

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA ESTIMATIVA DE ATRIBUTOS DO SOLO E  
IDENTIFICAÇÃO DE COMPARTIMENTOS DA PAISAGEM EM LATOSSOLOS  
DE BASALTO NO PLANALTO DO RS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Priscila Vogelei Ramos**

**Santa Maria, RS, Brasil.  
2015**

**SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA ESTIMATIVA DE ATRIBUTOS DO SOLO E  
IDENTIFICAÇÃO DE COMPARTIMENTOS DA PAISAGEM EM LATOSSOLOS  
DE BASALTO NO PLANALTO DO RS**

**Priscila Vogelei Ramos**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos físicos e morfogenéticos do solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo.**

**Orientador: Prof. Dr. Ricardo Simão Diniz Dalmolin**

Santa Maria, RS, Brasil.  
2015

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

Ramos, Priscila Vogelei  
Suscetibilidade magnética na estimativa de atributos do solo e identificação de compartimentos da paisagem em Latossolos de basalto no Planalto do RS / Priscila Vogelei Ramos.-2015.  
82 p.; 30cm

Orientador: Ricardo Simão Diniz Dalmolin  
Coorientador: Fabrício de Araújo Pedron  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2015

1. Pedometria 2. Geoestatística 3. Split Moving Windows I. Dalmolin, Ricardo Simão Diniz II. Pedron, Fabrício de Araújo III. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado**

**SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA ESTIMATIVA DE ATRIBUTOS DO SOLO E  
IDENTIFICAÇÃO DE COMPARTIMENTOS DA PAISAGEM EM LATOSSOLOS  
DE BASALTO NO PLANALTO DO RS**

elaborada por  
**Priscila Vogelei Ramos**

Como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Ciência do Solo**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Fabício de Araújo Pedron, Dr. (UFSM)**  
(Coorientador)

---

**Diego Silva Siqueira, Dr. (UNESP)**

---

**José Marques Júnior, Dr. (UNESP)**

Santa Maria, 25 de fevereiro de 2015.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus e a Nossa Senhora.

Aos meus pais Carla Mey Vogelei Ramos e José da Silva Ramos, que sempre me deram apoio incondicional em todas as minhas decisões.

Ao maninho José Carlos que mesmo estando distante sempre me apoiou e me incentivou aos estudos. À minha irmã Paola que sempre esteve ao meu lado me oferecendo seu ombro amigo e palavras de conforto.

Ao Professor Ricardo Simão Diniz Dalmolin pela orientação, paciência e ensinamentos ao longo deste período.

Aos professores Fabrício de Araújo Pedron e Ricardo Bergamo Schenato que colaboraram com seus conhecimentos na minha formação.

Aos professores Jaime Antônio de Almeida e José Marques Júnior pela disponibilidade dos equipamentos e ensinamentos.

Aos amigos do laboratório de Pedologia que me auxiliaram nas análises de laboratório Cassiane, Ismael, Ricardo, João Pedro, Vicente, Lucas e principalmente ao colega Jean pela paciência e coleguismo.

Aos colegas do nosso grande grupo de pesquisa, Ândrea, Pedro Paulo, André, Gabriel, Luis Antônio, Angélica, Juliana e Estéfane pela amizade e convivência.

Aos amigos do grupo de pesquisa da Gênese e Mineralogia da UDESC em Lages e ao grupo CSME em Jaboticabal, especialmente ao Diego e Daniel pela disponibilidade e contribuições no meu trabalho.

Ao meu noivo Cleiton pelo apoio e companheirismo.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

Finalmente, a todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para realização deste trabalho.

**“Se andarmos apenas por caminhos já traçados, chegaremos apenas aonde os outros chegaram”.**

Alexander Graham Bell

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo  
Universidade Federal de Santa Maria

### **SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA ESTIMATIVA DE ATRIBUTOS DO SOLO E IDENTIFICAÇÃO DE COMPARTIMENTOS DA PAISAGEM EM LATOSSOLOS DE BASALTO NO PLANALTO DO RS**

AUTORA: PRISCILA VOGELI RAMOS

ORIENTADOR: RICARDO S. D. DALMOLIN

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 25 de fevereiro de 2015.

A variabilidade dos atributos do solo está relacionada aos fatores ambientais que condicionam os processos de formação do solo. Diante disso, diferentes técnicas têm sido empregadas para mapear essa variabilidade, dentre estas técnicas, a leitura da suscetibilidade magnética (SM) tem se mostrado como alternativa por sua estreita relação com os demais atributos do solo. O presente estudo tem por objetivo determinar a suscetibilidade magnética de amostras em Latossolos de uma área experimental no Rio Grande do Sul, relacionando com diferentes atributos do solo para compreender a distribuição espacial e delimitar diferentes compartimentos da paisagem. A área de estudo de 350 ha está localizada no município de Santo Augusto, onde foram marcadas três transeções desde a cota mais elevada até a cota mais baixa da área, totalizando 1450 m. Nestas transeções foram marcados 29 pontos georreferenciados, em distância regular de 50 m entre os pontos e entre as transeções. Foram coletadas amostras das profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,15, 0,15-0,30 e 0,30-0,60 m onde se determinou a granulometria, carbono orgânico do solo e a SM. Também foram abertas cinco trincheiras ao longo das transeções distribuídas em locais diferenciados no relevo ao longo da topossequência, onde foi realizada a descrição morfológica e análises químicas, físicas, mineralógicas e de SM nas amostras de cada horizonte. No estudo 1, os dados provenientes dos atributos nos perfis foram submetidos ao teste de correlação linear de Pearson para averiguar a correlação da SM com os outros atributos do solo. Com os dados das transeções foram realizadas regressões lineares para cada profundidade a fim de avaliar o quanto a SM contribui para a predição do teor de argila, areia e carbono orgânico do solo. Para verificar a dependência espacial dos atributos nos pontos amostrais, foi utilizada a geoestatística com ajustes de variogramas. Os valores foram interpolados por meio da krigagem ordinária e posteriormente foram gerados mapas dos atributos do solo na topossequência para as quatro profundidades. No estudo 2 os dados provenientes das amostras das transeções foram submetidos à estatística descritiva e análise da ferramenta “Split Moving Window” (SMW), para averiguar o comportamento da SM na determinação dos limites de compartimentos da paisagem. De acordo com os dois estudos pode-se inferir que a SM tem potencial para aplicação no mapeamento de determinados atributos do solo, bem como potencial para determinação de limites dos compartimentos da paisagem.

**Palavras-Chave:** Pedometria, variabilidade espacial, Split Moving Windows.

## **ABSTRACT**

Master Dissertation  
Graduate Program in Soil Science  
Federal University of Santa Maria

### **MAGNETIC SUSCEPTIBILITY IN SOIL ATTRIBUTES OF ESTIMATES AND IDENTIFICATION OF COMPARTMENTS LANDSCAPE IN THE OXISOL OF THE PLATEAU THE RS**

**AUTHOR: PRISCILA VOGELI RAMOS**

**ADVISOR: RICARDO S. D. DALMOLIN**

Date and Local of the Defense: Santa Maria, february 25<sup>th</sup> 2014.

The variability of soil attributes is related to environmental factors affecting soil formation processes. Different techniques have been employed to map this variability, among these techniques, the reading of the magnetic susceptibility (MS) has been shown as an alternative due to its close relationship to the soil other attributes. This study aims to determine the magnetic susceptibility of Oxisol samples in a Rio Grande do Sul experimental area, related to different soil properties to understand the spatial distribution, as well to define different compartments of the landscape. The 350 ha study area is located in Santo Augusto city, three transects where were marked from the higher quota until the lower quota area, totaling 1450 m. In these transects we scored 29 points georeferenced, 50 m distance each one. Samples were collected at 0.00-0.05, 0.05-0.15, 0.15-0.30 and 0.30-0.60 meters depth where we determined the particle size distribution, soil organic carbon and the MS. Also we opened five trenches along the transects distributed over different locations in the relief along the topossequence, where the morphological description, chemical, physical, and mineralogical analysis and MS in the samples of each horizon. In study 1, the profiles data from the attributes were submitted to Pearson linear correlation test to determine the correlation of MS with the other attributes of the soil. With transects data we carried out linear regressions for each depth in order to assess how the MS contributes to the clay, sand, and soil organic carbon prediction. To verify spatial dependence of the attributes in the sample we used points geostatistics with variograms settings. The values were interpolated using the ordinary kriging and subsequently we generated maps of soil attributes on topossequência for the four depths. In the study 2 the data from transects were submitted to descriptive statistics and analysis of the "Split Moving Window" (SMW), to investigate the behavior of the MS in determining the limits of landscape compartments. According to two studies we can infer that the MS has potential for application in the mapping of certain soil attributes, as well potential for determination of landscape compartments limits.

**Keywords:** Pedometrics, spatial variability, Split Moving Windows.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Realinhamento dos spins na presença de um campo magnético.....	17
Figura 2 – Localização da área do estudo (a), com identificação das três transeções e dos cinco perfis (P1, P2, P3, P4, P5) e isolinhas (b), elevação com base na transeção central (c).....	24
Figura 3 – Medidor de suscetibilidade magnética Bartington MS2 com um sensor de leitura em laboratório MS2B.....	30
Figura 4 – Localização do município de Santo Augusto no Estado do Rio Grande do Sul e área experimental (a e b). Modelo digital de elevação e croqui de amostragem (c).....	34
Figura 5 – Variogramas do conteúdo de areia, argila e carbono orgânico do solo (COS) (g kg <sup>-1</sup> ) e suscetibilidade magnética (SM) (10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ) nas quatro profundidades.....	38
Figura 6 – Mapas da distribuição espacial dos atributos, teor de areia, argila, carbono orgânico do solo (COS) e suscetibilidade magnética (SM), nas profundidades de 0,00-0,05 m, 0,05-0,15 m, 0,15-0,30 m e 0,30-0,60 m.....	40
Figura 7 – Esquema amostral da disposição dos pontos amostrais e dos perfis (P1, P2, P3, P4, P5) nas transeções, com suas respectivas distâncias.....	44
Figura 8 – Difrátogramas de raio X (DRX) de amostras em pó do concentrado dos óxidos de ferro, evidenciando a variação na posição dos reflexos da goethita (Gt), da hematita (Hm) e da maghemita (Mgh) nos horizontes Ap e Bw1 dos cinco perfis estudados.....	47
Figura 9 – Difrátogramas do pó de amostras desferrificadas, evidenciando a variação na posição dos reflexos da caulinita (Ct), gibbsita (Gb) e quartzo (Qt) nos horizontes Ap e Bw1 dos cinco perfis.....	49
Figura 10 – Suscetibilidade magnética da fração argila, areia fina e terra fina seca ao ar (TFSA) por profundidade de cada perfil (P).....	50
Figura 11 – Perfil de elevação da transeção central (a) e os resultados da análise “Split Moving Windows” (SMW) e correlação entre os valores da Estatística t para suscetibilidade magnética na camada de 0,00-0,05 m (b), 0,05-0,15 m (c), 0,15-0,30 m (d) e 0,30-0,60 m (e), ao longo da transeção com pontos espaçados em 50 m. Os picos acima do pontilhado (...) indicam significância e os tracejados (---) indicam os picos de maior expressão da suscetibilidade magnética. ....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características morfológicas, químicas, físicas e mineralógicas dos cinco perfis estudados.....	26
Tabela 2 – Estatística descritiva dos atributos dos solos nas quatro profundidades dos pontos amostrais.....	35
Tabela 3 – Correlação linear de Pearson entre os atributos físicos, químicos e a suscetibilidade magnética (SM) dos horizontes superficiais e subsuperficiais dos cinco perfis de solo.....	36
Tabela 4 – Geoestatística dos atributos do solo nos perfis estudados.....	37
Tabela 5 – Características físicas e químicas dos cinco perfis estudados.....	46
Tabela 6 – Características estruturais dos óxidos de ferro goethita, hematita e maghemita de horizontes selecionados dos cinco perfis estudados.....	48
Tabela 7 – Estatística descritiva dos valores obtidos da leitura da suscetibilidade magnética nos quatro compartimentos.....	53

## LISTA DE REDUÇÕES

Al	Alumínio
Ap	Horizonte superficial lavrado ou revolvido
Bw	Horizonte subsuperficial B latossólico
C0	Efeito pepita
C0+C1	Patamar
Ca	Cálcio
Comp.	Compartimento
COS	Carbono orgânico do solo
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
Ct	Caulinita
CTC	Capacidade de troca de cátions
CV	Coefficiente de variação
DCB	Ditionito citrato bicarbonato de sódio
DP	Desvio Padrão
DRX	Difratograma de raio X
EHE	Esmectita com hidróxi-Al entre camadas
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ERD	Espectroscopia de reflectância difusa
Fe	Ferro
Fe <sub>d</sub>	Ferro cristalino
Fe <sub>o</sub>	Ferro de baixa cristalinidade
Fe <sub>s</sub>	Ferro extraído pelo ataque sulfúrico
Gb	Gibbsita
GPS	Sistema de posicionamento global
GSM	Global Soil Map
Gt	Goetita
ha	Hectare
Hm	Hematita
Horiz.	Horizonte
K	Potássio
KCl	Cloreto de potássio
LMA	Largura a meia altura
MDS	Mapeamento Digital do Solo
Mg	Magnésio
Mgh	Maghemita
MO	Matéria orgânica
NaOH	Hidróxido de sódio
P	Fósforo
Prof.	Profundidade
Qt	Quartzo
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação
RS	Rio Grande do Sul

SB	Soma de Bases
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SM	Suscetibilidade magnética
SMW	“Split Moving Windows”
TFSA	Terra fina seca ao ar
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina
UNESP	Universidade Estadual Paulista
V%	Saturação por bases

## **LISTA DE APÊNDICES**

<b>Apêndice A – Classificação do perfil 1.....</b>	<b>66</b>
<b>Apêndice B – Classificação do perfil 2.....</b>	<b>70</b>
<b>Apêndice C – Classificação do perfil 3.....</b>	<b>73</b>
<b>Apêndice D – Classificação do perfil 4.....</b>	<b>77</b>
<b>Apêndice E – Classificação do perfil 5.....</b>	<b>81</b>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>15</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>17</b>
2.1 Magnetismo dos solos.....	17
2.2 Suscetibilidade magnética e sua utilização no estudo dos atributos do solo.....	19
2.3 Métodos estatísticos para a avaliação da variabilidade da SM do solo.....	22
<b>3 HIPÓTESES.....</b>	<b>24</b>
<b>4 OBJETIVOS.....</b>	<b>25</b>
4.1 Geral.....	25
4.2 Específicos.....	25
<b>5. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>26</b>
5.1 Localização, sistema de amostragem e metodologia de campo.....	26
5.2 Metodologia de laboratório.....	29
5.2.1 Caracterização granulométrica e química dos solos.....	31
5.2.2 Caracterização mineralógica.....	31
5.2.3 Suscetibilidade magnética.....	31
5.3 Análises estatísticas.....	32
<b>6. ESTUDO 1. ASSINATURA MAGNÉTICA NA CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE GRANULOMÉTRICA E CARBONO ORGÂNICO DE SOLOS BASÁLTICOS.....</b>	<b>34</b>
6.1 Introdução.....	34
6.2. Material e métodos.....	35
6.3 Resultados e discussão.....	37
6.4 Conclusões.....	43
<b>7. ESTUDO 2. SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA DETERMINAÇÃO DE LIMITES DE COMPARTIMENTOS DA PAISAGEM.....</b>	<b>44</b>
7.1 Introdução.....	44
7.2 Material e métodos.....	45
7.3 Resultados e discussão.....	47
7.4 Conclusões.....	56
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>57</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>65</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Os Latossolos que predominam no estado do Rio Grande do Sul, principalmente na metade norte, apresentam boas propriedades físicas, porém são muito intemperizados, conferindo-lhes, portanto, uma baixa fertilidade química. Quando corrigidos com adubação e calagem, esses solos passam a ter uma boa aptidão para agricultura. A composição granulométrica desses solos é muito variável podendo ir de 20% até 85% de argila, dependendo da influência do material de origem. Na fração argila predominam minerais 1:1 (caulinita) e óxidos de ferro (hematita e goethita).

Levantamentos de solos são importantes para o planejamento racional do uso do solo, para avaliação de terras e escolha de áreas apropriadas para descarte de resíduos e, mais especificamente os levantamentos pedológicos, têm como objetivo principal subdividir áreas heterogêneas em parcelas homogêneas, uma vez que apresentem a menor variabilidade possível (EMBRAPA, 1995). No Estado do RS, há o levantamento de solos publicado na escala 1:750.000 (BRASIL, 1973) e poucos são os levantamentos de solos em escala compatível para o planejamento em escala de bacias hidrográficas ou municípios (DALMOLIN et al., 2004).

Recentemente no Brasil, vêm sendo utilizada a técnica de Mapeamento Digital do Solo (MDS), onde a principal finalidade é a predição, que fornece um conjunto de dados disponíveis para interpretações futuras. Lagacherie e McBratney (2007) definiram o MDS como “a criação e população de sistemas de informação espacial de solos através do uso de métodos observacionais de campo e laboratório, acoplados a sistemas de inferência espacial e não espacial de solos”. Esta nova opção vem sendo cada vez mais aplicada e está em constante evolução.

No MDS é possível gerar modelos matemáticos para estimar atributos do solo a partir de outros atributos medidos através de funções de pedotransferência (McBRATNEY et al., 2002). Estas funções são fundamentais, pois permitem que a partir de atributos de fácil obtenção possa se fazer a predição, de maneira indireta, de outros atributos que são mais complexos, que demandam muito tempo para coleta, análises e conseqüentemente com um custo elevado.

Nesse contexto, novas técnicas estão sendo exploradas para estabelecer relações e serem utilizadas em funções de pedotransferência, minimizando o tempo empregado em coletas e análises. Dentre essas técnicas, encontra-se a utilização da Suscetibilidade

Magnética (SM) que pode ser uma opção para avaliar determinados atributos do solo, de maneira simples, sem impacto ambiental, custo relativamente baixo, além de ser um procedimento rápido de ser realizado.



## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Magnetismo dos solos

A composição da crosta terrestre apresenta inúmeros tipos de rochas, nas quais carregam um histórico de sua formação. As condições em que as rochas são formadas determinam a presença ou ausência de certos minerais que apresentam comportamentos magnéticos diferenciados. Este comportamento está relacionado à reação de qualquer matéria na presença de um campo magnético.

Para auxiliar na compreensão da magnetização, deve-se entender o comportamento do elétron que gira em torno de si e possui uma orientação magnética composta de pólos norte e sul. Essa orientação é definida como spin. Quando há presença de um campo magnético externo, os spins tendem a se alinhar de acordo com a orientação desse campo. A razão entre o campo magnético indutor e a magnetização é denominada Suscetibilidade Magnética (SM), sendo, portanto a medida da capacidade do material adquirir magnetização.

De acordo com Dearing (1999) existem diferentes comportamentos magnéticos: ferrimagnetismo, antiferromagnetismo, paramagnetismo e diamagnetismo que são encontrados na natureza, além do ferromagnetismo que normalmente não é encontrado no ambiente. Materiais que possuem em sua composição substâncias altamente magnéticas são considerados ferromagnéticos, apresentando spins organizados na mesma direção. O ferrimagnetismo também apresenta spins organizados, porém, atuam dois conjuntos de forças opostas sendo que o mineral mais frequente classificado nesta categoria é a magnetita.

Minerais que apresentam uma menor suscetibilidade magnética, comparada aos anteriores, são os minerais antiferromagnéticos, que apresentam alinhamento em sentidos opostos, o que torna nula as forças. Esta categoria é representada pela hematita. A SM fraca ou similar são características dos minerais paramagnéticos, onde os íons somente são alinhados na presença de um campo magnético, representados neste caso pela biotita e pirita. O outro comportamento magnético é o diamagnetismo, onde se encontram os minerais que não possuem ferro em sua constituição, como o quartzo. Um esquema sobre o comportamento magnético pode ser visualizado na Figura 1.

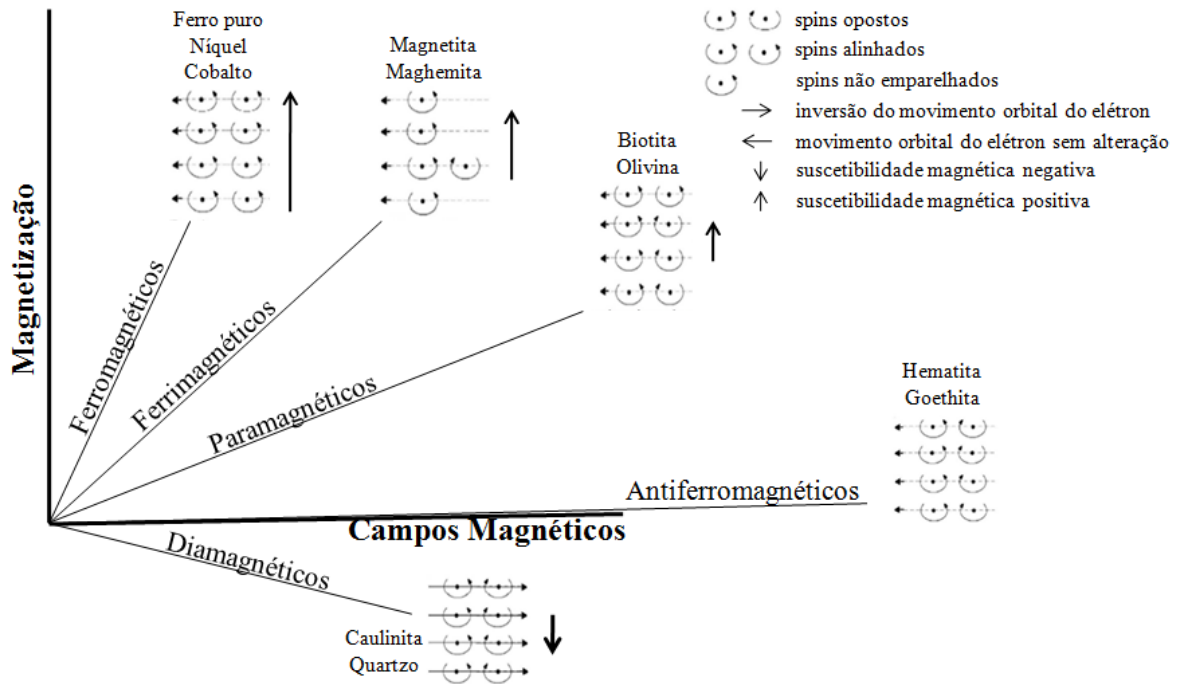


Figura 1 - Realinhamento dos spins na presença de um campo magnético (Modificado de DEARING, 1999 e SIQUEIRA 2013).

O magnetismo das rochas está diretamente relacionado com a constituição mineral. Em Latossolos há uma grande variação nas propriedades de minerais magnéticos. O estudo de substâncias magnéticas teve seu princípio na arqueologia, o que posteriormente emergiu para estudos relacionados a propriedades magnéticas do solo (RESENDE et al., 1988).

De acordo com Resende et al. (1986) os Latossolos formados a partir de rochas máficas possuem propriedades magnéticas, sendo estes comuns no Brasil. Fontes et al. (2000) realizaram estudos verificando a magnetização em Latossolos, Argissolos e Cambissolos, derivados de rochas distintas, como gnaiss, basalto, arenito, diabásio e itabirito. Os autores verificaram que os solos com maiores quantidades de óxidos de ferro possuíam valores mais elevados de magnetização, o que pôde ser conferido em solos derivados de basalto e itabirito.

Pretz et al. (2008) também investigaram a SM de solos derivados de diferentes rochas. O estudo contemplou rochas ígneas ultrabásicas (gabro e serpentinito), básicas (anfíbrito, andesito, basalto, diabásio, gabro, gnaiss e fonolito) e ácidas (dolerito, gnaiss, granito e pisólito), argilitos (ardósia, xisto), folhelhos (filito) e os arenitos (arenito e quartzito). Esses autores verificaram variações significativas nas medições dos solos provenientes dos seis grupos de rochas, atribuíram às diferenças devido a composição mineral, o grau de desenvolvimento do solo e o enriquecimento e empobrecimento de minerais magnéticos. Os solos derivados de rochas ígneas ultrabásicas e básicas obtiveram

valores de suscetibilidade magnética de  $1000 \times 10^{-5}$  ou superior, influenciadas pela presença da magnetita, enquanto os solos provenientes de rochas ígneas ácidas, argilitos, folhelhos e arenitos apresentaram valores menores que  $50 \times 10^{-5}$ , pois raramente possuem magnetita em sua constituição. Segundo Liu et al. (2013) os principais minerais que controlam as propriedades magnéticas dos solos são a magnetita, a maghemita, hematita e goethita.

Em alguns solos podem ocorrer à magnetização espontânea. Este efeito advém da presença de minerais ferrimagnéticos, como a magnetita na fração areia e silte, e a maghemita na fração argila (KÄMPF e CURI, 2000). Esta magnetização espontânea pode ser facilmente constatada no campo ou laboratório através da utilização de um ímã (RESENDE et al., 1988; FONTES et al., 2000). Quijano et al. (2011) comprovaram que a eficiência e rapidez nas leituras da SM pode ser obtida tanto em leituras com sensores adaptados para laboratório, quanto para medições no campo.

## **2.2 Suscetibilidade magnética e sua utilização no estudo dos atributos do solo**

A modelagem quantitativa da distribuição dos atributos do solo na paisagem se apresenta como uma ferramenta promissora na geração de informações para pesquisas em solos (SANTOS et al., 2011; MATIAS et al., 2013). De acordo com Campos et al. (2007) para melhor entender as causas da variabilidade espacial dos atributos do solo, a paisagem é considerada um apropriado instrumento em áreas nas quais os levantamentos de solos são menos detalhados. Segundo os mesmos autores, o conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo atua como fator determinante na agricultura de precisão, sendo utilizado para separar unidades de mapeamento.

A variabilidade espacial dos atributos do solo, embora disponha de variadas técnicas para sua aplicação, necessita de uma quantidade significativa de amostras, o que requer um custo elevado e um maior tempo empregado nas coletas e análises (DEMATTE et al., 2007). Objetivando minimizar os custos e o tempo, com um número elevado de amostras, são adotados métodos alternativos para a quantificação dos atributos do solo (MATIAS, 2010). Dentre os métodos recentemente utilizados, a SM destaca-se, pois se refere ao grau de magnetização de um material submetido a um campo magnético (ALPHA GEOFÍSICA, 2012), o que permite obter informações sobre a composição do solo, admitindo estimar indiretamente alguns atributos químicos e físicos do solo.

Resende et al. (1988) afirmam que no Brasil a utilização da técnica de comportamento magnético, teve início no levantamento de solos do estado de São Paulo em 1960, com a utilização de um ímã de mão a campo para distinguir diferentes Latossolos.

No decorrer dos anos a técnica da leitura da SM foi sendo aperfeiçoada. Daves (1992) apresentou um sistema baseado na utilização de uma balança de precisão, capaz de medir a força de interação entre o ímã e a amostra. Em 1999, Dearing apresentou outro sistema de medição da SM, o Bartington MS2 que é um equipamento que se tornou popular para uso em laboratório e campo. Em estudos de SM, esse é um dos sistemas de medição mais utilizado (CAMÊLO, 2013; INDA et al., 2014). Carneiro et al. (2003) utilizaram o mesmo princípio de medição de Daves, eles adotaram o uso da balança de precisão, porém sugeriram um novo método para a obtenção da suscetibilidade magnética a partir destas medidas. A medição por meio da balança de precisão é amplamente utilizada em pesquisas em solos (CORTEZ et al., 2011; SANTOS et al., 2011; MATIAS et al., 2013; PELUCO et al., 2013).

As medidas de SM representam uma técnica promissora, contribuindo de maneira rápida, eficaz e acessível economicamente em estudos relacionados à compreensão dos processos de formação, influência das condições climáticas e do material de origem, diagnóstico de drenagem inadequada e acumulação de substâncias tóxicas no solo (SILVA et al., 2010). Comparada a metodologias convencionais, a SM mostra-se uma técnica de menor custo, relativamente sensível, segura e rápida (DEARING et al., 1996).

Magiera et al. (2006) investigaram solos da Alemanha, Polônia e República Tcheca em superfície e em profundidade para elaborar um mapa da SM. Os autores perceberam que os resultados encontrados sofreram influência de processos litogênicos, pedogênicos e contribuições antrópicas. A influência litogênica foi confirmada pelo aumento da SM em profundidade e pelo elevado valor em solos florestais comparados aos solos cultivados na mesma área de estudo e a influência dos processos pedológicos foram observados através da presença de óxidos de Fe. A influência antrópica foi constatada pelos valores da SM mais elevados nos primeiros oito cm da superfície em áreas próximas às fontes industriais ou urbanas de poluição. Estes resultados corroboram com os obtidos por Lourenço et al. (2014), que desenvolveram o estudo em Coimbra, Portugal, onde verificaram a influência antrópica confirmada pelo valor de SM elevado em locais próximos as estradas e locais em obras.

A SM revela particularidades de cada solo, apresentando comportamento magnético diferenciado que representam características advindas da composição mineralógica de cada solo, possibilitando à classificação dos minerais e conseqüentemente a diferenciação de rochas, sedimentos e solos (MATIAS, 2010). Torrent et al. (2010), em seus estudos

caracterizaram óxidos de ferro e propriedades magnéticas do solo em um Calcic Luvisols (Chromic) na Espanha, onde perceberam que o intemperismo de materiais de origem, que contém um teor elevado de ferro, resulta na formação de hematita e maghemita em vez de goethita, o que causa uma elevada SM.

Estudos realizados por Siqueira et al. (2010), com a finalidade de avaliar funções de podotransferência utilizando a SM, concluíram que esta técnica apresenta a capacidade de contribuir na caracterização da variabilidade dos atributos do solo de acordo com a capacidade magnética dos minerais, sendo este método apontado como pedoindicador para a diferenciação de solos na paisagem. Os autores encontraram as seguintes correlações da SM com os atributos: teor de argila ( $r = 0,68$ ), porosidade ( $r = 0,74$ ), teor de água ( $R^2 = 0,63$ ), CTC ( $R^2 = 0,62$ ), saturação por bases ( $R^2 = 0,76$ ), P adsorvido ( $r = 0,76$ ), o teor de hematita ( $r = 0,82$ ,  $P < 0,001$ ,  $n = 38$ ) e  $Fe_d$  ( $r = 0,79$ ), todos os resultados significativos estatisticamente ( $P < 0,001$ ).

Marques Jr. et al. (2014), trabalhando em uma área com Argissolos arenosos cultivados com cana de açúcar no estado de São Paulo, obtiveram resultados promissores ao utilizar SM e espectroscopia de reflectância difusa (ERD) para caracterizar a variabilidade espacial de atributos do solo na área estudada. Os atributos que apresentaram correlações significativas com a SM foram o teor de argila, resistência à penetração, volume total de poros do solo e adsorção de P.

Além da capacidade de refletir condições em que o mineral foi formado, a SM também é considerada uma forma de detectar as variações pedogenéticas, tornando-se importante no estudo em que é realizada a identificação de diferentes compartimentos da paisagem (MATIAS, 2010; SANTOS et al., 2011; BARRIOS et al., 2012; CAMARGO et al., 2014). A identificação dos limites de compartimentos de paisagens (SANTOS et al., 2011) pode ser utilizada para diferenciar superfícies geomórficas (MATIAS et al., 2013; CAMARGO et al., 2014). Nesse sentido, o estudo da SM e seu potencial em identificar diferentes superfícies geomórficas na paisagem podem auxiliar em outros estudos como, por exemplo, no MDS em escala detalhada e na definição de zonas de manejo específico na agricultura de precisão.

### 2.3 Métodos estatísticos para a avaliação da variabilidade da SM no solo

No processo de avaliação da variabilidade da SM no solo, diferentes métodos estatísticos ganham destaque, como a estatística univariada, multivariada e a geoestatística, nos quais a escolha do método dependerá do objetivo do estudo proposto.

A estatística multivariada atua como uma importante ferramenta que obtém um maior número de informações comparadas à análise estatística univariada (CAMPOS et al., 2013). A estatística univariada, tem a capacidade de estudar somente uma variável aleatória por vez (LUCHESA, 2004), tornando-se pouco eficaz em estudos que envolvem vários atributos responsáveis pela variabilidade dos solos na paisagem, como na discriminação de superfícies geomórficas (MATIAS, 2010).

Um método estatístico utilizado para identificar os limites entre compartimentos de uma paisagem é determinado pela análise “Split Moving Windows” (SMW) (CUNHA et al., 2005; MATIAS, 2010; SIQUEIRA, 2013). Segundo Cunha et al. (2005) este método é utilizado para verificar automaticamente quais as partes da transeção são mais homogêneas e para isso, são realizadas determinações de um número de “janelas”, estas que são movimentadas consecutivamente na transeção no sentido do declive. Em cada posição da transeção a janela é dividida em duas partes e para cada uma é calculada a média e comparações de média fazendo uso da estatística t. A partir dos resultados desta análise, são gerados gráficos onde os picos maiores indicam os limites matemáticos onde os atributos do solo se diferenciam ao longo da transeção (SIQUEIRA, 2013).

Cunha et al. (2005) em uma área de transição arenito/basalto, utilizando a análise SMW confirmaram a possibilidade de utilização em estudos para detectar limites de compartimentos em uma paisagem através de métodos numérico-estatísticos. Matias (2010) em solos derivados de arenito também obteve resultados positivos utilizando a mesma análise, confirmando os limites numéricos das superfícies geomórficas e os segmentos de vertentes detectados no campo.

Para auxiliar na modelagem da variabilidade espacial dos atributos do solo, grande parte dos estudos têm-se utilizado da ferramenta geoestatística para identificação de limites entre diferentes compartimentos no percurso longitudinal da paisagem (SANTOS et al., 2011). Segundo Matias (2010) a técnica de geoestatística quando inserida nos estudos de relações solo-paisagem é considerada a mais indicada para a avaliação da variabilidade de atributos do solo uma vez que, considerada a distribuição espacial dos dados.

De acordo com Landim (2006) a geoestatística é uma ferramenta capaz de interpretar fenômenos regionais, por meio de análise matemática e da gênese do solo, possibilitando a inferência das variáveis regionalizadas através de informações e relações a partir de um conjunto de amostras. Entendem-se como variáveis regionalizadas o estudo da variação espacial de certas magnitudes como, por exemplo, a influência de uma formação geológica (MATHERON, 1965).

Com o uso da geoestatística em estudos de variáveis regionalizadas, duas ferramentas ganham destaque, o semivariograma e a krigagem. O semivariograma é o instrumento mais adequado para medir a dependência espacial, este que pode ser utilizado quando a interpolação entre locais medidos for necessária para a construção de mapas (VIEIRA et al., 1983).

Em relação à krigagem, trata-se de um processo de estimativa de certos valores distribuídos em um espaço, bem como em um período de tempo. Os valores são determinados adjacientemente, pois estes são interdependentes determinados pelo semivariograma (LANDIM, 2006).

Nesse sentido, Matias (2010) utilizou-se da geoestatística e verificou nos mapas de krigagem a variabilidade espacial dos atributos do solo e a ocorrência das superfícies geomórficas, identificando a dependência entre estes. Essa constatação se deve pela concordância do comportamento dos atributos do solo em relação aos limites entre os diferentes compartimentos da paisagem.

### **3. HIPÓTESES**

A suscetibilidade magnética evidencia atributos do solo como areia, argila e carbono orgânico, possibilitando a predição e espacialização destes atributos em solos derivados de basalto no RS.

A variabilidade da suscetibilidade magnética na paisagem permite identificar compartimentos da paisagem em áreas de Latossolo originados de basalto no Rio Grande do Sul.



## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 Geral**

Determinar a suscetibilidade magnética de amostras de Latossolos originados de basalto de uma pequena área, na região nordeste do Rio Grande do Sul, relacionando com diferentes atributos do solo para compreender a distribuição espacial e delimitar diferentes compartimentos da paisagem.

### **4.2 Específicos**

- Verificar a relação existente entre os dados obtidos por análises químicas e físicas tradicionais e a suscetibilidade magnética;
- Constatar a dependência espacial da argila, areia, carbono orgânico do solo e suscetibilidade magnética; e
- Investigar o comportamento da suscetibilidade magnética ao longo de uma topossequência e sua eficácia na determinação dos limites de compartimentos da paisagem.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Localização, sistema de amostragem e metodologia de campo

O estudo foi conduzido em uma área experimental no município de Santo Augusto, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil (Figura 2). A área está localizada à 495 metros de altitude no início do espigão, nas coordenadas 27°47'18,71" de latitude sul e 53°46'42.98" de longitude oeste. O clima da região segundo a classificação de Köppen é do tipo Cfa – subtropical do ponto de vista térmico e temperado chuvoso, com precipitação média anual elevada e bem distribuída ao longo do ano, apresentando média anual de pluviosidade de 1833 mm. A temperatura média da região é em torno de 19°C e o relevo predominante é o suave ondulado a ondulado. Segundo informações da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2006), a região faz parte da Formação Serra Geral, onde ocorreram derrames de basaltos, basalto andesitos, riodacitos e riolitos. Geologicamente a área está inserida no Planalto Basáltico.

Na área de estudo, com 22 ha situados em um talhão maior de 350 ha, é adotado o sistema de plantio direto na palha, utilizando as culturas do trigo, aveia, soja e milho. A irrigação do talhão é realizada por meio de quatro pivôs centrais desde 2010, época em que foi implantada a agricultura de precisão no local.

Foram marcadas três transeções a partir do topo para o sentido do caimento mais suave do declive (Figura 2), distanciadas 50 metros uma da outra. Cada transeção é composta de 29 pontos com distância regular de 50 metros, totalizando 87 pontos amostrais. Todos os pontos foram referenciados geograficamente com a utilização de um GPS Garmin etrex 10. Em cada ponto coletou-se amostras de solo na profundidade de 0,00-0,05, 0,05-0,15, 0,15-0,30 e 0,30-0,60 m, conforme proposição do consócio GlobalSoilMap.net (2011). Este consócio internacional fixa essas profundidades para padronizar tecnologias de mapeamento do solos. Nestas amostras determinou-se a composição granulométrica, o carbono orgânico do solo e a suscetibilidade magnética.

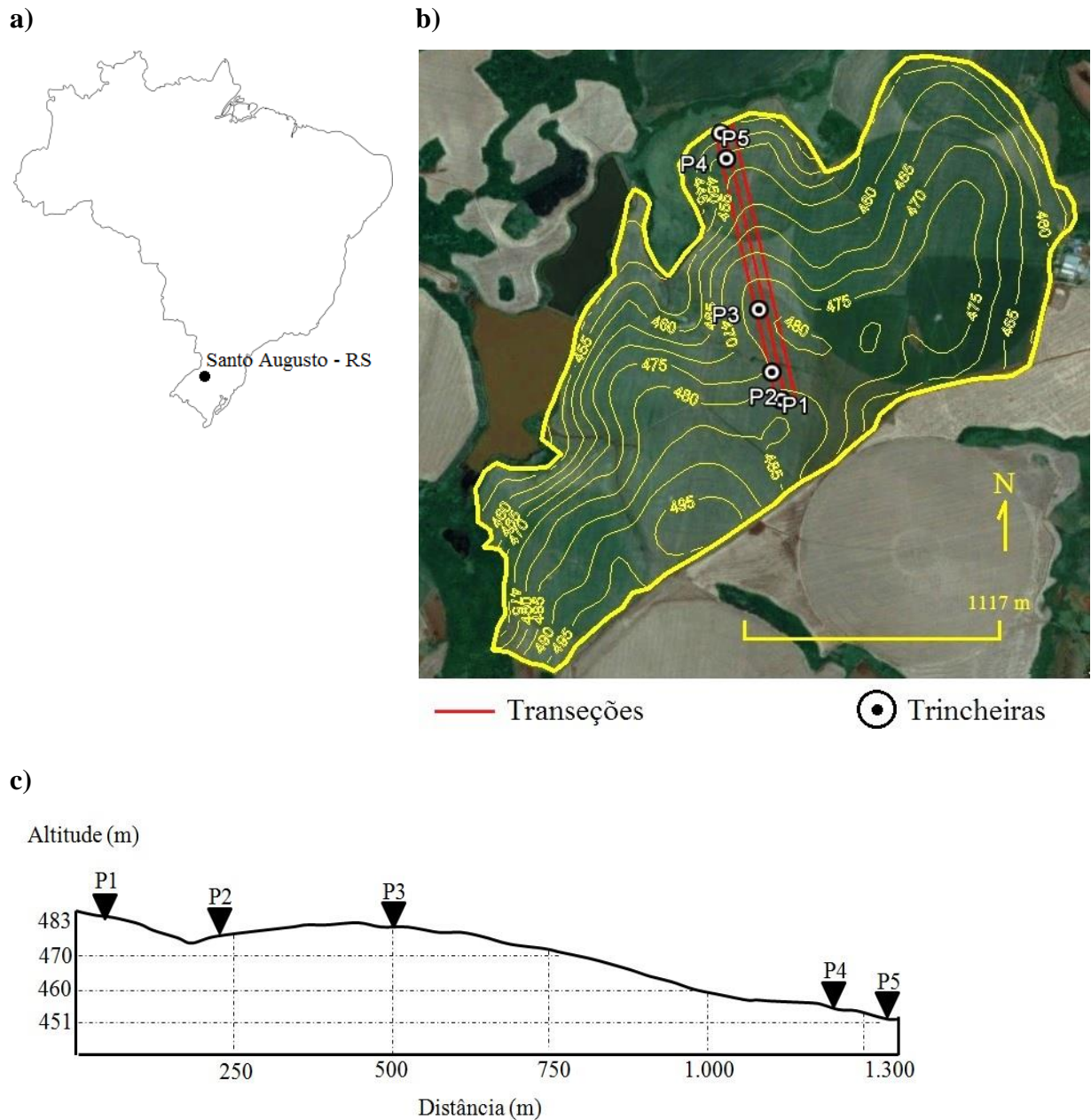


Figura 2- Localização da área do estudo (a), com identificação das três transeções e dos cinco perfis (P1, P2, P3, P4, P5) e isolinhas (b), elevação com base na transeção central (c). P1 - Latossolo Vermelho - Amarelo Distrófico típico; P2 - Latossolo Vermelho-Amarelo Distroférico típico; P3 - Nitossolo Vermelho Eutrófico latossólico; P4 - Latossolo Vermelho Distrófico típico; P5 - Latossolo Vermelho Eutrófico típico.

Além dos pontos amostrais foram abertas cinco trincheiras (Figura 2) com aproximadamente dois metros de profundidade, em locais com maiores variações de declividade, onde foram georreferenciadas e realizadas a descrição morfológica e coleta das

amostras de cada horizonte conforme Santos et al. (2013a). Nestas amostras realizou-se análises laboratoriais (Tabela 1), para a classificação de acordo com o SiBCS (EMBRAPA, 2013). Nessas amostras determinou-se a composição granulométrica, teor de carbono orgânico, alumínio trocável, acidez potencial, pH em água e em KCl, potássio, cálcio, magnésio, ferro cristalino, ferro não cristalino, ferro total, difração de raio X e susceptibilidade magnética.

Tabela 1 - Características morfológicas, químicas, físicas e mineralógicas dos cinco perfis estudados. Continua...

Perfis	Prof. (cm)	Horiz.	Cor úmida	pH		C.O.S g/kg <sup>-1</sup>	Ca	Mg	K	SB	CTC
				H <sub>2</sub> O	KCl						
P1	0-19	Ap	5YR 3/3	5,1	4,8	23,64	6,33	2,95	0,72	9,98	17,06
	20-35	A1	5YR 3/4	4,4	4,2	15,90	3,45	1,66	0,10	5,20	11,22
	36-60	AB	5YR 3/4	4,5	4,2	11,60	2,27	1,39	0,09	3,74	9,49
	61-85	BA	5YR 3/4	5,1	4,6	8,64	2,16	1,49	0,10	3,75	8,17
	86-136	Bw1	5YR 3/3	5,0	4,5	6,12	1,26	1,06	0,10	2,42	6,58
	137-170+	Bw2	5YR 3/3	5,1	4,2	5,16	0,72	0,68	0,10	1,50	5,92
P2	0-30	Ap	5YR 3/4	5,4	4,9	21,46	5,96	2,93	0,90	9,78	15,00
	31-60	BA	5YR 4/4	4,7	4,3	11,99	2,25	1,67	0,10	4,02	10,04
	61-90+	Bw	5YR 4/4	4,4	4,3	7,25	0,38	0,28	0,08	0,73	5,69
P3	0-12	Ap	2,5YR 3/3	4,9	4,6	20,71	6,83	2,48	1,02	10,33	16,88
	13-47	Bni	2,5YR 4/3	5,8	5,1	10,31	5,30	2,42	0,13	7,83	10,93
	48-82	Bw1	2,5YR 4/4	5,1	4,7	8,08	2,32	2,08	0,22	4,60	7,70
	83-125	Bw2	2,5YR 5/4	4,6	4,2	6,52	1,01	0,76	0,08	1,84	6,27
	126-170+	Bw3	2,5YR 5/4	5,0	4,1	3,60	0,46	0,29	0,07	0,80	5,22
P4	0-23	Ap	2,5YR 4/3	4,6	4,2	23,34	6,26	2,55	0,68	9,48	17,36
	24-42	A1	2,5YR 5/3	4,8	4,5	12,79	3,26	1,29	0,12	4,66	10,68
	43-64	BA	2,5YR 5/3	4,7	4,2	10,67	2,68	1,28	0,11	4,07	9,03
	65-110	Bw1	2,5YR 5/4	5,2	4,2	7,66	2,03	1,15	0,07	3,23	9,78
	111-170+	Bw2	2,5YR 5/4	5,1	4,1	4,50	0,73	0,40	0,08	1,20	5,36
P5	0-24	Ap	2,5YR 3/3	6,0	5,3	16,81	9,52	3,82	0,39	13,73	17,36
	25-38	A1	2,5YR 4/3	5,9	5,2	14,53	6,13	3,01	0,13	9,26	13,95
	39-63	AB	2,5YR 5/3	5,6	5,0	11,45	4,29	2,58	0,13	6,98	10,87
	64-96	Bw1	2,5YR 4/4	4,7	4,4	11,78	4,05	1,95	0,10	6,08	10,50
	97-134	Bw2	2,5YR 5/4	4,5	4,2	10,93	3,39	1,52	0,18	5,08	10,04
	135-170+	Bw3	2,5YR 5/4	4,5	4,1	10,73	2,54	1,27	0,22	4,02	9,51

Prof. - profundidade; Horiz. - horizonte; C.O.S - carbono orgânico do solo.

Tabela 1 - Continuação.

Perfis	Prof. (cm)	Horiz.	V %	Areia Silte Argila			Fe <sub>s</sub> Fe <sub>d</sub> Fe <sub>o</sub>			Relação Fe <sub>o</sub> /Fe <sub>d</sub>
				-----%-----			-----g.kg <sup>-1</sup> -----			
P1	0-19	Ap	58,49	5,60	27,83	66,57	83,80	35,69	6,72	0,19
	20-35	A1	46,34	4,32	28,13	67,55	77,72	58,85	7,96	0,14
	36-60	AB	39,40	2,73	24,88	72,40	94,13	67,75	6,65	0,10
	61-85	BA	45,89	2,55	20,52	76,94	74,56	43,21	8,14	0,19
	86-136	Bw1	36,77	2,14	17,49	80,37	77,60	71,91	8,36	0,12
	137-170	Bw2	25,33	2,14	17,60	80,26	103,17	46,77	6,47	0,14
P2	0-30	Ap	65,20	14,30	25,59	60,10	158,63	59,84	6,03	0,10
	31-60	BA	40,04	9,75	24,44	65,80	141,76	70,52	7,02	0,10
	61-90	Bw	12,83	11,96	17,46	70,19	142,25	52,71	8,64	0,16
P3	0-12	Ap	61,20	7,26	25,43	67,31	127,71	38,06	6,28	0,17
	13-47	Bni	71,64	4,78	18,96	76,26	115,97	65,97	6,53	0,10
	48-82	Bw1	59,74	4,61	15,46	79,93	121,99	75,27	7,55	0,10
	83-125	Bw2	29,35	3,88	23,00	74,00	107,70	74,47	7,24	0,10
	126-170	Bw3	15,33	4,03	14,26	81,71	111,37	46,77	7,68	0,16
P4	0-23	Ap	54,61	5,39	27,88	66,73	117,88	60,82	5,31	0,09
	24-42	A1	43,63	3,12	23,15	73,73	113,98	71,31	4,55	0,06
	43-64	BA	45,07	3,18	17,72	79,10	110,72	75,87	4,95	0,07
	65-110	Bw1	33,03	2,69	16,67	80,65	103,45	77,85	6,38	0,08
	111-170	Bw2	22,39	2,79	19,54	77,68	96,45	12,77	6,96	0,55
P5	0-24	Ap	79,08	11,92	34,06	54,02	164,06	39,25	6,45	0,16
	25-38	A1	66,37	7,75	31,19	61,06	150,35	38,26	7,00	0,18
	39-63	AB	64,21	9,30	24,69	66,01	138,11	67,55	7,16	0,11
	64-96	Bw1	57,90	6,03	17,20	76,77	124,39	44,79	5,73	0,13
	97-134	Bw2	50,59	5,25	18,93	75,82	120,58	11,63	4,83	0,42
	135-170	Bw3	42,27	6,05	16,96	76,99	116,63	12,60	5,70	0,45

Fes - ferro extraído com ácido sulfúrico; Fed - ferro extraído com ditionito, citrato e bicarbonato sódio; Feo - ferro extraído com oxalato ácido de amônio; Feo/Fed - relação ferro extraído com oxalato/ferro extraído com ditionito.

## 5.2 Metodologia de Laboratório

### 5.2.1 Caracterização Granulométrica e Química dos Solos

A determinação da granulometria do solo pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 1 mol L<sup>-1</sup> como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de baixa rotação, por 4 horas. A Areia foi obtida por peneiramento úmido, a argila pelo princípio

da sedimentação gravitacional (Lei de Stokes) e o silte obtido pela diferença. A determinação do carbono orgânico do solo (COS) foi baseada na oxidação úmida do carbono, utilizando dicromato de potássio em meio ácido aquecido e para titulação o sulfato ferroso amoniacal (YOMANS e BREMNER, 1988). Os teores de K, Ca e Mg foram determinados conforme metodologia de Donagema et al. (2011).

O pH foi determinado em suspensão na água e em KCl. Para a avaliação da acidez trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) utilizou-se a solução KCl para a extração e, para a determinação volumétrica a solução diluída de NaOH  $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ . A acidez potencial ( $\text{H}+\text{Al}^{+3}$ ) foi obtida através da extração com solução tamponada de acetato de cálcio a pH 7,0 e determinada volumetricamente com a solução NaOH  $0,0606 \text{ mol L}^{-1}$  em presença de azul de bromotimol como indicador. Ambos os procedimentos foram realizados conforme metodologia de Donagema et al. (2011). A soma de bases (SB), a capacidade de troca de cátions (CTC) e a saturação por bases (V%) foram obtidos através de cálculos. A identificação dos óxidos de ferro cristalinos foi realizada por meio da extração utilizando a solução ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), segundo a metodologia de Mehra e Jackson (1960) adaptada por Donagema (2011). A amostra foi aquecida em um meio tamponado, onde o ferro reduz de  $\text{Fe}^{+3}$  para  $\text{Fe}^{+2}$  pelo ditionito, e complexado pela solução de citrato de sódio. A determinação de ferro no extrato foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica.

Para a identificação da presença de óxidos de ferro de baixa cristalinidade, realizou-se a extração com solução de oxalato ácido de amônio a pH 3,0 em meio escuro. Este método baseia-se na afinidade do oxalato em meio ácido para formação de complexos coloidais após a dissolução dos óxidos e oxi-hidróxidos amorfos do solo, não ocorrendo à extração de óxidos cristalinos, conforme metodologia de McKeague e Day (1966) adaptada por Donagema et al. (2011).

O Fe extraído pelo ataque sulfúrico foi determinado conforme metodologia de Donagema et al. (2011). Com esse procedimento foi possível extrair o Fe ligado fortemente à estrutura dos minerais, através da combinação dos ácidos com a elevada temperatura ( $\pm 170^\circ\text{C}$ ).

### 5.2.2 Caracterização mineralógica

A análise mineralógica foi realizada utilizando-se um difratômetro Philips modelo PW 3710, dotado de tubo de cobre. As amostras em pó foram previamente secas em estufa a 50°C e moídas em almofariz de ágata. Nessas amostras procederam-se dois tratamentos: concentração de óxidos de Fe (NORRISH e TAYLOR, 1961, modificado por KÄMPF e SCHWERTMANN, (1982)) e desferrificação (MEHRA e JACKSON, 1960).

Na leitura das amostras com Fe concentrado, a variação angular foi de 15 a 45°2 $\theta$  para a caracterização da goethita (Gt), hematita (Hm) e maghemita (Mgh), com uma velocidade angular de 0,5°2 $\theta$ /minuto, em modo por passos (*step*), com tempo de leitura de 1 s por passo. Na leitura das amostras desferrificadas a variação angular foi de 4 a 45°2 $\theta$  para a caracterização da caulinita (Ct) e gibbsita (Gb), com velocidade angular de 1°2 $\theta$ /minuto. Para interpretação dos resultados utilizou-se o programa *X Pert High Score Plus* versão 3.0, na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) Campus Lages. Foram identificados os principais reflexos, Largura à Meia Altura (LMA) e a área dos reflexos identificados. Diante disso, foi possível estimar semiquantitativamente, a participação relativa de cada mineral nas amostras, através de uma relação percentual da área de cada um em relação à área total obtida da soma das áreas individuais de todos os minerais.

### 5.2.3 Suscetibilidade magnética

A suscetibilidade magnética foi determinada utilizando 10 gramas na fração de terra fina seca ao ar (TFSA) dos pontos amostrais e na fração argila, areia fina e TFSA dos perfis. Para essa determinação, utilizou-se um MS2 da Bartington Ltda. acoplado a um sensor de laboratório MS2B (Figura 3) do Laboratório de Mineralogia do Solo da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Jaboticabal. Todas as amostras foram lidas em baixa frequência (0,47 kHz).



Figura 3 - Medidor de suscetibilidade magnética Bartington MS2 com um sensor de leitura em laboratório MS2B.

### 5.3 Análises Estatísticas

Nos perfis foram realizadas análises de correlação linear de Pearson para averiguar a correlação da SM com os outros atributos do solo. Com os resultados obtidos nas transeções, analisou-se a estatística descritiva, calculando-se a média, valores mínimos e máximos, variância, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV) e a assimetria. Nos pontos amostrais das transeções também foram realizadas regressões lineares para cada profundidade a fim de avaliar o quanto a SM contribui para a predição do teor de argila, areia e COS.

Para verificar a dependência espacial dos atributos nos pontos amostrais, foi utilizada a geoestatística com ajustes de variogramas. O ajuste dos variogramas foi baseado nos coeficientes linear (a) e angular (b), obtidos nos procedimentos de validação cruzada (VIEIRA, 2000). Na validação cruzada, cada valor observado é retirado e, posteriormente, estimado, utilizando os parâmetros do modelo ajustado e os valores observados nas amostras vizinhas.

Os modelos matemáticos foram ajustados aos variogramas experimentais, possibilitando a definição do efeito pepita ( $C_0$ ), do patamar ( $C_0+C_1$ ), o alcance e o grau de



dependência espacial. Os valores foram interpolados por meio da krigagem ordinária e posteriormente foram gerados mapas dos atributos do solo na topossequência para as quatro profundidades.

Todos os resultados provenientes dos pontos amostrais das transeções, teor de areia, silte, argila, carbono orgânico e SM, foram submetidos à análise de autocorrelograma - Split Moving Windows (SMW) (PEREIRA et al., 1996, SIQUEIRA et al., 2015), para a verificação dos compartimentos da paisagem (MATIAS et al., 2015; SIQUEIRA, 2015). Esta avaliação é baseada em cálculos estatísticos de dissimilaridade, entre as sequências de pontos de amostras coletados na sequência da transeção. O SMW possibilita identificar com precisão limites de compartimentos em uma área com padrões de homogeneidade (SIQUEIRA et al., 2015).

Nesta análise, uma série de “n” pontos é escolhida, estas que são chamados de “Janela”. Esta janela é deslocada, desde o início até o fim da transeção, ponto por ponto. Em cada posição da janela, os pontos selecionados são divididos em duas partes, onde a média entre eles são calculadas e comparadas. As comparações são realizadas utilizando a estatística t e o resultado é expresso em um gráfico em função da distância. O tamanho da janela é determinado de acordo com análises de autocorrelação dos atributos. Além do tamanho da janela, há outro parâmetro para aplicar o SMW, é necessário também estabelecer o índice de Mullion (BERG, 1988), este que indica a distância pré-fixada entre duas janelas.

Neste estudo, foram utilizadas janelas de 7 observações e Mullion de 1 observação. Estes parâmetros foram escolhidos por meio de testes com validação das impressões de campo. O gráfico gerado ilustra os picos mais altos, representando o valor mais elevado da estatística t e os limites matemáticos na topossequência.

## **6. ESTUDO 1. ASSINATURA MAGNÉTICA NA CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE GRANULOMÉTRICA E CARBONO ORGÂNICO DE SOLOS BASÁLTICOS**

### **6.1 Introdução**

A demanda nacional e internacional por mapas de atributos do solo tem aumentado. O aumento desta demanda relaciona-se a dois fatores: (i) necessidade de desenvolver indicadores de impactos globais do uso e da ocupação do solo (ROCKSTROM et al., 2009) e (ii) a carência de mapas de solos detalhados para balizar planejamento sustentável. Várias abordagens envolvendo a caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo têm sido propostas para regiões temperadas e tropicais para resolver um conjunto de questões globais, como segurança alimentar e mudança climática, e também suporte para as políticas ambientais. A suscetibilidade magnética (SM) é uma das abordagens que tem mostrado bons resultados para caracterização da variabilidade dos atributos dos solos da região tropical.

Com os avanços dos sensores e de técnicas alternativas na avaliação da interação magnética (PREETZ et al., 2008; SIQUEIRA et al., 2010), o uso da SM como ferramenta auxiliar na caracterização quantitativa da variabilidade de campo ganhou novas expectativas. O magnetismo e a SM são utilizados rotineiramente para o sensoriamento remoto para aumentar o detalhamento do mapa geológico (RUY et al., 2006) e no desenvolvimento de assinaturas geomagnéticas para estudos detalhados sobre os solos da China (XIA et al., 2007).

Uma vez que é sensível às variações mineralógicas, a SM pode ser interpretada como indicador da pedodiversidade nos solos tropicais, onde os óxidos de ferro são os principais causadores da variabilidade físico-química dos solos. Assim, pode-se inferir que o mapa da SM expressa o mapa dos processos pedogenéticos do solo na zona de clima tropical (SIQUEIRA et al., 2015; CAMARGO et al., 2014).

Os principais minerais com expressão magnética dos solos tropicais estão na fração argila (maghemita e ferridrita ferrimagnética) (MICHEL et al., 2010; TORRENT et al., 2010), silte e areia fina (magnetita) (DEARING, 1994). Dessa maneira os valores da SM podem ser utilizados para estimar as frações granulométricas com boa precisão (SIQUEIRA et al. 2010, 2015).

O objetivo do trabalho foi utilizar os valores da assinatura magnética na caracterização da variabilidade granulométrica e carbono orgânico de solos basálticos no estado do Rio Grande do Sul.

## 6.2 Material e Métodos

O estudo foi realizado no município de Santo Augusto localizado ao norte do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 4). O clima da região segundo a classificação de Köppen é do tipo Cfa – subtropical, com precipitação média anual de 1.833 mm bem distribuídos ao longo do ano e temperatura média de 19 °C.

O relevo predominantemente é suave ondulado a ondulado. Segundo informações da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2006), a região faz parte da Formação Serra Geral, onde ocorreram derrames de basaltos, basalto andesitos, riolitos e riolitos. Foram encontradas as seguintes classes de solo na área: Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, Nitossolo Vermelho Eutrófico latossólico, Latossolo Vermelho Distrófico típico e Latossolo Vermelho Eutrófico típico.

A área de estudo possui 22 hectares com declividade média de 2%. Foram coletados 87 pontos espaçados de 50 metros, densidade amostral de 5 pontos ha<sup>-1</sup>. A maior extensão da área (1.450 m) acompanha o sentido do decaimento da altitude (Figura 4c). O planejamento amostral segue proposta de estudos anteriores para caracterização da variabilidade espacial que observaram máxima variação ao longo da vertente (SOUZA et al., 2003; CAMARGO et al., 2015, SIQUEIRA et al., 2015).

Em cada ponto foram obtidas amostras nas profundidades de 0,00-0,05 m, 0,05-0,15 m, 0,15-0,30 m e 0,30-0,60 m. Após secar ao ar, moídas e peneiradas em malha de 2 mm, foi determinada a composição granulométrica, o teor de carbono orgânico do solo (COS) e a SM. A leitura da SM foi realizada utilizando o equipamento Bartington MS2 em baixa frequência (0,47 kHz).

Além dos pontos amostrais, foram abertas cinco trincheiras para caracterização dos perfis de solo. Nas amostras dos perfis foram determinadas a composição granulométrica, teor de COS, alumínio trocável, acidez potencial, pH em água e em KCl, potássio, cálcio, magnésio, ferro cristalino, ferro de baixa cristalinidade, ferro total, difração de raio X e SM. Feita a estatística descritiva e teste de correlação linear de Pearson para averiguar a correlação

da SM com os outros atributos do solo. Para verificar a dependência espacial dos atributos nos pontos amostrais, foi utilizada a geoestatística com ajustes de variogramas. Com os valores obtidos, procedeu-se a interpolação por meio da krigagem ordinária, e, posteriormente foram gerados mapas dos atributos do solo na topossequência para as quatro profundidades.

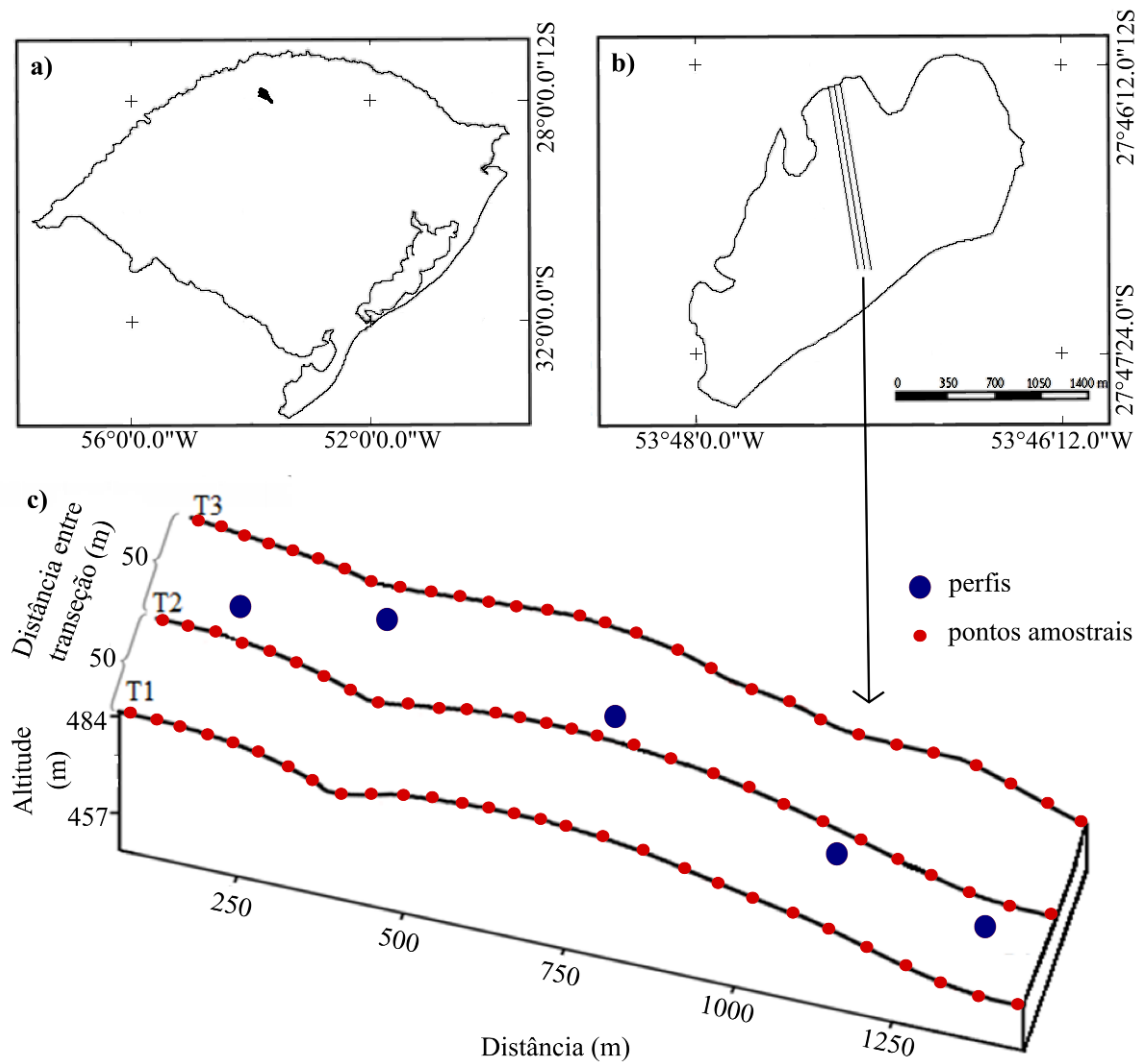


Figura 4 - Localização do município de Santo Augusto no Estado do Rio Grande do Sul e área experimental (a e b). Modelo digital de elevação e croqui de amostragem (c).

### 6.3 Resultados e Discussão

Para cada atributo, foram realizadas análises de comparações de média para cada profundidade, onde foi constatado que não houve diferenças significativas. Esses resultados possibilitaram a análise em conjunto de amostras de uma mesma profundidade. Em profundidade, todos os atributos diferiram significativamente. Os valores da camada superficial provavelmente foram influenciados pelo sistema de manejo, enquanto que, na camada mais profunda os atributos se mantiveram mais estáveis (Tabela 2).

Tabela 2 - Estatística descritiva dos atributos dos solos nas quatro profundidades dos pontos amostras.

Atributo	Profundidade (m)	Média	Min.	Max.	Variância	DP	CV	Assimetria
Argila g kg <sup>-1</sup>	0,00-0,05	599,6a	420,0	710,3	4705,7	68,6	11,4	-0,91
	0,05-0,15	653,5b	473,5	770,2	2848,8	53,3	8,2	-1,02
	0,15-0,30	669,1bc	510,0	801,0	2936,3	53,2	7,9	-0,90
	0,30-0,60	679,5c	371,0	772,0	5916,1	76,9	11,3	-1,91
Silte g kg <sup>-1</sup>	0,00-0,05	300,6a	120,3	512,1	4577,6	67,6	22,5	0,82
	0,05-0,15	264,9b	180,9	450,3	1915,9	43,7	16,5	1,12
	0,15-0,30	259,8b	80,3	410,3	2808,1	52,9	20,4	0,37
	0,30-0,60	253,2b	150,3	590,7	4577,9	67,6	26,7	2,32
Areia g kg <sup>-1</sup>	0,00-0,05	99,7a	40,0	230,3	1348,8	36,0	36,1	1,33
	0,05-0,15	81,7b	40,0	210,3	1016,7	31,8	38,9	1,46
	0,15-0,30	71,0c	30,0	210,1	897,7	29,9	42,1	1,69
	0,30-0,60	67,2c	30,0	210,0	955,1	30,9	45,9	1,93
COS g kg <sup>-1</sup>	0,00-0,05	22,8a	11,0	34,0	19,4	4,4	19,3	0,27
	0,05-0,15	16,4b	7,0	25,0	8,1	2,8	17,1	-0,16
	0,15-0,30	14,1c	7,0	17,0	5,3	2,3	16,3	-0,92
	0,30-0,60	12,9c	8,0	18,0	10,6	3,3	25,6	2,07
SM (10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	0,00-0,05	3729,0a	1822,6	4700,3	591937,5	759,6	20,3	-0,87
	0,05-0,15	3749,8a	1827,6	4810,3	658239,7	798,7	20,6	-1,00
	0,15-0,30	3873,5b	1631,3	5007,0	723070,1	840,2	21,6	-1,12
	0,30-0,60	3844,1b	1727,3	4793,0	668056,6	809,0	21,0	-1,03

DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; COS - carbono orgânico do solo; SM - suscetibilidade magnética. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

O incremento de argila em profundidade, provavelmente está sendo influenciado pelos processos de translocação de origem pedogênica. Resultados semelhantes foram

constatados por Demattê et al. (1994). Na fração argila são encontrados minerais de expressão magnética como maghemita e ferridrita ferrimagnética (MICHEL et al., 2010; TORRENT et al., 2010), por isso o aumento dos valores de SM em profundidade.

As análises para verificar a correlação entre os teores de argila e a SM nos perfis comprovaram uma relação entre os atributos (Tabela 3), apresentando resultado significativo a 5% de probabilidade no horizonte subsuperficial,  $r = 0,88$ . Souza Jr et al. (2010), estudando horizontes B em diferentes solos do estado do Paraná, verificou correlação significativa entre a SM e a argila, apresentando  $R^2$  de 0,98 indicando a presença de minerais superparamagnéticos. Resultados semelhantes também foram encontrados por Peluco (2013), ( $R^2 = 0,78$ ), em Latossolos de São Paulo na profundidade de 0,00 a 0,80 m.

Tabela 3 - Correlação linear de Pearson entre os atributos físicos, químicos e a suscetibilidade magnética (SM) dos horizontes superficiais e subsuperficiais dos cinco perfis de solo.

<b>Atributos</b> (g kg <sup>-1</sup> )	<b>Horizonte Ap</b> (profundidade entre 0,00-0,30)	<b>Horizonte Bw1</b> (profundidade entre 0,60-1,36)
Areia	-0,94**	-0,90*
Silte	-0,40 <sup>ns</sup>	-0,55 <sup>ns</sup>
Argila	0,73 <sup>ns</sup>	0,88*
Fe <sub>s</sub>	-0,87*	-0,87*
Fe <sub>d</sub>	-0,53 <sup>ns</sup>	0,83 <sup>ns</sup>
Fe <sub>o</sub>	0,24 <sup>ns</sup>	-0,07 <sup>ns</sup>
COS	0,44 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>

Fe<sub>s</sub> - ferro extraído com ácido sulfúrico; Fe<sub>d</sub> - ferro extraído com ditionito, citrato e bicarbonato sódio; Fe<sub>o</sub> - ferro extraído com oxalato ácido de amônio; COS - carbono orgânico do solo; r - coeficiente de correlação. \* - Significativo a 5% de probabilidade; \*\* - Significativo a 1% de probabilidade; ns - Não Significativo.

A correlação entre os teores da areia e a SM apresentaram valores significativos de  $r = -0,94$  na camada superficial e  $r = -0,90$  na camada subsuperficial (Tabela 3). Nas frações silte e areia fina é encontrada a magnetita, mineral litogenético característico de solos de origem basáltica. A correlação positiva da SM com teor de argila e negativa com areia fina indica que prevalece nos solos minerais pedogenéticos em relação aos minerais litogenéticos.

A correlação entre a SM e os atributos químicos do solo em sua maioria não apresentaram significância, divergindo com resultados encontrados por Siqueira et al. (2010) em Argissolos originários de sedimentos areníticos, e Matias et al. (2014) em Latossolos originados de arenito e basalto. O único atributo químico do solo que apresentou correlação

significante com a SM foi o ferro total (Fes), apresentando  $r = -0,87$ , comprovando a estreita relação dos teores de ferro com a SM.

A correlação da SM com o COS nos perfis não apresentou resultado significativo. Matias et al. (2014) também não encontrou significância na correlação da SM com a matéria orgânica destes atributos na profundidade de 0,60 - 0,80 m de profundidade, apresentando  $r = 0,05$ . No entanto, os autores encontraram  $r = 0,22$  ( $P < 0,01$ ) na profundidade de 0,00 - 0,20 m, concordando com Barbosa (2014) que encontrou  $r = 0,41$  ( $P < 0,05$ ) em Latossolos originados de Basalto, Depósito Colúvio-Aluvionar e Depósito Aluvionar na profundidade de 0,00 - 0,25 m.

Tabela 4 - Geoestatística dos atributos do solo nos perfis estudados.

Variável	Modelo	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	GDE (%)	Alcance (m)	Validação Cruzada	
						a	b
Profundidade 0,00 - 0,05 m							
Argila (g Kg <sup>-1</sup> )	Esférico	280,0	4600,0	0,1	250,0	61,1	0,9
Areia (g Kg <sup>-1</sup> )	Esférico	600,0	1150,0	0,5	250,0	-5,8	1,1
COS (g Kg <sup>-1</sup> )	Esférico	9,0	11,0	0,8	190,0	-0,7	1,0
SM (10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	Esférico	1000,0	481000,0	0,0	360,0	-22,0	1,0
Profundidade 0,05 - 0,15 m							
Argila (g Kg <sup>-1</sup> )	EPP						
Areia (g Kg <sup>-1</sup> )	Esférico	3,0	9,3	0,3	200,0	0,0	1,0
COS (g Kg <sup>-1</sup> )	Esférico	0,1	0,2	0,5	220,0	0,5	0,6
SM (10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	Esférico	1000,0	551000,0	0,0	330,0	48,8	0,9
Profundidade 0,15 - 0,30 m							
Argila (g Kg <sup>-1</sup> )	Esférico	6,0	23,5	0,3	200,0	-0,4	1,0
Areia (g Kg <sup>-1</sup> )	Esférico	2,0	8,0	0,3	230,0	0,0	1,0
COS (g Kg <sup>-1</sup> )	Esférico	0,1	0,2	0,5	270,0	0,2	0,8
SM (10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	Esférico	1000,0	571000,0	0,0	360,0	-3,3	1,0
Profundidade 0,30 - 0,60 m							
Argila (g Kg <sup>-1</sup> )	EPP						
Areia (g Kg <sup>-1</sup> )	Esférico	2,0	8,5	0,2	250,0	-0,3	1,1
COS (g Kg <sup>-1</sup> )	Esférico	0,1	0,2	0,5	150,0	0,0	0,9
SM (10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	Esférico	1000,0	571000,0	0,0	350,0	-66,7	1,0

EPP- efeito pepita puro, C<sub>0</sub>- efeito pepita, C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub>- patamar, GDE- grau de dependência espacial [ $C_0 / (C_0 + C_1)$ ] \*100, a- coeficiente angular, b- coeficiente linear, COS- carbono orgânico do solo, SM- suscetibilidade magnética.

Na Tabela 4, são apresentados os parâmetros dos variogramas experimentais e na Figura 5 os variogramas ajustados. De acordo com McBratney et al. (2003) a geoestatística auxilia na melhor compreensão da variabilidade dos atributos do solo. Desta maneira, foram gerados variogramas experimentais para os teores de areia, argila, COS e SM, nos quais comprovaram dependência espacial em todos os atributos, em determinadas profundidades, sendo o modelo esférico o que apresentou melhor ajuste à estrutura da variabilidade espacial dos dados. Em estudos da ciência do solo, o modelo esférico é frequente em estudos que avaliam a variabilidade de atributos do solo (CORTEZ et al., 2011; MATIAS et al., 2014).

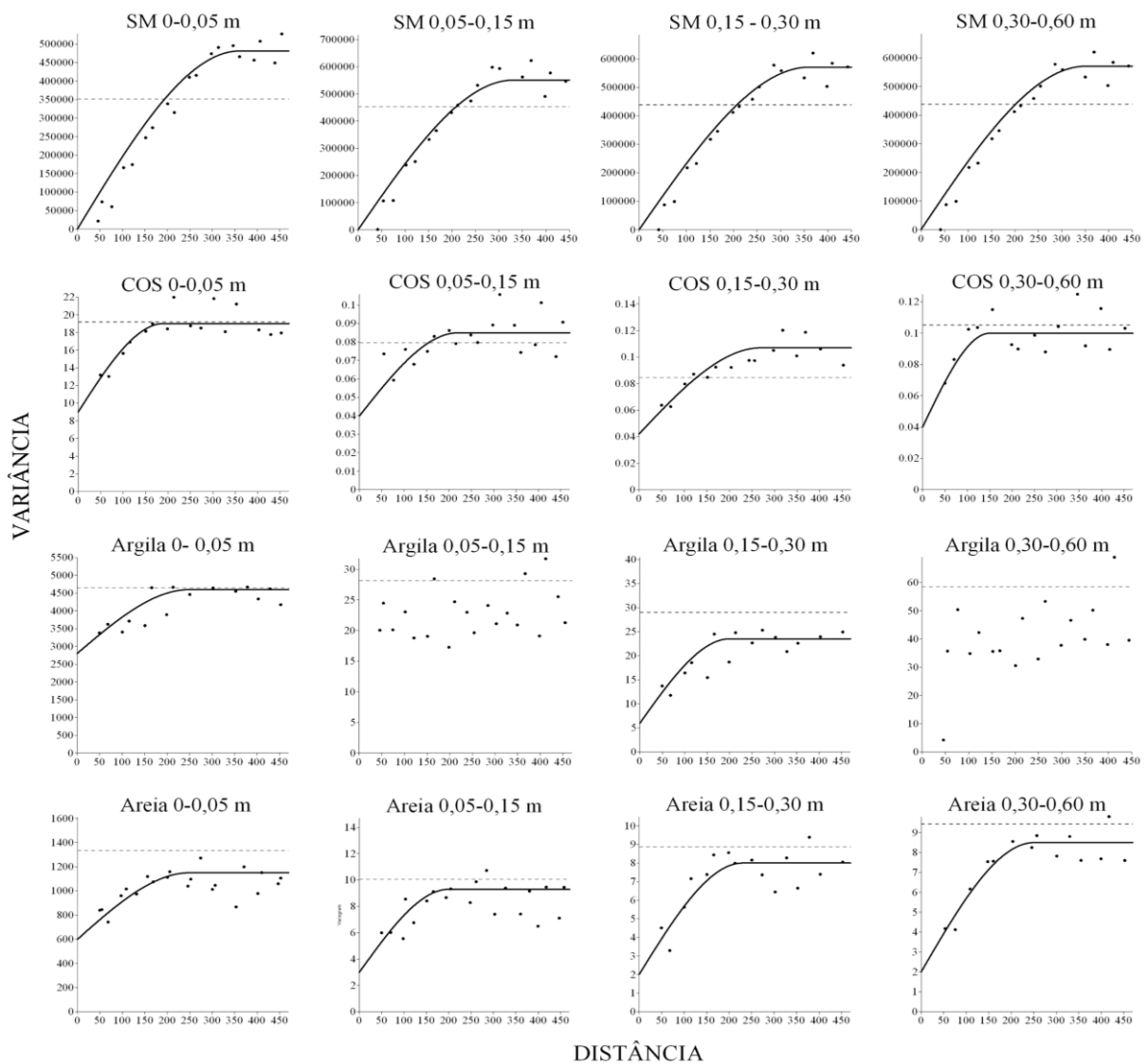


Figura 5 - Variogramas do conteúdo de areia, argila e carbono orgânico do solo (COS) ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e suscetibilidade magnética (SM) ( $10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ) nas quatro profundidades.



O modelo esférico indica transição abrupta dos valores modelados ao longo da paisagem (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989). Estas transições abruptas geralmente estão associadas aos fatores de formação do solo como transição geológica e ou compartimentos da paisagem (SIQUEIRA et al., 2015).

O efeito pepita de acordo com Landim (2006) refere-se aos erros de medição ou a dados não coletados em intervalos suficientemente pequenos para expressar o comportamento espacial. O atributo que apresentou o menor efeito pepita (C0) nas quatro profundidades foi o COS, indicando baixo erro experimental em uma malha de amostragem de 50 m.

A análise geoestatística mostrou que os atributos estudados apresentaram grau de dependência espacial (GDE) variando de fraco, com 80% de no COS na profundidade de 0,00-0,05 m, à forte na SM em todas as profundidades apresentando GDE de 0%, de acordo com a classificação de Cambardella et al. (1994). O alcance médio dos atributos estudados são 243 m para areia, 225 m para argila, 207 para o COS e 350 m para a SM, comprovando o potencial da SM. Santos et al. (2013b) obtiveram resultados semelhantes em Neossolos e Argissolos do Piauí, onde a SM apresentou maior alcance médio superior a maioria dos atributos do solo estudados e dependência espacial de 0%.

Na Figura 6, estão apresentados os mapas obtidos por meio da interpolação pelo método da krigagem, que possibilitam melhor visualização da dependência espacial dos atributos estudados (escala 1:345). Observa-se nos mapas uma grande amplitude nestes atributos em uma mesma profundidade. De acordo com Souza et al. (2003) essas diferenças na distribuição espacial dos atributos do solo estão associadas às variações do relevo.

Os mapas referentes aos teores de argila na profundidade de 0,05-0,15 e 0,30-0,60 e areia na profundidade de 0,05-0,15, não foram gerados por apresentarem o efeito pepita puro (EPP), impossibilitando o ajuste no variograma. De acordo com Landim (2006) o efeito pepita puro ocorre quando não há covariância entre os valores, deste modo, a análise variográfica não se aplica.

A parte inferior de cada mapa representa a área mais elevada, enquanto que a parte superior representa a parte mais baixa da paisagem. Pode-se observar que, de maneira geral, os teores mais elevados de argila e COS encontram-se na cota mais baixa do terreno. Comportamento semelhante foi encontrado por Campos et al. (2013) em Latossolos do estado Amazonas, ao encontrar teores mais elevados de argila na cota inferior. Essa distribuição está atrelada ao relevo, que transportaram as partículas menores ao local mais baixo da paisagem.

Em relação a SM, os menores valores foram encontrados no topo da paisagem. De acordo com estudos de Cortez et al. (2011) regiões com menores valores de SM indicam maiores potenciais produtivos.

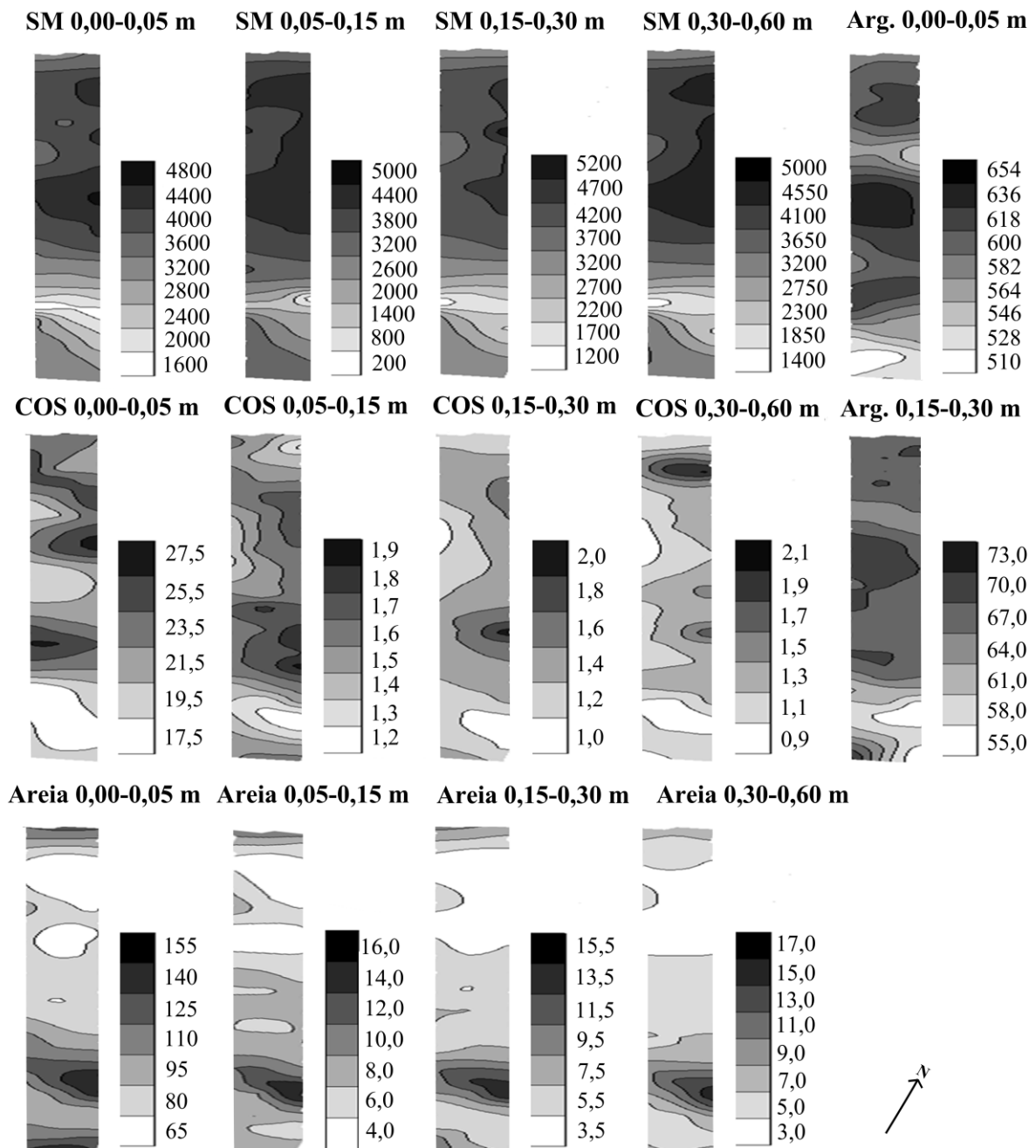


Figura 6 - Mapas da distribuição espacial dos atributos, teor de areia, argila, carbono orgânico do solo (COS) e suscetibilidade (SM), nas profundidades de 0,00-0,05 m, 0,05-0,15 m, 0,15-0,30 m e 0,30-0,60 m.

## 6.4 Conclusões

Com base nos valores de correlação entre a SM e a areia ( $r = -0,94$   $P < 0,01$ ), a argila ( $r = 0,88$   $P < 0,05$ ), e no padrão espacial encontrado entre a areia e a argila com a SM, pode-se afirmar que a SM tem potencial para aplicação no mapeamento desses atributos do solo no Planalto do Rio Grande do Sul. Enquanto que, o COS apresentou correlação ( $r = 0,49$ ) não significativa neste estudo.

## **7. ESTUDO 2. SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA DETERMINAÇÃO DE LIMITES DE COMPARTIMENTOS DA PAISAGEM**

### **7.1 Introdução**

A Suscetibilidade Magnética (SM) representa uma medida que informa o quanto um material é magnetizável e está diretamente relacionada aos componentes desse material (DEARING, 1999). A utilização das medidas de SM tem cada vez mais aceitação por suas inúmeras vantagens, tais como rapidez, eficácia e custo acessível, sendo utilizada nas áreas da arqueologia (MUNIZ, 2014), paleomagnetismo (JIANG et al., 2015), e também em estudos relacionados à ciência do solo em região de clima temperado e tropical. Nos solos tropicais a SM tem sido utilizada para expressar a relação de causa e efeito entre a paisagem e os óxidos de ferro, considerados pedoindicadores dos fatores e processos de formação do solo (CAMARGO et al., 2014; MATIAS et al. 2014; 2015; SIQUEIRA et al., 2015). A SM está diretamente relacionada com os óxidos de ferro, portanto é covariativa das características mineralógicas dos solos. Assim, devido à complexibilidade para caracterização mineralógica, a SM torna-se alternativa com potencial de aplicação para estudos que desejam relacionar a mineralogia dos solos tropicais e subtropicais com a compartimentalização do relevo para estudos de gênese, classificação e mapeamento detalhado de solos (CUNHA et al., 2005).

Em uma mesma classe de solo, onde as mesmas são consideradas homogêneas, a distribuição dos atributos do solo não ocorre de maneira regular ao longo da paisagem, pois sua variabilidade está atrelada a sua característica de origem, adquiridas durante o processo pedogenético. Nesse contexto, a SM representa uma medida de fácil obtenção, que possibilita inferir indiretamente atributos de difícil determinação, como o teor de argila, óxidos de ferro e saturação por bases (SIQUEIRA et al., 2010). Os resultados obtidos nas medições da SM podem ser usados como informação auxiliar a outras técnicas analíticas, como análises físicas, químicas e mineralógicas.

Além de inferir indiretamente outros atributos, a SM já demonstrou eficiência para diferenciar limites em superfícies geomórficas, geológicas e pedológicas (BARRIOS et al., 2012; CAMPOS et al., 2013; MATIAS et al., 2014). No entanto, a separação correta dos

limites deve-se ao tratamento adequado dos dados, com métodos estatísticos que identifiquem a variabilidade dos atributos do solo e sua distribuição ao longo da paisagem conforme suas características de origem, detectando diferenças significativas entre um compartimento e outro (SIQUEIRA, 2013).

Deste modo, o presente estudo teve por objetivo verificar o comportamento da SM ao longo de uma toposequência e sua eficácia na determinação dos limites de compartimentos da paisagem.

## 7.2 Material e Métodos

O estudo foi conduzido no município de Santo Augusto, no Estado do Rio Grande do Sul em uma área experimental de 350 ha (Figura 7), na latitude 27°47'18,71" e longitude 53°46'42,98". O clima da região segundo a classificação de Köppen é do tipo Cfa – subtropical, com precipitação média anual de 1.833 mm bem distribuídos ao longo do ano e temperatura média de 19 °C. O relevo predominantemente é suave ondulado a ondulado. Segundo informações da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2006), a região faz parte da Formação Serra Geral, onde ocorreram derrames de basaltos, basalto andesitos, riolitos e riolitos.

Foram feitas três transeções a partir do topo para o sentido do caimento mais suave do declive (espigão da paisagem), distanciadas 50 m entre elas. Em cada transeção foram marcados 29 pontos com distância regular de 50 m, totalizando 87 pontos amostrais nas três transeções. Todos os pontos foram georreferenciados. Em cada ponto foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0,00-0,05, 0,05-0,15, 0,15-0,30 e 0,30-0,60 m, por meio de tradagens. Foram abertas cinco trincheiras em locais representativos dos compartimentos da paisagem, pré-identificadas com auxílio do modelo digital de elevação e observações de campo. Nas trincheiras foram realizadas descrição morfológica e coleta de amostras dos horizontes dos solos para a realização de análises químicas, físicas, mineralógicas e de SM.

As amostras coletadas nas transeções foram secas (TFSA) e determinadas à composição granulométrica, o carbono orgânico do solo (COS) e a SM. Nas amostras dos perfis foram determinadas a composição granulométrica, teor de COS, alumínio trocável ( $Al^{3+}$ ), acidez potencial (H+Al), pH em água e em KCl, potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na fração TFSA e ferro cristalino ( $Fe_d$ ), ferro de baixa cristalinidade ( $Fe_o$ ), ferro total

(Fe<sub>s</sub>) e difração de raios X na fração argila e a SM na fração TFSA, argila e areia fina. Maiores detalhes das análises estão descritos no tópico 5.2.

Os dados de SM obtidos nas amostras coletadas nas três transeções foram analisados por estatística descritiva, calculando-se a média, valores mínimos e máximos, variância, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV) e a assimetria. Para a comparação da média da SM em diferentes profundidades e compartimentos, foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Os cálculos foram efetuados no Software Livre R (R CORE TEAM, 2014). Com os dados obtidos dos perfis foi verificada a correlação entre a SM da fração argila com o teor de Gt, Hm e Mgh, por meio da construção de modelos de regressão.

Todos os resultados provenientes dos pontos amostrais das transeções, teor de areia, silte, argila, carbono orgânico e SM, foram submetidos a análise “Split Moving Windows” (SMW), para a verificação dos compartimentos da paisagem (MATIAS, 2010; SIQUEIRA, 2013). Maiores detalhes das análises estatísticas estão expostos no item 5.3.

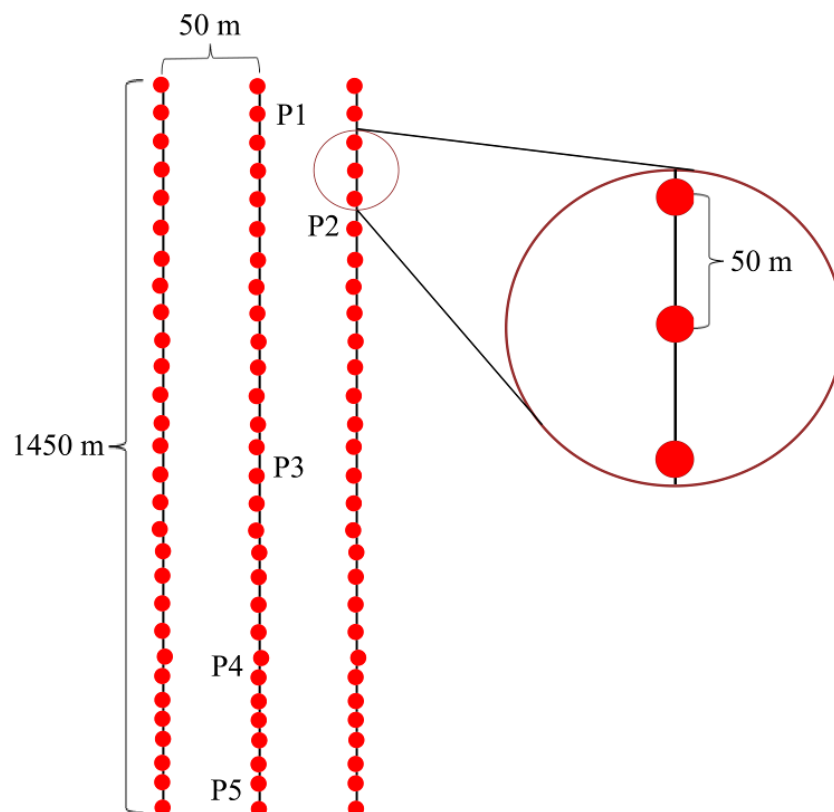


Figura 7 - Esquema amostral da disposição dos pontos amostrais e dos perfis (P1, P2, P3, P4, P5) nas transeções, com suas respectivas distâncias.

### 7.3 Resultados e Discussão

Os solos que ocorrem na área foram classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, Nitossolo Vermelho Eutrófico latossólico, Latossolo Vermelho Distrófico típico e Latossolo Vermelho Eutrófico típico.

Os teores de areia, silte e argila (Tabela 5) estão distribuídos nos perfis ao longo da topossequência de maneira regular, apresentando um suave acréscimo de argila e um decréscimo da fração areia em profundidade em todos os perfis. Essas variações podem estar associadas ao fluxo de água que favorecem o carreamento e a redistribuição das partículas na paisagem. Estudos têm mostrado que a variação de atributos do solo, ao longo de uma vertente, são expressões do material de origem e relevo. Meireles et al. (2012) avaliaram atributos químicos e físicos do solo em uma topossequência de origem basáltica, onde constataram que a distribuição espacial é dependente das formas do relevo, possibilitando, por meio de técnicas estatísticas, distinguir diferentes ambientes. Campos et al., (2007) também verificaram diferentes superfícies em uma litossequência de transição arenito-basalto.

A relação silte/argila apresentou valores variando de 0,3-0,4 na camada superficial e de 0,1-0,2 no horizonte Bw dos cinco perfis. O COS apresentou os maiores valores nos horizontes superficiais, com decréscimo em profundidade, conforme esperado. Os menores teores de COS foram constatados no P5, localizado em cota altimétrica inferior aos demais perfis.

O teor de Fe total ( $Fe_s$ ) dos solos variou de 164,1 g kg<sup>-1</sup> no topo para 74,5 g kg<sup>-1</sup> na encosta inferior. A relação  $Fe_o/Fe_d$  apresentou valores variando de 0,06 no perfil 4 a 0,19 no perfil 1. A variação da relação  $Fe_o/Fe_d$  ao longo da paisagem mostrou que o ambiente de formação mais propício para cristalização é onde está inserido o perfil 4, o que pode ser confirmado pelos DRX (Tabela 6 e Figura 8). Estes óxidos de ferro são pedogenéticos, logo quanto mais bem cristalizados, indicam que o processo pedogenético foi mais intenso no compartimento da paisagem 4 (Figura 11). A relação  $Fe_d/Fe_s$  apresentou variações de 0,10 a 0,93 indicando solos altamente intemperizados, sendo esses valores próximos aos obtidos por Inda e Kämpf (2003), com variações entre 0,68 e 0,87 em horizontes B de solos de diversas regiões do Brasil e por Dalmolin et al. (2006), com valores de 0,7 até 1,0 em Latossolos do Planalto do Rio Grande do Sul.

Tabela 5 - Características físicas e químicas dos cinco perfis estudados.

Perfis	Prof. (m)	Horiz.	-----g kg <sup>-1</sup> -----			S/A	C.O.S g kg <sup>-1</sup>	----- g kg <sup>-1</sup> -----			Fe <sub>o</sub> /Fe <sub>d</sub>	Fe <sub>d</sub> /Fe <sub>s</sub>
			Areia	Silte	Argila			Fe <sub>s</sub>	Fe <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub>		
P1	0,00-0,19	Ap	56	277	667	0,4	23,6	83,8	35,7	6,7	0,19	0,43
	0,20-0,35	A1	43	281	676	0,4	15,9	77,7	58,8	7,9	0,14	0,76
	0,36-0,60	AB	27	249	724	0,3	11,6	94,1	67,7	6,6	0,10	0,72
	0,61-0,85	BA	25	205	769	0,3	8,6	74,5	43,2	8,1	0,19	0,58
	0,86-1,36	Bw1	21	175	804	0,2	6,1	77,6	71,9	8,4	0,12	0,93
	1,37-1,70	Bw2	21	176	803	0,2	5,2	103,2	46,8	6,5	0,14	0,45
P2	0,00-0,30	Ap	143	256	601	0,4	21,5	158,6	59,8	6,0	0,10	0,38
	0,31-0,60	BA	98	244	658	0,4	11,9	141,8	70,5	7,0	0,10	0,50
	0,61-0,90	Bw	112	186	702	0,3	7,2	142,2	52,7	8,6	0,16	0,37
P3	0,00-0,12	Ap	73	254	673	0,3	20,7	127,7	38,1	6,3	0,17	0,30
	0,13-0,47	B	48	190	763	0,2	10,3	115,9	65,9	6,5	0,10	0,57
	0,48-0,82	Bw1	46	155	799	0,2	8,1	121,9	75,3	7,5	0,10	0,62
	0,83-1,25	Bw2	39	124	837	0,1	6,5	107,7	74,5	7,2	0,10	0,69
	1,26-1,70	Bw3	40	143	817	0,2	3,60	111,4	46,8	7,7	0,16	0,42
P4	0,00-0,23	Ap	54	279	667	0,4	23,3	117,9	60,8	5,3	0,09	0,52
	0,24-0,42	A1	31	231	737	0,3	12,8	113,9	71,3	4,5	0,06	0,63
	0,43-0,64	BA	32	177	791	0,2	10,7	110,7	75,9	4,9	0,07	0,69
	0,65-1,10	Bw1	27	167	806	0,2	7,7	103,4	77,8	6,4	0,08	0,75
	1,11-1,70	Bw2	27	186	788	0,2	4,5	96,4	65,9	6,9	0,10	0,68
P5	0,00-0,24	Ap	119	341	540	0,6	16,8	164,1	39,2	6,4	0,16	0,24
	0,25-0,38	A1	77	312	611	0,5	14,5	150,3	38,3	7,0	0,18	0,25
	0,39-0,63	AB	93	247	660	0,4	11,4	138,1	67,5	7,2	0,11	0,49
	0,64-0,96	Bw1	60	172	768	0,2	11,8	124,4	44,8	5,7	0,13	0,36
	0,97-1,34	Bw2	52	189	758	0,2	10,9	120,6	66,6	4,8	0,07	0,55
	1,35-1,70	Bw3	60	170	770	0,2	10,7	116,6	69,7	5,7	0,08	0,59

Prof. - profundidade; Horiz. - horizonte; COS - carbono orgânico do solo; S/A - relação silte/argila; Fe<sub>s</sub> - ferro extraído com ácido sulfúrico; Fe<sub>d</sub> - ferro extraído com ditionito, citrato e bicarbonato sódico; Fe<sub>o</sub> - ferro extraído com oxalato ácido de amônio; Fe<sub>o</sub>/Fe<sub>d</sub> - relação ferro extraído com oxalato/ferro extraído com ditionito.

Na Figura 8, são apresentados os difratogramas referentes à composição mineralógica a partir da concentração de óxidos de ferro, onde se pode observar os reflexos dos principais minerais presentes nas amostras dos horizontes Ap e Bw1 de todos os perfis. Os solos da área estudada são derivados de rochas basálticas com alto grau de intemperismo, que explica a predominância da hematita (FERNANDES et al., 2004).



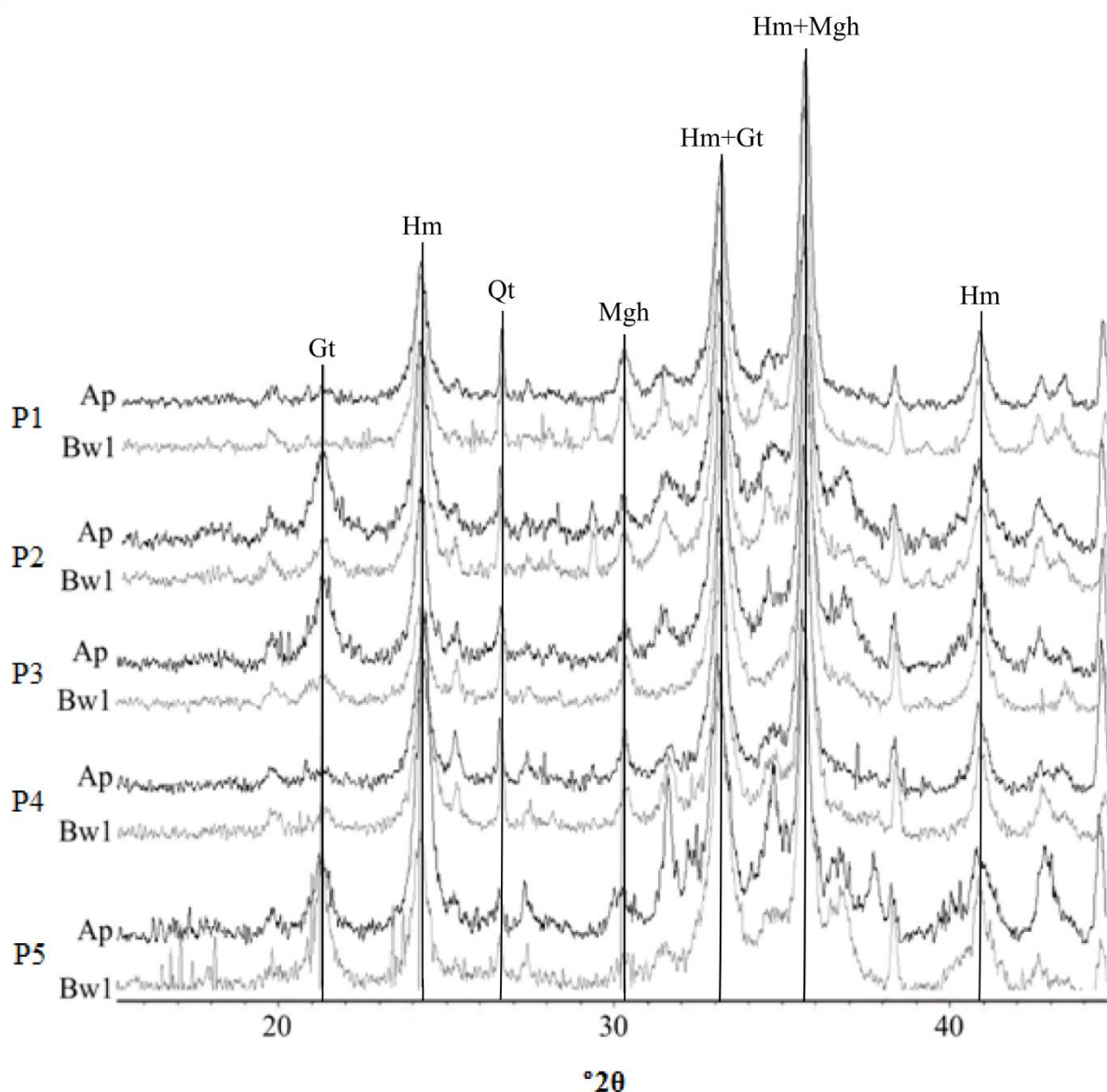


Figura 8 - Difratoograma de raio X (DRX) de amostras em pó do concentrado dos óxidos de ferro, evidenciando a variação na posição dos reflexos da goethita (Gt), da hematita (Hm), do quartzo (Qt) e da maghemita (Mgh) nos horizontes Ap e Bw1 dos cinco perfis estudados.

As características das estruturas dos óxidos e hidróxidos de ferro (Gt, Hm e Mgh) são apresentadas na Tabela 6. Os oxi-hidróxidos de ferro tiveram uma maior expressão nas cotas mais baixas da topossequência, onde a Gt apresentou seus maiores reflexos no perfil 3, a Hm no perfil 4 e a Mgh no perfil 5. Os resultados mostram que no compartimento da paisagem caracterizado pelo perfil 3 prevalecem condições ambientais que favorecem a pedogênese da Gt, enquanto no compartimento caracterizado pelos perfis 4 e 5, prevalecem condições ambientais que favorecem a pedogênese da Hm e Mgh.

Tabela 6 - Características estruturais dos óxidos de ferro goethita, hematita e maghemita de horizontes selecionados dos cinco perfis estudados.

Perfis	Horizontes	Goethita			Hematita			Maghemita		
		LMA	Área	%	LMA	Área	%	LMA	Área	%
P1	Ap	0,09	0,54	0,5	0,27	23,96	73,2	0,31	8,59	26,3
	Bw1	0,09	0,12	0,2	0,16	17,81	68,6	0,27	8,13	31,3
P2	Ap	0,39	13,09	13,0	0,27	22,47	75,0	0,24	3,32	10,9
	Bw1	0,31	5,55	7,4	0,14	15,51	68,0	0,31	5,57	24,5
P3	Ap	0,47	16,29	15,4	0,31	22,96	72,0	0,31	4,15	13,0
	Bw1	0,63	8,19	11,3	0,31	14,41	65,5	0,24	5,09	23,2
P4	Ap	0,09	0,42	0,5	0,31	23,71	87,7	0,12	3,18	11,7
	Bw1	0,47	4,32	3,0	0,31	34,83	83,0	0,31	5,92	14,0
P5	Ap	0,47	14,94	8,0	0,31	43,78	78,8	0,47	7,30	13,0
	Bw1	0,19	10,15	14,0	0,27	15,91	72,0	0,47	3,12	14,0

LMA - Largura a meia altura ( $^{\circ}2\theta$ ).

Maiores teores dos minerais também foram observados nos horizontes superficiais, notadamente na Gt e Hm, enquanto que a Mgh apresentou teores mais elevados em horizontes subsuperficiais. Este comportamento pode estar associado ao maior teor de COS na superfície, pois estudos sugerem que diferentes tipos de óxidos de ferro apresentam um comportamento diferenciado na interação com a matéria orgânica (DALMOLIN, 2006).

Os difratogramas da fração argila desferrificada (Figura 9) revelaram reflexos bem pronunciados em 0,715 nm, 0,448 nm e 0,357 nm, correspondentes ao argilomineral Ct e reflexos menores de Gb e Qt identificados a 0,485 nm e 0,334 nm, respectivamente (BRINDLEY e BROWN, 1980). Os teores de caulinita no solo diminuíram do topo para o sopé de deposição, apresentando no compartimento da paisagem caracterizado pelos perfis 4 e 5, um predomínio da Ct mal cristalizada. Este comportamento provavelmente está sendo influenciado pela posição na paisagem que proporciona diferentes condições redox, oferecendo um melhor ambiente para a cristalização dos óxidos de ferro (SIQUEIRA et al., 2015) no compartimento 4, onde o teor de ferro extraído com ataque sulfúrico chega a 164,1 g kg<sup>-1</sup>, e conseqüentemente, dificultando a cristalização da caulinita.

As regressões da SM da fração argila com teor de Gt, Hm e Mgh, apresentaram R<sup>2</sup> de 0,52; 0,36 e 0,38, respectivamente. Esses resultados indicam que a SM pode ser utilizada como técnica auxiliar para a identificação da composição mineralógica do solo. Estas

correlações provavelmente estão associadas ao teor de ferro total que varia de 74,5 até 164 g kg<sup>-1</sup>. Siqueira et al. (2010) encontraram correlações da SM com o teor de Hm de 82% em solos com teores de ferro total menores que 80 g kg<sup>-1</sup>.

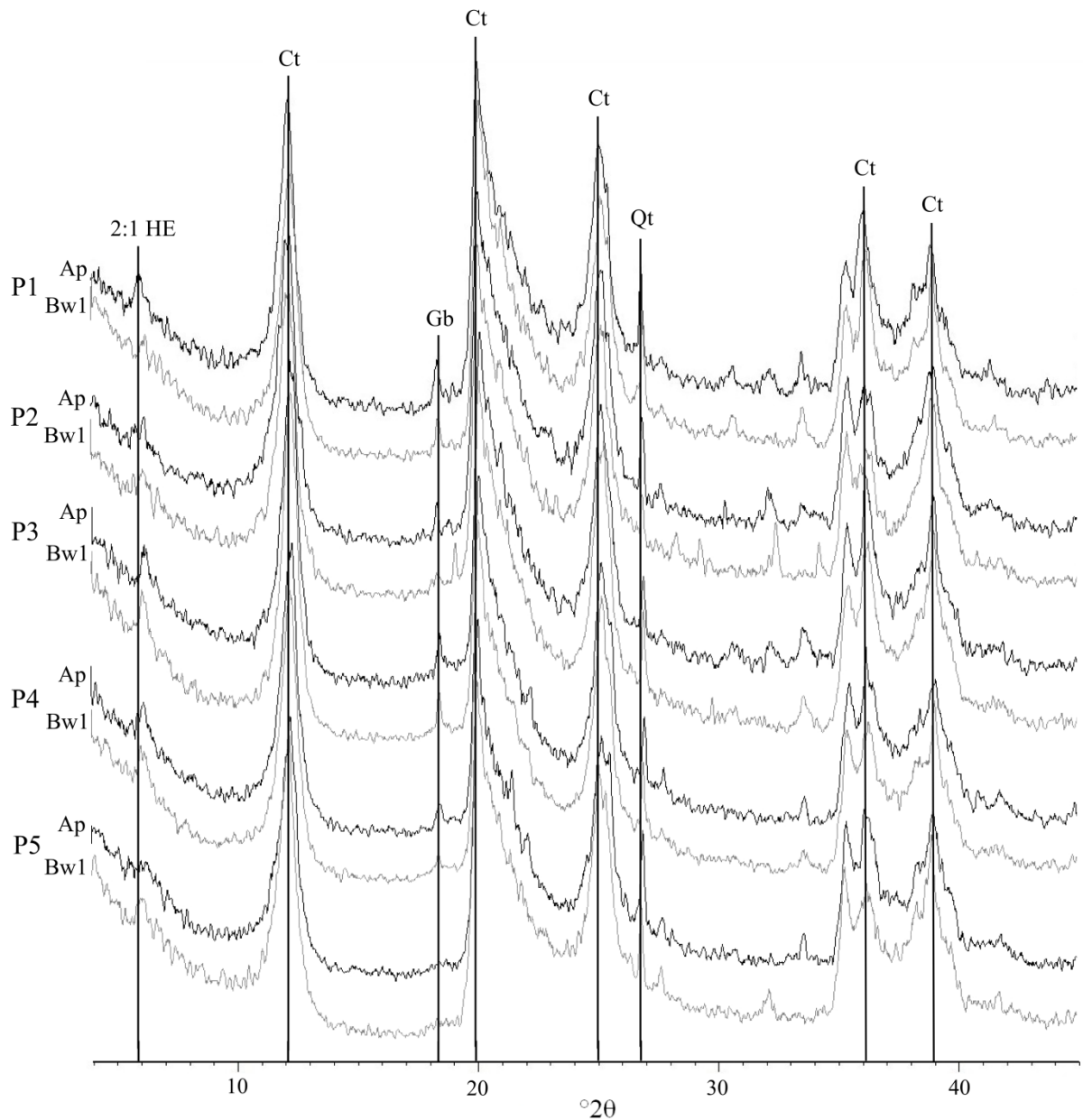


Figura 9 - Difractogramas do pó de amostras desferrificadas, evidenciando a variação na posição dos reflexos da caulinita (Ct), gibbsita (Gb) e quartzo (Qt) nos horizontes Ap e Bw1 dos cinco perfis.

Quanto à SM dos minerais, dentre os ferrimagnéticos, a magnetita é mais facilmente encontrada em frações mais grossas do solo, como areia e silte e a maghemita em frações mais finas como na argila. Fontes et al. (2000) enfatizam que o comportamento magnético é mais evidente em solos argilosos. De acordo com Singer et al. (1995), na fração areia a magnetita pode se estabilizar em hematita, que é antiferromagnética, enquanto que a magnetita presente na fração argila pode se estabilizar como maghemita. Desta maneira, são justificados os valores mais elevados da SM nas frações argila no perfil 1 (Figura 10), onde pode-se observar teores mais elevados de maghemita (Tabela 6).

Os valores de SM da fração argila dos perfis dos solos estudados apresentaram decréscimo em profundidade ao longo dos perfis (Figura 10). Esse comportamento pode ser um indicativo dos fluxos de água diferenciados conforme a posição da paisagem, modificando atributos do solo que influenciam na SM. Outra explicação pode estar relacionada à idade dos solos na paisagem, a SM na posição do perfil 1 confirma que este compartimento é o mais antigo por apresentar valores homogêneos em profundidade, fato não observado no perfil 5.

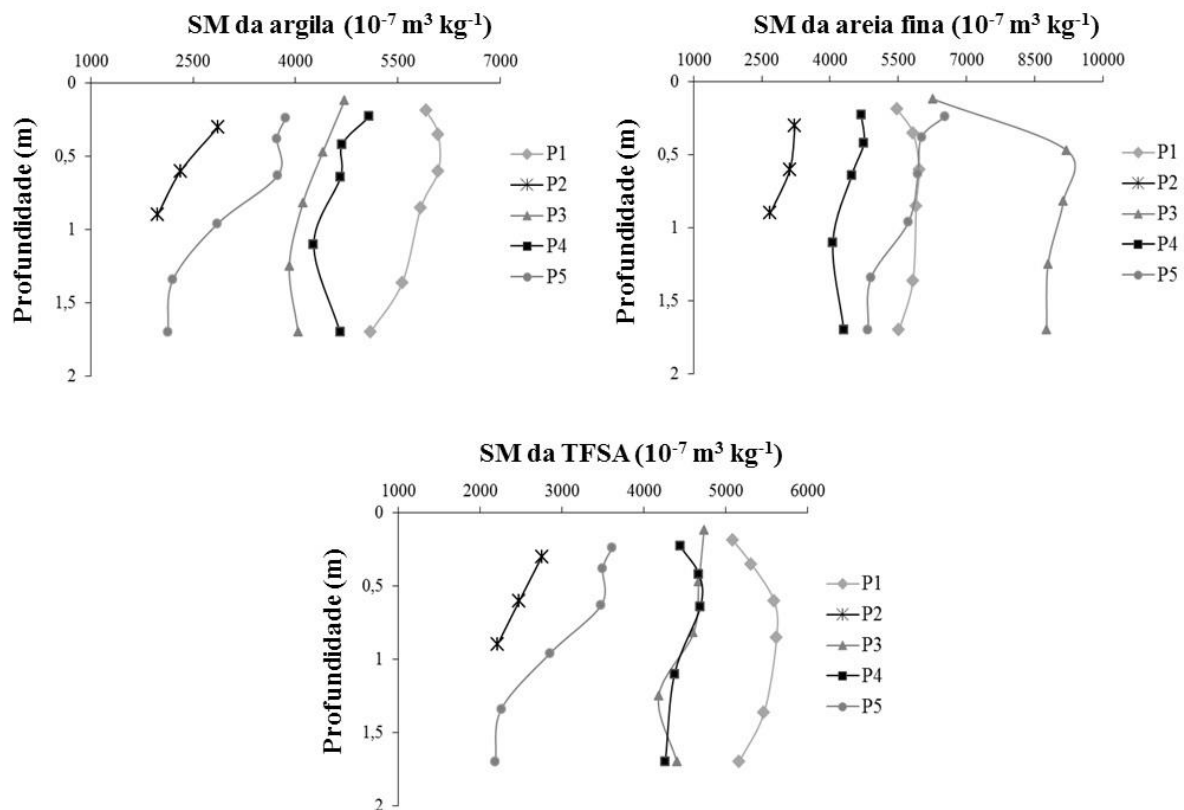


Figura 10 - Suscetibilidade magnética da fração argila, areia fina e terra fina seca ao ar (TFSA) por profundidade de cada perfil (P).

Pode-se observar que os perfis 2 e 5 apresentam os menores valores de SM na fração argila e TFSA, sendo isso relacionado a pior condição de drenagem desses perfis, causando o impedimento na formação de minerais ferrimagnéticos nos solos (SOUZA Jr et al., 2010) como maghemita e ferridrita ferrimagnética. A variação da SM entre os perfis na fração argila foi diretamente associada ao teor de ferro total (Tabela 5). Segundo resultados obtidos por Resende et al. (1988) e Matias (2010), a SM está relacionada diretamente com o teor de ferro total do solo.

Na fração areia fina as variações da SM foram semelhantes à argila, porém com maiores valores relativos principalmente no perfil 3, localizado na meia encosta, com média declividade, o que favorece o transporte de minerais presentes na fração argila e maior deposição de minerais presentes na fração areia. De acordo com Fontes et al. (2000), valores mais elevados de SM na fração areia indicam a presença de minerais ferrimagnéticos, provavelmente magnetita. No perfil 2 e 4 a SM na fração areia apresentou os menores valores. Este comportamento pode estar associado a posição destes perfis na meia encosta da transeção, posição que favorece a perda de frações finas (argila e silte) e acúmulo de areia, o que pode estar relacionado a presença de quartzo (diamagnético) (DEARING, 1999).

A análise sistemática com a utilização da técnica estatística do autocorrelograma (SMW) foi bastante sensível quanto à delimitação dos diferentes segmentos na transeção central. Na Figura 11 são apresentados os SMW dos valores da SM nas profundidades de 0,00-0,05, 0,05-0,15, 0,15-0,30 e 0,30-0,60 m, onde se pode observar que os reflexos foram mais expressivos na profundidade de 0,30-0,60 m, onde se encontram os horizontes pedogenéticos mais estáveis do solo, porém alguns picos na profundidade mais superficial coincidiram com os picos da camada mais profunda. Resultados encontrados por Matias et al. (2014), utilizando a mesma técnica na análise da SM, verificaram picos mais pronunciados na camada de 0,30-0,80 m.

A identificação dos limites dos compartimentos da paisagem foi possibilitada pela indicação dos picos da análise SMW que indicaram em todas as profundidades três picos, indicados a 280 m, 430 m e a 985 m do topo da paisagem, delimitando quatro compartimentos (Figura 11). Resultado expressivo também foi obtido por Siqueira (2013), que utilizou o SMW na identificação de diferentes compartimentos em Latossolos, em locais considerados homogêneos por apresentarem a mesma classe de solo. Campos et al. (2012) em seus estudos verificaram que solos com diferentes classes taxonômicas, podem apresentar características semelhantes, desde que se encontrem dentro de um mesmo compartimento da paisagem, contribuindo para aumentar os erros nas unidades de mapeamento. Na construção de

protocolos de mapeamento detalhado que utilizam modelos matemáticos, como o SMW, a geoestatística ou a análise de agrupamento, os mapeadores conseguem definir uma unidade de mapeamento com “menor erro interno”, pois dentro de um mesmo compartimento os fatores e processos de formação do solo são mais homogêneos em relação a outro compartimento.

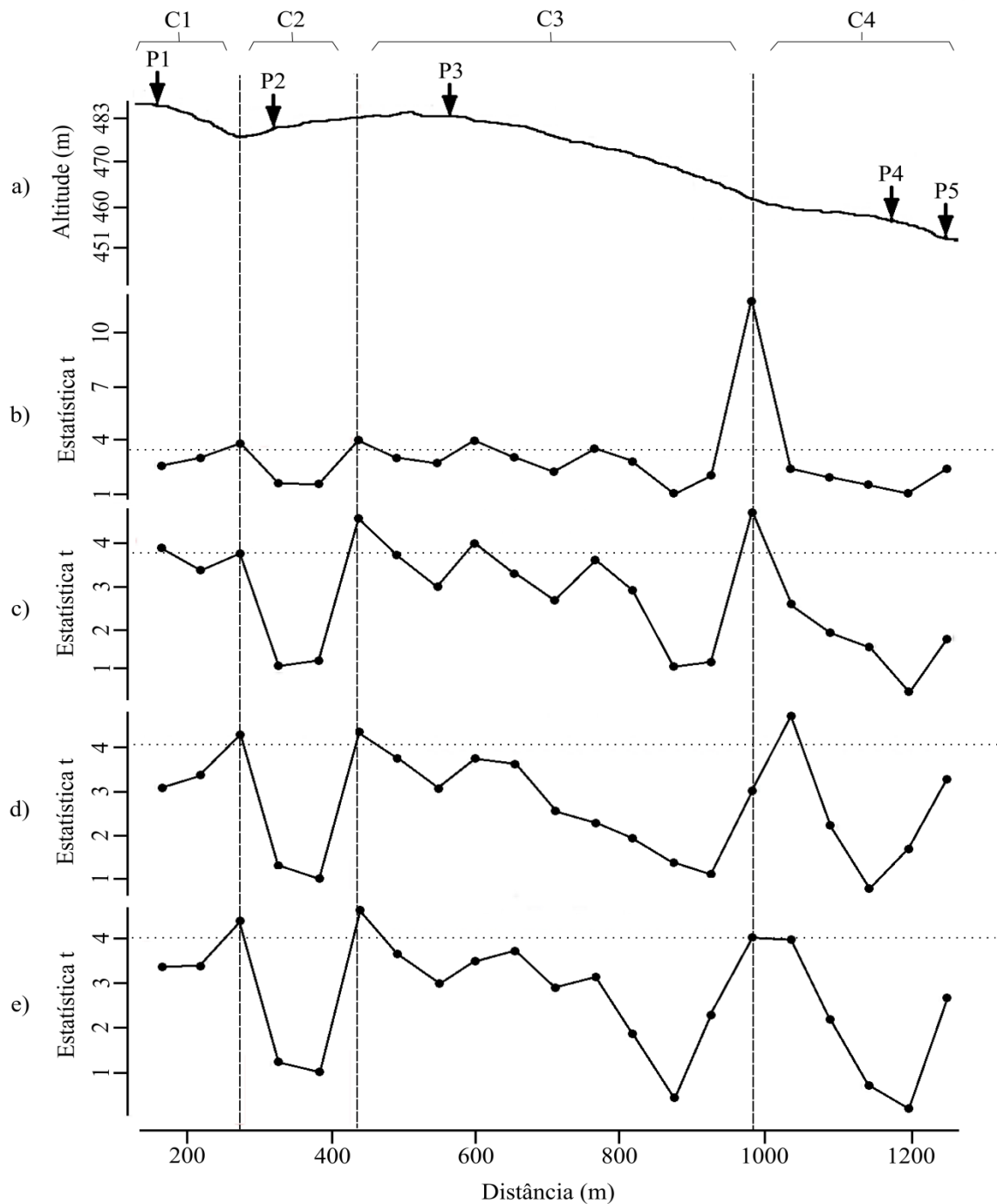


Figura 11 - Perfil de elevação da transeção central (a) e os resultados da análise “Split Moving Windows” (SMW) e correlação entre os valores da Estatística t para suscetibilidade

magnética na camada de 0,00-0,05 m (b), 0,05-0,15 m (c), 0,15-0,30 m (d) e 0,30-0,60 m (e), ao longo da transeção com pontos espaçados em 50 m. Os picos acima do pontilhado (...) indicam significância e os tracejados (---) indicam os picos de maior expressão da suscetibilidade magnética. C - Compartimento da paisagem.

De acordo com os compartimentos da paisagem indicados na análise SMW, foram selecionados os dados de cada compartimento para a realização da análise estatística descritiva (Tabela 7), na qual as médias foram submetidas ao teste de comparação, que não indicaram diferença significativa dos valores da SM entre os compartimentos 3 e 4. Esses resultados indicam que a estatística descritiva não é tão eficaz comparada à análise SMW para a separação de compartimentos em uma paisagem. Santos et al. (2011) confirmaram em seus estudos que a média e o coeficiente de variação obtidos da estatística descritiva, não são eficientes para a caracterização de compartimentos ao longo da paisagem.

Tabela 7 - Estatística descritiva dos valores obtidos da leitura da suscetibilidade magnética nos quatro compartimentos.

Profundidade (m)	Comp.	Média ( $\times 10^{-7}$ ) m <sup>3</sup> /kg	Mín	Máx	Variância	DP	CV (%)	Assimetria
0,00-0,05	C1	3072,33b	2404	3485	159303,90	399,12	12,99	-1,03
	C2	2372,66c	1989	2916	233952,30	483,68	20,38	1,32
	C3	4147,90a	3186	4646	230539,70	480,14	11,57	-0,94
	C4	4036,88a	3491	4285	74934,36	273,74	6,78	-1,11
0,05-0,15	C1	3106,33b	2442	3500	183803,50	428,72	13,80	-0,75
	C2	2393,00c	1938	2977	282361,00	531,37	22,20	1,02
	C3	4287,81a	3422	4765	174627,80	417,88	9,74	-1,14
	C4	4222,44a	3623	4597	106146,50	325,8	7,71	-0,74
0,15-0,30	C1	3164,00b	2464	3608	191918,00	438,08	13,84	-0,83
	C2	2365,66c	1934	2963	285294,30	534,12	22,57	1,26
	C3	4292,27a	3396	4719	166695,60	408,28	9,51	-1,35
	C4	4202,00a	3377	4589	133181,00	364,93	8,68	-1,67
0,30-0,60	C1	3180,83b	2472	3622	195065,00	441,66	13,88	-0,84
	C2	2390,66c	1974	3021	308292,30	555,24	23,22	1,47
	C3	4300,90a	3392	4731	173270,10	416,25	9,67	-1,26
	C4	4154,22a	3156	4585	198489,20	445,52	10,72	-1,64

Comp.- compartimento da paisagem; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação. Médias seguidas de mesma letra na vertical não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

O protocolo de compartimentalização da paisagem utilizando SMW da SM é considerado muito eficiente como um indicador pedoambiental, permitindo auxílio em mapeamentos de áreas de manejo específico, mapeamento digital de classes e propriedades do solo em nível detalhado e entendimento da variabilidade dos atributos do solo (CAMPOS et al., 2007; MATIAS, 2010; CORTEZ et al., 2011; BARRIOS et al., 2012; SIQUEIRA, 2013). No entanto, essa divisão de uma área deve levar em conta a escolha de atributos co-variativos do material de origem ou gênese do solo, como a SM e uso de análises estatísticas adequadas (SIQUEIRA et al., 2015).

#### **7.4 Conclusões**

Os limites matemáticos indicados pela análise SMW utilizando valores da SM, foram eficientes para a determinação de limites dos compartimentos da paisagem, em uma região geomorfológica originada de basalto.



## REFERÊNCIAS

- ALPHA GEOFÍSICA. Bartington. Instrumentação de Suscetibilidade Magnética. Disponível em: < <http://www.alphageofisica.com.br/bartington/2012/susceptibilmetro.htm>>. Acesso em 12 de março de 2015.
- BARBOSA, R. S. Erodibilidade de Latossolos predita pela suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa. 2014. 78f. Tese (Doutorado em Agronomia (Ciência do Solo)) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2014.
- BARRIOS, M. R.; MARQUES Jr., J.; PANOSSO, A. R.; SIQUEIRA, D. S.; LA SCALA Jr., N. Magnetic susceptibility to identify landscape segments on a detailed scale in the region of Jaboticabal, São Paulo, Brazil. *R. Bras. Ci. Solo*, 36:1073-1082, 2012.
- BERG, M. V. D. Transect. For, listagem na língua Fortran. Piracicaba: ESALQ/USP, Departamento de Ciências do Solo, 1988, 3p.
- BRASIL, Ministério da Agricultura. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul. Recife: convênio MA/DPP – SA/ DRNR, 1973. 431p. (Boletim Técnico, 30).
- BRINDLEY, G.W.; BROWN, G., eds. Crystal structures of clays minerals and their X-ray identification. London: Mineralogical Society, 1980. p.305-360.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; BAHIA, A. S. R. S. Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. *Scientia Agricola*, 71:244-256, 2014.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES Jr, J.; BARRÓN, V.; ALLEONI, L. R. F.; BARBOSA, R. S.; PEREIRA, G. T. Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 251:124-132, 2015.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci Soc Am J*, 58:1501-1511, 1994.
- CAMÊLO, D. L. Mineralogia, suscetibilidade magnética e teores de fósforo e de elementos traço em Latossolos férricos e perférricos de Minas Gerais. 2013. 108F. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2013.

- CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; CAMARGO, L. A. Relações solo-paisagem em uma litosequência arenito-basalto na região de Pereira Barreto-SP. *R. Bras de Ci Solo*, 31:519-529, 2007.
- CAMPOS, M. C. C.; MARQUES Jr., J.; SOUZA, Z. M.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, T. P. Discrimination of geomorphic surfaces with multivariate analysis of soil attributes in sandstone - basalt lithosequence. *R Ciênc. Agron.*, 43:429-438, 2012.
- CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JUNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; AQUINO, I. A. Superfícies geomórficas e atributos do solo em uma toposseqüência de transição várzea-terra firme. *Biosci. J.*, 29:132-142, 2013.
- CARNEIRO, A. A. O.; TOUSO, A. T.; BAFFA, O. Avaliação da susceptibilidade magnética usando uma balança analítica. *Química Nova*, 26:952- 956, 2003.
- CORTEZ, L. A.; MARQUES Jr, J.; PELUCO, R. G.; TEIXEIRA, D. B.; SILVEIRA, D. S. Susceptibilidade magnética para identificação de áreas de manejo específico em citricultura. *Revista Energia na Agricultura*. 26:60-79, 2011.
- CPRM, Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. 2006. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/publique/media/mapa\\_rio\\_grande\\_sul.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/mapa_rio_grande_sul.pdf)>. Acesso em 21 de jan. 2014.
- CUNHA, P.; MARQUES JÚNIOR, J.; CURI, N.; PEREIRA, G. T.; LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma seqüência Arenítico-Basáltica da região de Jaboticabal (SP). *R. Bras. Ci. Solo*, 29:81-90, 2005.
- DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; PEDRON, F. A; AZEVEDO, A. C. Relação entre as características e o uso das informações de levantamentos de solos de diferentes escalas. *Ciência Rural*, 34:1479-1486, 2004.
- DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; DICK, D. P.; KNICKER, H.; KLAMT, E.; KÖGEL-KNABNER, I. Organic matter characteristics and distribution in ferralsol profiles of a climosequence in southern Brazil. *Eur J Soil Sci.*, 57:644-654, 2006.
- DAVIS, R. S.; *Am. J. Phys.* 1992, 60, 365p.
- DEARING, J. A. Environmental magnetic susceptibility: using the Bartington MS2 system. 2.ed. Kenilworth: Chi Publishing, 1999. 54 p.
- DEARING, J. A.; HAY, K. L.; BABAN, S. M. J.; HUDDLESTON, A. S.; WELLINGTON, E. M. H. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set. *Geophys. J. Int.* 127:728-734, 1996.

- DEMATTE, J. A. M.; ALOISI, R. R.; DEMATTÊ, J. L. I. Sequência Latossolo Amarelo - Podzólico Amarelo - Areias Quartzosas sob material da Formação Barreiras na região de Tucuruí, estado do Pará. *Sci. Agric.*, 51:345-356, 1994.
- DEMATTE, J. A. M.; GALDOS, M. V.; GUIMARÃES, R.; GENÚ, A. M.; NANNI, M. R.; ZULLO JÚNIOR, J. Quantification of tropical soil attributes from ETM+/Landsat-7 data. *International Journal of Remote Sensing*, London, 8;3.813-3.829, 2007.
- DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. (Org.) Manual de métodos de análises de solos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1995. 116p.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, 2013. 342p.
- FERNANDES, R. B. A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; FONTES, M. P. F. Quantificação de óxidos de ferro de Latossolos brasileiros por Espectroscopia de Refletância Difusa. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:245-257, 2004.
- FONTES, M. P. F.; OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M.; CAMPOS, A. A. G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. *Geoderma*. 96:81-99, 2000.
- GLOBALSOILMAP.NET. Specifications Version 1 GlobalSoilMap.net products, 2011. Disponível em: <[http://www.globalsoilmap.net/system/files/GlobalSoilMap\\_net\\_specifications\\_v2\\_0\\_edited\\_draft\\_Sept\\_2011\\_RAM\\_V12.pdf](http://www.globalsoilmap.net/system/files/GlobalSoilMap_net_specifications_v2_0_edited_draft_Sept_2011_RAM_V12.pdf)>. Acesso em 2 jun. 2013.
- INDA, A. V.; KÄMPF, N. Avaliação de procedimentos de extrações dos óxidos de ferro pedogênicos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB). *R. Bras. Ci. Solo*, 27:1139-1147, 2003.
- INDA, A. V.; TOMASI, C. A.; OLIVEIRA, J. S.; FINK, J. R. Óxidos de ferro e área superficial de Latossolo subtropical sob campo e floresta nativa. *Ciência Rural*. 44:289-292, 2014.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M., 1989. *Applied geostatistics*. Nova York: Oxford University Press. 561 p.
- JIANG, Z.; LIU, Q.; DEKKERS, M. J.; TAUXE, L.; QIN, H.; BARRON, V.; TORRENT, J. Acquisition of chemical remanent magnetization during experimental ferrihydrite-hematite

conversion in Earth-like magnetic field—implications for paleomagnetic studies of red beds. *Earth Planet Sc Lett.* 428:1–10, 2015.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. *Tópicos em ciência do solo*, v. 1, p. 107-138, 2000.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequência in Southern Brazil and their application in classification of kaolinitic Soils. *Geoderma*, 29:27-39, 1982.

LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A.B. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: Perspectives for digital soil mapping. In: LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A.; VOLTZ, M., eds. *Digital soil mapping: An introductory perspective*. Amsterdam, Elsevier, 2007. p.3-22.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. *Terra e Didática*, 2:19-33, 2006.

LIU, Z.; LIU, Q.; TORRENT, J.; BARRÓN, V.; HU, P. Testing the magnetic proxy  $\chi_{FD}/HIRM$  for quantifying paleoprecipitation in modern soil profiles from Shaanxi Province, China. *Global Planet Change*. 110:368-378, 2013.

LOURENÇO, A. M.; SEQUEIRA, E.; SANT’OVAIA, H.; GOMES, C. R. Magnetic, geochemical and pedological characterisation of soil profiles from different environments and geological backgrounds near Coimbra, Portugal. *Geoderma*, 213:408-418, 2014.

LUCHESA, C. J. Estudo da adequação dos índices da análise econômico- financeira às empresas florestais, utilizando métodos estatísticos multivariados. 2004. 225f. Tese (Doutorado em Economia e Política Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

MAGIERA, T.; STRZYSZCZ, Z.; KAPICKA, A.; PETROVSKY, E. Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe. *Geoderma*, 130:299-311, 2006.

MARQUES Jr., J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. D. B.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. *Geoderma*, 219:63–71, 2014.

MATHERON, G. Les variables régionalisées et leur estimation: Une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature. Paris: Masson. 1965. 293p.

MATIAS, S. S. R. Suscetibilidade magnética e sua associação com atributos do solo e do relevo em uma topossequência de Latossolos. 2010. 125f. Tese (Doutorado em Agronomia (Produção Vegetal)) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2010.

- MATIAS, S. S. R.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Modelos de paisagem e susceptibilidade magnética na identificação e caracterização do solo. *Pesqui. Agropecu. Trop.*, 43:93-103, 2013.
- MATIAS, S. S. R.; MARQUES Jr., J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Outlining precision boundaries among areas with different variability standards using magnetic susceptibility and geomorphic surfaces. *Eng. Agríc.* 34:695-706, 2014.
- MATIAS, S. S. R.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SIQUEIRA, D. S. Ferramentas matemáticas, suscetibilidade magnética e modelos de paisagem aplicados na delimitação de áreas de manejo específico. *R Bras Ci Solo*, 39:968-980, 2015.
- McBRATNEY, A., MYNASNY, B., STEPHEN, R., CATTLE, R., VERVOORT, W. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*, 109:41–73, 2002.
- McBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117:3-52, 2003. 90f.
- McKEAGUE, J.A.; DAY, J.H. Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *J. Soil Sci.*, 46:13-22, 1966.
- MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clay Clay Miner*, 7:317-327, 1960.
- MEIRELES, H. T.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; PEREIRA, G. T. Relações solo-paisagemem topossequência de origem basáltica. *Pesqui. Agropecu. Trop.*, 42:129-136, 2012.
- MICHEL, F. M.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. MORALES, M. P.; SERNA, C. J. BOILYE, J. F.; LIU, Q. S.; AMBROSINING, A.; CISMASU, A. C.; BROWN, G. E. Ordered ferrimagnetic form of ferrihydrite reveals links between structure, composition and magnetism *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 107:2787–2792, 2010.
- MUNIZ, M. S. Forte de Rathnadrinna: arqueologia e implicações ambientais. *Revista de Arqueologia Pública*. 8:1-9, 2014.
- NORRISH, K.; TAYLOR, R. M. The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. *J Soil Sci*, 12:294-306, 1961.
- PELUCO, R. G. Técnicas indiretas na identificação de áreas de manejo específico para cana-de-açúcar. 2013. Dissertação (Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal)) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2013.
- PELUCO, R. G.; MARQUES Jr.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S.; TEIXEIRA, D. B.; ADAME, C. R.; CORTEZ, L. A. Suscetibilidade magnética so solo e

estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. *Pesqui. agropec. bras.*, 48:661-672, 2013.

PEREIRA, G. T. et al.. JEM 1.0: programa computacional para localização de limites de superfícies geomórficas de solos através de dados de uma transeção; caso univariado. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13, 1996. *Anais...Águas de Lindoia*, 1996, CDROM.

PREETZ, H.; ALTFELDER, S.; IGEL, J. Tropical Soils and Landmine Detection – An Approach for a Classification System. *Soil Sci Soc Am J*, 72:151-159, 2008.

QUIJANO, L.; GASPAR, L.; CHAPARRO, M. A. E.; NAVAS, A. Magnetic susceptibility in topsoils and bulk cores of cultivated Calcisols. *Latinmag Letters*, 1:1-6, 2011.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2014.

RESENDE, M.; SANTANA, D. P.; REZENDE, S. B. Susceptibilidade magnética em latossolo do Sudeste e Sul do Brasil. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., 1988, Rio de Janeiro. *Anais... Rio de Janeiro: Embrapa-SNLCS/SBCS*, 1988. p. 233-258.

ROCKSTROM, J.; KAUMBUTHO, P.; MWALLEY, J.; NZABI, A. W.; TEMESGEN, M.; MAWENYA, L. BARRON, J.; MUTUA, J.; DAMGAARD-LARSEN, S. Conservation farming strategies in East and Southern Africa: Yields and rain water productivity from on-farm action research. *103: 23-32*, 2009.

RUY, A. C.; SILVA, A. M.; TOLEDO, C. L. B.; SOUZA FILHO, C. R. uso de dados aerogeofísicos de alta densidade para mapeamento geológico em terrenos altamente intemperizados: o estudo de caso da Região de Cláudio, porção Sul do Cráton São Francisco. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24:535-546, 2006.

SANTOS, H. L.; MARQUES JÚNIOR, J.; MATIAS, S. S. R.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem em uma vertente. *R Bras Ci Agr*, 6:710-716, 2011.

SANTOS, R.D. dos; LEMOS, R.C. de; SANTOS, H.G. dos; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. dos; SHIMIZU, S.H. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 6. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013a. 100 p.

SANTOS, H. L.; MARQUES Jr., J.; MATIAS, S. R. R.; SIQUEIRA, D. S.; MARTINS FILHO, M. V. Erosion factors and magnetic susceptibility in different compartments of a slope in Gilbués- PI, Brazil. *Eng. Agríc.*, 33:64-74, 2013b.

- SILVA, A. R.; SOUZA JUNIOR, I. G. S.; COSTA, A. C. S. Suscetibilidade Magnética do horizonte B de solos do estado do Paraná. *R Bras Ci Solo*, 34:329-337, 2010.
- SINGER, M.J.; BOWEN, L.H.; VEROSUB, K.L.; FINE, P.; TENPAS, J. Mössbauer spectroscopy evidence for citratebicarbonate-dithionite extraction of maghemite from soils. *Clays Clay Miner.*, 43:1-7, 1995.
- SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR, J.; MATIAS, S. S. R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L. C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. *Soil Use Manage*, 26:425-431, 2010.
- SIQUEIRA, D. S., MARQUES Jr., J., PEREIRA, G. T., 2010. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. *Geoderma* 155:55–66. 2010.
- SIQUEIRA, D. S. Mapeamento de atributos e planejamento amostral para Latossolosutilizandosuscetibilidade magnética, cor e relação solo-paisagem. 2013. 113f. Tese (Doutorado em Agronomia (Produção Vegetal)) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2013.
- SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; TEIXEIRA, D. B.; VASCONCELOS, V.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. ; MARTINS, E. S. Detailed mapping unit design based on soil-landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. *Catena*, 135: 149-162, 2015.
- SOUZA, C. K.; MARQUES JR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; PEREIRA, G. T. Influência do relevo na variação anisotrópica dos atributos químicos e granulométricos de latossolo. *Eng. Agríc.*, 23:486-495, 2003.
- SOUZA, C. K.; MARQUES Jr., J; MARTINS FILHO, M. V.; PEREIRA, G. T. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um Latossolo em Jaboticabal (SP). *R. Bras. Ci. Solo*, 27:1067-1074, 2003.
- SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S.; VILAR, C. C.; HOEPERS, A. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. *Cienc. Rural*, 40:513-519, 2010.
- TORRENT, J.; LIU, Q. S.; BARRÓN, V. Magnetic minerals in Calcic Luvisols (Chromic) developed in a warm Mediterranean region of Spain: Origin and paleoenvironmental significance. *Geoderma*. 154:465-472, 2010.
- VIEIRA, S. R.; Hatfield, T. L.; Nielsen, D. R.; Biggar, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, Oakland, 51:1-75. 1983.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudo da variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 1:1-54, 2000.

XIA, D.; MING, J.; XIUMING, L.; FAHU, C.; JIANYING, M.; HUI, Z.; XUNMING, W.; HAITAO, W. A preliminary study on the magnetic signatures of modern soil in Central Asia. *Frontiers of Earth Science in China*, 1:275-283, 2007.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method routine determination of organic carbon in soil. *Commun. Soil Sci. Plant.*, 19:1467-1476, 1988.



**APÊNDICES**

**Apêndice A - Descrição do Perfil do Solo 1.**



## **A - DESCRIÇÃO GERAL (Perfil 1)**

DATA - 18/10/2013

CLASSIFICAÇÃO SiBCS - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Região do Celeiro, Santo Augusto, Rio Grande do Sul, 27°46'56,9"S 53°47'11,5"W

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Descrito e coletado em abertura de trincheira, em topo de elevação com aproximadamente 4% de declive, sob o cultivo de milho.

ALTITUDE - 481 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA - Formação Serra Geral

MATERIAL ORIGINÁRIO - Basalto

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não visível.

RELEVO LOCAL - suave ondulado

RELEVO REGIONAL - suave ondulado a ondulado

EROSÃO - laminar ligeira

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - campo subtropical

USO ATUAL - cultivo do milho

CLIMA: Cfa da classificação de Köppen, subtropical do ponto de vista térmico e temperado chuvoso.

DESCRITO E COLETADO POR - Ricardo Dalmolin e Nelson Smola.

**B - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA (Perfil 1)**

- Ap 0 - 19 cm, bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/3, úmido), muito argilosa, pequenos a grandes, blocos subangulares; poroso; firme, plástico e pegajoso; transição gradual; muitas raízes.
- A1 19 - 35 cm, bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4 úmido), muito argilosa, pequenos, blocos subangulares; poroso; firme, plástico e pegajoso; transição gradual; muitas raízes.
- AB 35 - 60 cm, bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4 úmido), muito argilosa, pequenos, blocos subangulares; poroso; firme a friável, plástico e pegajoso; transição difusa; raízes comuns.
- BA 60 - 85 cm, bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4 úmido), muito argilosa, pequenos, blocos subangulares; poroso; friável, plástico e pegajoso; transição difusa; raízes comuns.
- Bw1 85 - 136 cm, bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4 úmido), muito argilosa, pequenos, blocos subangulares; poroso; friável, plástico e pegajoso; transição difusa; raízes raras.
- Bw2 136 - 170 cm+, bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4 úmido), muito argilosa, pequenos, blocos subangulares; poroso; friável, plástico e pegajoso; transição difusa; raízes raras.

### C - ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS (Perfil 1)

Horizonte		Composição Granulométrica da Terra Fina								Relação Silte/Argila					
Símbolo	Prof.	Areia (2-0.05 mm)		Silte (0.05-0.002 mm)		Argila (<0.002 mm)									
	cm	----- g kg <sup>-1</sup> -----													
Ap	0 - 19	56		278		666		0,4							
A1	19 - 35	43		281		676		0,4							
AB	35 - 60	27		249		724		0,3							
BA	60 - 85	25		205		769		0,3							
Bw1	85 - 136	21		175		804		0,2							
Bw2	136 - 170	21		176		803		0,2							
Horiz.	pH (1:2,5)		Complexo Sortivo							V	$\frac{100 \cdot Al^{3+}}{Al^{3+} + S}$	COS	Fe <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub>	Fe <sub>s</sub>
	Água	KCl	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Valor S	H+Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>	CTC PH 7.0						
	----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----									%	%	----- g kg <sup>-1</sup> -----			
Ap	5,1	4,8	6,3	2,9	0,7	9,9	7,0	0,1	17,1	58,4	0,7	23,6	35,5	6,7	83,8
A1	4,4	4,2	3,4	1,6	0,1	5,2	6,0	0,4	11,2	46,3	7,3	15,8	58,8	7,9	77,7
AB	4,5	4,2	2,2	1,3	0,1	3,7	5,7	0,5	9,5	39,4	12,2	11,6	67,7	6,6	94,1
BA	5,1	4,6	2,1	1,4	0,1	3,7	4,4	0,3	8,2	45,8	8,3	8,6	43,2	8,1	74,5
Bw1	5,0	4,5	1,2	1,1	0,1	2,4	4,1	0,1	6,6	36,7	5,4	6,1	71,9	8,3	77,6
Bw2	5,1	4,2	0,7	0,6	0,1	1,5	4,4	0,3	5,9	25,3	15,2	5,1	46,7	6,4	103,1



**Apêndice B - Descrição do Perfil do Solo 2.**



## **A - DESCRIÇÃO GERAL (Perfil 2)**

DATA - 18/10/2013

CLASSIFICAÇÃO SiBCS - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Região do Celeiro, Santo Augusto, Rio Grande do Sul, 27°46'54,6"S 53°47'12,9"W

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Descrito e coletado em abertura de trincheira, em topo de elevação, sob o cultivo de milho.

ALTITUDE - 476 metros.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA - Formação Serra Geral

MATERIAL ORIGINÁRIO - Basalto

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não visível.

RELEVO LOCAL - suave ondulado

RELEVO REGIONAL - suave ondulado a ondulado

EROSÃO - laminar ligeira

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - campo subtropical

USO ATUAL - cultivo do milho

CLIMA - Cfa da classificação de Köppen, subtropical do ponto de vista térmico e temperado chuvoso.

DESCRITO E COLETADO POR - Ricardo Dalmolin e Nelson Smola

## B - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA (Perfil 2)

- Ap 0 - 30 cm, bruno avermelhado escuro (5 YR 3/4, úmido), argilosa, pequenos, granular; muitos poros; friável a firme, plástico e pegajoso; transição gradual; muitas raízes.
- BA 30 - 60 cm, bruno avermelhado (5 YR 4/4, úmido), muito argilosa, pequenos, blocos; poros comuns; firme, plástico e pegajoso; transição difusa; raízes comuns.
- Bw 60 - 90 cm, bruno avermelhado (5 YR 4/4, úmido), muito argilosa, pequenos, blocos; poros comuns; firme, plástico e pegajoso; transição difusa; raízes poucas.

## C - ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS (Perfil 2)

Horizonte		Composição Granulométrica da Terra Fina									Relação Silte/Argila				
Símbolo	Prof.	Areia (2-0.05 mm)			Silte (0.05-0.002 mm)			Argila (<0.002 mm)							
	cm	----- g kg <sup>-1</sup> -----													
Ap	0 - 30	143			256			601			0,43				
BA	30 - 60	98			244			658			0,37				
Bw	60 - 90	112			186			702			0,26				
Horiz.	pH (1:2,5)		Complexo Sortivo							V	$\frac{100 \cdot \text{Al}^{3+}}{\text{Al}^{3+} + \text{S}}$	COS	Fe <sub>a</sub>	Fe <sub>o</sub>	Fe <sub>s</sub>
	Água	KCl	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Valor S	H+Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>	CTC PH 7.0						
	----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----									%	%	----- g kg <sup>-1</sup> -----			
Ap	5,4	4,9	5,9	2,9	0,9	9,8	5,2	0,1	15,0	65,2	0,7	21,4	59,8	6,0	158,6
BA	4,7	4,3	2,2	1,7	0,1	4,0	6,0	0,3	10,0	40,0	6,2	11,9	70,5	7,0	141,7
Bw	4,4	4,3	0,4	0,3	0,1	0,7	4,9	0,5	5,7	12,8	42,2	7,2	52,7	8,6	142,2



**Apêndice C - Descrição do Perfil do Solo 3.**



### **A - DESCRIÇÃO GERAL (Perfil 3)**

DATA - 18/10/2013

CLASSIFICAÇÃO SiBCS - Nitossolo Vermelho Eutrófico latossólico.

LOCALIZAÇÃO MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Região do Celeiro, Santo Augusto, Rio Grande do Sul, 27°46'36,7"S 53°47'16,1"W

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Descrito e coletado em abertura de trincheira, em terço superior da coxilha com aproximadamente 4% de declive, sob o cultivo de milho.

ALTITUDE - 470 metros.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA - Formação Serra Geral

MATERIAL ORIGINÁRIO - Basalto

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não visível

RELEVO LOCAL - suave ondulado

RELEVO REGIONAL - suave ondulado a ondulado

EROSÃO - laminar ligeira

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - campo subtropical

USO ATUAL - cultivo do milho

CLIMA - Cfa da classificação de Köppen, subtropical do ponto de vista térmico e temperado chuvoso

DESCRITO E COLETADO POR - Ricardo Dalmolin e Nelson Smola

**B - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA (Perfil 3)**

- Ap 0 - 12 cm, bruno avermelhado escuro (2,5 YR 3/3, úmido), muito argilosa, fraca a moderada, pequena, granular, friável, plástico e pegajoso; transição gradual; raízes abundantes.
- B 12 - 47 cm, bruno avermelhado escuro (2,5 YR 3/4, úmido), muito argilosa; média a moderada, pequenos, blocos; firme, plástico e pegajoso; transição gradual; raízes abundantes.
- Bw1 47 - 82 cm, bruno avermelhado escuro (2,5 YR 4/4, úmido), muito argilosa; fraca a moderada, pequenos, blocos; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição difusa, raízes comuns.
- Bw2 82 - 125 cm, bruno avermelhado escuro (2,5 YR 4/5, úmido), muito argilosa; fraca, pequenos, blocos; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição difusa, raízes poucas.
- Bw3 125 - 170 cm+, bruno avermelhado escuro (2,5 YR 4/5, úmido), muito argilosa; fraca, pequenos, blocos; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição difusa, raízes raras.

### C - ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS (Perfil 3)

Horizonte		Composição Granulométrica da Terra Fina									Relação Silte/Argila				
Símbolo	Prof.	Areia (2-0.05 mm)	Silte (0.05-0.002 mm)			Argila (<0.002 mm)									
	cm	----- g kg <sup>-1</sup> -----													
Ap	0 - 12	73	254			673			0,3						
B	12 - 47	48	190			763			0,2						
Bw1	47 - 82	46	155			799			0,2						
Bw2	82 - 125	39	124			837			0,1						
Bw3	125-170+	40	143			817			0,2						
Horiz.	pH (1:2,5)		Complexo Sortivo							V	$\frac{100 \cdot \text{Al}^{3+}}{\text{Al}^{3+} + \text{S}}$	COS	Fe <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub>	Fe <sub>s</sub>
	Água	KCl	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Valor S	H+Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>	CTC PH 7.0						
	----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----									%	%	----- g kg <sup>-1</sup> -----			
Ap	4,9	4,6	6,8	2,5	1,0	10,3	6,5	0,3	16,8	61,2	3,1	20,7	38,0	6,2	127,7
B	5,8	5,1	5,2	2,4	0,1	7,8	3,1	0,6	10,9	71,6	7,9	10,3	65,9	6,5	115,9
Bw1	5,1	4,7	2,3	2,1	0,2	4,6	3,1	0,1	7,7	59,7	1,5	8,1	75,2	7,5	121,9
Bw2	4,6	4,2	1,0	0,7	0,1	1,8	4,4	0,5	6,2	29,3	22,	6,5	74,4	7,2	107,7
Bw3	5,0	4,1	0,4	0,3	0,1	0,8	4,4	0,4	5,2	15,3	33,8	3,6	46,7	7,6	111,3



**Apêndice D - Descrição do Perfil do Solo 4.**



**A - DESCRIÇÃO GERAL (Perfil 4)**

DATA - 18/10/2013

CLASSIFICAÇÃO SiBCS - Latossolo Vermelho Distrófico típico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Região do Celeiro, Santo Augusto, Rio Grande do Sul, 27°46'24,8"S 53°47'16,6"W

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Descrito e coletado em abertura de trincheira, sob o cultivo de milho

ALTITUDE - 456 metros.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA - Formação Serra Geral

MATERIAL ORIGINÁRIO - Basalto

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não visível.

RELEVO LOCAL - suave ondulado

RELEVO REGIONAL - suave ondulado a ondulado

EROSÃO - laminar ligeira

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - campo subtropical

USO ATUAL - cultivo de milho

CLIMA - Cfa da classificação de Köppen, subtropical do ponto de vista térmico e temperado chuvoso.

DESCRITO E COLETADO POR - Ricardo Dalmolin e Nelson Smola

**B - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA (Perfil 4)**

- Ap 0 - 23 cm, bruno avermelhado escuro (2,5 YR 3/4. úmido); muito argilosa, médios, blocos subangulares; poroso; solto, plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e gradual; raízes abundantes.
- A1 23 - 42 cm, bruno avermelhado escuro (2.5 YR 3/6. úmido); muito argilosa; fraca, pequenos a médios, blocos subangulares; poroso; muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição gradual e plana: raízes abundantes.
- BA 42 - 64 cm, bruno avermelhado escuro (2.5 YR 3/6. úmido); muito argilosa; fraca, pequenos a médios, blocos subangulares, poroso; muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição gradual e plana, raízes abundantes.
- Bw1 64 - 110 cm, bruno avermelhado escuro (2.5 YR 4/5. úmido); muito argilosa: fraca. pequenos a médios; fraca e pouca: poroso; friável, plástico e pegajoso; transição gradual e plana, raízes comuns.
- Bw2 110 - 170 cm+, bruno avermelhado escuro (2,5 YR 4/5. úmido); muito argilosa; fraca, pequenos a médios, blocos subangulares; poroso; friável, plástico e pegajoso; transição gradual e plana, raízes poucas.

### C - ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS (Perfil 4)

Horizonte		Composição Granulométrica da Terra Fina								Relação Silte/Argila					
Símbolo	Prof.	Areia (2-0.05 mm)	Silte (0.05-0.002 mm)		Argila (<0.002 mm)										
	cm	----- g kg <sup>-1</sup> -----													
Ap	0 - 23	54	279		667			0,4							
A1	23 - 42	31	231		737			0,3							
BA	42 - 64	32	177		791			0,2							
Bw1	64 - 110	27	167		806			0,2							
Bw2	110 - 170+	26	186		788			0,2							
Horiz.	pH (1:2,5)		Complexo Sortivo							V	$\frac{100 \cdot Al^{3+}}{Al^{3+} + S}$	COS	Fe <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub>	Fe <sub>s</sub>
	Água	KCl	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Valor S	H+Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>	CTC PH 7.0						
	----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----										%	%	----- g kg <sup>-1</sup> -----		
Ap	4,6	4,2	6,2	2,5	0,6	9,4	7,8	0,4	17,3	54,6	4,1	23,3	60,8	5,3	117,8
A1	4,8	4,3	3,2	1,2	0,1	4,6	6,0	0,6	10,6	43,6	11,5	12,8	71,3	4,5	113,9
BA	4,7	4,2	2,6	1,2	0,1	4,0	4,9	0,6	9,0	45,0	13,0	10,7	75,8	4,9	110,7
Bw1	5,2	4,2	2,0	1,1	0,0	3,2	6,5	0,3	9,7	33,0	9,5	7,7	77,8	6,3	103,4
Bw2	5,1	4,1	0,7	0,3	0,0	1,2	4,1	0,7	5,3	22,3	38,1	4,5	65,9	6,9	96,4



**Apêndice E - Descrição do Perfil do Solo 5.**



## **A - DESCRIÇÃO GERAL (Perfil 5)**

DATA - 18/10/2013

CLASSIFICAÇÃO SiBCS - Latossolo Vermelho Eutrófico típico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Região do Celeiro, Santo Augusto, Rio Grande do Sul, 27°46'17,4"S 53°47'18,2"W

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Descrito e coletado em abertura de trincheira, sob o cultivo do milho.

ALTITUDE - 440 metros.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA - Formação Serra Geral

MATERIAL ORIGINÁRIO - Basalto

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não visível.

RELEVO LOCAL - suave ondulado

RELEVO REGIONAL - suave ondulado a ondulado

EROSÃO - laminar ligeira

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - campo subtropical

USO ATUAL: cultivo do milho

CLIMA: Cfa da classificação de Köppen, subtropical do ponto de vista térmico e temperado chuvoso.

DESCRITO E COLETADO POR: Ricardo Dalmolin e Nelson Smola

**B - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA (Perfil 5)**

- Ap 0 - 24 cm, bruno avermelhado escuro (2,5 YR 3/3. úmido); argilosa, pequenos a médios, blocos subangulares; poroso; solto, plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e gradual; raízes abundantes.
- A1 24 - 38 cm, bruno avermelhado escuro (2.5 YR 3/4. úmido); muito argilosa; pequenos a médios, blocos subangulares; poroso; muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição gradual e plana; raízes abundantes.
- AB 38 - 63 cm: bruno avermelhado escuro (2.5 YR 3/6. úmido); muito argilosa; pequenos a médios, blocos subangulares, poroso; muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição gradual e plana, raízes abundantes.
- Bw1 63 - 96 cm: bruno avermelhado (2.5 YR 4/4. úmido); muito argilosa: fraca. pequenos a médios; fraca e pouca: poroso; friável, plástico e pegajoso; transição gradual e plana, raízes comuns.
- Bw2 96 - 134 cm, bruno avermelhado escuro (2,5 YR 4/5. úmido): muito argilosa; pequenos a médios, blocos subangulares; cerosidade fraca e comum; poroso; friável, plástico e pegajoso; transição gradual e plana, raízes poucas.
- Bw3 134 - 170 cm, bruno avermelhado escuro (2,5 YR 4/5. úmido): muito argilosa; pequenos a médios, blocos subangulares; cerosidade fraca e comum; poroso; friável, plástico e pegajoso; transição gradual e plana, raízes poucas.

### C - ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS (Perfil 5)

Horizonte		Composição Granulométrica da Terra Fina								Relação Silte/Argila					
Símbolo	Prof.	Areia (2-0.05 mm)	Silte (0.05-0.002 mm)		Argila (<0.002 mm)										
	cm	----- g kg <sup>-1</sup> -----													
Ap	0 - 24	119	341		540			0,6							
A1	24 - 38	77	312		611			0,5							
AB	38 - 63	93	247		660			0,4							
Bw1	63 - 96	60	172		768			0,2							
Bw2	96 - 134	52	189		758			0,2							
Bw3	134 -170+	60	170		770			0,2							
Horiz.	pH (1:2,5)		Complexo Sortivo							V	$\frac{100 \cdot \text{Al}^{3+}}{\text{Al}^{3+} + \text{S}}$	COS	Fe <sub>a</sub>	Fe <sub>o</sub>	Fe <sub>s</sub>
	Água	KCl	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Valor S	H+Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>	CTC PH 7.0						
	----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----											%	%	----- g kg <sup>-1</sup> -----	
Ap	6,0	5,3	9,5	3,8	0,3	13,7	3,6	0,2	17,3	79,0	1,9	16,8	39,2	6,4	164,0
A1	5,9	5,2	6,1	3,0	0,1	9,2	4,7	0,1	13,9	66,3	0,7	14,5	38,2	7,0	150,3
AB	5,6	5,0	4,2	2,5	0,1	6,9	3,9	0,1	10,8	64,2	1,9	11,5	67,5	7,1	138,1
Bw1	4,7	4,4	4,0	1,9	0,1	6,1	4,4	0,2	10,5	57,9	3,1	11,8	44,7	5,7	124,3
Bw2	4,5	4,2	3,3	1,5	0,2	5,1	4,9	0,2	10,0	50,5	3,7	10,9	66,6	4,8	120,5
Bw3	4,5	4,1	2,5	1,2	0,2	4,0	5,5	0,2	9,51	42,2	4,7	10,7	69,6	5,7	116,6