

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**ATRIBUTOS DO TERRENO NA DIFERENCIAÇÃO E  
NO MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS**

**TESE DE DOUTORADO**

**Júlio Cesar Wincher Soares**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

# **ATRIBUTOS DO TERRENO NA DIFERENCIAÇÃO E NO MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS**

**Júlio Cesar Wincher Soares**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Silvicultura da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Florestal.**

**Orientador: Prof. Dalvan José Reinert.**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo autor.

Soares, Júlio Cesar Wicher

Atributos do terreno na diferenciação e no mapeamento digital de solos/ Júlio Cesar Wincher Soares - 2015

96 p.; 30 cm

Orientador: Dalvan José Reinert

Coorientadores: Rudiney Soares Pereira, José Miguel Reichert

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2015.

1. Geomorfologia 2. MDE de Alta resolução e Exatidão 3. Classes de Solos 4. Mineração de Dados 5. Levantamento de Solos I. Reinert, Dalvan José II. Pereira, Rudiney Soares III. Reichert, José Miguel. Título

---

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a Júlio Cesar Wincher Soares. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

---

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Tese de  
Doutorado

**ATRIBUTOS DO TERRENO NA DIFERENCIAÇÃO E NO  
MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS.**

elaborada por  
**Júlio Cesar Wincher Soares**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Doutor em Engenharia Florestal**

**Comissão Examinadora:**

**Dalvan José Reinert, PhD.**  
(Presidente/Orientador)

**Rudiney Soares Pereira, Dr. (UFSM)**

**Ândrea M. Pereira Franco, Dr. (UFSM)**

**Douglas Rodrigo Kaiser, Dr. (UFFS)**

**Eduardo Saldanha Vogelmann, Dr. (FURG)**

Santa Maria, 31 de Agosto de 2015.

À minha esposa e filho, que iluminam todos  
os meus dias...Dedico esta obra.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal e ao Departamento de Solos, que possibilitaram a realização do curso de doutorado.

Aos professores, Dalvan José Reinert, José Miguel Reichert, Jean Minella e Paulo Ivonir Gubiani pela orientação, dedicação, ensinamentos e amizade ao longo dos meus 6 anos como estudante e colaborador do grupo da física do solo.

Ao professor Douglas Rodrigo Kaiser, pela ajuda e colaboração junto ao grupo de pesquisa da Física do Solo da UFSM.

Ao professor Rudiney Soares Pereira, pela amizade e colaboração na área de Geomática.

Ao amigo e conselheiro Flávio Fontinelli, que sempre ajudou nos trabalhos de laboratório.

Agradeço, de maneira especial, aos bolsistas de iniciação científica.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Física do Solo, pela amizade, incentivo e pelos momentos de descontração.

À amiga e colega Ândrea Franco, pelas contribuições no mapeamento digital de solos.

Ao professor Fabrício Pedron, pelo companheirismo e ensinamentos.

Ao colega e amigo Gabriel Deobalde, pelo companheirismo e ajuda nos trabalhos de campo e laboratório.

Aos professores Juliana Prevedelo e Eduardo Vogelmann, pelo apoio e amizade incondicional.

Aos demais colegas do programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, pelo apoio, incentivo e auxílios prestados.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos colegas da URI Santiago, pelo apoio e coleguismo, em especial aos professores Claiton Ruviaro, Vanius Veiga, Attus Pereira Moreira, Ludmilla Ribeiro, Eduardo Ferreira, André Fiorin, Régis Simeão, Danie Martini Sanchotene, Victor Machado Alves, Luis Felipe Netto Lauer e Fernando Hoffmam.

A minha esposa e meu filho, que apesar da ausência sempre me apoiaram e incentivaram.

A todos, MUITO OBRIGADO!!!!

## **RESUMO**

Tese de Doutorado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal  
Universidade Federal de Santa Maria, RS.

### **ATRIBUTOS DO TERRENO NA DIFERENCIAÇÃO E NO MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS**

**AUTOR:** Júlio Cesar Wincher Soares

**ORIENTADOR:** Dalvan José Reinert

**Data e Local da Defesa:** Santa Maria, 31 de agosto de 2015.

Os atributos do terreno controlam muitos processos hidrológicos, geomorfológicos e pedológicos, influenciando a radiação solar, precipitação pluvial, o escoamento superficial, evapotranspiração, umidade do solo e a distribuição da vegetação. Dessa maneira, atributos do terreno foram extraídos de MDE's de alta resolução (0,5 m) e exatidão para explicar a diferenciação de solos da região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil; também, para avaliar a acurácia entre um MDS gerado e os mapas de solos obtidos pelo método tradicional de levantamento, utilizando o índice Kappa, a exatidão global, a exatidão do usuário e a exatidão do produtor. Foram estudados solos de quatro catenas representativas da paisagem da região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. Os atributos do terreno analisados pelas técnicas multivariadas apresentaram-se efetivos na diferenciação dos solos, principalmente a elevação, a declividade, o índice de umidade do terreno e o fator LS. A acurácia do MDS foi classificada como excelente. Os atributos do terreno declividade a montante, declividade, índice de umidade do terreno, elevação, fator LS e curvatura planar apresentaram elevado potencial preditivo, conferindo exatidão ao MDS gerado.

**Palavras-chave:** Geomorfologia, MDE de Alta resolução e Exatidão, Classes de Solos, Mineração de Dados, Levantamento de Solos.



## **ABSTRACT**

Doctoral Thesis

Graduate Program in Forest Engineering

Federal University of Santa Maria, Brazil

## **TERRAIN ATTRIBUTES ON DIFFERENTIATION AND DIGITAL MAPPING OF SOILS**

**AUTHOR:** Júlio Cesar Wincher Soares

**ADVISOR:** Dalvan José Reinert

Santa Maria, August 31 th, 2015.

Terrain attributes control many hydrological, geomorphological and pedological processes, these processes influence the solar radiation, rainfall, runoff, evapotranspiration, soil moisture and the distribution of vegetation. In this way, the terrain attributes were extracted from MDE's high resolution (0.5 m) and accuracy to explain the differentiation of the soils of northeast region in the Rio Grande do Sul State, Brazil; also, to assess the accuracy of an MDS generated and soil maps obtained by the traditional soil survey, using the Kappa index, the overall accuracy, the user accuracy and correctness of the producer. Four representative catenas soils were studied of the landscape of the northeast region in the Rio Grande do Sul State. Terrain attributes analyzed by multivariate techniques showed to be effective in the differentiation of the soil, especially elevation, slope, the moisture content of the soil and the LS factor. The accuracy of the MDS was classified as excellent. The attributes of slope upstream slope, moisture content of the soil, elevation, LS factor and plane curvature in the plane showed high predictive potential, providing accuracy to the generated MDS.

**Keywords:** Geomorphology, MDE High resolution and accuracy, Soil Classes, Data Mining, Soil Survey.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coleta de pontos com o receptor do GNSS modelo Hiper/RTK (Base e Rover) da Topcon, operado no modo Semi-cinemático (Stop & Go) no sistema geodésico SIRGAS 2000. ....	27
Figura 2 - Montagem da Estação Total na bordadura da floresta.....	28
Figura 3 - Extração de um monólito na catena 2.....	30
Figura 4 - Monólito de NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico extraído na catena 3. ....	31
Figura 5 - Perfil de ARGISSOLO AMARELO Eutrófico abrupção descrito na catena 4. ....	31
Figura 6 - Histograma altimétrico com os padrões geomorfológicos das diferentes catenas. 1: catena 1; 2: catena 2; 3: catena 3; e 4: catena 4.....	35
Figura 7 - Gráfico com os padrões de tendência nos dados altimétricos das diferentes catenas. 1: catena 1; 2: catena 2; 3: catena 3; e 4: catena 4. ....	36
Figura 8 - Mapas de variogramas dos dados altimétricos das diferentes catenas. 1: catena 1; 2: catena 2; 3: catena 3; e 4: catena 4. ....	37
Figura 9 - Semivariogramas experimentais dos dados altimétricos das diferentes catenas. 1: catena 1; 2: catena 2; 3: catena 3; e 4: catena 4.....	38
Figura 10 - Regressões lineares simples obtidas com validação cruzada e descrição dos parâmetros dos modelos ajustados aos “variogramas médios” (omnidirecionais) (modelo teórico, efeito pepita; patamar; alcance (m)). 1: catena 1; 2: catena 2; 3: catena 3; e 4: ca .	39
Figura 11 - Mapas temáticos dos atributos do terreno da catena 1 e suas estatísticas descritivas (n = 51.975). Datum horizontal SIRGAS 2.000.....	41
Figura 12 - Mapas temáticos dos atributos do terreno da catena 2 e suas estatísticas descritivas (n = 84.512). Datum horizontal SIRGAS 2.000.....	43
Figura 13 - Mapas temáticos dos atributos do terreno da catena 3 e suas estatísticas descritivas (n = 19.321). Datum horizontal SIRGAS 2.000.....	44
Figura 14 - Mapas temáticos dos atributos do terreno da catena 4 e suas estatísticas descritivas (n = 6.970). Datum horizontal SIRGAS 2.000.....	46
Figura 15 - Mapa de solos da catena 1. Projeção Universal Transversa de Mercator (Fuso 22 S); origem da quilometragem UTM Meridiano Central -51. Datum horizontal SIRGAS 2.000. ....	50
Figura 16 - Mapa de solos da catena 2. Projeção Univeral Transversa de Mercator (Fuso 22 S); origem da quilometragem UTM Meridiano Central -51. Datum horizontal SIRGAS 2.000. ....	52

Figura 17 - Mapa de Solos da catena 3. Projeção Universal Transversa de Mercator (Fuso 22 S); origem da quilometragem UTM Meridiano Central -51. Datum horizontal SIRGAS 2.000. ....	54
Figura 18 - Mapa de solos da catena 4. Projeção Universal Transversa de Mercator (Fuso 22 S); origem da quilometragem UTM Meridiano Central -51. Datum horizontal SIRGAS 2.000. ....	55
Figura 19 - MDS gerado utilizando seis atributos do terreno. PAC: ARGISSOLO ACINZENTADO; PA: ARGISSOLO AMARELO; PBAC: ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO; PV: ARGISSOLO VERMELHO; CX: CAMBISSOLO HÁPLICO; MX: CHERNOSSOLO HÁPLICO; RL: NEOSSOLO LITÓLICO; e RR: NEOSSOLO REGOLÍTICO .....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatísticas descritivas da altimetria para as quatro catenas.....	34
Tabela 2 - Distribuição das unidades de mapeamento por ordens de solos na catena .....	48
Tabela 3 - Legenda de identificação dos solos da catena 1 e suas respectivas áreas e proporções.....	49
Tabela 4 - Distribuição das unidades de mapeamento por ordens de solos na catena 2. ....	50
Tabela 5 - Legenda de identificação dos solos da catena 2 e suas respectivas áreas e proporções.....	51
Tabela 6 - Distribuição das unidades de mapeamento por ordens de solos na catena 3. ....	52
Tabela 7 - Legenda de identificação dos solos da Catena 3 e suas respectivas áreas e proporções.....	53
Tabela 8 - Distribuição das unidades de mapeamento por ordens de solos, legenda de identificação dos solos e suas respectivas áreas e proporções na catena 4.....	54
Tabela 9 - Atributos do terreno da catena 1 nos componentes principais (CP). ....	56
Tabela 10 - Atributos do terreno da catena 2 nos componentes principais (CP). ....	56
Tabela 11 - Atributos do terreno da catena 3 nos componentes principais (CP). ....	57
Tabela 12 - Atributos do terreno da catena 4 nos componentes principais (CP). ....	57

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Matriz de confusão e parâmetros que avaliam acurácia do MDS.....	61
---	----

## LISTA DE REDUÇÕES

AC	Área de Contribuição
ACP	Análise de Componentes Principais
AD	Árvores de Decisão
C.perf	Curvatura do Perfil
C.plan	Curvatura Planar
CTS	Capacidade de Transporte de Sedimentos
CX	CAMBISSOLO HÁPLICO
CXVd	CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico
EG	Exatidão Global
EP	Exatidão do Produtor
EU	Exatidão do Usuário
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite
IUT	Índice de Umidade Topográfica
LS	Fator Topográfico
MDE	Modelos Digitais de Elevação
MDS	Mapeamento Digital do Solo
MX	CHERNOSSOLO HÁPLICO
MXo	CHERNOSSOLO HÁPLICO Órtico típico
PA	ARGISSOLO AMARELO
PAC	ARGISSOLO ACINZENTADO
PACe	ARGISSOLO ACINZENTADO Eutrófico abrupto
PAe	ARGISSOLO AMARELO Eutrófico abrupto
PBAC	ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO
PBACd	ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO Distrófico abrupto
PV	ARGISSOLO VERMELHO
PVal	ARGISSOLO VERMELHO Alítico abrupto
PVd	ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abrupto
PVe	ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico abrupto
RL	NEOSSOLO LITÓLICO
RLe	NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico fragmentário
RNA	Redes Neurais Artificiais
RR	NEOSSOLO REGOLÍTICO
RRe	NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico
RTK	Posicionamento Cinemático em Tempo Real
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SOC	Estoques de carbono

## LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A - Dendrograma hierárquico de 157 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 1. 1: NEOSSOLO LITÓLICO; 2: NEOSSOLO REGOLÍTICO; 3: CAMBISSOLO HÁPLICO; 4: ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO.....	69
Apêndice B - Dendrograma hierárquico de 171 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 2. 1: ARGISSOLO VERMELHO; 2: CAMBISSOLO HÁPLICO; 3: ARGISSOLO ACINZENTADO.....	73
Apêndice C - Dendrograma hierárquico de 174 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 3. 1: ARGISSOLO VERMELHO; 2: NEOSSOLO REGOLÍTICO; 3: ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO.....	78
Apêndice D - Dendrograma hierárquico de 91 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 4. 1: CHERNOSSOLO HÁPLICO; 2: CAMBISSOLO HÁPLICO; 3: ARGISSOLO AMARELO.....	83
Apêndice E - Perfil de NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico fragmentário descrito na catena 1.....	86
Apêndice F - Monólito de NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico extraído na catena 1.....	87
Apêndice G - Perfil de CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico léptico descrito na catena 1.....	88
Apêndice H - Perfil de ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO Distrófico abrupático descrito na catena 1.....	89
Apêndice I - Perfil de ARGISSOLO VERMELHO Alítico abrupático descrito na catena 2.....	90
Apêndice J - Monólito de ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico abrupático extraído na catena 2.....	91
Apêndice K - Perfil de CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico léptico descrito na catena 2.....	92
Apêndice L - Perfil de ARGISSOLO ACINZENTADO Eutrófico abrupático descrito na catena 2.....	93
Apêndice M - Perfil de ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abrupático descrito na catena 3.....	94
Apêndice N - Perfil de ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO Distrófico abrupático descrito na catena 3.....	95
Apêndice O - Perfil de CHERNOSSOLO HÁPLICO Órtico típico descrito na catena 4. ....	96

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 HIPÓTESES .....	19
3 OBJETIVOS.....	20
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
5.1 Localização e descrição da área de estudo .....	26
5.2 Seleção das áreas .....	26
5.3 Geomorfologia e mapeamento de solos.....	27
5.3.1 Obtenção do MDE .....	27
5.3.2 Obtenção dos atributos do terreno .....	28
5.3.2.1 Obtenção dos atributos primários do terreno.....	28
5.3.2.2 Obtenção dos atributos secundários do terreno .....	29
5.3.3 Levantamento tradicional de solos.....	30
5.3.3.1 Coleta de solos .....	30
5.3.3.2 Análises físicas e químicas de amostras de solos.....	32
5.3.3.3 Classificação de solos.....	32
5.4 Análises estatísticas .....	33
5.5 Mineração de dados e obtenção do MDS .....	33
5.6 Acurácia do MDS predito .....	33
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
6.1 Geomorfologia .....	34
6.2 Levantamento tradicional de solos.....	48
6.3 Atributos do terreno na diferenciação das subordens de solos .....	55
6.4 Mapeamento digital de solos.....	59
7 CONCLUSÕES.....	63
8 LITERATURA CITADA.....	64
Apêndices.....	69



# 1 INTRODUÇÃO

Promover o reconhecimento do espaço físico é um subsídio imprescindível para as ações de planejamento e gestão territorial. É crescente a demanda por dados de levantamento de solos para os setores de produção agropecuária, de gestão ambiental e dos centros de pesquisa sobre mudanças climáticas (HARTEMINK; MCBRATNEY, 2008). Porém, o método tradicional de levantamento de solos tem se mostrado caro e demorado (MCBRATNEY et al., 2003).

São inúmeros os esforços para superar essas limitações, sendo que o Mapeamento Digital de Solos (MDS) tem contribuído para a disponibilização de informações espaciais de solos, através de dados obtidos no campo e no laboratório, além de inferências realizadas com base nos fatores de formação do solo e covariáveis ambientais (LAGACHERIE et al., 2007).

Conforme Behrens et al. (2005), dentre os novos métodos e estratégias desenvolvidos para a obtenção de informações de solos, destacam-se os métodos de mineração de dados como as Redes Neurais Artificiais (RNA), as Árvores de Decisão (AD) e as Árvores de Classificação, os quais fornecem soluções que auxiliam na extração automática de informações a partir de um conjunto de dados existentes.

As árvores de decisão tem a finalidade de classificar e predizer casos desconhecidas com base em casos já conhecidos, ou seja, para o seu desenvolvimento é utilizado um conjunto de treinamento formado por entradas e saídas/classes. Os trabalhos de Zhou et al. (2004), Hansen et al. (2009), Silva et al. (2013) e Franco et al. (2015) demonstraram boa aplicabilidade dessa técnica de mineração de dados no MDS.

Dentre as covariáveis ambientais utilizadas no MDS, destacam-se os atributos que estão relacionados com o terreno. Estes atributos são extraídos de modelos digitais de elevação (MDE) e conforme a sua ordem de processamento, são classificados em primários e secundários. Conforme Wilson e Gallant (2000), a elevação, o declive, o aspecto, a curvatura do plano e do perfil, e a área de contribuição são os atributos primários. Os atributos secundários são calculados a partir de dois ou mais atributos primários e sua importância está atrelada a aptidão de identificar um padrão em função de processos.

Para a predição adequada dos solos, partindo de mapas pedológicos preexistentes é necessária a reconstrução do modelo da relação solo-paisagem utilizado na sua concepção e a utilização de dados e informações espaciais de boa qualidade. Desta maneira, a utilização de covariáveis ambientais extraídas de um MDE com alta resolução, apresenta grande potencial para a obtenção de predições de solos com alta resolução e exatidão.

## **2 HIPÓTESES**

H1: A distribuição espacial dos atributos do terreno influencia na variabilidade das propriedades dos solos e, por consequência, na classificação dos solos.

H2: Atributos do terreno extraídos de MDE's de alta resolução auxiliam na obtenção de MDS com elevada resolução e exatidão.

### **3 OBJETIVOS**

- Testar o potencial da tecnologia GNSS RTK na produção de MDE's de elevada resolução e exatidão.
- Avaliar a influência dos atributos do terreno na diferenciação de solos.
- Avaliar a acurácia entre o MDS gerado e os mapas de solos obtidos pelo método tradicional, utilizando o índice Kappa, a exatidão global, a exatidão do usuário e a exatidão do produtor.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Considerando o tempo geológico, o solo é um recurso natural não renovável, constituindo um componente fundamental dos ecossistemas e dos ciclos naturais. Ao longo dos anos, várias civilizações se desenvolveram, não evoluíram e, até mesmo, em função do uso inadequado do solo, declinaram no seu desenvolvimento.

No ano de 1886 Dokuchaev propôs que o “solo” deveria ser empregado como um termo técnico, posteriormente, sugeriu que o solo não era um simples amontoado de materiais geológicos, mas um corpo único produzido pelas ações conjuntas dos organismos, do clima, do relevo e da geologia ao longo do tempo (BUOL et al., 2011).

Conforme o Soil Survey Staff (1951), os solos são corpos naturais, que ocupam porções na superfície terrestre, suportam plantas, as edificações do homem e apresentam propriedades resultantes da atuação integrada do clima e dos organismos, atuando sobre o material de origem, condicionado pelo relevo, durante um período de tempo.

Em 1941 Hans Jenny concluiu que os fatores de formação não são forças ou causas, mas variáveis independentes descreveu que o solo é função do clima, dos organismos e do relevo agindo sobre o material de origem durante um determinado período de tempo (JENNY, 1941).

Para a Embrapa (2013), o solo que classificamos é uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por matérias minerais e orgânicos que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta. Quando examinados a partir da superfície, consistem de secções aproximadamente paralelas, organizadas em camadas e/ou horizontes que se distinguem do material de origem inicial, como resultados de adições, perdas, translocações e transformações de energia e matéria, que ocorrem ao longo do tempo e sob a influência dos fatores clima, organismo e relevo. Os horizontes refletem os processos de formação do solo a partir do intemperismo do substrato rochoso ou de sedimentos de natureza diversa. As camadas, por sua vez, são pouco ou nada afetadas pelos processos pedogenéticos, mantendo, em maior ou menor proporção, as características do material de origem.

A classificação taxonômica de um solo é determinada pela interpretação de características morfológicas e propriedades físicas, químicas e mineralógicas descritas em campo e analisadas em laboratório, respectivamente (EMBRAPA, 2013).

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) é o sistema taxonômico oficial de classificação de solos do Brasil. É uma prioridade nacional compartilhada com várias instituições de ensino e pesquisa do País desde as primeiras tentativas de organização, a partir da década de 1970, com base em aproximação sucessivas, buscando definir um sistema hierárquico, multicategórico e aberto, que permita a inclusão de novas classes e que torne possível a classificação de todos os solos existentes no território nacional. Em sua terceira edição, o sistema apresenta 13 classes no primeiro categórico (EMBRAPA, 2013).

Os levantamentos tradicionais de solos vêm sofrendo algumas críticas por serem muito qualitativos. Em contraponto a essas críticas, vários modelos quantitativos foram desenvolvidos nos últimos 30 anos para a descrição, classificação e estudo dos padrões de distribuição espacial do solo de maneira mais objetiva (McBRATNEY et al., 2000).

Nesses estudos, a relação dos fatores de formação do solo é amplamente utilizada na predição de solos. A Pedometria do Solo, termo utilizado pela *International Union of Soil Sciences* (MCBRATNEY et al., 2003) é um ramo inovador que tem apresentado bons resultados para a predição espacial e mapeamento digital de solos (MDS) (classes e atributos).

Para Webster (1994), o termo Pedometria do Solo descreve o modo quantitativo, o qual tem sido incorporado à Ciência do Solo por meio dos métodos matemáticos e estatísticos aplicados ao solo ou ao pedon, que corresponde à parte da Ciência do Solo que denominamos de Pedologia; ou seja, a Pedometria trata de Pedologia quantitativa ou de métodos quantitativos aplicados à Pedologia.

De acordo com Lagacherie et al. (2007), a predição e o MDS são conceituados como: “a criação e a população de sistemas de informação espacial de solos por meio de modelos numéricos para inferir as variações espaciais e temporais de classes de solo e suas propriedades, a partir de observações, conhecimento e de dados de variáveis ambientais relacionados”.

Em função do incremento das preocupações ambientais, os mapeamentos de solos tem tido um foco em modelagem quantitativa com o acompanhamento de

questões envolvendo acurácia e incertezas (MCBRATNEY et al., 2000). Dentre os estudos necessários para o desenvolvimento de programas de Gestão Conservacionista da Paisagem, estão à classificação dos solos e a descrição da dinâmica dos estoques de carbono (SOC) num bioma ou região agro-ecológica (BATJES, 1999).

A lógica da predição das classes e de atributos do solo no MDS é baseada na função de formação do solo proposta por Jenny (1941), posteriormente generalizada por McBratney et al. (2003) que assumiram como objetivo explicar as variáveis responsáveis pelos processos de formação dos solos para uma descrição quantitativa empírica das relações entre e outros fatores espaciais referenciados (ou co-variáveis ambientais) com a formulação do modelo *s.c.o.r.p.a.n*, o qual é definido como:

$$S = f(s.c.o.r.p.a.n)$$

Em que: *S* = classe ou atributo do solo *s* = solo, outras propriedades do solo em um determinado ponto; *c* = clima, propriedades climáticas do ambiente em determinado ponto; *o* = organismos, vegetação ou fauna ou atividades antrópicas; *r* = topografia, atributos da paisagem; *p* = material originário, litologia; *a* = idade, fator de tempo; *n* = espaço, localização espacial.

Conforme Zhu et al. (1997), nos modelos automatizados de mapeamento, a decisão de quais variáveis ambientais que serão escolhidas se dá a partir do conhecimento de um pedólogo experiente da região. Porém, o fator de formação do solo mais utilizado na predição de solos é o relevo, e ainda há uma lacuna no MDS nacional quando a inserção de informações sobre o relevo de alta resolução (ten CATEN, 2012). A importância do relevo se dá em função que, a geomorfologia influencia a conformação dos horizontes e atributos dos solos (MOORE et al., 1993), tendo também influência sobre os processos erosivos e na dinâmica dos sedimentos na escala de bacia (MOORE et al., 1991). Uma vez que as feições do relevo condicionam os fluxos de água, sedimentos e solutos na paisagem.

A utilização de atributos do terreno apresenta grande potencial para a diferenciação e predição de propriedades e de unidades de solos. Esses atributos são obtidos do Modelo Digital de Elevação (MDE), o qual é a representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre. Conforme a ordem de derivação os

atributos do terreno são classificados como primários (primeira derivada) e secundários (segunda derivada) (MOORE et al., 1993; WILSON; GALLANT, 2000).

Um modelo ambiental, em linhas gerais, é concebido para simular uma abstração da realidade, tornando-se assim, uma importante ferramenta para a descrição de processos que ocorrem na paisagem. Desta maneira, a modelagem matemática é empregada no estudo da dinâmica dos recursos naturais, contribuindo para o entendimento das alterações na paisagem, além de prever cenários futuros para os ecossistemas.

Na natureza, a ocorrência dos processos é complexa e ocorre em três dimensões no tempo. Derivando-se assim, comportamentos não lineares e componentes estocásticos sobre multi-escalas temporais e espaciais, havendo um entendimento qualitativo do processo particular. Porém, o entendimento quantitativo desse processo pode ser limitado e a probabilidade de se expressar processos físicos como um conjunto de submodelos matemáticos pode não existir, ou esses submodelos podem ser muito complexos, exigindo simplificações para o uso (MAIDMENT, 1993).

Em linhas gerais, a comunidade científica classifica os modelos ambientais conforme as variáveis de entrada (*input*) em estocásticos ou determinísticos, quanto à relação entre essas variáveis há a classificação em modelos empíricos ou conceituais. Há também, a classificação quanto à dependência espacial e temporalidade, sendo esses modelos pontuais ou distribuídos, estáticos ou dinâmicos, respectivamente (MAIDMENT, 1993; VERTESSY et al., 1993).

Um modelo é considerado estocástico quando baseado em equações matemáticas que contemplam probabilidades oriundas de uma amostra de uma população existente. Assim, não há um controle dos fatores que provocam variações nas taxas vitais do processo, resultando em valores preditos conforme a distribuição probabilística. Em contraponto, um modelo que apresenta entrada de variáveis não aleatórias e algumas aleatórias, tendo saídas independentes das probabilidades é classificado como determinístico.

Um modelo empírico é concebido para a identificação de relações estatísticas entre variáveis de interesse de um conjunto de dados. Já o modelo conceitual tem concepção baseada nos conceitos físicos do processo.

Quanto à dependência espacial e temporalidade, um modelo que não contempla a variabilidade espacial dos parâmetros e das variáveis do sistema é



classificado como pontual. Ao contrário de modelos distribuídos, que contemplam a dependência espacial dos parâmetros de entrada em *layers* gerados por algoritmos de análise espacial, que na maioria das vezes resultam num *Raster* com a distribuição espacial da variável na paisagem. Quanto à temporalidade, um modelo é dinâmico quando as variáveis que definem o sistema estão atreladas ao tempo, caso contrário o modelo é pontual.

Atualmente, estão sendo utilizados diferentes métodos de modelagem no MDS, como modelos logísticos com aplicação de componentes principais (ten CATEN et al., 2009), regressões logísticas múltiplas (GIASSON et al., 2006), mineração de dados como as redes neurais artificiais (RNA) (SIRTOLI, 2008), árvores de decisão (AD) e árvores de classificação (BEHRENS et al., 2005; BEHRENS et al., 2007; FRANCO et al., 2015).

Comparando diferentes algoritmos computacionais Qi e Zhu (2003), concluíram que as árvores de decisão (AD) apresentam elevada capacidade preditiva de propriedades e de classes de solos. Apesar disso, para o trabalho adequado com árvores de decisão, alguns procedimentos metodológicos ainda precisam ser definidos. Dentre eles, McBratney et al. (2003), salientam a intensidade amostral de pontos nos planos de informação de co-variáveis ambientais e nos planos de informação de referência, onde são extraídas informações sobre a distribuição dos solos e, também, são realizados treinamentos dos modelos preditivos. Outro aspecto importante é a utilização de planos de informação de co-variáveis ambientais com alta resolução (ten CATEN, 2012).

## **5 MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.1 Localização e descrição da área de estudo**

O trabalho foi conduzido em quatro catenas de solos da Bacia Experimental de Arvorezinha, localizada no município de Arvorezinha, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil (-28 ° 49 ' 30 " S e -52 ° 12 ' 15 " O).

De acordo com a classificação de Köppen, o clima regional é do tipo Cfb, subtropical úmido com verões quentes, inverno com geadas frequentes e precipitação média anual de 1600 mm, bem distribuída durante o ano (MORENO, 1961). A vegetação regional encontra-se sob o domínio da Floresta Ombrófila Mista (LEITE, 2002). Na composição do uso do solo e cobertura vegetal da bacia, predomina a cultura do fumo (MINELLA et al., 2009).

Conforme o Mapa Temático da Litologia do Estado do Rio Grande do Sul (1:750.000) a geologia é composta pela formação Serra Geral, com o predomínio da Fácies Caxias. O relevo por sua vez, apresenta feições de suave ondulado a montanhoso (UZEIKA et al., 2012).

Os componentes da paisagem supracitados contribuem para a formação de diferentes classes de solos, que numa escala de desenvolvimento vão de Neossolos Litólicos, passando por Neossolos Regolíticos, Cambissolos Háplicos até Argissolos Vermelhos (STRECK, 2001).

### **5.2 Seleção das áreas**

Partindo da hipótese de que a conformação dos atributos de terreno condiciona o desenvolvimento do solo, foram escolhidas quatro catenas representativas do mosaico que compõem a paisagem regional.

Com solos desenvolvidos sobre o mesmo material de origem (riólito) e topografia semelhante foram selecionadas duas áreas agrícolas, uma sob o cultivo convencional (catena 1) e outra com o cultivo mínimo (catena 2). A terceira área é destinada a silvicultura de eucalipto, após a exaustão da capacidade de produção agrícola (catena 3). A quarta área está inserida num fragmento da Floresta Ombrófila Mista em estágio avançado de regeneração (catena 4).

### 5.3 Geomorfologia e mapeamento de solos

#### 5.3.1 Obtenção do MDE

O Modelo Digital de Elevação (MDE) e os atributos do relevo foram elaborados com o uso de algoritmos e comandos específicos do Sistema de Informações Geográficas (SIG) SAGA (SAGA GIS, 2010).

Com resolução espacial de 0,5 m, o MDE teve como fonte de dados geodésicos 381 pontos coletados (latitude, longitude e elevação) com o receptor do GNSS modelo Hiper/RTK (Base e Rover) da Topcon (Colégio Politécnico da UFSM), operado no modo Semi-cinemático (Stop & Go) no sistema geodésico SIRGAS 2000 (Figura 1). Para os sítios onde houve a inexistência do ângulo de rastreamento dos sinais de satélites, a obtenção dos dados se deu com a Estação Total (Figura 2). A extração das curvas de contorno do relevo foi realizada com a krigagem universal desses pontos, conforme Ferreira (2013).



Figura 1 - Coleta de pontos com o receptor do GNSS modelo Hiper/RTK (Base e Rover) da Topcon, operado no modo Semi-cinemático (Stop & Go) no sistema geodésico SIRGAS 2000.

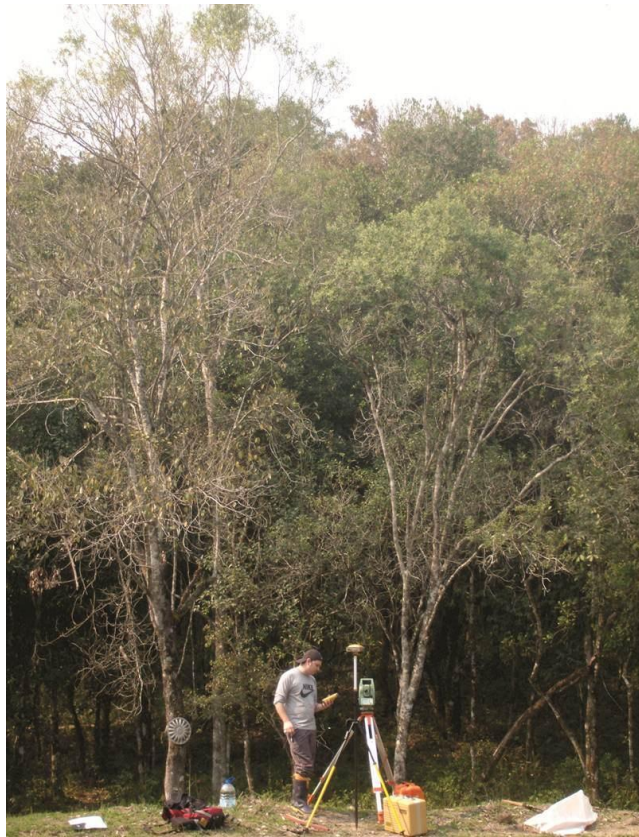


Figura 2 - Montagem da Estação Total na bordadura da floresta.

### 5.3.2 Obtenção dos atributos do terreno

Foram extraídos do MDE os atributos do terreno: elevação, declividade, aspecto, curvatura planar (C.plan), curvatura do perfil (C.perf) e área de contribuição (AC), fator topográfico (LS), índice de umidade topográfica (IUT) e a capacidade de transporte de sedimentos (CTS). A escolha desses atributos para a caracterização geomorfológica foi baseada nos trabalhos de Moore et al. (1993), Wilson e Gallant (2000), e Dlugosz (2011). Para o MDS foi inserido o atributo declividade a montante.

#### 5.3.2.1 Obtenção dos atributos primários do terreno

- a) Elevação (m): Foi extraído diretamente do modelo digital de elevação (MDE).
- b) Declividade, Declividade a Montante e Aspecto (graus): A derivação da superfície resultou num vetor com duas componentes a declividade e o aspecto.

Sendo que para a determinação da declividade a montante é considerada a declividade média de uma área a montante de um ponto específico.

c) Curvatura de Perfil ( $m^{-1}$ ): O atributo foi extraído com o cálculo da primeira derivada da declividade.

d) Curvatura Planar ( $m^{-1}$ ): O atributo foi extraído com o cálculo da primeira derivada do aspecto.

e) Área de Contribuição ( $m^2$ ): Foi determinado utilizando algoritmos de direção de múltiplo fluxo, os quais consideram que o fluxo entre as células não é unidirecional. Desta maneira, uma célula do arquivo matricial pode receber o fluxo de diferentes células e transferir o mesmo para diferentes células.

### 5.3.2.2 Obtenção dos atributos secundários do terreno

f) Fator LS (adimensional): Atributo análogo ao fator topográfico da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) calculado através da seguinte equação:

$$LS = (n + 1) \cdot \left(\frac{AC}{22,13}\right)^n \cdot \left(\frac{\text{sen}\beta}{0,896}\right)^m \quad (1)$$

Onde AC refere-se a área de contribuição ( $m^2$ ),  $\beta$  é a declividade (graus),  $n = 0,4$  e  $m = 1,3$ .

g) Índice de Umidade Topográfica (adimensional): Atributo adquirido através da seguinte equação:

$$IUT = \ln\left(\frac{AC}{\tan.\beta}\right) \quad (2)$$

h) Capacidade de Transporte de Sedimentos (CTS): Atributo obtido através da seguinte equação:

$$CTS = AC \times \tan(\beta) \quad (3)$$

### 5.3.3 Levantamento tradicional de solos

#### 5.3.3.1 Coleta de solos

O levantamento tradicional de solos envolveu pesquisas de gabinete, campo e laboratório, compreendendo o registro de observações, análises e interpretações de aspectos do meio físico e de características morfológicas, físicas, e químicas dos solos, visando à sua caracterização, classificação e cartografia. Tendo em vista os objetivos do presente trabalho, optou-se pela realização do mapeamento ultradetalhado dos solos.

Primeiramente foi realizada a conferência de campo, através de transecções nas catenas predefinidas na paisagem, foram realizadas 108 prospecções através da extração de 93 monólitos (Figuras 3 e 4) e descrição de 15 perfis modais (Figura 5).



Figura 3 - Extração de um monólito na catena 2.



Figura 4 - Monólito de NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico extraído na catena 3.



Figura 5 - Perfil de ARGISSOLO AMARELO Eutrófico abrupto descrito na catena 4.

A descrição completa dos perfis de solos foi realizada conforme IBGE (2007) e Santos et al. (2013), incluiu a delimitação dos horizontes e camadas com

identificação e registro das características morfológicas de cada um (a), caracterizando a transição entre horizontes ou camadas, profundidade e espessura, cor, textura, estrutura, consistência e demais características. Após a descrição procede-se a coleta de amostras.

### **5.3.3.2 Análises físicas e químicas de amostras de solos**

No laboratório, as amostras foram secas ao ar e peneiradas com malha de 2 mm (TFSA), raízes e outras partículas de matéria orgânica não decomposta reconhecíveis foram removidas.

A análise granulométrica foi realizada conforme Embrapa (1997). As análises químicas do pH do solo em água ( $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ), teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  seguiram os métodos propostos por Donagema et al. (2011). A partir dos dados analíticos foram calculadas a  $\text{CTC}_{\text{pH}7,0}$ ,  $\text{Al}\%$ ; e  $\text{V}\%$ . A determinação de carbono orgânico total (COT) do solo foi realizada por via seca no Auto Analisador Flash EA 112 series.

### **5.3.3.3 Classificação de solos**

As unidades taxonômicas foram estabelecidas para as diferentes catenas, através da interpretação dos dados analíticos e morfológicos de perfis representativos da menor unidade tridimensional de solo (pedon), a classificação seguiu o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2013).

Os mapas detalhados de classificação dos solos foram elaborados na escala 1:500 e 1:300, com a vetorização das classes de solos ao nível de grupos no software SAGA (SAGA GIS, 2010). As extrapolações das unidades taxonômicas foram realizadas considerando as curvas de contorno e elementos de referência previamente mapeados conforme Flores et al. (2012).

Após a produção das informações descritas anteriormente foi criada uma base de dados, implementada numa planilha do Microsoft Excel®, com um conjunto de características qualitativas e quantitativas descritivas dos perfis de solo; uso do solo e cobertura vegetal; geomorfologia; e localização sobre a superfície terrestre (Projeção UTM, SIRGAS 2000). Todos esses dados foram incorporados ao banco de dados geográficos, com o auxílio do software SAGA (SAGA GIS, 2010).



## 5.4 Análises estatísticas

Os dados quantitativos foram analisados através de cálculos da estatística descritiva, obtendo-se valores máximo, mínimo, média, desvio padrão, variância, assimetria e curtose. As mesmas informações foram submetidas ao teste de Kolmogorov-Smirnov, com nível 95% de confiança para constatação da distribuição normal. Já as análises multivariadas foram realizadas por meio de componentes principais (ACP) e de agrupamentos hierárquicos (cluster).

## 5.5 Mineração de dados e obtenção do MDS

A árvore de decisão foi gerada no programa Weka 3.7, utilizando o algoritmo J48 (HALL et al., 2009). A AD foi gerada para os seis atributos do terreno com maior poder preditivo. Entre as configurações internas para da AD foi especificado o número mínimo de objetos (*minNumObj*) por folha igual a dois e selecionada a opção verdadeira para a poda da árvore (*reducedErrorPruning=True*), que é necessária para diminuir a extensão e complexidade da mesma.

A conversão da AD para o entendimento no Sistema de Informações Geográficas (SIG) foi realizada no software ADtoSIG (RUIZ et al., 2012). O arquivo de saída do ADtoSIG gera o MDS. No software Quantum GIS 1.8.0, utilizou-se a ferramenta *Accuracy Assesment* para gerar a matriz de confusão, oriunda da relação entre o MDS de treinamento e o de validação. Os mapas de validação utilizados como referência foram os mapas obtidos pelo levantamento de solos convencional das diferentes catenas.

## 5.6 Acurácia do MDS predito

A partir da matriz de confusão com um total de 587 amostras de atributos do terreno identificadas nos mapas de referência foi possível obter a acurácia do MDS gerado através da análise de concordância entre o MDS de treinamento e o MDS de validação, utilizando o índice kappa, exatidão global, exatidão do produtor e exatidão do usuário (CONGALTON; GREEN, 2008). O índice Kappa pode ser classificado de acordo com Landis e Koch (1977):  $k \leq 0,2$ : ruim;  $0,2 < k \leq 0,4$ : razoável;  $0,4 < k \leq 0,6$ : bom;  $0,6 < k \leq 0,8$ : muito bom e  $k \geq 0,8$ : excelente.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Geomorfologia

Os valores de desvio padrão ( $\sigma$ ) da altimetria variam de 3,13 a 7,89 m (Tabela 1), e esses valores são considerados baixos. Comparando os coeficientes de variação (Tabela 1), com os limites propostos por Warrick e Nielsen (1980), pode-se observar a baixa variabilidade dos dados altimétricos ( $CV\% < 12\%$ ).

Os coeficientes de assimetria e curtose são apresentados para a comparação com a distribuição normal; assim, apenas a catena 4 apresenta coeficientes que indicam a distribuição normal, fato confirmado pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) a 5% de significância (Tabela 1). O uso dos coeficientes de assimetria e curtose, e o teste K-S são importantes para uma possível transformação de dados, não sendo o objetivo deste trabalho.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas da altimetria para as quatro catenas.

Catena*	Observações Geodésicas	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Assimetria	Curtose	K-S	Sig
1	99	633,010	660,206	643,152	7,89	1,23	0,79	-0,71	1,84	0,002
2	163	709,967	722,863	715,238	3,69	0,52	0,55	-1,07	2,18	0,000
3	71	674,048	687,949	680,347	4,46	0,66	0,27	-1,57	1,43	0,034
4	48	705,002	714,980	710,014	3,13	0,44	-0,24	-1,14	0,98	0,290

\*: 1 - Catena com plantio convencional; 2 - Catena com cultivo mínimo; 3 - Catena com silvicultura de eucalipto; e 4 - Catena com Floresta Ombrófila Mista. CV (%): Coeficiente de variação. K-S: Kolmogorov-Smirnov para 5% de significância. Sig: Significância.

Os histogramas de frequência da altimetria revelam a ocorrência de zonas com homogeneidade de processos geomorfológicos, os quais contribuem para a ocorrência de zonas com o desprendimento de material, desprendimento e transporte de material e deposição de material em vertentes curtas e vales encaixados (Figura 6).

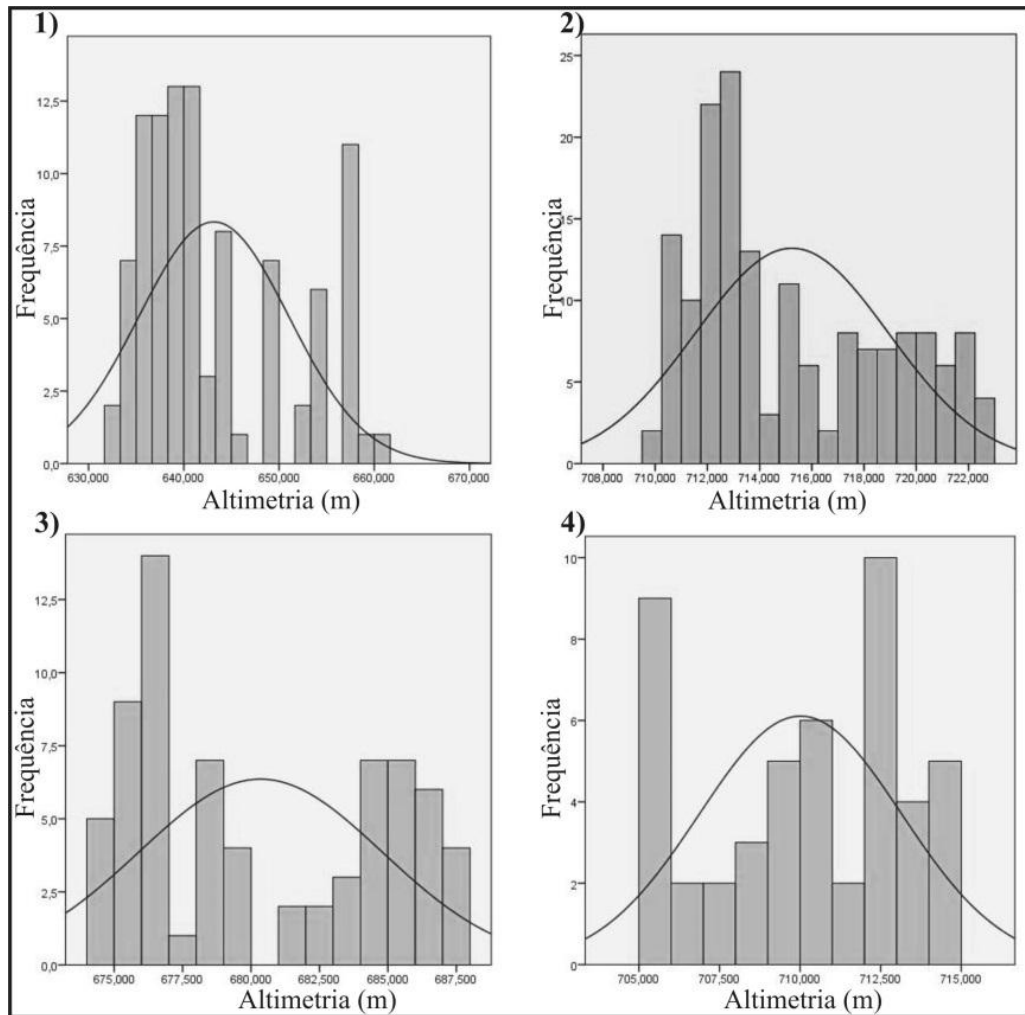


Figura 6 - Histograma altimétrico com os padrões geomorfológicos das diferentes catenas. 1: catena 1; 2: catena 2; 3: catena 3; e 4: catena 4.

A visualização das superfícies resultantes indica a presença de tendência nos dados altimétricos. As catenas 1, 2 e 3 apresentam tendência de terceira ordem, e a catena 4 apresenta tendência de segunda ordem (Figura 7). A observação de tendência nos dados altimétricos está de acordo com a realidade, pois se trata de porções da paisagem com inclinação proeminente.

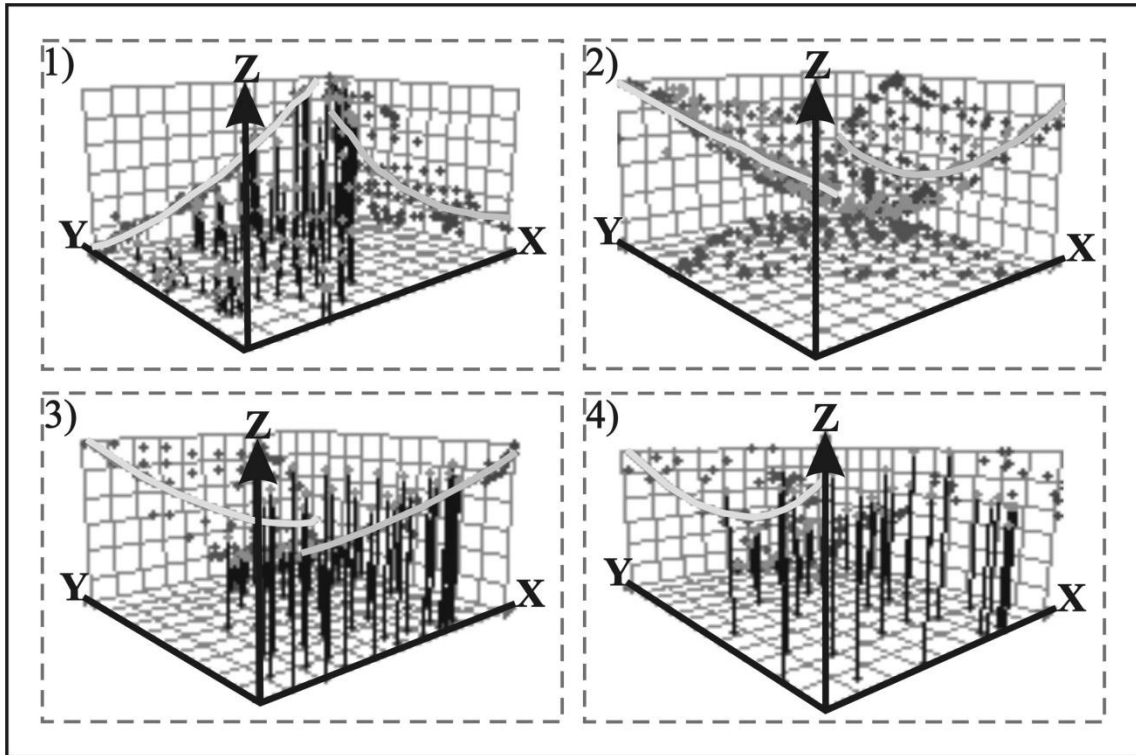


Figura 7 - Gráfico com os padrões de tendência nos dados altimétricos das diferentes catenas. 1: catena 1; 2: catena 2; 3: catena 3; e 4: catena 4.

Assim, para prosseguir com a análise geoestatística optou-se pelo ajuste de polinômios para a remoção da tendência e trabalhou-se com os resíduos, aplicando a krigagem universal ou “krigagem para um modelo com tendência” conforme indica o trabalho de Clark e Harper (2000).

Os mapas de variogramas, construídos para verificar experimentalmente a ocorrência de isotropia ou anisotropia possuem ajustes na forma elipsoidal. Logo, há variação do grau de continuidade em função da direção, ou seja, há presença de anisotropia nos dados altimétricos das diferentes catenas (Figura 8).

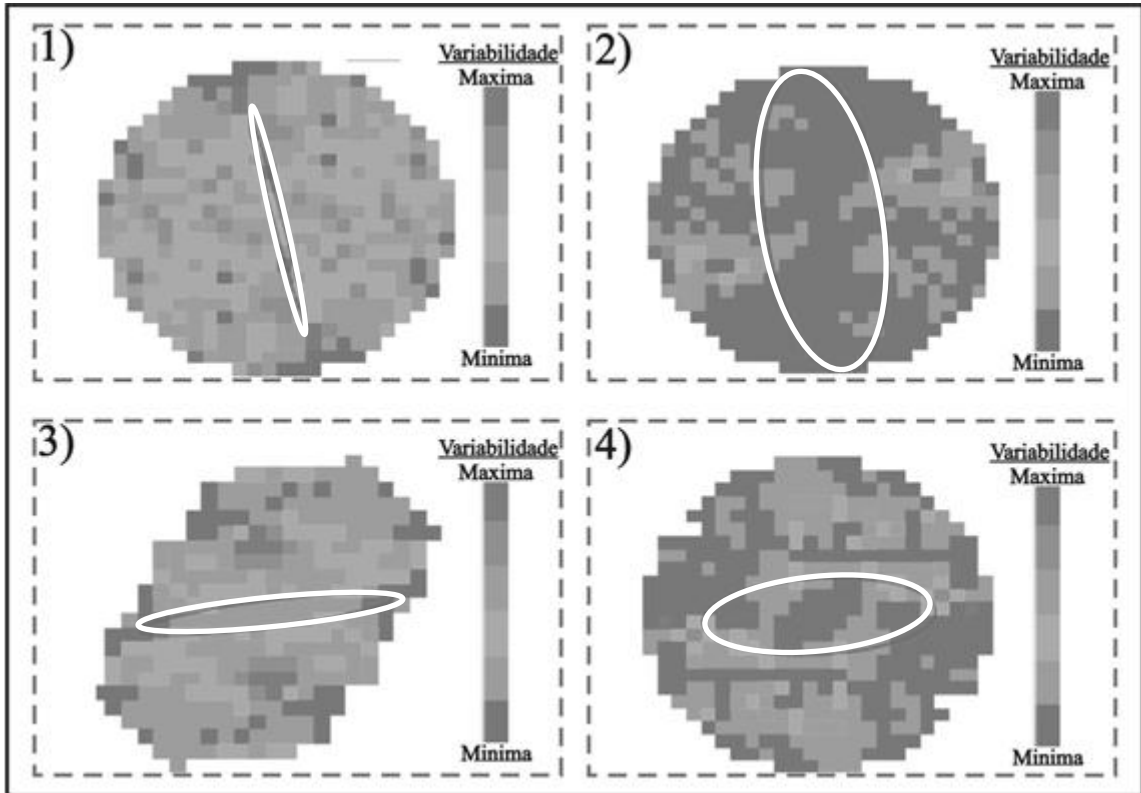


Figura 8 - Mapas de variogramas dos dados altimétricos das diferentes catenas. 1: catena 1; 2: catena 2; 3: catena 3; e 4: catena 4.

A Figura 9 apresenta os semivariogramas dos resíduos, que para as catenas 2, 3 e 4 foram elaborados nas direções de maior e menor continuidade espacial: N-S e E-W, todos com abertura angular de  $45^\circ$ . Para a catena 1, foram elaborados semivariogramas nas direções: NE-SW e NW-SE, com abertura angular de  $45^\circ$  (Figura 9).

Através dos semivariogramas demonstrados na Figura 9 nota-se que as direções dos semivariogramas coincidem, aproximadamente, com as direções de maior declividade do terreno e que a variável altitude (m) apresenta anisotropia geométrica nos diferentes conjuntos dados. Ao se considerar as diferentes direções, as amplitudes variaram em todos os conjuntos dados. Já o patamar permaneceu constante, comportamento associado ao zoneamento espacial da variável. Constata-se também, que o efeito pepita não apresenta variação entre os variogramas das catenas 2, 3 e 4, sendo inexistente nos variogramas da catena 1.

Salvo as diferenças observadas nos valores preditos para a amplitude altimétrica de todas as catenas (Figura 9), há um comportamento semelhante entre

os gráficos, tornando possível o ajuste de um semivariograma “variograma médio” (omnidirecional) entre as diferentes direções.

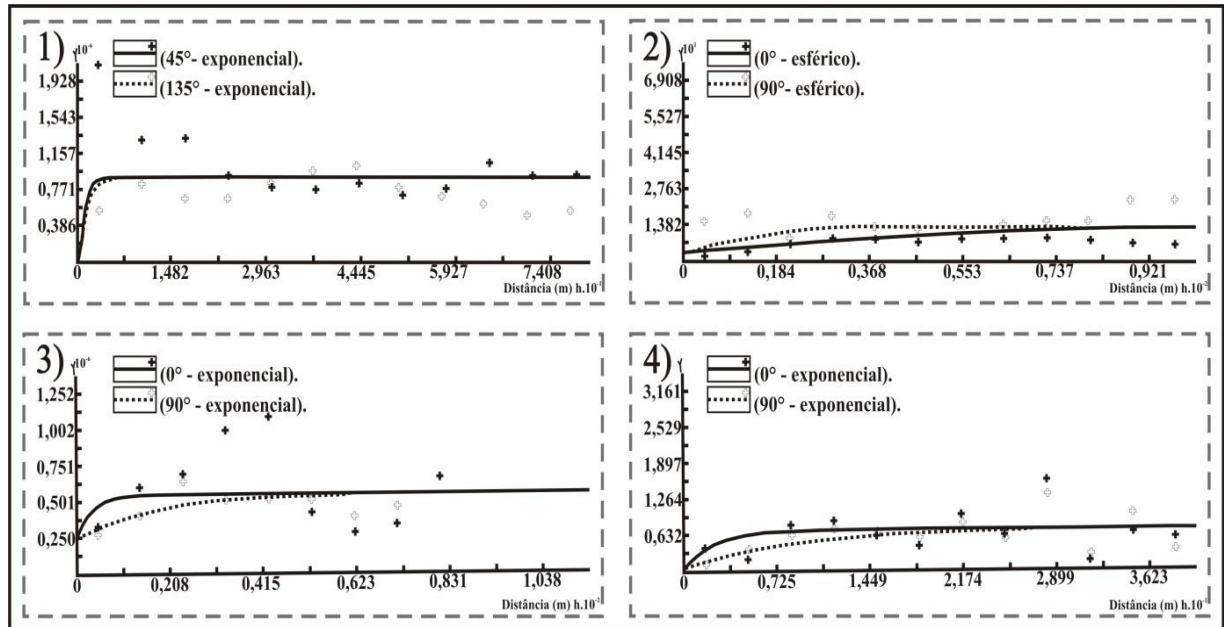


Figura 9 - Semivariogramas experimentais dos dados altimétricos das diferentes catenas. 1: catena 1; 2: catena 2; 3: catena 3; e 4: catena 4.

Para testar o modelo ajustado ao “variograma médio”, ou seja, testar o modelo para valores reais foi empregada a técnica de validação cruzada. De acordo com Isaaks & Sirivastava (1989), essa prática consiste na obtenção de um valor real do banco de dados, com estimativa posterior do mesmo valor, utilizando o modelo variográfico. A validação se dá, comparando os valores estimados com os valores reais, com o uso de uma regressão linear como o critério de comparação.

Após uma rotina intensa de tentativas, obteve-se um ajuste bastante realista para os semivariogramas omnidirecionais. Para a catena 1, o modelo teórico que melhor se ajustou ao modelo experimental foi o exponencial, com efeito pepita de 0 m<sup>2</sup>, patamar de 0,000001 m<sup>2</sup> e uma amplitude de 54,3 m. O modelo teórico que melhor se ajustou ao modelo experimental foi o esférico na catena 2, com efeito pepita de 0,008803 m<sup>2</sup>, patamar de 0,12193 m<sup>2</sup> e uma amplitude de 101,3 m. Para a catena 3, o melhor ajuste ao modelo experimental foi obtido empregando-se o modelo teórico exponencial, com efeito pepita de 0,000002 m<sup>2</sup>, patamar de 0,000005 m<sup>2</sup> e amplitude de 76,1 m. Por fim, na catena 4 o modelo teórico que melhor se

ajustou ao modelo experimental foi o exponencial, com efeito pepita de 0,05466 m<sup>2</sup>, patamar de 0,66761 m<sup>2</sup> e amplitude de 26,6 m (Figura 9).

A Figura 10 demonstra a correlação entre valores observados e estimados pelos modelos, descrevendo a precisão da krigagem universal. As regressões lineares simples, entre valores observados e preditos apresentaram valores de R<sup>2</sup> bem próximos de um para todas as catenas. As relações entre os valores preditos (eixo vertical) e os valores medidos (eixo horizontal) obtidos com a validação cruzada, resultam na aglomeração dos pontos em torno de todas as retas, demonstram uma considerável igualdade entre os valores preditos e medidos. Desta maneira, os valores de R<sup>2</sup> e as relações entre os valores preditos e os valores medidos obtidos com a validação cruzada indicam ajustes satisfatórios dos modelos, conforme preconiza Vieira (2000).

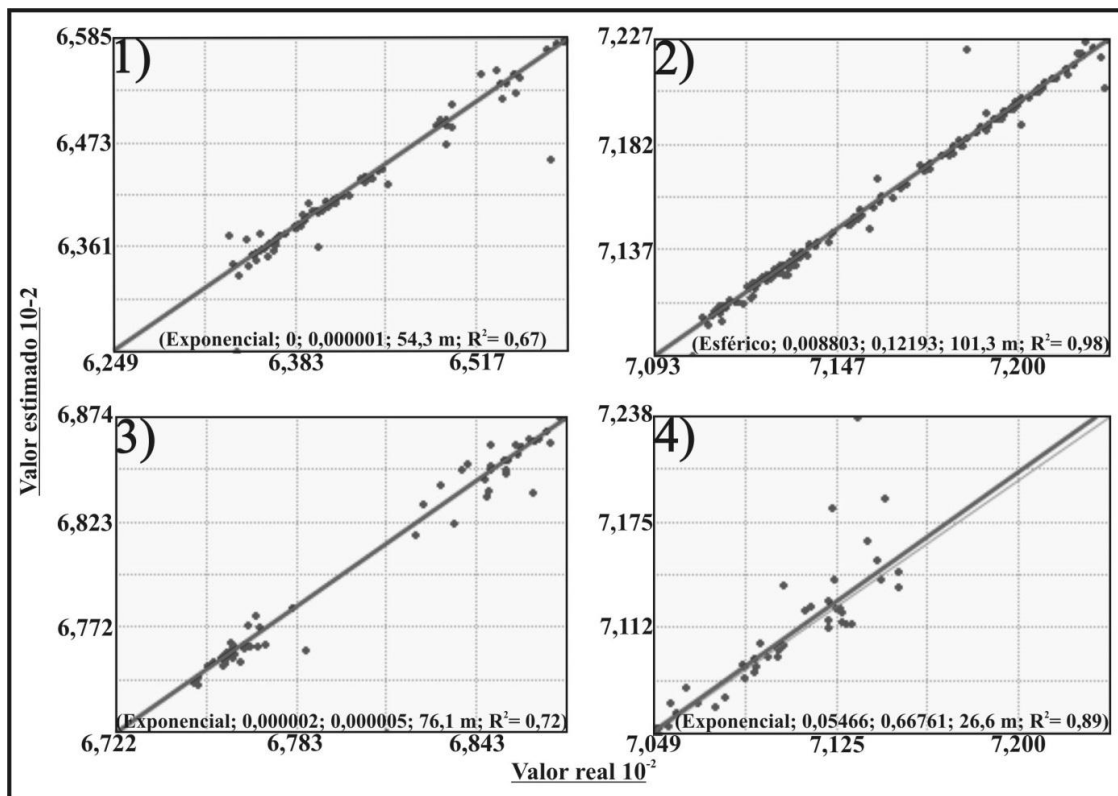


Figura 10 - Regressões lineares simples obtidas com validação cruzada e descrição dos parâmetros dos modelos ajustados aos “variogramas médios” (omnidirecionais) (modelo teórico, efeito pepita; patamar; alcance (m)). 1: catena 1; 2: catena 2; 3: catena 3; e 4: catena 4.

As estatísticas e os padrões espaciais dos atributos do terreno da catena 1 são demonstrados na Figura 11. Observa-se que todos os possíveis atributos do

terreno possuem uma considerável variabilidade espacial dentro da área de estudo, indicando assim, a sua vocação para uso no MDS.

O MDE representou matematicamente a distribuição espacial da altimetria (elevação), demonstrando uma clara tendência de redução altimétrica de nordeste para oeste, com valores superiores a 660 m no terço superior e inferiores a 636 m no sítio mais deprimidos. A declividade demonstra um padrão geomorfológico complexo, no terço superior, no sentido nordeste, predomina uma encosta íngreme, com declividades superiores a  $11^\circ$ , configurando uma feição de relevo forte ondulado (Ramalho Filho e Beek, 1995). O restante da catena apresenta feições de relevo que variam de ondulado (valores  $< 11^\circ$ ) no centro a plano (valores  $< 2^\circ$ ) no sentido oeste. A direção de máximo gradiente, que corresponde ao aspecto, se dá do sentido nordeste (valores  $> 309^\circ$ ) para oeste (valores  $< 218^\circ$ ), estando a feição mais plana do terreno, orientada para nordeste, com aspectos que vão de aproximadamente  $229$  a  $263^\circ$ . A curvatura planar e do perfil demonstram um comportamento retilíneo de nordeste para oeste, com fluxos convergentes na porção oeste da catena. A AC indica que os maiores volumes potenciais de escoamento superficial ocorrem no sentido oeste e noroeste, conforme o padrão de concavidades. Conforme os valores do Fator LS, no terço superior, o relevo forte ondulado culmina no escoamento concentrado com alta energia de escoamento em sulcos de erosão e ravinas, os quais são condicionados pelas concavidades, e nesses processos convergem para a área de depósito na saída da catena. Os valores do IUT e CTS possuem padrões de distribuição espaciais semelhantes a AC. Sendo que os valores do IUT demonstram uma tendência de maior acumulo de água e, portanto, maior conteúdo de água no solo da área de depósito. Já os valores do CTS indicam um maior potencial erosivo da enxurrada acima da área de depósito (Figura 11).



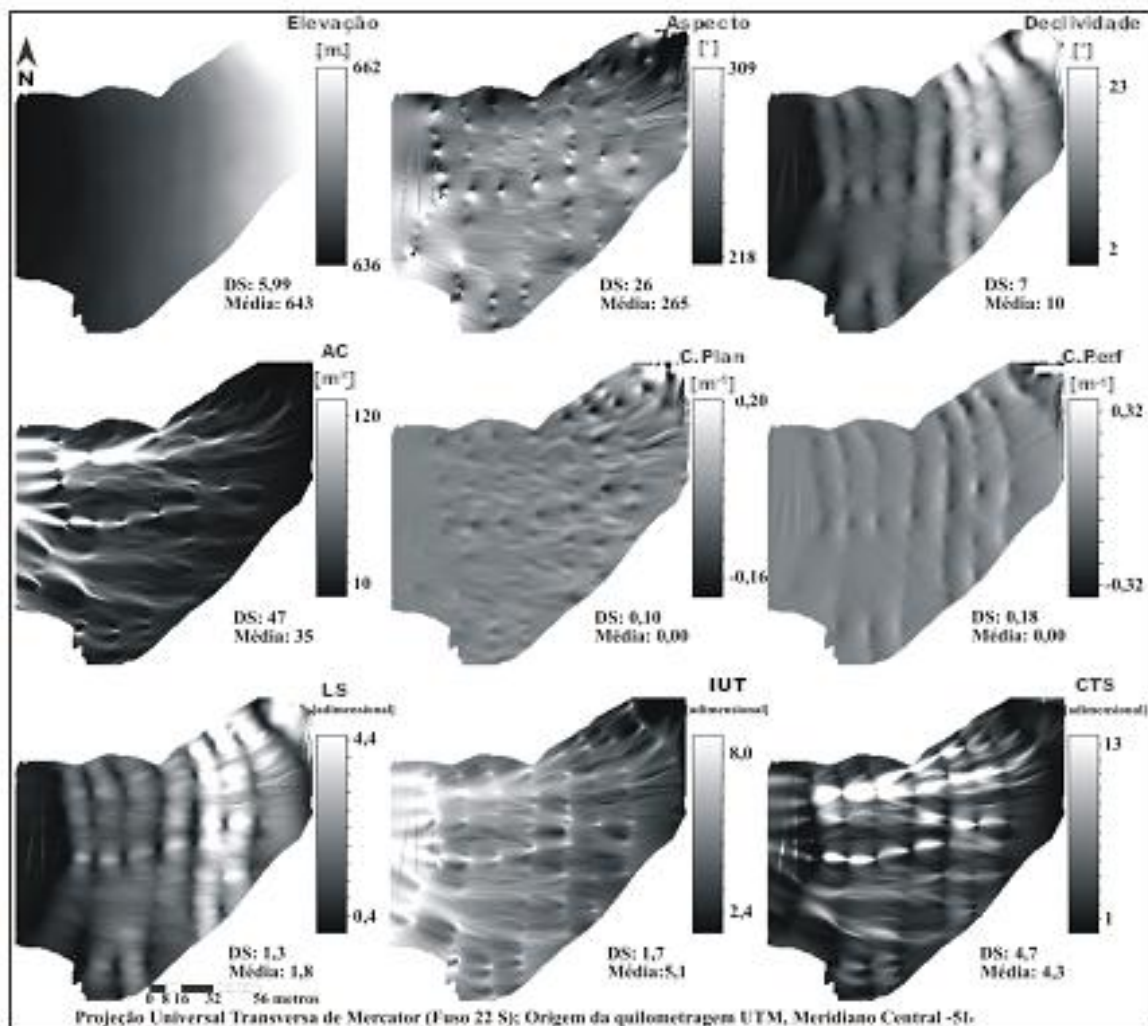


Figura 11 - Mapas temáticos dos atributos do terreno da catena 1 e suas estatísticas descritivas ( $n = 51.975$ ). Datum horizontal SIRGAS 2.000.

Os resultados das estatísticas e os padrões espaciais dos atributos do terreno da catena 2, demonstram a elevada variabilidade espacial desses atributos dentro da área de estudo, o que indica a sua vocação para o MDS (Figura 12).

A representação matemática da distribuição espacial altimétrica demonstra que há uma tendência de redução nos valores dessa variável de oeste e noroeste para leste, com cotas superiores a 722 m no terço superior, e inferiores a 709 m no sítio mais baixo. A distribuição espacial da declividade demonstram um padrão geomorfológico complexo, com feições de relevo classificados como ondulado no terço superior (valores  $> 11^\circ$ ), conforme a classificação de Ramalho Filho e Beek (1995), principalmente nas porções oeste, sul, sudeste, e ao longo terço médio. Há também, a ocorrência de relevo ondulado ao norte do sítio do exutório, e este sítio

por sua vez, apresenta relevo plano (valores  $< 2^\circ$ ). Observa-se também, um sítio como relevo plano no terço superior, trata-se de um platô. A direção do aspecto ocorre de oeste e noroeste (valores  $> 183^\circ$ ) para leste (valores  $< 218^\circ$ ), com feições planas principalmente no exutório, com aspectos que vão de aproximadamente  $45^\circ$  a valores inferiores a  $28^\circ$ . Conforme os resultados da distribuição espacial da curvatura no plano e no perfil, a catena apresenta uma feição côncava, com fluxos convergentes. O padrão espacial da AC se dá do sentido nordeste, sul e sudeste para leste, conforme o padrão de concavidades. A distribuição espacial do fator LS, indica que o escoamento concentrado com alta energia de escoamento, ocorre na forma de sulcos de erosão e ravinas nas feições de relevo ondulado, convergindo para a área de depósito. A distribuição espacial do IUT e CTS assemelha-se ao padrão espacial da AC. Os valores do IUT e CTS indicam uma tendência de maior acúmulo de água no solo próximo a área de depósito, com o maior potencial erosivo da enxurrada nos sítios com sulcos de erosão e ravinas acima da área do depósito (Figura 12).

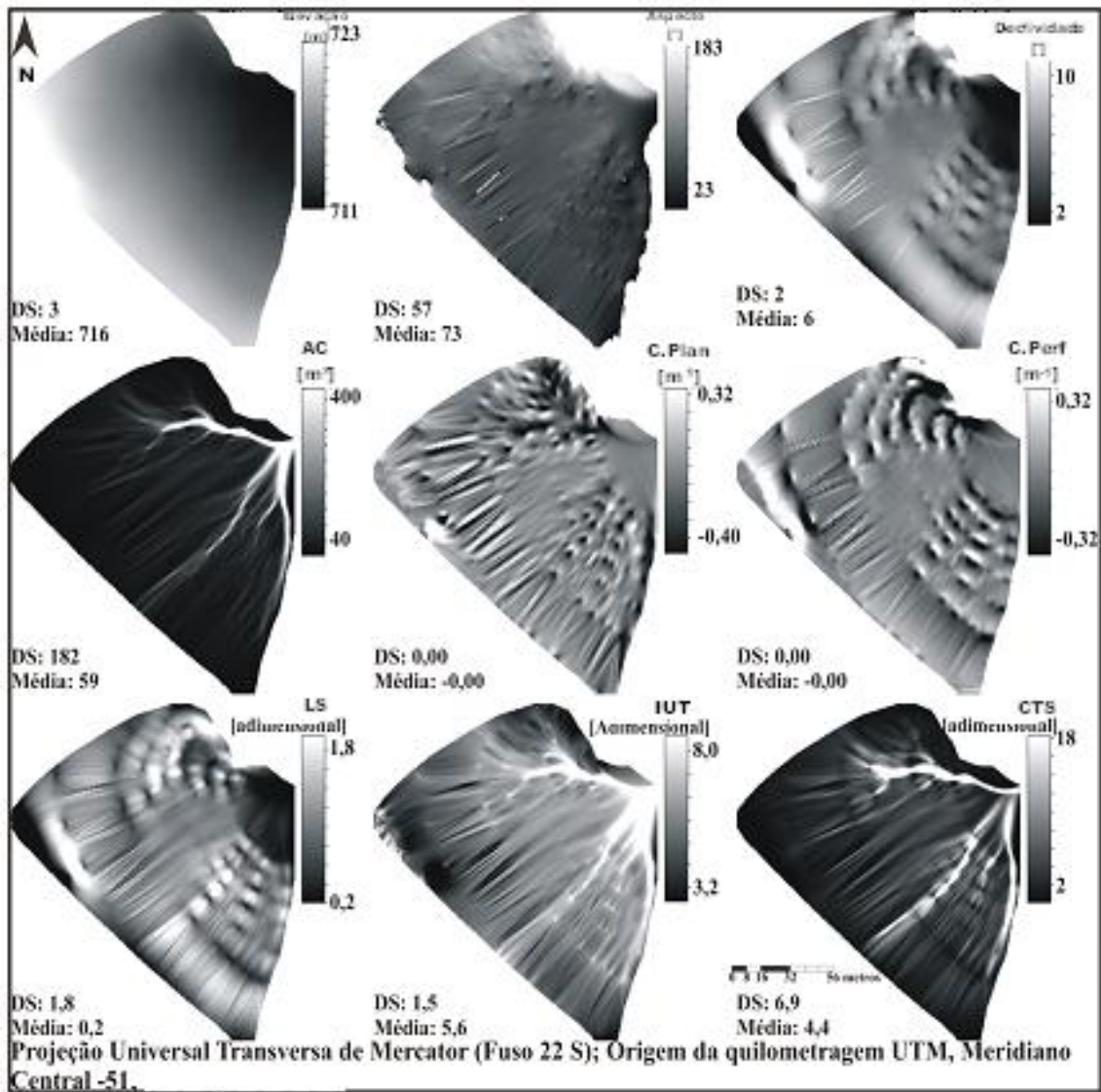


Figura 12 - Mapas temáticos dos atributos do terreno da catena 2 e suas estatísticas descritivas (n = 84.512). Datum horizontal SIRGAS 2.000.

Conforme a Figura 13, todos os atributos do terreno apresentam uma considerável variabilidade espacial dentro da catena 3, com vocação para o uso no MDS.

A representação matemática da distribuição do fenômeno altimétrico indica uma tendência de redução dos valores de sudoeste para nordeste, com cotas superiores a 687 m no terço superior, e inferiores a 676 no sítio mais baixo. Já a distribuição espacial da declividade apresenta um padrão geomorfológico complexo, no terço superior são observadas feições de relevo forte ondulado (valores > 11°) no sentido sudoeste e leste; no sentido nordeste o relevo é plano, com valores inferiores a 2° de acordo com Ramalho Filho e Beek (1995). A direção do aspecto

ocorre de sudeste e nordeste (valores  $> 321^\circ$ ) para norte (valores  $< 46^\circ$ ), há a ocorrência de feições planas principalmente no exutório, com aspectos que vão de aproximadamente  $92^\circ$  a valores inferiores a  $46^\circ$ . A distribuição espacial da curvatura planar e do perfil indicam um comportamento convexo, com fluxos convergentes. A distribuição espacial da AC se dá do sentido sul para norte, conforme o padrão de concavidades. O padrão espacial do fator LS, indica a ocorrência do escoamento concentrado com alta energia de escoamento nas feições de relevo ondulado, convergindo para a área de depósito. Os índices IUT e CTS apresentam um padrão espacial semelhante a AC, e indicam uma tendência de maior acumulo de água no solo na área de depósito, com o maior potencial erosivo da enxurrada acima da área do depósito (Figura 13).

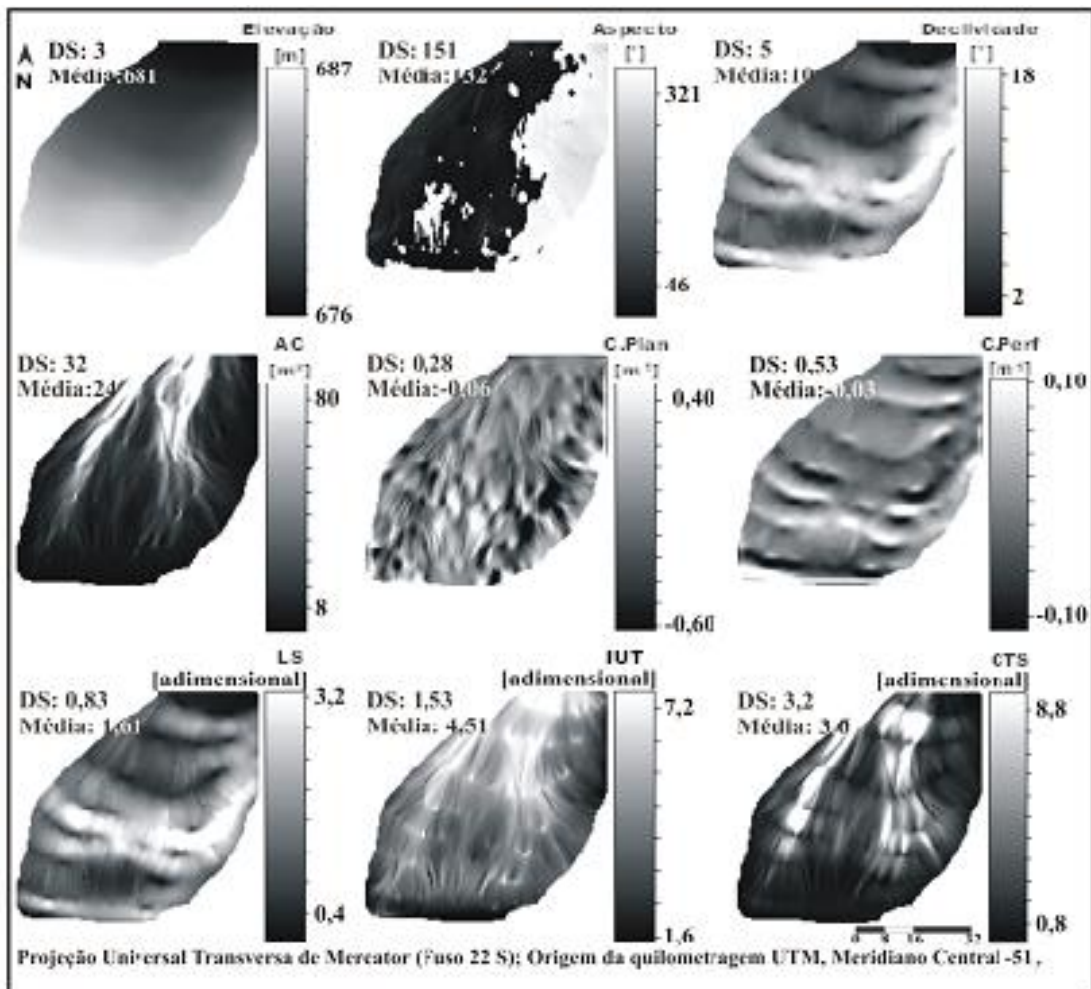


Figura 13 - Mapas temáticos dos atributos do terreno da catena 3 e suas estatísticas descritivas ( $n = 19.321$ ). Datum horizontal SIRGAS 2.000.

A variabilidade espacial dos atributos do terreno dentro da catena 4, indica a sua capacidade de inserção no MDS (Figura 14).

A descrição do fenômeno altimétrico, expõe a tendência de redução dos valores de sudoeste e sul para norte, com elevações superiores a 714 m no terço superior, e inferiores a 708 m no sítio mais deprimido. A distribuição espacial da declividade demonstra um padrão geomorfológico complexo ao longo da catena, conforme a classificação de Ramalho Filho e Beek (1995) ocorrem feições de relevo forte ondulado (valores  $> 11^\circ$ ) a plano (valores  $< 2^\circ$ ). O aspecto se dá no sentido sudeste e nordeste (valores  $> 321^\circ$ ) para norte (valores  $< 46^\circ$ ), com a ocorrência de pequenas feições planas ao longo da catena ( $46 \leq \text{valores} \leq 229$ ). Conforme o padrão da distribuição espacial da curvatura planar e do perfil trata-se de uma encosta côncava, com fluxos convergentes. A distribuição espacial da AC se dá no sentido norte, conforme o padrão das concavidades. A configuração espacial do fator LS, sugere a ocorrência do escoamento concentrado com alta energia de escoamento, principalmente nas feições de relevo ondulado a forte ondulado, convergindo para a pequena área de depósito. Com padrão espacial semelhante a AC, os índices IUT e CTS indicam uma tendência de maior acumulo de água no solo na área de depósito, com o maior potencial erosivo da enxurrada acima da área do depósito, no sentido centro-norte (Figura 14).

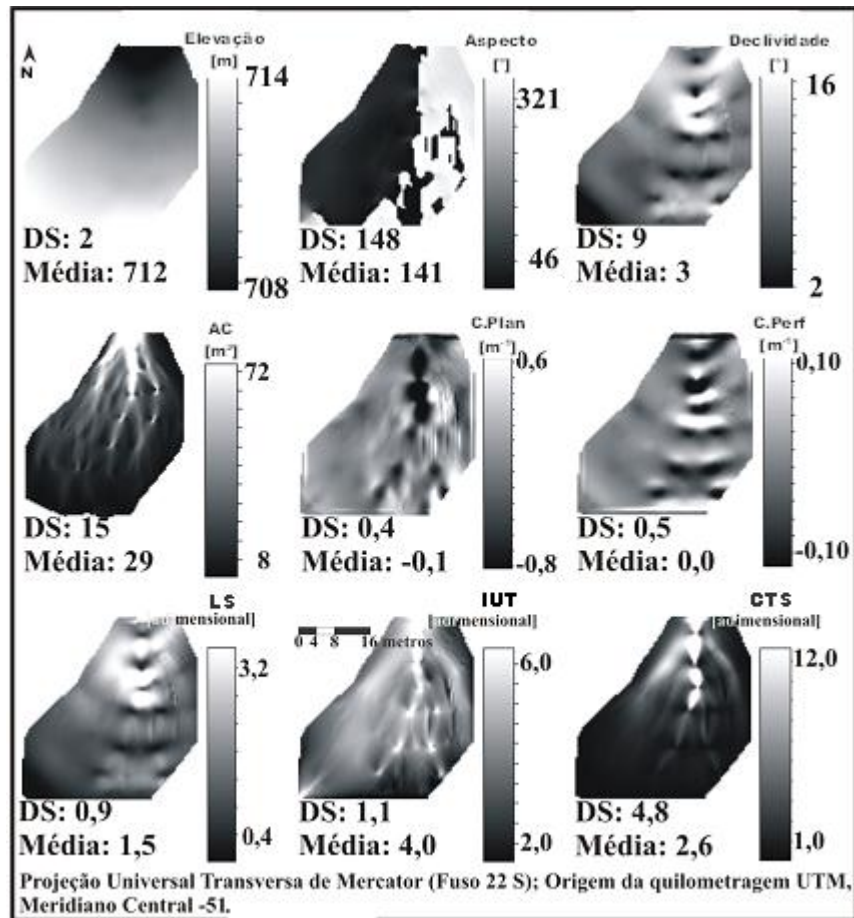


Figura 14 - Mapas temáticos dos atributos do terreno da catena 4 e suas estatísticas descritivas (n = 6.970). Datum horizontal SIRGAS 2.000.

Os diferentes MDE's indicam que a catena 2 apresenta a maior elevação com cotas superiores a 722 m. Já a catena 3 apresenta a menor altitude com cotas inferiores a 636 m. A conformação da declividade nas diferentes catenas, demonstra um padrão geomorfológico complexo, com feições diversas, que variam de forte ondulado (valores > 11°) a plano (valores < 2°) (RAMALHO FILHO; BEEK, 1995). Esses valores estão próximos aos valores observados por Minella e Merten (2012) em toda a Bacia Experimental de Arvorezinha (curvas de contorno extraídas por restituição aerofotogramétrica - 5 m de equidistância). Os valores de declividade assemelham-se também, aos observados por Minella et al. (2010) em bacias de ordem zero localizadas na Bacia Experimental de Arvorezinha e nas suas imediações, em estudo realizado com curvas de contorno com 2 m de equidistância (levantamento planialtimétrico com estação total). As catenas 1 e 3 apresentam a maior declividade média com 10°, seguidas pela catena 4 com 9° de declividade

média, nessas áreas há o predomínio de fluxos com alta velocidade de escoamento, sendo maior as perspectivas de picos de enchentes.

A catena 1 possui direção de fluxo preferencial de nordeste para oeste, com o maior valor médio do aspecto frente as demais catenas. Dessa maneira, pode-se inferir que nessa porção de terras há maior incidência da radiação solar, com a maior temperatura do solo e maior evapotranspiração (MOORE, 1991; WILSON; GALLANT, 2000).

Predominam valores médios negativos de curvatura planar e do perfil na maioria das catenas, esses valores descrevem a ocorrência de feições côncavas (OLAYA, 2004), com a convergência (concentração) de fluxos na paisagem, seguindo o padrão de distribuição espacial do aspecto (curvatura no plano) e da declividade (curvatura no perfil). O mesmo padrão foi observado por Janssens (2011) em bacias de ordem zero localizadas na Bacia Experimental de Arvorezinha e nas suas imediações, e por Dlugoš (2011) numa bacia de ordem zero da Alemanha. Sendo que a convergência ou a divergência dos fluxos na paisagem influenciam diretamente o conteúdo de água no solo, a velocidade do fluxo superficial, a taxa de erosão/deposição e as características do solo (MOORE, 1991; WILSON; GALLANT, 2000), nas encostas de lavagem o solo tende a possuir maior umidade e características hidromórficas, principalmente nos sítios de depósito. À montante, a velocidade do fluxo superficial e as taxas de erosão são superiores as observadas em encostas convexas, como relatado por Golosov e Litvin (2005), comparando encostas côncavas e convexas sob sistema de cultivo não conservacionista.

A catena 2 apresenta o maior valor mensurado e médio da AC, este índice topográfico constitui a área acima da célula em questão que contribui para o fluxo superficial que chega até a célula, ou seja, relaciona-se com o volume do escoamento superficial/enxurrada que chega até a célula (MOORE, 1991; MINELLA; MERTEN, 2012).

Os resultados do fator LS relacionam-se diretamente com a declividade nas diferentes catenas e indicam que a catena 1 apresenta o maior efeito da topografia sobre a erosão do solo (MOORE et al., 1993), ou seja, nessa porção de terras há o maior potencial erosivo (energia) capaz de desagregar e transportar partículas de solo quando estas se movem no sentido do declive (MINELLA et al., 2010); as catenas 3 e 4, também apresentam comportamento semelhante. Os valores

mensurados do fator LS assemelham-se aos registrados por Minella et al. (2010) em quatro bacias de ordem zero inseridas na Bacia Experimental de Arvorezinha.

As diferentes catenas apresentam valores semelhantes do IUT e a distribuição espacial desse índice indica que as zonas saturadas da superfície do solo ocorrem geralmente, nas áreas de depósito e de convergência do relevo próximas aos canais preferenciais com alta energia de escoamento indicados pelo CTS. A ocorrência desses canais está atrelada as convexidades das diferentes catenas, indicando a suscetibilidade dessas áreas aos processos erosivos em sulcos e em voçorocas. Os valores do IUT e do CTS são semelhantes aos determinados por Minella e Merten (2012) para toda a Bacia Experimental de Arvorezinha, e possuem distribuição espacial semelhante à distribuição espacial da AC (volume do escoamento superficial/enxurrada) em todas as catenas. O mesmo comportamento foi observado por Dlugosz (2011) numa bacia de ordem zero na Alemanha.

## 6.2 Levantamento tradicional de solos

Conforme o levantamento tradicional de solos, foram identificadas quatro unidades de mapeamento de solos, pertencentes a três ordens de solos na catena 1 (Tabela 2). Os Neossolos apresentam ocorrência mais frequente, com duas unidades de mapeamento.

Em termos de superfície ocupada, de acordo com o mapa final de solos da catena 1, há um predomínio dos Neossolos, com 4.505 m<sup>2</sup>, correspondendo a 48,5 % da área total da catena 1. Os Cambissolos perfazem uma área de 3.513 m<sup>2</sup> (37,8% da área total) e os Argissolos, ocupam uma extensão de 1.273 m<sup>2</sup> (13,7% da área total) (Tabela 2).

Tabela 2 - Distribuição das unidades de mapeamento por ordens de solos na catena

Ordem	Número de unidades de mapeamento de solos	Área ocupada (m <sup>2</sup> )	Proporção (%)
Argissolos	1	1.273	13,7
Cambissolos	1	3.513	37,8
Neossolos	2	4.505	48,5
Total	4	9.291	100

A legenda de identificação dos solos lista todos os símbolos atribuídos às unidades de mapeamento de solos e suas respectivas denominações, constituindo a



chave para a leitura e interpretação do mapa de solos. Todas as unidades de mapeamento estão representadas por um perfil descrito, coletado e analisado.

A catena 1 possui quatro classes de solos em nível de subordem, quatro classes de solos em nível de grande grupo e quatro classes de solos em nível de subgrupo (Tabela 3).

O levantamento de solos da catena 1 indica que há o predomínio do CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico léptico na paisagem, com 3.513 m<sup>2</sup>, correspondendo a 37,8% da área total da catena, seguido pelo NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico fragmentário, com 3.228 m<sup>2</sup> (34,8% da área total), NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico, com 1.277 m<sup>2</sup> (13,7% da área total) e por fim o ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO Distrófico abrupto, com 1.273 m<sup>2</sup> (13,7% da área total) (Tabela 3).

Tabela 3 - Legenda de identificação dos solos da catena 1 e suas respectivas áreas e proporções.

Símbolo	Descrição da unidade de mapeamento	Área ocupada (m <sup>2</sup> )	Proporção (%)
PBACd	ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO Distrófico abrupto	1.273	13,7
CXVd	CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico léptico	3.513	37,8
RLe	NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico fragmentário	3.228	34,8
RRe	NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico	1.277	13,7
	Total	9.291	100

Para demonstrar a elevada heterogeneidade de solos observada na catena 1, foi construído, através de extrapolação em função das curvas de contorno do relevo, um mapa de distribuição de unidades de mapeamento de solos (Figura 15). É evidente a elevada variabilidade das unidades de mapeamento, considerando a ocorrência de quatro classes de solos numa área de apenas 9.291 m<sup>2</sup> (0,9 ha).

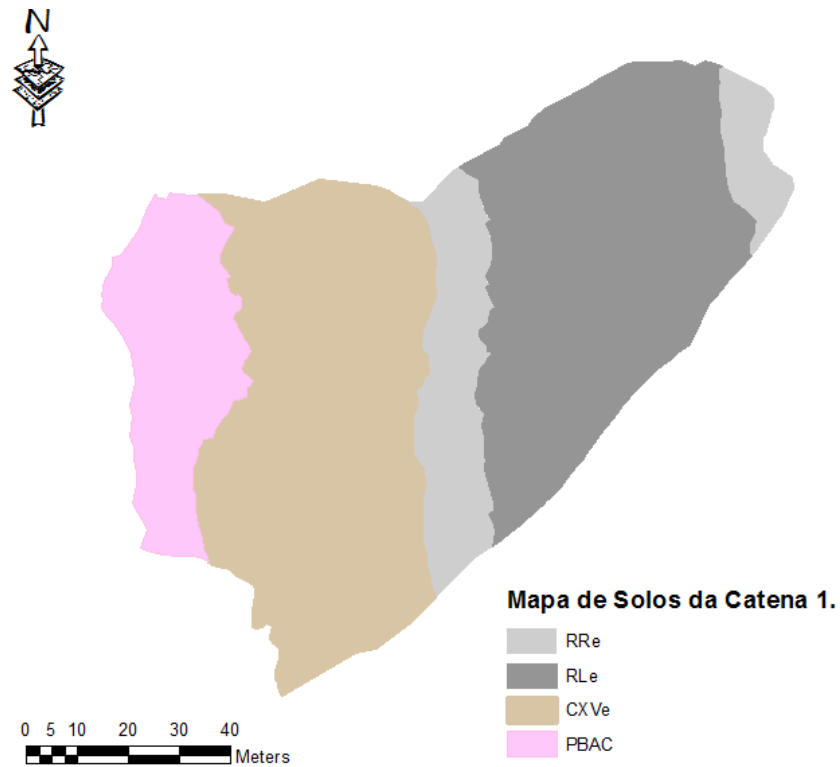


Figura 15 - Mapa de solos da catena 1. Projeção Universal Transversa de Mercator (Fuso 22 S); origem da quilometragem UTM Meridiano Central -51. Datum horizontal SIRGAS 2.000.

Na Catena 2 foram identificadas quatro unidades de mapeamento de solos, inseridas em duas ordens (Tabela 4). Os Argissolos perfazem três unidades de mapeamento e os Cambissolos uma unidade.

Os Argissolos ocupam a maior área, com 8.147 m<sup>2</sup>, correspondendo a 62,9% do total da catena 2. Os Cambissolos desenvolvem-se no restante da área, ocupando 4.813 m<sup>2</sup> (37,1%) (Tabela 4).

Tabela 4 - Distribuição das unidades de mapeamento por ordens de solos na catena 2.

Ordem	Número de unidades de mapeamento de solos	Área ocupada (m <sup>2</sup> )	Proporção (%)
Argissolos	3	8.147	62,9
Cambissolos	1	4.813	37,1
Total	3	12.960	100

Foram identificadas três classes de solos em nível de subordem na catena 2, distribuídas em quatro classes de solos em nível de grande grupo e em quatro classes de solos em nível de subgrupo (Tabela 5).

Predomina o ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico abrupto na paisagem da catena 2, com 4.913 m<sup>2</sup>, correspondendo a 38,0% da área total, destaca-se também, o CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico léptico, com 4.813 m<sup>2</sup> (37,1% da área total). Menos representativos o ARGISSOLO VERMELHO Alítico abrupto e o ARGISSOLO ACINZENTADO Eutrófico abrupto desenvolvem-se em 2.106 m<sup>2</sup> (16,2% da área total) e 1.128 m<sup>2</sup> (8,7% da área total), respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5 - Legenda de identificação dos solos da catena 2 e suas respectivas áreas e proporções.

Símbolo	Descrição da unidade de mapeamento	Área ocupada (m <sup>2</sup> )	Proporção (%)
PACe	ARGISSOLO ACINZENTADO Eutrófico abrupto	1.128	8,7
PVal	ARGISSOLO VERMELHO Alítico abrupto	2.106	16,2
PVe	ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico abrupto	4.913	38,0
CXvd	CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico léptico	4.813	37,1
	Total	12.960	100

Considerando a área mapeada e a classificação dos solos em nível de ordem, é possível observar que a catena 2 apresenta a menor heterogeneidade dentre todas as catenas, com duas ordens (quatro unidades de mapeamento de solos) distribuídas em 12.960 m<sup>2</sup> (1,2 ha) (Figura 16).

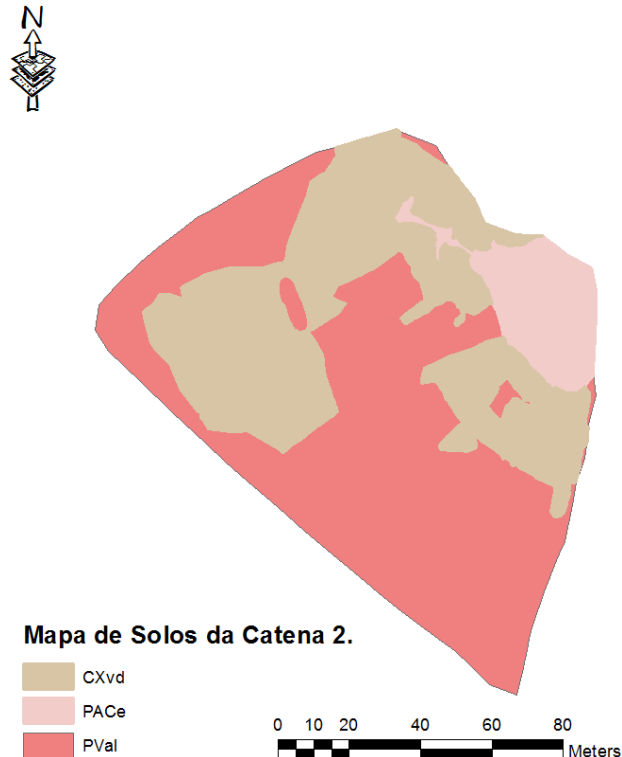


Figura 16 - Mapa de solos da catena 2. Projeção Univeral Transversa de Mercator (Fuso 22 S); origem da quilometragem UTM Meridiano Central -51. Datum horizontal SIRGAS 2.000.

Foram identificadas três unidades de mapeamento de solos, pertencentes a duas ordens de solos na catena 3, sendo que os Argissolos perfazem duas unidades de mapeamento e os Neossolos uma unidade. Nessa catena, os Argissolos ocupam 2662 m<sup>2</sup> (73,0% da área total) e os Neossolos, apenas 984 m<sup>2</sup> (27,0% da área total) (Tabela 6).

Tabela 6 - Distribuição das unidades de mapeamento por ordens de solos na catena 3.

Ordem	Número de unidades de mapeamento de solos	Área ocupada (m <sup>2</sup> )	Proporção (%)
Argissolos	2	2.662	73,0
Neossolos	1	984	27,0
Total	3	3.646	100

As unidades de mapeamento de solos identificadas na catena 3, estão distribuídas em três classes de solos em nível de subordem, em três classes de

solos em nível de grande grupo e em três classes de solos em nível de subgrupo (Tabela 7).

Considerando a área mapeada, predomina o ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO Distrófico abruptico na catena 3, com 1.658 m<sup>2</sup>, perfazendo 45,5% da área total, desenvolve-se também nessa área, o ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abruptico em 1.004 m<sup>2</sup> (27,5% da área total) e o NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico, com 984 m<sup>2</sup> (27,0% da área total) (Tabela 7).

Tabela 7 - Legenda de identificação dos solos da Catena 3 e suas respectivas áreas e proporções.

Símbolo	Descrição da unidade de mapeamento	Área ocupada (m <sup>2</sup> )	Proporção (%)
PVd	ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abruptico	1.004	27,5
PBACd	ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO Distrófico abruptico	1.658	45,5
RRe	NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico	984	27,0
	Total	3.646	100

Conforme o mapa de distribuição de unidades de mapeamento de solos, a catena 3 apresenta elevada variabilidade das unidades de mapeamento, com três unidades de mapeamento de solos distribuídas em apenas 3.646 m<sup>2</sup> (0,4 ha) (Figura 17).

O levantamento de solos da catena 4 revelou a ocorrência de três unidades de mapeamento de solos, inseridas em três ordens de solos: Argissolos, Cambissolos e Chernossolos. Estas três ordens estão distribuídas em três classes de solos em nível de subordem, em três classes de solos em nível de grande grupo e em três classes de solos em nível de subgrupo (Tabela 8).

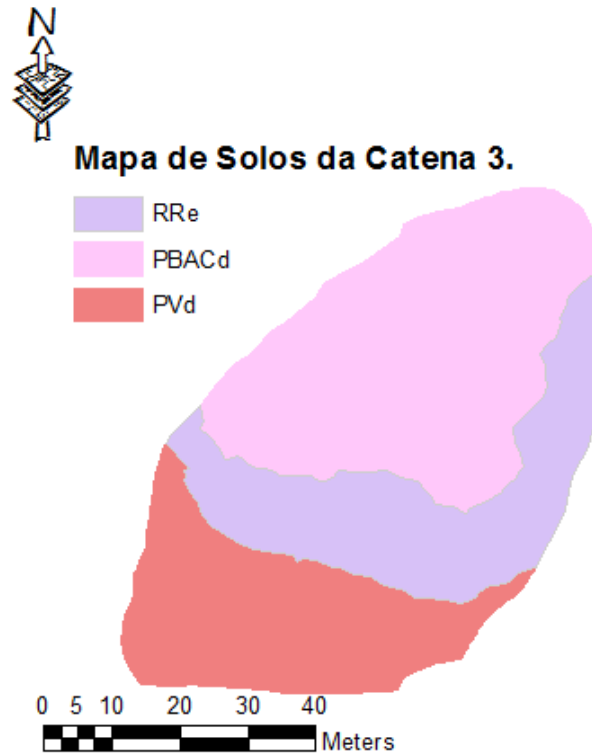


Figura 17 - Mapa de Solos da catena 3. Projeção Universal Transversa de Mercator (Fuso 22 S); origem da quilometragem UTM Meridiano Central -51. Datum horizontal SIRGAS 2.000.

O CHERNOSSOLO HÁPLICO Órtico típico ocupa a maior área mapeada da catena 4, com 1.041 m<sup>2</sup>, correspondendo a 72,5% da área total, o CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico típico desenvolvem-se em 302 m<sup>2</sup> (21,0% da área total) e o ARGISSOLO AMARELO Eutrófico abruptico em apenas 94 m<sup>2</sup> (6,5% da área total) (Tabela 8).

Tabela 8 - Distribuição das unidades de mapeamento por ordens de solos, legenda de identificação dos solos e suas respectivas áreas e proporções na catena 4.

Ordem	Nº. U.	Símbolo	Descrição da unidade de mapeamento	Área ocupada (m <sup>2</sup> )	Proporção (%)
Argissolos	1	PAe	ARGISSOLO AMARELO Eutrófico abruptico	94	6,5
Cambissolos	1	CXvd	CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico típico	302	21,0
Chernossolos	1	MXo	CHERNOSSOLO HÁPLICO Órtico típico	1.041	72,5
	3		Total	1.437	100

Nº U. Número de unidades de mapeamento de solos.

Avaliando a área mapeada e a classificação dos solos em nível de subgrupo, é possível compreender que a catena 4 apresenta a maior heterogeneidade dentre todas as catenas, com três unidades de mapeamento, distribuídas em apenas 1.437 m<sup>2</sup> (0,1 ha) (Figura 18).

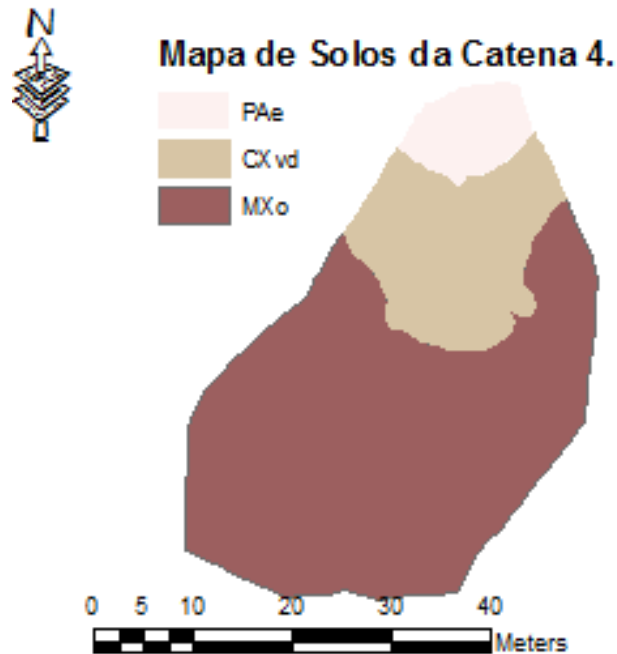


Figura 18 - Mapa de solos da catena 4. Projeção Universal Transversa de Mercator (Fuso 22 S); origem da quilometragem UTM Meridiano Central -51. Datum horizontal SIRGAS 2.000.

Por se tratarem de catenas com relevo heterogêneo, variando de forte ondulado a plano de acordo, as diferentes unidades de mapeamento encontradas são aquelas esperadas conforme os trabalhos de Pedron et al. (2006), Pedron e Dalmolin (2011).

### 6.3 Atributos do terreno na diferenciação das subordens de solos

Para demonstrar a relação dos atributos do terreno com o desenvolvimento dos solos, foram realizadas análises de componentes principais (ACP) e de agrupamentos hierárquicos, as quais demonstram que os atributos topográficos interferem de forma diferenciada na distribuição espacial dos solos.

Após várias análises, as matrizes de dados das diferentes catenas foram reduzidas a oito atributos topográficos, excluindo-se o atributo CTS que

comprometeu a adequação amostral, conferindo valores inaceitáveis (inferiores a 0,5) para as matrizes, conforme o teste de adequação amostral de Kaiser-Meyer-Olkin.

Para a catena 1, as duas primeiras componentes principais (a soma dos dois primeiros autovalores) explicaram 71,57% da variação dos dados, com autovalores de 52,74% para a CP1 e de 18,83% para a CP2 (Tabela 9).

Tabela 9 - Atributos do terreno da catena 1 nos componentes principais (CP).

Componente	Variância (%)	Variância Acumulada (%)	Atributo	CP1	CP2
				Contribuição	
1	52,74	52,74	IUT	-0,948	
2	18,83	71,57	Declividade	0,945	
			Elevação	0,929	
			Fator LS	0,915	
			AC	-0,616	
			Aspecto	-0,529	
			C.plan		-0,810
			C.perf		0,776

As duas primeiras componentes principais explicaram 67,73% da variância dos atributos do terreno na catena 2, com autovalores de 42,24% para a CP1 e de 25,49% para a CP2 (Tabela 10).

Tabela 10 - Atributos do terreno da catena 2 nos componentes principais (CP).

Componente	Variância (%)	Variância Acumulada (%)	Atributo	CP1	CP2
				Contribuição	
1	42,23	42,23	IUT	-0,922	
2	25,49	67,73	Declividade	0,928	
			Elevação	0,693	
			Fator LS	0,841	-0,353
			AC	-0,671	
			Aspecto	-	-
			C .plan		0,940
			C.perf		0,947



Na catena 3, as duas primeiras componentes principais explicaram 59,63% da variação dos dados, com autovalores de 40,66% para a CP1 e de 18,97% para a CP2 (Tabela 11).

Tabela 11 - Atributos do terreno da catena 3 nos componentes principais (CP).

Componente	Variância (%)	Variância Acumulada (%)	Atributo	CP1	CP2
				Contribuição	
1	40,66	40,66	IUT	-0,908	
2	18,97	59,63	Declividade	0,898	
			Elevação	0,704	
			Fator LS	0,776	
			AC	-0,710	-0,420
			Aspecto		0,508
			C .plan		0,697
			C.perf		0,669

As duas primeiras componentes principais explicaram 62,85% da variação dos dados dos atributos do terreno na catena 4, com autovalores de 39,43% para a CP1 e de 23,42% para a CP2 (Tabela 12).

Tabela 12 - Atributos do terreno da catena 4 nos componentes principais (CP).

Componente	Variância (%)	Variância Acumulada (%)	Atributo	CP1	CP2
				Contribuição	
1	39,43	39,43	IUT	0,916	
2	23,42	62,85	Declividade		0,932
			Elevação	-0,666	-0,565
			Fator LS	0,513	0,830
			AC	0,855	
			Aspecto		0,668
			C .plan	-0,565	-0,330
			C.perf	-	-

Após várias análises, os dendrogramas gerados pelo método de classificação hierárquico apontam que a distribuição dos solos em nível de subordens ocorre em função das semelhanças ou das dissemelhanças entre os atributos do terreno: elevação, declividade, IUT e fator LS.

Na catena 1, observou-se o quase na totalidade o agrupamento no nível de subordens de solos (Apêndice A). O NEOSSOLO LITÓLICO tende a desenvolver-se

nas áreas mais declivosas da catena, com relevo forte ondulado, corroborando com os resultados de Klamt et al. (1997), Dalmolin et al. (2008) e Pedron et al. (2009). Além da maior declividade, essas áreas apresentam forte potencial erosivo que, é capaz de desagregar e transportar partículas de solo quando estas se movem no sentido do declive (Minella et al., 2010), fato que contribuí para a pouca espessura desse solo. Ao passo em que há a redução da declividade e do fator LS, desenvolvem-se solos mais profundos primeiramente o NEOSSOLO REGOLÍTICO e posteriormente, o CAMBISSOLO HÁPLICO. Na área de depósito da catena, desenvolve-se o ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO, onde predomina o relevo suave ondulado a plano, com as menores elevações da catena e o menor potencial erosivo, nesse ambiente há a maior tendência para o acúmulo de água, portanto, maior conteúdo de água no solo. Moore et al. (1993), encontraram correlação entre a pequena declividade e o valor elevado IUT com a gênese de solos hidromórficos e semi-hidromórfico. Já Streck et al. (2008), descreve a ocorrência do ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO associada ao ambiente com drenagem moderada a imperfeita.

Conforme o dendrograma obtido com os dados da catena 2, nota-se uma forte tendência de agrupamento no nível de subordens de solos (Apêndice B). O ARGISSOLO VERMELHO relaciona-se com as porções de terras mais elevadas da catena, onde foram determinados os menores valores do IUT. Desta maneira, pode-se inferir que o ambiente é bem drenado, propício para a gênese dessa tipologia de solo, de acordo com os trabalhos de Streck et al. (2008) e Chagas et al. (2013). Com a redução da elevação, são registradas áreas com declividade acentuada e com elevado potencial erosivo do solo, ambiente propício para a formação do CAMBISSOLO HÁPLICO. Streck et al. (2008) observaram a relação a ocorrência desse solo com a declividade acentuada. Nas cotas mais baixas da catena, há a redução da declividade com a conformação do relevo suave ondulado a plano, ocorrendo a menor incidência do efeito da topografia sobre os processos erosivos, configurando uma área de depósito, onde são registrados os maiores valores do IUT, pode-se inferir então, que na área de depósito há o maior conteúdo de água no solo, ambiente propício para o desenvolvimento do ARGISSOLO ACINZENTADO.

De acordo com o dendrograma gerado com os dados da catena 3, houve o total agrupamento no nível de subordens de solos (Apêndice C). O ARGISSOLO VERMELHO tende a se desenvolver nas cotas mais elevadas da catena, onde foram

mensurados os menores valores do IUT, desta maneira, pode-se concluir que se trata de um ambiente bem drenado. Com o incremento abrupto da declividade, há o maior efeito da topografia sobre os processos erosivos, e nessas porções de terras ocorre o NEOSSOLO REGOLÍTICO. Na medida em que ocorre a redução da elevação, o relevo apresenta uma conformação que varia de suave ondulado a plano, com a menor incidência do efeito da topografia sobre os processos erosivos. Trata-se da área de depósito da catena, nessa área foram registrados os maiores valores do IUT, pode-se subtender então, que no depósito há o maior conteúdo de água no solo, ambiente adequado para o desenvolvimento do ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO.

Para a catena 4, o dendrograma indica o quase total agrupamento das subordens de solos (Apêndice D). O CHERNOSSOLO HÁPLICO inter-relaciona-se com as porções mais elevadas da catena, corroborando com as observações de Flores et al. (2012). Essas porções de terras apresentam os menores valores do IUT, o que indica um ambiente bem drenado. Com a redução da elevação, são registradas áreas com declividade marcante e com alto potencial erosivo do solo, nesse ambiente ocorre o desenvolvimento do CAMBISSOLO HÁPLICO. Nas cotas inferiores da catena, com a conformação do relevo plano ocorre a menor incidência do efeito da topografia sobre os processos erosivos, desenvolvendo-se uma área de depósito e é nessa área onde são registrados os maiores valores do TWI. Assim, pode-se deduzir que nessa onde se desenvolve o ARGISSOLO AMARELO há o maior conteúdo de água no solo.

De maneira geral, a distribuição espacial dos atributos do terreno: elevação, declividade, IUT e fator LS possui forte relação com a variabilidade espacial dos solos, e esse comportamento é preconizado por Moore et al. (1993), Zevenbergen e Thorne (1987), Wilson e Gallant (2000).

#### **6.4 Mapeamento digital de solos**

Os valores do índice kappa determinados para as diferentes áreas (Quadro 1) foram classificados como excelentes conforme a hierarquia proposta por Landis e Koch (1977). Esse resultado difere dos trabalhos de Hengl e Rossiter (2003), e Silva et al. (2013) que empregaram a resolução espacial de 30 metros em seus

mapeamentos. Assim, a explicação para essa divergência, pode estar relacionada com a alta resolução espacial do mapeamento, que conta com o pixel de 0,5 m.

Partindo de 587 amostras extraídas dos mapas de referência, foram determinadas as exatidões globais (EG) que consistem na proporção de observações corretamente classificadas em relação ao número total de observações. Os valores de EG (Quadro 1) foram considerados altos em relação aos mapeamentos de Zhou et al. (2004) e de Hansen et al. (2009). Esses autores utilizaram árvores de decisão para prever a relação solo-paisagem e determinaram valores de EG respectivos de 81,3% e 75,5%. Conforme Embrapa (1995), a precisão dos mapas gerados é compatível com aquela esperada no nível ultradetalhado (Figura 19).

A exatidão do usuário (EU) consiste na probabilidade de um ponto, no mapa, representar a verdade do terreno. Conforme o Quadro 1, a grande maioria das subordens de solos nas diferentes catenas, apresentam concordâncias iguais ou superiores a 95,0% dos mapas preditos com os pontos marcados nos mapas de referência. O valor de 76,9% de EU mensurado para o ARGISSOLO VERMELHO na catena 2, pode estar atrelada a algumas porções de terras com esse solo que apresentam valores destoantes de declividade a montante, frente aos demais pontos; também, ao fato de haver inclusões do CAMBISSOLO HÁPLICO no ARGISSOLO VERMELHO.

O menor valor determinado para a exatidão do produtor (EP) foi de 87,5%, com valores chegando até a 100% (Quadro 1). Assim, pode-se entender que as sete subordens de solos mapeadas nas diferentes catenas foram identificadas corretamente, quase que na totalidade dos MDS gerados (Figura 19). Desta maneira, pode-se afirmar que o mapeamento preditivo apresenta grande semelhança aos mapas de referência (Quadro 1).

A predição correta das subordens de solos pode estar relacionada à alta resolução do mapeamento acrescida pela tecnologia GNSS RTK. Conforme ten Caten (2012), tecnologias como o LIDAR, satélite TerraSAR-X e Scanners 3D empregadas na obtenção da informação sobre as nuances do terreno ainda não foram testadas no MDS nacional, e possuem um grande potencial na obtenção de MDE de elevada resolução e exatidão, visando ao levantamento preditivo de solos em pequenas áreas e/ou grandes escalas.

Quadro 1 - Matriz de confusão e parâmetros que avaliam acurácia do MDS.

Catena 1						
Subordens de solos	RL	RR	CX	PBAC	Total	Exatidão do Usuário (%)
RL	30	0	0	0	30	100,0
RR	1	30	0	0	31	96,8
CX	0	0	46	0	46	100,0
PBAC	0	1	1	38	40	95,0
Total	31	31	47	38	147	
Exatidão do Produtor (%)	96,8	96,8	95,8	100,0		
Exatidão global (%)	97,3	Kappa = 0,96				
Catena 2						
Subordens de solos	CX	PAC	PV		Total	Exatidão do Usuário (%)
CX	84	0	2		86	97,67
PAC	0	40	0		40	100,00
PV	12	0	40		52	76,92
Total	96	40	42		178	
Exatidão do Produtor (%)	87,5					
Exatidão global (%)	92,1	Kappa = 0,87				
Catena 3						
Subordens de solos	RR	PBAC	PV		Total	Exatidão do Usuário (%)
RR	65	0	2		67	97,0
PBAC	0	59	0		59	100,0
PV	0	1	44		45	97,78
Total	65	60	46		171	
Exatidão do Produtor (%)	100,0	98,3	95,7			
Exatidão global (%)	98,3	Kappa = 0,97				
Catena 4						
Subordens de solos	CX	PAC	MX		Total	Exatidão do Usuário (%)
CX	35	1	0		36	97,22
PAC	0	19	0		19	100,00
MX	0	0	37		37	100,00
Total	35	20	37		92	
Exatidão do Produtor (%)	100,0	95,0	100,0			
Exatidão global (%)	98,91	Kappa = 0,98				

PAC: ARGISSOLO ACINZENTADO; PA: ARGISSOLO AMARELO; PBAC: ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO; PV: ARGISSOLO VERMELHO; CX: CAMBISSOLO HÁPLICO; MX: CHERNOSSOLO HÁPLICO; RL: NEOSSOLO LITÓLICO; e RR: NEOSSOLO REGOLÍTICO.

Este trabalho é inovador ao gerar um MDS com alta resolução e exatidão apoiado na tecnologia GNSS RTK. Desta maneira, muitos estudos serão realizados utilizando essa tecnologia, não só para a classificação dos solos, mas também para a agricultura de precisão e para o mapeamento dos estoques de carbono do solo. Buscamos novas tecnologias que produzam informações mais detalhadas sobre solos do que as disponíveis atualmente, de maneira rápida e pouco onerosa e que possam auxiliar os usuários dos diferentes setores da sociedade.

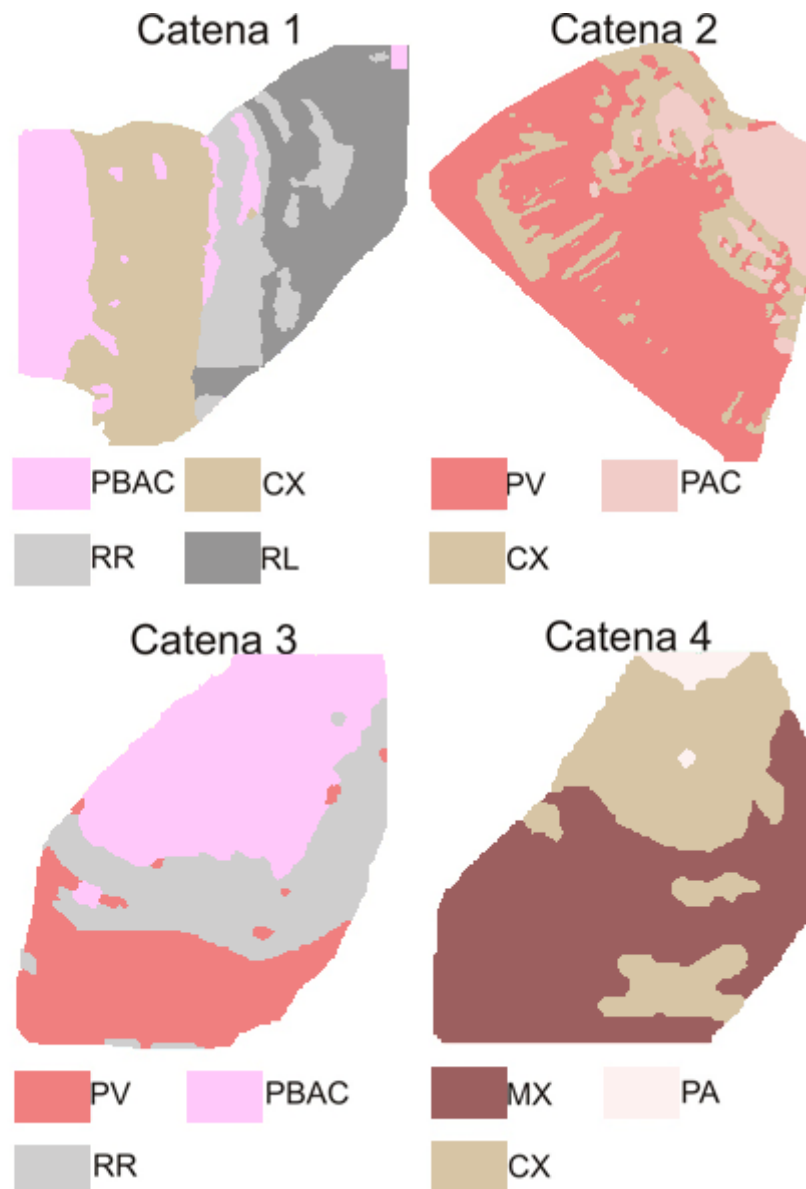


Figura 19 - MDS gerado utilizando seis atributos do terreno. PAC: ARGISSOLO ACINZENTADO; PA: ARGISSOLO AMARELO; PBAC: ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO; PV: ARGISSOLO VERMELHO; CX: CAMBISSOLO HÁPLICO; MX: CHERNOSSOLO HÁPLICO; RL: NEOSSOLO LITÓLICO; e RR: NEOSSOLO REGULÍTICO

## 7 CONCLUSÕES

- Os atributos do terreno apresentaram-se efetivos na diferenciação dos solos, principalmente a elevação, a declividade, o índice de umidade do terreno e o fator LS.
- A tecnologia GNSS contribuiu para a geração de MDE's de alta resolução e exatidão.
- A acurácia do MDS foi classificada como excelente. Os atributos do terreno declividade a montante, declividade, índice de umidade do terreno, elevação, fator LS e curvatura planar apresentaram elevado potencial preditivo, conferindo exatidão aos MDS gerados.

## 8 LITERATURA CITADA

BATJES, N. H. Management options for reducing CO<sub>2</sub> concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. Bilthoven: Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change, NRP Report, 1999. (**Nota Técnica, nº410-200-03130**)

BEHRENS, T. et al. Digital soil mapping using artificial neural networks. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 168, p. 21-33, 2005.

BEHRENS, T. et al. A comparison of data-mining techniques in predictive soil mapping. In: LAGACHERIE, P. et al. (Ed). **Digital soil mapping, an introductory perspective. Developments in soil science**. Amsterdam: Elsevier, 2007. v. 31, p. 353-364.

BUOL, S. W. et al. **Soil Genesis and Classification**. Chichester: Wiley Blackwell, 2011. 543 p.

CHAGAS, C. S. et al. Atributos Topográficos na Diferenciação de Argissolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 441-453, 2013.

CLARK, I.; WILLIAM, V. **Practical Geostatistics 2000**. Columbus: Ecosse North America, 2007. 430p.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. 2. ed. Boca Raton: Taylor and Francis, 2008. 200p.

DALMOLIN, R. S. D. et al. **Solos do município de Silveira Martins: Características, classificação distribuição geográfica e aptidão agrícola**. Santa Maria: Orium, 2008. 70p.

DLUGOß, V. et al. Model based analysis of lateral and vertical soil carbon fluxes induced by soil redistribution processes in a small agricultural catchment. **Earth Surf. Process. Landforms**, v. 37, p. 193–208, 2012.

DONAGEMMA, G. K. et al. (Org.) **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. (Documentos, 132).

GIASSON, E. et al. Digital soil mapping using multiple logistic regressions on terrain parameters in Southern Brazil. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 3, p.262-268, 2006.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 211 p.



EMBRAPA. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos.** Brasília, 1995. 116p

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

FERREIRA, I.O. et al. Estudo Sobre a Utilização Adequada da Krigagem na Representação Computacional de Superfícies Batimétricas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, p. 831-842, 2013.

FLORES, C. A. et al. **Os solos do Vale dos Vinhedos.** Brasília: Embrapa, 2012. 176 p.

FRANCO, A. M. P. et al. Delineamento das Unidades de Mapeamento de Solos Utilizando o Google Earth. **Geociências**, v. 34, p. 861 - 871-871, 2015.

GOLOSOV, V.; LITVIN, L. The sediment budgets of cultivated slopes and slope catchments: an evaluation of the influence of slope morphology. **IAHS-AISH**, v. 291, p. 3-10, 2005.

HALL, M. et al. **The WEKA Data Mining Software: An Update;** SIGKDD Explorations, 2009.

HANSEN, M. K. et al. Inductively mapping expertderived soil-landscape units within Dambo Wetland catenae using multispectral and topographic data. **Geoderma**, v. 150, p. 72-84, 2009.

HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A.B. A soil science renaissance. **Geoderma**, v. 148, n. 2, p. 123-129, 2008.

HENGL, T.; ROSSITER, D. G. Supervised Landform classification to enhance and replace photo-interpretation in semi-detailed soil survey. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 6, p. 1810-1822, 2003.

IBGE. **Manual técnico de pedologia.** Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 316 p.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics.** New York: Oxford University, 1989. 561p.

JENNY, H. **Factors of soil formation; a system of quantitative pedology.** New York: McGraw-Hill, 1941. 281p.

KLAMT, E. et al. **Solos do município de São João do Polêsine: classificação, distribuição geográfica e aptidão de uso.** Santa Maria: UFSM, Departamento de Solos, 1997. 93p.

LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B.; VOLTZ, M. **Digital soil mapping: an introductory perspective.** Amsterdam: Elsevier, 2007, 600 p.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n.1, p. 159-174, 1977.

LEITE, F.P. Contribuição ao conhecimento fitoecológico do sul do Brasil. **Ciência & Ambiente**, v. 1, n. 24, p. 51-73, 2002.

MAIDMENT, D. R. GIS and hydrologic modeling. In: Goodchild, M. F.; Parks, B. O.; Steyaert, L. T. (Ed). **Environmental modeling with GIS**. New York: Oxford University Press, 1993. Cap. 14, p. 147-167.

McBRATNEY, A.B.; MENDONÇA SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, p. 3-52, 2003.

McBRATNEY, A. B. et al. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**, v. 97, p. 293-327, 2000.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; RUHOFF, A. L. Utilização de métodos de representação espacial para o cálculo do fator topográfico na equação Universal de Perdas de Solo Revisada em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1455-1462, 2010.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental. **Ciência Rural**, v. 42, n .9, p. 1575-1582, 2012.

MINELLA, J. P. G. et al. Changing Sediment yield as an indicator of improved soil management practices in southern Brazil. **Catena**, v. 79, p. 228-236, 2009.

MOORE, I.D. et al. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 443-452, 1993.

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

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1951. 42 p.

NOVAES, R. F. et al. **Tópicos em ciências do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.2-54.

OLAYA, V. **A gentle introduction to SAGA GIS**. 2004. 202p.

PEDRON, F. de A.; DALMOLIN, R. S. D.; AZEVEDO, A. C. Utilização do sistema de avaliação do potencial de uso urbano das terras no diagnóstico ambiental do município de Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, v. 36, n. 2, p. 468-477, 2006.

PEDRON, F. A.; DALMOLIN, R. S. D. Solos da região do rebordo do Planalto Meridional no Rio Grande do Sul. In: SCHUMACHER, M. V.; LONGUI, S. J.; BRUM, E. J.; KILCA, R. V. (Org.). **A Floresta Estacional Subtropical: caracterização e ecologia no rebordo do Planalto Meridional**. Santa Maria: s.n., 2011. p. 33-51.

PEDRON, F.A. et al. Morfologia e classificação taxonômica de Neossolos e saprolitos derivados de rochas vulcânicas da formação Serra Geral no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p.119-128, 2009.

QI, F; ZHU, A. X. Knowledge discovery from soil maps using inductive learning. **IJ GIS**. v. 17, p. 71-95, 2003.

RAMALHO-FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 65 p.

RUIZ, L. F. C.; TEN CATEN, A. & DALMOLIN, R. S. D. **ADtoSIG - Software de Conversão**. Universidade Federal de Santa Maria, v.1, 2011.

SAGA DEVELOPMENT TEAM. **SAGA GIS**. Hamburg, Alemanha, 2010. Versão 2.0.6.

Disponível em: <<http://www.saga-gis.org>, 2010>.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. Viçosa: SBCS, 2005. 100 p.

SILVA, C.C. et al. Mapeamento Pedológico Digital da Folha Botucatu (SF-22-Z-B-VI-3): Treinamento de Dados em Mapa Tradicional e Validação de Campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.846-857, 2013.

SIRTOLI, A.E. Mapeamento de solos com auxílio da geologia, atributos do terreno e índices espectrais integrados por redes neurais artificiais. 2008. 96f. **Tese (Doutorado em Geologia)** – Curso de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, PR.

STRECK, E.V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2.ed. Porto Alegre, EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222p.

STRECK, E.V. et al. **Levantamento de Solos da Bacia Experimental de Arvorezinha**. 2001. 32 p.

ten CATEN, A. et al. Mapeamento digital de solos através da aplicação de componentes principais em modelos logísticos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009, Natal, RN. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p.7677-7684.

ten CATEN, A. et al. Mapeamento digital de classes de solos: características da abordagem brasileira. **Ciência Rural**, v. 42, p. 1990-1997, 2012.

ten CATEN, A. et al. Mapeamento Digital de Solos: Estratégias de Pré-processamento de dados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 4, p. 1083-1091, 2012.

ten CATEN, A. et al. Resolução espacial de um modelo digital de elevação definida pela função wavelet. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 449-457, 2012.

USDA. Soil Conservation Service. Soil Survey Staff. **Soil Survey Manual**. Washington: Govt. Print. Off., 1951. 503 p.

USEIKA, T. et al. Aplicabilidade do modelo SWAT na simulação hidrossedimentológica em uma pequena bacia hidrográfica rural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1-9, 2012.

VERTESSY, R. A. et al. Predicting water yield from a mountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model. **Journal Hydrology**, v. 150, p. 665-700, 1993.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVARES V., V.H.; SCHAEFFER, C.E.G.R., (Ed). **Tópicos em ciência do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Viçosa, 2000. p.1-54.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., (Ed). **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, 1980. 350p.

WEBSTER, R. The development of pedometrics. **Geoderma**, v. 62, p. 1–15, 1994.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. Digital terrain analysis (Ed.). **Terrain analysis: principles and applications**. New York: Wiley & Sons, 2000. p. 1-27.

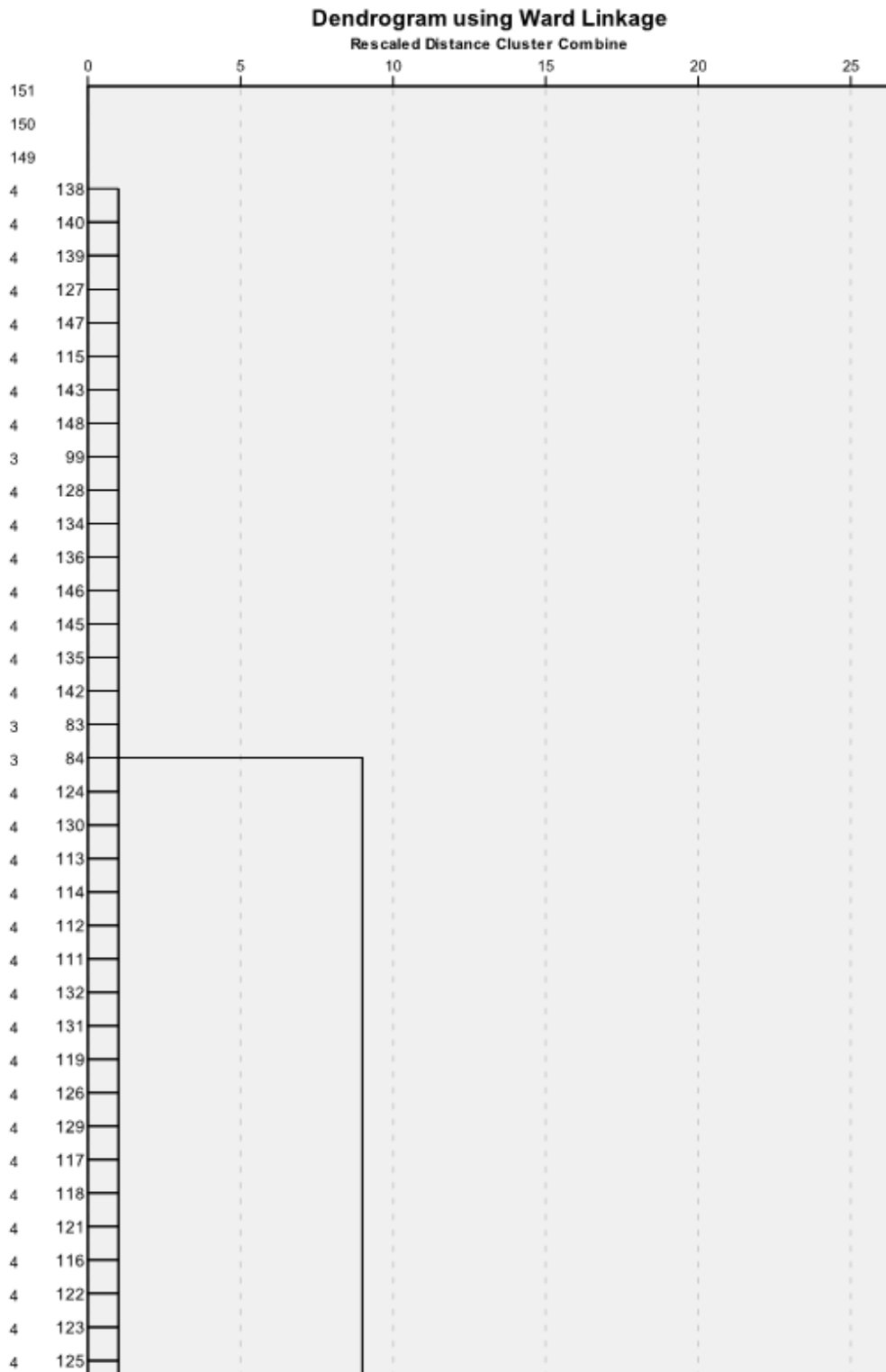
ZEVENBERGEN, L. W.; THORNE, C. R. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 12, p.47-56, 1987.

ZHOU, B.; ZHANG, X.; WANG, R. Automated soil resources mapping based on decision tree an Bayesia predictive modeling. **Journal Zhejiang**, v. 5, p. 782-795, 2004.

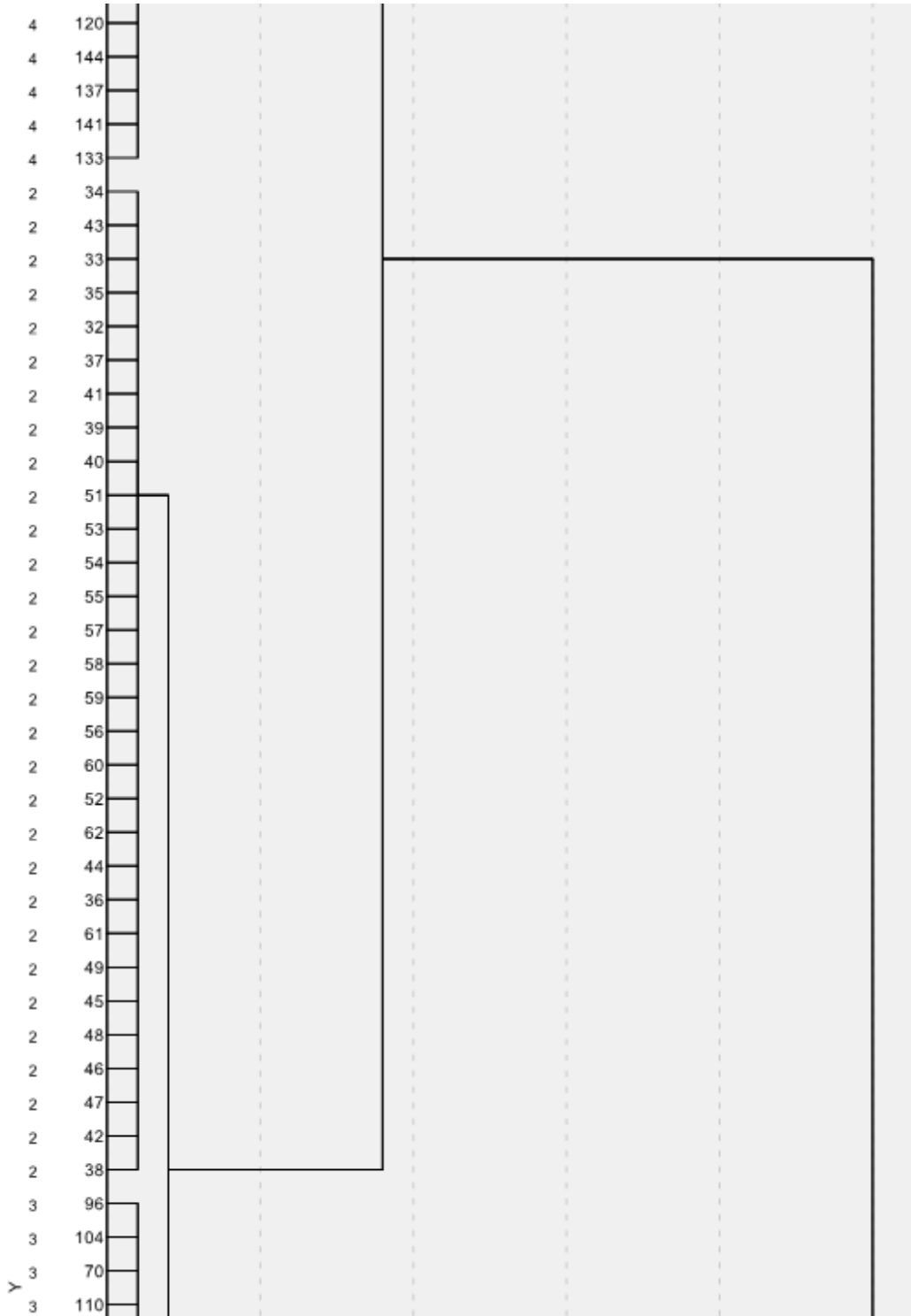
ZHU, A. X. A similarity model for representing soil spatial information. **Geoderma**, v. 77, p. 217-242. 1997.

Apêndice

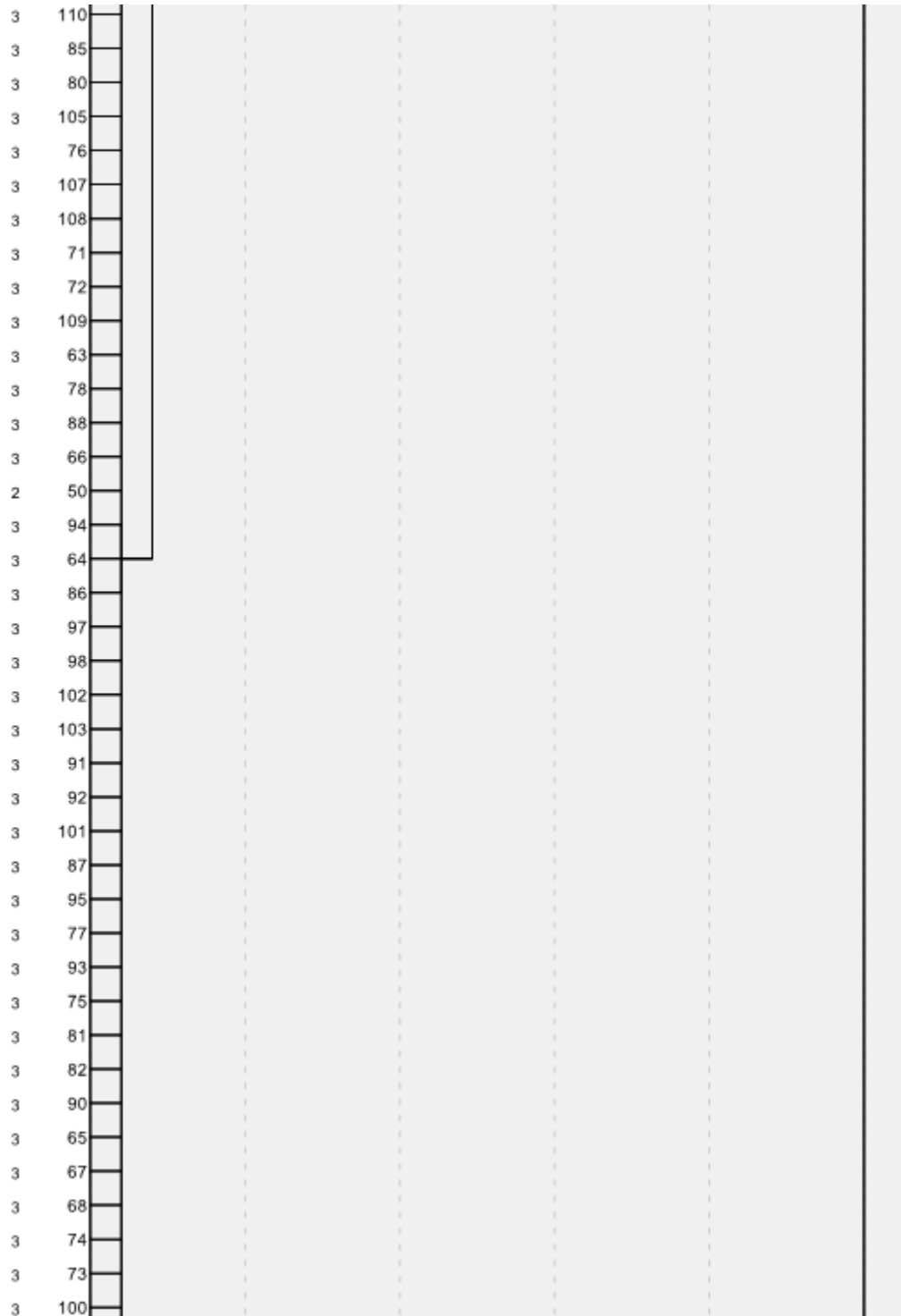
Apêndice A - Dendrograma hierárquico de 157 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 1. 1: NEOSSOLO LITÓLICO; 2: NEOSSOLO REGOLÍTICO; 3: CAMBISSOLO HÁPLICO; 4: ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO.



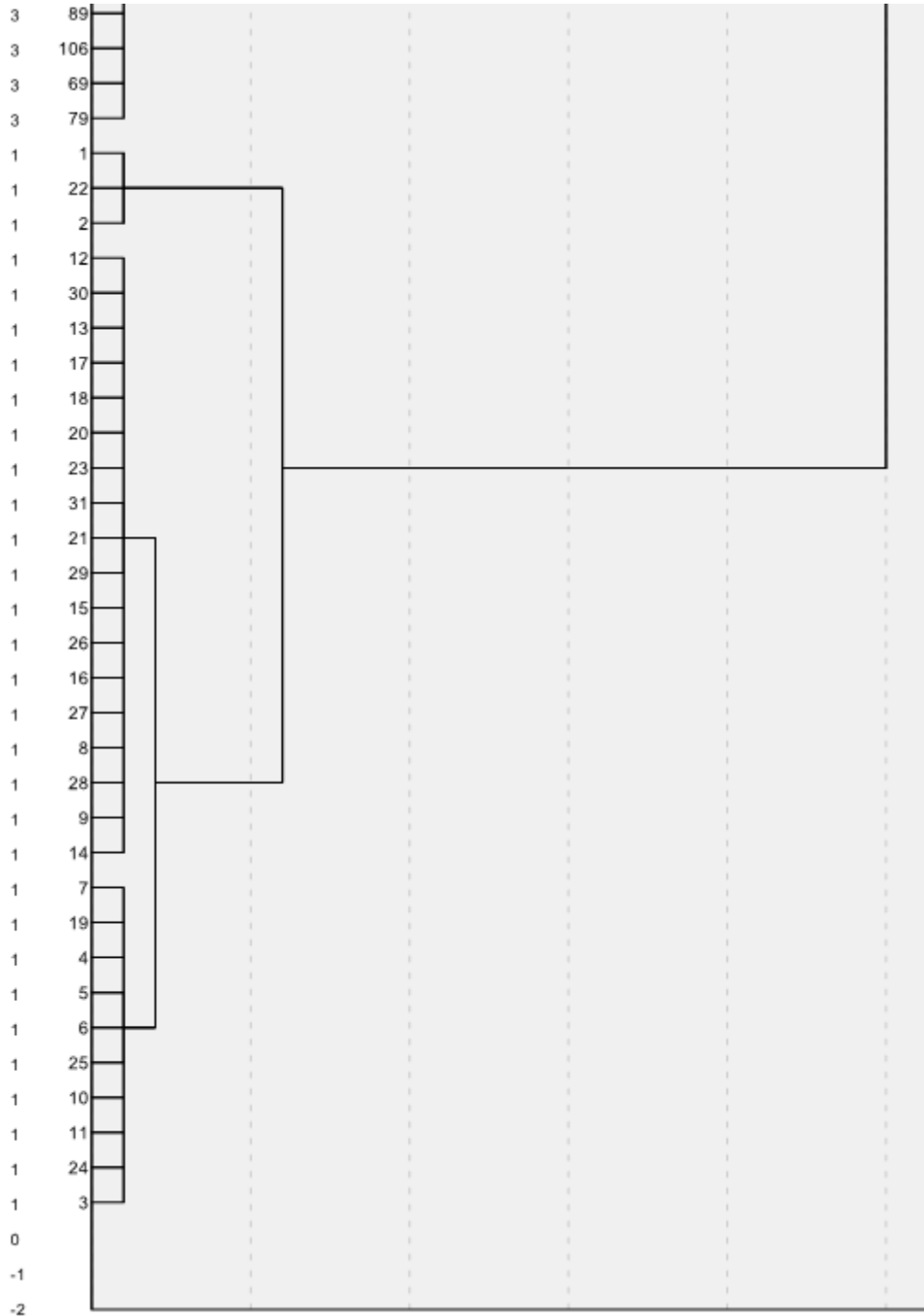
Apêndice A (continuação) – Dendrograma hierárquico de 157 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 1. 1: NEOSSOLO LITÓLICO; 2: NEOSSOLO REGOLÍTICO; 3: CAMBISSOLO HÁPLICO; 4: ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO.



Apêndice A (continuação) – Dendrograma hierárquico de 157 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 1. 1: NEOSSOLO LITÓLICO; 2: NEOSSOLO REGOLÍTICO; 3: CAMBISSOLO HÁPLICO; 4: ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO.

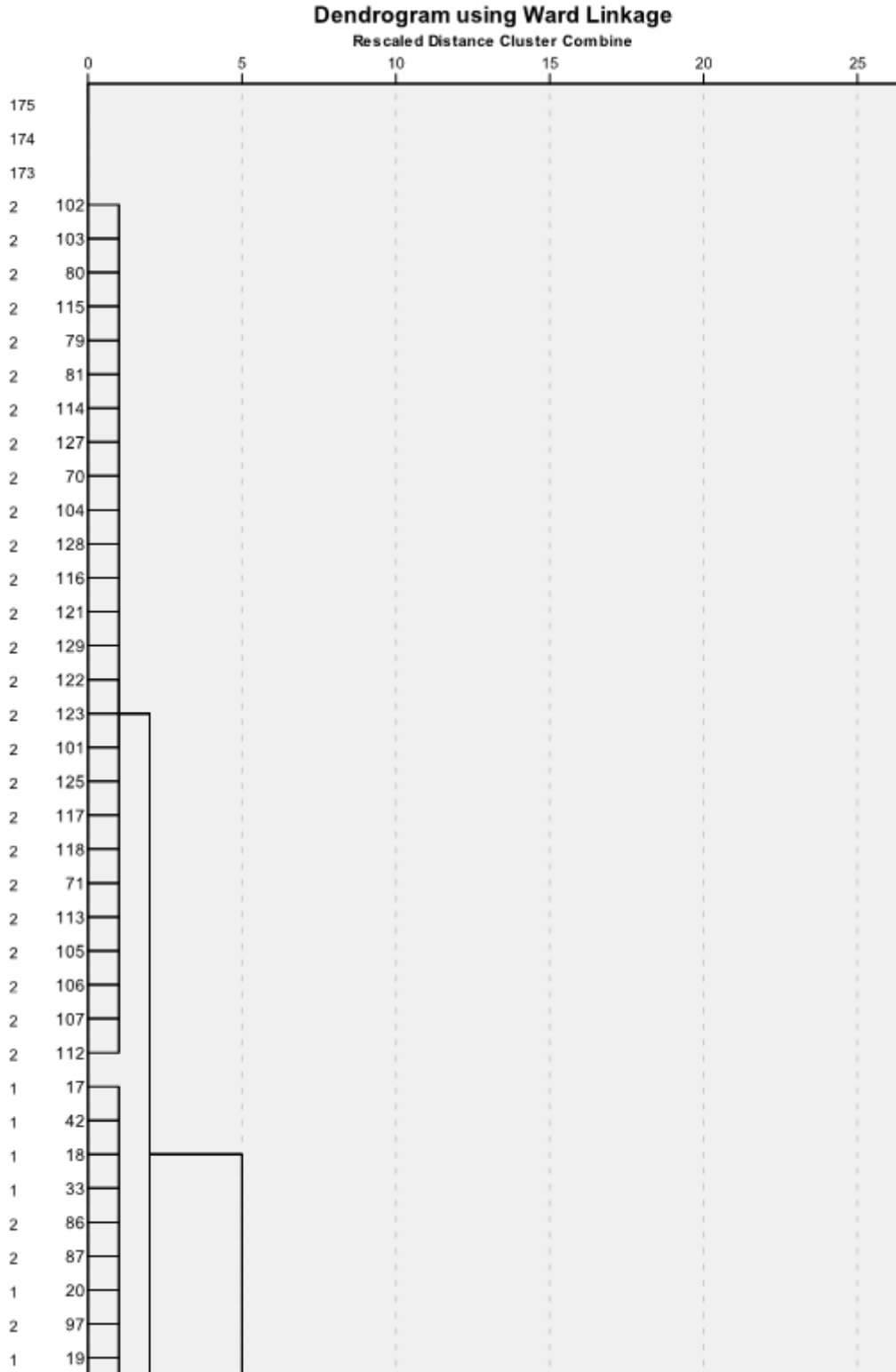


Apêndice A (continuação) – Dendrograma hierárquico de 157 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 1. 1: NEOSSOLO LITÓLICO; 2: NEOSSOLO REGOLÍTICO; 3: CAMBISSOLO HÁPLICO; 4: ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO.

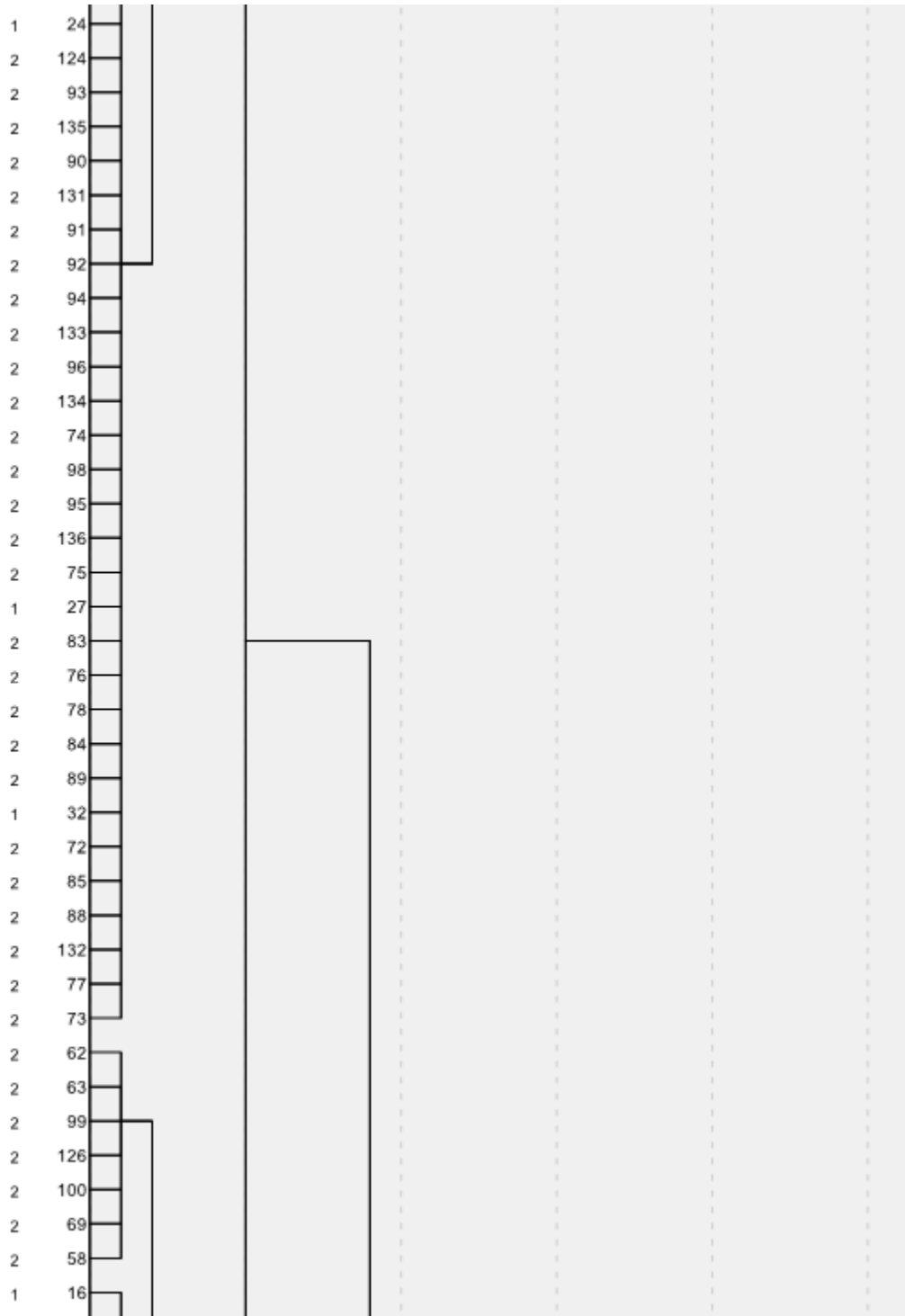




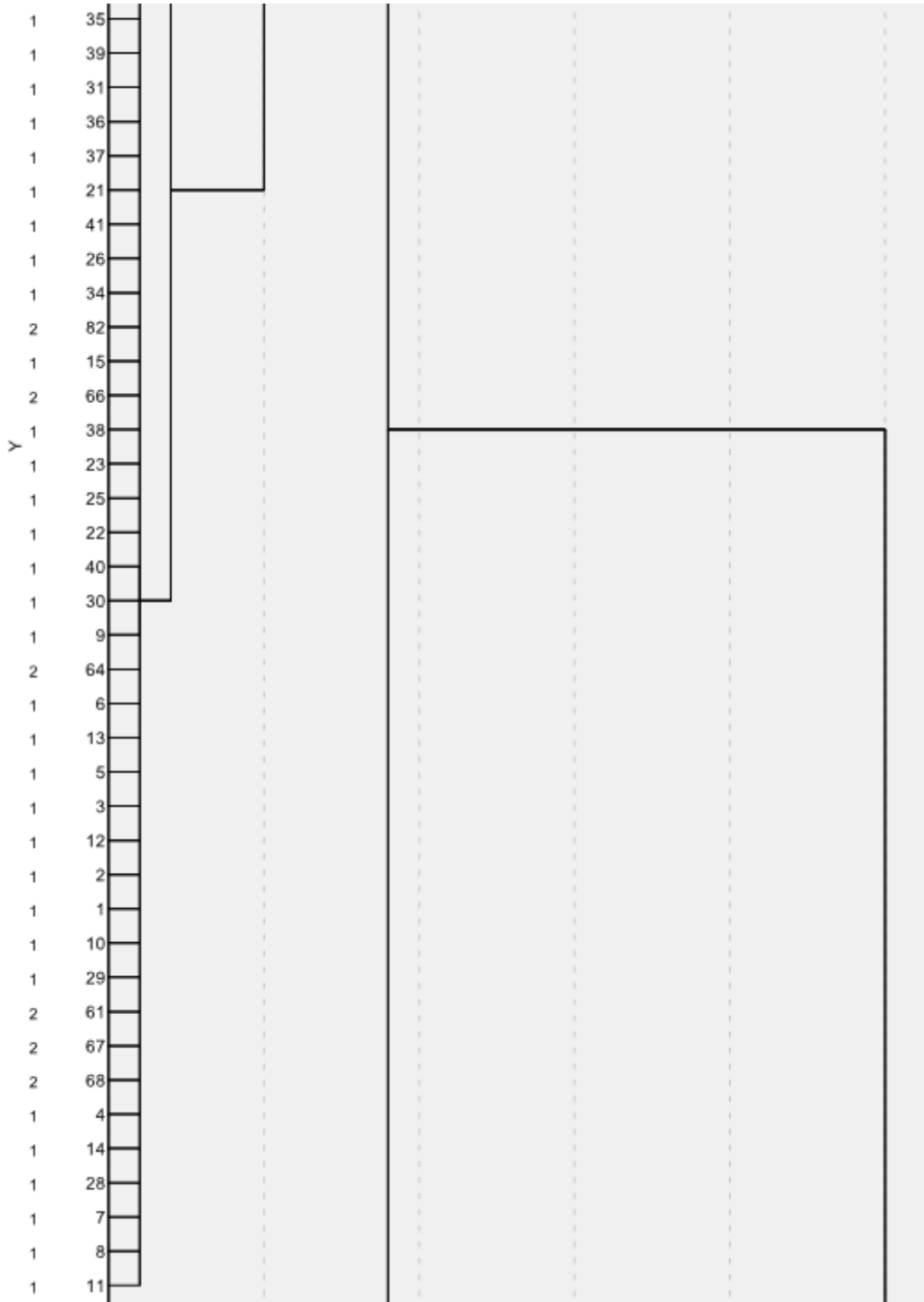
Apêndice B - Dendrograma hierárquico de 171 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 2. 1: ARGISSOLO VERMELHO; 2: CAMBISSOLO HÁPLICO; 3: ARGISSOLO ACINZENTADO.



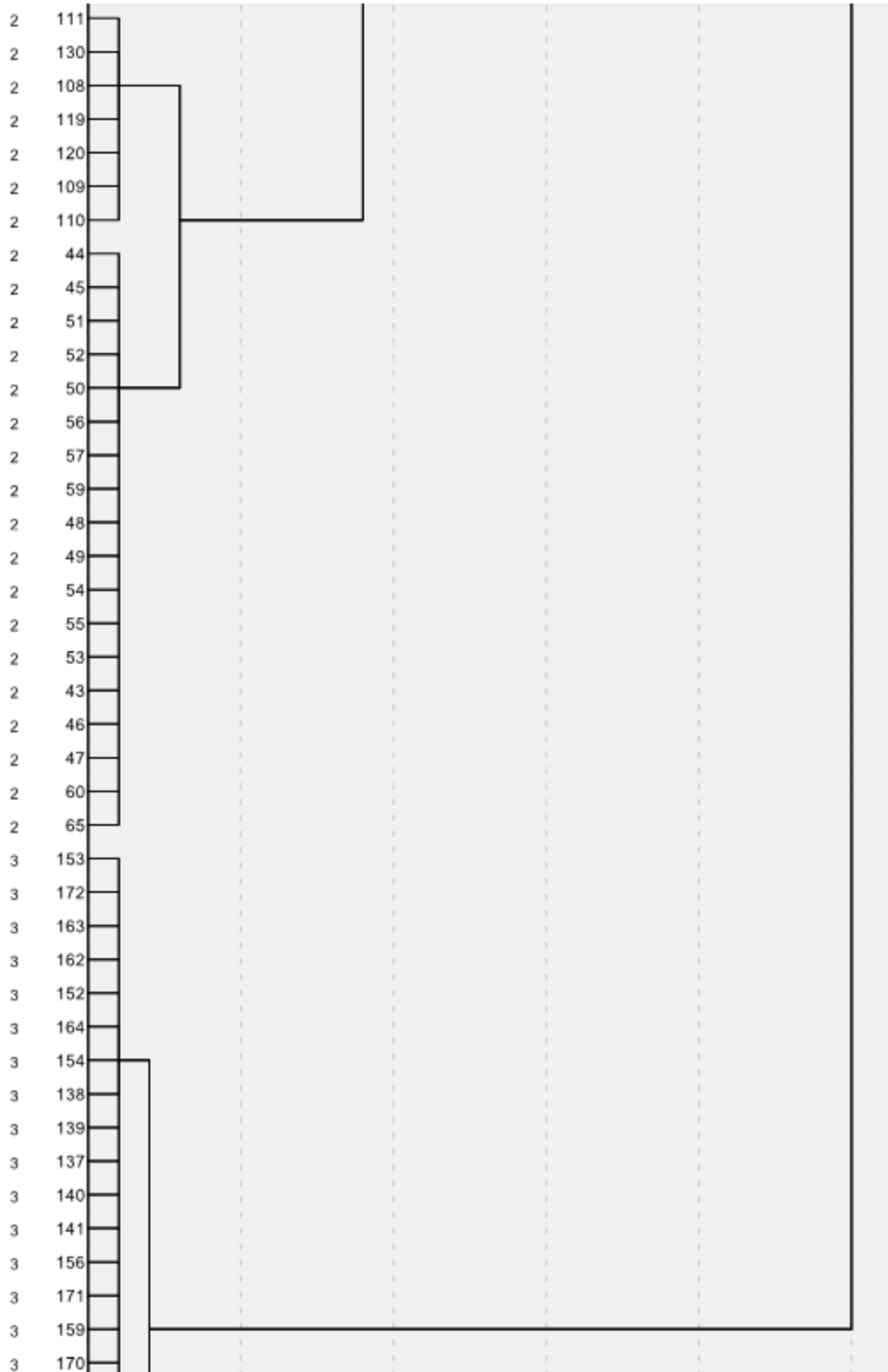
Apêndice B (continuação) – Dendrograma hierárquico de 171 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 2. 1: ARGISSOLO VERMELHO; 2: CAMBISSOLO HÁPLICO; 3: ARGISSOLO ACINZENTADO.



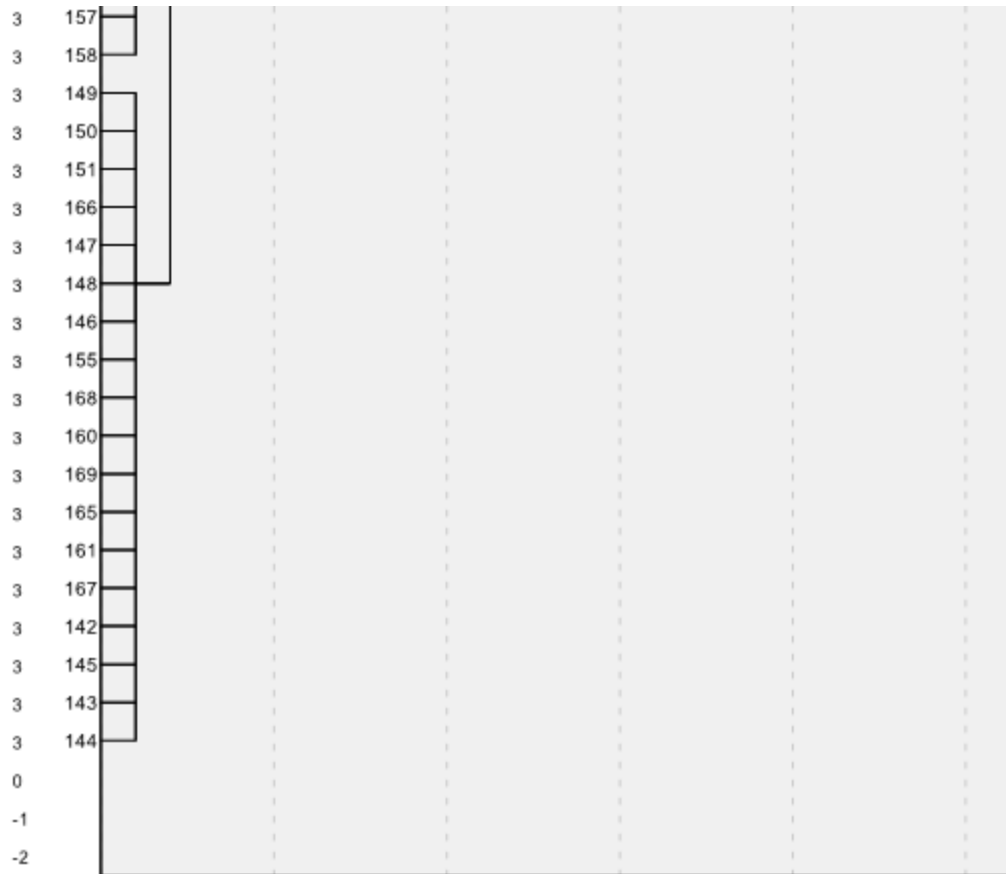
Apêndice B (continuação) – Dendrograma hierárquico de 171 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 2. 1: ARGISSOLO VERMELHO; 2: CAMBISSOLO HÁPLICO; 3: ARGISSOLO ACINZENTADO.



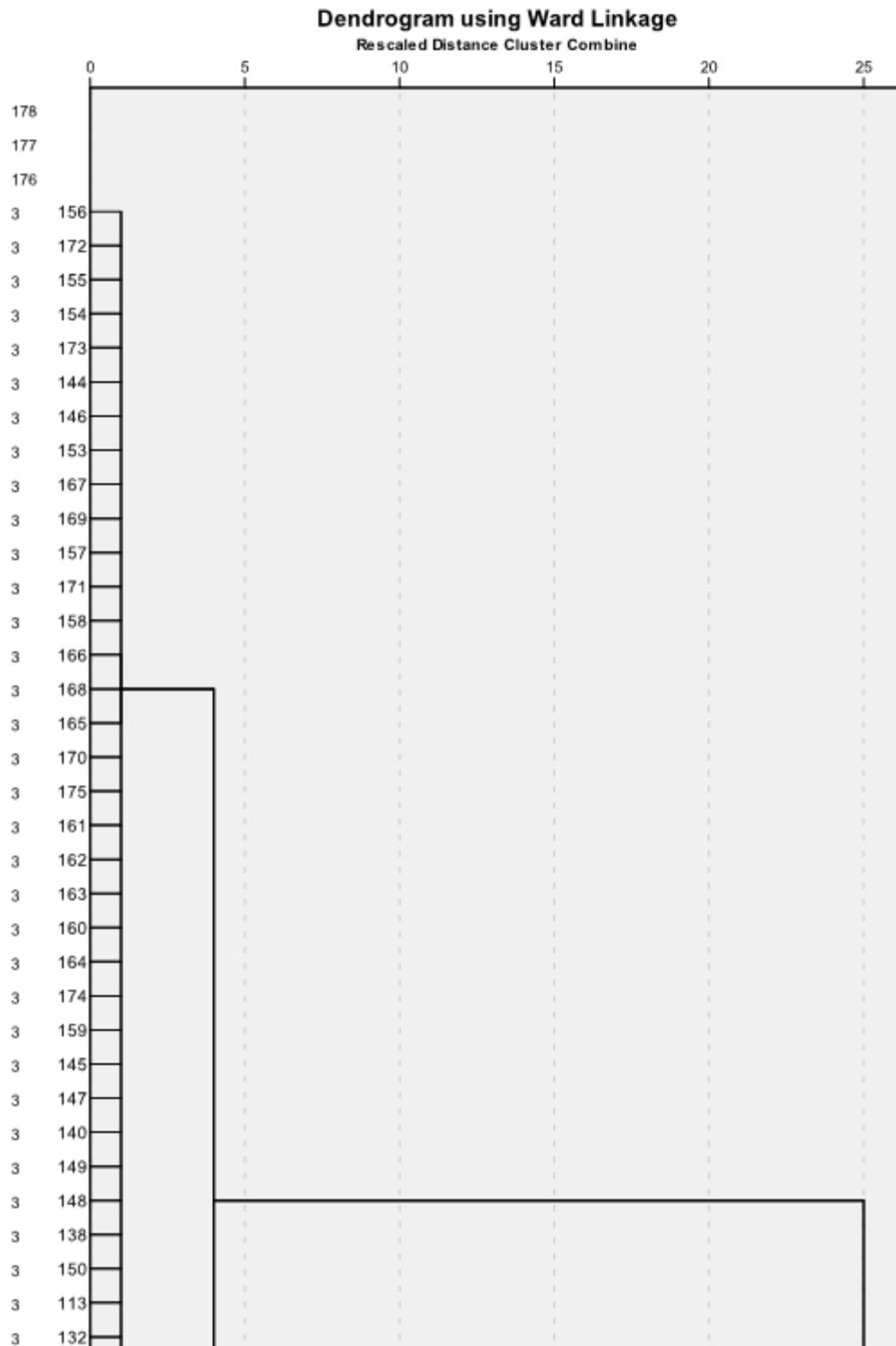
Apêndice B (continuação) – Dendrograma hierárquico de 171 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 2. 1: ARGISSOLO VERMELHO; 2: CAMBISSOLO HÁPLICO; 3: ARGISSOLO ACINZENTADO.



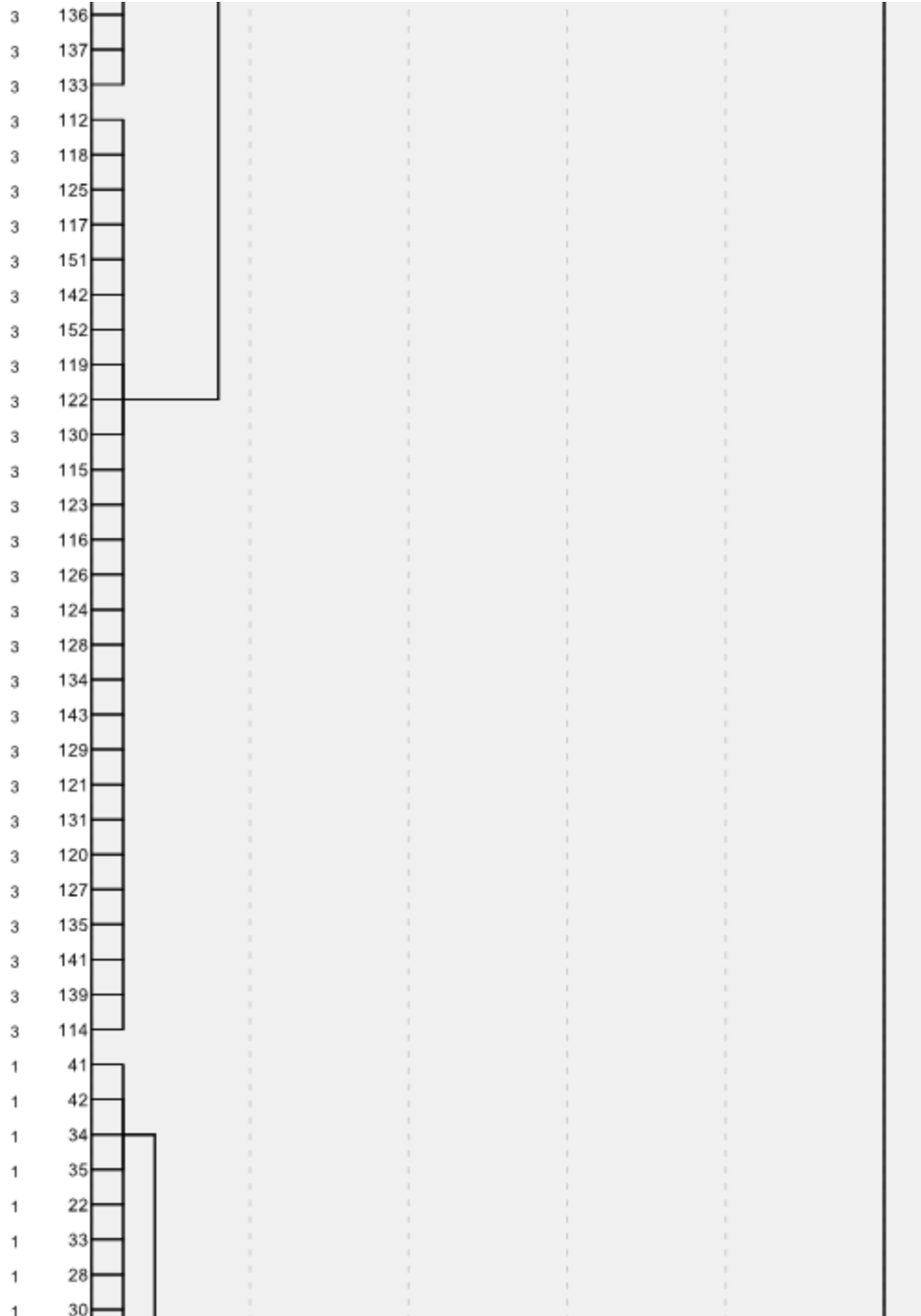
Apêndice B (continuação) – Dendrograma hierárquico de 171 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 2. 1: ARGISSOLO VERMELHO; 2: CAMBISSOLO HÁPLICO; 3: ARGISSOLO ACINZENTADO.



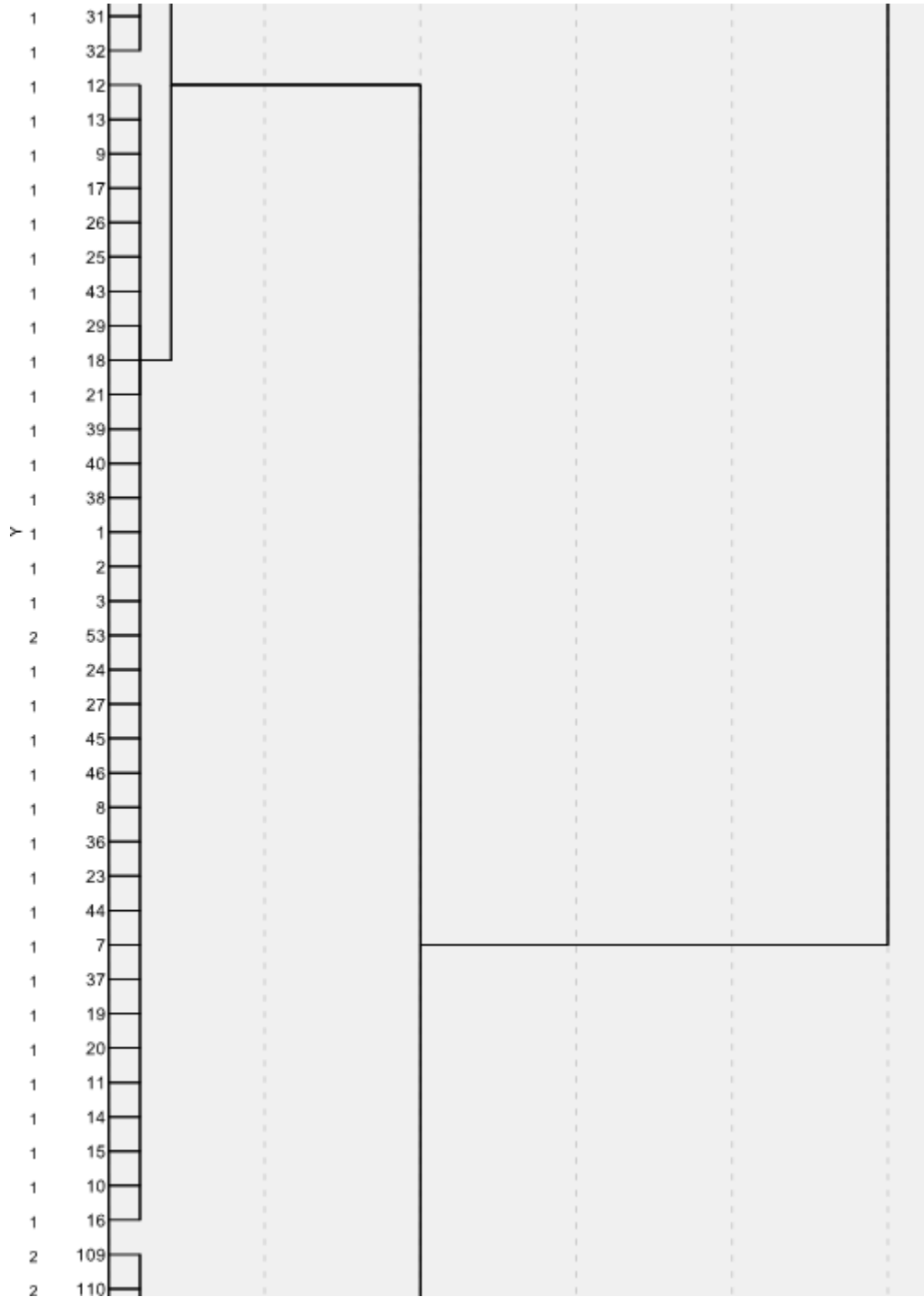
Apêndice C - Dendrograma hierárquico de 174 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 3. 1: ARGISSOLO VERMELHO; 2: NEOSSOLO REGOLÍTICO; 3: ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO.



Apêndice C (continuação) – Dendrograma hierárquico de 174 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 3. 1: ARGISSOLO VERMELHO; 2: NEOSSOLO REGOLÍTICO; 3: ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO.

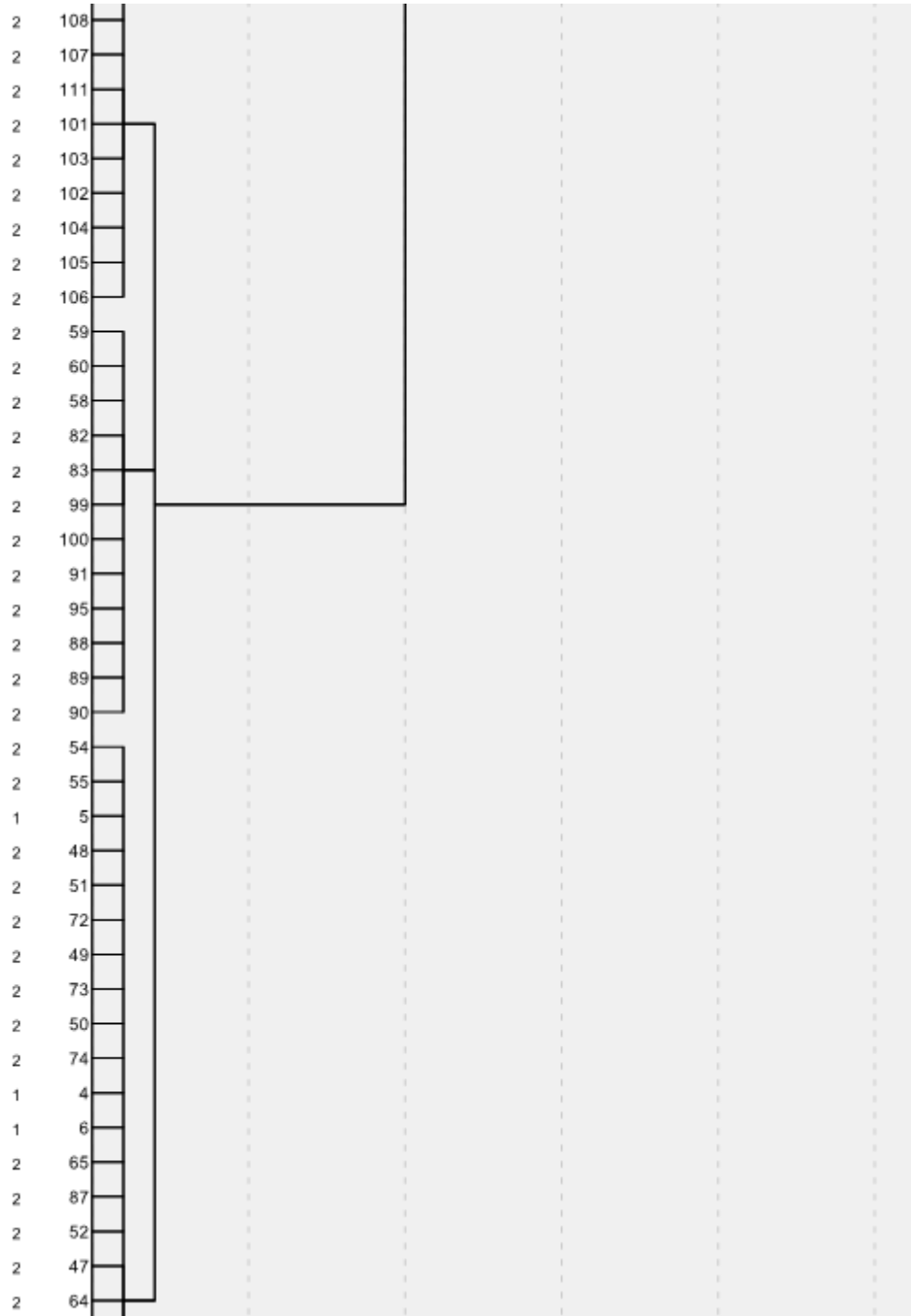


Apêndice C (continuação) – Dendrograma hierárquico de 174 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 3. 1: ARGISSOLO VERMELHO; 2: NEOSSOLO REGOLÍTICO; 3: ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO.

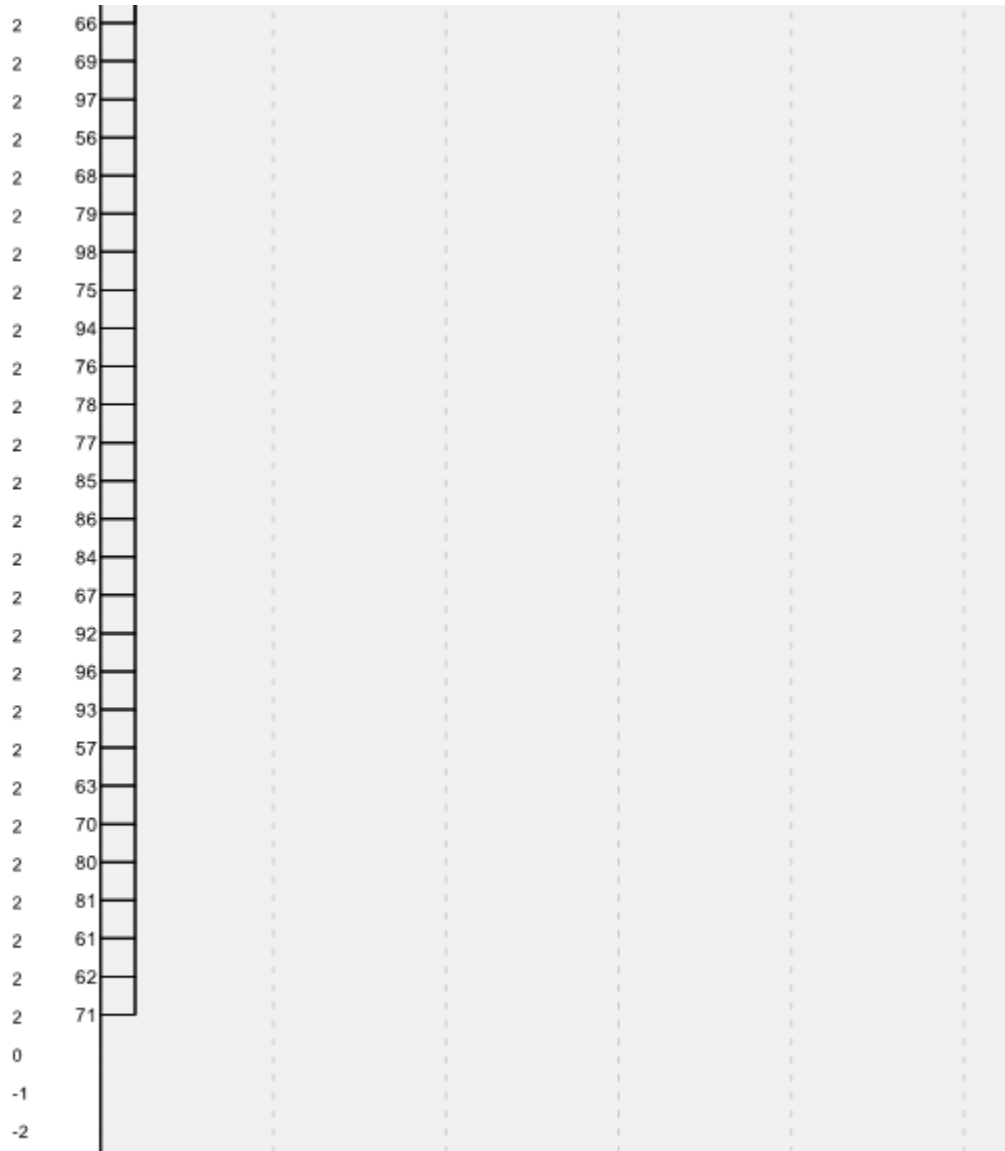




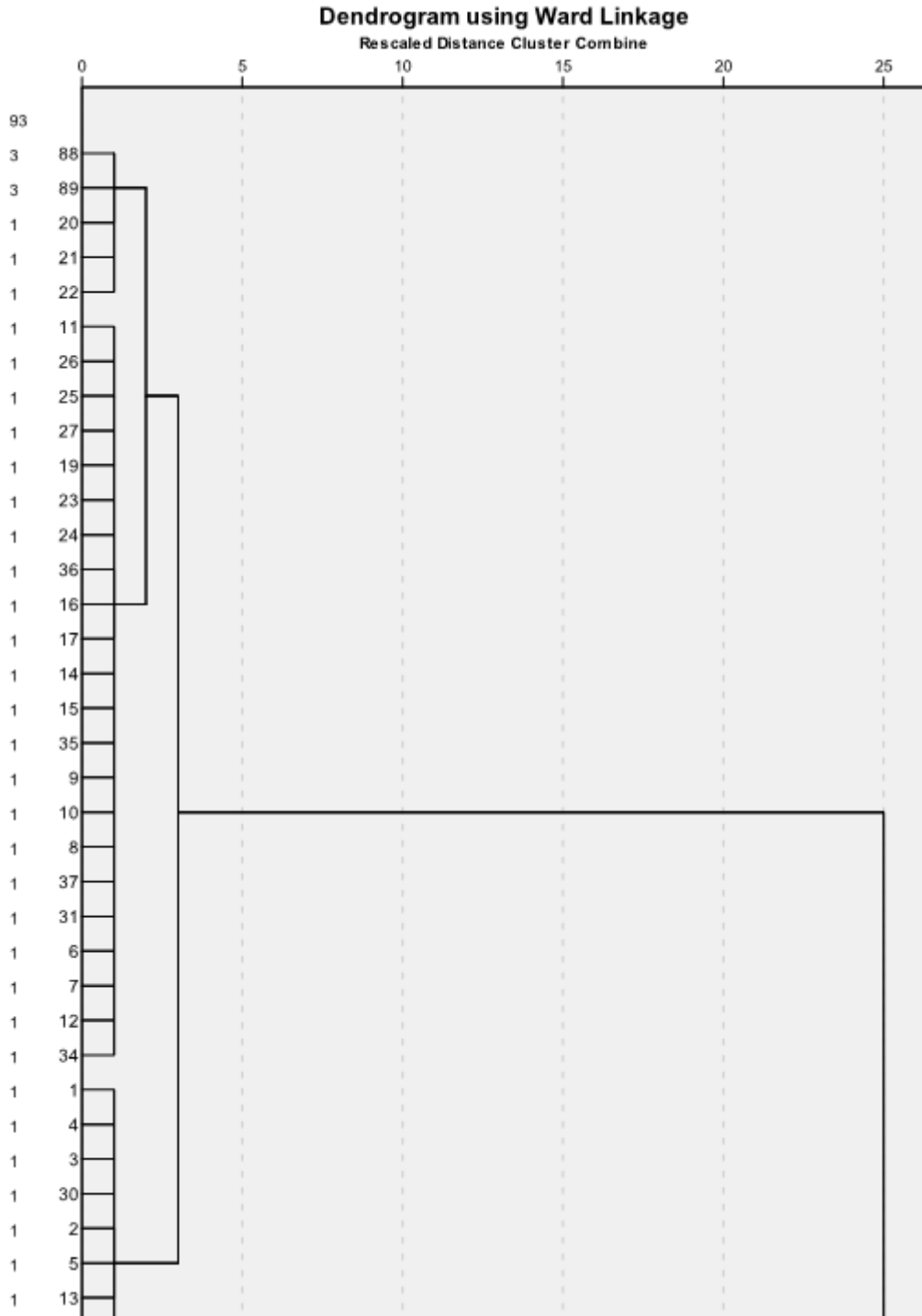
Apêndice C (continuação) – Dendrograma hierárquico de 174 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 3. 1: ARGISSOLO VERMELHO; 2: NEOSSOLO REGOLÍTICO; 3: ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO.



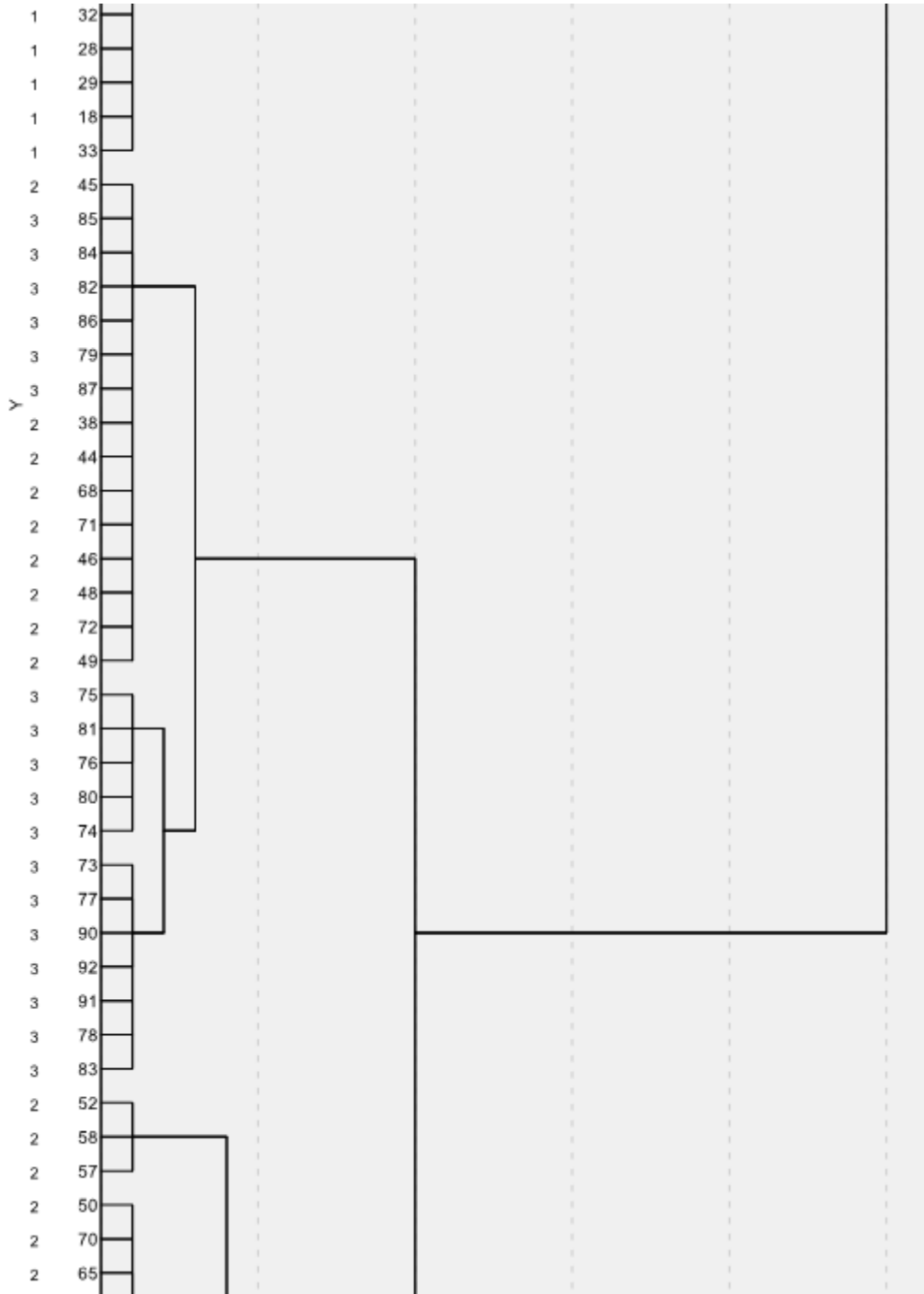
Apêndice C (continuação) – Dendrograma hierárquico de 174 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 3. 1: ARGISSOLO VERMELHO; 2: NEOSSOLO REGOLÍTICO; 3: ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO.



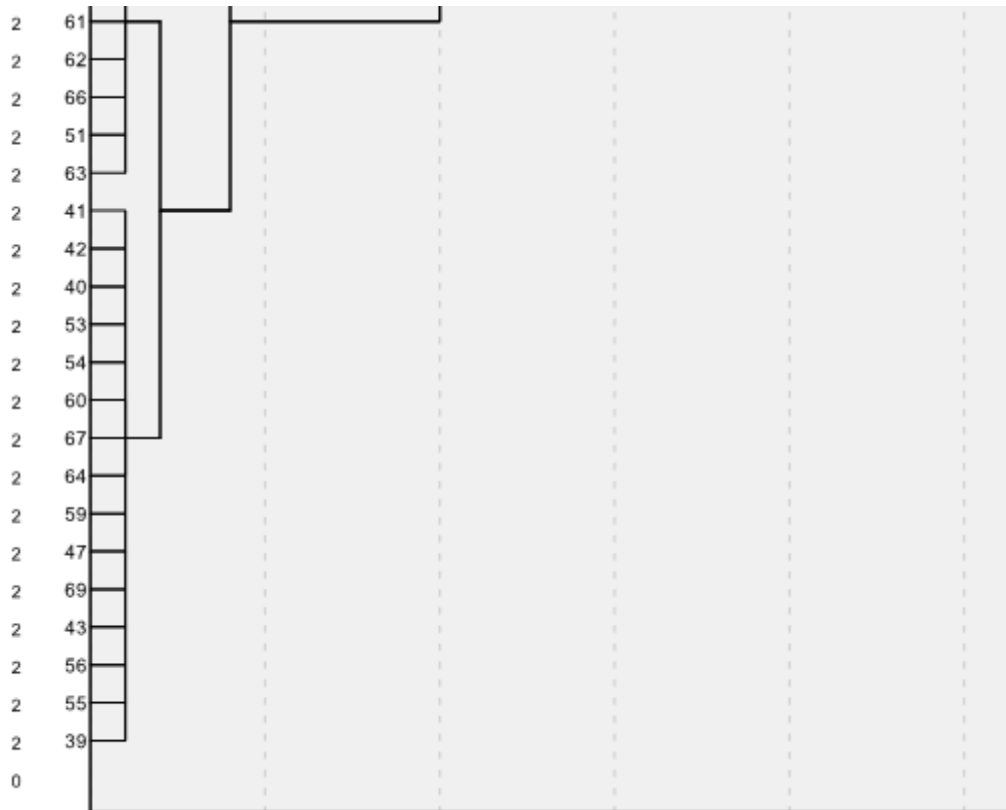
Apêndice D - Dendrograma hierárquico de 91 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 4. 1: CHERNOSSOLO HÁPLICO; 2: CAMBISSOLO HÁPLICO; 3: ARGISSOLO AMARELO.



Apêndice D (continuação) – Dendrograma hierárquico de 91 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 4. 1: CHERNOSSOLO HÁPLICO; 2: CAMBISSOLO HÁPLICO; 3: ARGISSOLO AMARELO.



Apêndice D (continuação) – Dendrograma hierárquico de 91 casos de solos (Método Ward - valores médios dos atributos do terreno) da catena 4. 1: CHERNOSSOLO HÁPLICO; 2: CAMBISSOLO HÁPLICO; 3: ARGISSOLO AMARELO.



Apêndice E - Perfil de NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico fragmentário descrito na catena 1.



Apêndice F - Monólito de NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico extraído na catena 1.



Apêndice G - Perfil de CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico léptico descrito na catena 1.





Apêndice H - Perfil de ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO Distrófico abrupto descrito na catena 1.



Apêndice I - Perfil de ARGISSOLO VERMELHO Alítico abrupto descrito na catena 2.



Apêndice J - Monólito de ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico abrupto extraído na catena 2.



Apêndice K - Perfil de CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico léptico descrito na catena 2.



Apêndice L - Perfil de ARGISSOLO ACINZENTADO Eutrófico abrupto descrito na catena 2.



Apêndice M - Perfil de ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abruptico descrito na catena 3.



Apêndice N - Perfil de ARGISSOLO BRUNO-ACINZENTADO Distrófico abrupto descrito na catena 3.



Apêndice O - Perfil de CHERNOSSOLO HÁPLICO Órtico típico descrito na catena 4.

