrotes, em relevo plano ou suave ondulado. Geralmente em cotas altimétricas inferiores a 20 metros, caracterizando relevo de agradação, ocorrendo juntamente com GLEISSOLOS HÁPLICOS e ARGISSOLOS AMARELOS. Os solos dessa classe apresentam em geral, horizontes de textura cascalhenta, e em algumas condições, transição abrupta entre horizontes, podendo conter plintita, porém em quantidade insuficiente para

caracterizar a ordem dos Plintossolos. Tem pouca expressão na bacia, normalmente em associações e complexos nos sopés de colinas e limites de planícies.

Os ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS encontram-se predominantemente associados a litologia de maciços intrusivos alcalinos na porção sudeste da bacia, em terço médio a superior de encostas, cotas altimétricas de 50 a 600 metros, com declives acentuados (forte ondulado ou montanhoso) e associados aos CAMBISSOLOS HÁPLICOS.

As Tabelas 23 e 24 apresentam resumidamente, características de perfis representativos correspondentes à ordem dos ARGISSOLOS.

**Tabela 23.** Características morfológicas e físicas de perfis de Argissolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ.

Classificação SiBCS	Horizonte/ Prof. (cm)	Cor <sup>1</sup>	Estrutura <sup>2</sup>	Granulometria <sup>3</sup> (g.kg <sup>-1</sup> )				Si/ Arg <sup>4</sup>
				AG	AF	Silte	Arg.	
ARGISSOLO AMARELO (PA)	Ap / 0-18	10YR 4/3	fr me gr	546	201	152	101	1,50
	AB / 18-40	10YR 4/4	fr me gr/bs	479	196	143	182	0,79
	Bt / 40-103 <sup>+</sup>	10YR 5/6	fr me bs	404	182	131	283	0,46
ARGISSOLO VERMELHO- AMARELO (PVA)	A / 0-17	7,5YR4/3	mo pe/me gr	401	128	147	324	0,45
	BA / 17-32	5YR 5/6	mo me bs/ba	320	136	119	425	0,28
	Bt1 / 32-63	5YR 5/7	mo me ba (cr pc mo)	292	130	112	466	0,24
	Bt2 / 63-86	5YR 5/8	mo me ba (cr cm mo)	274	126	113	487	0,23
	Bt3 / 86-137	6YR 5/8	mo me ba (cr cm mo)	270	112	131	487	0,27
	BC / 137-157	3,5YR5/7	fr/mo me ba	226	102	144	528	0,27

1- Cor úmida da Caderneta de Munsell; 2- Estrutura: fr= fraca, mo= moderada, mp= muito pequena, pe= pequena, me= média, bs= blocos subangulares, ba= blocos angulares, gr= granular; cr = cerosidade; pc = pouca; cm = comum; 3- Granulometria: AG = Areia Grossa, AF = Areia Fina, Arg.= Argila; 4- Silte/Argila

**Tabela 24.** Características químicas de perfis de Argissolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ.

Classificação SiBCS	Horizonte/ Prof. (cm)	C.Org. <sup>1</sup> (g.kg <sup>-1</sup> )	pH em H <sub>2</sub> O	Valor S <sup>2</sup> (cmol.c.dm <sup>-3</sup> )	Valor T <sup>3</sup> (%)	Valor V <sup>4</sup> (%)	m <sup>5</sup>
	AB / 18-40	4,9	4,8	4,4	4,4	18	64
	Bt / 40-103 <sup>+</sup>	3,3	4,7	4,5	4,5	16	74
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO (PVA)	A / 0-17	16,4	4,7	0,9	9,3	10	65
	BA / 17-32	5,6	4,5	0,6	5,2	12	73
	Bt1 / 32-63	4,6	4,7	0,5	5,5	9	75
	Bt2 / 63-86	4,0	4,9	0,5	4,5	11	72
	Bt3 / 86-137	3,6	4,9	0,5	4,0	12	67
	BC / 137-157 <sup>+</sup>	2,8	5,0	0,5	4,0	12	67

SiBCS= Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos; 1- Carbono Orgânico; 2- Soma de Bases; 3- Capacidade de Troca de Cátions a pH 7,0; 4- Saturação em Bases; 5- Saturação de Alumínio.

A Figura 30 apresenta perfil de solo e condição de paisagem dominante nas áreas de ocorrência dos ARGISSOLOS.



**Figura 30.** a) Perfil e paisagem de ARGISSOLO AMARELO; b) Perfil e paisagem de ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO

A Tabela 25 apresenta a estatística descritiva dos atributos morfométricos nos locais dos perfis e amostras extras dos ARGISSOLOS AMARELOS.

**Tabela 25.** Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Argissolos Amarelos.

Atributos Morfométricos	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
Aspecto (graus)	0,61	226,32	359,29	95,42
Índice Topográfico Combinado (adm)	5,50	7,94	13,05	1,44
Curvatura (adm)	-0,17	0,01	0,24	0,06
Plano de Curvatura (adm)	-0,09	0,02	0,23	0,04
Perfil de Curvatura (adm)	-0,19	0,01	0,26	0,05
Altimetria (m)	6,97	22,12	41,83	8,68
Distancia Euclidiana (m)	30	252,00	721,25	174,63
Radiação Solar (kWH/m <sup>2</sup> .ano)	6674,20	6871,38	7035,41	69,62
Declividade (%)	1,90	5,35	12,88	2,01

adm = adimensional

A Tabela 26 apresenta a estatística descritiva dos atributos morfométricos em locais típicos de ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS.

**Tabela 26.** Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Argissolos Vermelho-Amarelos

Atributos Morfométricos	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
Aspecto (graus)	0,16	199,92	359,31	101,37
Índice Topográfico Combinado (adm)	4,20	5,85	7,82	0,75
Curvatura (adm)	-0,36	0,14	0,79	0,23
Plano de Curvatura (adm)	-0,40	0,06	0,71	0,17
Perfil de Curvatura (adm)	-0,73	-0,08	0,50	0,18
Altimetria (m)	46,07	279,44	566,66	173,15
Distancia Euclidiana (m)	42,42	433,71	1082,08	213,69
Radiação Solar (kWH/m <sup>2</sup> .ano)	4965,37	6779,05	7692,97	481,13
Declividade (%)	2,33	28,32	67,42	11,15

adm = adimensional

### b) Pedodomínio dos CAMBISSOLOS

Os CAMBISSOLOS HÁPLICOS ocorrem de forma expressiva, principalmente em paisagens de relevo movimentado, em cotas superiores e declives acentuados. Nas áreas montanhosas estão comumente associados aos NEOSSOLOS LITÓLICOS e Afloramentos de Rochas, podendo apresentar, em casos raros, argila de atividade alta e caráter eutrófico.

Ocorrem também associados, nas mesmas condições de paisagem, aos LATOSSOLOS, diferenciando destes, principalmente pela quantidade de minerais primários facilmente intemperizáveis, como micas e feldspatos. São conceitualmente, solos pouco evoluídos de características variáveis, em geral bem drenados, pouco profundos ou rasos e às vezes com teores de silte relativamente elevados.

As Tabelas 27 e 28 apresentam resumidamente, as características de um perfil representativo da classe dos CAMBISSOLOS HÁPLICOS. A Figura 31 exibe a condição de paisagem do pedodomínio dos solos desta ordem.

**Tabela 27.** Características morfológicas e físicas de perfis completos de Cambissolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu.

Classificação SiBCS	Horizonte/ Prof. (cm)	Cor <sup>1</sup>	Estrutura <sup>2</sup>	Granulometria <sup>3</sup> (g.kg <sup>-1</sup> )				Si/ Arg <sup>4</sup>
				A.Gr.	A.F.	Silte	Arg.	
CAMBISSOLO HÁPLICO (CX)	Ap / 0-24	5YR 4/3	mo pe/me bs	462	109	125	304	0,41
	AB / 24-34	5YR 4/4	mo pe/me bs	442	126	108	324	0,33
	BA / 34-50	5YR 5/6	mo pe/me bs	433	123	120	324	0,37
	Bi / 50-90 <sup>+</sup>	5YR 5/8	fr pe/me bs	403	115	97	385	0,25

SiBCS= Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos; 1- Cor úmida da Caderneta de Munsell; 2- Estrutura: fr= fraca, mo= moderada, mp= muito pequena, pe= pequena, me= média, bs= blocos subangulares, ba= blocos angulares, gr= granular; 3- Granulometria: A.Gr.= Areia Grossa, A.F.= Areia Fina, Arg.= Argila; 4- Silte/Argila

**Tabela 28.** Características químicas de perfis de Cambissolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ.

Classificação SiBCS	Horizonte/ Prof. (cm)	C.Org. <sup>1</sup> (g.kg <sup>-1</sup> )	pH em H <sub>2</sub> O	Valor S <sup>2</sup> (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	Valor T <sup>3</sup>	Valor V <sup>4</sup> (%)	m <sup>5</sup>
CAMBISSOLO HÁPLICO (CX)	Ap / 0-24	13,1	5,2	0,3	13,9	2	82
	AB / 24-34	10,3	5,1	0,2	12,7	2	87
	BA / 34-50	7,3	5	0,3	4,4	7	80
	Bi / 50-90 <sup>+</sup>	4,8	4,9	0,3	4,1	7	80

SiBCS= Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos; 1- Carbono Orgânico; 2- S= Soma de Bases; 3- T= Capacidade de Troca de Cátions a pH 7,0; 4- V=Saturação por Bases; 5- m= Saturação por Alumínio.



**Figura 31.** Perfil e paisagem de CAMBISSOLO HÁPLICO;

A Tabela 29 apresenta a estatística descritiva dos atributos morfométricos nos locais de CAMBISSOLOS HÁPLICOS.

**Tabela 29.** Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Cambissolos Háplicos.

Atributos Morfométricos	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
Aspecto (graus)	30,38	171,14	337,67	70,41
Índice Topográfico Combinado (adm)	3,51	5,83	9,41	0,95
Curvatura (adm)	-1,17	-0,11	0,50	0,31
Plano de Curvatura (adm)	-0,73	0,02	0,66	0,20
Perfil de Curvatura (adm)	-0,43	0,13	0,81	0,20
Altimetria (m)	101,95	486,98	869,17	163,50
Distancia Euclidiana (m)	42,42	592,14	1368,21	485,79
Radiação Solar (kWH/m <sup>2</sup> .ano)	4107,34	5842,55	7129,20	769,53
Declividade (%)	17,19	56,26	102,81	18,76

adm = adimensional

### c) Pedodomínio dos GLEISSOLOS

Os GLEISSOLOS HÁPLICOS ocorrem em grande extensão na área do mapeamento. As condições de paisagem propiciam o acúmulo de sedimentos e drenagem lenta, contribuindo para a formação destes solos, principalmente em vales entre colinas com pouca amplitude topográfica. O relevo de colinas isoladas, morrotes e morros baixos possuem

densidade de drenagem muito baixa com padrão de dendrítico e drenagem imperfeita dos fundos de vales afogados, onde ocorrem com frequência GLEISSOLOS. Os solos são em geral distróficos, alguns alumínicos, em geral, com muita argila e silte em profundidade. Foram constatados, em alguns perfis, horizontes enterrados, em alguns casos orgânicos.

Em menor proporção foram também descritos alguns GLEISSOLOS MELÂNICOS, porém em condições de campos alagados, muito mal drenados, que caracterizam depressões sutis do microrrelevo. Ocorrem associados com ORGANOSSOLOS.

As Tabelas 30 e 31 apresentam, resumidamente, as características morfológicas, físicas e químicas dos pontos amostrais correspondentes aos GLEISSOLOS. A Figura 32 e os dados em anexo, caracterizam o pedodomínio dos GLEISSOLOS.

**Tabela 30.** Características morfológicas e físicas de perfis de Gleissolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ.

Classificação SiBCS	Horizonte/ Prof. (cm)	Cor <sup>1</sup>	Estrutura <sup>2</sup>	Granulometria <sup>3</sup> (g.kg <sup>-1</sup> )				Si/Arg <sup>4</sup>
				A.Gr.	A.F.	Silte	Arg.	
Gleissolo Háptico (GX)	Ap / 0-26	7,5YR 4/3	mo pe/ me gr	292	83	219	406	0,54
	Cg1 / 26-57	10YR 5/2 mq cm pe dt 5YR 4/6	mc	430	103	184	283	0,65
	Cg2 / 57-104	2,5Y 5/2 mq cm pe dt 5YR 5/8	mc	518	133	127	222	0,57
Gleissolo Melânico (GM)	A / 0-30	2,5Y 4/1 mq cm pe dt 10YR 4/6	*	416	61	217	306	0,71
	AC / 30-40	2,5Y 4/1 mq cm pe dt 10YR 4/6	*	517	47	170	266	0,64
Gleissolo Sálico (GS)	2Cg / 40-70 <sup>+</sup>	10Y 4/1	*	860	28	31	81	0,38
	A / 0-10	5Y 3/1	*	220	60	410	510	0,80
	C1g / 20-60	5Y 4/1	*	220	200	340	440	0,77
	C2g / 60-100	5GY 6/1	*					

SiBCS= Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos; 1- Cor úmida da Caderneta de Munsell; mq = mosqueado; cm = comum; dt = distinto; 2- Estrutura: fr= fraca, mo= moderada, mp= muito pequena, pe= pequena, me= média, bs= blocos subangulares, ba= blocos angulares, gr= granular; mc = maciça; 3- Granulometria: A.Gr.= Areia Grossa, A.F.= Areia Fina, Arg.= Argila; 4- Silte/Argila; \*Perfil coletado muito úmido, não foi possível descrever estrutura

A ocorrência de GLEISSOLOS SÁLICOS e TIMÓRFICOS está restrita à foz da bacia hidrográfica, que deságua na Baía de Guanabara, sofrendo influência direta do mar. Em razão da carência de acesso as áreas de ocorrência destes solos, o programa utilizado para definição do conjunto amostral não abrangeu os solos das Planícies e Depressões Fluvio-Marinhas. Sendo assim, a caracterização desta unidade baseou-se em perfis de solos descritos em outros estudos (Carvalho Filho et al., Embrapa, 2003).

**Tabela 31.** Características químicas de perfis de Gleissolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ.

Classificação SiBCS	Horizonte/ Prof. (cm)	C.Org. <sup>1</sup> (g.kg <sup>-1</sup> )	pH em H <sub>2</sub> O	Valor S <sup>2</sup> --(cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )---	Valor T <sup>3</sup>	Valor V <sup>4</sup> -----(%)-----	m <sup>5</sup>
Gleissolo Háptico (GX)	Ap / 0-26 Cg1 / 26-57 Cg2 / 57-104 <sup>+</sup>	15,2 7,7 4,3	4,8 5,1 5,1	1,6 0,8 0,5	9,0 5,6 4,0	18 14 12	41 67 72
Gleissolo Melânico (GM)	A / 0-30 AC / 30-40 2Cg / 40-70 <sup>+</sup>	15,0 9,0 2,2	6,1 6,3 5,4	11,7 12,5 3,8	14,6 15,2 5,5	80 82 69	0 0 0
Gleissolo Sálico (GS)	A / 0-10 C1g / 20-60 C2g / 60-100	49,0 21,7	3,6 3,6	7,0 9,4	43,1 29,2	16 32	55 31

SiBCS= Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos; 1- Carbono Orgânico; 2- S= Soma de Bases; 3- T= Capacidade de Troca de Cátions a pH 7,0; 4- V=Saturação de Bases; 5- m= Saturação de Alumínio.



**Figura 32.**a) Perfil e paisagem de ocorrência de GLEISSOLO HÁPTICO; b) Perfil e paisagem de ocorrência de GLEISSOLO MELÂNICO.

As Tabelas 32 e 33 apresentam a estatística descritiva dos atributos morfométricos para as classes dos GLEISSOLOS HÁPLICOS + GLEISSOLOS MELÂNICOS e da associação de GLEISSOLOS SÁLICOS + GLEISSOLOS TIMÓRFICOS, respectivamente.

**Tabela 32.** Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Gleissolos Háplicos.

Atributos Morfométricos	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
Aspecto (graus)	0,07	177,12	356,24	104,81
Índice Topográfico Combinado (adm)	6,94	9,75	15,89	1,69
Curvatura (adm)	-0,27	0,00	0,22	0,03
Plano de Curvatura (adm)	-0,10	0,00	0,10	0,01
Perfil de Curvatura (adm)	-0,11	0,00	0,22	0,02
Altimetria (m)	5,20	11,35	18,67	3,63
Distancia Euclidiana (m)	0	119,45	611,88	132,03
Radiação Solar (kWH/m <sup>2</sup> .ano)	6787,31	6886,17	6942,56	34,10
Declividade (%)	0	0,89	3,26	0,60

adm = adimensional

**Tabela 33.** Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Gleissolos Salinos e Tiomórficos.

Atributos Morfométricos	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
Aspecto (graus)	0,03	166,05	359,91	108,17
Índice Topográfico Combinado (adm)	6,25	9,47	18,04	1,82
Curvatura (adm)	-0,43	0,00	0,35	0,05
Plano de Curvatura (adm)	-0,23	0,00	0,17	0,03
Perfil de Curvatura (adm)	-0,25	-0,01	0,20	0,04
Altimetria (m)	0,60	6,42	8,767	1,78
Distancia Euclidiana (m)	0	102,16	247,38	64,23
Radiação Solar (kWH/m <sup>2</sup> .ano)	6853,85	6973,71	7072,92	33,02
Declividade (%)	0,02	1,82	6,13	1,63

adm = adimensional

#### d) Pedodomínio dos LATOSSOLOS

Os LATOSSOLOS AMARELOS, de forma geral, ocorrem em condições diversas de declive, geralmente sob pastagem ou vegetação de mata, podendo apresentar textura franco-arenosa a muito argilosa. Estão associados aos LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS e em alguns casos CAMBISSOLOS HÁPLICOS. Os LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS constituem subordem de grande expressão na área. Ocorrem em condições variadas de paisagem e sob diferentes tipos de uso, mas principalmente sob pastagem.

Os solos destas classes são em geral, muito profundos, podendo apresentar algum incremento de argila em maior profundidade e ausência ou pouca expressão de cerosidade, o que os diferenciam dos ARGISSOLOS, quando estes ocorrem em condições similares de paisagem.

As Tabelas 34 e 35 apresentam resumidamente as características dos pontos amostrais correspondentes aos LATOSSOLOS.

**Tabela 34.** Características morfológicas e físicas de perfis Latossolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ.

Classificação SiBCS	Horizonte/ Prof. (cm)	Cor <sup>1</sup>	Estrutura <sup>2</sup>	Granulometria <sup>3</sup> (g.kg <sup>-1</sup> )				Si/ Arg <sup>4</sup>
				A.Gr.	A.F.	Silte	Arg.	
Latossolo Amarelo (LA)	Ap / 0-16	10YR 4/3	fr mp gr	480	99	198	223	0,89
	AB / 16-33	10YR 3/6	fr mp gr	496	93	168	243	0,69
	BA / 33-50	10YR 4/6	fr mp gr	425	79	151	345	0,44
	Bw1 / 50-95	10YR 5/6	fr pe gr	387	83	145	385	0,38
	Bw2 / 95-130 <sup>+</sup>	10YR 5/6	fr pe gr	384	77	153	386	0,40
Latossolo Vermelho- Amarelo (LVA)	Ap / 0-18	7,5YR4/3	fr pe/me gr	441	83	131	345	0,38
	BA / 18-36	5YR 4/6	fr pe/me bs	406	81	87	426	0,20
	Bw1 / 36-60	5YR 5/6	fr pe/me bs	379	83	112	426	0,26
	Bw2 / 60-80	5YR 5/8	fr me bs	375	79	100	446	0,22
	BC / 80-120 <sup>+</sup>	7,5YR5/8	-	367	81	127	425	0,30

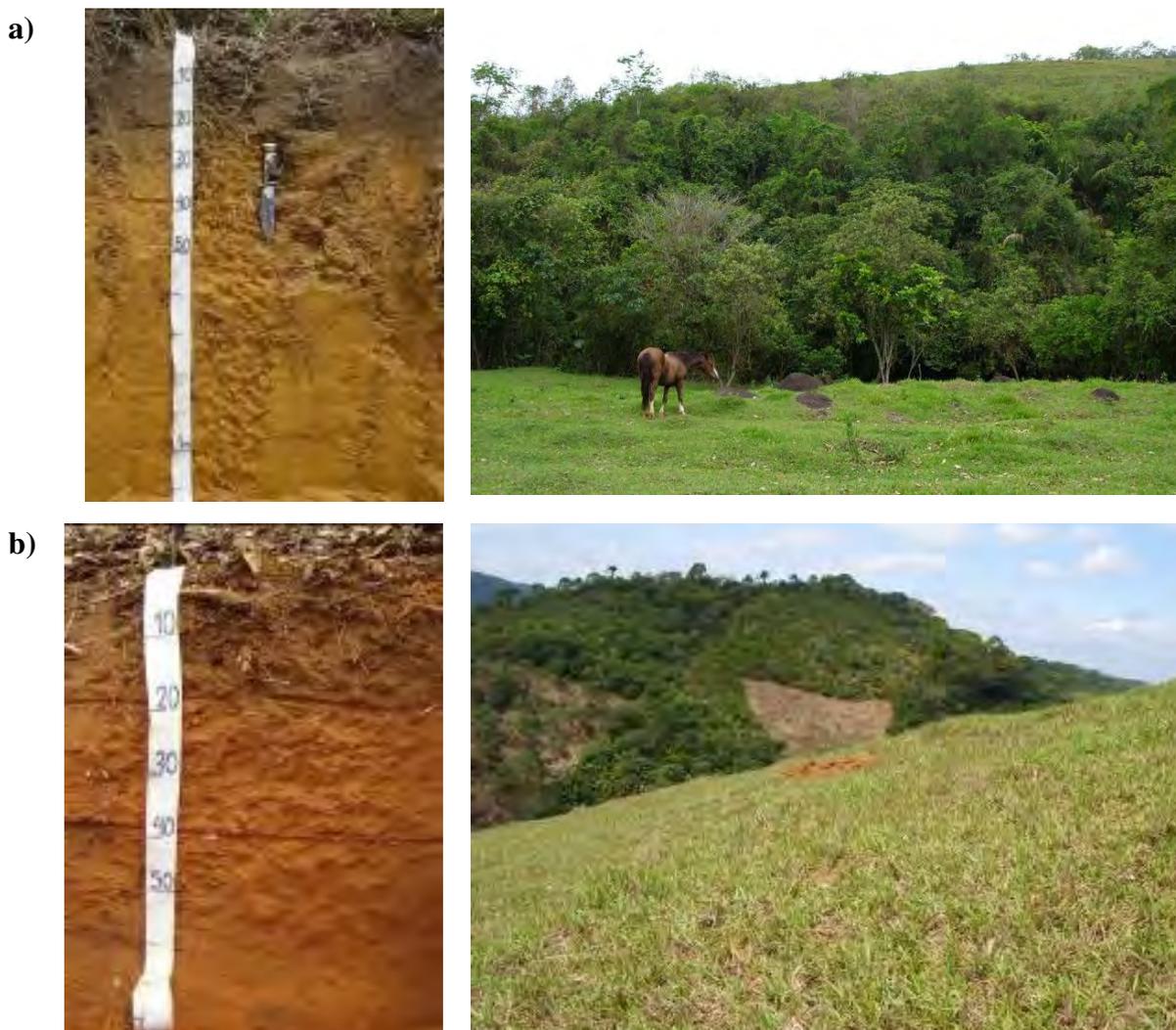
SiBCS= Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos; 1- Cor úmida da Caderneta de Munsell; 2- Estrutura: fr= fraca, mo= moderada, mp= muito pequena, pe= pequena, me= média, bs= blocos subangulares, ba= blocos angulares, gr= granular; 3- Granulometria: A.Gr.= Areia Grossa, A.F.= Areia Fina, Arg.= Argila; 4- Silte/Argila

**Tabela 35.** Características químicas de perfis de Latossolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ.

Classificação SiBCS	Horizonte/ Prof. (cm)	C.Org. <sup>1</sup> (g.kg <sup>-1</sup> )	pH em H <sub>2</sub> O	Valor	Valor	Valor	m <sup>5</sup>
				S <sup>2</sup>	T <sup>3</sup>	V <sup>4</sup>	
				-----(cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )-----		-----(%)------	
Latossolo Amarelo (LA)	Ap / 0-16	14,1	5,3	2,1	6,2	34	16
	AB / 16-33	8,3	5,3	1,9	5,2	37	14
	BA / 33-50	5,7	5,2	1,3	4,6	28	28
	Bw1 / 50-95	4,4	5,0	0,7	4,5	16	61
	Bw2 / 95-130 <sup>+</sup>	3,5	5,1	0,8	4,4	18	56
Latossolo Vermelho- Amarelo (LVA)	Ap / 0-18	16,6	4,9	1,2	8,2	15	52
	BA / 18-36	7,5	4,8	0,8	5,4	15	65
	Bw1 / 36-60	4,7	4,7	0,6	4,6	13	73
	Bw2 / 60-80	3,5	4,7	0,5	4,3	12	75
	BC / 80-120 <sup>+</sup>	2,9	4,8	0,5	4,0	12	72

SiBCS= Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos; 1- Carbono Orgânico; 2- S= Soma de Bases; 3- T= Capacidade de Troca de Cátions a pH 7,0; 4- V= Saturação de Bases; 5- m= Saturação de Alumínio.

A Figura 33 apresenta as características morfológicas e a paisagem típica de ocorrência de perfis representativos do pedodomínio dos LATOSSOLOS.



**Figura 33.** a) Perfil e paisagem de ocorrência de LATOSSOLO AMARELO; b) Perfil e paisagem de ocorrência de LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO

Nas Tabelas 36 e 37 é apresentada a estatística descritiva dos atributos morfométricos para os locais de ocorrência de LATOSSOLOS AMARELOS e LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS, respectivamente.

**Tabela 36.** Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Latossolos Amarelos.

Atributos Morfométricos	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
Aspecto (graus)	0,36	209,51	359,98	92,00
Índice Topográfico Combinado (adm)	4,10	5,54	8,35	0,67
Curvatura (adm)	-0,84	0,47	2,14	0,38
Plano de Curvatura (adm)	-0,58	0,23	1,25	0,23
Perfil de Curvatura (adm)	-1,00	-0,23	0,59	0,26
Altimetria (m)	17,51	61,83	146,87	32,39
Distancia Euclidiana (m)	60	389,99	1110,40	272,28
Radiação Solar (kWH/m <sup>2</sup> .ano)	5859,28	6710,74	7212,06	283,04
Declividade (%)	0,818652	21,16496	58,48587	10,94851

adm = adimensional

**Tabela 37.** Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Latossolos Vermelho-Amarelo.

Atributos Morfométricos	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
Aspecto (graus)	0,18	170,29	359,29	91,03
Índice Topográfico Combinado (adm)	4,09	5,52	9,58	0,76
Curvatura (adm)	-1,15	0,35	1,62	0,46
Plano de Curvatura (adm)	-0,55	0,19	0,99	0,26
Perfil de Curvatura (adm)	-0,98	-0,15	0,71	0,32
Altimetria (m)	42,13	87,07	185,27	34,74
Distancia Euclidiana (m)	60	217,23	657,95	124,12
Radiação Solar (kWH/m <sup>2</sup> .ano)	5276,15	6514,12	7206,36	466,01
Declividade (%)	1,396847	27,70366	59,37088	12,91

adm = adimensional

### e) Pedodomínio dos NEOSSOLOS

Os NEOSSOLOS LITÓLICOS ocupam áreas de maiores cotas e declives, em geral associados aos Afloramentos Rochosos e em menor proporção aos CAMBISSOLOS HÁPLICOS. Ocorrem nos divisores de água, nos limites da bacia hidrográfica.

Por sua vez, os NEOSSOLOS FLÚVICOS possuem grande importância para a região, pois ocupam as áreas de baixada, onde a utilização agrícola para plantio de tubérculos é muito valorizada, devido a facilidade de mecanização. Também foi constatado plantio de feijão, milho, entre outras culturas. Ocorrem nos limiares dos maiores drenos, inclusive nos cursos principais da bacia, como rio Guapi-Açu, onde a mudança de fluxo, densidade de drenagem e vazão do rio ao longo dos tempos, favoreceu a deposição de materiais de granulometria distinta, constituindo as/os camadas/horizontes.

As Tabelas 38 e 39 apresentam, resumidamente, as características dos pontos amostrais correspondentes aos Neossolos.

**Tabela 38.** Características morfológicas e físicas de perfis de Neossolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ.

Classificação SiBCS	Horizonte/ Prof. (cm)	Cor <sup>1</sup>	Estrutura <sup>2</sup>	Granulometria <sup>3</sup> (g.kg <sup>-1</sup> )				Si/ Arg <sup>4</sup>
				A.Gr.	A.F.	Silte	Arg.	
Neossolo Litólico (RL)	A / 0-15	7,5YR3/3	fr pe gr	423	151	202	224	0,90
	C / 15-38	7,5YR5/6	fr me bs	424	171	161	244	0,66
Neossolo Flúvico (RY)	Ap / 0-25	2,5Y 4/2	fr pe/me gr/bs	344	255	259	142	1,82
	1C1 / 25-43	5Y 4/2	mc	492	232	155	121	1,28
	2C2 / 43-50	5YR 7/2	gs	578	353	29	40	0,72
	3C3 / 50-100	5Y 7/3	gs	339	570	51	40	1,28

SiBCS= Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos; 1- Cor úmida da Caderneta de Munsell; 2- Estrutura: fr= fraca, mo= moderada, mp= muito pequena, pe= pequena, me= média, bs= blocos subangulares, ba= blocos angulares, gr= granular; mc = maciça; gs = grão simples ; 3- Granulometria: A.Gr.= Areia Grossa, A.F.= Areia Fina, Arg.= Argila; 4- Silte/Argila

**Tabela 39.** Características químicas de perfis de Neossolos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ.

Classificação SiBCS	Horizonte/ Prof. (cm)	C.Org. <sup>1</sup> (g.kg <sup>-1</sup> )	pH em H <sub>2</sub> O	Valor S <sup>2</sup> -(cmol <sub>c</sub> .dm <sup>3</sup> )-	Valor T <sup>3</sup>	Valor V <sup>4</sup> (%)	m <sup>5</sup>
Neossolo Litólico (RL)	A / 0-15	18,4	4,1	0,8	9,5	8	70
	C / 15-38	5,5	4,4	0,6	4,9	12	68
Neossolo Flúvico (RY)	Ap / 0-25	13,1	5,0	2,5	7,9	32	19
	1C1 / 25-43	7,4	5,5	1,5	5,0	30	25
	2C2 / 43-50	2,0	5,5	0,9	2,6	35	25
	3C3 / 50-100	1,1	5,6	0,9	2,2	41	18

SiBCS= Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos; 1- Carbono Orgânico; 2- S= Soma de Bases; 3- T= Capacidade de Troca de Cátions a pH 7,0; 4- V= Saturação de Bases; 5- m= Saturação de Alumínio.

A Figura 34 complementa a caracterização dos solos desta ordem e as Tabelas 40 e 41 apresentam a estatística descritiva dos atributos morfométricos nos locais de NEOSSOLOS FLÚVICOS e NEOSSOLOS LITÓLICOS, respectivamente.



**Figura 34.** a) Perfil e paisagem de ocorrência de NEOSSOLO LITÓLICO; b) Perfil e paisagem de ocorrência de NEOSSOLO FLÚVICO

**Tabela 40.** Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Neossolos Flúvicos.

Atributos Morfométricos	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
Aspecto (graus)	0	199,50	356,59	92,19
Índice Topográfico Combinado (adm)	10,54	15,21	25,89	4,19
Curvatura (adm)	-0,06	-0,01	0,05	0,01
Plano de Curvatura (adm)	-0,05	-0,01	0,03	0,01
Perfil de Curvatura (adm)	-0,06	0,00	0,07	0,01
Altimetria (m)	7,37	13,65	19,99	3,33
Distancia Euclidiana (m)	0	63,14	210	60,05
Radiação Solar (kWH/m <sup>2</sup> .ano)	6823,94	6871,38	6925,62	18,13
Declividade (%)	0	0,18	1,52	0,23

adm = adimensional

**Tabela 41.** Estatística descritiva dos atributos morfométricos para os Neossolos Litólicos.

Atributos Morfométricos	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
Aspecto (graus)	0,38	170,37	357,51	71,71
Índice Topográfico Combinado (adm)	3,38	5,27	7,81	0,73
Curvatura (adm)	-2,49	-0,05	0,60	0,44
Plano de Curvatura (adm)	-1,59	0,01	0,68	0,25
Perfil de Curvatura (adm)	-0,52	0,07	1,69	0,30
Altimetria (m)	492,29	872,55	1972,50	305,45
Distancia Euclidiana (m)	0	264,55	798,81	149,84
Radiação Solar (kWH/m <sup>2</sup> .ano)	2739,20	5205,90	7453,49	1060,16
Declividade (%)	38,18	91,13	178,12	30,59

adm = adimensional

### 3.5.5. Análise Conjunta dos Atributos Morfométricos nos Pedodomínios

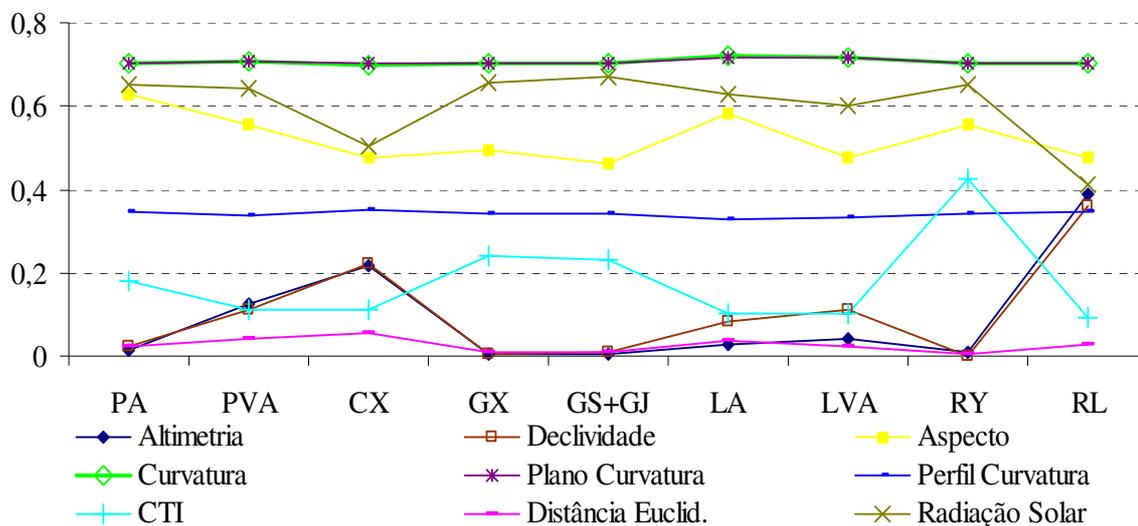
O reconhecimento dos padrões geomórficos dominantes nos distintos pedodomínios considerados buscou subsidiar o entendimento das relações solo-paisagem na área da bacia, para coleta consistente das amostras para o treinamento e validação das RNA's, de modo a maximizar a exatidão das classificações, que serão oportunamente discutidas no Capítulo 3. Para tanto, os atributos morfométricos foram analisados com base na estatística descritiva e variação conjunta observada em cada pedodomínio.

Para facilitar a análise conjunta dos atributos morfométricos foi realizado o reescalonamento dos dados para compatibilizar as diferentes unidades, nas quais os dados são dimensionados. A Figura 35 mostra graficamente, a partir dos valores médios dos atributos reescalados, as diferentes tendências de comportamento em cada pedodomínio.

Embora os valores médios (tendência central) não englobem a gama de possibilidades de combinações das feições dos atributos do terreno em cada classe de solo (pela própria natureza das variáveis), espera-se que essa análise destaque diferenças entre os pedodomínios, em função das relações diretas entre os fatores/atributos e a pedogênese, conforme Carvalho Júnior (2005).

Observando a Figura 35 é possível notar que alguns atributos não mostram variação significativa entre os pedodomínios, como o perfil e plano de curvatura. Em contrapartida, atributos como o índice topográfico combinado, apresentam valor médio distinto e coerente para os pedodomínios. Os atributos altimetria e declividade apresentaram tendência similar de variação entre os pedodomínios. Já a distância euclidiana e o aspecto mostram apenas variação sutil entre os mesmos. As observações em campo indicaram pouca relação entre os atributos aspecto e radiação solar, e a ocorrência das distintas classes de solos, indicando

pouca contribuição como variável determinante da distribuição dos solos na área de estudo. No caso do perfil e plano de curvatura, ambos apresentaram similaridade com o atributo curvatura, que representa a resultante da integração dos dois primeiros, sendo assim optou-se por não utilizar estes componentes nas etapas posteriores.



**Figura 35.** Padrão geomórfico dos diferentes pedodomínios.

Neste estudo não foram utilizadas diretamente como variáveis discriminantes atributos do terreno que representam os fatores climáticos, que sabidamente são importantes no processo de formação dos solos, principalmente devido à falta de informações detalhadas e georreferenciadas. No entanto, esperava-se encontrar diferenças microclimáticas em função das variações no aspecto e conseqüentemente na radiação solar incidente nas diferentes encostas que pudessem ajudar na diferenciação dos solos da BHRGM. Porém, diferentemente dos resultados encontrados por Chagas (2006) e Vaz de Melo (2009) estes atributos não tiveram a influência esperada. Entretanto, o estudo de Sirtoli (2008) também mostrou influência limitada da radiação solar sobre a diferenciação dos tipos de solos.

Em função das análises foi possível indicar os atributos Altimetria, Declividade, Curvatura, CTI e Distância Euclidiana para compor o conjunto de variáveis discriminantes usadas na etapa de classificação supervisionada pelos simuladores de redes neurais artificiais.

A sequência de gráficos a seguir (Figuras 36, 37, 38, 39 e 40) mostra a variação dos parâmetros estatísticos (média e desvio padrão) entre os pedodomínios considerados no presente estudo, para os atributos morfométricos considerados de maior influência na distribuição dos solos da bacia hidrográfica.

A variação da altimetria entre as classes de solos permite distinguir em primeira instância os pedodomínios que ocorrem nos relevos de agradação e degradação (Figura 36). As classes que ocorrem nas cotas mais baixas correspondem aos solos com grande influência de hidromorfismo (NEOSSOLOS FLÚVICOS, GLEISSOLOS HÁPLICOS, GLEISSOLOS SÁLICOS e GLEISSOLOS TIOMÓRFICOS, e no limiar dos morros e colinas, no terço inferior, ocorrem os ARGISSOLOS AMARELOS). Analogamente, os pedodomínios que ocupam as cotas mais elevadas correspondem aos NEOSSOLOS LITÓLICOS e CAMBISSOLOS HÁPLICOS. Os Latossolos ocorrem predominantemente nos morros e colinas em altitudes inferiores à 100m. Já os ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS têm sua distribuição mais relacionada aos maciços alcalinos com cotas elevadas, na parte sudeste da bacia hidrográfica, portanto neste caso a litologia é o fator de formação principal.

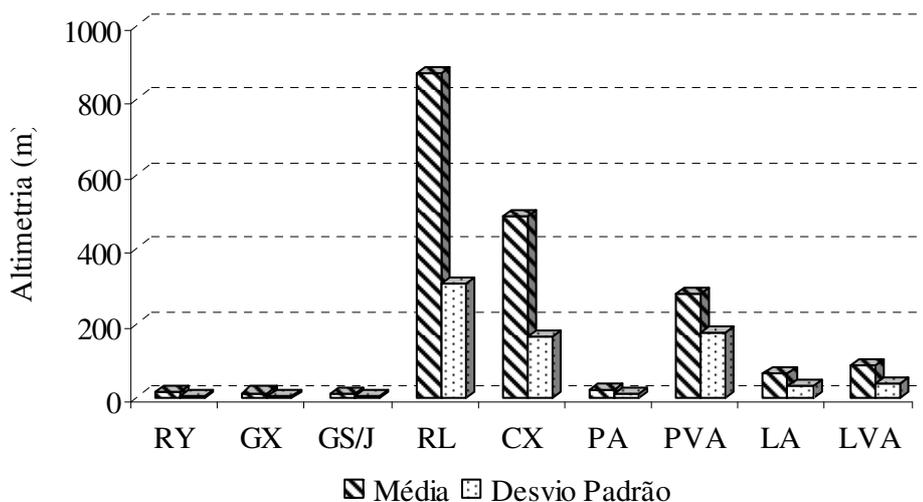


Figura 36. Variação da altimetria nos pedodomínios considerados.

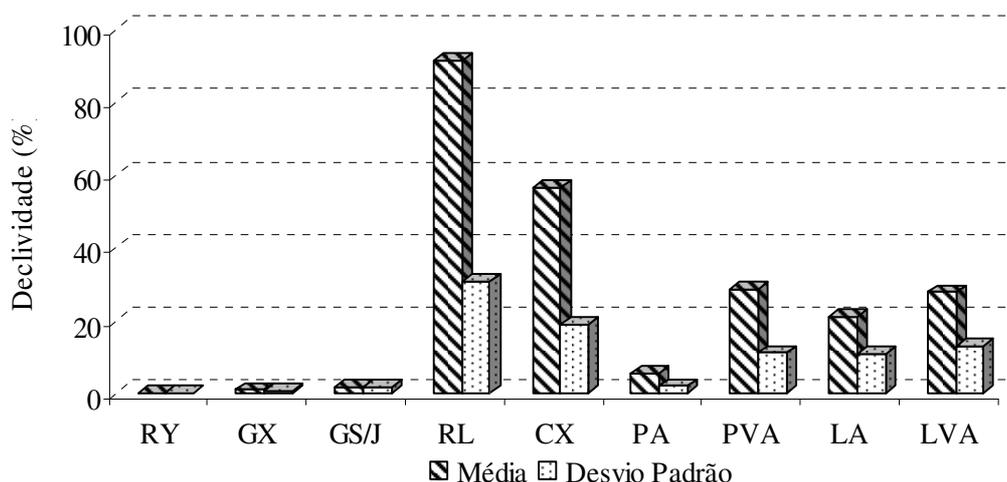
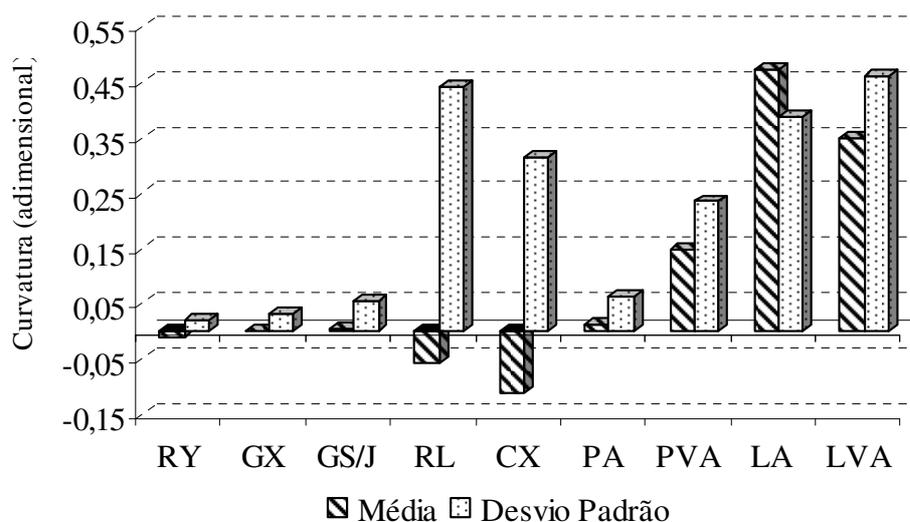


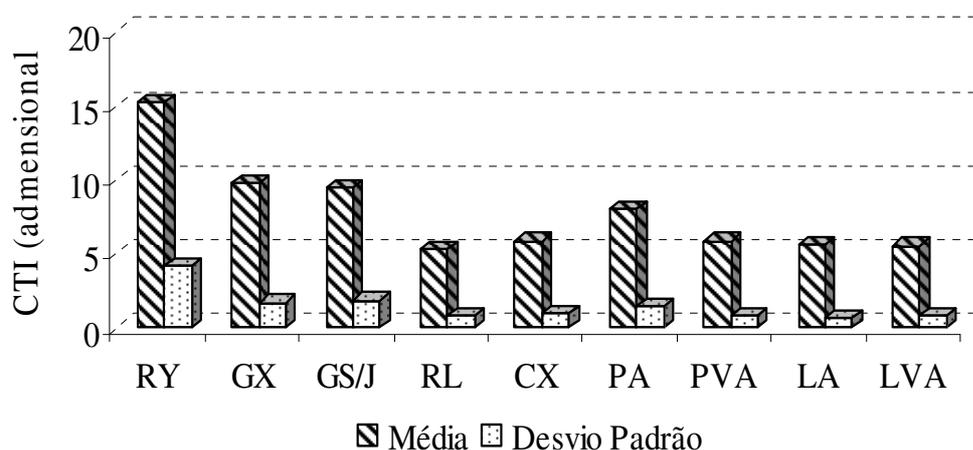
Figura 37. Variação da declividade nos pedodomínios considerados.

De forma similar à altimetria, a variação da declividade, corrobora as expectativas prévias sobre a distribuição dos solos na área (Figura 37). Os solos sob influência de hidromorfismo apresentam os declives mais suaves, principalmente os NEOSSOLOS FLÚVICOS, que tem a gênese intrínseca à condição de deposição de material aluvial transportado, principalmente pelos grandes drenos da bacia. A declividade permite diferenciar com maior clareza os GLEISSOLOS HÁPLICOS dos ARGISSOLOS AMARELOS. A primeira classe ocorrendo predominantemente em relevo plano a suave ondulado e a segunda sob relevo suave ondulado a ondulado. Os LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS e ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS ocorrem, em sua maioria sob declive forte ondulado, enquanto os LATOSSOLOS AMARELOS estão distribuídos em relevo que varia de ondulado a forte ondulado nos morrotes e colinas isoladas. Este atributo também possibilitou a distinção dos CAMBISSOLOS HÁPLICOS e dos NEOSSOLOS LITÓLICOS, uma vez que os estes últimos estão predominantemente nas escarpas serranas, associados aos afloramentos de rocha, sob declives muito acentuados.



**Figura 38.** Variação da curvatura nos pedodomínios considerados.

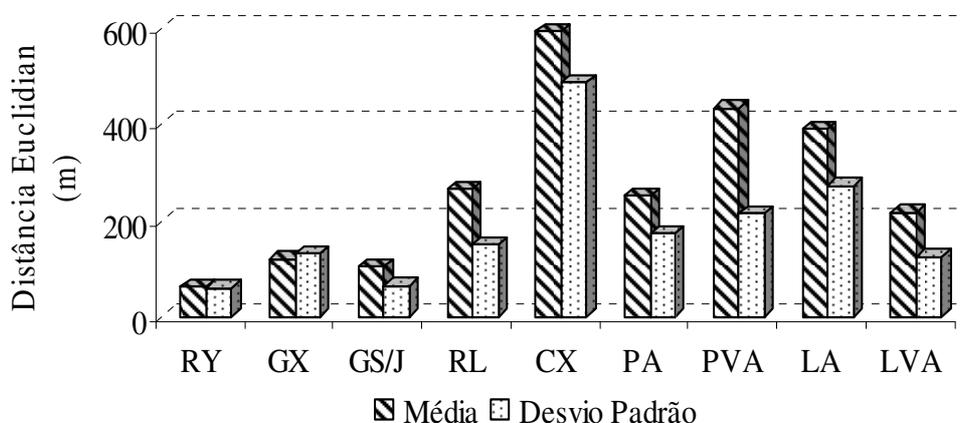
Avaliando a distribuição da superfície de curvatura é possível destacar algumas tendências. As classes dos GLEISSOLOS e dos NEOSSOLOS FLÚVICOS ocorrem predominantemente em superfícies planares, com desvio padrão relativamente pequeno. Em contrapartida, os ARGISSOLOS AMARELOS, também com reduzido desvio padrão, encontram-se em áreas planares a ligeiramente convexas (Figura 38). Os CAMBISSOLOS HÁPLICOS e os NEOSSOLOS LITÓLICOS, apesar do elevado desvio padrão, mostram tendência dominante de ocorrência em áreas côncavas. Por outro lado, os LATOSSOLOS e os ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS apresentam tendência de ocorrência em superfícies convexas, embora mostrem elevado desvio padrão para esta variável.



**Figura 39.** Variação do índice topográfico combinado (CTI) nos pedodomínios considerados

O índice CTI, muito utilizado para reconhecimento de solos hidromórficos, juntamente com a declividade permitiu identificar com clareza os padrões de ocorrência dos NEOSSOLOS FLÚVICOS e dos GLEISSOLOS que, em geral, mostram valores elevados para o índice, e reduzidos para declividade (Figuras 37 e 39). Conforme esperado, os ARGISSOLOS AMARELOS apresentaram valores médios superiores aos verificados para os NEOSSOLOS FLÚVICOS e GLEISSOLOS, contribuindo dessa maneira para uma melhor distinção entre estas classes. Os LATOSSOLOS, ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS,

CAMBISSOLOS HÁPLICOS e NEOSSOLOS LITÓLICOS, não mostraram diferenças para os valores deste atributo.



**Figura 40.** Variação da distancia euclidiana nos pedodomínios considerados.

A distância euclidiana mostrou coerência com a gênese dos solos hidromórficos que apresentaram valores reduzidos para distância da hidrografia (Figura 40). Entre estes, os NEOSSOLOS FLÚVICOS apresentaram o menor valor médio, corroborando as observações de campo, onde ocorrem em função da deposição de materiais decorrente da atividade dos rios. Entre os GLEISSOLOS as subordens dos Sálícos e Tiomórficos apresentaram menores valores médios que os Háplicos uma vez que os primeiros encontram-se nas áreas de manguezais sazonalmente irrigadas pelas marés.

Os CAMBISSOLOS HÁPLICOS apresentaram o maior valor para média e desvio padrão, em contrapartida, os NEOSSOLOS LITÓLICOS apesar de ocorrerem em áreas similares aos CAMBISSOLOS HÁPLICOS apresentaram valores significativamente menores. Os ARGISSOLOS AMARELOS por estarem distribuídos preferencialmente no terço inferior das encostas apresentaram um menor valor médio que os ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS. Os LATOSSOLOS AMARELOS apresentaram maior valor médio e desvio padrão para este atributo, do que os outros solos da mesma ordem, evidenciando a amplitude de condições em que ocorrem.

### 3.6. CONCLUSÕES

O uso de técnicas de geoprocessamento e modelagem espacial permitiram a identificação das relações entre os atributos morfométricos e a distribuição das diferentes classes de solos na bacia. O reconhecimento dos padrões geomórficos dos pedodomínios fundamentou-se nos dados e observações obtidas em campo usando procedimento amostral representativo para seleção de pontos de observação, coleta de amostras e descrição de perfis, em conjunto com a análise da variabilidade dos atributos morfométricos derivados do MDE (inclusive o próprio).

O conjunto amostral indicado pelo programa cLHS, como constatado em campo, contemplou as diferentes classes de solo na bacia hidrográfica. O método de obtenção de pontos amostrais, baseado na variabilidade de atributos morfométricos e viabilidade de acesso, mostrou-se representativo e dependente da malha viária e, por conseqüência, da geomorfologia do local, que determina a condição de acesso.

A avaliação quanto a distância plausível das vias de acesso (tamanho do *buffer*) não indicou diferença entre os diferentes tamanhos (50, 100 e 200m). Em todos os casos, a estatística descritiva mostrou valores para atributos topográficos inferiores aos obtidos para a área total da bacia, pela grande variabilidade dos atributos na área, que inclui maciços serranos, de difícil acesso. Foram consideradas para execução do mapeamento e casualização do conjunto amostral, áreas com distancia de ate 100m para cada lado da via de acesso.

As ordens de solos de maior expressão na bacia do rio Guapi-Macacu foram os LATOSSOLOS, ARGISSOLOS, CAMBISSOLOS, GLEISSOLOS e NEOSSOLOS, em ordem decrescente. A caracterização da área, baseada em revisão de literatura, utilização de modelos digitais de elevação e dos atributos morfométricos (principalmente altimetria, declividade e curvatura), aliada as observações de campo permitiram identificar relações consistentes entre as formas do relevo e a ocorrência de classes de solos.

Os ARGISSOLOS AMARELOS foram identificados em áreas com declives suaves e baixas cotas altimétricas, enquanto os ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS ocorrem em cotas mais elevadas e em relevos mais acidentados e associados a litologia de rochas alcalinas. Os CAMBISSOLOS HÁPLICOS predominam em formas côncavas, declive forte ondulado à montanhoso e elevadas cotas altimétricas, de forma similar aos NEOSSOLOS LITÓLICOS e Afloramentos de Rocha. Os Gleissolos ocorrem em cotas baixas, declives suaves e curvatura planar, sendo subdivididos em dois pedodomínios: o dos GLEISSOLOS HÁPLICOS, associados com GLEISSOLOS MELÂNICOS e dos GLEISSOLOS SÁLICOS em associação com GLEISSOLOS TIOMÓRFICOS. A diferença entre estes se dá, principalmente, em razão da altimetria, declividade e do índice topográfico combinado, que mostra valores são superiores para o índice CTI e inferiores para altimetria e declividade na classe dos GLEISSOLOS SÁLICOS + TIOMÓRFICOS. Os LATOSSOLOS AMARELOS e LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS ocorrem preferencialmente em formas convexas com valores reduzidos para o índice CTI em declives que vão de ondulado a montanhoso. Por fim, os NEOSSOLOS FLÚVICOS ocorrem em áreas planares (terraços fluviais), e possuem valores elevados para o índice CTI ocorrendo nas proximidades das drenagens, com valores reduzidos para distancia euclidiana e declividade.

Os atributos morfométricos de maior influência sobre a distribuição dos solos da bacia foram: altimetria, declividade, curvatura, índice CTI, distância euclidiana da hidrografia. Estes atributos serão utilizados como variáveis discriminantes na predição da distribuição das classes de solo, através da classificação supervisionada por redes neurais artificiais.

## **4. CAPÍTULO III**

### **PREDIÇÃO DE CLASSES DE SOLOS ATRAVÉS DE CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA POR REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS**

#### 4.1. RESUMO

As bases de dados de solos do país foram produzidas de acordo com métodos tradicionais de empregados nos levantamentos pedológicos. Atualmente, a demanda por informações especializadas em alto nível de detalhamento e a melhoria da capacidade de processamento de computadores, vem modificando os rumos do mapeamento de solos e das análises ambientais. Baseado nos modelos clássicos de formação do solo em conjunto com modelos geoestatísticos para espacialização e interpretação dos resultados, o mapeamento digital de solos busca aperfeiçoar o procedimento padrão do levantamento de solos, tanto na fase de planejamento como na execução, processamento, organização e apresentação dos dados. O objetivo deste estudo foi a utilização de técnica preditiva de classificação supervisionada por redes neurais artificiais (RNA's) para a obtenção do mapa digital de solos na bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu (BHRGM), Rio de Janeiro. A predição das classes de solos foi realizada utilizando-se o simulador de RNA's JavaNNS (Java Neural Network Simulator v. 1.1). A abordagem adotada baseia-se nos conceitos de formação do solo e das relações solo-paisagem decorrentes da interação espacial entre os componentes, representados por seis atributos morfométricos derivados de um modelo digital de elevação, geologia e três índices derivados de uma imagem do sensor TM do Landsat 5 (*clay minerals*, *iron oxide* e índice de vegetação da diferença normalizada - NDVI). As etapas da classificação supervisionada por RNA's compreenderam: a definição dos dados de entrada e das classes de saída, aquisição das amostras de treinamento e validação, treinamento com diferentes arquiteturas de RNA's, aplicação da rede treinada na classificação e geração da imagem resultante desta classificação. A aquisição das amostras para treinamento e validação das RNA's foi realizada com base nos padrões geomórficos de ocorrência dos perfis descritos para as diferentes classes de solos, respeitando-se cuidadosamente a amplitude dos valores das variáveis discriminantes associadas a cada classe verificando a consistência dos dados dentro do padrão de resposta desejado. Foram testadas várias combinações de variáveis discriminantes e a influência de cada variável na predição das classes de solos da BHRGM foi medida retirando-se uma variável a cada conjunto testado, incluindo um conjunto com todas as variáveis consideradas e outro sem os três índices derivados da imagem Landsat, totalizando 11 conjuntos. As classes de saída consideradas correspondem as seguintes classes de solo: Argissolo Amarelo, Argissolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo Háptico, Gleissolo Háptico + Gleissolo Melânico, Gleissolo Sálico + Gleissolo Tiomórfico, Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Flúvico e Neossolo Litólico. A análise do erro quadrado médio (EQM) mostrou de forma geral, estabilidade dos valores a partir de 10 neurônios na camada de oculta, em todos os conjuntos treinados. Para efeito de comparação entre os conjuntos optou-se por definir o conjunto de dados de entrada, utilizando arquitetura de dez neurônios na camada oculta. O melhor desempenho, nas etapas de treinamento e validação das RNA's, foi obtido por pelo conjunto 1 (todas as variáveis discriminantes), que teve valores de 85,2% para exatidão global e 0,833 para o índice Kappa. Entretanto a matriz de significância entre os conjuntos testados não mostrou diferença significativa para os conjuntos 7 e 10, que apresentaram valores de 0,801 e 0,809, respectivamente. Os valores obtidos na validação preliminar mostraram melhor acerto (59,2%) para a rede do conjunto 10, quando comparada com os dois outros conjuntos (52,5%, para ambos). A melhor generalização das classes de solos foi obtida pelo conjunto 10 (oito variáveis na camada de entrada: altimetria, elevação, curvatura, CTI, distância euclidiana, *clay minerals*, *iron oxide* e geologia), sendo esta escolhida para representar o mapa de solos da área de estudo.

## 4.2. ABSTRACT

The Brazilian soil databases were produced according to traditional methods used in pedological surveys. Currently, the demand for specialized information on the high level of detail and improving the processing capacity of computers has been changing the track of the soil mapping and environmental analysis. Based on classical models of soil formation in conjunction with geostatistical models for spatial and interpretation of results, the digital soil mapping aims to improve the standard of soil survey, both in the planning and execution, processing, organization and presentation of data. The objective of this study was to apply a predictive technique for supervised classification by artificial neural networks (ANN) to obtain the soil digital map of the area in the watershed basin Guapi-Macacu (BHRGM), Rio de Janeiro State. The prediction of soil classes was performed using the ANN's simulator JavaNNS RNA (Java Neural Network Simulator v. 1.1). The approach is based on the concepts of soil formation and soil-landscape relationships arising from the spatial interaction between components, represented by six morphometric attributes derived from a digital elevation model, geology, and three indexes derived from image sensor TM Landsat 5 (clay minerals, iron oxide index and normalized difference vegetation - NDVI). The stages of supervised classification by ANN included: the definition of input data and the classes of output, purchase of training samples and validation, training with different architectures of ANN, application of the network trained in classification and image generation resulting from this classification. The acquisition of samples for training and validation of the ANN was performed based on the standards geomorphic occurrence of profiles described for different soil classes, observing carefully the range of values of discriminating variables associated with each class, and by checking the data consistency within the desired response pattern. Various combinations of discriminating variables were tested, and the influence of each variable in the prediction of soil classes of BHRGM was measured by removing a variable to each set tested, including a set with all variables considered and another without the three indices derived from Landsat, thus totalling 11 sets. The soil class or classes of output considered were the following: Haplic Acrisols (Clayic), Haplic Acrisols (Chromic), Haplic Cambisols, Haplic Gleysols, Endosalic Gleysols, Haplic Ferralsols (Xanthic), Haplic Ferralsols (Dystric), Fluvisols, Regosols, according to WRB (IUSS, 2007). The analysis of the mean squared error (MSE), showed in general, stability of values from 10 neurons in the hidden layer, in all training sets. For comparison between the groups it was defined the set of input data, using the ten neurons in the hidden layer architecture. The best performance on the steps of training and validation of the ANN, was obtained by set 1 (with all discriminating variables), with values of 85.2% for overall accuracy and Kappa index of 0.833. However, the matrix of significance between the groups tested showed no significant difference in the sets 7 and 10, with values of 0.801 and 0.809, respectively. The values obtained showed good preliminary check correct (59.2%) for the network of the assembly 10, when compared with the other two sets (52.5%, for both). The best generalization of the soil class was obtained by set 10 (eight variables in the input layer: altimetry, elevation, curvature, CTI, Euclidean distance, clay minerals, iron oxide and geology), which was then chosen to represent the soil map of the study area.

### 4.3. INTRODUÇÃO

Os levantamentos de solos no Brasil, com bases confiáveis, tem nível exploratório ou de reconhecimento (escalas 1:250.000 até 1:1.000.000), carecendo de informações na escala das exigências regionais e locais. Os motivos principais que dificultam a execução do levantamento de solos no país envolvem a própria diversidade intrínseca dos pedoambientes, restrições orçamentárias e logísticas, além da escassez de profissionais capacitados. Algumas regiões com grande pressão de ocupação, seja de uso urbano ou rural, não possuem mapas com informações em nível adequado para subsidiar o planejamento, favorecendo a ocupação desordenada e causando sérios problemas, inclusive degradação ambiental e catástrofes decorrentes da falta de planejamento de uso do solo. Ainda assim, os levantamentos de solo têm sido considerados atividade não ligada diretamente à produção e de razão custo-benefício pouco valorizada (Chagas, 2006).

As técnicas de geoprocessamento ligadas a análises ambientais podem auxiliar a execução de tais levantamentos, enquanto o uso de métodos tradicionais isoladamente torna o trabalho mais árduo e com menor precisão. Portanto, com o avanço tecnológico das últimas décadas, a informatização dos dados tem sido de relevada importância para trabalhos em ciências ambientais, buscando otimizar desde o planejamento até o processamento e interpretação dos resultados obtidos. Contudo, a possibilidade de se trabalhar com dados “digitais”, requer a avaliação da distribuição dos mesmos na área para qual será gerado o modelo, uma vez que a precisão e qualidade dos produtos finais são diretamente dependentes das informações obtidas em campo (Zhu, 2001).

A pedologia trata do estudo do solo como corpo natural, constituído de horizontes ou camadas, minerais ou orgânicos, resultante da formação e evolução em seu ambiente. Como ramo das ciências da terra, a pedologia é relativamente recente (pouco mais de um século) quando comparada a outras ciências a exemplo da ecologia, mineralogia, etc. Tem origem como ciência reconhecida na Rússia, a partir dos estudos de Dokuchaev (1846-1903) sobre as propriedades e fatores que resultavam na diferenciação dos solos e na capacidade de suporte para desenvolvimento vegetal.

A pedometria tem como objetivos a descrição, classificação e compreensão da distribuição espacial dos solos de maneira objetiva e precisa, constituindo um campo emergente da ciência do solo, com abordagem mais quantitativa que a utilizada nos levantamentos convencionais. A palavra pedometria é um neologismo derivado das palavras gregas: *pedos* (solos) e *metron* (medida), sendo utilizada analogamente a palavras como biometria, geometria, entre outras (Webster, 1994).

O surgimento da pedometria foi necessário para sanar a necessidade de se realizar com maior precisão e acurácia, as inferências sobre classes e atributos de solos, facilitando a execução dos procedimentos necessários em um levantamento e a apresentação dos resultados. Atualmente, representa um ramo interdisciplinar entre a ciência do solo e a estatística e matemática, aplicada à geoinformação, reunindo diferentes campos das ciências, com diversos objetivos de aplicação. As ferramentas da geoestatística e da estatística clássica, bem como a combinação de ambas, são comumente utilizadas para análise da distribuição espacial dos solos (McBratney e Odeh, 2000).

Os primeiros trabalhos na área de pedometria foram embasados na classificação numérica por sistemas de computadores e desde então, a análise espacial e geoestatística, organização de banco de dados, análise discriminante e outras derivadas da classificação numérica para os estudos de solos, vem sendo amplamente utilizadas, porém estes dados ainda são tratados de forma descontínua entre unidades (Chagas, 2006).

A descrição das propriedades morfológicas e caracterização analítica, bem como a interpretação dos resultados, podem ser utilizadas para um mapeamento mais quantitativo das propriedades dos solos (Minasny et al., 2003). As funções de pedotransferência (FPT's) buscam estimar por expressões matemáticas, atributos ou características de difícil mensuração direta ou que envolvam grande número de informações. A estimativa de propriedades do solo, por sua vez, pode ser utilizada como *input* em modelos de predição mais complexos, como na predição de classes de solos. Para derivar estas equações e estabelecer relações entre variáveis preditoras e preditas, algumas técnicas tem sido utilizadas recentemente como modelos aditivos generalizados, sistema de lógica difusa, árvore de regressão, redes neurais artificiais, entre outras. Estas técnicas, apesar de relativamente recentes, tem grande potencialidade para a utilização em diversos âmbitos, como estimativas de susceptibilidade à erosão e estudo das propriedades hídricas (Moonjun, 2007).

Utilizados como ferramenta de inferência, tais métodos possibilitam o conhecimento do nível de certeza das estimativas, contribuindo para melhorar a qualidade dos levantamentos existentes, uma vez que a variabilidade espacial das propriedades no solo é grande e a confiabilidade dos produtos gerados depende do volume de dados e a organização destes em sistemas de informações geográficas.

Algum avanço para uma visão contínua para inferências geográficas é abordagem pela lógica “*fuzzy*”, que expressa os dados em formato numérico contínuo, quando por alguma razão não se tem ou não se pode definir limites rígidos entre as classes, o que é coerente com a variação natural dos solos. A prévia segmentação das imagens e o uso de lógica “*fuzzy*” podem melhorar a qualidade de um mapeamento na classificação automática orientada a objeto, e possibilitam extrair muitas informações relevantes para o manejo e conservação dos recursos. O mapa resultante é utilizado em sistemas de informações geográficas, no auxílio da tomada de decisões, servindo como subsídio para análises da paisagem, impactos ambientais, cobertura vegetal, entre outros (Campos, 2005).

Hengl e Heuvelink (2004) e Ibañez et al. (1993), propõem que os rumos das mudanças no mapeamento de solos abordem questões como algoritmos preditivos, modelagem global e dinâmica da gênese de solos, integração de sistemas de informações geográficas e ferramentas geoestatísticas, uso de imagens de alta resolução e capacitação de profissionais interdisciplinares, com expectativas que ampliem os rumos da pesquisa de solos e da pedometria na próxima década.

O mapeamento digital de solos tem se desenvolvido neste contexto devido aos métodos mais rápidos e econômicos associados à facilidade de obtenção de mapas auxiliares, com destaque para as imagens de sensor remoto e os atributos derivados dos modelos digitais de elevação. Vários estudos (Moore et al., 1993; Odeh et al., 1994; McKenzie e Ryan, 1999; Gessler et al., 2000; Lagacherie e Voltz, 2000; Chagas, 2006; Smith et al., 2006; Chagas et al., 2010a,b) mostram que o uso de atributos do terreno derivados de MDE's é eficiente na predição de propriedades e classes do solo.

A classificação de pedoambientes compreende a definição de classes para cada padrão de terreno. O reconhecimento destes padrões, por sua vez, envolve a organização e agrupamento de variáveis com comportamento semelhante de possível identificação, delimitação e classificação. A classificação digital pode ser feita com ou sem a presença de um analista, informando previamente os padrões estruturados que definem a estratificação, sendo classificada como supervisionada ou não supervisionada, respectivamente (Câmara et al., 1996; Carvalho Júnior, 2005). A classificação supervisionada é baseada em algoritmos onde o reconhecimento dos padrões utiliza como base amostras de treinamento oferecidas ao classificador pelo especialista (Moreira, 2003).

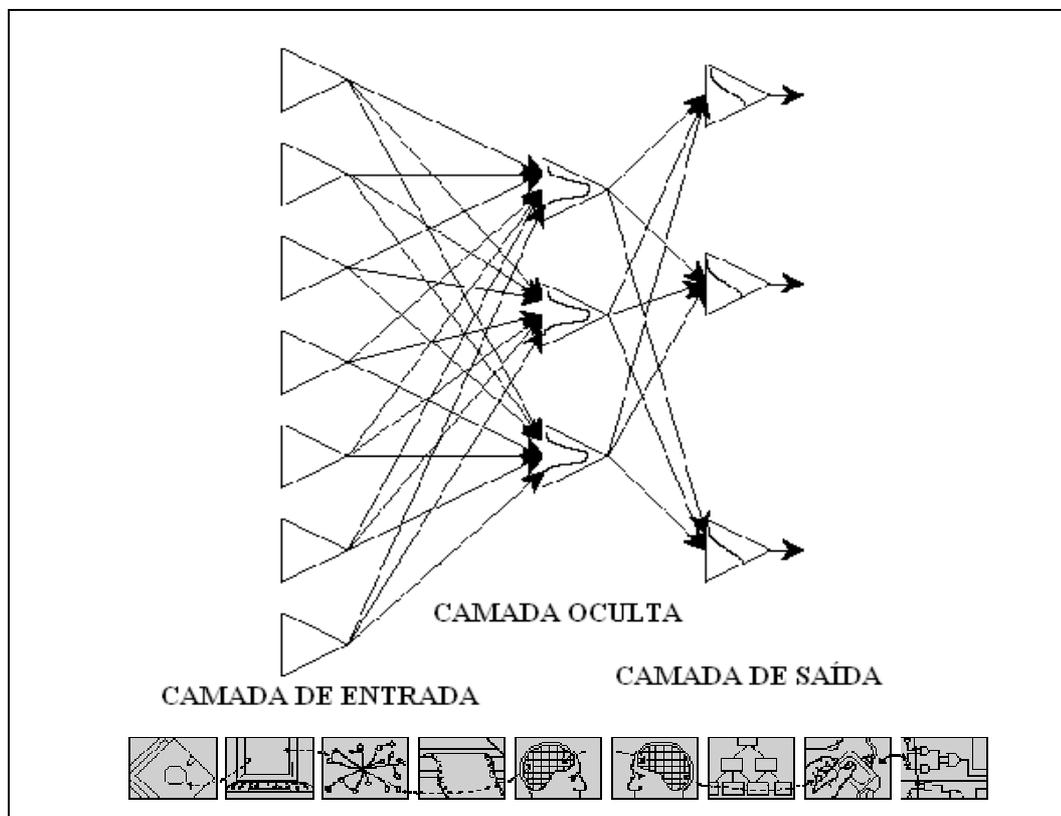
Alguns exemplos recentes de aplicação destas técnicas em levantamentos pedológicos são encontrados nos estudos de Chagas (2006), Chagas et al. (2011), Carvalho Júnior (2005),

Carvalho Júnior et al. (2011), Ten Caten (2008), Ten Caten (2011). Entre os métodos mais utilizados para extração de informações e reconhecimento de padrões, destacam-se os simuladores de redes neurais artificiais (RNA's), árvores de decisão, regressão logística. As RNA's são aplicadas em diversos campos da modelagem, análise de séries temporais, reconhecimento de padrões, entre outros (Braga et al., 2000).

Os simuladores de redes neurais artificiais compreendem técnicas de inteligência artificial que, analogamente ao cérebro humano, têm a capacidade de aprendizado e reconhecimento de padrões, a partir de exemplos que subsidiam o treinamento e conferem capacidade de predição para análises subsequentes. Segundo Vieira (2000), a abordagem por redes neurais envolve dois valores semânticos com conceitos distintos, um baseado no desenvolvimento de sistemas artificiais que reproduzem as características de um especialista nas tomadas de decisões e outro analogamente a sistemas neurais cognitivos de um cérebro humano. Essa semelhança com o cérebro deve-se a capacidade de armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso, após processo de treinamento baseado na interação entre os neurônios e pesos sinápticos que resultam no aprendizado da rede (Haykin, 2001; Braga et al., 2000).

O uso de simuladores de redes neurais para o processo de classificação supervisionada requer em primeira instância um processo de treinamento, onde a rede aprende as condições em que cada classe que se deseja mapear ocorre (Tso e Mather, 2009; Zhu et al., 2000). A unidade de processamento da rede (neurônio ou *perceptron*) representa uma variável preditora (atributos do terreno, dados de sensores remotos, entre outros), ou uma classe de saída, que se deseja mapear. O neurônio é assim definido por ser a unidade de processamento fundamental para a operação de uma rede neural artificial.

A Figura 41 apresenta o esquema simplificado de uma rede neural artificial.



**Figura 41.** Esquema de rede neural artificial com uma camada oculta (Fonte: University of Stirling).

As formas em que os neurônios estão distribuídos e o modelo pelo qual estão conectados definem a arquitetura da rede que é de fundamental importância, pois restringe o tipo de problema a ser tratado (Braga, 2000). A definição da arquitetura da rede compreende os seguintes parâmetros: número de camadas, número de neurônios em cada camada, tipo de conexão entre os nós e topologia da rede.

A aprendizagem por retropropagação do erro é o método de treinamento mais popular para resolução de problemas através dos simuladores de redes neurais, e consiste em regra de correção de erros em função do aprendizado do conjunto de unidades sensoriais representados por uma camada de entrada, uma ou mais camadas ocultas e uma camada de saída. A aprendizagem por retropropagação de erro consiste de dois passos através das diferentes camadas da rede: um passo para frente, a propagação, e um passo para trás, a retropropagação. No passo para frente, um padrão de atividade (vetor de entrada) é aplicado aos nós sensoriais da rede, e seu efeito se propaga através da rede, camada por camada. Em consequência, um conjunto de saídas é produzido como a resposta real da rede. Durante o passo de propagação os pesos sinápticos da rede são todos fixos. Já durante o passo para trás os pesos sinápticos são ajustados de acordo com a regra de correção de erro. Dessa forma a resposta da rede é subtraída de uma resposta desejada (alvo) produzindo um sinal de erro, e este sinal é então propagado a direção das conexões sinápticas, daí a denominação “retropropagação do erro” (Carvalho Junior, 2005; Braga et al., 2000, Haykin, 2001).

É importante ressaltar que a quantidade e qualidade dos dados são fatores relevantes ao processo e quanto maior variedade de informação para o aprendizado (treinamento) da rede melhores resultados serão alcançados. Na última década, alguns trabalhos foram publicados utilizando redes neurais artificiais para correlações espaciais envolvendo classificação dos solos, como Florinsky et al. (2002); Carvalho Júnior (2005), Behrens et al. (2005) e Chagas (2006).

O presente capítulo tem como objetivo a predição da distribuição das classes de solos através da classificação supervisionada por simuladores de redes neurais artificiais. Os capítulos anteriores serviram de subsídio para definição das variáveis preditoras, classes de saída a serem mapeadas e por consequência, da arquitetura adequada para a obtenção do mapa de solos da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu. O procedimento para seleção do mapa final envolveu a análise do desempenho da classificação através de parâmetros estatísticos (exatidão e Kappa), qualidade da generalização e validação preliminar com perfis de solos (pontos de controle) não utilizados na fase de treinamento das redes.

#### 4.4. MATERIAL E MÉTODOS

A classificação supervisionada pelo simulador de redes neurais artificiais (RNA's) foi realizada no programa JavaNNS (Java Neural Network Simulator- Version 1.1 –University of Tübingen, 2001). Este programa é baseado no Stuttgart Neural Network Simulator 4.2 Kernel (SNNS, 1998) que utiliza o algoritmo de aprendizado por retropropagação (*backpropagation*).

##### 4.4.1. Seleção das Variáveis Discriminantes

A abordagem na qual se baseou a construção do modelo das relações solo-paisagem neste estudo foi fundamentada na proposta de Jenny (1941) e no modelo descrito por Hudson (1992), largamente utilizado nos levantamentos de solos convencionais. As variáveis ambientais discriminantes usadas para identificar os padrões de ocorrência dos solos na paisagem são descritas na Tabela 42.

**Tabela 42.** Fatores de formação dos solos e variáveis ambientais correspondentes.

Fatores de Formação	Variáveis Ambientais	Implicações na Pedogênese
Organismos	NDVI	Vegetação, comportamento hidrológico
Relevo	Elevação, Declividade, Curvatura, Índice Topográfico Combinado e Distância Euclidiana	Intemperismo, variações climáticas, umidade e outras propriedades dos solos
Material de Origem e Tempo	Unidades Litológicas, <i>Clay Minerals</i> , <i>Iron Oxide</i>	Produtos do intemperismo, natureza mineral, susceptibilidade à erosão

\* adaptado de McKenzie e Ryan (1999) e Chagas (2006).

Tomando como base os resultados obtidos nos capítulos anteriores, com destaque para o Capítulo II que abordou as relações geomorfopedológicas que ocorrem na área de estudo, foram selecionadas nove variáveis discriminantes, sendo seis derivadas do MDE selecionado no capítulo 1 (elevação, declividade, curvatura, índice CTI e distância euclidiana), um mapa das unidades litológicas da bacia e três índices derivados de imagens do sensor TM do Landsat 5 (*NDVI*, *clay minerals* e *iron oxide*).

Avaliações realizadas no capítulo antecedente mostraram que os atributos do terreno aspecto, radiação solar, perfil e plano de curvatura não possuem poder de discriminação dos solos da bacia hidrográfica, devido à pequena variabilidade entre as classes consideradas (Figura 33, do item 3.5.5. Análise Conjunta dos Atributos Morfométricos nos Pedodomínios), desta maneira, não foram utilizadas como variáveis discriminantes.

Os índices derivados do Landsat 5 foram obtidos no ERDAS Imagine v.9.1. através da relação entre as bandas, conforme se segue:

$$NDVI = (banda\ 4 - banda\ 3) / (banda\ 4 + banda\ 3)$$

$$clay\ minerals = banda\ 5 / banda\ 7$$

$$iron\ oxide = banda\ 3 / banda\ 1$$

Os índices derivados das imagens foram utilizados buscando melhorar o desempenho da classificação das RNA's devido às contribuições indiretas para as informações relativas à vegetação (fator organismos), composição mineral do solo (fator material de origem) e disponibilidade de água no solo (fator clima e relevo).

De acordo com Sabins (1997), estes índices são muito usados no sensoriamento remoto geológico para distinguir propriedades da superfície, possibilitando a distinção entre propriedades físicas e mineralógicas diferentes. Autores como Yang et al. (1997), em seus estudos, destacaram relações entre índices derivados de dados de sensor remoto e regimes de temperatura, pluviosidade e características físicas e morfológicas do solo.

#### 4.4.2. Classificação pelas Redes Neurais Artificiais

Inicialmente, todos os temas correspondentes às variáveis discriminantes foram reescalados entre 0 e 1 de forma a compatibilizar a análise conjunta dos temas e facilitar o aprendizado das redes, pois valores elevados podem impedir a solução do problema, ou seja, a convergência da rede (Vieira, 2000). Com esta operação é possível redefinir a amplitude global dos valores dos atributos do terreno para a área da bacia hidrográfica, tornando as escalas das unidades dos atributos comparáveis, onde os valores máximos de cada mapa correspondem a 1 (um) e os mínimos a 0 (zero).

Em seguida procedeu-se a aquisição das amostras para treinamento e validação das RNA's. Estas amostras foram coletadas com base no conhecimento das relações solo-paisagem nos locais de ocorrência dos perfis e amostras extras coletados na área da BHRGM, representativos das classes de solos identificadas. Foi respeitada a amplitude de valores das variáveis discriminantes associadas a cada classe de saída, correspondente as classes de solos identificadas previamente através da descrição de perfis e caracterização dos pedodomínios.

As amostras utilizadas no treinamento e validação das RNA's correspondem ao mesmo conjunto usado no estudo das relações geomorfopedológicas (Capítulo II). Embora, Congalton e Green (1999) tenham desenvolvido procedimentos estatísticos para definir o número mínimo de amostras para classificadores, optou-se por utilizar as recomendações de Zhu (2000), que propõe um número de amostras igual ou superior a 30 vezes o número de classes de saída para o treinamento da rede, pois, quanto mais classes, mais complexo será o mapeamento da relação entrada (variáveis)/saída (classes de solo) e, por sua vez, mais amostras serão necessárias para treinar as redes. O autor estabelece ainda que o número de amostras para validação deva ser a metade das amostras de treinamento.

Sendo assim, foram destinadas 350 amostras para treinamento e 150 para validação, coletados independentemente um do outro, para cada classe de solo identificada no antecedente (Capítulo II), conforme mostra a Tabela 43. Em seguida, os arquivos foram convertidos para o formato de trabalho do "Java Neural Network Simulator".

**Tabela 43.** Classes de solos identificadas na bacia do rio Guapi-Macacu.

Unidade	Descrição
1 PA	Argissolo Amarelo + Planossolo Háptico
2 PVA	Argissolo Vermelho-Amarelo
3 CX	Cambissolo Háptico
4 LA	Latossolo Amarelo
5 LVA	Latossolo Vermelho-Amarelo + Latossolo Amarelo
6 GX	Gleissolo Háptico + Gleissolo Melânico
7 GS + GJ	Gleissolo Sáfico + Gleissolo Tiomórfico
8 RY	Neossolo Flúvico
9 RL	Neossolo Litólico + Afloramento Rochoso

Ao todo foram testados 11 conjuntos de variáveis discriminantes conforme apresentado na Tabela 44, a seguir.

**Tabela 44.** Conjuntos de variáveis discriminantes testados.

Conjuntos	Variáveis Discriminantes
1	Elevação, declividade, curvatura, índice CTI, distância euclidiana, geologia, índice <i>clay minerals</i> , índice <i>iron oxide</i> e índice <i>NDVI</i> .
2	Todas exceto a elevação
3	Todas exceto a declividade
4	Todas exceto a curvatura
5	Todas exceto o índice CTI
6	Todas exceto a distância euclidiana
7	Todas exceto a geologia
8	Todas exceto o índice <i>Clay minerals</i>
9	Todas exceto o índice <i>Iron oxide</i>
10	Todas exceto o índice <i>NDVI</i>
11	Todas exceto os índices <i>Clay minerals</i> , <i>Iron oxide</i> e <i>NDVI</i>

O conjunto 1 utiliza todas as variáveis inicialmente consideradas (9). Já nos conjuntos 2 a 10 foi retirada apenas uma das variáveis discriminantes (8) e no conjunto 11 foram excluídas três das 9 variáveis inicialmente consideradas (6), que correspondem aos três índices das imagens do sensor TM do Landsat 5, conforme mostrado na Tabela 44. Este procedimento buscou avaliar o efeito de cada variável(s) retirada(s) no desempenho do treinamento e posterior classificação pelas RNA's.

O aprendizado das RNA's é baseado em testes iterativos, por tentativa e erro, conforme sugerido por Hirose et. al (1991) onde é possível variar o número e tipo de neurônios, da camada de entrada, em função das variáveis ambientais discriminantes utilizadas e/ou número de neurônios e camadas ocultas, contendo todas o mesmo número de neurônios na camada de saída, que correspondem as classes que se deseja mapear, no presente caso, as classes de solos identificadas na BHRGM.

O aprendizado da rede em si consiste em submeter cada RNA ao treinamento através da inicialização do algoritmo, com parâmetros de treinamento e o número de ciclos pré-definidos. Um dos parâmetros a serem configurados para inicialização consiste na alocação dos pesos interneurônios com valores aleatórios pequenos (normalmente entre -1 e 1). No presente estudo utilizaram-se pesos variando entre -0,5 e 0,5, evitando assim a saturação da RNA com valores grandes que podem dificultar a aprendizagem da rede (Vieira, 2000). Outros valores passíveis de configuração consistem na taxa de aprendizado e os ciclos de treinamentos. Neste estudo, optou-se por utilizar valores correspondentes a 0,2 para taxa de aprendizado e 10000 ciclos de treinamento, conforme Chagas et al. (2011) e Chagas (2006).

Para cada conjunto de variáveis discriminantes testado foram treinadas várias arquiteturas de redes com diferentes neurônios em uma camada oculta (variando de 1 a 15), todas contendo o mesmo número de neurônios nas camadas de entrada e saída, correspondentes as variáveis discriminantes e as classes de solo, respectivamente. O critério adotado para adicionar neurônios à camada oculta das RNA's foi baseado no comportamento do erro quadrático médio (EQM) durante essa fase, que mede a diferença entre os valores estimados e os valores desejados para o treinamento, conforme a equação:

$$EQM = \frac{\sum(e - d)^2}{n}$$

em que  $e$  representa os valores estimados para cada *pixel*; e  $d$ , os valores desejados e  $n$  o número de ciclos de aprendizado. Assim, o treinamento deve ser interrompido quando esse erro, para o conjunto de treinamento testado, tende ao menor possível e não mais oscila com novos ciclos (Chagas et al., 2011).

A avaliação dos resultados do treinamento das RNA's para cada conjunto foi feita por medidas estatísticas, como o índice Kappa e a exatidão global da classificação, derivados de uma matriz de confusão (Congalton e Green, 1999). Segundo Congalton (1991), o valor do índice Kappa representa a medida mais adequada da exatidão de uma classificação temática, considerando os erros de toda matriz de confusão e não apenas os componentes da diagonal.

Uma matriz de significância foi gerada para comparar os resultados das RNA's entre os conjuntos, tendo-se utilizado os valores de Kappa e da variância da classificação das redes selecionadas para representar cada conjunto. Na matriz de significância a diagonal principal mostra o nível de concordância entre os dois conjuntos de dados. A exatidão global é obtida por cálculo aritmético dos valores da diagonal principal que representam a estimativa relativa das amostras corretamente classificadas.

O teste estatístico  $Z$  verifica, inicialmente, se a classificação difere de uma classificação casual e, em segunda análise, se existe diferença significativa entre os valores de Kappa resultantes da avaliação dos diferentes conjuntos, aos pares. Ao término do processo de treinamento e validação das RNA's, foi selecionada, para gerar o mapa digital das classes de solos da área, arquitetura de rede com melhor desempenho para o índice Kappa, para cada um dos conjuntos de variáveis ambientais utilizados, conforme Chagas et al. (2011).

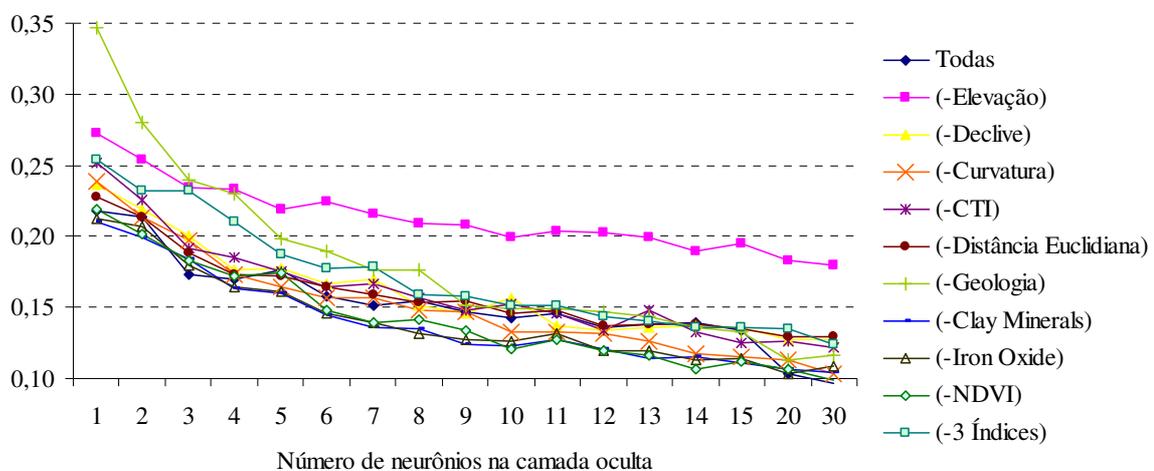
Como o simulador de RNA's (JavaNNS) não possibilita a geração de matrizes de confusão e significância tais procedimentos foram realizados através dos aplicativos executáveis "funcpow.exe" e "gerapat.exe", assim como a compatibilização dos arquivos no que tange ao tipo de extensão compreendida pelo classificador (Vieira, 2000).

## 4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.5.1. Avaliação do Desempenho da Classificação por Redes Neurais Artificiais

A avaliação do erro quadrático médio (EQM), que orientou a adição de neurônios na camada oculta das RNA's, e conseqüentemente, indicou o término da fase de treinamento das redes, mostrou que o comportamento deste erro foi muito parecido para todos os conjuntos avaliados. Notou-se tendência a estabilização a partir de 10 neurônios na camada oculta, por isso a fase de treinamento foi encerrada com 15 neurônios nesta camada (Figura 41). Após encerrada, para cada conjunto foi escolhida a topologia de rede com 10 neurônios na camada oculta para comparação entre os diferentes conjuntos de variáveis discriminantes, e ao mesmo tempo manter uma estrutura razoavelmente simples e evitar a saturação da rede (*overfitting*).

Segundo Faussett (1994), teoricamente, uma topologia contendo apenas uma camada interna tem sido suficiente para extrair conhecimento relevante a partir de um conjunto de dados de treinamento. Além disso, de acordo com Foody & Arora (1997), em geral, redes maiores e mais complexas são mais eficientes para caracterizar corretamente um conjunto de treinamento, porém podem ser menos eficientes do que redes mais simples para generalizar. Brown et al. (1998), Zhu (2000), Boruvka e Penizek (2007), Chagas et al. (2011), também utilizaram em seus estudos redes com apenas uma camada oculta. A Figura 42 mostra a comparação do erro quadrático médio entre os diferentes conjuntos de redes avaliados.



**Figura 42.** Análise do erro quadrático médio (EQM).

Assim, os resultados para o EQM, considerando topologia de rede com 10 neurônios em uma única camada oculta, variaram de 0,144 (com todas as variáveis) a 0,239 (sem a curvatura). De modo geral, a remoção dos atributos do terreno teve efeito mais significativo no aumento do EQM (0,164 a 0,239) do que a remoção dos índices derivados da imagem do sensor TM do Landsat 5 (0,150 a 0,166), corroborando a maior contribuição dos atributos do terreno neste tipo de abordagem, conforme destacado por Dobos et al. (2001). Segundo estes autores os dados de sensores remotos são influenciados pela variabilidade do terreno e não conseguem identificar com precisão toda a variabilidade do solo que ocorre na paisagem. Por essa razão, sugere-se que os dados de sensores remotos devam ser complementados com informações do terreno para fornecer dados adicionais para modelagem solo-paisagem.

Em seguida, o desempenho das RNA's dos conjuntos avaliados foi medido, com base nas amostras de validação, através da análise da exatidão global e do índice Kappa derivados de uma matriz de confusão, conforme Congalton e Green (1999). Na Tabela 45 é apresentado o desempenho da exatidão global e do índice Kappa entre os conjuntos de variáveis discriminantes testados no treinamento das redes.

**Tabela 45.** Resultados dos índices obtidos das matrizes de confusão das RNA's dos conjuntos avaliados.

Conjuntos	Exatidão Global	Índice Kappa	Contribuição
1	85,2	0,833	-
2	80,1	0,777	0,056
3	73,3	0,699	0,134
4	70,1	0,663	0,170
5	70,4	0,667	0,166
6	81,2	0,788	0,045
7	82,3	0,801	0,032
8	79,8	0,772	0,061
9	78,7	0,761	0,072
10	83,0	0,809	0,024
11	77,9	0,752	0,081

Observa-se na Tabela 45 que a exatidão global e o índice Kappa variaram entre os conjuntos testados. A combinação dos atributos do terreno com os três índices derivados da imagem do sensor TM do Landsat 5 e a geologia (conjunto 1) foi a que apresentou o melhor desempenho, com exatidão de 85,2% e um valor para o índice Kappa de 0,833. Segundo Landis & Koch (1977) e Monserud & Leemans (1992) os valores de Kappa >0,75 obtidos pelos conjuntos 1, 2, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 mostram um desempenho do classificador de muito bom a excelente, enquanto os conjuntos 3, 4 e 5 mostram um desempenho moderado do classificador.

Todos os demais conjuntos onde foram retiradas variáveis discriminantes tiveram desempenho do classificador inferior ao conjunto que utilizou todas as variáveis, indicando que estes tiveram alguma contribuição para a classificação dos dados. De modo geral, a contribuição dos atributos do terreno, principalmente a declividade, a curvatura e o índice CTI foram maiores do que a dos índices da imagem do sensor TM do Landsat 5 como verificado na Tabela 45. Neste sentido, a remoção do atributo curvatura produziu o maior decréscimo nos valores da exatidão global e do índice Kappa 70,1% e 0,663, respectivamente, seguido de perto pela remoção dos atributos índice CTI (conjunto 5), com uma exatidão global de 70,4% e índice Kappa de 0,667 e declividade (conjunto 3) com exatidão de 73,3% e índice Kappa de 0,699, sugerindo uma maior contribuição destes atributos para a classificação dos dados. Assim como foi observado nos dados de obtidos para o EQM durante a fase de treinamento das RNA's, que mostraram valores elevados e conseqüentemente piores para o treinamento destes conjuntos (0,230, 0,239 e 0,226, respectivamente para os conjunto 3, 4 e 5).

Embora a área da bacia apresente grande amplitude altimétrica a contribuição da elevação não foi tão significativa quanto a os demais atributos, já que sua remoção produziu exatidão global de 80,1% e índice Kappa de 0,777. O mesmo quando a distância euclidiana foi excluída da análise, o que produziu valor de exatidão de 81,2% e 0,788 de índice Kappa.

As variáveis que aparentemente menos contribuíram para a classificação dos dados foram o índice *NDVI*, com exatidão de 83% e índice Kappa de 0,809, e a geologia com exatidão igual a 82,3% e Kappa de 0,801. No entanto, embora os índices *Clay minerals*, *Iron Oxide* e *NDVI* não apresentem uma relação direta com os fatores de formação do solo, a utilização destes juntamente com os atributos do terreno teve um efeito positivo sobre a

exatidão da classificação, visto que quando os índices foram excluídos (conjunto 11) o desempenho foi menor do que quando com todas as variáveis (Tabela 45), ou seja, exatidão global de 77,9% e índice Kappa de 0,752, corroborando resultados de Chagas (2006).

Neste sentido, Kanellopoulos & Wilkinson (1997) destacam que o uso de variáveis complementares tem efeito benéfico sobre o desempenho da classificação por RNA's, desde que a variável utilizada forneça informação adicional útil. Sendo assim, não é garantido que estas variáveis irão aumentar a exatidão da classificação e algumas vezes, até mesmo degradam a precisão (fenômeno de Hugues). Além disso, é possível que a adição de variáveis extras reduza o desempenho geral da classificação, e com aumento do tempo de treinamento. Embora, isto não parece ter ocorrido quando os índices foram adicionados como variáveis discriminantes adicionais, já que quando foram removidos da análise (conjunto 11) não apresentaram resultados para exatidão global e índice Kappa superiores ao conjunto 1, que mostrou o melhor desempenho.

A geologia foi usada como variável discriminante neste estudo para melhorar, principalmente, o desempenho da classificação da classe PVA que ocorre em paisagem semelhantes a das classes LVA e LA (elevação, declividade e curvatura), diferindo destas primordialmente quanto ao material de origem (Rochas Alcalinas), evitando assim confusões entre as classes. No entanto, o desempenho do classificador não parece ter sido muito significativo, já que sua contribuição, medida pela diminuição do índice Kappa (Tabela 45) quando da sua remoção foi semelhante a do índice *NDVI*. Estes resultados destoam daqueles obtidos por McKenzie e Ryan (1999), Thomas et al. (1999) e Chagas et al. (2011), nos quais a utilização de informações sobre o material de origem dos solos foi primordial para melhorar a classificação dos dados.

Segundo Kanellopoulos & Wilkinson (1997), um aspecto que tem sido negligenciado nas comparações entre classificadores estatísticos e redes neurais é a existência de diferenças significativas entre o desempenho destes classificadores quando se consideram as classes individualmente. Esta questão foi também abordada por Chagas (2006) e Chagas et al. (2011).

Nas Tabelas que se seguem são apresentadas as matrizes de confusão das RNA's para cada conjunto de variáveis discriminantes testados. A Tabela 46 apresenta o resultado do aprendizado da rede do conjunto 1.

**Tabela 46.** Matriz de confusão da RNA do conjunto 1.

Classes	PA	PVA	CX	GX	GS+GJ	LA	LVA	RY	RL	Total	Usuário
PA	135	2	0	24	1	0	0	3	0	165	81,8
PVA	1	148	3	0	0	0	0	2	2	156	94,9
CX	5	0	105	1	0	0	2	0	11	124	84,7
GX	6	0	0	108	3	0	0	11	1	129	83,7
GS+GJ	1	0	0	1	142	1	0	1	0	146	97,3
LA	0	0	3	0	0	115	19	0	0	137	83,9
LVA	0	0	19	0	0	34	129	1	0	183	70,5
RY	2	0	0	16	4	0	0	132	0	154	85,7
RL	0	0	20	0	0	0	0	0	136	156	87,2
*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	150	150	150	150	150	150	150	150	150	1350	
Produtor	90,0	98,7	70,0	72,0	94,7	76,7	86,0	88,0	90,7		

Exatidão global = 85,2; Kappa = 0,833; Variância = 0,000118;  $Z_{\text{calculado}} = 76,69$ . \* pixels não classificados.

Na matriz de confusão obtida para o conjunto com todas as variáveis discriminantes (conjunto 1) é possível verificar que apenas as classes CX e GX tiveram uma exatidão do produtor inferior a 75% (70 e 72%, respectivamente). A classe CX teve um maior confundimento com as classes LVA e RL, com 19 pixels que deveriam ser classificados como pertencentes a esta classe sendo atribuídos à classe LVA e 20 sendo atribuída a classe RL. A confusão com os LVA se dá principalmente pela similaridade das condições de paisagem, que diferem somente quanto à curvatura, com os LVA ocorrendo predominantemente em encostas convexas e os CX em encostas côncavas. A confusão com os RL pode ser atribuída a condições muito próximas de elevação e declividade, uma vez que ambos ocorrem em áreas elevadas e íngremes próximos aos divisores de águas da bacia.

A classe GX apresentou confusão com as classes PA e RY, com as quais ocorre de forma intimamente relacionada na paisagem, já que todas ocupam o terço inferior de encostas em áreas planas e suaves onduladas ao longo das drenagens e várzeas, onde são influenciados pelos processos hidromórficos. Neste caso, do total de pixels que deveriam ser atribuídos a esta classe, 24 foram atribuídos erroneamente a classe PA e 16 a classe RY.

As classes dos LA e LVA mostraram pequena confusão entre si (Tabela 46), que também pode ser considerada normal, pois ambas ocorrem em uma situação de elevação, declividade e curvatura muito semelhante na paisagem, sendo neste caso a composição mineralógica do material de origem e a geomorfologia os principais fatores para a diferenciação destes solos. As demais classes tiveram uma elevada exatidão do produtor, superior a 85%, apresentando baixo confundimento com as demais classes.

A Tabela 47 mostra os resultados do treinamento da RNA do conjunto 2.

**Tabela 47.** Matriz de confusão da RNA do conjunto 2.

Classes	PA	PVA	CX	GX	GS+GJ	LA	LVA	RY	RL	Total	Usuário
PA	107	1	0	4	0	0	0	5	0	117	91,5
PVA	0	149	3	0	0	1	0	0	1	154	96,8
CX	0	0	128	0	0	3	10	0	8	149	85,9
GX	34	0	0	90	1	0	0	1	0	126	71,4
GS+GJ	8	0	0	4	147	1	0	0	0	160	91,9
LA	0	0	4	4	0	98	49	1	3	159	61,6
LVA	0	0	7	0	0	44	90	0	7	148	60,8
RY	1	0	0	48	2	0	0	143	1	195	73,3
RL	0	0	8	0	0	3	1	0	130	142	91,5
*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	150	150	150	150	150	150	150	150	150	1350	
Produtor	71,3	99,3	85,3	60,0	98,0	65,3	60,0	95,3	86,7		

Exatidão global = 80,1; Kappa = 0,777; Variância = 0,000149;  $Z_{\text{calculado}} = 63,70$ . \* pixels não classificados.

A RNA do conjunto 2 apresentou índices de exatidão do produtor relativamente baixos (menor que 70%) para a classe dos GLEISSOLOS HÁPLICOS, LATOSSOLOS AMARELOS e VERMELHO-AMARELOS. No caso dos GX, a exclusão da variável elevação neste conjunto causou maior confusão com a classe dos RY, já que ocorrem em condição similar de paisagem, mas diferem quanto à altimetria. Onde, os GX ocorrem em cotas mais baixas entre os morros e colinas na porção central da bacia, e os RY estão distribuídos desde as partes altas da bacia, no entorno dos rios que drenam escarpas serranas.

A ordem dos LATOSSOLOS apresentou maior confusão entre si, quando comparada com os resultados obtidos para o conjunto 1, destacando a diferença na distribuição das

subordens, pois os LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS têm ocorrência expressiva nas partes mais altas, juntamente com os CAMBISSOLOS HÁPLICOS; já os LATOSSOLOS AMARELOS estão amplamente distribuídos na área da bacia, mas principalmente nos morrotes e colinas.

A classe dos PA apresentou confusão com os GX, o que causou redução dos índices de exatidão do produtor quando comparados com o conjunto com todas as variáveis. Estas classes ocorrem com condições semelhantes na paisagem, ocupando o terço inferior dos morrotes, sendo que os GX estão em cotas ligeiramente inferiores em condições de drenagem imperfeita. As classes dos PVA, GS + GJ e dos CX, apresentaram desempenho ótimo para índices de exatidão do produtor, que superaram 95 % de acerto.

A Tabela 48 apresenta os resultados encontrados para o conjunto 3.

**Tabela 48.** Matriz de confusão da RNA do conjunto 3

Classes	PA	PVA	CX	GX	GS+GJ	LA	LVA	RY	RL	Total	Usuário
PA	118	1	0	11	1	0	0	22	0	153	77,1
PVA	0	149	7	3	0	0	0	1	0	160	93,1
CX	0	0	90	0	0	0	9	0	32	131	68,7
GX	27	0	0	90	3	0	0	15	0	135	66,7
GS+GJ	2	0	0	7	145	1	0	8	0	163	89,0
LA	0	0	3	0	0	129	94	1	0	227	56,8
LVA	0	0	9	0	0	20	47	0	0	76	61,8
RY	3	0	0	39	1	0	0	103	0	146	70,5
RL	0	0	41	0	0	0	0	0	118	159	74,2
*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	150	150	150	150	150	150	150	150	150	1350	
Produtor	78,7	99,3	60,0	60,0	96,7	86,0	31,3	68,7	78,7		

Exatidão global = 73,3; Kappa = 0,699; Variância = 0,000181;  $Z_{\text{calculado}} = 51,92$ . \* pixels não classificados.

Analisando a Tabela 48 constata-se que o conjunto 3 apresentou piores resultados para as classes LVA, CX, GX, RY e PA. A classe dos LVA mostrou desempenho inferior a 35%, apresentando confusão com os LA, que ocorrem em condições mais suaves de declive que os primeiros. Conforme destacado anteriormente, os LVA ocorrem nas partes mais elevadas juntamente com os CX, e os LA tem distribuição mais ampla pela área ocorrendo preferencialmente nos domínios geomorfológicos de colinas e morros isolados.

A exclusão do atributo declividade também piorou o reconhecimento da classe dos CX, que apresentaram confusão com os RL. Ambas as classes ocorrem nas escarpas serranas, nos divisores de água da bacia, porém os RL ocupam áreas com declive mais acentuado, o que conseqüentemente dificulta o desenvolvimento de processos pedogenéticos, evidenciado pela ausência de horizonte diagnóstico nesta classe.

Para os solos GX e RY, que sofrem influencia de hidromorfismo o conjunto 3 também mostrou piores índices de exatidão do produtor, quando comparados ao desempenho obtido pelo conjunto 1 (todas variáveis). Embora ambas as classes estejam sob relevo plano, os GX podem ocorrer em terço inferior de encostas, com cerca de 3% de declive, e os RY ocupam predominantemente terraços ao longo dos grandes drenos com pouca variação de declive (menor que 2%).

A Tabela 49 mostra os resultados da RNA do conjunto 4.

**Tabela 49.** Matriz de confusão da RNA do conjunto 4.

Classes	PA	PVA	CX	GX	GS+GJ	LA	LVA	RY	RL	Total	Usuário
PA	121	4	0	26	1	1	0	62	2	217	55,8
PVA	2	146	6	1	0	0	0	0	0	155	94,2
CX	0	0	83	0	0	0	0	0	21	104	79,8
GX	20	0	0	84	3	2	0	6	0	115	73,0
GS+GJ	7	0	0	6	145	2	0	14	0	174	83,3
LA	0	0	4	1	0	135	110	1	1	252	53,6
LVA	0	0	16	0	0	10	40	0	1	67	59,7
RY	0	0	0	32	1	0	0	67	0	100	67,0
RL	0	0	41	0	0	0	0	0	125	166	75,3
*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	150	150	150	150	150	150	150	150	150	1350	
Produtor	80,7	97,3	55,3	56,0	96,7	90,0	26,7	44,7	83,3		

Exatidão global = 70,1; Kappa = 0,663; Variância = 0,000192;  $Z_{\text{calculado}} = 47,90$ . \* pixels não classificados.

A variável excluída neste conjunto (curvatura) causou maior confundimento entre as classes CX, LVA, GX e RY. O pior desempenho para a classe CX decorreu da confusão com os RY e LVA. Embora os CX e RY geralmente ocorram em condições similares de paisagem, os primeiros mostram tendência de menores valores para concavidade da superfície. Já em relação aos LVA predominantemente convexos, apresentam comportamento inverso, sendo a curvatura e declividade os principais atributos de distinção destas classes.

Entre os GX e RY, ambos apresentam tendência de ocorrência em superfície planares, porém a classe dos GX possui maior amplitude na variabilidade destes atributos, podendo ocorrer em locais ligeiramente côncavos ou convexos, variando de -0,2 a 0,2. Também foi possível observar confusão entre os GX e PA, conforme destacado anteriormente, ambas as classes ocorrem em condições próximas na paisagem, porém o valor para exatidão do produtor na classe PA foi satisfatório (maior que 80%).

A Tabela 50 apresenta o desempenho da classificação para o conjunto 5.

**Tabela 50.** Matriz de confusão da RNA do conjunto 5

Classes	PA	PVA	CX	GX	GS+GJ	LA	LVA	RY	RL	Total	Usuário
PA	104	2	0	16	0	0	0	23	2	147	70,7
PVA	0	148	3	0	0	0	0	0	0	151	98,0
CX	1	0	67	0	0	0	1	0	23	92	72,8
GX	37	0	0	99	2	0	0	8	1	147	67,3
GS+GJ	6	0	3	1	146	1	0	18	0	175	83,4
LA	1	0	17	1	0	145	125	1	1	291	49,8
LVA	1	0	23	0	0	4	24	4	1	57	42,1
RY	0	0	0	32	2	0	0	96	1	131	73,3
RL	0	0	37	1	0	0	0	0	121	159	76,1
*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	150	150	150	150	150	150	150	150	150	1350	
Produtor	69,3	98,7	44,7	66,0	97,3	96,7	16,0	64,0	80,7		

Exatidão global = 70,4; Kappa = 0,667; Variância = 0,000190;  $Z_{\text{calculado}} = 48,37$ . \* pixels não classificados.

O conjunto 5 apresentou o pior desempenho para classe dos LVA, quando comparados a todos demais conjuntos testados, classificando erroneamente mais de 80% das amostras de validação. A confusão com a classe LA provavelmente deve-se as diferentes condições de umidade, pois de forma geral os LVA ocorrem em condições mais secas, fato esse evidenciado pela própria cor e mineralogia dos horizontes diagnósticos. Outro possível fator que diferencia estas classes quanto ao atributo CTI refere-se aos diferentes domínios geomorfológicos em que ocorrem, uma vez que os LA ocupam preferencialmente os morrotes e colinas na parte central da bacia hidrográfica, já os LVA encontram-se em cotas mais elevadas, e conseqüentemente mais distantes da rede de drenagem.

A exclusão do índice CTI do conjunto de variáveis ocasionou piores índices para as classes dos GX e RY. A classe dos GX apresentou confusão com os PA e RY, uma vez que ocorre sob condições relativamente similares de paisagem, porém apresenta maior acúmulo de água quando comparado com os PA, e menor em relação ao RY. A classe dos RY, também apresentou confusão com os GS+GJ, os quais apresentam elevada concentração de umidade, embora ocorram em condições ambientais distintas.

A classe dos CX apresentou confundimento com as classes RL, LA e LVA, embora apresentem valores médios próximos para este atributo, a classe dos CX apresenta maior amplitude de variação do índice, do que a classe dos LATOSSOLOS, e que ocasionou a confusão com a retirada deste que distribuiu erroneamente as amostras de validação dos CX para as duas outras classes de solos.

A Tabela 51, a seguir, apresenta os resultados obtidos pelo conjunto 6.

**Tabela 51.** Matriz de confusão da RNA do conjunto 6

Classes	PA	PVA	CX	GX	GS+GJ	LA	LVA	RY	RL	Total	Usuário
PA	128	0	0	11	1	0	0	6	0	146	87,7
PVA	0	143	3	0	0	0	0	0	0	146	97,9
CX	0	0	110	1	0	0	5	0	10	126	87,3
GX	9	0	0	88	0	0	0	6	0	103	85,4
GS+GJ	0	0	0	2	146	2	0	0	0	150	97,3
LA	0	0	7	0	0	72	12	0	0	91	79,1
LVA	0	0	19	0	0	76	133	1	0	229	58,1
RY	13	0	0	48	3	0	0	137	1	202	67,8
RL	0	7	11	0	0	0	0	0	139	157	88,5
*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	150	150	150	150	150	150	150	150	150	1350	
Produtor	85,3	95,3	73,3	58,7	97,3	48,0	88,7	91,3	92,7		

Exatidão global = 81,2; Kappa = 0,788; Variância = 0,000142;  $Z_{calculado}$  = 66,19. \* pixels não classificados.

O conjunto 6 apresentou desempenho satisfatório (superior à 75%) para a maioria das classes, com exceção das classes LA e CX, que apresentaram confusão entre si e com a classe dos LVA. Ao excluir a variável distância euclidiana da hidrografia a confusão entre as classes dos LATOSSOLOS aumentou uma vez que estes solos podem ocorrer em condições similares de paisagem, porém diferenciam-se quanto à disponibilidade de água, que no caso dos LA tem um elevado desvio padrão embora apresente em geral tendência à maior proximidade das drenagens conforme destacado para o conjunto 5.

Pode-se observar aumento na confusão entre os hidromórficos GX e RY, que possuem condições similares de paisagem, entretanto os primeiros podem ocorrer em maior distância dos drenos, porém com influência da flutuação do lençol, já os RY ocorrem preferencialmente nos limiares dos drenos, apresentando menor valor para este atributo.

A Tabela 52 mostra os resultados obtidos pelo conjunto 7.

**Tabela 52.** Matriz de confusão da RNA do conjunto 7

Classes	PA	PVA	CX	GX	GS+GJ	LA	LVA	RY	RL	Total	Usuário
PA	122	1	0	11	0	3	0	1	0	138	88,4
PVA	0	141	11	0	0	3	5	1	1	162	87,0
CX	0	4	108	0	0	0	2	0	23	137	78,8
GX	11	0	0	118	3	0	0	1	0	133	88,7
GS+GJ	12	0	0	4	147	2	0	6	0	171	86,0
LA	0	0	0	1	0	113	41	2	0	157	72,0
LVA	0	2	9	0	0	29	102	0	0	142	71,8
RY	5	0	1	15	0	0	0	139	5	165	84,2
RL	0	2	21	1	0	0	0	0	121	145	83,4
*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	150	150	150	150	150	150	150	150	150	1350	
Produtor	81,3	94,0	72,0	78,7	98,0	75,3	68,0	92,7	80,7		

Exatidão global = 82,3; Kappa = 0,801; Variância = 0,000136;  $Z_{\text{calculado}} = 68,59$ . \* pixels não classificados.

Observando os resultados para do conjunto 7, é possível inferir que, de forma geral, a exclusão do atributo geologia melhorou o acerto na classificação dos solos hidromórficos, já que as três classes (GX, GS+GJ, RY) apresentaram desempenho para a exatidão do produtor superior à 75%, sendo que para a classe dos GS+GJ o acerto foi de 98%. Isso deve-se à natureza destes solos alóctones, desenvolvidos sobre sedimentos de origem variável, onde a natureza da litologia contribui pouco para distinção entre eles. Em contrapartida, o desempenho da classes de solos autóctones foi pior quanto comparado com o conjunto que reúne todas as variáveis.

O principal efeito constatado ao excluir a variável geologia foi na classe dos PVA, que mostrou pior desempenho do que nos demais conjuntos de discriminantes testados, uma vez que esta classe possui ocorrência restrita à litologia específica de maciços alcalinos, embora ainda assim apresente valor elevado para exatidão do produtor (94%).

A Tabela 53, a seguir, apresenta os resultados obtidos pelo conjunto 8.

**Tabela 53.** Matriz de confusão da RNA do conjunto 8

Classes	PA	PVA	CX	GX	GS+GJ	LA	LVA	RY	RL	Total	Usuário
PA	146	2	0	21	5	3	0	10	1	188	77,7
PVA	0	144	1	3	0	0	0	0	1	149	96,6
CX	0	0	89	0	0	2	9	0	7	98	90,8
GX	1	0	0	71	9	0	0	9	0	90	78,9
GS+GJ	0	0	0	1	131	3	0	1	0	136	96,3
LA	0	0	16	0	0	88	10	0	1	115	76,5
LVA	1	0	12	0	0	52	140	2	0	207	67,6
RY	2	0	0	54	5	0	0	128	0	189	67,7
RL	0	4	32	0	0	2	0	0	140	178	78,7
*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	150	150	150	150	150	150	150	150	150	1350	
Produtor	97,3	96,0	59,3	47,3	87,3	58,7	93,3	85,3	93,3		

Exatidão global = 79,8; Kappa = 0,772; Variância = 0,000149;  $Z_{\text{calculado}} = 63,22$ . \* pixels não classificados.

Os resultados obtidos para o conjunto 8 mostraram o efeito da variável *clay minerals*, na diferenciação dos CX, GX e LA. O aumento na confusão na classe dos CX com os RL devem-se principalmente ao intemperismo incipiente nos RL, já que estes ocorrem intimamente associados aos afloramentos rochosos, ou seja, rocha nua. A exclusão da variável mostrou o poder da mesma em diferenciar estas duas classes, que ocorrem em condições similares de paisagem, entretanto os CX apresentam condições mais favoráveis para o intemperismo e ocorrência de minerais de menor tamanho (granulometria mais fina) favorecendo o estabelecimento de cobertura vegetal. A classe dos LA também teve pior desempenho neste conjunto de variáveis, mostrando confundimento com a classe dos LVA, que podem ocorrer em condições similares de paisagem, embora se situem sobre diferentes tipos de litologia e geomorfologia. Para classe dos GX este conjunto de variáveis também causou efeito negativo no desempenho do classificador devido à confusão com as classes PA e RY. Tais observações indicam a importância do uso de informações oriundas de dados de sensor remoto para complementar o conjunto de variáveis preditoras.

A Tabela 54 apresenta os resultados obtidos pelo conjunto 9.

**Tabela 54.** Matriz de confusão da RNA do conjunto 9

Classes	PA	PVA	CX	GX	GS+GJ	LA	LVA	RY	RL	Total	Usuário
PA	131	0	0	8	2	0	0	41	1	183	71,6
PVA	0	150	10	2	0	0	0	1	3	166	90,4
CX	0	0	96	0	0	0	3	1	23	123	78,0
GX	19	0	0	128	7	0	0	13	0	167	76,6
GS+GJ	0	0	0	11	141	3	0	11	0	166	84,9
LA	0	0	9	1	0	76	10	0	0	96	79,2
LVA	0	0	12	0	0	71	137	0	0	220	62,3
RY	0	0	0	0	0	0	0	81	0	81	100,0
RL	0	0	23	0	0	0	0	2	123	148	83,1
*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	150	150	150	150	150	150	150	150	150	1350	
Produtor	87,3	100,0	64,0	85,3	94,0	50,7	91,3	54,0	82,0		

Exatidão global = 78,7; Kappa = 0,761; Variância = 0,000155;  $Z_{\text{calculado}} = 61,12$ . \* pixels não classificados.

Corroborando as observações feitas para o conjunto 8, a retirada do índice *iron oxide* causou efeitos similares aos destacados anteriormente para a classe dos CX e LA. No entanto neste conjunto de variáveis discriminantes o desempenho entre os solos hidromórficos foi pior para a classe dos RY, que apresentou acerto de apenas 54% e confundimento com as classes PA, GX, GS+GJ.

Analisando de forma geral os resultados obtidos para as classes GX e RY relativos às redes dos conjuntos 8 e 9, as classes apresentam comportamento inverso quanto aos valores para exatidão do produtor. Provavelmente isso ocorre devido ao próprio comportamento inverso nos valores destes índices, ou seja, regiões com valores elevados para *clay minerals* apresentam valores reduzidos para *iron oxide*, mas principalmente porque são os dados fornecidos se baseiam no tipo de uso, ou cobertura da superfície. Foi observado nas visitas a campo que os GX e PA, são predominantemente utilizados para pastejo, em contrapartida os locais onde ocorrem os RY (entorno dos principais drenos), são preferencialmente utilizados para agricultura.

A Tabela 55 apresenta a matriz de confusão obtida pelo conjunto 10.

**Tabela 55.** Matriz de confusão da RNA do conjunto 10

Classes	PA	PVA	CX	GX	GS+GJ	LA	LVA	RY	RL	Total	Usuário
PA	127	2	2	11	0	0	0	7	0	149	85,2
PVA	0	146	4	1	0	0	0	0	0	151	96,7
CX	0	0	121	1	0	0	1	0	15	138	87,7
GX	14	0	0	124	17	1	0	25	0	181	68,5
GS+GJ	9	0	0	1	132	2	0	2	0	146	90,4
LA	0	1	3	0	0	112	38	0	1	155	72,3
LVA	0	1	15	0	0	34	109	0	0	159	68,6
RY	0	0	0	12	1	1	2	116	0	132	87,9
RL	0	0	5	0	0	0	0	0	134	139	96,4
*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	150	150	150	150	150	150	150	150	150	1350	
Produtor	84,7	97,3	80,7	82,7	88,0	74,7	72,7	77,3	89,3		

Exatidão global = 83,0; Kappa = 0,809; Variância = 0,000132;  $Z_{\text{calculado}} = 70,40$ . \* pixels não classificados.

Pode-se observar que para o conjunto 10, onde se retirou a variável NDVI, o desempenho da classificação foi satisfatório, apresentando concordância superior a 70% para todas as classes de solos. Quando comparado com os resultados obtidos pela classificação com todas as variáveis discriminantes (conjunto 1), apresentou resultados próximos, com valores de desempenho superior apenas para as classes dos CX e GX. É possível que devido à similaridade no comportamento dos índices *iron oxide* e NDVI, o uso destes atributos em um mesmo conjunto cause redundância no aprendizado da rede, ocasionando depreciação no desempenho do classificador. As considerações e dados obtidos indicam que este índice pouco contribuiu para discriminação dos solos da área de estudo.

A Tabela 56, a seguir, apresenta os resultados obtidos pelo conjunto 11, onde foram retirados os três índices derivados de dados de sensor remoto.

**Tabela 56.** Matriz de confusão da RNA do conjunto 11

Classes	PA	PVA	CX	GX	GS+GJ	LA	LVA	RY	RL	Total	Usuário
PA	130	2	0	6	6	0	0	1	1	146	89,0
PVA	2	148	3	0	0	0	0	0	0	153	96,7
CX	0	0	118	2	0	0	0	0	23	143	82,5
GX	14	0	0	77	30	1	0	29	0	151	51,0
GS+GJ	3	0	0	59	113	0	0	25	1	201	56,2
LA	0	0	4	0	0	128	28	0	2	162	79,0
LVA	0	0	14	0	0	21	122	2	0	159	76,7
RY	1	0	0	6	1	0	0	93	0	101	92,1
RL	0	0	11	0	0	0	0	0	123	134	91,8
*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	150	150	150	150	150	150	150	150	150	1350	
Produtor	86,7	98,7	78,7	51,3	75,3	85,3	81,3	62,0	82,0		

Exatidão global = 77,9; Kappa = 0,752; Variância = 0,000161;  $Z_{\text{calculado}} = 59,23$ . \* pixels não classificados.

O conjunto 11 mostrou que os índices de exatidão dos solos hidromórficos apresentaram pior desempenho, quando comparados aos resultados obtidos para o conjunto 1,

que reúne todas as variáveis testadas, destacando a importância do uso de informações derivadas de sensoriamento remoto de forma a complementar o conjunto de variáveis discriminantes na classificação supervisionada destes solos. A exceção da classe dos LA, que inversamente ao comportamento dos conjuntos que continham estas variáveis, mostrou redução na confusão com outras classes, principalmente com LVA, uma vez que os solos dessas classes possuem ampla distribuição na área da bacia, e o tipo de uso, em geral, é de floresta secundária em diferentes estágios de regeneração ou pastagem.

Finalmente, uma matriz de significância foi gerada para comparar o desempenho dos conjuntos de variáveis discriminantes testados (Tabela 57), buscando destacar as diferenças entre os resultados e auxiliar a seleção da(s) arquitetura(s) mais adequada(s) para a classificação final dos dados.

**Tabela 57.** Matriz de significância entre as RNA's dos conjuntos testados.

Conjuntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Kappa	0,833	0,777	0,699	0,663	0,667	0,788	0,801	0,772	0,761	0,809	0,752
Variância**	0,134	0,149	0,181	0,192	0,190	0,142	0,136	0,149	0,155	0,132	0,161
1	71,96										
2	3,33*	63,65									
3	7,55*	4,29*	51,96								
4	9,42*	6,17*	1,86	47,85							
5	9,22*	5,97*	1,66	0,21	48,39						
6	2,71*	0,65	4,95*	6,84*	6,64*	66,13					
7	1,95	1,42	5,73*	7,62*	7,42*	0,78	68,69				
8	3,63*	0,29	4,02*	5,90*	5,70*	0,94	1,72	63,25			
9	4,24*	0,92	3,38*	5,26*	5,06*	1,57	2,35*	0,63	61,13		
10	1,47	1,91	6,22*	8,11*	7,91*	1,27	0,49	2,21*	2,83*	70,41	
11	4,72*	1,42	2,87*	4,74*	4,54*	2,07*	2,84*	1,14	0,51	3,33*	59,27

1 - Todas as variáveis; 2 - sem elevação; 3 - sem declividade; 4 - sem curvatura; 5 - sem índice CTI; 6 - sem a distância euclidiana; 7 - sem geologia; 8 - sem índice *clay minerals*; 9 - sem índice *iron oxide*; 10 - sem índice NDVI; e 11- sem os três índices. \* existe diferença significativa a 5%; \*\* valores multiplicados por 1000.

A matriz da Tabela 57 mostra que o conjunto 1 (todas as variáveis) apresentou o melhor desempenho para o índice Kappa, com valor de 0,833, considerado como muito bom a excelente (Landis & Koch, 1977). Estes resultados corroboram os resultados de Dobos et al. (2000); Dobos et al. (2001); Behrens et al. (2005); Chagas et al. (2010 b); Chagas et al. (2011); Souza (2009), nos quais o uso combinado de atributos do terreno, dados de sensores remotos e informações sobre litologia como preditores melhorou o desempenho da classificação.

Por outro lado, os piores desempenhos foram obtidos quando a curvatura (conjunto 4), o índice CTI (conjunto 5) e a declividade (conjunto 3) foram removidos da análise, com índice Kappa de 0,663, 0,667 e 0,699, respectivamente. Esses desempenhos são considerados moderados por Landis & Koch (1977) e diferem estatisticamente (ao nível de confiança de 5%) do conjunto de melhor desempenho (conjunto 1), mais uma vez, confirmando a importância destes atributos como variáveis discriminantes nos estudos de predição de classes

de solos. Conforme destacado por Park & Vlek (2002), a forte influência dos atributos do terreno sobre a variação espacial dos solos também foi confirmada neste estudo.

Os demais conjuntos embora tenham apresentado desempenho de muito bom a excelente ( $Kappa > 0,75$ ) também diferiram estatisticamente ao nível de confiança de 5 %, do conjunto 1, com exceção do conjunto 7 (sem a geologia) e do conjunto 10 (sem o índice *NDVI*). Além disso, estes conjuntos também não diferem entre si (Tabela 57).

As classes de solos consideradas tiveram uma exatidão do produtor na classificação diferente entre os conjuntos 1, 7 e 10 como mostram os dados das Tabelas 46, 52 e 56. O conjunto 1 teve o melhor desempenho para as classes PA (90%), PVA (98,7%), LA (76,7%), LVA (86%) e RL (90,7%). Em contrapartida ao se retirar o índice *NDVI* melhores desempenhos foram obtidos para as classes CX (80,7%) e GX (82,7%).

A retirada da geologia, por sua vez, favoreceu uma maior exatidão do produtor para as classes CX (72%), GX (78,7%), GS+GJ (98%) e RY (92,7%) com relação ao conjunto 1. Conforme comentado anteriormente o principal objetivo da utilização da geologia como variável discriminante foi tentar melhorar o desempenho da classificação da classe PVA, evitando a confusão com as classes LVA e LA. Assim, ao contrário do que se esperava a retirada desta variável no conjunto 7 diminuiu o desempenho da classificação para a classe PVA em apenas 4,7%, em relação ao conjunto 1.

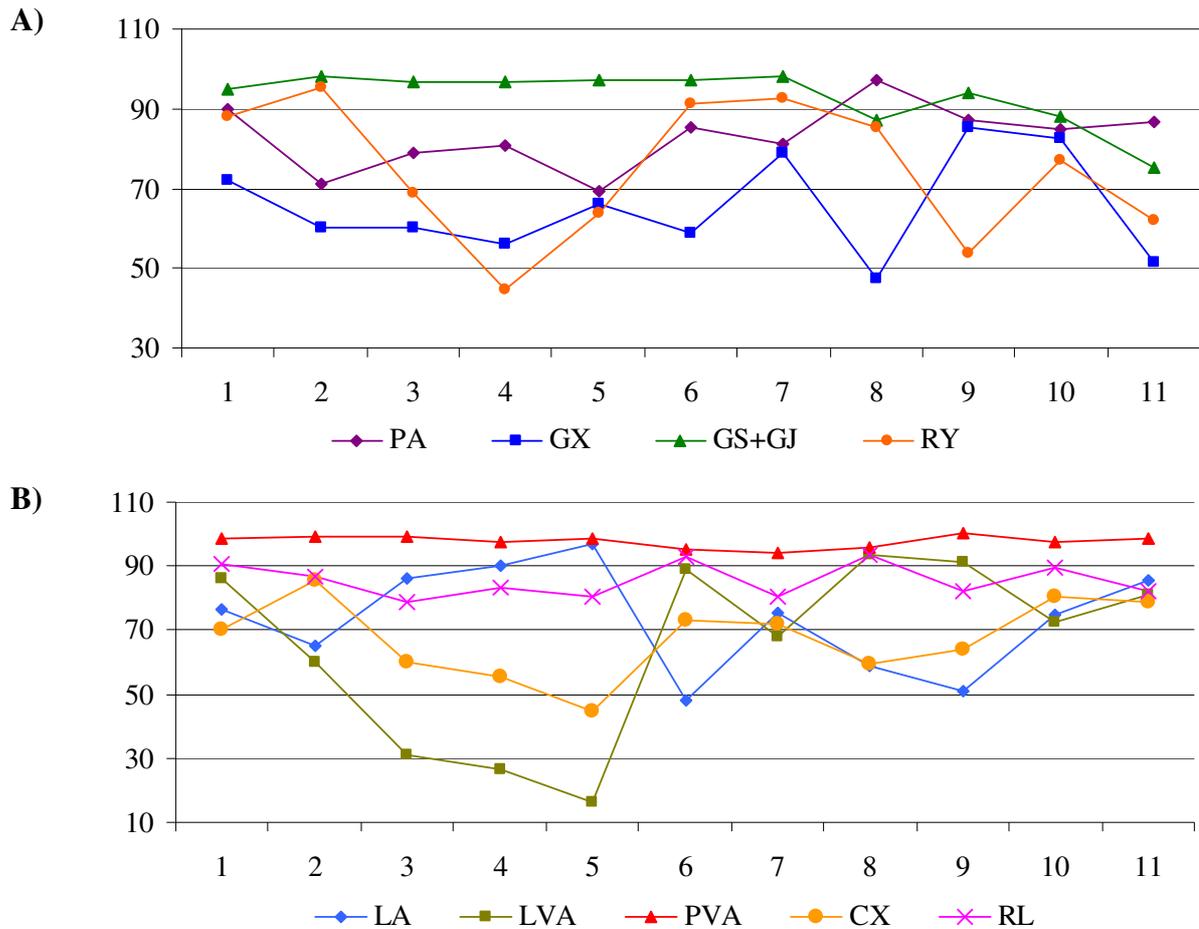
A supressão do índice *NDVI* somente favoreceu uma maior exatidão do produtor para as classes CX (80,7%) e GX (82,7%) contra 70% (CX) e 72% (GX) para a exatidão do produtor obtida pelo conjunto 1, confirmando também a menor influência deste índice para a classificação dos dados, embora alguns autores (McKenzie e Ryan, 1999; Dobos et al., 2000; Zhu, 2000) tenham utilizado este índice como variável auxiliar para predição de classes ou atributos do solo com sucesso. Este índice também não produziu resultados satisfatórios no estudo de Chagas (2006).

Uma análise dos resultados da classificação nos diferentes sistemas de relevo (agradacional e degradacional) auxiliou na identificação dos atributos que mais contribuíram para a distinção das classes de solos, nos respectivos sistemas de relevo.

A Figura 43 apresenta a comparação dos índices de exatidão do produtor obtidos nos diferentes conjuntos (1 a 11), para os dois sistemas de relevo e as respectivas classes de solos que ocorrem nos mesmos.

No sistema agradacional, composto pelas classes de solos desenvolvidos sobre sedimentos e colúvio, a classe que teve melhor desempenho de forma geral foi as dos GS+GJ (Figura 43 a). Entretanto nos conjuntos 8 e 11 (sem *clay minerals* e sem os três índices, respectivamente), houve confundimento entre os GS+GJ, GX e PA, sendo que os as duas primeiras mostraram redução no índice, e a classe dos PA mostrou aumento, indicando que as amostras GS+GJ e GX foram classificadas erroneamente nesta classe.

Em geral, os índices oriundos de dados de sensor remoto por discernirem bem os tipos de uso do solo, foram importantes para classificação e generalização dos solos hidromórficos nas áreas de baixada, pois embora ocorram em condições ambientais similares tem comportamento distinto, assim como a capacidade de suporte para agricultura. O gráfico também mostra que ao retirar o índice *NDVI*, as quatro classes deste relevo apresentaram resultados para a exatidão do produtor satisfatórios e relativamente próximos entre si.



**Figura 43.** Comparação do desempenho das RNA's nos sistemas de relevo: A) Sistema agradacional, B) Sistema degradacional

O sistema de relevo degradacional, composto por classes de solos desenvolvidos sobre rocha consolidada, mostrou de forma geral melhor resultado para as classes dos PVA, que superou o desempenho das demais classes deste sistema em todos os conjuntos testados (Figura 43 b). Entre as demais classes, os LA mostram grande confundimento com os LVA, ao se retirar os atributos CTI, curvatura e declividade, mostrando a importância dos fatores topográficos na distinção destas classes. As classes CX e RL também apresentaram de forma geral confusão entre si, neste sentido os melhores preditores para a distinção destas classes foram declividade, curvatura, CTI e *clay minerals*.

A capacidade de discernimento das classes de solos que ocupam o sistema de relevo de degradação é interdependente da variação conjunta dos atributos morfométricos. Os atributos declividade, curvatura, CTI e distância euclidiana contribuíram positivamente para a distinção de classes de solos que ocorrem em condição similar de paisagem, diminuindo a confusão entre CX e RL, CX e LVA, e entre LVA e LA. De forma geral, os atributos morfométricos exerceram maior influência na classificação dos solos neste sistema de relevo, e os atributos derivados de sensor remoto, que refletem o uso e cobertura dos solos, mostraram menor influência. Os desempenhos mais próximos e satisfatórios para estas classes foram obtido nos conjuntos 7 e 10.

#### 4.5.2. Obtenção dos Mapas Digitais de Solos e Validação dos Resultados

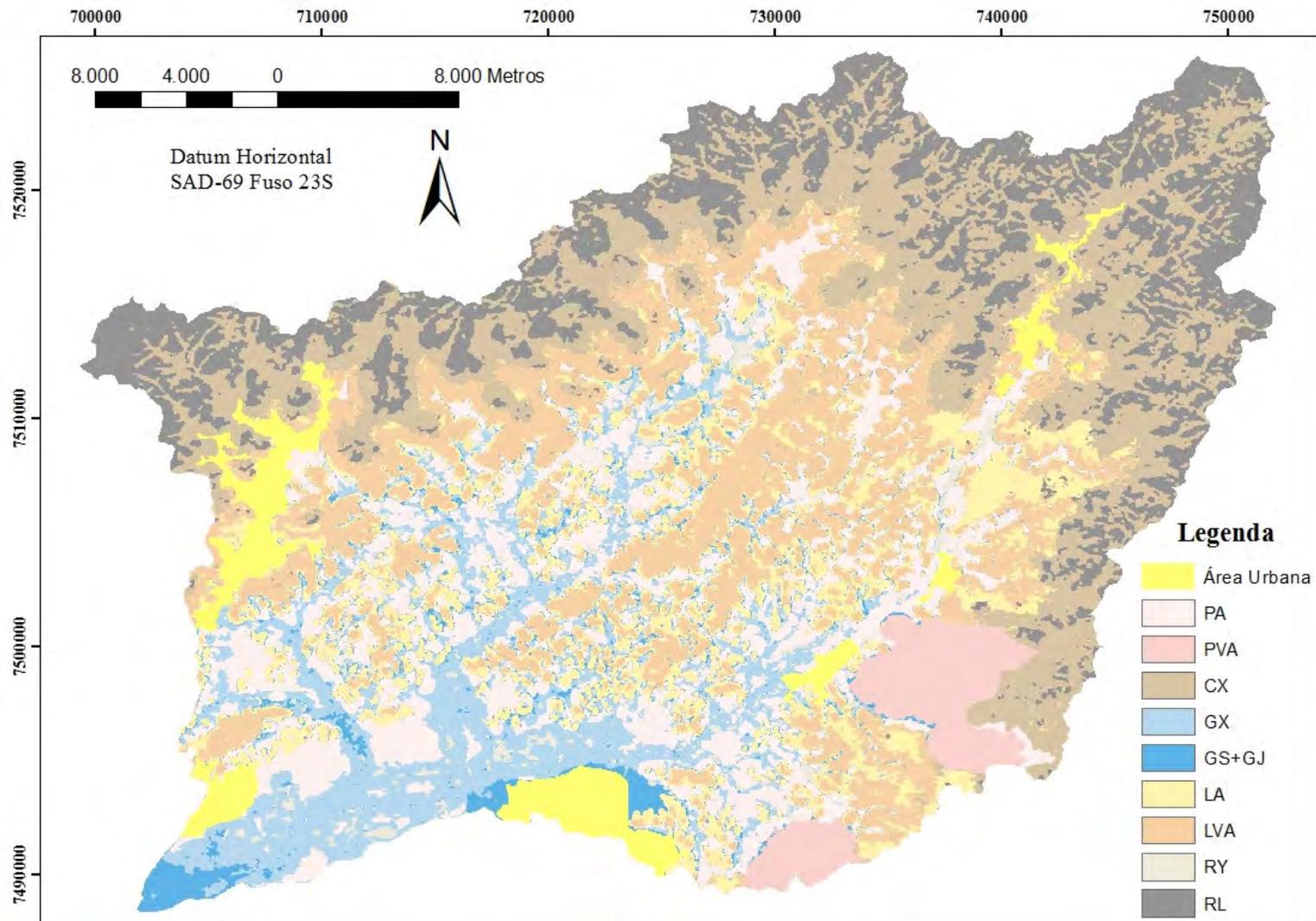
Diante dos resultados obtidos os conjuntos 1, 7 e 10 foram selecionados para gerar os respectivos mapas digitais de solos da BHRGM. Na classificação por redes neurais o resultado final é um valor de probabilidade atribuído a cada *pixel* da imagem, que identificam às classes de saída pré-determinadas. Os arquivos binários resultantes da classificação pelas RNA's de cada conjunto selecionado foram manipulados no programa ERDAS Imagine v. 9.1. para produzir o mapa digital de solos. Neste procedimento adiciona-se a cada célula (*pixel*) valor correspondente à classe que apresentou a maior probabilidade entre as envolvidas (Zhu, 1997). Para melhorar a generalização foi utilizado um filtro que tem a função de eliminar *pixels* isolados que não pertença a classe predominante na vizinhança do mesmo. Os mapas digitais de solos produzidos pelos conjuntos selecionados são apresentados nas Figuras 44, 45 e 46.

Observando a Figura 44 que apresenta o mapa resultante da classificação pelo conjunto 1 (com todas as variáveis), foi possível observar que houve uma generalização equivocada da classe dos GS+GJ (classe 5), com destaque para a porção sul da bacia, sob área urbanizada. Outra discrepância que pôde ser observada neste mapa encontra-se na classe dos PA, que mostrou na generalização o confundimento com os GX. A classe dos LVA mostra área reduzida em razão da confusão com os LA, que por sua vez tiveram área superestimada.

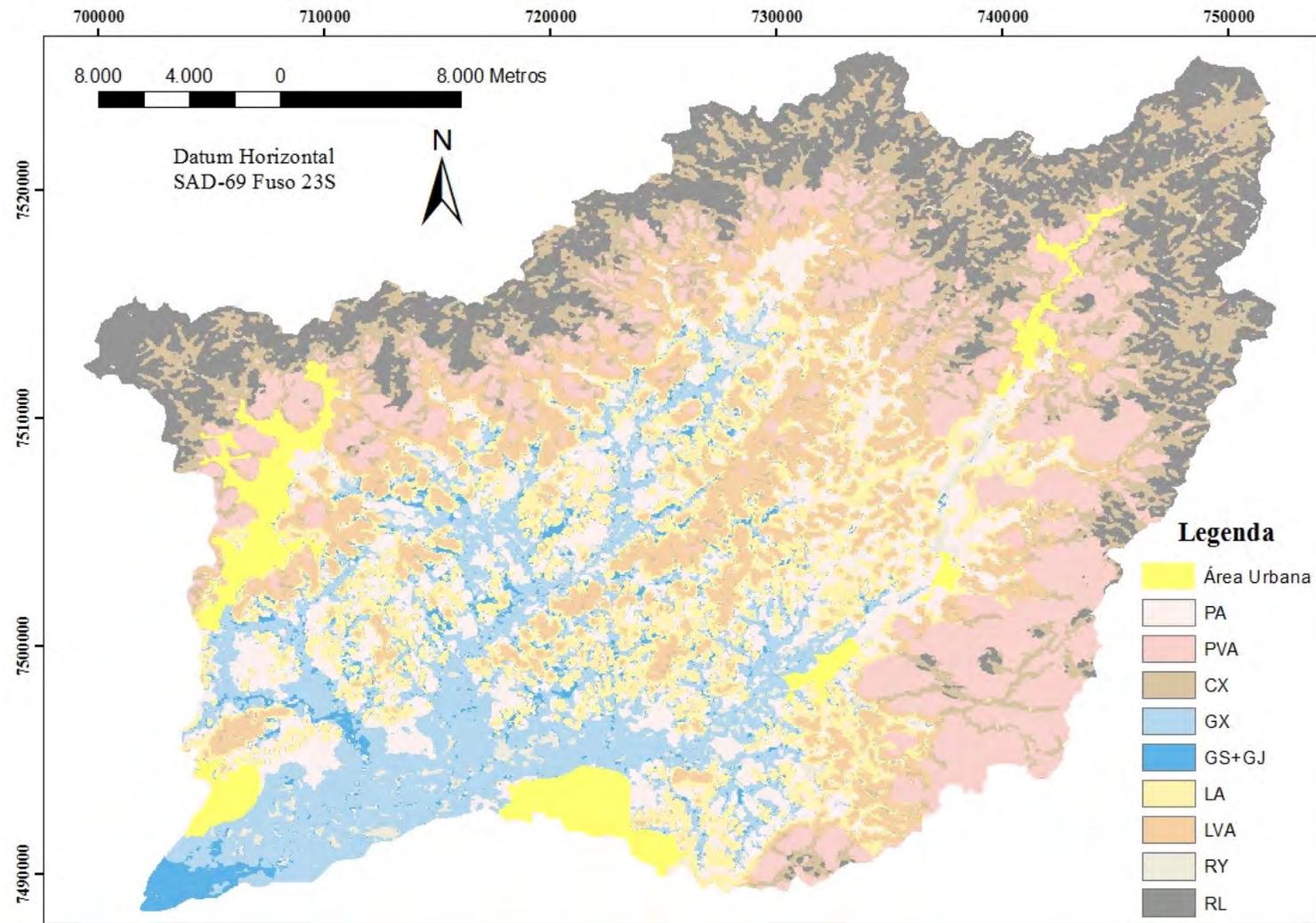
A Figura 45 evidenciou o efeito da exclusão da geologia como variável discriminante na classificação dos PVA, que tem sua distribuição na bacia intrinsecamente dependente do material de origem (maciços intrusivos alcalinos). Ao retirar esta condicionante o classificador do conjunto 7 confundiu os PVA com CX, devido a similaridade das características topográficas entre estas classes. A área de ocorrência dos CX diminuiu drasticamente, pois além da generalização superestimada para a classe dos PVA, esta rede apresentou confundimento com a classe dos RL, que neste caso tiveram a área ampliada. Outra discrepância observada com a retirada desta variável foi na espacialização da classe GS+GJ, devido à confusão com a classe dos ARGISSOLOS e LATOSSOLOS AMARELOS, conforme observado na porção sul da bacia, próximo à área urbana. Em função disso, a área pertencente a estas duas classes foi subestimada na generalização feita quando este conjunto foi utilizado.

A classificação obtida pelo conjunto 10 (Figura 46) mostrou de forma geral, melhor resultado quando comparada as duas outras, embora este classificador tenha apresentado maior confundimento das classes RY e GX, causando redução na área dos RY em detrimento da ampliação da área de GX. Foi possível observar melhor distinção entre as classes LA e LVA, e a separação adequada dos PVA, restritos à litologia específica. Para as demais classes de solo foi possível notar a similaridade na espacialização entre esta rede e o produto obtido pelo conjunto 1.

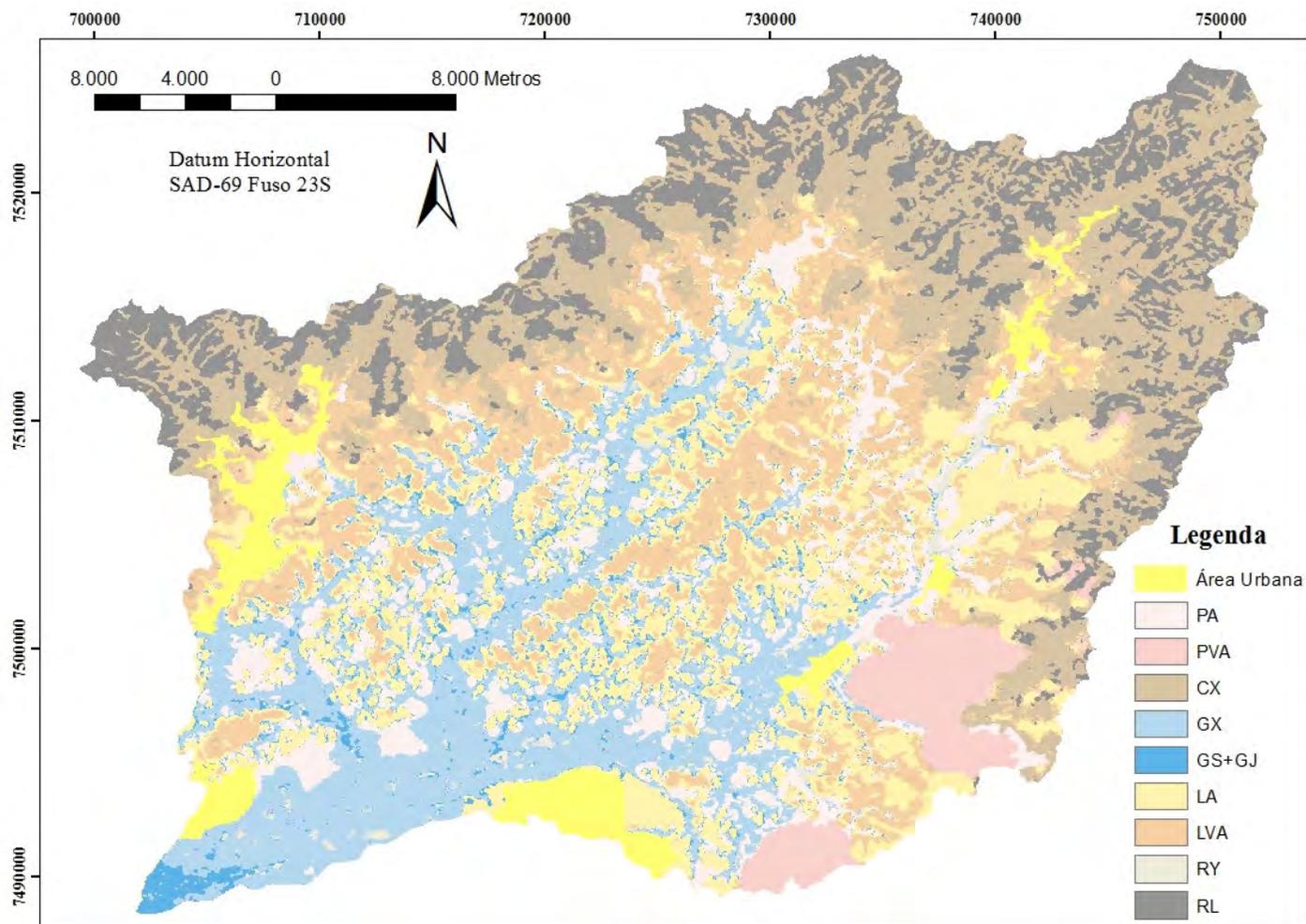
As considerações quanto à generalização corroboram os resultados apresentados para a exatidão das classes nas matrizes de confusão dos três diferentes conjuntos, que apesar de não apresentarem diferença significativa entre si, de acordo com a matriz de significância (Tabela 57), mostram com clareza o efeito da exclusão das variáveis - geologia e NDVI. O fator litologia, conforme esperado foi importante para classificação dos PVA, e a exclusão do índice NDVI, por refletir o tipo de uso e cobertura do solo, melhorou o resultado da generalização dos LA e LVA, por não mostrarem diferenças entre si quanto a esse fator. Em todos os conjuntos selecionados as principais divergências encontradas ocorreram para a generalização da classe dos NEOSSOLOS FLÚVICOS, onde sua área de ocorrência, localizada nas margens dos principais drenos (rio Macacu e rio Guapi-Açu) foi bastante reduzida em prol da classe PA, principalmente. Neste sentido, o conjunto 7 foi o que apresentou a maior expressão em área para esta classe.



**Figura 44.** Mapa digital de solos inferido pela classificação da RNA obtido pelo conjunto 1.



**Figura 45.** Mapa digital de solos inferido pela classificação da RNA obtido pelo conjunto 7.



**Figura 46.** Mapa digital de solos inferido pela classificação da RNA obtido pelo conjunto 10.

Na impossibilidade de coleta de um número mais representativo de pontos de controle no campo para aferir os resultados obtidos pelos diferentes conjuntos de variáveis discriminantes testados, optou-se por utilizar provisoriamente os perfis e amostras extras que não foram utilizados para a coleta das amostras de treinamento das RNA's. Ainda, estes foram acrescidos de perfis e amostras extras georreferenciados, utilizados em outros estudos desenvolvidos na área da bacia, totalizando 20 pontos. Para essa análise foi gerado índice de concordância entre os mapas e pontos de controle, desconhecidos pelas redes testadas.

Os resultados obtidos para estas comparações são mostrados na Tabela 58. Dentre os conjuntos selecionados a maior concordância com os pontos de referência foi obtida pelo conjunto 10, quando o índice *NDVI* foi retirado da análise, que inferiu corretamente as classes de solo em 71 locais (59,2%). Os conjuntos 1 e 7 obtiveram concordância menor do que a do conjunto 10 e comportamento semelhante entre si e permitiram inferir corretamente as classes em 63 locais, o equivalente a 52,5%.

**Tabela 58.** Comparação entre os pontos de referência e os mapas obtidos pelos conjuntos selecionados

Mapas	Total de pontos	Pontos corretamente classificados	% corretamente classificada
Conjunto 1 (todas as variáveis)	120	63	52,5
Conjunto 7 (sem a geologia)	120	63	52,5
Conjunto 10 (sem o índice <i>NDVI</i> )	120	71	59,2

Estes resultados preliminares são diferentes dos obtidos por outros estudos com a abordagem por redes neurais. Em seu estudo Zhu (2000) obteve concordância de 77% entre as classes de solos avaliadas e pontos de referência. Por sua vez, Chagas (2006) alcançou concordância de 70,8% para esta comparação. Já Vaz de Melo (2009), em estudo com RNA's na Zona da Mata Mineira, obteve concordância de 66,6%. Os resultados obtidos para a concordância foram relativamente próximos de outros trabalhos e indicaram melhor concordância para o produto obtido pela rede neural do conjunto 10 (59,2%), conforme observado quanto à generalização da classificação para a área total da bacia hidrográfica (Figura 46).

O processo de validação é de grande importância, embora não seja realizado em grande parte dos levantamentos pedológicos. No presente estudo, existem limitações que confirmem os valores obtidos para concordância, como por exemplo, a carência de número de perfis representativo para as classes GS+GJ, PVA, RL e RY. Além disso, é difícil obter perfis que representem os padrões típicos da variabilidade do conjunto de variáveis preditoras consideradas. Esta consideração também é válida para levantamentos de solos que utilizam os métodos tradicionais de mapeamento, a exemplo de classes que podem ocorrer em condições similares de paisagem, conforme observado entre as respectivas classes LA e LVA, GX e RY e PA, CX e RY, que podem confundir inclusive os pedólogos experientes.

## 4.6. CONCLUSÕES

A abordagem usada produziu resultados satisfatórios no treinamento das RNA's com desempenhos na classificação que variaram de moderado a excelente. Dentre os conjuntos avaliados o melhor desempenho dos índices estatísticos foi obtido quando todas as variáveis discriminantes foram utilizadas, com exatidão global de 85,2% e índice Kappa de 0,833, enquanto o pior desempenho foi obtido quando a curvatura foi retirada da análise, que teve uma exatidão global de 70,1% e índice Kappa de 0,663.

O conjunto 1 teve o melhor desempenho para as classes PA (90%), PVA (98,7%), LA (76,7%), LVA (86%) e RL (90,7%). Em contrapartida ao se retirar o índice NDVI melhores desempenhos foram obtidos para as classes CX (80,7%) e GX (82,7%). A retirada da geologia, por sua vez, favoreceu uma maior exatidão do produtor para as classes CX (72%), GX (78,7%), GS+GJ (98%) e RY (92,7%) com relação ao conjunto 1.

Em geral, os índices oriundos de dados de sensor remoto, por discernirem bem os usos do solo, foram importantes para a classificação e generalização dos solos hidromórficos nas áreas de baixada (sistema agradacional), que embora ocorram em condições ambientais similares tem diferentes comportamentos e capacidade de suporte para agricultura.

Os atributos declividade, curvatura, CTI e distância euclidiana contribuíram positivamente para a distinção de classes de solos que ocorrem em condição similar de paisagem no sistema de relevo degradacional, diminuindo a confusão entre CX e RL, CX e LVA, e entre LVA e LA.

Os conjuntos 1, 7 e 10 não apresentaram diferenças significativas entre si, evidenciando a necessidade de avaliação detalhada quanto à generalização. Neste sentido o melhor produto da classificação foi obtido pelo conjunto 10, que mostrou generalização mais coerente para as classes LA, LVA, GX, PA, quando comparado ao produto do conjunto 1. Para as demais classes estes dois conjuntos foram similares no que tange à generalização. O pior desempenho neste critério foi observado no conjunto 7, que mostrou discrepância na generalização dos PVA, RL e CX, superestimando as duas primeiras e subestimando a área de distribuição da terceira classe. Em todos os conjuntos selecionados as principais divergências observadas na generalização correspondem à classe dos NEOSSOLOS FLÚVICOS, onde sua área de ocorrência, localizada nas margens dos principais drenos (rio Macacu e rio Guapi-Açu) foi bastante reduzida em prol das classes PA e GX, principalmente. Neste sentido, o conjunto 7 foi o que apresentou a maior expressão em área para esta classe.

A validação preliminar dos produtos dos classificadores selecionados (conjunto 1, 7 e 10) indicou maior concordância entre os perfis de controle e o conjunto 10 (sem o índice NDVI), com valor de 59,2% de acerto. Embora o melhor desempenho para o índice Kappa tenha sido obtido para o conjunto 1 (todas as variáveis), o valor observado para concordância com os pontos de controle, e principalmente o produto obtido na generalização da classificação justificam a escolha do conjunto 10 para representação da distribuição dos solos da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu.

## 5. CONCLUSÕES GERAIS

O presente estudo destaca o uso de técnicas de geoprocessamento e mapeamento digital no inventário do recurso solo, contribuindo para que este tenha um caráter mais quantitativo. A abordagem utilizada se fundamenta na compreensão da gênese de solos no que tange à seleção de atributos que determinam a ocorrência das distintas classes de solos.

Neste aspecto, a utilização de modelos digitais de elevação é fundamental para o mapeamento de solos. Sendo assim, foi necessária a avaliação detalhada da representação da altimetria na área, de forma quantitativa e qualitativa, embora esta seja frequentemente suprimida em muitos estudos. Através desta análise foi possível constatar que de uma forma geral os modelos obtidos por interpolação de dados primários apresentaram qualidade superior aos modelos obtidos por sensoriamento remoto e aerorestituição, uma vez que nestes últimos ocorrem ruídos e erros grosseiros em função da forma de obtenção. Também foi possível averiguar que a densidade de dados primários e escala original em que foram gerados podem afetar a qualidade dos modelos.

A seleção criteriosa do MDE a ser usado no mapeamento digital de solos foi fundamental para a qualidade dos produtos finais, ao afetar diretamente a variabilidade e representatividade dos atributos morfométricos usados na caracterização dos pedodomínios. O conjunto de análises empregado nesta etapa permitiu indicar o MDE HÍBRIDO (resolução espacial 30m), para representação da altimetria e derivação dos atributos.

Outro aspecto descrito neste estudo foi o uso do programa *Conditioned Latin Hypercube Sampling* como estratégia de amostragem dos pontos amostrais (perfis de solos e amostras extras), o qual utiliza as informações das principais variáveis ambientais que determinam a distribuição dos solos na área. O programa teve grande contribuição para a melhor representatividade dos diferentes tipos de solos e formas de paisagem na área da bacia, e também ao buscar otimizar as etapas de coleta das amostras no campo.

A estratégia adotada permitiu a coleta de amostras em 100 pontos que representam as classes de solos de maior expressão na área de estudo que são: os LATOSSOLOS, ARGISSOLOS, CAMBISSOLOS, GLEISSOLOS e NEOSSOLOS, respectivamente. Os LATOSSOLOS AMARELOS assim como os LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS foram identificados em condições de relevo local semelhante variando de ondulado a montanhoso, todavia os primeiros ocorrem preferencialmente nos domínios geomorfológicos de colinas, morros e os outros em áreas de maciços com cotas mais elevadas. Os LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS, que ocupam áreas com declives mais acentuados, apresentam ainda similaridade com os CAMBISSOLOS HÁPLICOS.

Os ARGISSOLOS AMARELOS cobrem grande parte da bacia, preferencialmente nos limites inferiores de morrotes, sob declive suave a ondulado, ocorrendo em associação com GLEISSOLOS HÁPLICOS e inclusões de PLANOSSOLOS HÁPLICOS. Já os ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS tiveram ocorrência restrita à áreas sob influência de material de origem alcalino (maciços intrusivos). Os GLEISSOLOS HÁPLICOS ocorrem nos vales sob relevo aplainado, e nas proximidades da foz da bacia ocorrem GLEISSOLOS SÁLICOS e TIOMÓRFICOS; ambas as unidades associadas a GLEISSOLOS MELÂNICOS, nas depressões do relevo. Os NEOSSOLOS FLÚVICOS, de forma geral ocorrem nos limiares dos principais drenos (rios Guapi-Açu e Macacu). Os NEOSSOLOS LITÓLICOS ocorrem sob geomorfologia de escarpas serranas, de declive acentuado, juntamente com afloramentos rochosos nos divisores de água da bacia. Os CAMBISSOLOS HÁPLICOS estão sob situações similares de paisagem e predominam nas Escarpas Serranas.

Os atributos que exerceram maior influência na distribuição dos solos da bacia hidrográfica foram a altimetria, declividade, curvatura e índice topográfico combinado (CTI), além da geologia, particularmente no caso dos solos oriundos de sedimentos, depósitos coluviais e de rochas alcalinas.

A caracterização dos padrões geomórficos, através dos parâmetros estatísticos dos atributos morfométricos derivados do MDE e identificação dos padrões geomórficos baseado no conhecimento dos solos e paisagem da área de estudo, serviram de base para os procedimentos empregados na classificação supervisionada dos pedodomínios por simuladores de redes neurais artificiais.

O conjunto de análise empregado na seleção da rede para a classificação final mostrou melhor desempenho quanto aos índices estatísticos exatidão global (85,2%), Kappa (0,833), que foi obtido pela rede com todas as variáveis discriminantes (conjunto 1), embora não apresente diferenças estatísticas entre este e os conjuntos 7 (sem geologia), e conjunto 10 (sem NDVI), que apresentaram valores de índice Kappa 0,801 e 0,809, respectivamente. Os valores para o desempenho do Kappa, para os três conjuntos, são considerados excelentes.

Em contrapartida os piores resultados foram encontrados ao excluir os atributos curvatura (conjunto 4), o índice CTI (conjunto 5) e a declividade (conjunto 3), com valores de 0,663, 0,667 e 0,699, respectivamente. Esses conjuntos apresentam confusão principalmente entre as classes PA, GX, LA, LVA e CX.

A avaliação da generalização para os três conjuntos de melhor desempenho mostrou melhor resultado para o produto final da classificação pelo conjunto 10, e o pior para o conjunto 7. As principais discrepâncias foram observadas entre as classes PA, PVA, CX, LA, LVA e RL. De uma forma geral, os conjuntos 1 e 10 mostraram similaridade para a espacialização das classes de solos apresentando confusão para as classes PA, GX e GS+GJ, e também para os LA e LVA, entre si. A classe dos RY mostrou na generalização área reduzida nos mapas finais dos três conjuntos.

O conjunto de análises adotado nesse estudo permitiu selecionar para a classificação final dos solos da bacia hidrográfica, o mapa obtido pelo conjunto 10 (elevação, declividade, curvatura, CTI, distancia euclidiana, *clay minerals*, *iron oxide* e geologia), com dez neurônios na camada oculta e nove classes de saída, correspondentes às classes de solos consideradas.

O uso da classificação supervisionada pelos simuladores de redes neurais artificiais possibilitou a realização do mapeamento de solos da bacia hidrográfica, de forma quantitativa, obtendo resultados satisfatórios dentro do prazo estabelecido para a execução do mesmo, considerando a complexidade da atividade proposta. Embora não tenha sido feita validação através da checagem em campo, com nova coleta de amostras em número representativo para todas as classes de solos consideradas, a análise prévia quanto à concordância com perfis não utilizados para o treinamento apresentou cerca de 60% de acerto, resultado próximo aos obtidos em outros estudos que utilizaram RNA's no mapeamento digital de solos.

Ao final dessas explicações, é esperado que este tipo de abordagem possa contribuir para o aperfeiçoamento dos produtos de levantamentos de solos, no que tange à riqueza de informações geradas, compreensão das relações solo-paisagem, além de possibilitar a redução da subjetividade atribuída ao mapeamento de solos elaborados de forma convencional, que contam somente com a experiência dos pedólogos envolvidos.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEHRENS, T., FORSTER, H., SCHOLTEN, T., STEINRUCKEN, U., SPIES, E., GOLDSCHMITT, M. Digital soil mapping using artificial neural networks. **J. Plant Nutr. Soil Sci.**, 168, 21-33, 2005.
- BIRKELAND, P. W. **Soils and geomorphology**. New York: Oxford University Press. 1984. 430p.
- BOLSTAD, P.V.; STOWE, T. An evaluation of DEM accuracy: elevation, slope, and aspect. **Photogrammetric Engineering Remote Sensing**. v.60. p.1327-1332, 1994.
- BORUVKA, L., PENIZEK, V. A test of artificial neural network allocation procedure using the Czech soil survey of agricultural land data. **Developments in Soil Science**. v. 31.p 415-425, 2007.
- BRAGA, A. de P.; CARVALHO L. F. de; LUDEMIR., T. B. **Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora. 2000. 262p.
- BRASIL. Diretoria de Serviço Geográfico. Rio Bonito: **folha SF-23-Z-B-V-2 MI-2746/2**. Rio de Janeiro. 1997. Carta topográfica na escala 1:50.000.
- BROWN, D. G.; LUSCH, D. P.; DUDA, K. A. Supervised classification types of glaciated landscapes using digital elevation data. **Geomorphology** 21: 233-250. 1998.
- BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford University Press Inc. New York. 1986. 194p.
- CAMPOS, M. A. A. **Padrão e dinâmica de floresta tropical, através de classificação orientada a objeto e da análise da paisagem com imagens Landsat**. Tese de Doutorado. Curitiba. UFPR. 2005. 122 p.
- CÂMARA, C. & DAVIS, C. 1996. **Fundamentos de Geoprocessamento**. Livro on-line: [www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/). Acesso em março de 2010.
- CARVALHO FILHO, A. de; LUMBRERAS, J. F.; WITTERN, K. P.; LEMOS, A. L.; SANTOS, R. D. dos; CALDERANO FILHO, B.; MOTHCI, E. P.; ITURRI LARACH, J. O.; CONCEIÇÃO, M. da; TAVARES, N. P.; SANTOS, H. G. dos; GOMES, J. B. V.; CALDERANO, S. B.; GONÇALVES, A. O.; MARTORANO, L. G.; SANTOS, L. C. de O.; BARRETO, W. de O.; CLAESSEN, M. E. C.; PAULA, J. L. de; SOUZA, J. L. R. de; LIMA, T. da C.; ANTONELLO, L. L.; LIMA, P. C. de; OLIVEIRA, R. P. de; AGLIO, M. L. D. **Levantamento de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos (Rio de Janeiro, RJ). 2003. Contém texto e mapa colorido. Escala 1:250.000. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. 32). 2003.
- CARVALHO JÚNIOR, W. de. **Classificação supervisionada de pedopaisagens no domínio dos mares de morros utilizando redes neurais artificiais**. Tese de doutorado. UFV, MG. 2005. 160p.
- CARVALHO JÚNIOR, W. DE. CHAGAS, C. DA S., FERNANDES FILHO, E. I., VIEIRA, C. A. O., SCHAEFER, C. E. G. BHERING, S. B., FRAN-CELINO, M. R. Digital soilscape mapping of tropical hillslope areas by neural networks. **Sci. Agric**. Piracicaba, Braz. V. 68. n6. p.691-696. 2011.

- CHAGAS, C. DA S., **Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica de domínio de mar de morros**. Tese de doutorado. UFV, MG. 2006. 239p.
- CHAGAS, C.S.; FERNANDES FILHO, E. I.; ROCHA, M.F.; 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**. V.14. p. 218-226. 2010 a.
- CHAGAS, C. S.; FERNANDES. E.I.; VIEIRA, C.A.O.; SCHAEFER, C.E.G.R.; CARVALHO JÚNIOR, W. Atributos topográficos e dados do Landsat 7 no mapeamento digital de solos com uso de redes neurais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. V.45. p.497-507. 2010 b.
- CHAGAS, C. S. CARVALHO JÚNIOR, W., BHERING, S. B. Integração de dados do Quickbird e atributos do terreno no mapeamento digital de solos por redes neurais artificiais. **R. Brás. Ci. Solo**, v.35, p.693-704, 2011.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. IGCE. UNESP. Ed. Edgard Blucher Ltda. 236 p. 1999.
- CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data. **Remote Sensing Environment**. V.37. p.35-46. 1991
- CONGALTON, R. G. e GREEN. K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. New York: Lewis Publishers. 1999. 137p. 30
- CÔRTEZ, M. B. V., WASSERMAN, J. C., BASTOS, O. M., BARCELLOS, R. G. S., BARBOSA, A. da S. Gestão da Qualidade Bacteriológica da Água dos Rios Macacu, Caceribu. Guapi-Açu d Guapi-Macacu. RJ. Brasil. **Anais**. VI Congresso Nacional de Excelência em Gestão. Niterói. RJ. 2010. 12p. (ISSN 1984-9354)
- CPRM. **Geologia do Estado do Rio de Janeiro**: texto explicativo e mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro. Serviço Geológico do Brasil. Departamento de Recursos Minerais – DRM. Brasília: CPRM. 2 ed. Revista em 2001. CD-ROM.
- DALRYMPLE, J. B.; BLONG, R. J.; CONACHER, A. J. A Hypothetical nine-unit landsurface model. **Geomorphology**. 12: 60-76. 1968.
- DANIELS, R. B. e HAMMER, R. D. **Soil Geomorphology**. Ed. John Wiley & Sons. New York. 1992. 236p.
- DANTAS. M. E. **Estudo geoambiental do Estado do Rio de Janeiro**. Geomorfologia do Estado do Rio de Janeiro. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Minas e metalurgia. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Brasília. Dezembro 2000. 1 CD-ROM.
- DANTAS, J. R. da C., ALMEIDA, J. R. de, LINS, G. A. Impactos ambientais na bacia hidrográfica de Guapi-Macacu e suas conseqüências para o abastecimento de água nos municípios do leste da Baía de Guanabara. **Série Gestão e Planejamento Ambiental**. 10. Rio de Janeiro. CETEM/MCT. 2008. 26 p. (Coleção Artigos Técnicos nº7).
- DRM. DEPARTAMENTO DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro. **Itaboraí: folha SF-23-Z-B-V-1**. Rio de Janeiro.. Escala 1:50.000. 1981<sup>a</sup>
- DRM. DEPARTAMENTO DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro. **Cava: folha SF-23-Z-B-IV-1**. Rio de Janeiro. Escala 1:50.000. 1981b.
- DRM. DEPARTAMENTO DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro. **Itaipava: folha SF-23-Z-B-I-4**. Rio de Janeiro. Escala 1:50.000. 1984.

- DRM. DEPARTAMENTO DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro. **Petrópolis: folha SF-23-Z-B-IV-2**. Rio de Janeiro. Escala 1:50.000. 1979.
- DRM. DEPARTAMENTO DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro. **Teresópolis: folha SF-23-Z-B-11-3**. Rio de Janeiro. Escala 1:50.000. 1980<sup>a</sup>.
- DRM. DEPARTAMENTO DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro. **Nova Friburgo: folha SF-23-Z-B-II-4**. Rio de Janeiro. Escala 1:50.000. 1980b.
- DRM. DEPARTAMENTO DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro. **Rio Bonito: folha SF-23-Z-B-IV-1**. Rio de Janeiro. 1980c. Escala 1:50.000.
- DIXON, T. H. **SAR interferometry and surface change detection**. University of Miami. Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Sciences. RASMAS TR 95-003. 1995.
- DOBOS, E., MICHELI, E., BAUMGARDNER, M. F., BIEHL, L., HELT, T. Use of combined digital elevation model and satellite radiometric data for regional soil mapping. **Geoderma**. V.97. p.367-391. 2000.
- DOBOS, E., MONTANARELLA, L., NEGRE, T., MICHELI, E. A regional scale soil mapping approach using integrated AVHRR and DEM data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation – JAG**, v.3, p.30-42, 2001.
- ECOLOGUS- AGRAR. **Plano Diretor dos Recursos Hídricos da Região Hidrográfica da Baía de Guanabara**. Rio de Janeiro. RJ. 2003. 3087 p. CD-ROOM
- ECOLOGUS- AGRAR. **Plano Diretor dos Recursos Hídricos do Programa para a despoluição da Baía da Guanabara**. Secretaria de estado de Meio ambiente e Desenvolvimento Urbano do estado do rio de Janeiro. RJ. 2006. CD-ROOM
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos – CNPS. 1997. 212p. (Embrapa-CNPS. Documentos. 1).
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro. 1999. 412p
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2º ed. Rio de Janeiro. Embrapa Solos. 2006. 306p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Dinâmica de uso e cobertura da terra nas bacias hidrográficas de Guapi-Macacu e Caceribu – RJ**. Rio de Janeiro. Embrapa Solos. 2009. 65p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 136).
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. ESRI. ARC/INFO. **Command references**. New York. 1994. 281 p.
- ESRI. Environmental Systems Research Institute Inc.. Redlands. CA. Software: **ArcGIS e ArcINFO** – v.10. 2010. CD-ROM.
- ENVI v.4.5. ITT – Visual Information Solutions. Inc. **Programa de computação**.
- ERDAS Imagine versão 9.1. ERDAS Systems. Inc. Atlanta. **Programa de computação**.
- ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Soil Survey Division. Soil Conservation Service. Soil Survey Staff. **Soil survey manual: revised**. Washington: Enlarg. Ed. 1993. 437p. (USDA. Agriculture Handbook. 18).

- FANNING, D. S., FANNING, M. C. B. **Soil Morphology. Genesis and Classification.** John Wiley & Sons. Inc. 1989. 420 p.
- FAUSSET, L. V. **Fundamentals of neural networks:** Architectures, algorithms and applications. New Jersey, Prentice Hall, 1994. 461p.
- FERRARI, A. L. **Evolução tectônica do gráben da Guanabara.** Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. USP. São Paulo. 2001.
- FIGUEIREDO, M. A., VARAJÃO, A. F. D. C., FABRIS, J. D., LOUTFI, I. S., CARVALHO, A. P. Alteração superficial e pedogeomorfologia no sul do Complexo Baçõ – Quadrilátero Ferrífero (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** Vol.28. n.4. p. 713-729. 2004.
- FLORINSKY, I.V., EILERS, R. G., MANNING, G. R., FULLER, L. G. Prediction of soil properties by digital terrain modeling. **Environmental Modelling & Software.** v. 17 p. 295–311. 2002.
- FLORINSKY, I.V. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. **International Journal of Geographical Information Science.** v.12. p.47-61. 1998.
- FOODY, G. M., ARORA, M. K. An evaluation of some factors affecting the accuracy of classification by an artificial neural network. **International Journal of Remote Sensing,** v.18, p.799-810, 1997.
- FUNDAÇÃO CIDE. Fundação Centro de Informações e Dados do Rio De Janeiro. **Programa de Despoluição da Baía de Guanabara- PDBG.** Folhas cartográficas 1:10.000. RJ. 1996
- FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: período 1995-2000.** São Paulo. 2002. 47 p. Edição conjunta com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Relatório Final. Disponível em: <HTTP://www.rma.org.br>.
- GALLANT, J. C.; WILSON, J. P. **Primary topographic attributes.** In: WILSON, J. P. & GALLANT, J. C. (Eds.). *Terrain Analysis: Principles and applications.* New York: John Wiley & Sons. 2000. p.51-85.
- GESSLER, P.E.; CHADWICK, O.A.; CHAMRAN, F.; ALTHOUSE, L.; HOLMES, K. Modeling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes. **Soil Science Society of American Journal.** V.64. p.2046-2056. 2000.
- GESSLER, P. E.; MOORE, I. D.; MCKENZIE, N. J. & RYAN, P. J. Soil landscape at a local scale and spatial prediction of soil attributes. **International Journal of Geographic Information System.** V. 9. n. 4. p. 421-432. 1995.
- HALL, G.F. & OLSON, C. G. **Predicting variability of soils from landscape models.** In M.J. MAUSBACH and L.P. WILDING (ed.) *Spatial variabilities of soils and landforms.* SSSA Special Publication 28. SSSA. Madison. WI. 1991. p.9-24
- HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e práticas.** Trad. Paulo Martins Engel. 2 ed. Porto Alegre: Bookman. 2001. 900 p.
- HENGL, T. E HEUVELINK, G. B. M. New Challenges for Predictive Soil Mapping. **Anais.** Global Workshop on Digital Soil Mapping. Montpellier AGRO-M/INRA Campus. September 14-17. 2004.
- HICKEY, R.; SMITH, A.; JANKOWSKI, P. Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID: Computers. **Environment and Urban Systems.** V. 18. n. 5. p. 365-380. 1994.

HIROSE, Y.; YAMASHITA, K., HIJIYA, S. Back-propagation algorithm which varies the number of hidden units. **Neural Networks**. V.4. p.61-66. 1991.

HOLE, F. D. & CAMPBELL, J. B. **Soil landscape analysis**. Rowman & Allenheld. Totowa. NJ. 1985. 196 p.

HUDSON, B. D. Concepts of soil mapping and interpretation. **Soil Survey Horizons**. V.31. p.63-72. 1990.

HUDSON, B. D. The soil survey as a paradigm-based science. **Soil Science Society of American Journal**. V. 56. p.836-841. 1992.

HUTCHINSON, M. F. **Development of continent-wide DEM with applications to terrain and climate analysis**. In: GOODCHILD, M.F. (Ed.) Environmental Modeling with GIS. New York: Oxford University Press. 1993. p.392-399.

HUTCHINSON, M. F.; GALLANT, J. C. **Digital elevation models and representation of terrain shape**. In: WILSON, J. P. & GALLANT, J. C. (Eds.) Terrain analysis: principles and applications. New York: John Wiley & Sons. 2000. p.29-50.

IBAÑEZ, J. J., ZINCK, J. A.; JIMÉNEZ-BALLESTA, R. **Soil Science Survey: old and new challenges**. In: ZINCK, J. A. Soil survey: perspectives and strategies for 21<sup>st</sup> century. ITC Publication. Enschede. The Netherlands. N.21. p.7-14. 1993.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Classificação da vegetação brasileira. Adaptada a um sistema universal**. VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, L. R.; LIMA, J. C. A. Rio de Janeiro: IBGE. Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 124p. 1991.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia**. 2 Ed. Diretoria de Geociências, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. IBGE. 2007. 316 p. (Manuais Técnicos em Geociências, n 4)

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Geociências. Departamento de Cartografia. **PONTA DO FORNO. Folha SF-24-Y-A-IV-3-NE 2748-3-NE. Modelo de Elevação Projeto RJ-25**. Metadados. Rio de Janeiro. 2008. Disponível em: [geoftp.ibge.gov.br/](http://geoftp.ibge.gov.br/). Acesso em: 20 abr. 2011.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Geociências. Departamento de Cartografia. **Itaboraí: folha SF-23-Z-B-V-1. 2. □a**. Rio de Janeiro. 1979<sup>a</sup>. Escala 1:50.000. Carta topográfica. Disponível em: [www.ibge.gov.br/home/#sub\\_download](http://www.ibge.gov.br/home/#sub_download).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Geociências. Departamento de Cartografia. **Itaipava: dados digitais da carta topográfica na escala 1:50.000**. Disponível em: [www.ibge.gov.br/home/#sub\\_download](http://www.ibge.gov.br/home/#sub_download).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Geociências. Departamento de Cartografia. **Nova Friburgo: folha SF-23-Z-B-II-4**. Rio de Janeiro. 1974. Escala 1:50.000. Carta topográfica. Disponível em: [www.ibge.gov.br/home/#sub\\_download](http://www.ibge.gov.br/home/#sub_download).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Geociências. Departamento de Cartografia. **Petrópolis: folha SF-23-Z-B-IV-2. 2. □a**. Rio de Janeiro. 1979<sup>b</sup>. Escala 1:50.000. Carta topográfica. Disponível em: [www.ibge.gov.br/home/#sub\\_download](http://www.ibge.gov.br/home/#sub_download).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Geociências. Departamento de Cartografia. **Teresópolis: folha SF-23-Z-B-II-3 MI-2716-3. 2. □a**. Rio de Janeiro. 1983. Escala 1:50.000. Carta topográfica. Disponível em: [www.ibge.gov.br/home/#sub\\_download](http://www.ibge.gov.br/home/#sub_download).

- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais **Modelo de Elevação SRTM: Topodata**. 2009. Disponível em: [dsr.inpe.br/topodata/](http://dsr.inpe.br/topodata/). Acesso: 20 abr. 2011.
- IUSS. Working Group WRB. 2007. **World Reference Base for Soil Resources 2006**, first update 2007. FAO, Rome. 128p. (World Soil Resources Reports, No. 103).
- JavaNNS. **Java Neural Network Simulator**. Version 1.1. 2001. University of Tubingen. Germany. Disponível em: [http://www-ra.informatik.uni-tuebingen.de/software/JavaNNS/welcome\\_e.html](http://www-ra.informatik.uni-tuebingen.de/software/JavaNNS/welcome_e.html).
- JARVIS, A.; RUBIANO, J.; NELSON, A.; FARROW, A.; MULLIGAN, M. **Practical use of SRTM data in the tropics: comparisons with digital elevation models generated from cartographic data**. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). 2004. 32p. (Working document. 198).
- JENNY, H. **Factors of soil formation: a system of quantitative pedology**. New York: McGraw-Hill. 1941. 281p.
- KANELLOPOULOS, I., WILKINSON, G. G. Strategies and best practice for neural network image classification. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, p.711-725, 1997.
- KLINGEBIEL, A. A. HORVATH, E. H., MOORE, D. G., REYBOLD, W. U. Use of slope, aspect and elevation maps derived from digital elevation model data in making soil survey. In REYBOLD, W. U. & PETERSEN, G. W. **Soil survey techniques**. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, 1987. p.77-90. (SSSA Special Publication; n°20).
- KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. Fondo de Cultura Econômica. México. 479p. 1948.
- LAGACHERIE, P.; VOLTZ, M. Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area and digital elevation data: a conditional probability approach. **Geoderma**, v.97. p.187-208. 2000.
- LANDIS, J. R., KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, p.159-174, 1977.
- LIN, Z.; OGUCHI, T. Dem analysis on longitudinal and transverse profiles of steep mountainous watersheds. **Geomorphology**, v.78, p.77-89, 2006,
- McBRATNEY, A. B.; ODEH, I. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**, v.97. p.293-327. 2000.
- McBRATNEY, A.B.; MENDONÇA-SANTOS, M.L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v.117. p.3-52. 2003.
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. de L. M.; SANTOS H. G. dos. **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes de solos e atributos do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2003. 50 p. (Embrapa Solos. Documentos n. 45).
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A.B. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. **Computers & Geosciences**, v.32. p.1378-1388. 2006.
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A.B. Incorporating taxonomic distance into spatial prediction and digital mapping of soil classes. **Geoderma**, v.142. p.285-293. 2007.
- McKENZIE, N. J.; RYAN, P. J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. **Geoderma**, v.89. p.67-94. 1999.

MONSERUD, R. A., LEEMANS, R. Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic. **Ecological Modelling**, v.62, p.275-293, 1992.

MOONJUN. R. **Application of artificial neural network and decision tree in a GIS-based predictive soil mapping for landslide vulnerability study**. A case study of Hoi Num Rin sub-watershed. Thailand. Tese de Mestrado. International Institute for Geo-Information Science and Earth observation Enschede. The Netherlands – ITC. Enschede. 2007. 118 p.

MOORE, I.D.; GRAYSON, R.B.; LADSON, A.R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological application. **Hydrology Processes**, v.5. p.3-30. 1991.

MOORE, I.D.; GESSLER, P.E.; NIELSEN, G.A.; PETERSON, G.A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v.57. p.443-452. 1993.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2 ed. Viçosa: UFV. 2003. 307 p.: il.

ODEH, I. O. A, McBRATNEY, A. B.; CHITTLEBOROUGH, D. J. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. **Geoderma**, v. 63. p.197-214. 1994.

OLIVEIRA, J. B., MONIZ, A. C. de Levantamento pedológico detalhado da estação experimental de Ribeirão Preto. SP. *Bragantia*, v 34. n 2. p. 1-55. 1975.

PARK, S. J., VLEK, P. L. G. Environmental correlation of three-dimensional soil spatial variability: a comparison of three adaptive techniques. **Geoderma**, v.109, p.117-140, 2002.

PEDREIRA, B. da C. C. G.; FIDALGO, E, C. C.; ABREU, M, de B. Mapeamento do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu. RJ. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Natal. Brasil. 25-30 abril 2009. INPE. P. 2111-2118.

PENHA, H. M.; FERRARI, A. L.; AMADOR, E. S.; PENTAGNA, F.; JUNHO, M. C B.; BRENNER. T. L. **Projeto Carta Geológica Estado do Rio de Janeiro. Folha – Petrópolis**. Departamento de Recursos Minerais da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 1979.

PROJETO RADAMBRASIL. **Levantamento de Recursos Naturais v.32**. Folhas SF.23/24 Rio de Janeiro/Vitória. 1983. 775 p.

PROJETO MACACU. **Planejamento Estratégico da Região Hidrográfica dos Rios Guapi-Macacu e Caceribu-Macacu**. Niterói. RJ: UFF/FEC. 2010. 544 p.

RIBEIRO, C.A.S. **Apostila de curso ENF613**. Viçosa. MG: UFV. 2003. 22p.

RIOS, R. O., ALMEIDA, M. G., RIBEIRO, M. M. Análise do uso e ocupação do solo da cidade de Vitória-ES usando a composição colorida de imagens fornecidas pelo satélite Landsat-5. **Anais. XIII Encontro de Modelagem Computacional**. Instituto Politécnico (IPRJ). UERJ. Nova Friburgo-RJ. Brasil. P.251-257. 2010.

RUHE, R. V. 1975: **Geomorphology: geomorphic processes and surficial geology**. Boston. Massa chusetts: Houghton Mifflin. 246 p.

SABINS, F. F. **Remote sensing: Principles and Interpretation**. 3nd ed. New York: W. H. Freeman and Company. 1997. 432p.

SANTOS, R. D. dos; LEMOS, R. C. de; SANTOS, H. G. dos; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5ªed. Revista e ampliada. SBCE. Viçosa. 2005. 100p.

- SIRTOLI, A. E. **Atributos do terreno e índices espectrais integrados por redes neurais artificiais**. Tese de Doutorado. UFPR, Curitiba, PR. 2008. 114p.
- SNNS. **Stuttgart Neural Network Version 4.2**. University of Stuttgart e University of Tubingen. 1998. <http://www-ra.informatik.uni-tuebingen.de>
- SMITH, M.P.; ZHU, A.X.; BURT, J.E.A.; STILES, C. The effects of DEM resolution and neighbourhood size on digital soil survey. **Geoderma**, v.137. p.8-69. 2006.
- SOMMER, M.; HALM, D.; WELLER, U.; ZAREI, M.; STAHR, K. Lateral podzolization in a granite landscape. **Soil Sci. Soc. AM. J.**, v. 64:1434–1442. 2000.
- SOUZA, E. de. **Classificação supervisionada de solos por redes neurais artificiais na Serra do Cipó- MG**. Dissertação de Mestrado. UFV. Viçosa, MG. 2009. 112p.
- TEN CATEN, A. **Aplicação de componentes principais e regressões logísticas múltiplas em sistema de informações geográficas para a predição e o mapeamento digital de solos**. Dissertação de Mestrado. UFSM, RS. 2008. 130p.
- TEN CATEN, A. **Mapeamento digital de solos: metodologias para atender a demanda por informação especial em solos**. Tese de Doutorado. UFSM, RS. 2011. 108p. 2008.
- THOMAS, A. L.; KING, D.; DAMBRINE, E.; COUTURIER, A.; ROQUE, J. Predicting soil with parameters derived from relief and geologic materials in a sandstone region of Vosges Mountains (Northeastern France). **Geoderma**, v.90, p.291-305, 1999.
- THOMPSON, J.A.; BELL, J.C.; BUTLER, C.A. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modelling. **Geoderma**, v.100. p.67-89. 2001.
- TSO, B.; MATHER, P. M. **Classification methods for remotely sensed data**. 2 ed. Boca Raton. FL. USA: CRC. 2009. 356p.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. 2005. Disponível em <[edc.usgs.gov/products/elevation/srtm](http://edc.usgs.gov/products/elevation/srtm)> Acesso em 10 de outubro de 2010.
- UNIVERSITY OF STIRLING. Department of computing science and mathematics. Disponível em: [cs.stir.ac.uk/](http://cs.stir.ac.uk/). **Esquema rede neural**. Acesso em 10 de outubro de 2010.
- VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos: INPE, 2004. 72 p. (INPE-10550-RPQ/756).
- VALERIANO, M. M., ALBUQUERQUE, P. C. G. **TOPODATA: Processamento dos Dados SRTM**. São José dos Campos: INPE, 2010. 81p. (INPE-16702-RPQ/854).
- VARAJÃO, C. A. C., SALGADO, A. A. R., VARAJÃO, A. F. D. C., BRAUCHER, C. F., NALINI JÚNIOR, H. A. Estudo da evolução da paisagem do quadrilátero ferrífero (Minas Gerais. Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (10be) e da pedogênese. **R. Bras.. Ci. Solo**, 33:1409-1425. 2009.
- VAZ DE MELO, L. **Mapeamento digital de solos da bacia do rio Turvo Sujo por redes neurais artificiais**. Dissertação de Mestrado. UFV. 2009. 86p.
- VIEIRA, C.A.O. **Accuracy of remotely sensing classification of agricultural crops: a comparative study**. (Ph.D Thesis) – University of Nottingham. Nottingham. UK. 2000. 327p.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo. ED. McGraw-Hill do Brasil. 245p. 1975.

- WEBSTER, R. The development of pedometrics. **Geoderma**, v.62. p.1-15. 1994.
- WILSON, J. P., GALLANT, J. C. Digital terrain analysis. In: WILSON, J. P. & GALLANT, J.C. (eds.). **Terrain analysis: principles and applications**. New York: John Wiley & Sons, 2000. p.4-27.
- WISE, S. Assessing the quality for hydrological applications of digital elevations models derived from contours. **Hydrological Processes**, v.14. p.1909-1929. 2000.
- WOOD, J. **The geomorphological characterization of digital elevation models**. (Ph.D Thesis) City University. London. 2000. 185p. Disponível em: <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd>. Acesso em: outubro de 2010.
- YANG, W.; YANG, L.; MERCHANT, J.W. An assessment of AVHRR/NDVI-ecoclimatological relations in Nebraska. USA. **International Journal of Remote Sensing**, v.10. p.2161-2180. 1997.
- ZHU, A.X. A similarity model for representing soil spatial information. **Geoderma**, v.77, p.217-242, 1997.
- ZHU, A.X. Mapping soil landscape as spatial continua: the neural network approach. **Water Resources Research**, v.36. p.663-677. 2000.
- ZHU, A.X.; HUDSON, B.; BURT, J.; LUBICH, K.; SIMONSON, D. Soil mapping using GIS. Expert knowledge. And fuzzy logic. **Soil Science Society of American Journal**, v.65. p.1463-1472. 2001.

## 7. ANEXOS

### 8.1. Perfis Representativos das Classes de Solo Identificadas

#### 8.1.1. ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico

##### Descrição Geral

**Perfil n°:** P10

**Data:** 18/11/10

**Classificação:** ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico, textura arenosa/argilosa, A moderado, fase floresta tropical subperenifólia, relevo plano a suave ondulado.

**Localização:** Distrito de Papucaia, Município de Cachoeiras de Macacu, RJ.

**Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil:** trincheira em baixada, relevo plano e sob pastagem.

**Altitude:** 11 metros.

**Litologia, formação geológica e cronologia:** Migmatitos da Unidade Santo Eduardo, pré-cambriano.

**Material originário:** produto de alteração das litologias supracitadas, com contribuição coluvionar.

**Pedregosidade:** não pedregosa.

**Rochosidade:** não rochosa.

**Relevo local:** plano.

**Relevo regional:** plano com morros (meia laranja).

**Erosão:** laminar ligeira.

**Drenagem:** moderadamente drenado.

**Vegetação primária:** floresta tropical subperenifólia.

**Uso atual:** pastagem.

**Descrito e coletado por:** Helena Saraiva Koenow Pinheiro e Waldir de Carvalho Júnior.

##### Descrição Morfológica

Ap	0-17 cm; bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmida); franco-arenosa; grão simples; solta, não plástica e não pegajosa; transição plana e gradual.
AB	17-27 cm; bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmida); franco-arenosa; grão simples; solta, não plástica e não pegajosa; transição plana e clara.
BA	27-38 cm; bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida); franco-arenosa; fraca, pequena, blocos subangulares; friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
Bt <sub>1</sub>	38-65 cm; bruno (10YR 4/3, úmida); franco-argilo-arenosa; fraca, pequena, blocos subangulares; friável, plástica e pegajosa.
Bt <sub>2</sub>	65-90 cm+; cor variegada composta de amarelo-brunado (10YR 6/6, úmida) e bruno-amarelado (10YR 5/8, úmida); argila; plástica e pegajosa.
Raízes:	Muitas finas no A e AB, comuns finas no BA e poucas finas no Bt <sub>1</sub> .
Observações:	Coleta para densidade com anel Kopeck (2 volumes por horizonte) – Ap e topo do Bt <sub>1</sub> . Coleta para análises de rotina de todos os horizontes descritos. Horizonte Bt <sub>2</sub> coletado com trado

## Dados Analíticos

Perfil n°: P10

Horizonte		Frações da amostra total g/kg			Composição granulométrica da terra fina g/kg				Argila dispersa em água g/kg	Grau de flocculação %	Relação silte/argila	Densidade g/cm <sup>3</sup>		Porosidade cm <sup>3</sup> /100cm <sup>3</sup>
Símbolo	Profundidade cm	Calhaus >20 mm	Cascalho 20-2 mm	Terra fina <2 mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila <0,002 mm				Solo	Partículas	
Ap	0-17	0	6	994	604	165	130	101	40	60	1,29			
AB	-27	0	11	989	553	155	191	101	80	21	1,89			
BA	-38	0	9	991	538	165	176	121	121	0	1,45			
Bt1	-65	0	12	988	480	173	145	202	181	10	0,72			
Bt2	-90	0	4	996	240	187	147	426	0	100	0,35			
Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol <sub>c</sub> /kg								Valor V (□at, por bases) %	Saturação por alumínio %	P assimilável mg/kg	
	Água	KCl 1N	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S (soma)	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	Valor T (soma)				
Ap	5,0	4,2	1,4	0,7	0,06	0,01	2,2	0,1	4,0	6,3	35	4	2	
AB	5,6	4,4	1,3	0,5	0,03	0,01	1,8	0,1	3,4	5,3	34	5	1	
BA	5,5	4,3	1,1	0,5	0,02	0,01	1,6	0,4	4,1	6,1	26	20	<1	
Bt1	5,3	4,2	0,9		0,01	0,01	0,9	0,6	3,7	5,2	17	40	1	
Bt2	4,9	3,9	0,7		0,02	0,01	0,7	2,0	3,3	6,0	12	74	<1	
Horizonte	C (orgânico) g/kg	N g/kg	Relação C/N	Ataque sulfúrico g/kg					Relações moleculares			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> livre g/kg	Saturação por sódio %	
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ (Ki)	$\frac{SiO_2}{R_2O_3}$ (Kr)			$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$
Ap	6,8	1,0	7										<1	
AB	4,0	0,7	6										<1	
BA	3,4	0,7	5										<1	
Bt1	2,4	0,6	4	90	80	14	6,3		1,91	1,72	8,97		<1	
Bt2	0,8	0,5	2	180	149	46	8,2		2,05	1,71	5,09		<1	

Relação Textural: 2,47

## 8.1.2. ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico

### Descrição Geral

**Perfil n°:** P33

**Data:** 10/02/11

**Classificação:** ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, textura média/argilosa, A moderado, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado.

**Localização:** Distrito de Papucaia, Município de Cachoeiras de Macacu, RJ.

**Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil:** perfil descrito em terço inferior de encosta em corte de estrada com declive maior que 50%.

**Altitude:** 142 metros.

**Litologia, formação geológica e cronologia:** Granitóides da Unidade Desengano, Proterozóico.

**Material originário:** produto de alteração das litologias supracitadas.

**Pedregosidade:** não pedregosa.

**Rochosidade:** não rochosa.

**Relevo local:** forte ondulado.

**Relevo regional:** escarpado.

**Erosão:** não aparente.

**Drenagem:** bem drenado.

**Vegetação primária:** floresta tropical subperenifólia.

**Uso atual:** floresta em regeneração estágio médio com bananeiras.

**Descrito e coletado por:** Osório Oscar Marques da Fonseca, Waldir de Carvalho Júnior e Helena Saraiva Koenow Pinheiro.

### Descrição Morfológica

A	0-21 cm; bruno (7,5YR 4/4, úmida); franco-argilo-arenosa; moderada, média, granular; duro, firme, plástica e pegajosa; transição plana e gradual.
BA	21-45 cm; bruno-forte (7,5YR 4/6, úmida); franco-argilo-arenosa; forte, média, blocos subangulares; duro, firme, plástica e pegajosa; transição plana e clara.
Bt	45-62 cm; bruno-forte (5YR 5/6, úmida); franco-argilo-arenosa; forte, média, blocos subangulares e angulares; duro, firme, plástica e pegajosa; transição plana e clara
BC	62-130+ cm; bruno-forte (5YR 5/8, úmida); argila, moderada, média, blocos subangulares; ligeiramente duro, friável, plástica e pegajosa

Observações: - Coleta para densidade com anel Kopeck (2 volumes por horizonte) – Ap, Bt

- Amostras de rotina coletadas dos horizontes Ap, BA, Bt, BC.

- Presença de minhocas no horizonte A.

- Presença de matações ao longo do perfil.

## Dados Analíticos

Perfil n°: P33

Horizonte		Frações da amostra total g/kg			Composição granulométrica da terra fina g/kg				Argila dispersa em água g/kg	Grau de floculação %	Relação silte/argila	Densidade g/cm <sup>3</sup>		Porosidade cm <sup>3</sup> /100cm <sup>3</sup>
Símbolo	Profundidade cm	Calhaus >20 mm	Cascalho 20-2 mm	Terra fina <2 mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila <0,002 mm				Solo	Partículas	
A	0-21	0	66	934	384	116	194	306	245	20	0,63		2,53	
BA	21-45	0	75	925	384	130	161	325	0	100	0,50			
Bw	45-62	13	32	955	373	118	163	346	0	100	0,47		2,58	
BC	62-130	0	22	978	293	88	169	450	0	100	0,38			
Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol <sub>c</sub> /kg								Valor V (□ at, por bases) %	Saturação por alumínio %	P assimilável mg/kg	
	Água	KCl 1N	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S (soma)	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	Valor T (soma)				
A	5,4	4,5	3,0	1,9	0,32	0,02	5,2	0,1	4,3	9,6	54	2	2	
BA	5,1	4,0	0,6	1,5	0,10	0,03	2,2	0,6	2,9	5,7	39	21	3	
Bw	5,1	3,9	0,5	1,4	0,07	0,02	2,0	1,0	2,0	5,0	40	33	4	
BC	5,0	3,9	0,4	1,2	0,07	0,05	1,7	1,4	2,8	5,9	29	45	3	
Horizonte	C (orgânico) g/kg	N g/kg	Relação C/N	Ataque sulfúrico g/kg						Relações moleculares			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> livre g/kg	Saturação por sódio %
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ (Ki)	$\frac{SiO_2}{R_2O_3}$ (Kr)	$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$		
A	12,5	1,8	7											<1
BA	4,5	1,0	4											<1
Bw	3,4	0,8	4	168	128	43	4,7			2,23	1,84	4,67		<1
BC	4,0	0,7	6	217	165	54	5,1			2,24	1,85	4,80		<1

### 8.1.3. CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico

#### Descrição Geral

**Perfil n°:** P32

**Data:** 06/10/10

**Classificação:** CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico, textura média, A moderado, fase floresta tropical perenifólia, relevo ondulado.

**Localização:** Município de Guapimirim, RJ.

**Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil:** perfil coletado em terço inferior de encosta, sob cobertura de gramíneas e com árvores esparsas.

**Altitude:** 68 metros.

**Litologia, formação geológica e cronologia:** Gnaisses-graníticos da Unidade Santo Aleixo, pré-cambriano.

**Material originário:** produto de alteração das litologias supracitadas.

**Pedregosidade:** não pedregosa.

**Rochosidade:** moderadamente rochosa.

**Relevo local:** ondulado.

**Relevo regional:** ondulado a forte ondulado.

**Erosão:** laminar ligeira.

**Drenagem:** bem drenado.

**Vegetação primária:** floresta tropical perenifólia.

**Uso atual:** gramínea e arbóreas esparsas.

**Descrito e coletado por:** Nilson Rendeiro Pereira e Helena S. K. Pinheiro.

#### Descrição Morfológica

- A 0-22 cm; bruno (7,5YR 4/3, úmida); franco-argilo-arenosa; fraca, pequena e média, blocos subangulares e granular; macia, friável, plástica e pegajosa; transição plana e clara.
- BA 22-40 cm; bruno-forte (7,5YR 5/6, úmida); franco-argilo-arenosa; fraca, média, blocos subangulares; macia, friável, plástica e pegajosa; transição plana e gradual.
- Bi 40-60 cm; bruno-forte (7,5YR 5/8, úmida); franco-argilo-arenosa; fraca, média, blocos subangulares; macia, friável, plástica e pegajosa; transição ondulada e clara.
- C<sub>1</sub> 60-95 cm; vermelho-amarelado (5YR 5/8, úmida); franco-argilo-arenosa; fraca, média a grande, blocos angulares; macia, friável, plástica e pegajosa; transição plana e clara.
- C<sub>2</sub> 95-120 cm+; amarelo-avermelhado (7,5YR 6/8, úmida); franco-argilo-arenosa; fraca, média a grande, blocos angulares; macia, friável, plástica e pegajosa.
- Raízes: Muitas finas, poucas médias, raras grossas A, poucas finas e raras grossas no BA, poucas finas e raras grossas no Bi, poucas médias C1 e C2 .
- Observações: - Coleta para análises de rotina de todos os horizontes descritos  
- Coleta para densidade com anel de Kopeck (2 volumes por horizonte) – A e Bi  
- Presença de saprolito brando (calhaus) no horizonte C1  
- Escurecimento irregular do horizonte C1 e C2 (provavelmente por apodrecimento de raízes)

## Dados Analíticos

Perfil n°: P32

Horizonte		Frações da amostra total g/kg			Composição granulométrica da terra fina g/kg				Argila dispersa em água g/kg	Grau de floculação %	Relação silte/argila	Densidade g/cm <sup>3</sup>		Porosidade cm <sup>3</sup> /100cm <sup>3</sup>
Símbolo	Profundidade cm	Calhaus >20 mm	Cascalho 20-2 mm	Terra fina <2 mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila <0,002 mm				Solo	Partículas	
A	0-22	0	20	980	408	142	187	263	243	8	0,71			
AB	-40	0	16	984	471	93	133	303	20	93	0,44			
Bi	-60	0	21	979	436	115	166	283	0	100	0,59			
C1	-95	0	18	982	433	109	176	282	0	100	0,62			
C2	-120	0	13	987	442	105	150	303	0	100	0,49			
Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol <sub>c</sub> /kg								Valor V (sat, por bases) %	Saturação por alumínio %	P assimilável mg/kg	
	Água	KCl 1N	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S (soma)	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	Valor T (soma)				
A	5,1	4,1	2,0	0,8	0,11	0,01	2,9	0,3	4,9	8,1	36	9	6	
AB	5,2	4,1	0,5	0,6	0,15	0,01	1,3	0,8	3,3	5,4	24	38	2	
Bi	5,1	4,1	0,8		0,01	0,01	0,8	0,8	3,0	4,6	17	50	2	
C1	5,0	4,1	0,7		0,01	0,01	0,7	0,8	2,7	4,2	17	53	2	
C2	5,0	4,1	0,8		0,01	0,01	0,8	0,9	2,7	4,4	18	53	2	
Horizonte	C (orgânico) g/kg	N g/kg	Relação C/N	Ataque sulfúrico g/kg						Relações moleculares			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> livre g/kg	Saturação por sódio %
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
										Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
A	11,6	1,4	8											<1
AB	4,7	0,7	7											<1
Bi	3,5	0,6	6											<1
C1	2,3	0,5	5											<1
C2	3,4	0,6	6											<1

#### 8.1.4. GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico

##### Descrição Geral

**Perfil n°:** P07

**Data:** 04/10/10

**Classificação:** GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico, textura argilosa/média, A moderado, fase floresta tropical perenifólia de várzea, relevo plano.

**Localização:** Município de Guapimirim, RJ.

**Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil:** perfil descrito em trincheira com 1% de declive, em área de várzea.

**Altitude:** 16 metros.

**Litologia, formação geológica e cronologia:** Sedimentos do Quaternário.

**Material originário:** Sedimentos aluvionares.

**Pedregosidade:** não pedregosa.

**Rochosidade:** não rochosa.

**Relevo local:** plano.

**Relevo regional:** suave ondulado a forte ondulado.

**Erosão:** laminar ligeira.

**Drenagem:** imperfeitamente drenado.

**Vegetação primária:** floresta tropical perenifólia de várzea.

**Uso atual:** pastagem.

**Descrito e coletado por:** Osório Oscar Marques da Fonseca e Alexandre Muselli.

##### Descrição Morfológica

- Ap 0-26 cm; bruno (7,5YR 4/3, úmido); argila; moderada, pequena e média, blocos subangulares e grão simples; firme, muito plástica e pegajosa; transição plana e clara.
- Cg<sub>1</sub> 26-57 cm; bruno-acinzentado (10YR 5/2, úmido) com mosqueado abundante pequeno e distinto vermelho-amarelado (5YR 4/6), franco-argilo-arenosa; maciça, firme, muito plástica, pegajosa; transição plana e clara.
- Cg<sub>2</sub> 57-104 cm+; bruno-acinzentado (2,5Y 5/2, úmido) com mosqueados como pequeno e distinto vermelho-amarelado (5YR 5/8, úmido); franco-argilo-arenosa; maciça; firme, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa.

**Raízes:** Abundantes finas em Ap, comuns finas em C1 e poucas finas em Cg2.

**Observações:** - Coleta para densidade com anel comum de volume conhecido (2 volumes por horizonte) – Ap e Cg2. Ocorrência de calhaus no horizonte Cg2.

## Dados Analíticos

Perfil n°: P07

Horizonte		Frações da amostra total g/kg			Composição granulométrica da terra fina g/kg				Argila dispersa em água g/kg	Grau de flocculação %	Relação silte/argila	Densidade g/cm <sup>3</sup>		Porosidade cm <sup>3</sup> /100cm <sup>3</sup>
Símbolo	Profundidade cm	Calhaus >20 mm	Cascalho 20-2 mm	Terra fina <2 mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila <0,002 mm				Solo	Partículas	
Ap	0-26	0	12	988	292	83	219	406	325	20	0,54			
C1	-57	0	27	973	430	103	184	283	182	36	0,65			
Cg2	-104	0	49	951	518	133	127	222	181	18	0,57			
Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol <sub>c</sub> /kg								Valor V (□at, por bases) %	Saturação por alumínio %	P assimilável mg/kg	
	Água	KCl 1N	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S (soma)	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	Valor T (soma)				
Ap	4,8	3,9	0,7	0,8	0,07	0,05	1,6	1,1	6,3	9,0	18	41	3	
C1	5,1	4,0	0,8		0,02	0,01	0,8	1,6	3,2	5,6	14	67	2	
Cg2	5,1	4,0	0,5		0,01	0,01	0,5	1,3	2,2	4,0	12	72	2	
Horizonte	C (orgânico) g/kg	N g/kg	Relação C/N	Ataque sulfúrico g/kg						Relações moleculares			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> livre g/kg	Saturação por sódio %
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ (Ki)	$\frac{SiO_2}{R_2O_3}$ (Kr)	$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$		
Ap	15,2	1,7	9											<1
C1	7,7	1,1	7											<1
Cg2	4,3	0,7	6											<1

### 8.1.5. GLEISSOLO SÁLICO Órtico solódico

#### Descrição Geral

**Perfil:** P100

**Data:** 15/12/91

**Fonte:** Levantamento de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do Estado do Rio de Janeiro (Carvalho Filho et al., 2003).

**Classificação:** GLEISSOLO SÁLICO Órtico solódico, textura argilosa, A moderado, fase campo halófilo, relevo plano.

**Localização, município, estado e coordenadas:** estrada Magé - Niterói (BR 493), a 2km do rio Guapi entrando para fz. Jamaica. Magé, RJ. Coordenadas 22°40'52"S. e 42°58'10"W.Gr. Folha Itaboraí.

**Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil:** várzea aplainada com 0 a 1% de declive, sob cobertura graminóide.

**Altitude:** 10 metros.

**Litologia, formação geológica e cronologia:**

**Material originário:**

**Pedregosidade:** não pedregosa.

**Rochosidade:** não rochosa.

**Relevo local:** plano.

**Relevo regional:** plano.

**Erosão:** não aparente.

**Drenagem:** muito mal drenado.

**Vegetação primária:** campo halófilo.

**Uso atual:** reserva.

**Descrito e coletado por:** Aroaldo L. Lemos e Klaus P. Wittern.

#### Descrição Morfológica

A 0-10cm; cinzento muito escuro (5Y 3/1); argilo-siltosa.

C1g 20-60cm; cinzento-escuro (5Y 4/1); argila.

C2g 60-100cm; cinzento-esverdeado (5GY 6/1).

Observações - água a 60cm;

: - área drenada superficialmente.

## Dados Analíticos

Perfil nº extra rio  
523

Horizonte		Frações da amostra total g/kg			Composição granulométrica da terra fina g/kg				Argila dispersa em água g/kg	Grau de floculação %	Relação silte/ argila	Densidade g/cm <sup>3</sup>		Porosidade cm <sup>3</sup> /100cm <sup>3</sup>	
Símbolo	Profundidade cm	Calhaus >20 mm	Cascalho 20-2 mm	Terra fina <2 mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05- 0,002 mm	Argila <0,002 mm				Solo	Partículas		
A	0-10	0	0	1000	220	60	410	510	0	100	0,80				
C1g	20-60	0	0	1000	220	200	340	440	0	100	0,77				
Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol <sub>c</sub> /kg								Valor V (sat. por bases) %	Saturação por alumínio %	P assimilável mg/kg		
	Água	KCl 1N	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S (soma)	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	Valor T (soma)					
A	3,6	3,1	3,2	2,3	0,11	1,40	7,0	8,6	27,5	43,1	16	55	18		
C1g	3,6	3,2	5,1	1,5	0,55	2,22	9,4	4,2	15,6	29,2	32	31	6		
Horizonte	C (orgânico) g/kg	N g/kg	Relação C/N	Ataque sulfúrico g/kg						Relações moleculares			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> livre g/kg	Equivalente de CaCO <sub>3</sub> g/kg	
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ (Ki)	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{R}_2\text{O}_3}$ (Kr)	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$			
A	49,0	4,3	11	215	178	49	8,9			2,05	1,74	3,63			
C1g	21,7	2,1	40	199	161	54	10,5			2,10	1,73	2,98			
Horizonte	Saturação por sódio %	Pasta saturada		Sais solúveis (extrato 1:5) cmol <sub>c</sub> /kg								Constantes hídricas g/100g			
		C. E. do extrato mS/cm 25°C	Água %	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Umidade 1/30MPa	Umidade 1,5MPa	Água disponível máxima	Equivalente de umidade
A	3	8,26	83			0,04	4,29					+			
C1g	7	6,19	67			0,06	3,43					+			

### 8.1.6. LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico

#### Descrição Geral

**Perfil n°:** P12

**Data:** 24/09/10

**Classificação:** LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico, textura argilosa, A moderado, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado.

**Localização:** Distrito de Papucaia, Município de Cachoeiras de Macacu, RJ.

**Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil:** perfil coletado em barranco de corte de estrada, em terço médio de encosta com 30% de declive, sob pastagem.

**Altitude:** 55 metros.

**Litologia, formação geológica e cronologia:** Migmatitos da Unidade Santo Eduardo, pré-cambriano.

**Material originário:** produto de alteração das litologias supracitadas.

**Pedregosidade:** não pedregosa.

**Rochosidade:** não rochosa.

**Relevo local:** forte ondulado.

**Relevo regional:** forte ondulado.

**Erosão:** laminar ligeira.

**Drenagem:** bem drenado.

**Vegetação primária:** floresta tropical subperenifólia.

**Uso atual:** pastagem.

**Descrito e coletado por:** Helena Saraiva Koenow Pinheiro, Osório Oscar Marques da Fonseca e Alexandre Muselli.

#### Descrição Morfológica

- |                 |  |
|-----------------|--|
| Ap              | 0-15 cm; bruno-escuro (10YR 3/3, úmida); argila; moderada, pequena, blocos subangulares; ligeiramente dura, firme, muito plástica e muito pegajosa; transição plana e clara.                                   |
| BA              | 15-30 cm; bruno (10YR 4/3, úmida); argila; moderada, pequena e média, blocos subangulares; ligeiramente duro, friável, muito plástica, muito pegajosa; transição plana e difusa.                               |
| Bw <sub>1</sub> | 30-60 cm; bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida); muito argilosa; moderado, pequeno a média, bloco subangulares; ligeiramente duro, muito friável, muito plástica, muito pegajosa; transição plana e difusa. |
| Bw <sub>2</sub> | 60-90 cm <sup>+</sup> ; bruno-amarelado-escuro (10YR 4/6, úmida); argila; fraca, pequena, blocos angulares; ligeiramente dura, muito friável, muito plástica, muito pegajosa.                                  |
| Raízes:         | Muitas finas em A, comuns finas no BA e raras finas no Bw <sub>1</sub> e Bw <sub>2</sub> .   |
| Observações:    | - Coleta para densidade com anel comum de volume conhecido (2 volume por horizonte) – A e Bw <sub>1</sub><br>- presença de minhocas no horizonte A<br>- plantio de mandioca na área                            |

## Dados Analíticos

Perfil n°: P12

Horizonte		Frações da amostra total g/kg			Composição granulométrica da terra fina g/kg				Argila dispersa em água g/kg	Grau de flocculação %	Relação silte/argila	Densidade g/cm <sup>3</sup>		Porosidade cm <sup>3</sup> /100cm <sup>3</sup>
Símbolo	Profundidade cm	Calhaus >20 mm	Cascalho 20-2 mm	Terra fina <2 mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila <0,002 mm				Solo	Partículas	
A	0-15	0	6	994	298	104	91	507	406	20	0,18			
BA	-30	0	8	992	273	69	88	570	183	68	0,15			
Bw1	-60	0	10	990	271	69	70	590	0	100	0,12			
Bw2	-90	0	10	990	237	78	73	612	0	100	0,12			
Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol <sub>e</sub> /kg									Valor V (sat, por bases) %	Saturação por alumínio %	P assimilável mg/kg
	Água	KCl 1N	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S (soma)	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	Valor T (soma)				
A	4,7	3,7	0,8	0,7	0,14	0,07	1,7	1,1	6,8	9,6	18	39	2	
BA	4,7	3,8	0,4	0,4	0,04	0,04	0,5	1,8	4,6	6,9	7	78	1	
Bw1	4,6	3,8	0,2	0,2	0,02	0,01	0,2	1,7	3,8	5,7	4	89	1	
Bw2	4,5	3,8	0,2	0,2	0,01	0,01	0,2	1,7	3,2	5,1	4	89	1	
Horizonte	C (orgânico) g/kg	N g/kg	Relação C/N	Ataque sulfúrico g/kg						Relações moleculares			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> livre g/kg	Saturação por sódio %
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ (Ki)	$\frac{SiO_2}{R_2O_3}$ (Kr)	$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$		
A	16,9	1,8	9											<1
BA	10,5	1,4	7											<1
Bw1	8,4	1,2	7	196	231	81	14,8			1,44	1,18	4,48		<1
Bw2	5,4	0,8	7	206	229	87	16,3			1,53	1,23	4,13		<1

### 8.1.7. LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico

#### Descrição Geral

**Perfil n°:** P47

**Data:** 07/10/10

**Classificação:** LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, textura argilosa, A moderado, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado.

**Localização:** Município de Guapimirim, RJ.

**Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil:** perfil coletado em terço inferior de encosta com >40% de declive, sob pastagem.

**Altitude:** 46 metros.

**Litologia, formação geológica e cronologia:** Gnaisses-graníticos da Unidade Santo Aleixo, pré-cambriano.

**Material originário:** produto de alteração das litologias supracitadas.

**Pedregosidade:** não pedregosa.

**Rochosidade:** não rochosa.

**Relevo local:** forte ondulado.

**Relevo regional:** forte ondulado.

**Erosão:** laminar ligeira.

**Drenagem:** acentuadamente a bem drenado.

**Vegetação primária:** floresta tropical subperenifólia.

**Uso atual:** pastagem.

**Descrito e coletado por:** Nilson Rendeiro Pereira, César da Silva Chagas e Helena S. K. Pinheiro.

#### Descrição Morfológica

Ap	0-17 cm; bruno (7,5YR 4/4, úmida); franco-argilo-arenosa; moderada, média, granular; friável, plástica e pegajosa; transição plana e clara.
BA	17-33 cm; vermelho-amarelado (5YR 5/6, úmida); argilo-arenosa; moderada, média, granular; friável, plástica e pegajosa; transição plana e gradual.
Bw <sub>1</sub>	33-74 cm; vermelho-amarelado (5YR 5/8, úmida); argila; fraca, pequena e média, blocos subangulares; friável, plástica, pegajosa; plana e difusa.
Bw <sub>2</sub>	74-150 cm+; vermelho-amarelado (5YR 5/8, úmida); argilo-arenosa; fraca, média, blocos subangulares que desfaz em forte pequena granular, muito friável, plástica e pegajosa.
Raízes:	Comuns finas no A, poucas finas no BA e Bw <sub>1</sub> , raras finas no Bw <sub>2</sub> .
Observações:	- Coleta para densidade com anel de Kopeck (2 volumes por horizonte) – A e Bw <sub>1</sub> . - Coleta para análise de rotina de todos os 4 horizontes descritos - Em barranco próximo o horizonte A apresenta maior espessura.

## Dados Analíticos

Perfil n°: P47

Horizonte		Frações da amostra total g/kg			Composição granulométrica da terra fina g/kg					Argila dispersa em água g/kg	Grau de flocculação %	Relação silte/argila	Densidade g/cm <sup>3</sup>		Porosidade cm <sup>3</sup> /100cm <sup>3</sup>
Símbolo	Profundidade cm	Calhaus >20 mm	Cascalho 20-2 mm	Terra fina <2 mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila <0,002 mm	Solo				Partículas		
Ap	0-17	0	11	989	405	105	186	304	243	20	0,61				
BA	-33	0	7	993	354	97	124	425	0	100	0,29				
Bw1	-74	0	4	996	316	85	154	445	0	100	0,35				
Bw2	-150	0	7	993	368	89	98	445	0	100	0,22				
Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol <sub>c</sub> /kg								Valor V (sat, por bases) %	Saturação por alumínio %	P assimilável mg/kg		
	Água	KCl 1N	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S (soma)	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	Valor T (soma)					
Ap	5,2	4,1	0,7	0,9	0,08	0,01	1,7	0,5	4,4	6,6	26	23	1		
BA	5,1	4,1	0,3	0,9	0,03	0,01	1,2	0,7	2,8	4,7	26	37	1		
Bw1	5,1	4,2		0,9	0,02	0,01	0,9	0,4	2,7	4,0	22	31	2		
Bw2	5,0	4,1		0,7	0,02	0,01	0,7	0,6	3,0	4,3	16	46	1		
Horizonte	C (orgânico) g/kg	N g/kg	Relação C/N	Ataque sulfúrico g/kg						Relações moleculares			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> livre g/kg	Saturação por sódio %	
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ (Ki)	$\frac{SiO_2}{R_2O_3}$ (Kr)	$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$			
Ap	13,0	1,3	10											<1	
BA	6,8	0,8	8											<1	
Bw1	3,5	0,5	7	134	251	63	9,0			0,91	0,78	6,26		<1	
Bw2	4,6	0,6	8	126	243	63	8,5			0,88	0,76	6,06		<1	

### 8.1.8. NEOSSOLO FLÚVICO Tb Distrófico típico

#### Descrição Geral

**Perfil n°:** P19

**Data:** 16/10/10

**Classificação:** NEOSSOLO FLÚVICO Tb Distrófico típico, textura média/arenosa, A moderado, fase floresta tropical perenifólia de várzea, relevo plano.

**Localização:** Município de Cachoeiras de Macacu, RJ.

**Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil:** perfil descrito em barranco na beira de dreno.

**Altitude:** 34 metros.

**Litologia, formação geológica e cronologia:** Sedimentos do Quaternário.

**Material originário:** Sedimentos colúvio-aluvionares.

**Pedregosidade:** não pedregosa.

**Rochosidade:** não rochosa.

**Relevo local:** plano.

**Relevo regional:** ondulado.

**Erosão:** não aparente.

**Drenagem:** bem drenado.

**Vegetação primária:** floresta tropical perenifólia de várzea.

**Uso atual:** plantio de milho.

**Descrito e coletado por:** Osório Oscar Marques da Fonseca, Alexandre Muselli e Helena Saraiva Koenow Pinheiro.

#### Descrição Morfológica

- A 0-11 cm; bruno (10YR 4/3, úmida); franco-arenosa; fraca, pequena, granular; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- AC 11-23 cm; bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida); franco-arenosa; maciça; muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- C<sub>1</sub> 23-38 cm; bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida); franco-arenosa; maciça; muito friável, não plástica e não pegajosa; transição plana e gradual.
- C<sub>2</sub> 38-62 cm; bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida); franco-arenosa; maciça; muito friável, não plástica e não pegajosa; transição plana e gradual.
- C<sub>3</sub> 62-79 cm; bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida); areia-franca; maciça; muito friável, não plástica e não pegajosa; transição plana e abrupta.
- IIC 79-92 cm+; bruno-oliváceo-claro (2,5Y 5/4, úmida); areia; grão simples, não plástica e não pegajosa.
- Raízes: Muitas finas no A, comuns finas no AC e C<sub>1</sub>, poucas finas e raras médias no C<sub>2</sub>, raras finas no C<sub>3</sub> e IIC.
- Observações: - Coleta para densidade com anel comum de volume conhecido (2 volumes por horizonte) – A e C<sub>1</sub>.  
- Amostras de rotina coletadas dos 6 horizontes A, AC, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> e IIC.  
- Atividade biológica no perfil

## Dados Analíticos

Perfil n°: P19

Horizonte		Frações da amostra total g/kg			Composição granulométrica da terra fina g/kg					Argila dispersa em água g/kg	Grau de floculação %	Relação silte/argila	Densidade g/cm <sup>3</sup>		Porosidade cm <sup>3</sup> /100cm <sup>3</sup>
Símbolo	Profundidade cm	Calhaus >20 mm	Cascalho 20-2 mm	Terra fina <2 mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila <0,002 mm	Solo				Partículas		
A	0-11	0	0	1000	209	384	244	163	142	13	1,50				
AC	-23	0	1	999	221	392	225	162	101	38	1,39				
C1	-38	0	0	1000	221	433	204	142	0	100	1,44				
C2	-62	0	0	1000	263	395	200	142	20	86	1,41				
C3	-79	0	0	1000	411	381	127	81	60	26	1,57				
IIC	-92	0	0	1000	583	326	31	60	20	67	0,52				
Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol <sub>c</sub> /kg								Valor V (sat, por bases) %	Saturação por alumínio %	P assimilável mg/kg		
	Água	KCl 1N	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S (soma)	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	Valor T (soma)					
A	5,2	4,0	0,9	0,7	0,20	0,01	1,8	0,9	5,6	8,3	22	33	85		
AC	5,1	4,0		0,8	0,03	0,01	0,8	1,3	4,9	7,0	11	62	83		
C1	5,3	4,2		0,7	0,03	0,01	0,7	0,8	3,7	5,2	13	53	84		
C2	5,5	4,2	0,8	0,5	0,02	0,01	1,3	0,6	3,2	5,1	25	32	106		
C3	5,7	4,4		0,9	0,04	0,01	0,9	0,3	2,2	3,4	26	25	172		
IIC	5,7	4,3		0,9	0,03	0,01	0,9	0,3	1,8	3,0	30	25	107		
Horizonte	C (orgânico) g/kg	N g/kg	Relação C/N	Ataque sulfúrico g/kg						Relações moleculares			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> livre g/kg	Saturação por sódio %	
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	<u>SiO<sub>2</sub></u> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<u>SiO<sub>2</sub></u> R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
										(Ki)	(Kr)				
A	12,4	1,6	8										<1		
AC	9,1	1,4	6										<1		
C1	5,1	0,9	6										<1		
C2	4,5	0,8	6										<1		
C3	2,9	0,4	7										<1		
IIC	1,7	0,4	4										<1		

### 8.1.9. NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico

#### Descrição Geral

**Perfil n°:** AE35

**Número de campo:** 59

**Data:** 06/10/10

**Classificação:** NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico, textura média, A moderado, fase floresta tropical perenifólia, relevo forte ondulado.

**Localização:** Município de Guapimirim, RJ.

**Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil:** perfil coletado em terço médio/inferior de encosta com aproximadamente 40% declive, sob mata.

**Altitude:** 739 metros.

**Litologia, formação geológica e cronologia:** Gnaisses-graníticos da Unidade Santo Aleixo, pré-cambriano.

**Material originário:** produto de alteração das litologias supracitadas.

**Pedregosidade:** pedregosa.

**Rochosidade:** moderadamente rochosa.

**Relevo local:** forte ondulado.

**Relevo regional:** forte ondulado a escarpado.

**Erosão:** laminar moderada.

**Drenagem:** bem drenado.

**Vegetação primária:** floresta tropical perenifólia.

**Uso atual:** mata em estágio avançado de regeneração.

**Descrito e coletado por:** Nilson Rendeiro Pereira e Helena Saraiva Koenow Pinheiro.

#### Descrição Morfológica

A 0-15cm, bruno-escuro (7,5YR 3/3, úmida); franco-argilo-arenosa; fraca, pequena, granular, blocos subangulares; macia, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.

C 15-38cm, bruno-forte (7,5YR 5/6, úmida); franco-argilo-arenosa; fraca, média, blocos subangulares; macia, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

Raízes: Abundantes finas e poucas médias no A.

Observações: - Coleta para análise de rotina e para densidade com anel de Kopeck (2 volumes por horizonte) – A e C.

## Dados Analíticos

Perfil nº: AE35

Horizonte		Frações da amostra total g/kg			Composição granulométrica da terra fina g/kg				Argila dispersa em água g/kg	Grau de flocculação %	Relação silte/argila	Densidade g/cm <sup>3</sup>		Porosidade cm <sup>3</sup> /100cm <sup>3</sup>
Símbolo	Profundidade cm	Calhaus >20 mm	Cascalho 20-2 mm	Terra fina <2 mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2- 0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila <0,002 mm				Solo	Partículas	
A	0-15	0	24	976	423	151	202	224	81	64	0,90			
C	-38	0	42	958	424	171	161	244	0	100	0,66			
Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol/kg								Valor V (sat, por bases) %	Saturação por alumínio %	P assimilável mg/kg	
	Água	KCl 1N	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S (soma)	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	Valor T (soma)				
A	4,1	3,6	0,7		0,13	0,01	0,8	1,9	6,8	9,5	8	70	2	
C	4,4	3,9	0,6		0,03	0,01	0,6	1,3	3,0	4,9	12	68	2	
Horizonte	C (orgânico) g/kg	N g/kg	Relação C/N	Ataque sulfúrico g/kg						Relações moleculares			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> livre g/kg	Saturação por sódio %
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ (Ki)	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{R}_2\text{O}_3}$ (Kr)	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$		
A	18,4	2,0	9										<1	
C	5,5	0,8	7										<1	