

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ERODIBILIDADE DE LATOSSOLOS PREDITA PELA
SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E ESPECTROSCOPIA DE
REFLECTÂNCIA DIFUSA**

Ronny Sobreira Barbosa

Engenheiro Agrônomo

2014

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ERODIBILIDADE DE LATOSSOLOS PREDITA PELA
SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E ESPECTROSCOPIA DE
REFLECTÂNCIA DIFUSA**

Ronny Sobreira Barbosa

Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior

Coorientador: Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

2014

B238e Barbosa, Ronny Sobreira
Erodibilidade de latossolos predita pela suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa / Ronny Sobreira Barbosa. – – Jaboticabal, 2014
xiii, 65 p. ; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2014
Orientador: José Marques Júnior
Banca examinadora: Carlos Eduardo Angeli Furlani, Gener Tadeu Pereira, Marlene Cristina Alves e Zigomar Menezes de Souza
Bibliografia

1. Pedometria. 2. Quimiometria. 3. Mapeamento. 4. Mineralogia. 5. Vis-NIR-MIR. 6. Geoestatística. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.425:553

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE JABOTICABAL
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ERODIBILIDADE DE LATOSSOLOS PREDITA PELA SUSCETIBILIDADE
MAGNÉTICA E ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA DIFUSA

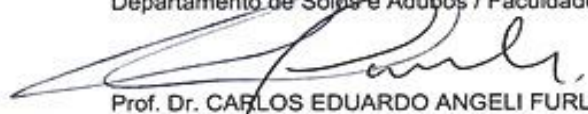
AUTOR: RONNY SOBREIRA BARBOSA

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

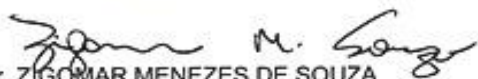
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCILIO VIEIRA MARTINS FILHO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA
(CIÊNCIA DO SOLO) , pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR
Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI
Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. GENE TADEU PEREIRA
Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA
Universidade Estadual de Campinas / Campinas/SP


Profa. Dra. MARLENE CRISTINA ALVES
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Data da realização: 21 de fevereiro de 2014.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Ronny Sobreira Barbosa – Graduado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal do Piauí (2008) (Título da monografia: Diagnóstico químico dos solos sob cultivo de feijão-caupi nos setores três e quatro do perímetro irrigado caldeirão, Piauí) e mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual de Campinas (2011) (Título da Dissertação: Sistema radicular e atributos físicos do solo sob diferentes sistemas de preparo em citros – Bolsista CAPES). Iniciou o doutorado em 2011 no curso de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) pela FCAV/UNESP Jaboticabal (Título do Projeto de Tese: Erodibilidade de Latossolos predita pela suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa – Bolsista CAPES), com doutorado sanduíche na Universidade de Córdoba (Espanha) por cinco meses (Título do Projeto de doutorado sanduíche: Estimativa da erodibilidade (K, Ki & Kr) por suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa em diferentes solos brasileiros, PDSE – CAPES Proc. Nº 18732-12-7). Atua na área de Agronomia com ênfase em modelagem de erodibilidade do solo, geoestatística, mapeamento de áreas de manejo específico com base na relação solo-paisagem e técnicas de quantificação indireta de atributos químicos, físicos, mineralógicos do solo e de erodibilidade do solo (suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa). Publicou oito artigos, sendo as produções mais relevantes publicadas nas revistas Pesquisa Agropecuária Brasileira e Revista Brasileira de Ciência do Solo. Participou da organização do 1º Encontro Paulista de Ciência do Solo. Membro do Grupo de Pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico (CSME) da UNESP, Câmpus de Jaboticabal, desde 2011.

"Determinação, coragem e auto confiança são fatores decisivos para o sucesso. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho..."

DALAI LAMA

"Toda a nossa ciência, comparada à realidade, é primitiva e inocente; e, portanto, é o que temos de mais valioso."

ALBERT EINSTEIN

Aos meus queridos pais:
Antonio Barbosa da Silva e
Rosalba Maria Sobreira Barbosa

DEDICO

À minha Família

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois sem Ele nada é possível.

Aos meus pais, Antonio Barbosa da Silva e Rosalba Maria Sobreira Barbosa, por me apoiarem incansavelmente em todas as fases da minha vida e por sempre me darem força, apesar da distância física.

Aos meus irmãos, Ramon Barbosa da Silva, Bárbara Sobreira Barbosa, Suéllen Sobreira Barbosa e Dayse Sobreira Barbosa, por permanecerem sempre ao meu lado e estarem sempre dispostos a me ajudar durante essa longa caminhada.

Aos Professores José Marques Júnior e Marcílio Vieira Martins Filho, pelas pelos ensinamentos que contribuíram tanto para o meu crescimento profissional, como para o meu crescimento pessoal.

Aos Professores Vidál Barrón e José Torrent, por fazerem do meu estágio de doutorado sanduíche no exterior muito mais que uma oportunidade de aborver conhecimento, transformando-o em uma das maiores experiências da minha vida.

Aos professores da Banca de Defesa, Carlos Eduardo Angeli Furlani, Gener Tadeu Pereira, Marlene Cristina Alves e Zigomar Menezes de Souza, que, por meio de suas críticas, sugestões e questionamento, contribuíram muito para a evolução desse trabalho.

À amiga Angélica Santos Rabelo de Souza Bahia, pela constante preocupação no andar do meu trabalho, pela ajuda intelectual e pelos momentos de descontração.

Ao amigo Daniel De Bortoli Teixeira, pelas brincadeiras, pela sinceridade, pelo apoio nas análises estatísticas e geoestatísticas e pelos biscoitos de polvilho.

Ao amigo Diego Silva Siqueira, pelos conselhos de cunho profissional e pessoal, pelas ideias científicas, pelas conversas animadoras e pelo apoio moral.

À amiga e madrinha de crisma Lívia Arantes Camargo, por contribuir incansavelmente com minha formação pessoal e profissional, em que foram construídos laços que jamais serem desfeitos.

À amiga Milla Reis de Alcantara, que por vários anos, fez tudo que estava a seu alcance máximo para me ajudar a cumprir essa etapa da minha vida. Sem ela essa conquista não seria possível.

Ao amigo Elson César de Moraes, por ser mais que “irmão mais velho”, sempre participando da minha vida com conselhos importantíssimos para as decisões da minha vida.

Aos grandes amigos Izabel Maria Almeida Lima e Thiago Vinícius B. Ibiapina, pela amizade incontestável e pelo apoio nos momentos turbulentos e por compartilharem dos momentos felizes dos últimos 10 anos de nossas vidas. Tenho certeza que continuaremos assim.

Aos amigos: Bruno Braos, Flávio Batistella, Felipe Batistella, Gabriel Moreira, Gustavo Claudiano, Juliana Evangelista, Lucas Braos, Thalita Petrillo, Paulo Marcusso, por serem minha família em Jaboticabal e por terem papel preponderante nos momentos de descontração. Que nossa amizade nunca se acabe.

Aos queridos amigos membros do Grupo de Pesquisa CSME: Ana Beatriz Coelho França, Danilo Almeida Baldo do Carmo, Frederico Luiz Siansi, Henrique Menezes Santos, Ivanildo Amorim de Oliveira, Rafael Gonçalves Peluco e Renato Eleotério de Aquino pelo companherismo durante essa fase da minha vida e também pela ajuda dispensada nos momentos de coleta e análises de laboratório.

Aos amigos e funcionários do Departamento de Ciências Exatas, Solos e Adubos, Biblioteca, U.A.D, R.U. e FUNEP, pelo maravilhoso convívio e ajuda.

À Usina São Martinho, por todo o apoio logístico e pela concessão da área experimental, e aos queridos amigos com quem tive a oportunidade de aprender.

A CAPES (Proc. nº 18732-12-7), pela ajuda financeira e pelas bolsas concedidas.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais	1
1.1 Introdução.	1
1.2 Revisão de Literatura	4
1.2.1 Estudos sobre a erodibilidade do solo no Brasil e no mundo	4
1.2.2 Uso da suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa na ciência do solo.....	7
1.2.3 Teorização e aplicação de funções de pedotransferencia.....	10
1.2.4 Uso da quimiometria na ciência do solo	11
1.3 Referências	13
CAPÍTULO 2 – Suscetibilidade magnética e pedometria no mapeamento da erodibilidade de Latossolos da região nordeste do Estado de São Paulo, Brasil.	23
Resumo	23
2.1 Introdução	23
2.2 Material e Métodos	25
2.2.1 Área de estudo	25
2.2.2 Amostragem e análises laboratoriais	27
2.2.3 Cálculo dos fatores de erodibilidade K e Ki	28
2.2.4 Análises estatísticas	29
2.3 Resultados e Discussão	30
2.4 Conclusões.....	38
Agradecimentos.	38
2.5 Literatura Consultada.	38
CAPÍTULO 3 – Espectroscopia de reflectância difusa na predição da erodibilidade de Latossolo da região nordeste do Estado de São Paulo, Brasil.	44
Resumo	44
3.1 Introdução	44
3.2 Material e Métodos	46
3.2.1 Área de estudo	46

3.2.2 Amostragem e análises laboratoriais.....	48
3.2.3 Análises espectrais.....	49
3.2.4 Cálculo dos fatores de erodibilidade K e Ki	50
3.2.5 Análises estatísticas	50
3.2.6 Calibração espectral e construção dos modelos preditivos.....	51
3.3 Resultados e Discussão	52
3.3.1 Propriedades do solo.....	52
3.3.2 Espectros do solo	54
3.3.3 Análises PLS	54
3.4 Conclusões.....	60
Agracedimentos.	60
3.5 Considerações finais	60
3.6 Literatura Consultada	61

ERODIBILIDADE DE LATOSSOLOS PREDITA PELA SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA DIFUSA

RESUMO – A compreensão da erodibilidade do solo é de suma importância para se aprofundar nos estudos que visem a diminuição da erosão do solo. Objetivou-se com este trabalho, investigar a eficiência da utilização da suscetibilidade magnética (SM) e espectroscopia de reflectância difusa (ERD) em funções de pedotransferência que sejam capazes de estimar os fatores de erodibilidade K e K_i em latossolos no nordeste do estado de São Paulo. Este estudo foi realizado em área de 380 ha sob cultivo de cana-de-açúcar, no Município de Guatapar, estado de São Paulo, Brasil. Foram coletadas 86 amostras no “espigão” da vertente (Transeção) e 150 amostras na lateral. Realizaram-se as análises das fraoes granulométricas, argila dispersa em gua (ADA), teor de matéria orgânica (MO), concentração dos óxidos de ferro, razão entre goethita (Gt) e hematitas (Hm) e entre caolinita (Ct) e gibbsita (Gb), suscetibilidade magnética e calcularam-se os parâmetros de erodibilidade K e K_i . As funções de pedotransferência (FPT), para estimar os fatores K e K_i em função da SM, foram modeladas por meio de análise de regressão linear simples e a validação dos modelos ocorreu por meio da validação cruzada. A SM apresentou correlação significativa com os fatores K e K_i , provavelmente por ela estar associada aos atributos do solo que regem a resistência do solo em ser erodido. Observando os mapas de Krigagem, percebe-se que a mudança dos valores da SM ocorre de forma decrescente no sentido do ponto mais alto ao ponto mais baixo, e os valores de K_{est} e $K_{i,est}$ crescem no mesmo sentido. Conclui-se que a SM pode ser usada como componente da função de pedotransferência na quantificação da erodibilidade de latossolos da região nordeste do estado de São Paulo, Brasil. Para testar a eficiência da ERD na predição de K e K_i , foram utilizadas 30 amostras, 15 selecionadas da transeção e 15 da lateral. Utilizaram-se três bandas espectroscópicas (Vis-NIR-MIR) separadamente e combinadas. A calibração espectral foi feita utilizando a quimiometria. Os modelos foram gerados utilizando a regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLS), com o uso da validação cruzada denominada leave-one-out. A precisão e acurácia da modelagem foram avaliadas com os cálculos do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) e o Desvio Residual de Previsão (RPD), respectivamente. A importância das variáveis na predição dos fatores K e K_i foi dada pelo ndice de importância das variáveis (VIP). Em todas as propriedades estudadas, o sistema espectroscópico que melhor estimou os mesmos, foi o MIR. Dentre os parâmetros de erodibilidade, o que apresentou melhores ajustes, foi o K_i , com coeficiente $R^2_{adj} = 0,57$ e $RDP = 1,57$. Concluiu-se que o uso da técnica de ERD, principalmente na faixa do MIR, é eficiente na predição dos fatores K e K_i em latossolos da região nordeste do estado de São Paulo.

Palavras-chave: geoestatística, mapeamento, mineralogia, pedometria, quimiometria, Vis-NIR-MIR

ERODIBILITY OXISOLS PREDICTED BY MAGNETIC SUSCEPTIBILITY AND SPECTROSCOPY DIFFUSE REFLECTANCE

ABSTRACT – Understanding soil erodibility is of paramount importance to delve into studies aimed at the reduction of soil erosion. The objective of this study was to investigate the efficiency of the use of magnetic susceptibility (MS) and diffuse reflectance spectroscopy (ERD) in pedotransfer functions that are capable of estimating the factors erodibility K and Ki latosols in the northeastern state of São Paulo. This study was conducted in 380 ha area under cultivation of cane sugar in Guatapar, São Paulo, Brazil. 86 samples in the "spike" strand (transect) and 150 samples were collected on the side. There were analyzes of size fractions, water dispersible clay (ADA), soil organic matter (OM), concentration of iron oxides, goethite ratio (Gt) and hematite (Hm) and between kaolinite (Ct) and gibbsite (Gb), magnetic susceptibility and calculated the parameters of erodibility K and Ki. The pedotransfer functions (PTF) to estimate the K and Ki factors as a function of SM, were modeled by linear regression analysis and model validation was performed by cross-validation. The SM was significantly correlated with K and Ki factors, probably because she was associated with the soil properties that govern the resistance of the soil to be eroded. Observing the Kriging maps, one realizes that changing the values of SM occurs in decreasing order towards the highest point to the lowest point, and the values of K_{est} and Ki_{est} grow in the same direction. We conclude that the SM can be used as function Pedotransfer component in quantifying the erodibility oxisols the northeast region of the state of São Paulo, Brazil. To test the efficiency of the ERD in the prediction of K and Ki, 30 samples selected from 15 and 15 lateral transect were used. Spectroscopic used three bands (Vis-NIR-MIR) separately and combined. The spectral calibration was performed using chemometrics. The models were generated using the Partial Least Squares regression (PLS), using the cross-validation called leave-one -out. The precision and accuracy of modeling calculations were evaluated with the adjusted coefficient of determination (R^2_{adj}) and Residual Prediction Deviation (RPD), respectively. The importance of the variables in the prediction of the factors K and Ki was given by the index of importance of the variables (VIP). All properties studied, the spectroscopic system that estimated the same, was the MIR. Among the erodibility parameters, presented the best adjustments, was the Ki coefficient $R^2_{adj}=0.57$ and $RDP=1.57$. It was concluded that the use of the technique of ERD, especially in the MIR range, is effective in predicting the factors K and Ki latosols the northeast region of the state of São Paulo.

Keywords: geostatistics, mapping, mineralogy, pedometrics, chemometrics, Vis-NIR-MIR

CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais

1.1 Introdução

Conceitua-se erosão do solo como o processo pelo qual partículas da camada superficial do solo são retiradas, seja pela ação da água (em forma de chuva e gelo) ou do vento, e são transportadas e depositadas em outro lugar. Esse processo ocorre de forma natural, porém, quando ocorre de forma antrópica é considerado como um grave problema ambiental, uma vez que ameaça seriamente os recursos naturais, da agricultura e do meio ambiente (RAHMAN et al., 2009).

A informação espacial e quantitativa da erosão do solo contribui significativamente para a gestão da conservação do solo e controle de erosão (PRASANNAKUMAR et al., 2011). Para auxiliar no desenvolvimento deste cenário, foram criados diferentes modelos que servem para estimar as taxas de perdas de solo por erosão. Os modelos mais usados são a USLE (Universal Soil Lost Equation) (WISCHMEIER & SMITH, 1978) e o modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) (FLANAGAN & NEARING, 1995).

O modelo USLE é um modelo empírico que foi desenvolvido para atuar como um modelo simples de estimativa a longo prazo de taxas de perda de solo anual média. O modelo WEPP é um modelo determinístico que foi desenvolvido para ser capaz de prever a perda de solo e deposição utilizando uma abordagem espacial e temporalmente distribuído (FOSTER et al., 1995). Ambos os métodos baseiam-se na estimativa da perda de solo por unidade de área e toma em conta os parâmetros específicos tais como a precipitação, topografia, erodibilidade, erosivas e escoamento (BESKOW et al., 2009).

Dentre os parâmetros utilizados na USLE e no WEPP, existe um que é comum aos dois modelos e que atua como um agente dependente do material de origem e da pedogênese de cada local, que é o fator erodibilidade do solo. A erodibilidade do solo representa a suscetibilidade do solo ao processo erosivo. No modelo USLE o fator K representa a erodibilidade do solo (WISCHMEIER & SMITH, 1978), enquanto que no modelo WEPP, esse fator é subdividido em K_i (erodibilidade

do solo em entressulcos) e K_r (erodibilidade do solo em sulcos) (FLANAGAN & NEARING, 1995).

A determinação direta deste fator ocorre pelo cálculo da razão entre as perdas de solo e a erosividade das chuvas, sob chuva natural ou chuva simulada (WISCHMEIER & SMITH, 1978). Contudo, quando a observação da erodibilidade é feita dessa maneira, se tem um gasto financeiro muito grande o que impede, na maioria das vezes, a realização da investigação, principalmente, quando o objetivo é a espacialização desse parâmetro em grandes áreas.

Assim, os estudos sobre erodibilidade do solo tornam-se um desafio, fazendo com a demanda por modelos que sejam capazes de estimar de forma indireta o fator erodibilidade sejam constantes. Na tentativa de superar esse desafio pode-se fazer uso de funções de pedotransferência (FPT). Segundo EMBRAPA (2003), as FPT são funções preditivas de certas propriedades dos solos a partir de outras facilmente medidas e rotineiramente obtidas a custos mais baixos. Por meio delas, é possível extrair dos atributos correlatos informações para aplicação em toda a área de interesse (MISASNY & McBRATNEY, 2006).

Dois instrumentos importantes na observação de atributos do solo que podem ser usados nessas FPT são a suscetibilidade magnética (SM) e a espectroscopia de reflectância difusa (ERD). Estas ferramentas são capazes de estimar atributos do solo de maneira não destrutiva, rápida e eficiente, o que permite sua aplicação em processos de mapeamento de pequenas ou grandes áreas (SIQUEIRA, 2013).

Enquanto que a SM é usada como uma ferramenta poderosa para a avaliação da composição e das propriedades das rochas, dos sedimentos e dos solos (MAHER & THOMPSON, 1999), a ERD é encarada como importante ferramenta em estudos que visem o entendimento de processos intrínsecos ao solo (MARTÍNEZ-CARRERAS et al., 2010). Ambos estão relacionados à mineralogia, que é o principal fator que condiciona o comportamento mecânico do solo, e como tal, interfere diretamente na permeabilidade do solo (QUEIROZ, 2009).

Encontra-se na literatura, várias pesquisas onde são exaltadas as relações da mineralogia com os atributos morfológicos (GOMES et al., 2004), físicos (CAMARGO et al., 2008) e químicos do solo (TOMASI et al., 2012), e estes são agentes reguladores da erodibilidade do solo (WISCHMEIER et al., 1971; BREWER, 1976).

Também é possível verificar a ocorrência de muitos trabalhos, principalmente em solos tropicais, que investigam a aplicação de modelos indiretos para estimar erodibilidade (DENARDINI, 1990; MARQUES et al., 1997; SILVA et al., 2000; AMORIM et al., 2009; EDUARDO, 2012).

Contudo, é notória a necessidade de estudos que correlacionem a erodibilidade com atributos relacionados à mineralogia do solo e que estes forneçam subsídios para o surgimento de novos modelos que utilizem estes atributos como agentes preditores.

O objetivou-se com essa pesquisa, investigar a eficiência da SM e da ERD em estimar, com precisão e acurácia, a erodibilidade de latossolos na região nordeste do estado de São Paulo, Brasil.

1.2 Revisão de Literatura

1.2.1 Estudos sobre a erodibilidade do solo no Brasil e no mundo

Um dos trabalhos pioneiros sobre erodibilidade do solo no mundo foi o estudo de CHEPIL (1950), onde investigou a influência de estrutura do solo na erodibilidade. Dentre os trabalhos mais clássicos sobre erodibilidade do solo, destaca-se o de WISCHMEIER et al. (1971), o qual possui até o momento, 368 citações (WEB OF SCIENCE, 2013). Trabalhos como estes abriram as portas para estudos aprofundados sobre erodibilidade dentro da área da agricultura, sendo que hoje o número de trabalhos publicados é de aproximadamente 806 (Figura 1).

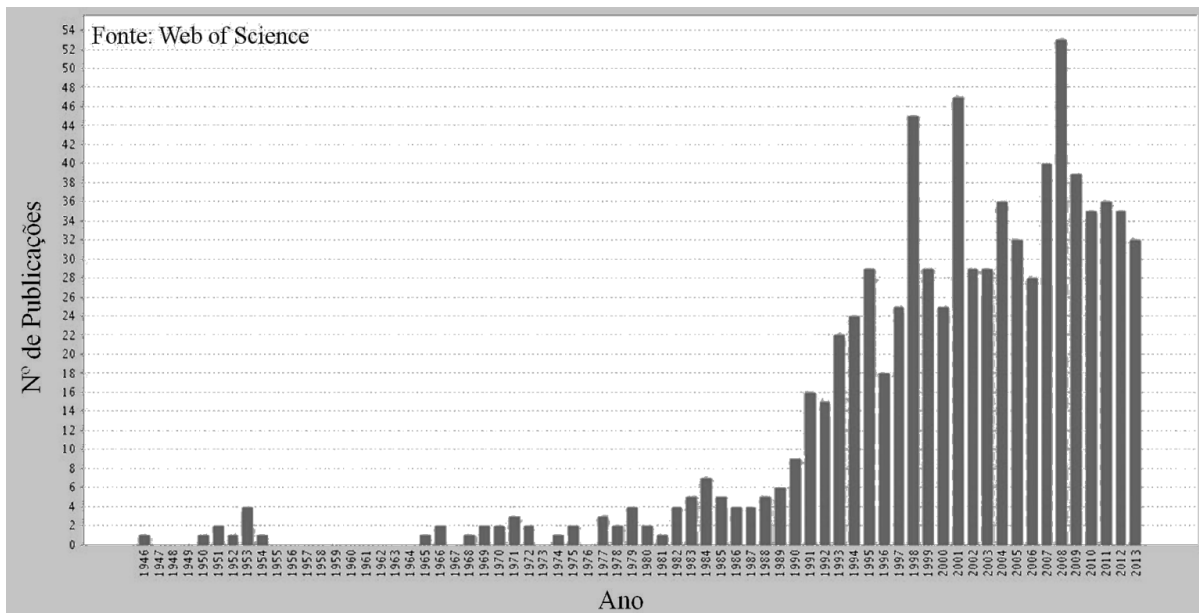


Figura 1. Relatório indicando o número de publicações por ano no mundo desde 1946 até 2013 na base de dados Web of Science - Tópico: soil erodibility; Refinado por área de pesquisa: agriculture.

Observa-se que o número de publicações anuais sobre erodibilidade do solo no mundo foi relativamente limitado até a década de oitenta (Figura 1). A partir daí, houve crescimento exponencial do número de publicações que ocorreu ao mesmo tempo que o acesso das universidades e dos institutos de pesquisas aos primeiros mecanismos computacionais, a exemplo do primeiro computador desenvolvido pela IBM em 1981 (FIOLHAIS & TRINDADE, 2003). O número de variáveis envolvidas e

o número de informações para serem processadas dificultavam a execução dos trabalhos e o advento do computador facilitou muito o trabalho com grande número de informações.

O país que mais publicou pesquisas sobre erodibilidade do solo foram os Estados Unidos, com 28 % do total de artigos publicados sobre este tema (Figura 2) (WEB OF SCIENCE, 2013). O Brasil tem cerca de 6% do total de artigos publicados no mundo sobre esse tema, mas ainda fica atrás da Espanha (7%), Austrália (6,5%) e China (6,2%) (Figura 2).

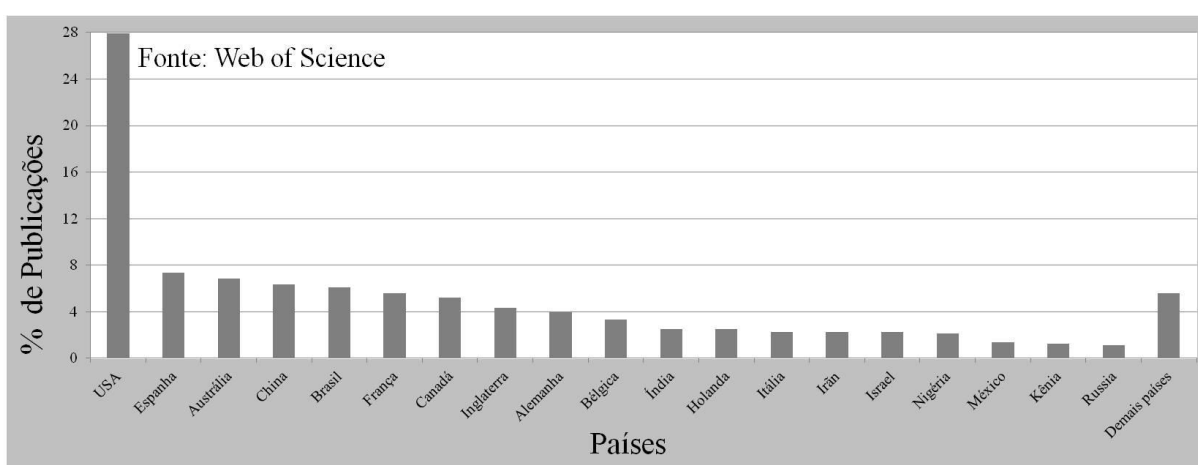


Figura 2. Relatório indicando a porcentagem de pesquisas publicadas por país desde 1946 até 2013 na base de dados Web of Science - Tópico: soil erodibility; Endereço: USA, Spain, Australia, China, Brazil, etc; Refinado por área de pesquisa: agriculture.

No Brasil, uma das primeiras investigações sobre erodibilidade do solo foi desenvolvida por LEITE et al. (1982). Um dos artigos científicos sobre erodibilidade do solo realizado no Brasil mais citado no mundo é o preconizado por CASTRO FILHO & LOGAN (1991). O número de publicações sobre este tema aumentou depois dos anos 90 (Figura 3). Os trabalhos desenvolvidos a partir desta década foram desenvolvidos na UFRGS que tiveram forte interface com a física do solo e hidráulica do escoamento superficial. Essa linha foi conduzida em parceria entre a UFRGS e a UFSM, envolvendo vários pesquisadores, entre os quais sobressaíram pelo número de participações (BARRETO et al., 2008).

A partir desta época, se estabeleceram os trabalhos que investigavam as subdivisões do processo erosivo. Principalmente subdividindo a erodibilidade em

sulcos e em entressulcos, conforme as características de fluxo e origem dos sedimentos, abordando, dentre outras questões, as relações existentes entre erodibilidade dos solos e os índices de estabilidade de agregados e, além de determinar taxas de desagregação e a tensão crítica de cisalhamento, variando o tipo de solo, as práticas de manejo e a cultura (VEIGA et al., 1993; BRAIDA & CASSOL, 1996; REICHERT et al., 2001; CASSOL et al., 2004; CANTALICE et al., 2005). Estes conceitos são aplicados principalmente no modelo WEEP, que ampliou a aplicabilidade dos resultados em estudos de predição de erosão, que até então somente eram focalizados no modelo USLE (BARRETO et al., 2008).

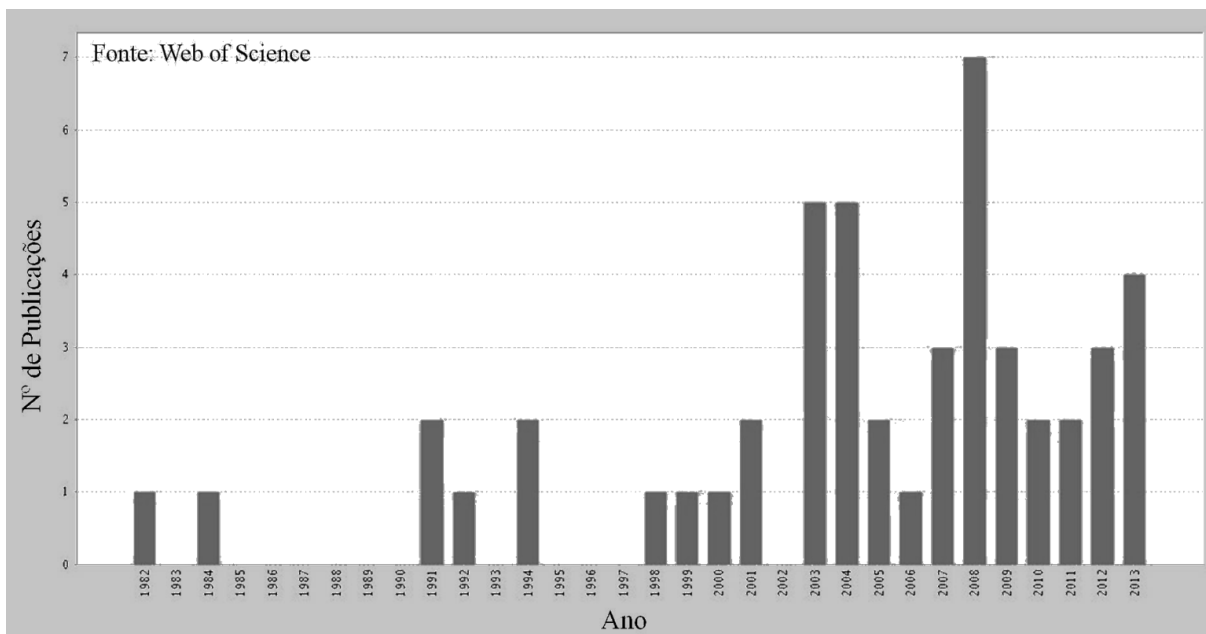


Figura 3. Relatório indicando o número de publicações por ano no Brasil desde 1982 até 2013 na base de dados Web of Science - Tópico: soil erodibility; Endereço: brazil; Refinado por área de pesquisa: agriculture.

Em pesquisa desenvolvida por SILVA et al. (1999), foram construídos cinco modelos de predição de erodibilidade, contudo, estes modelos pecaram pela sua complexibilidade e pela falta da inserção de atributos diagnósticos nos modelos. BEZERRA & CANTALICE (2006) investigaram o comportamento da erodibilidade em entressulcos do solo quando submetidos a diferentes níveis de cobertura vegetal, e concluíram que o resíduo da cana-de-açúcar em contato direto com o solo fornece condições que possibilita maiores taxas de infiltração de água no solo e menores taxas da erosão entressulcos. O comportamento da erodibilidade em entressulcos

do solo quando submetidos a diferentes níveis de cobertura vegetal também foi avaliado por outros autores, a exemplo de SILVA et al. (2012) onde afirmam que devem ser mantidos 75 % de cobertura com palha de cana-de-açúcar, 50 % de cobertura para perda de água e 25 % de cobertura para perda de matéria orgânica e nutrientes, o que possibilita otimizar o uso desse recurso tanto para a conservação do solo como para a produção de energia limpa em indústrias sucroalcooleiras.

Contudo, número de pesquisas que levam em consideração a influência da mineralogia no comportamento da erodibilidade do solo ainda é pequeno. Existe uma lacuna muito grande entre os conceitos sobre material de origem, pedogênese, posição da paisagem e erodibilidade do solo. Alguns pesquisadores já vêm tentando investigar a erodibilidade do solo correlacionando com parâmetros que, indiretamente, estão relacionados com os atributos mineralógicos, que por sua vez interferem diretamente no comportamento dos atributos do solo (SANTOS et al., 2011; SANTOS et al., 2013).

1.2.2 Uso da suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa na ciência do solo

A suscetibilidade magnética (SM) e a espectroscopia de reflectância difusa (ERD) são duas técnicas capazes de estimar atributos do solo de maneira não destrutiva, rápida e eficiente, o que permite a aplicação destas técnicas em processos de mapeamento de pequenas ou grandes áreas (SIQUEIRA, 2013).

Partindo do princípio que a SM é uma característica de alguns minerais e que estes minerais têm como origem as rochas, pode afirmar que ela é afetada, principalmente, pelos mesmos fatores de formação do solo, ou seja, pelo clima (DEARING et al., 2001), material de origem (HANESCH et al., 2001), relevo (JONG et al., 2000) e fauna/flora (DEARING et al., 1995).

A SM é usada como uma ferramenta poderosa para a avaliação da composição e propriedades das rochas, dos sedimentos e dos solos (MAHER & THOMPSON, 1999). Os minerais magnéticos dos solos são derivados a partir do material de origem, da pedogênese ou como resultado de atividades antrópicas e dependem da concentração e das características dos minerais, tais como:

composição, estrutura espacial do cristal e tamanho (VEROSUB & ROBERTS, 1995). Assim sendo, pode-se afirmar que os minerais com capacidade magnética armazenam arquivos naturais contendo registros dos fatores e processos de formação do solo (MAHER & THOMPSON, 1999).

São considerados cinco tipos básicos de comportamento magnético: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo. Nos minerais diamagnéticos, os átomos que compõem a cela unitária do mineral, possuem as camadas eletrônicas preenchidas. Assim, o número de “spins” eletrônicos alinhados numa direção é igual ao número de “spins” eletrônicos na direção oposta (Exemplo: quartzo). Nos minerais paramagnéticos as camadas eletrônicas estão incompletas. A presença de um campo magnético externo faz com que os “spins” se alinhem e, mesmo após a retirada do campo magnético, alguns “spins” permanecem alinhados (Exemplo: olivina).

Os minerais ferromagnéticos são um caso especial de paramagnetismo. Após a retirada do campo magnético os “spins” permanecem alinhados, fazendo com que o mineral possua um grande valor de magnetização remanescente (Exemplo: ferro e cobalto). Nos minerais ferrimagnéticos, os “spins” não estão emparelhados, assim prevalece o momento magnético do maior número de “spins” no mesmo sentido (Exemplo: magnetita). Os minerais antiferromagnéticos não apresentam propriedades magnéticas. Frequentemente, a SM é confundida com atração magnética. A atração magnética foi utilizada como ferramenta auxiliar de campo nos primeiros levantamentos de solos do estado de São Paulo na década de 1960, para distinguir solos originados de rochas máficas de outros materiais de origem (RESENDE et al., 1988a,b).

Com os avanços dos sensores e de técnicas alternativas na avaliação da interação magnética (CARNEIRO et al., 2003; PREETZ et al., 2008), o uso da SM como ferramenta auxiliar na caracterização quantitativa da variabilidade de campo (BARRIOS et al., 2012; SANTOS et al., 2013) ganha novas expectativas.

As análises de ERD também são importantes em estudos que visem o entendimento de processos intrínsecos ao solo (MARTÍNEZ-CARRERAS et al., 2010; LIU et al., 2011; XIAN-LI et al., 2012; GÚZMAN et al., 2013). A ERD tem sido amplamente adotada para estudos de propriedades primárias e secundárias do solo

(JANIK et al., 1998; MALLEY et al., 2004; NANNI & DEMATTÊ, 2006; VISCARRA ROSSEL et al., 2006; CAÑASVERAS et al., 2012). A ERD se enquadra na categoria de técnicas rápidas, baratas e de baixo impacto ambiental na previsão simultânea de uma variedade de atributos primário e secundários do solo é o ERD (MALLEY et al., 2004; VISCARRA ROSSEL et al., 2006). Para utilizar-se de seu benefício, não é necessário o uso de produtos químicos, que é uma vantagem do ponto de vista ambiental (CAÑASVERAS et al., 2010).

A EDR mede a reflectância de uma amostra de solo, que é a quantidade de base que caracteriza o processo de reflexão, que é definida como a razão do fluxo radiante refletido (ou potência) para o fluxo radiante que incide (WYSZECKI & STILES, 1982). Segundo TORRENT & BARRÓN (2008), a cor e vários outros atributos da aparência do solo são altamente sensíveis à dimensão, natureza das partículas, proporção e morfologia e a associação espacial de seus minerais e componentes orgânicos. Ela permite a análises de moléculas orgânicas (e algumas inorgânicas) utilizando o princípio de emissão de radiação eletromagnética que, ao incidir sobre uma amostra sólida, fornece uma quantidade de energia capaz de fazer vibrar as ligações químicas que unem os átomos. De acordo com cada tipo de ligação, essa vibração difere e, é transformada matematicamente na concentração do elemento que se deseja determinar (SANTOS, 2011).

Dentre as bandas de absorção dos espectros, as mais utilizadas com este fim são a banda do visível (Vis – 400 a 750 nm), infravermelho próximo (NIR – 750 a 2500 nm) e infravermelho médio (MIR – 2500 a 25000 nm) (SKOOG et al., 2006). O processo de absorção de luz na ERD envolve transições eletrônicas, excitação de elétrons do orbital de moléculas e cristais (SKOOG & LEARY, 2002). A forma em que ocorre esta interação e a região do espectro em que ela ocorre, geram informações que permitem a identificação da composição química de grande parte dos minerais presentes nas amostras (VISCARRA ROSSEL et al., 2006; SILVERSTEIN et al., 2007; CAÑASVERAS et al., 2012).

Estudos recentes demonstram o potencial de métodos para quantificação indireta por meio de SM e ERD do teor de argila, saturação por bases e teor de hematita do solo (SIQUEIRA et al., 2010), erosão (SANTOS et al., 2011; GÚZMAN, et al., 2013) e potencial quali-quantitativo do solo para a cultura da laranja (CORTEZ

et al., 2011). Estas informações sobre o potencial de uso e aplicações destes métodos são importantes para incentivar novas pesquisas sobre o tema.

1.2.3 Teorização e aplicação de funções de pedotransferência

Com a grande explosão em tecnologia de computação e informações veio vastas quantidades de dados e ferramentas em todos os ramos da ciência, inclusive na ciência do solo (McBRATNEY et al., 2003). O desafio de compreender a lógica embutida em grandes blocos de dados levou ao desenvolvimento de novas ferramentas no domínio da estatística e gerou novas áreas, como por exemplo, a mineração de dados (HASTIE et al., 2001). Além disso, houve considerável aumento das ferramentas de sistemas de informações geográficas aplicados em ciência do solo. O detalhamento dos estudos relacionados ao solo é subsidiado por técnicas que visem aquisições de informações que deem apoio à sustentabilidade das atividades agrícolas. A aquisição destas informações, em geral, geram grande desconforto econômico e ambiental e segundo McBRATNEY et al. (2003), uma das razões do pouco conhecimento sobre a variabilidade dos atributos do solo é, de fato, devido ao elevado custo e a demanda de tempo requerido para a realização dos levantamentos convencionais.

Neste contexto, a pedometria surge como uma ferramenta que torna isso possível por meio das funções de pedotransferência (FPT) que, segundo EMBRAPA (2003) são funções preditivas de certas propriedades dos solos a partir de outras facilmente medidas e rotineiramente obtidas a custos mais baixos. MISASNY & McBRATNEY (2006) afirmam que enquanto os métodos tradicionais de levantamento e análise das propriedades do solo ainda são dispendiosos e demorados, a pedometria pode ser usada para extrair dos atributos correlatos informações para aplicação em toda a área de interesse. Segundo SIQUEIRA (2010), a pedometria permite aumentar a precisão dos estudos juntamente com o aumento do número de amostras coletadas sem que haja aumento de custo e tempo de análise.

O uso da pedometria para realizar a espacialização das propriedades do solo tornou-se um tema comum nas investigações na área da ciência do solo. A predição

espacial das propriedades do solo dependentes por meio de variáveis de observação mais simples tem atraído pesquisas em pedometria (MISASNY & McBRATNEY, 2006). GONTIJO et al. (2012) usaram a pedometria para estudar a variabilidade e correlação espacial de micronutrientes e matéria orgânica do solo com a produtividade da pimenta-do-reino. SANTOS et al. (2011) utilizou a suscetibilidade magnética como agente pedométrico para identificar diferentes compartimentos da paisagem em uma vertente. CAMPOS et al. (2010) estudou a influência das superfícies geomórficas na distribuição espacial dos atributos do solo em área sob cultivo de cana-de-açúcar por meio da pedometria.

Apesar da constante ocorrência de pesquisas relacionadas com a pedometria (TEN CATEN et al., 2009; KEMPEN et al., 2010; SIQUEIRA et al., 2010; KEMPEN et al., 2011; SILVEIRA et al., 2012) ainda existe uma lacuna a ser ocupada por pesquisas que utilizem dados mineralógicos para a construção de cenários mais seguros sobre atributos relacionados à erodibilidade dos solos.

1.2.4 Uso da quimiometria na ciência do solo

O termo quimiometria vem da expressão sueca Kemometri (Kemo + Metri) e do inglês chemometrics. Foi inserida pelo Professor Svante Wold (Umea University, Suécia) em 1971 (WOLD, 1995). Quimiometria se refere a utilização de análises estatísticas multivariada para descrever o comportamento de variáveis resposta de dados de origem química. O aperfeiçoamento desta técnica foi impulsionado pela invasão de microprocessadores e microcomputadores nos laboratórios de análises químicas (BRUNS & FAIGLE, 1985). Os modelos estatísticos dos métodos multivariados utilizados na quimiometria consideram as correlações entre muitas variáveis analisadas simultaneamente, permitindo a extração de muita informação (SENA et al., 2000).

Os métodos quimiométricos possuem um enorme potencial no tratamento dos dados de solos. Entretanto, até a segunda metade dos anos 80, a sua presença na literatura era escassa. A partir dos anos 90 nota-se um aumento significativo de suas aplicações, levando os pesquisadores da área de solos a uma grande elevação na sua capacidade de extrair informações dos dados. Pode-se afirmar que está em

curso um processo de substituição de muitos métodos tradicionais de análise univariados por métodos multivariados. Mas esse processo ainda está em seu início e há necessidade de uma ampla divulgação para que cada vez mais maior número de pesquisadores tome contato com esta ferramenta de tratamento de dados multivariados que é a quimiometria (SENA et al., 2000).

A calibração multivariada aplicada em estudos quimiométricos na ciência do solo são, em geral, a Regressão Linear Múltipla (RLM), a Regressão de Componentes Principais (PCR) e a Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLS) (SENA et al., 2000). Essa calibração tem como princípio básico a utilização simultânea de muitas variáveis x_1, x_2, \dots, x_n (como valores de absorbância a vários comprimentos de onda), para quantificar alguma outra variável de interesse y (MARTENS & NAES, 1989).

Segundo MARTENS & NAES (1989) o método mais simples de calibração multivariada é a Regressão Linear Múltipla (RLM). Na RLM a variável a ser prevista, y , é estimada por uma combinação linear das variáveis independentes contidas na matriz X ,

$$Y = Xb \text{ ou } y = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (1)$$

onde, b é o vetor com os coeficientes de regressão. A solução de mínimos quadrados para encontrar b é: $b = (X'X)^{-1}X'y$.

O PCR é um método que fornece uma maneira de superar os problemas descritos (SENA et al., 2000). A regressão, ao invés de ser feita nas variáveis originais, é feita nos "scores" obtidos em uma análise de componentes principais (PCA).

O PLS é o método mais usado em calibração multivariada e difere do PCR por usar a informação de y no cálculo das chamadas variáveis latentes (equivalentes às componentes principais) (SENA et al., 2000). Nesse método, é necessário achar o melhor número de variáveis latentes, o que normalmente é feito por um procedimento chamado validação cruzada ("cross validation"), no qual o erro mínimo de previsão é determinado (BEEBE & KOWALSKI, 1987).

A calibração por RLM na quimiometria já foi utilizada para prever a agregação do solo (GOMEZ et al., 2013), atributos químicos do solo (GHOLIZADE et al., 2013; ZHAI et al., 2013) e atributos físico-químicos (CHAKRABORTY et al., 2012). O PCR também já foi utilizado nos estudos de matéria orgânica (McWHIRT et al., 2012) e outros atributos do solo (BELLON-MAURE et al., 2010). Contudo, a frequência em que são publicados estudos quimiométricos na ciência do solo em que a calibração é feita por PLS é superior aos outros dois métodos (BROWN et al., 2005; WAISER et al., 2007; MORGAN et al., 2009; TATZBER et al., 2010; VOHLAND et al., 2011; TEKIN et al., 2012).

Portanto, o uso da quimiometria na ciência do solo não é somente eficiente como é também muito frequente. Ela fornece subsídios para a análise de dados multivariadamente, facilitando estudos com grande número de amostras, caracterizando-a como uma técnica de destaque na extração e na interpretação das informações de solos.

1.3 Referências

AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. **Principais modelos para estimar as perdas de solo em áreas agrícolas.** In: PRUSKI, F. F., ed. Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. 2.ed. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, p. 74-107, 2009.

BARRETO, A. G. O. P.; LINO, J. S.; SPAROVEK, G. Bibliometria da pesquisa brasileira em erosão acelerada do solo: instituições, temas, espaço e cronologia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1845-1854, 2009.

BARRIOS, M. R.; MARQUES JR, J.; PANOSSO, A. R.; SIQUEIRA, D. S.; SCALA JR, N. L. Magnetic susceptibility to identify landscape segment son a detailed scale in the region of Jaboticabal, São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 1073-1082, 2012.

BEEBE, K. R.; KOWALSKI, B. R. **An introduction to multivariate calibration and analysis.** Analytical Chemistry, v. 59, p. 1007, 1987.

BELLON-MAUREL, V.; FERNANDEZ-AHUMADA, E.; PALAGOS, B.; ROGER, J. M.; MCBRATNEY, A. Critical review of chemometric indicators commonly used for assessing the quality of the prediction of soil attributes by NIR spectroscopy. **Trac-Trends in Analytical Chemistry**, v. 29, n. 9, p. 1073-1081, 2010.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURI, N.; VIOLA, M. R.; AVANZI, J. C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin. Brazil using distributed modeling. **Catena**, Amsterdam, v.79, n.1, p.49–59, 2009.

BEZERRA, A.S.; CANTALICE, J. R. B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 565-573, 2006.

BRAIDA, J. A.; CASSOL, E. A. Relações da erosão em entressulcos com o tipo e com a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 699-709, 1999.

BREWER, R. **Fabric and mineral analysis of soil**. New York: R.E. Krieger, p.482, 1976.

BROWN, D. J.; BRICKLEMYER, R. S.; MILLER, P. R. Validation requirements for diffuse reflectance soil characterization models with a case study of VNIR soil C prediction in Montana. **Geoderma**, Amsterdam, v. 129, n. 3-4, p. 251-267, 2005.

BRUNS, R. E.; FAIGLE, J. F. G. Quimiometria. **Química Nova**, v. 8, p. 84-99, 1985.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas do relevo: II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2279-2288, 2008.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T. Influência das superfícies geomórficas na distribuição espacial dos atributos do solo em área sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 2, p.133-141, 2010.

CAÑASVERAS, J. C.; BARRÓN, V.; DEL CAMPILLO, M. C.; TORRENT, J.; GÓMEZ, J. A. Estimation of aggregate stability indices in Mediterranean soils by diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 158, n. 1-2, p. 78–84, 2010.

CAÑASVERAS, J. C.; BARRÓN, V.; DEL CAMPILLO, M. C.; VISCARRA ROSSEL, R. A. Reflectance spectroscopy: a tool for predicting soil properties related to the incidence of Fe chlorosis. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 4, p. 1133-1142, 2012.

CANTALICE, J. R. B.; CASSOL, E. A.; REICHERT, J. M.; BORGES, A. L. O. Hidráulica do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo franco-argilo-arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 597-607, 2005.

CARNEIRO, A. A. O.; TOUSO, A. T.; BAFFA, O. Avaliação da suscetibilidade magnética usando uma balança analítica. **Química Nova**, v. 26, p. 952-956, 2003.

CASSOL, E. A.; CANTALICE, J. R. B.; REICHERT, J. M.; MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.7, p.685-690, 2004.

CASTRO FILHO, C.; LOGAN, T. J. Liming effects on the stability and erodibility of some Brazilian Oxisols. **Soil Science Society of American Journal**, v. 55, n. 5, p. 1407-1413, 1991.

CHAKRABORTY, S.; WEINDORF, D. C.; ZHU, Y. D.; LI, B.; MORGAN, C. L. S.; GE, Y. F.; GALBRAITH, J. Spectral reflectance variability from soil physicochemical properties in oil contaminated soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 117, p. 80-89, 2012.

CHEPIL, W. S. Properties of Soil Which Influence Wind Erosion: II. Dry Aggregate Structure as an Index of Erodibility. **Soil Science**, v. 69, p. 403-414, 1950.

CORTEZ, L. A.; MARQUES JR., J.; PELUCO, R. G.; TEIXEIRA, D. B. T.; SIQUEIRA, D. S. Suscetibilidade magnética para identificação de áreas de manejo específico em citricultura. **Energia na Agricultura**, v. 26, n. 3, p. 60-79, 2011.

DEARING, J.A., LEES, J.A.; WHITE, C. Mineral magnetic properties of acid gleyed soils under oak and Corsican pine. **Geoderma**, Amsterdam, v. 68, p. 309–319. 1995.

DEARING, J.A.; LIVINGSTONE, I.P.; BATEMAN, M.D.; WHITE, K. Palaeoclimate records from OIS 8.0–5.4 recorded in loess-palaeosol sequences on the Matmata Plateau, southern Tunisia, based on mineral magnetism and new luminescence dating. **Quaternary International**, v. 76–77, p. 43–56, 2001.

DENARDIN, J. E. **Erodibilidade do solo estimado por meio de parâmetros físicos e químicos**. 1990. 114 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

EDUARDO, E. N. **Determinação da erodibilidade e do fator cobertura e manejo do solo sob condições de chuva natural e simulada**. 2012. 56f. Tese (Mestrado) - Seropédica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do Solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003, 50 p.(Embrapa Solos. Documentos; n. 45).

FIOLHAIS, C.; TRINDADE, J. Física no computador: o computador como uma ferramenta no ensino e na aprendizagem das ciências físicas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 3, p. 259-272, 2003.

FLANAGAN, D.C. & NEARING, M.A., eds. **Water Erosion Prediction Project - WEPP**. West Lafayette, USDA, 1995. p. 1-47. (Report, 10).

FOSTER, D. C.; FLANAGAN, M. A.; NEARING, L. J.; LANE, L. M.; RISSE, S. C. **Finkner Hillslope erosion component**. Chapter 11 In: FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. (Eds.), USDA-Water Erosion Prediction Project, Technical Documentation, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana, 1995.

GHOLIZADE, A.; SOOM, M. A. M.; SABERIOON, M. M.; BORUVKA, L. Visible and near infrared reflectance spectroscopy to determine chemical properties of paddy soils. **Journal of Food Agriculture and Environment**, v. 11, n. 2, p. 859-866, 2013.

GOMES, J. B. V.; CURI, N.; SCHULZE, D. G.; MARQUES, J. J. G. S. M.; KER, J. C.; MOTTA, P. E. F. Mineralogia, morfologia e análise microscópica de solos do bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 679-694, 2004.

GOMEZ, C.; LE BISSONNAIS, Y.; ANNABI, M.; BAHRI, H.; RACLOT, D. Laboratory Vis-NIR spectroscopy as an alternative method for estimating the soil aggregate stability indexes of Mediterranean soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 209, p. 86-97, 2013.

GONTIJO, I.; NICOLE, L.R.; PARTELLI, F.L.; BONOMO, R.; SANTOS, E.O.J. Variabilidade e correlação espacial de micronutrientes e matéria orgânica do solo com a produtividade da pimenta-do-reino. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1093-1102, 2012.

GÚZMAN, G.; QUINTON, J. N.; NEARING, M. A.; MABIT, L.; GÓMEZ, J. A. Sediment tracers in water erosion studies: current approaches and challenges. **Journal of Soil and Sediments**, v. 13, n. 4, p. 816-833, 2013.

HANESCH, M., SCHOLGER, R.; DEKKERS, M.J. The application of fuzzy c -means cluster analysis and non-linear mapping to a soil data set for the detection of polluted sites. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 26, p. 885–891. 2001.

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **The elements of statistical learning: data mining, inference and prediction**. Springer Series in Statistics. Springer-Verlag, New York, 2001.

JANIK, L. J.; MERRY, R. H.; SKJEMSTAD, J. O. Can mid infra-red diffuse reflectance analysis replace soil extractions? **Australian Journal Experimental Agriculture**, v.38, n.7, p.681-696, 1998.

JONG, E.; PENNOCK, D.J.; NESTOR, P.A. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada. **Catena**, Amsterdam, v. 40, p. 291–305, 2000.

KEMPEN, B.; BRUS, D.J.; STOORVOGEL, J.J. Three-dimensional mapping of soil organic matter content using soil type-specific depth functions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 162, p. 107-123, 2011.

KEMPEN, B.; HEUVELINK, G.B.M.; BRUS, D.J.; STOORVOGEL, J.J. Pedometric mapping of soil organic matter using a soil map with quantified uncertainty. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 61, p. 333-347, 2010.

LEITE, J. A.; CAVALCANTE, L. F.; MEDINA, B. F.; MONTENEGRO, J. O. Fator de erodibilidade de quatro solos do município Sao Mamede - PB, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 2, p. 319-321, 1982.

LIU, Q. S.; TORRENT, J.; BARRÓN, V.; DUAN, Z. Q.; BLOEMENDAL, J. Quantification of hematite from the visible diffuse reflectance spectrum: effects of aluminium substitution and grain morphology. **Clay Minerals**, v. 46, n. 1, p. 137-147, 2011.

MAHER, B. A.; THOMPSON, R. **The magnetic record of palaeoclimate in the terrestrial loess and palaeosol sequences**, in Quaternary climates. In: MAHER, B.A.; THOMPSON, R. (ed.) *Environments and magnetism*. Cambridge: 1999 p. 81–125.

MALLEY, D.F.; MARTIN, P.D.; BEN-DOR, E. **Application in Analysis of Soils**. In: Roberts, C.A., Workman, J., Reeves, J.B.I.I.I. (Eds.), *Near-Infrared Spectroscopy in Agriculture*. Soil Science Society of America, WI:729–784, 2004.

MARQUES, J. J. G. S. M.; ALVARENGA, R. C.; CURI, N.; SANTANA, D. P.; SILVA, M. L. N. Índices de erosividade da chuva, perdas de solo e fator erodibilidade para dois solos da região dos cerrados - primeira aproximação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 427-434, 1997.

MARTENS, H.; NAES, T. **Multivariate Calibration**; John Wiley & Sons; New York, 1989; p 97-108.

MARTÍNEZ-CARRERAS, N.; KREIN, A.; UDELHOVEN, T.; GALLART, F.; IFFLY, J. F.; HOFFMANN, L.; PFISTER, L.; WALLING, D. E. A rapid spectral-reflectance-based fingerprinting approach for documenting suspended sediment sources during storm runoff events. **Journal of Soil and Sediments**, v. 10, n. 3, p. 400-413, 2010.

McBRATNEY, A. G.; MENDONÇA SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v. 117, n. 1-2, p. 3–52, 2003.

McWHIRT, A. L.; WEINDORF, D. C.; CHAKRABORTY, S.; LI, B. Visible near infrared diffuse reflectance spectroscopy (VisNIR DRS) for rapid measurement of organic matter in compost. **Waste Management and Research**, v. 30, n. 10, p.1049-1058, 2012.

MORGAN, C. L. S.; WAISER, T. H.; BROWN, D. J.; HALLMARK, C. T. Simulated in situ characterization of soil organic and inorganic carbon with visible near-infrared diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 151, n. 3-4, p. 249-256, 2009.

NANNI, M. R.; DEMATTE, J. A. W. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. **Soil Science Society American Journal**, v. 70, n. 2, p. 393-407. 2006.

PRASANNAKUMAR, V.; VIJITH, H.; ABINOD, S.; GEETHA, N. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. **Geoscience Frontiers**, v. 3, n. 2, p. 209–215, 2011.

PREETZ, H.; ALTFELDER, S.; IGEL, J. Tropical Soils and Landmine Detection – An Approach for a Classification System. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, p. 151-159, 2008.

RAHMAN, R. M.; SHI, Z. H.; CHONGFA, C. Soil erosion hazard evaluation: an integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 220, p.1724–1734, 2009.

REICHERT, J. M.; SCHÄFER, M. J.; ELTZ, F. L. F.; NORTON, L. D. Erosão em sulco e entressulcos em razão do formato de parcela em Argissolo Vermelho-Amarelo arênico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 7, p. 965-973, 2001.

RESENDE, M.; SANTANA, D. P.; REZENDE, S. B. **Magnetic properties of Brazilian Oxisoils**. In: INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP,8., 1998, Rio de Janeiro, RJ. Proceedings... Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1988b. p.78-108.

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, 1988a, p 233–258.

SANTOS, H. L.; MARQUES JR, J.; MATIAS, S. S. R.; SIQUEIRA, D. S.; MARTINS FILHO, M. V. Erosion factors and magnetic susceptibility in differet compartments of a slope in Gilbués-PI, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 1, p. 64-74, 2013.

SANTOS, H. L.; MARQUES JR., J.; MATIAS, S. S. R.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem em uma vertente. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 4, p. 710-716, 2011.

SENA, M. M.; POPPI, R. J.; FRIGHETTO, R. T. S.; VALARINI, P. J. Avaliação do uso de métodos quimiométricos em análise de solos. **Química Nova**, v. 23, n. 4, p. 547-556, 2000.

SILVA, G. R. V.; SOUZA, Z. M.; MARTINS FILHO, M. V.; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. Soil, water and nutrient losses by interrill erosion from green cane cultivation. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 963-970, 2012.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M.; FERREIRA, D. F. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 12, p. 2287-2298, 1999.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; LIMA, J.M.; FERREIRA, M. M. Avaliação de métodos indiretos de determinação da erodibilidade de Latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 6, p. 1207-1220, 2000.

SILVEIRA, C.T.; OKA-FIORI, C.; SANTOS, L.J.C.; SIRTOLI, A.E.; SILVA, C.R. pedometria apoiada em atributos topográficos com operações de tabulação cruzada por álgebra de mapas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, p. 125-237, 2012.

SILVERSTEIN, R. M.; FRANCIS, X. R.; KIEMLE, D. J. W. **Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos**. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

SIQUEIRA, D. S. **Mapeamento de atributos e planejamento amostral para Latossolos utilizando suscetibilidade magnética, cor e relação solo-paisagem**. 2013. 109 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.

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 and Management**, v. 26, n. 4, p. 425-431, 2010.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de análise Instrumental**. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

SKOOG, D. A.; LEARY, J. J. **Principles of Instrumental Analysis**. Saunders College Publishing: USA, 2002.

TATZBER, M.; MUTSCH, F.; MENTLER, A.; LEITGEB, E.; ENGLISCH, M.; GERZABEK, M. H. Determination of Organic and Inorganic Carbon in Forest Soil Samples by Mid-Infrared Spectroscopy and Partial Least Squares **Regression**. **Applied Spectroscopy**, v. 64, n. 10, p. 1167-1175, 2010.

TEKIN, Y.; TUMSAVAS, Z.; MOUAZEN, A. M. Effect of Moisture Content on Prediction of Organic Carbon and pH Using Visible and Near-Infrared Spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 1, p. 188-198, 2012.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A.; QUOOS, J.H. Mapeamento digital: Probabilidade associada à distribuição espacial de classes de solos. **Geomética**, v. 4, p. 87-97, 2009.

TOMASI, C. A.; INDA, A. V.; DICK, D. P.; BISSANI, C. A.; FINK, J. R. Atributos químicos e área superficial específica em Latossolo subtropical de altitude sob usos e manejos distintos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 12, p. 2172-2179, 2012.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. **Diffuse Reflectance Spectroscopy**. In: Ulery, A.L., Drees, L.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 5. Mineralogical Methods*, SSSA Book Series, vol. no. 5. Soil Science Society of American, pp. 367–387, 2008.

VEIGA, M.; CABEDA, M. S. V.; REICHERT, J. M. Erodibilidade em entressulcos de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, p. 289-298, 1993.

VEROSUB, K.L. & ROBERTS, A.P. Environmental magnetism: past, present and future. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, p. 2.175–2.192, 1995.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; WALVOORT, D. J. J.; McBRATNEY, A. B.; JANIK, L. J.; SKJEMSTAD, J. O. Visible, near-infrared, mid-infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 131, n. 1-2, p. 59–75, 2006.

VOHLAND, M.; BESOLD, J.; HILL, J.; FRUND, H. C. Comparing different multivariate calibration methods for the determination of soil organic carbon pools with visible to near infrared spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 166, n. 1, p. 198-205, 2011.

WAISER, T. H.; MORGAN, C. L. S.; BROWN, D. J.; HALLMARK, C. T. In situ characterization of soil clay content with visible near-infrared diffuse reflectance spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 2, p. 389-396, 2007.

WEB OF SCIENCE – ISI, Web of Knowledge, 2013. Disponível em: http://apps.webofknowledge.com/WOS_CitedReferenceSearch_input.do?product=WOS&SID=4AiB%40kmFpG2PIhgheoL. Acesso em 20 de outubro de 2013.

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 26, p. 189-193, 1971.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation planning**. Washington: Department of Agriculture, 1978. 58 p. (Agriculture Handbook 537).

WOLD, S. Chemometrics; what do we mean with it, and what do we want from it? **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 30, n. 1, p. 109-115, 1995.

XIAN-LI, X.; XIAN-ZHANG, P.; BO, S. Visible and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy for prediction of soil properties near copper smelter. **Pedosphere**, v. 22, p. 351-366, 2012.

ZHAI, Y. F.; CUI, L. J.; ZHOU, X.; GAO, Y.; FEI, T.; GAO, W. X. Estimation of nitrogen, phosphorus, and potassium contents in the leaves of different plants using laboratory-based visible and near-infrared reflectance spectroscopy: comparison of partial least-square regression and support vector machine regression methods. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 7, p. 2502-2518, 2013.

CAPÍTULO 2 – Suscetibilidade magnética e pedometria no mapeamento da erodibilidade de Latossolos da região nordeste do Estado de São Paulo, Brasil

RESUMO – Objetivou-se com este trabalho, investigar a eficiência da utilização da suscetibilidade magnética em funções de pedotransferência que sejam capazes de estimar os fatores K e K_i em Latossolos no nordeste do estado de São Paulo. Este estudo foi realizado em área de 380 ha sob cultivo de cana-de-açúcar, no Município de Guataporã, estado de São Paulo, suldeste do Brasil. Foram coletadas 86 amostras no “espigão” da vertente (Transeção) e 150 amostras na lateral. Realizaram-se as análises das frações granulométricas, argila dispersa em água (ADA), teor de matéria orgânica (MO), concentração dos óxidos de ferro, razão entre goethita (Gt) e hematitas (Hm) e entre caolinita (Ct) e gibbsita (Gb), suscetibilidade magnética e calcularam-se os parâmetros de erodibilidade K e K_i . As funções de pedotransferência (FPT), para estimar os fatores K e K_i em função da SM, foram modeladas por meio de análise de regressão linear simples e a validação dos modelos ocorreu por meio da validação cruzada. Os valores estimados de K_{est} e $K_{i,est}$ e SM foram submetidos à análise de semivariância e Krigagem. O local de estudo apresenta valores de K variando de 0,010 a 0,036 t h MJ⁻¹ mm⁻¹, o valor médio de K foi de 0,021 t h MJ⁻¹ mm⁻¹ e de SM variou de 510 a 7458 10⁻⁸ m³ kg⁻¹. A SM apresentou correlação significativa com os fatores K e K_i , provavelmente por ela estar associada aos atributos do solo que regem a resistência do solo em ser erodido. As FPT geradas possuem confiabilidade em estimar K e K_i por SM (valores de RMSE e CMR próximos a 0). Observando os mapas de Krigagem, percebe-se que a mudança dos valores da SM ocorre de forma decrescente no sentido do ponto mais alto ao ponto mais baixo e, os valores de K_{est} e $K_{i,est}$ crescem no mesmo sentido. Conclui-se que a suscetibilidade magnética pode ser usada como componente da função de pedotransferência na quantificação da erodibilidade de latossolos da região nordeste do estado de São Paulo, Brasil.

Palavras-chaves: erodibilidade do solo, mineralogia do solo, funções de pedotransferência, áreas de manejo específico.

2.1 Introdução

O solo é um recurso natural não renovável na escala de tempo humana (Lal e Stewart 1992). De acordo com Lal (1994) um dos eventos que põem em risco a manutenção deste recurso natural é a erosão acelerada do solo. Ela é a grande responsável pela degradação de terras agricultáveis, que é, já desde muito tempo, um dos mais significativos problemas econômicos e ambientais (Silva et al. 2008).

A erosão tem sido assunto de grande preocupação no Brasil (Amorim et al. 2010) e é alvo de pesquisas que visam a adequação e ou melhorias de modelos capazes de estimar as taxas de erosão. Dentre os modelos existentes, destacam-se a Equação Universal de Perdas de

Solo (EUPS) (Universal Soil Loss Equation - USLE) (Wischmeier e Smith 1978) e WEPP-Water Erosion Prediction Project (Lane e Nearing 1989). Nestes dois modelos, descata-se o fator erodibilidade do solo, por ser um parâmetro a ter caráter intrínseco ao solo. Essa erodibilidade do solo representa o efeito integrado dos processos que regulam a infiltração de água e a resistência do solo à desagregação e transporte de partículas (Lal 1988), portanto, refere-se à sua predisposição à erosão. Na USLE, a erodibilidade é representada pelo fator K e no modelo WEPP a erodibilidade é representada pelos fatores K_i e K_r , que significam erodibilidade em entressulcos e em sulcos, respectivamente.

Para o melhor entendimento dos processos de causa e efeito relacionados à erodibilidade do solo, é necessário o estudo do solo no seu nível mais detalhado, que é representado pelo ramo da mineralogia do solo. A mineralogia do solo tem relação direta, por exemplo, com a argila dispersa em água, que segundo Calero et al. (2008) é um atributo chave para entender o processo de selamento superficial e formação de crosta no solo. Camargo et al. (2008) afirmam que a fração argila interfere diretamente no comportamento dos atributos físicos dos solos, inclusive na estabilidade de agregados do solo, que também possui relação estreita com a erodibilidade.

Contudo, tanto os métodos tradicionais de observação dos fatores de erodibilidade do solo como dos atributos mineralógicos encontram algumas limitações. Estas limitações estão relacionadas ao alto custo, tempo necessário para adquirir e processar as informações (Wischmeier e Smith 1978; McBratney et al. 2003), e no caso das análises mineralógicas, possuem um agravante, a produção de resíduos (Torrent e Barrón 2008).

Neste contexto, a pedometria surge como uma ferramenta que torna possível superar estas limitações por meio das funções de pedotransferência (FPT) que, segundo Embrapa (2003) são funções preditivas de certas propriedades dos solos a partir de outras facilmente medidas e rotineiramente obtidas a custos mais baixos. Nestes casos, pesquisadores têm apontado o uso da suscetibilidade magnética (SM) como alternativa, já que é um atributo mineralógico de fácil aquisição, de baixo custo e que não gera resíduos (Torrent et al. 2007; Siqueira et al. 2010) que é importante para a quantificação indireta de atributos do solo, a exemplo do teor de argila (Peluco et al. 2013), teor de matéria orgânica (MO) (Wang et al. 2013), estabilidade de agregados (Alekseeva et al. 2009) e erodibilidade do solo (Rhoton e Duiker 2008).

Objetiva-se com este trabalho, investigar a eficiência da utilização da suscetibilidade magnética em funções de pedotransferência que sejam capazes de estimar os fatores K e Ki em latossolos no nordeste do estado de São Paulo.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Área de estudo

Este estudo foi realizado em área de 380 ha sob cultivo de cana-de-açúcar no sistema de colheita mecanizada. A área está localizada no município de Guatapar, estado de São Paulo, suldeste do Brasil (Figura 4). Os solos do local foram classificados (Embrapa 2006) como: Latossolo Vermelho distrófico, textura média (LVd); Latossolo Vermelho distroférico, textura argilosa (LVdf); Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa (LVef); e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média (LVAd), estes originados de Basalto, Depósito Colúvio-Aluvionar e Depósito Aluvionar (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais 2012) (Figura 4e).

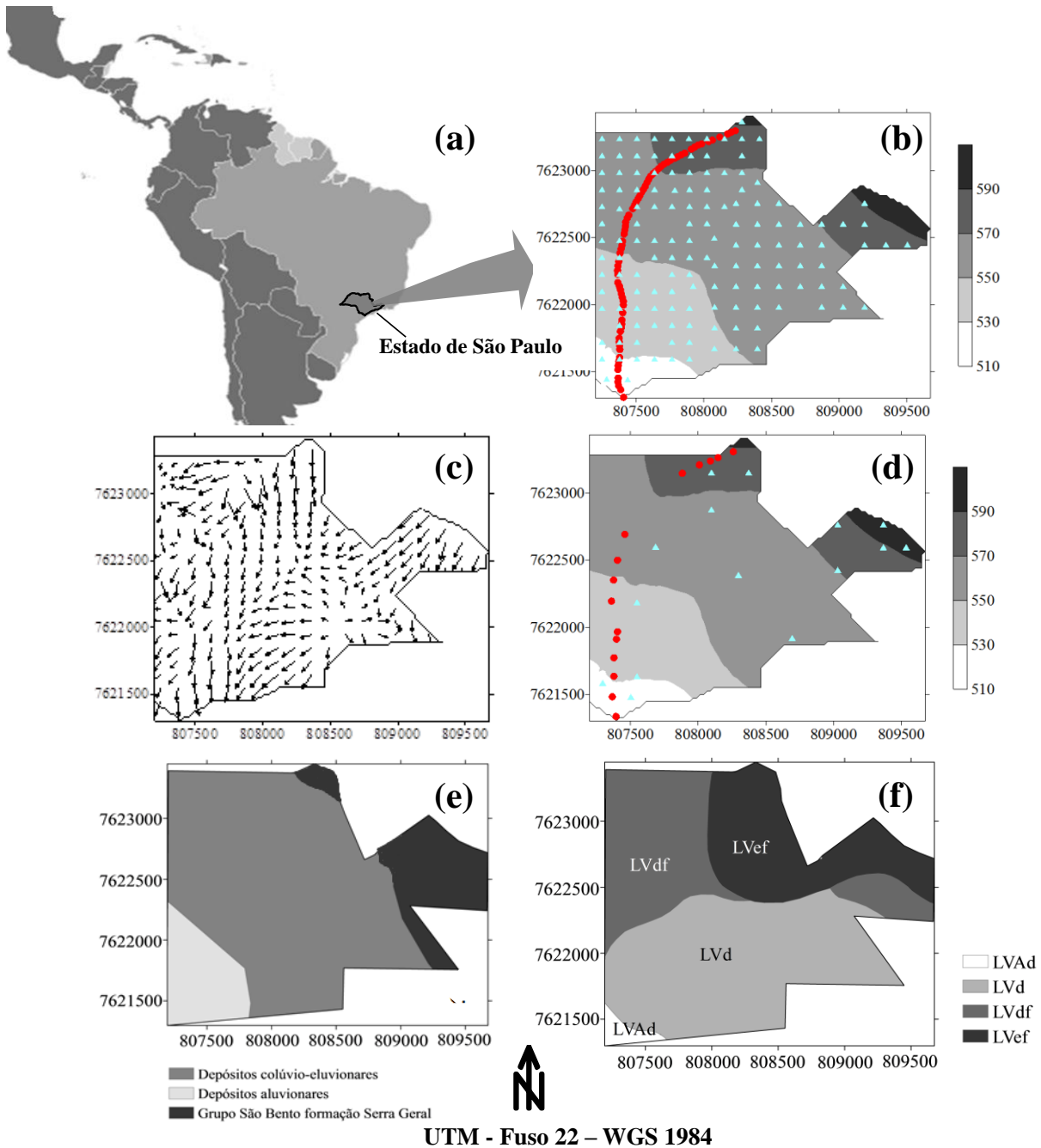


Figura 4. Localização da área (a); mapa da área indicando a localização dos pontos amostrados na lateral (triângulos azuis) e na transeção (círculos vermelhos) (b); mapa de diferenças de cotas com setas indicando o sentido da declividade (c); mapa indicando a localização dos pontos selecionados para a geração das FPT (triângulos azuis) e para a validação externa (círculos vermelhos) (d); mapa geológico na escala 1:500.000 (e); mapa de solos na escala 1:12.000 (LVd - Latossolo Vermelho distrófico, textura média; LVdf - Latossolo Vermelho distroférico, textura argilosa; LVef - Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa; e LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média) (f).

Segundo a classificação de Thornthwaite (1948), o clima local pode ser definido como B1rB'4a', Tipo Mesotérmico Úmido, com pequena deficiência hídrica, sendo a evapotranspiração de verão menor que 70% da evapotranspiração anual.

2.2.2 Amostragem e análises laboratoriais

A transeção foi feita no espigão da área. O espigão foi identificado com o auxílio do modelo digital de elevação (MDE) (Figura 4a) e do mapa de diferenças de cotas com setas indicando o sentido da declividade (Figura 4c). A transeção, de 2.508 metros, foi feita a partir do topo da vertente, seguindo o “espigão” da vertente até o sopé, no sentido do decaimento mais suave do declive, onde foram coletadas 86 amostras em intervalos regulares de 30 m (Figura 4b). O sistema de coleta de solos no “espigão” da vertente é a bastante utilizada por pesquisadores como ferramenta para compreender os limites de compartimentos naturais (geológico, paisagem, dentre outros). Com as informações dos atributos do solo coletados no “espigão” da vertente é possível compreender melhor o comportamento da variabilidade dos atributos do solo em toda a área (Montanari et al. 2010; Camargo et al. 2010; Camargo et al. 2013).

Na lateral da transeção foram coletadas 150 amostras em intervalos de 159 metros (densidade de um ponto a cada 2,5 ha) (Figura 4b). Nestes locais, foram coletadas amostras de solo com trado, na profundidade de 0,00-0,25. Diversos autores utilizaram amostras de solo nessa mesma profundidade com o objetivo de correlacionar as propriedades do solo com a suscetibilidade magnética (Siqueira et al. 2010; Barrios et al. 2012; Lu et al. 2012). Berquó et al. (2004) e Camargo (2013) confirmam a baixa variabilidade vertical da suscetibilidade magnética e atributos físicos, químicos e mineralógicos em Latossolosprovenientes do Basalto.

Nas amostras coletadas, foram analisadas as frações granulométricas em água e NaOH 0,1 mol L⁻¹ de acordo com o procedimento descrito pela Embrapa (1997). O teor de MO foi analisado segundo a metodologia descrita por Rajj et al. (1987). O ferro total (Fe₂O₃) foi determinado após digestão com H₂SO₄ 1:1, para Al₂O₃ e Fe₂O₃, seguido de dissolução alcalina para SiO₂, segundo o método descrito pela Embrapa (1997). Os óxidos de ferro livres (Fe_{DCB}) foram extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato (Mehra e Jackson 1960) e o ferro mal cristalizado (Fe_O) foi extraído com oxalato ácido de amônio, de acordo com a metodologia descrita por Camargo et al. (1986) adaptado de Schwertmann (1973).

As análises de difração de raios x (DRX), foram feitas para as amostras coletadas na transeção, utilizando o equipamento Mini-Flex II- Rigaku. Foi utilizado anticátodo de cobre com filtro de níquel e radiação $\text{Cu K}\alpha$ (20mA, 30Kv). A razão Goethita/(Goethita+Hematita) ($Gt/(Gt+Hm)$) foi obtida após o cálculo de acordo com Kämpf e Schwertmann (1998) e a razão Caulinita/(Caulinita+Gibbsita) ($Ct/(Ct+Gb)$) foi determinada empregando-se as áreas dos reflexos da Ct (001) e da Gb (002) dos difratogramas.

A SM foi determinada na TFSA (terra fina seca ao ar) das amostras coletadas na transeção e laterais, no equipamento Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B. A avaliação foi feita em baixa frequência (0,47 kHz) (Dearing 1994; Costa et al. 1999). Segundo estes autores, as medições de dupla frequência (alta – 4,7 kHz e baixa) devem ser utilizadas em estudo de caráter qualitativo para indicar a presença de minerais magnéticos de domínio simples e múltiplos. No caso de única leitura, para obtenção de resultados mais precisos, é indicado o uso da baixa frequência (Bartington 2013). O potencial de uso em solos tropicais e a confiabilidade dos resultados deste método, no estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo, já foram comprovadas por estudos anteriores (Siqueira et al. 2010; Matias et al. 2013; Santos et al. 2013; Peluco et al. 2013).

2.2.3 Cálculo dos fatores de erodibilidade K e Ki

Para o cálculo da erodibilidade do solo do modelo USLE (fator K) foi utilizada a equação proposta por Denardin (1990) para os solos do Brasil e EUA:

$$K = 0,00000748 \times M + 0,00448059 \times P - 0,0631175 \times DMP + 0,01039567 \times REL \quad (1)$$

em que,

$M = (\% \text{ silte} + \% \text{ areia muito fina}) \times (100 - \% \text{ argila});$

$P = \text{código de permeabilidade codificada segundo Wischmeier et al. (1971), adimensional};$

$DMP = \text{diâmetro médio ponderado das partículas do solo inferiores a 2,00 mm};$

$$REL = \%MO \div \% \geq 0,1\text{mm}, \text{ adimensional}; \quad (2)$$

Para o cálculo da erodibilidade entre sulcos do modelo Wepp (fator K_i) foram utilizadas as equações propostas por Flanagan e Livingston (1995):

$$K_i = 2728000 + 192100AMF, \text{ para teor de areia } \geq 30\% \quad (3)$$

$$K_i = 6054000 - 55130ARG, \text{ para teor de areia } < 30\% \quad (4)$$

em que,

AMF = percentual de areia muito fina, %;

ARG = percentual de argila, %.

2.2.4 Análises estatísticas

Foram calculados os valores de média, desvio padrão, mínimo e máximo das variáveis determinadas em laboratório (atributos do solo) e dos fatores K e K_i . Foi feita análises de correlação de Pearson dos fatores K e K_i entre as variáveis, $Ct/(Ct+Gb)$, $Gt/(Gt+Hm)$, Fe_2O_3 , Fe_{DBC} e Fe_O , e também da SM entre todas as variáveis observadas neste estudo.

As FPT, para estimar os fatores K e K_i em função da SM, foram modeladas por meio de análise de regressão linear simples, utilizando 15 pontos da transeção (Figura 3), e que fossem representativos dos tipos de solos e material de origem da área.

Os valores de K_{est} e $K_{i,est}$ foram estimados por SM com as FPT para um conjunto de 15 pontos da lateral, diferentes do modelo original. Os valores de K_{est} e $K_{i,est}$ foram comparados com os valores de K e K_i calculados (Figura 3). Esse procedimento é conhecido como validação externa e evita o erro devido à retroalimentação de modelos.

Para observar a precisão da calibração das FPT e para avaliar a validação externa foram utilizados como parâmetros o erro padrão da estimativa normalizado (RMSE) e o coeficiente de massa residual (CMR), de acordo com Loague e Green (1991). Considerou-se que quando valores preditos e observados são iguais, os RMSE e CMR assumem valores iguais 0 (Martins Filho 1999; Cerquetani e Martins Filho 2006; Santos et al. 2013; Aragão et al. 2013).

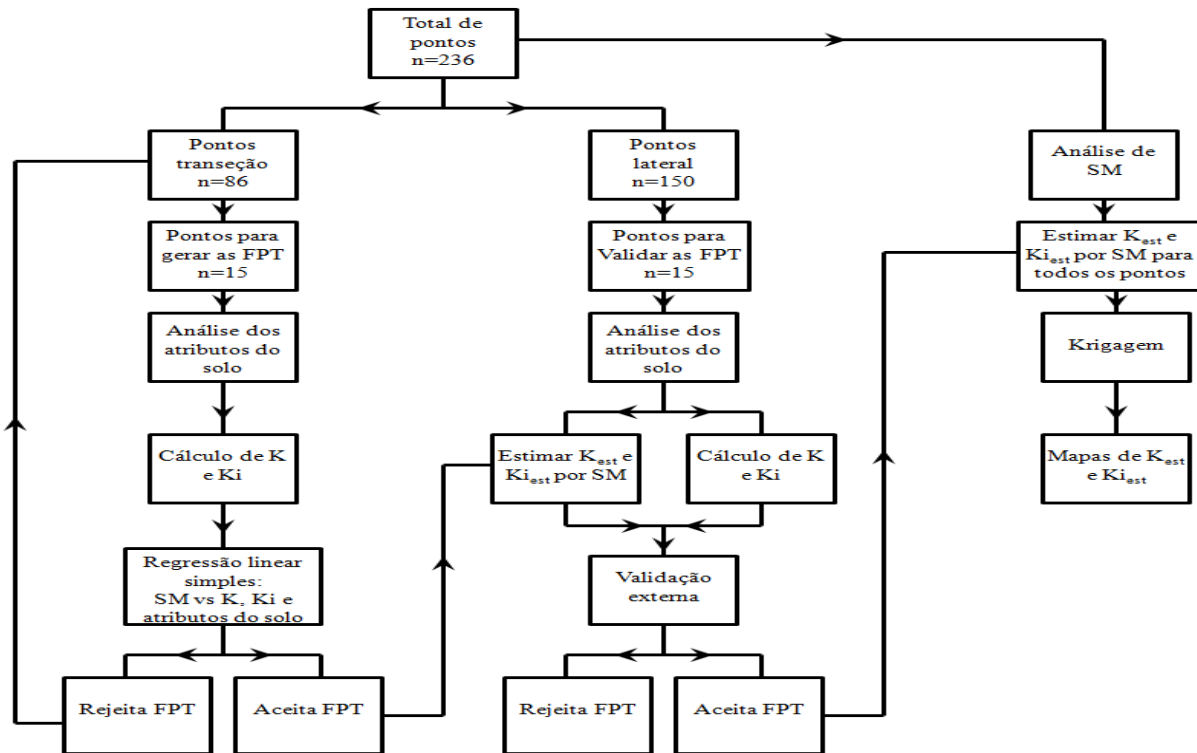


Figura 5. Esquema de análise dos dados, modelagem das funções de pedotransferência (FPT) e geoestatística.

Com base nos resultados da validação externa, as FPT foram utilizadas para estimar, por SM, os valores de K_{est} e Ki_{est} para toda a área restante, utilizando todos os pontos coletados na transeção e na lateral. Os resultados de K_{est} , Ki_{est} e SM foram utilizados na análise geoestatística (ajuste dos semivariogramas e krigagem) (Figura 3).

Os cálculos da estatística descritiva, correlação de Pearson e regressão linear simples foram realizados utilizando o software Minitab[®] 14 (Minitab Inc. 2003). Os cálculos da krigagem foram realizados utilizando o software GS+[®] versão 7.0 (Robertson 2004). A plotagem dos mapas foi realizada utilizando o programa Surfer[®] versão 8.0 (2002).

2.3 Resultados e Discussão

O local de estudo apresenta valores de K variando de 0,010 a 0,036 $t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$ (Tabela 1). Tomazoni e Guimarães (2005) afirmam que os valores de K para latossolos brasileiros variam de 0,002 a 0,034 $t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$, o que comprova que os valores obtidos pelo modelo proposto por Denardin (1990) e adotado nesta pesquisa estão coerentes. O valor médio de K foi de 0,021 $t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$ (Tabela 1), semelhante ao encontrado por Lima et al. (1990) em

Latossolo Vermelho Escuro (0,022 t h MJ⁻¹ mm⁻¹). O valor médio de Ki foi 3,340 x 10⁶ kg s m⁻⁴ (Tabela 1), corroborando com Bezerra e Cantalice (2006).

Tabela 1. Valores da estatística descritiva das variáveis estudadas nos 30 pontos selecionados.

Variáveis	Estatística			
	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
K (t h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	21 x 10 ⁻³	5 x 10 ⁻³	10 x 10 ⁻³	36 x 10 ⁻³
Ki (kg s m ⁻⁴)	3,340 x 10 ⁶	4,717 x 10 ⁵	2,669 x 10 ⁶	4,216 x 10 ⁶
SM(10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)	3412	1903	510	7458
Argila (g kg ⁻¹)	459	118	160	614
Silte (g kg ⁻¹)	201	104	30	428
Areia (g kg ⁻¹)	340	160	121	629
ADA (g kg ⁻¹)	133	36	42	202
MO (g kg ⁻¹)	31,7	6,3	20	45
Ct/(Ct+Gb)	0,7	0,04	0,6	0,8
Gt/(Gt+Hm)	0,3	0,07	0,08	0,41
Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	8,1	6,18	2,28	20,93
Fe _{DBC} (g kg ⁻¹)	102,7	38,3	24,9	158,2
Fe _O (g kg ⁻¹)	8,2	5,04	1,7	21,9

SM, suscetibilidade magnética; ADA, argila dispersa em água; MO, matéria orgânica; Ct, caulinita; Gb, gibsitita; Gt, goethita; Hm, hematita; Fe_{DBC}, ferro extraído por ditionito bicarbonato de cálcio; Fe_O, ferro extraído por oxalato; K, erodibilidade do solo; Ki, erodibilidade em entressulcos.

A caracterização da SM é um importante para a compreensão da relação do solo com seu material de origem, principalmente em regiões de transição litoestratigráfica (Barrios et al. 2012). Neste trabalho, a SM variou de 510 a 7458 10⁻⁸ m³ kg⁻¹. Os altos valores de SM são típicos de solos formados em regiões tropicais e subtropicais (Torrent et al. 2006), o que faz da SM um importante indicador pedoambiental (Torrent et al. 2010).

O teor de argila variou de 160 a 614 g kg⁻¹, o teor de silte varou de 30 a 428 g kg⁻¹ e o teor de areia variou de 121 a 629 g kg⁻¹ (Tabela 1). O teor de ADA variou de 42 a 202 g kg⁻¹. Estes resultados são reflexos da influência dos diferentes materiais de oriem da área, uma vez que a área estudada está inserida em um divisor litoestratigráfico arenito-basalto (Peluco et al. 2013). Os resultados indicam também que a área possui um grande aporte de MO, com média em torno de 30 g kg⁻¹ (Tabela 1), corroborando com resultados encontrados por Souza et al. (2003) para Latossolos no nordeste paulista. Estes valores podem estar relacionados ao incremento de MO fornecido pelo sistema de colheita de cana crua (Souza et al. 2006).

Os valores médios das relações Ct/(Ct+Gb) e Gt/(Gt+Hm) são 0,7 e 0,3 respectivamente (Tabela 1). Montanari et al. (2010) encontraram resultados semelhantes estudando a

mineralogia de Latossolos na região nordeste do estado de São Paulo. Estes valores indicam a alta presença de ferro nos materiais de origem da área estudada (Schwertmann e Kämpf 1985). Essa é uma característica típica dos Latossolos brasileiros, onde os altos níveis de intemperização resultam no acúmulo de óxidos de ferro e alumínio (Uehara 1988; Alleoni e Camargo 1995).

O Fe_2O_3 variou de 2,28 a 20,93 g kg^{-1} e foram valores inferiores aos observados por Matias et al. (2013) em latossolos no estado de São Paulo. As variáveis Fe_{DCB} e Fe_O apresentaram valores médios de 102,7 e 8,2 g kg^{-1} (Tabela 1), semelhante pesquisa realizada por Nunes e Cassol (2008) em latossolos do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Comparando os valores de Fe_{DCB} e Fe_O , podemos afirmar que os valores de Fe_O são muito inferiores aos de Fe_{DCB} , o que evidencia o predomínio de formas mais cristalinas de óxidos de ferro, que é uma característica de solos em níveis avançados de intemperismo (Kämpf et al. 2000).

Os valores de correlação de Pearson dos parâmetros de K e K_i entre $\text{Ct}/(\text{Ct}+\text{Gb})$, $\text{Gt}/(\text{Gt}+\text{Hm})$, Fe_2O_3 , Fe_{DCB} e Fe_O estão descritas na Tabela 2. As demais variáveis estudadas não entraram na correlação para se evitar a retroalimentação do sistema, uma vez que as mesmas entram nos modelos para calcular K e K_i . Os fatores K e K_i não apresentaram correlação significativa com as relações $\text{Ct}/(\text{Ct}+\text{Gb})$ e $\text{Gt}/(\text{Gt}+\text{Hm})$ (Tabela 2). Kämpf e Curi (2000) afirmam que os óxidos de Fe são importantes componentes em solos tropicais e que eles caracterizam-se como indicadores pedoambientais sensíveis. Neste trabalho o Fe_2O_3 apresentou correlação negativa significativa com o fator K_i , enquanto que os teores de Fe_{DCB} e Fe_O apresentaram correlação negativa significativa com os fatores K e K_i , indicando que solos altamente intemperizados tentem a apresentar menor suscetibilidade à erosão. Vários trabalhos clássicos afirmam que os altos teores de óxidos de ferro no solo, em especial os de Fe_{DCB} , são os principais responsáveis pela estruturação granular e estabilização nas unidades estruturais, induzindo maior permeabilidade em latossolos (Roht et al. 1974; Romkens et al. 1977; Lima et al. 1990).

Tabela 2. Valores dos coeficientes de correlação de Pearson entre os parâmetros de erodibilidade e os atributos do solo.

	K(t h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	Ki(kg s m ⁻⁴)
Ct/(Ct+Gb)	-0,17	-0,16
Gt/(Gt+Hm)	0,26	0,14
Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	-0,43	-0,68*
Fe _{DBC} (g kg ⁻¹)	-0,67*	-0,42*
Fe _O (g kg ⁻¹)	-0,40*	-0,69*

Ct, caulinita; Gb, gibsitita; Gt, goethita; Hm, hematita; Fe_{DBC}, ferro extraído por ditonito bicarbonato de cálcio; Fe_O, ferro extraído por oxalato; K, erodibilidade do solo; Ki, erodibilidade em entressulcos.

*Significativo a 5% de probabilidade.

Na Tabela 3 observou-se que a SM apresentou correlação com todos os atributos do solo estudados, com exceção do silte, Ct/(Ct+Gb) e Gt/(Gt+Hm). Observa-se que a SM interfere no K e Ki de forma que quanto maior ela seja, menores serão os valores de K e Ki, e vice-versa. A SM apresentou correlação positiva com argila, ADA, MO, Fe_{DBC}, Fe_O e Fe₂O₃ e negativa com areia. Outras pesquisas também demonstraram a correlação entre SM e estes atributos (Torrent et al. 2006; Siqueira et al. 2010; Peluco et al. 2013).

O fatores K e Ki sofrem interferência direta dos atributos do solo que afetam, principalmente a sua agregação, a permeabilidade e a velocidade de infiltração da água (Bertoni e Lombardi Neto 2008). Todos os atributos têm correlação positiva com a SM são preconizados na literatura como variáveis importantes em propiciar condições ao que aumentam estas condições.

Campos et al. (2008) consideram que os atributos como ADA e MO influenciam positivamente na estrutura, hidratação e nas características da circulação da água, que confere menor erodibilidade do solo. Lima e Anderson (1997) ressaltam a importância da participação dos óxidos de Fe na agregação do solo. A areia, apesar de proporcionar maior velocidade de infiltração, não oferece condições de agregação do solo e a fração areia muito fina é decisiva no processo de selamento superficial do solo (Santos et al., 2008) e isso faz com que ocorra o aumento dos índices de erodibilidade do solo (Nunes e Cassol 2008).

Tabela 3. Valores dos coeficientes de correlação de Pearson entre a SM e os atributos do solo e de erodibilidade (K e Ki).

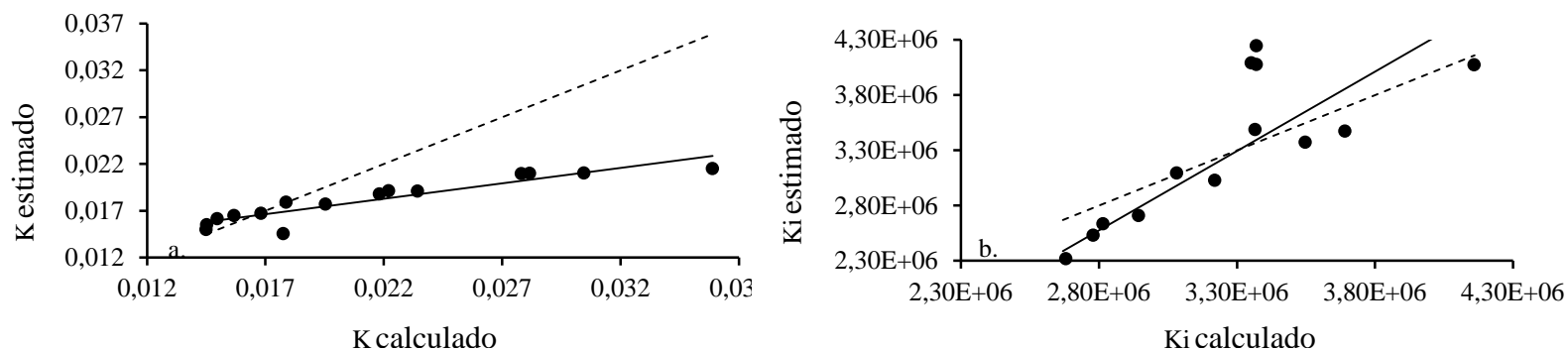
	K t h MJ ⁻¹ mm ⁻¹	Ki kg s m ⁻⁴	Argila -----g kg ⁻¹ -----	Silte	Areia	ADA	MO	Ct/(Ct+Gb)	Gt/(Gt+Hm)	Fe _{DBC}	Fe _O	Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)
SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)	-0,62*	-0,74*	0,88*	0,22	-0,79*	0,69*	0,41*	0,42	-0,19	0,91*	0,63*	0,60*

SM, suscetibilidade magnética; ADA, argila dispersa em água; MO, matéria orgânica; Ct, caulinita; Gb, gibsitita; Gt, goethita; Hm, hematita; Fe_{DBC}, ferro extraído por ditionito bicarbonato de cálcio; Fe_O, ferro extraído por oxalato; K, erodibilidade do solo; Ki, erodibilidade em entressulcos. *Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 4. Funções de pedotransferência, valores de precisão e acurácia calculados por meio da validação externa e teste de significância comparado pelo teste F para latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar no norte do estado de São Paulo.

Variável	Variável = A + B*SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)		Calibração		Validação externa	
	A	B	RMSE (%)	CMR	RMSE (%)	CMR
K _{est} (t h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	2,20 10 ⁻²	-10 ⁻⁶	2,11	0,00258	8,26	0,16
Ki _{est} (kg s m ⁻⁴)	4,407 10 ⁶	-320	1,07	-0,00024	0,16	0,02
Argila (g kg ⁻¹)	274	6,19 10 ⁻²	0,56	-0,00010	0,25	-0,11
Areia (g kg ⁻¹)	768	-1,3 10 ⁻¹	3,12	-0,00109	5,56	-0,16
ADA (g kg ⁻¹)	104	1,18 10 ⁻²	2,10	-0,00265	1,95	-0,08
MO (g kg ⁻¹)	27,4	1,91 10 ⁻³	1,27	-0,00032	0,51	-0,03
Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	-2,49	3,29 10 ⁻³	1,73	0,00026	1,59	-0,57
Fe _{DBC} (g kg ⁻¹)	30,5	2,33 10 ⁻²	1,67	-0,00020	1,72	-0,47
Fe _O (g kg ⁻¹)	3,23	1,24 10 ⁻³	5,92	-0,00035	1,95	0,01

SM, suscetibilidade magnética; K_{est}, erodibilidade do solo estimada; Ki_{est}, erodibilidade em entressulcos estimada; ADA, argila dispersa em água; MO, matéria orgânica; Fe₂O₃, ferro total; Fe_{DBC}, ferro extraído por ditionito bicarbonato de cálcio; Fe_O, ferro extraído por oxalato; RMSE - erro-padrão da estimativa normalizado; CMR - coeficiente de massa residual.

**Figura 6.** Valores preditos vs calculados (validação cruzada) de (a) erodibilidade do solo e (b) erodibilidade do solo em entressulco.

Os erros-padrão das FPT foram baseados no RMSE, o qual representa o erro-padrão das estimativas normalizado (Tabela 4). O RMSE variou de 0,56 a 5,92% na calibração e de 0,16 a 8,26% na validação externa. As FPT modeladas nesta pesquisa apresentaram valores de CMR variando de -0,00265 a 0,00258 na calibração e de -0,47 a 0,16 na validação externa. Esse índice estatístico confirma que os ajustes de cada FPT são bons, pois apresentaram desvios próximos de zero (Loague e Green 1991). Valores de CMR positivos indicam que as FPT possuem uma tendência em subestimar a variável predita, enquanto que valores negativos indicam que as FPT possuem tendência a superestimar a variável predita (Loague e Green 1991). Em função do exposto, pôde-se inferir que existe confiabilidade e acuracidade das estimativas dos valores de K_{est} e Ki_{est} por SM usando as FPT modeladas neste trabalho (Figura 6). Outros autores também inferiram confiabilidade a modelos de predição de atributos do solo que apresentaram valores de RMSE acima dos 10% (Martins Filho et al. 2004) e de CMR acima de $\pm 0,20$ (Dalri et al. 2010).

Levando em consideração que K e Ki possuem correlação com SM (Tabela 3) e que as FPT possuem confiabilidade em estimar estes dois atributos por SM (Tabela 4) (Figura 6), as leituras de SM observadas nos 236 pontos amostrados foram utilizadas para estimar K_{est} e Ki_{est} pelas respectivas FPT. Assim, os valores de K_{est} , Ki_{est} e SM foram utilizados para a modelagem dos semivariogramas (Tabela 5).

Tabela 5. Estimação dos coeficientes dos modelos dos semivariogramas ajustados para as variáveis K, Ki e SM em amostras de 0,00-0,25 m de profundidade.

Variável	Mod.	C_0	C_0+C_1	$C/(C_0+C_1)$	a	R^2	SQR	Validação	
								cruzada	
								C (%)	b
K_{est} ($t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$)	Esf.	$7,96\ 10^{-8}$	$1,04\ 10^{-6}$	0,077	1048	0,95	$5,17\ 10^{-14}$	-0,0002	1,128
Ki_{est} ($kg\ s\ m^{-4}$)	Esf.	$7,79\ 10^9$	$1,08\ 10^{11}$	0,072	1062	0,95	$4,92\ 10^{20}$	0,01	1,122
SM ($10^{-8}\ m^3\ kg^{-1}$)	Esf.	71384	1098000	0,065	1086	0,96	$4,27\ 10^{10}$	-0,01	1,116

C_0 , efeito pepita; C_0+C_1 , patamar; a, alcance; $C/(C_0+C_1)$, dependência espacial; R^2 , coeficiente de determinação; SQR, soma dos quadrados dos resíduos, C, coeficiente angular padronizado ($C=a/(max.-min)*100$).

Todas as variáveis estudadas apresentaram dependência espacial (Cambardella et al. 2004), e o modelo esférico foi o que apresentou melhor ajuste à estrutura da variabilidade espacial dos dados (Tabela 5). Cortez et al. (2011) trabalharam com técnicas geoestatísticas e compartimentalização da paisagem, para delimitações de zonas específicas de manejo na

citricultura, e também encontraram ajustes dos variogramas da suscetibilidade magnética ao modelo esférico.

De acordo com Grego e Vieira (2005), o modelo esférico é o que predomina nos trabalhos em ciência do solo. Mcbratney e Webster (1986) estudaram modelos de ajuste do semivariograma para os atributos do solo e relataram que quando o modelo esférico se apresenta como a melhor opção para o ajuste do semivariograma, isso indica que ocorrem variações abruptas desses atributos em nível de campo. Estudos anteriores relatam que essas variações podem estar relacionadas aos tipos de material de origem (Rauch 2011), relevo (Camargo et al. 2013) e solo (Montanari et al. 2010). No caso deste trabalho, essa variação pode estar relacionada à paisagem (Figura 1).

O alcance do seminariograma pode ser utilizado como indicador da homogeneidade do atributo estudado (Montanari et al. 2012). Neste trabalho, observou-se que os valores de alcance do semivariograma para K_{est} e Ki_{est} foram próximos aos observados para SM e, foram superiores ao espaçamento entre os pontos amostrados, indicando que as amostras estão correlacionadas umas as outras, o que permite que se façam krigagem (Vieira 2000). Cortez et al. (2011) também encontraram valores semelhantes de alcance entre os variogramas dos atributos físicos e químicos de um Latossolo e o da suscetibilidade magnética.

Observando os resultados dos coeficientes de correlação da validação cruzada (Tabela 5), podemos afirmar que os valores de K_{est} , Ki_{est} e SM foram bem estimados pelos semivariogramas, uma vez que os valores do coeficiente angular padronizado (C) foram próximos de zero e os valores do coeficiente linear (b) foi igual a 1.

Atributos do solo que apresentam dependência espacial podem ser interpolados em mapas (krigagem) e as informações inseridas nestes mapas podem ser usadas para visualizar e entender melhor o padrão de distribuição espacial, além de definir diferentes zonas de manejo em uma determinada área (Souza et al. 2007). Na Figura 7 é possível realizar a visualização dos mapas de krigagem de K_{est} , Ki_{est} e SM.

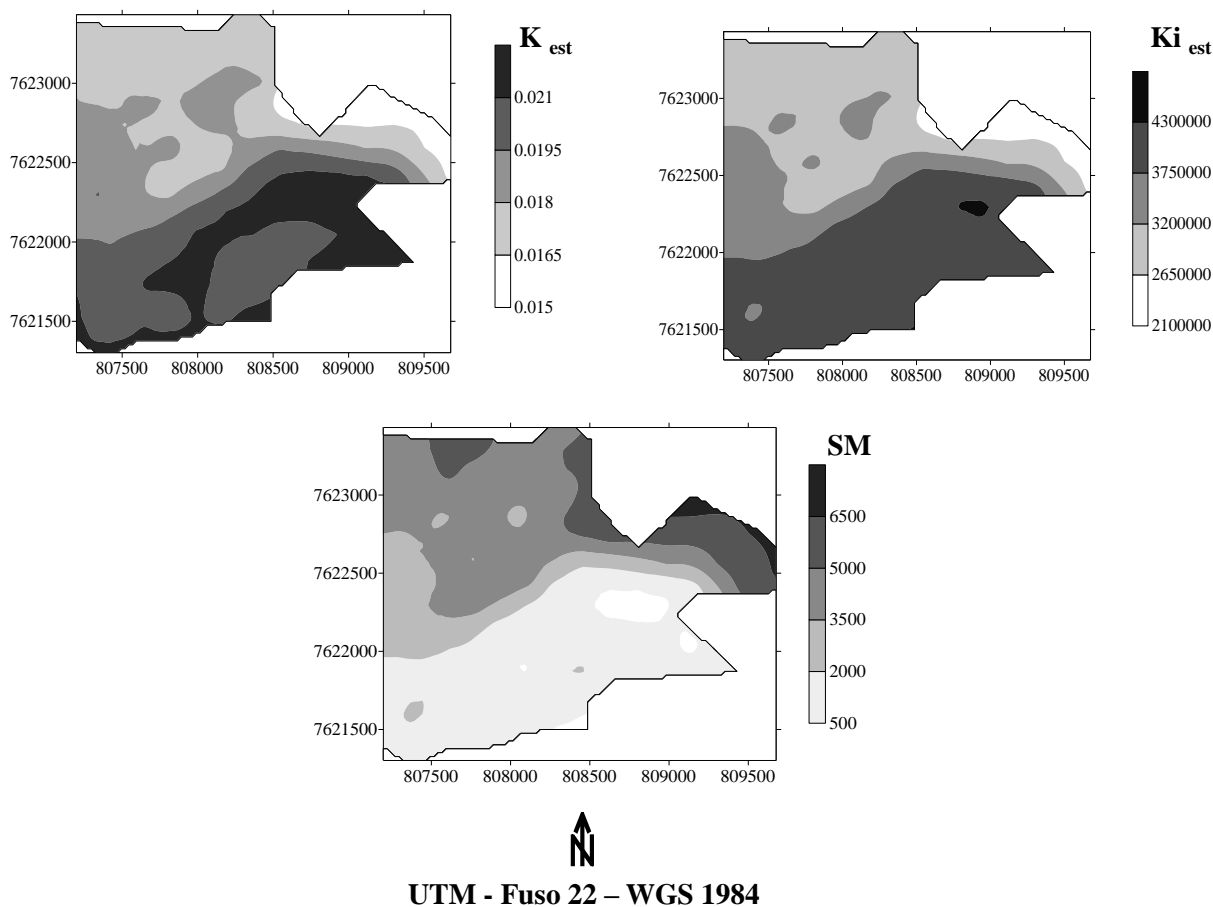


Figura 7. Mapas de Krigagem para aerodibilidade do solo estimada (K_{est} - fator K do modelo EUPS), erodibilidade do solo em entresulcos (Ki_{est} - fator Ki do modelo Wepp) e suscetibilidade magnética (SM).

A mudança gradativa dos maiores aos menores valores da SM ocorre no sentido do ponto mais alto ao ponto mais baixo. Observa-se que essa alteração faz com que os valores de K_{est} e Ki_{est} cresçam no mesmo sentido. Estes resultados exemplificam o grau de correlação negativa encontrado entre a SM com K_{est} e Ki_{est} (Tabela 3). Regiões com menores teores de SM (final da vertente) indicam que estes locais são mais propícios à erosão. Assim pode ser estabelecido um vínculo entre posição na paisagem, distribuição da SM e com os fatores K_{est} e Ki_{est} .

2.3 Conclusões

A suscetibilidade magnética apresentou correlação com a erodibilidade do solo e erodibilidade do solo em entresulco, bem como com os atributos relacionados a estes processos.

A suscetibilidade magnética pode ser usada como componente da função de pedotransferência na quantificação da erodibilidade de Latossolos da região nordeste do estado de São Paulo, Brasil.

Agradecimentos: A Cordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelas concessões das bolsas de doutorado e de doutorado sanduíche no exterior (Processo N° 18732-12-7). A UNESP (Campus de Jaboticabal) e Universidade de Córdoba (Espanha) pela estrutura cedida para a realização da pesquisa. A usina São Martinho por ceder a área onde foi realizada a amostragem.

2.5 Literatura Consultada

- ALEKSEEVA, T. V.; SOKOLOWSKA, Z.; HAJNOS, M.; ALEKSEEV, A. O.; KALININ, P. I. Water stability of aggregates in subtropical and tropical soils (Georgia and China) and its relationships with the mineralogy and chemical properties. **Eurasian Soil Science**, v.42, n.4, p.415-425, 2009.
- ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, A. O. Óxidos de ferro e de alumínio e a mineralogia da fração argila deferrificada de Latossolos Ácricos. **Scientia Agrícola**, v.52, n.3, p.416-421, 1995.
- AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. **Principais modelos para estimar as perdas de solo em áreas agrícolas**. In: PRUSKI, F. F., ed. Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. 2.ed. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, p.74-107, 2009.
- ARAGÃO, R.; SANTANA, G. R.; DA COSTA, C. E. F.F.; CRUZ, M. A.S; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. Chuvas intensas para o estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuva diária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.3, p.243-252, 2013.
- BARRIOS, M. R.; MARQUES JR, J.; PANOSSO, A. R.; SIQUEIRA, D. S.; SCALA JR, N. L. Magnetic susceptibility to identify landscape segment son a detailed scale in the region of Jaboticabal, São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.4, p.1073-1082, 2012.
- BARTINGTON. **Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System** Disponível em:<http://www.bartington.com/Literaturepdf/Operation%20Manuals/om0408%20MS2.pdf>. Acesso em: 24 de jan. 2013.

- BERQUÓ, T. S.; THOMPSON, R.; PARTITI, C. S. M. Magnetic study of Brazilian peats from São Paulo state. **Geoderma**, v.118, n.3-4, p.233-243, 2004.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 6.ed. São Paulo, Ícone. 355p, 2008.
- BEZERRA, A.S.; CANTALICE, J. R. B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* v.30, n.3, p.565-573, 2006.
- CALERO, N.; BARRÓN. V.; TORRENT, J. Water dispersible clay in calcareous soils of southwestern Spain. **Catena**, v.74, n.1, p.22-30, 2008.
- CAMARGO, L. A. **Mineralogia da argila por difração de raios x e espectroscopia de reflectância difusa em Latossolos sob diferentes superfícies geomórficas**. 2013. 125 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of physical attributes of an Alfisol under different hillslope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n.3, p. 617-630, 2010.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; ALLEONI, L. R. F. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. **Catena**, v. 100, p. 100-106, 2013.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas do relevo: II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2279-2288, 2008.
- CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Instituto Agronomico de Campinas, Campinas, 1986.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.
- CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; MONTANARI, R. Planejamento agrícola e implantação de sistema de cultivo de cana-de-açúcar com auxílio de técnicas geoestatísticas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.3, p.297-304, 2009.
- CERQUETANI, G. E.; MARTINS FILHO, M. V. Rotina computacional e equação simplificada para modelar transporte de sedimentos num Latossolo Vermelho Distrófico. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.2, p.617-626, 2006.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Serviço Geológico do Brasil. Geobank: mapa geológico do Estado de São Paulo – escala 1:750.000**. Disponível em: http://geobank.sa.cprm.gov.br/pls/publico/Projetos.Projeto.Cadastro?p_cod_ Acesso: 1 out. 2012.
- CORTEZ, L. A.; MARQUES JR., J.; PELUCO, R. G.; TEIXEIRA, D. B. T.; SIQUEIRA, D. S. Suscetibilidade magnética para identificação de áreas de manejo específico em citricultura. **Energia na Agricultura**, v.26, n.3, p. 60-79, 2011.
- COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M.; RHOTON, F. E.; TRAINA, S. J. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clays and Clays Minerals**, v.4, n.4, p.466-473, 1999.

- DARLI, A. B.; CORTEZ, G. E. P.; RIUL, L. G. S.; ARAÚJO, J. A. C.; CRUZ, R. L. Influência da aplicação de vinhaça na capacidade de infiltração de um solo de textura franco arenosa. **Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**, v.15, n.4, p.344-352, 2010.
- DEARING, J.A. **Environmental magnetic susceptibility**. Using the Bartington MS2 system. England: British Library, 1994, 104 p.
- DENARDIN, J. E. **Erodibilidade do solo estimado por meio de parâmetros físicos e químicos**. 1990. 114 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 2. ed., Rio de Janeiro, 2006, p. 306.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do Solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003, 50 p.(Embrapa Solos. Documentos; n. 45).
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997, 212p.
- FLANAGAN, D.C. & NEARING, M.A., eds. **Water Erosion Prediction Project - WEPP**. West Lafayette, USDA, 1995. p.1-47. (Report, 10).
- GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas de solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.2, p.169-177, 2005.
- KÄMPF, N.; CURI, N. **Óxidos de ferro: Indicadores de ambientes pedogênicos**. In: Novais RF, Alvarez VVH, Schaefer CEGR. Tópicos em ciência dosolo, Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1. p.107-138, 2000.
- KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Avaliação da estimativa de substituição de Fe por Al em hematitas de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.209-213, 1998.
- LAL, R. **Erodibility and erosivity**. In: LAL, R. et al. Soil erosion research methods. Washington: Soil and Water Conservation Society, pp. 141-160, 1988.
- LAL, R. **Soil erosion by wind and water: Problems and prospects**. In: LAL R, ed. Soil erosion research methods. 2.ed. Ankeny, Soil and Water Conservation Society, p.1-9, 1994.
- LAL, R.; STEWART, B. A. Need for land restoration. **Advanced Soil Science**, v.17, p.1-11, 1992.
- LANE, L. J.; NEARING, M. A. **USDA - Water erosion prediction project: hillslope profile model documentation**. West Lafayette: National Soil Research Laboratory, USDA – Agricultural Research Service. pp. A1-S1, 1989.
- LIMA, J. M.; ANDERSON, S. J. Aggregation and aggregate size effects on extractable iron and aluminum in two Hapludoxs. **Soil Science Society of American Journal**, v.61, n.3, p.965-970, 1997.
- LIMA, J. M.; CURI, N.; RESENDE, M.; SANTANA, D. P. Dispersão do material de solo em água para avaliação indireta da erodibilidade em latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** v.14, p.85-90, 1990
- LOAGUE, K.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, v.7, n.1-2, p.51-73, 1991.
- LU, S.; ZHU, L.; YU, J. Mineral magnetic properties of Chinese paddy soils and its pedogenic implications. **Catena**, v.93, p.9-17, 2012.
- MARTINS FILHO, M. V.; ENGLER, M. P. C.; IZIDORIO, R.; CONTRIN, F. B.; SERRA, E. A.; AMARAL, N. S.; SOUZA, Z. M. Modelos para estimativa do subfator cobertura-

- manejo (CiII) relativo à erosão entressulcos. **Engenharia Agrícola**, v.24, n.3, p.603-611, 2004
- MARTINS FILHO, M.V. **Modelagem do processo de erosão entressulcos em latossolos de Jaboticabal-SP**. 1999. 140 f. Tese. (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.
- MATIAS, S. S. R.; MARQUES JR, J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Modelos de paisagem e susceptibilidade magnética na identificação e caracterização do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.43, n.1, p.93-103, 2013.
- McBRATNEY, A. G.; MENDONÇA SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v.117, n.1-2, p.3-52, 2003.
- McBRATNEY, A. G.; WEBSTER, A. G. Choosing functions for semivariograms and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, v.37, n.4, p.617-639, 1986.
- MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clay by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, v.7, p.317-327, 1960.
- MINITAB Inc. **Release 14 for Windows**, State College, USA, 2003.
- MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, Z. M.; CAMARGO, L. A.; Caracterização mineralógica de Latossolos em diferentes feições do relevo na região de Jaboticabal, SP. **Revista Ciência Agrônômica**, v.41, n.2, p.191-199, 2010.
- MONTANARI, R.; ZAMBIANCO, E. C.; CORRÊA, A. R.; PELLIN, D. M. P.; CARVALHO, M. P.; DALCHIAVON, F. C. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho correlacionados linear e espacialmente com a consorciação de gandu com milho. **Revista Ceres**, v.59, n.1, p.125-135, 2012.
- NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.spe, p.2839-2845, 2008
- PELUCO, R. G.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S.; TEIXEIRA, D. B.; ADAME, C. R.; CORTEZ, L. A. Suscetibilidade magnética do solo e estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, n.6, p.661-672, 2013.
- RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Fundação Cargill, pp.107, 1987.
- RAUCH, J. N. Global distributions of Fe, Al, Cu, and Zn contained in Earth's derma layers. **Journal of Geochemical Exploration**, v.110, n.2, p.193-201, 2011.
- RHOTON, F. E.; DUIKER, S. W. Erodibility of a soil drainage sequence in the loess uplands of Mississippi. **Catena**, v.75, n.2, p.164-171, 2008.
- ROBERTSON, G. P. **GS+: Geostatistics for the environmental sciences - GS+ User's Guide**. Plainwell: Gamma Desing Software, 152 p, 2004.
- RÖMKENS, M. J. M.; ROTH, C. B.; NELSON, D. W. Erodibility of selected clay subsoils in relation to physical and chemical properties. **Soil Science Society of American Journal**, v.41, p.954-960, 1977.
- ROTH, C. B.; NELSON, D. W.; ROMKENS, M. J. M. **Prediction of subsoil erodibility using chemical, mineralogical and physical parameters**. Washington: United States Environmental Protection Agency. 111p. Report, 1974
- SANTOS, H. L.; MARQUES JR, J.; MATIAS, S. S. R.; SIQUEIRA, D. S.; MARTINS FILHO, M. V. Erosion factors and magnetic susceptibility in differet compartments of a slope in Gilbués-PI, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v.33, n.1, p.64-74, 2013.

- SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA JUNIOR, V. P. Erosão hídrica e perda de carbono orgânico em diferentes tipos de cobertura do solo no semiárido, em condições de chuva simulada. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.13, n.2, p.113-125, 2008.
- SCHWERTMANN, U. Use of oxalate for Fe extraction from soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v.53, n.2, p.244-246, 1973.
- SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of Southern and Central Brazil. **Soil Science**, v.139, p.344-350, 1985.
- SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; CURI, N.; OLIVEIRA, P. M. Simulação da variabilidade espacial da erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica de Latossolos no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.5, p.2125-2134, 2008.
- SILVA, G. R. V.; SOUZA, Z. M.; MARTINS FILHO, M. V.; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. Soil, water and nutrient losses by interrill erosion from green cane cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.3, p.963-970, 2012.
- 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 and Management**, v. 26, n. 4, p. 425-431, 2010.
- SOUZA, Z. M.; BARBIERI, D. M.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; CAMPOS, M. C. C. Influência da variabilidade espacial de atributos químicos de um latossolo na aplicação de insumos para cultura de cana-de-açúcar. **Ciência Agrotecnica**, v.31, n.2, p.371-377, 2007.
- SOUZA, Z. M.; BEUTLER, A. N.; PRADO, R. M.; BENTO, M. J. C. Efeito de sistemas de colheita de cana-de-açúcar nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho. **Científica**, v.34, n.1, p.31-38, 2006.
- SURFER. **Version 8.0**. Contouring, Gridding, and Surface Mapping Package for Scientists and Engineers, 2002.
- THORNTHWAITE, C. W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n.1, p. 55-94, 1948.
- TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES, E. A sistematização dos fatores da EUPS em SIG para quantificação da erosão laminar na bacia do Rio Jirau. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.57, n.3, p.235-244, 2005.
- TORRENT, J.; BARRÓN, V. **Diffuse Reflectance Spectroscopy**. In: Ulery, A.L., Drees, L.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 5. Mineralogical Methods*, SSSA Book Series, vol. no. 5. Soil Science Society of American, pp. 367-387, 2008.
- TORRENT, J.; BARRÓN, V.; LIU, Q. S. Magnetic enhancement is linked to and precedes hematite formation in aerobic soil. **Geophysical Research Letters**, v.33, n.6, p.1-4, 2006.
- 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**, v.154, n.3-4, p.465-472, 2010.
- TORRENT, J.; LIU, Q. S.; BLOEMENDAL, J.; BARRÓN, V. Magnetic enhancement and iron oxides in the upper luochuan Loess-paleosol sequence, Chinese Loess plateau. **Soil Science Society of American Journal**, v.71, n.5, p.1570-1578, 2007.
- UEHARA, G. **Aeric properties and their significance to soil classification**. In: *International Soil Classification Workshop, 8.*, Rio de Janeiro: Embrapa/Snlcs, p.19-22, 1988.
- VIEIRA, S. R. **Geostatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. In: NOVAIS RF, ALVAREZ VVH, SCHAEFER GR, eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.1-54, 2000.

- WANG, B.; XIA, D. S.; YU, Y.; JIA, J.; XU, S. J. Magnetic properties of river sediments and their relationship with heavy metals and organic matter in the urban area in Lanzhou, China. **Environmental Earth Sciences**, v.70, n.2, p.605-614, 2013.
- WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.26, p.189-193, 1971.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation planning**. Washington: Department of Agriculture, 1978. 58 p. (Agriculture Handbook 537).

CAPÍTULO 3 – Espectroscopia de reflectância difusa na predição da erodibilidade de Latossolo da região nordeste do Estado de São Paulo, Brasil

RESUMO – Objetivo: avaliar a eficiência da espectroscopia de reflectância difusa na predição da erodibilidade de latossolo da região nordeste do estado de São Paulo. Material e métodos: Realizaram-se coletas de 30 amostras do solo a uma profundidade de 0,0-0,25 m. em área de latossolos situada na região nordeste do estado de São Paulo, Brasil. Foram analisadas as frações granulométricas, argila dispersa em água (ADA), teor de matéria orgânica (MO), concentração dos óxidos de ferro, razão entre goethita (Gt) e hematitas (Hm) e entre caolinita (Ct) e gibbsita (Gb) e calcularam-se os parâmetros de erodibilidade K e Ki. Testaram-se três bandas espectroscópicas (Vis-NIR-MIR) separadamente e combinadas. A calibração espectral foram feitas utilizando a quimiometria. Os modelos foram gerados utilizando a regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLS), com o uso da validação cruzada denominada leave-one-out. A precisão e acurácia da modelagem foram avaliadas com os cálculos do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) e o Desvio Residual de Previsão (RPD – Residual Prediction Deviation), respectivamente. A importância das variáveis na predição dos fatores K e Ki foi dada pelo índice de importância das variáveis (VIP – Variable Importance in the Projection). Resultados e discussão: Em todas as variáveis estudadas, o sistema espectroscópico que melhor estimou os mesmos, foi o MIR. O teor de argila foi, dentre as frações granulométricas estudadas, a melhor predita ($R^2_{adj} = 0,86$ e RDP = 2,81). Dentre parâmetros de erodibilidade, o que apresentou melhores ajustes, foi o Ki, com coeficiente $R^2_{adj} = 0,57$ e RDP = 1,57. Conclusões: O uso da técnica de espectroscopia de reflectância difusa, principalmente na faixa do MIR, é eficiente na predição dos fatores K e Ki em latossolos da região nordeste do estado de São Paulo.

Palavras-chaves: quimiometria, pedometria, Vis-NIR-MIR, solos tropicais.

3.1 Introdução

A preocupação com a erosão do solo é antiga. Bennett (1928), em um dos trabalhos pioneiros sobre erosão do solo, afirma que este é o evento que mais ameaça a utilização de terras para a agricultura. No Brasil, a maioria dos estudos sobre erosão do solo gira em torno dos modelos de predição de perdas de solo por erosão, sendo os modelos USLE-*Universal Soil Loss Equation* (Wischmeier e Smith 1978) e WEPP-*Water Erosion Prediction Project* (Lane e Nearing 1989) os mais utilizados.

Apesar da importância de se conhecer as taxas de perdas de solo por erosão, a comunidade científica mundial vem focando em estudos que forneçam subsídios para o entedimento mais aprofundado dos parâmetros relacionados à erosão separadamente, como o

clima (Lee e Heo 2011), solo (Eduardo et al. 2013) e topografia (Oliveira et al. 2013). Segundo Wischmeier et al. (1971), dentre estes parâmetros, existe um que é intrínseco ao solo, chamado de erodibilidade do solo. A erodibilidade do solo representa o efeito integrado dos processos que regulam a infiltração de água e a resistência do solo à desagregação e transporte de partículas (Lal 1988). Segundo Foster (1982) este parâmetro é expresso distintamente de acordo com cada local, devido as características e propriedades químicas, físicas e mineralógicas do solo.

A erodibilidade do solo é representada diferentemente nos modelos USLE e WEPP. Na USLE, a erodibilidade do solo é representada pelo fator K e no modelo WEPP a erodibilidade do solo é subdividida em erodibilidade em entressulcos (K_i) e erodibilidade em sulcos (K_r). Os estudos destes fatores podem auxiliar no gerenciamento do manejo em áreas agrícolas com o objetivo de se evitar a erosão (Silva et al. 2012). Para estudos deste porte, a caracterização das frações granulométricas, alguns atributos químicos e mineralógicos do solo são imprescindíveis (Sanchez et al. 2009). A argila, silte, areia e argila dispersa em água (ADA) são atributos muito importantes para compreender os processos de selamento superficial e formação de crosta no solo, que antecede a erosão (Calero et al. 2008; Silva et al. 2012). Jindaluang et al. (2013) afirmam que estes atributos sofrem influência direta da mineralogia do solo. A Matéria Orgânica (MO) também influencia diretamente no comportamento do solo diante do processo erosivo, sendo que a mesma sofre influência dos minerais de argila para sua estabilização (Denef et al. 2004).

Os meios tradicionais de se chegar aos valores correspondentes à erodibilidade do solo são em nível de campo, em condição de chuva natural ou simulada e, possuem alguns entraves. Estes estão relacionados a complexibilidade, ao custo e ao tempo necessário para aquisição das informações (Wischmeier e Smith 1978). Estas limitações são potencializadas quando o objetivo é mapear grandes áreas. Pensando em superar essas limitações, pesquisadores do ramo da ciência do solo vêm trabalhando com ferramentas que possibilitem a observação de forma indireta da erodibilidade (Gomez et al. 2013).

Uma dessas ferramentas é a espectroscopia de reflectância difusa (ERD), que segundo Nanni e Demattê (2006) e Torrent e Barrón (2008), possui como vantagens principais, a rapidez, economia e a não produção de resíduo. A ERD é uma técnica importante em estudos que visem o entendimento de processos intrínsecos ao solo (Martínez-Carreras et al. 2010; Gúzman et al. 2013). Ela tem sido amplamente adotada para estudos de propriedades primárias

e secundárias do solo (Janik et al. 1998; Malley et al. 2004; Nanni e Demattê 2006; Cañasveras et al. 2012).

Dentre as bandas de absorção dos espectros, as mais utilizadas com este fim são as bandas do visível (Vis – 400 a 750 nm), infravermelho próximo (NIR – 750 a 2500 nm) e infravermelho médio (MIR – 2500 a 25000 nm) (Skoog et al. 2006). O processo de absorção de luz na ERD envolve transições eletrônicas, excitação de elétrons do orbital de moléculas e cristais (Skoog e Leary 2002). A forma em que ocorre esta interação e a região do espectro em que ela ocorre, geram informações que permitem a identificação da composição química de grande parte dos minerais presentes nas amostras (Viscarra Rossel et al. 2006; Silverstein et al. 2007; Cañasveras et al. 2012).

A maior limitação ao uso de ERD para predição de atributos do solo consiste no grande número de informações obtidas com estas análises (Ferrari 2004). Para que os estudos destes espectros ocorram de forma conclusiva, é necessário fazer uso de métodos quimiométricos (Ferreira et al. 1999a). A quimiometria é definida como um método estatístico para tratamento de dados químicos, de forma que facilite a extração do maior número de informações possíveis (Massart et al. 1998). Segundo Williams e Norris (1990), tanto a classificação das amostras, de acordo com suas propriedades, bem como a previsão de atributos, fazem com que a quimiometria seja indispensável para estudos espectrais.

Diferentes técnicas de ERD já foram utilizadas para relacionar espectros do solo às frações granulométricas do solo (Madari et al. 2006), óxidos de ferro (Cañasveras et al. 2010) e MO (Gómez et al. 2008). No entanto, ainda existe carência de estudos que utilizem os dados obtidos por análises de ERD agentes preditores de erodibilidade do solo.

Objetivou-se com esta pesquisa, avaliar a eficiência da espectroscopia de reflectância difusa na predição da erodibilidade de latossolo da região nordeste do estado de São Paulo.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Área de estudo

Este estudo foi realizado em área de aproximadamente 380 ha sob cultivo de cana-de-açúcar no sistema de colheita mecanizada em Guatapará, no estado de São Paulo, suldeste do Brasil (Figura 8).

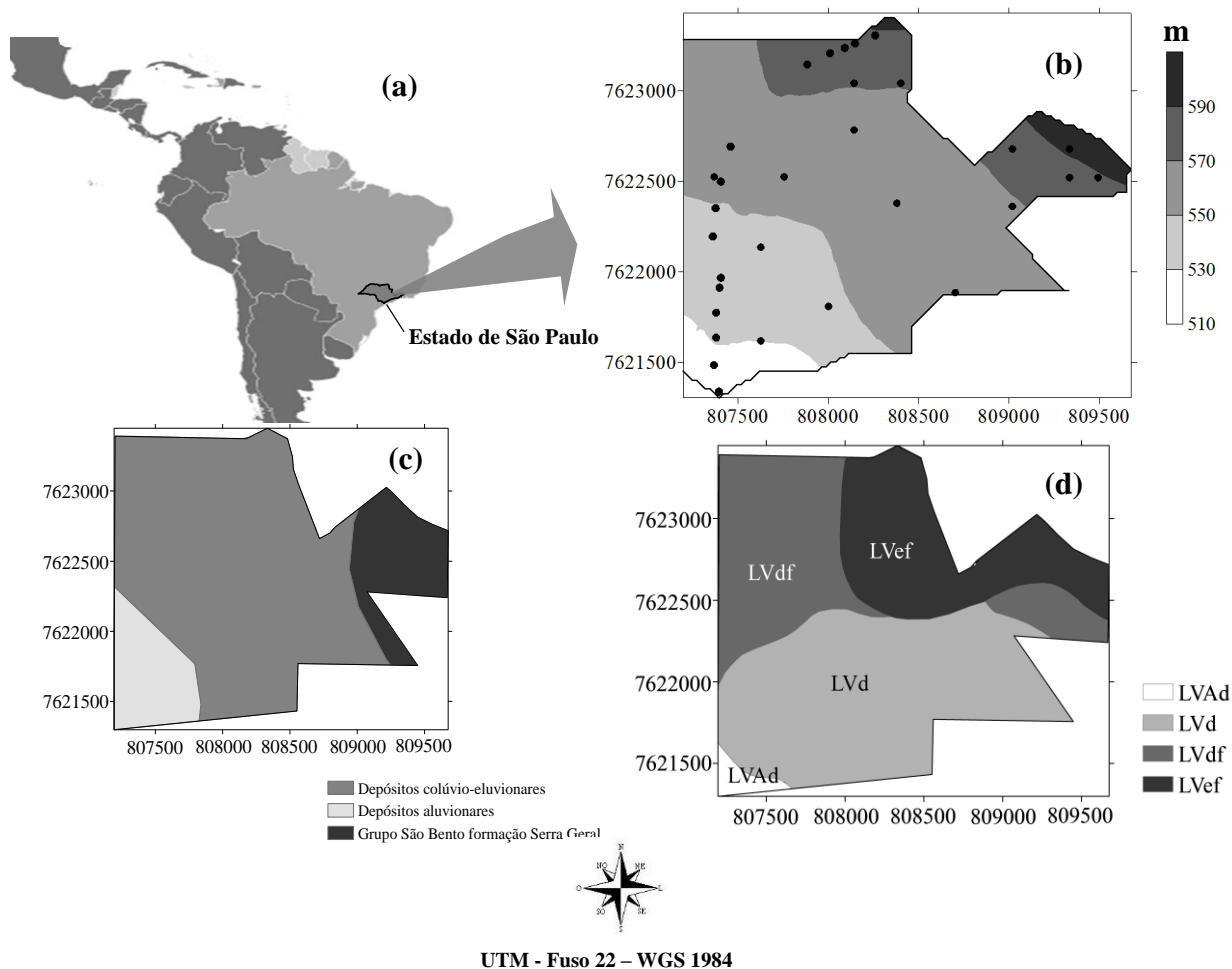


Figura 8. Localização da área, (A); mapa das cotas indicando a localização dos pontos amostrados, (B); mapa geológico na escala 1:500.000, (C); mapa de solos na escala 1:12.000 (LVd - Latossolo Vermelho distrófico, textura média; LVdf - Latossolo Vermelho distroférico, textura argilosa; LVef - Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa; e LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média), (D).

Os solos do local foram classificados (Santos et al. 2006) como: Latossolo Vermelho distrófico, textura média (LVd); Latossolo Vermelho distroférico, textura argilosa (LVdf); Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa (LVef); e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média (LVAd) (Figura 8d), estes originados de basalto, depósito colúvio-eluvionar e depósito aluvionar (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais 2012) (Figura 8c).

Segundo a classificação de Thornthwaite (1948), o clima local pode ser definido como B1rB'4a', Tipo Mesotérmico Úmido, com pequena deficiência hídrica, sendo a evapotranspiração de verão menor que 70% da evapotranspiração anual. A cor (Matiz) do solo

da área em questão varia de 2,5YR a 7,5YR com Valor de 4.4 e Cromo variando de 2,5 a 4 (Figura 9).

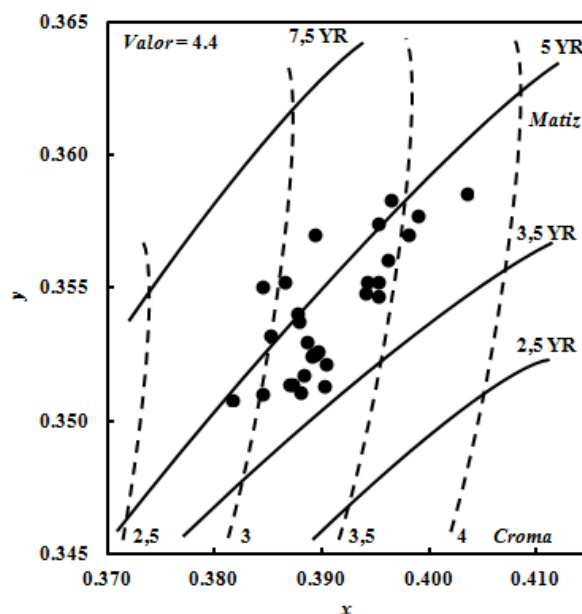


Figura 9. Parâmetros Munsell no plano valor 4.4 dos eixos cromáticos x e y das amostras estudadas.

3.2.2 Amostragem e análises laboratoriais

Foram coletadas 30 amostras de solo na profundidade de 0,00-0,25 m. A escolha da localização dos pontos seguiu de tal forma que fosse possível representar as classes de solo, os materiais de origem em as cotas locais.

Em laboratório, foram analisadas as frações granulométricas em água e em NaOH 0,1 mol L⁻¹ de acordo com o procedimento descrito pela Embrapa (1997). O teor de matéria orgânica (MO) foi analisado segundo a metodologia descrita por Raij et al. (1987). Os óxidos de ferro livres (Fe_{DCB}) foram extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato (Mehra e Jackson 1960) e o ferro mal cristalizado (Fe_O) foi extraído com oxalato ácido de amônio, de acordo com a metodologia descrita por Camargo et al. (1986) adaptado de Schwertmann (1973).

As análises de difração de raios-x (DRX) ocorreram utilizando o Mini-Flex II- Rigaku, empregando-se anticátodo de cobre com filtro de níquel e radiação $k\alpha$ (20mA, 30Kv). A razão Goethita/(Goethita+Hematita) foi obtida após o cálculo de acordo com Kämpf e Schwertmann 1998 e a razão Caulinita/(Caulinita+Gibbsita) foi determinada empregando-se as áreas dos reflexos da Ct (001) e da Gb (002) dos difratogramas.

3.2.3 Análises espectrais

Os valores correspondentes às análises espectrais ocorreram em três diferentes instrumentos e diferentes faixas espectrais, sendo:

- (1) Espectrofotômetro Cary 5000 Vis-NIR equipado com uma esfera de integração de acolhimento de um detector fotomultiplicador/Pbs. Os valores de reflectância foram adquiridos em intervalos de 0.5 nm na faixa de 400 a 2500 nm. A fim de obter os valores dos parâmetros de cores da reflectância na faixa do Vis (380-770nm), as medidas foram convertidas para tístímulos (XYZ) de acordo com a ponderação de cores do CIE 1931 (Wyszecki e Stiles 1982) e, em seguida, transformados em valores de matiz, valor e croma da notação Munsell.
- (2) Espectrômetro Labspec 4 ASD[®] Vis-NIR. Os valores dos espectros o foram adquiridos com resolução de 1 nm na faixa 400 a 2500 nm. Este é um equipamento portátil e possui forma de absorção do espectro diferenciada em relação aos espectômetros de bancada. Ou melhor, enquanto os espectrômetros de bancada utilizam esfera integradora para captar os componentes especulares e difusos, o Labspec ASD[®] utiliza apenas uma pequena sonda manual que integra a lâmpada e uma fibra ótica para captação da radiação refletada, fazendo com que ele seja um equipamento indicado para uso no campo.
- (3) Tensor 27 MIR espectrofotômetro da Bruker Optics equipado com uma semiesfera de reflectância (Pike EasiDiff). Os espectros forão registrados na faixa de 4000-600 cm^{-1} (2500 a 16666 nm) a 8 cm^{-1} com resolução de 64 varreduras por segundo.

As amostras utilizadas para este fim foram terra fina seca ao ar moídas em almofariz de ágata até atingirem tamanho < 2 mm. Para todas as análises espectrais foram utilizadas as mesmas amostras de solo. Para os equipamentos de leitura nas faixas Vis-NIR e MIR as medições de referência para o branco (padrão) foram obtidos com Teflon (PTFE) e Brometo de potássio (KBr) respectivamente.

3.2.4 Cálculo dos fatores de erodibilidade K e Ki

Para o cálculo do fator K foi utilizado o modelo proposto por Denardin (1990) para os solos do Brasil e EUA:

$$K = 0,00000748 \times M + 0,00448059 \times P - 0,0631175 \times DMP + 0,01039567 \times REL \quad (1)$$

em que,

$M = (\% \text{ silte} + \% \text{ areia muito fina}) \times (100 - \% \text{ argila});$

$P = \text{código de permeabilidade codificada segundo Wischmeier et al. (1971), adimensional};$

$DMP = \text{diâmetro médio ponderado das partículas do solo inferiores a 2,00 mm};$

$$REL = \%MO \div \% \geq 0,1\text{mm}, \text{ adimensional}; \quad (2)$$

Para o cálculo do fator Ki foram utilizados os modelos propostos por Flanagan e Livingston (1995):

- para teor de areia $\geq 30\%$

$$Ki = 2728000 + 192100AMF \quad (3)$$

- para teor de areia $< 30\%$

$$Ki = 6054000 - 55130ARG \quad (4)$$

em que,

$AMF = \text{percentual de areia muito fina, } \%;$

$ARG = \text{percentual de argila, } \%.$

3.2.5 Análises estatísticas

Foram calculados os valores de média, desvio padrão, mínimo e máximo das variáveis determinadas em laboratório (atributos do solo) e dos fatores de erodibilidade K e Ki. Foram feitas análises de correlação de Pearson dos fatores K e Ki entre as variáveis que não são inseridos nos modelos de erodibilidade. O software Minitab® 14 (Minitab Inc. 2003) foi utilizado tanto para os cálculos dos parâmetros da estatística descritiva, como para as análises de correlação.

3.2.6 Calibração espectral e construção dos modelos preditivos

Os espectros foram submetidos a pré tratamento com o intuito de minimizar os efeitos secundários (por exemplo, estabilidade da iluminação). O pré-tratamento consistiu na centralização na média dos espectros e na correção do espalhamento de luz com a transformação dos valores para absorbância [$\text{Log}_{10}(1/\text{Reflectância})$]. O mesmo pré-tratamento foi utilizado por Cañasveras et al. (2012).

A calibração espectral (quimiometria) ocorreu por regressão de Mínimos Quadrados Parciais (PLS - *Partial Least Squares*) usando o pacote do programa ParleS[®] (Viscarra Rossel 2008). Essa técnica é utilizada para construir modelos preditivos quando há variáveis preditivas que são altamente interrelacionadas (Martínez-Carreras et al., 2010).

Para determinação do número de fatores a serem retidos nos modelos de validação utilizou-se a rotina de validação cruzada denominada *leave-one-out* (Efron e Tibshirani 1994). Neste procedimento, as amostras que fazem parte do conjunto de calibração são retiradas, uma a uma, para serem utilizadas como elementos de previsão. O critério utilizado para selecionar o número de fatores em um cálculo de validação, em muitos casos, é o que apresentar menor Erro Médio Quadrático (RMSE - *Root-Mean-Square Error*), no entanto, optou-se por usar o Critério de Informação Akaike (AIC – *Akaike Information Criterion*) (Akaike 1973). O AIC se origina da minimização da distância (Kullback-Liebert) entre os modelos verdadeiro e candidato (Burnham e Anderson 1998), ou seja, foi escolhido o número de fatores que apresentou menor AIC.

A precisão e acurácia da modelagem foram avaliadas com os cálculos do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) e o Desvio Residual de Previsão (RPD – *Residual Prediction Deviation*), respectivamente. Para os valores de RPD, foi considerada a classificação de Chang et al. (2001), no qual quando o modelo apresenta $\text{RPD} > 2$ indica que possui boas previsões, RPD entre 1,4 - 2 indica previsões confiáveis e $\text{RPD} < 1,4$ indica que possui previsões pouco confiáveis.

Quando se utiliza a regressão PLS, a importância de uma determinada variável na predição de outra é dada pelo índice de importância das variáveis (VIP – *Variable Importance in the Projection*) (Wold et al. 2001; Yan et al. 2013). Assim sendo, as variáveis identificadas como sendo as mais relevantes para explicar a predição dos fatores K e Ki foram as correspondentes com os picos de maior intensidade no gráfico de VIP.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Propriedades do solo

O local estudado apresenta uma ampla variação nos valores correspondentes aos atributos granulométricos, sendo que o teor de areia varia de 121 a 629 g kg⁻¹, o teor de silte varia de 30 a 428 g kg⁻¹ e o teor de argila varia de 160 a 614 g kg⁻¹ (Tabela 6). O teor de ADA varia de 42 a 202 g kg⁻¹. Estes resultados são reflexos da influência dos diferentes materiais de origem da área, uma vez que a área estudada está inserida em um divisor litoestratigráfico arenito-basalto (Peluco et al. 2013). Os resultados indicam também que a área possui um grande aporte de MO, com média em torno de 30 g kg⁻¹ (Tabela 6), corroborando com resultados encontrados por Souza et al. (2003) para latossolos no nordeste paulista. Estes valores podem estar relacionados ao incremento de MO fornecido pelo sistema de colheita de cana crua (Souza et al. 2006).

Tabela 6 Estatística descritiva das variáveis selecionadas para o estudo do solo.

Variáveis	Estatística			
	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
K (t h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	21 x 10 ⁻³	5 x 10 ⁻³	10 x 10 ⁻³	36 x 10 ⁻³
Ki (kg s m ⁻⁴)	3,340 x 10 ⁶	4,717 x 10 ⁵	2,669 x 10 ⁶	4,216 x 10 ⁶
Areia (g kg ⁻¹)	340	160	121	629
Silte (g kg ⁻¹)	201	104	30	428
Argila (g kg ⁻¹)	459	118	160	614
ADA (g kg ⁻¹)	133	36	42	202
MO (g kg ⁻¹)	31,7	6,3	20	45
Ct/(Ct+Gb)	0,7	0,04	0,6	0,8
Gt/(Gt+Hm)	0,3	0,07	0,08	0,41
Fe _{DCB} (g kg ⁻¹)	102,7	38,3	24,9	158,2
Fe _O (g kg ⁻¹)	8,2	5,04	1,7	21,9

ADA, argila dispersa em água; MO, matéria orgânica; Ct, caulinita; Gb, gibsita; Gt, goethita; Hm, hematita; Fe_{DCB}, ferro extraído por ditonito bicarbonato de cálcio; Fe_O, ferro extraído por oxalato; K, erodibilidade do solo; Ki, erodibilidade em entressulcos.

Os valores médios das relações Ct/(Ct+Gb) e Gt/(Gt+Hm) são 0,7 e 0,3 respectivamente (Tabela 6). Montanari et al. (2010) encontraram resultados semelhantes estudando a mineralogia de latossolos na região nordeste do estado de São Paulo. Estes valores indicam a alta presença de ferro nos materiais de origem da área estudada (Schwertmann e Kämpf 1985). Essa é uma característica típica dos latossolos brasileiros, onde os altos níveis de intemperização resultam no acúmulo de óxidos de ferro e alumínio (Uehara 1988; Alleoni e

Camargo 1995). A predominância da mineralogia oxidica nesta área também poderia ser indicado pela variação da cor do solo (Fig. 9) (Centurion et al. 1995).

As variáveis Fe_{DCB} e Fe_O apresentaram valores médios de 102,7 e 8,2 g kg⁻¹ (Tabela 6), semelhante a pesquisa realizada por Nunes e Cassol (2008) em latossolos do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Comparando os valores de Fe_{DCB} e Fe_O , pode-se afirmar que os valores de Fe_O são muito inferiores aos de Fe_{DCB} , o que evidencia o predomínio de formas mais cristalinas de óxidos de ferro, que é uma característica de solos em níveis avançados de intemperismo (Kämpf et al. 2000).

Os valores de K apresentam uma amplitude de 0,010 a 0,036 t h MJ⁻¹ mm⁻¹. De acordo com Tomazoni e Guimarães (2005) os valores de K para latossolos brasileiros variam de 0,002 a 0,034 t h MJ⁻¹ mm⁻¹, o que comprova que os valores obtidos pelo modelo proposto por Denardin (1990) e adotado nesta pesquisa estão coerentes. O valor médio de Ki foi 3,340 x 10⁶ kg s m⁻⁴ (Tabela 6), corroborando com Bezerra e Cantalice (2006).

Na Tabela 7, encontram-se os valores de correlação de Pearson dos parâmetros de erodibilidade (K e Ki) entre as relações Ct/(Ct+Gb) e Gt/(Gt+Hm) e entre os teores de Fe_{DCB} e Fe_O . As demais variáveis não entraram na correlação para se evitar a retroalimentação do sistema, uma vez que as mesmas entram nos modelos para calcular K e Ki.

Tabela 7. Valores dos coeficientes de correlação de Pearson entre os parâmetros de erodibilidade e os atributos do solo.

	K (t h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	Ki (kg s m ⁻⁴)
Ct/(Ct+Gb)	-0,17	-0,16
Gt/(Gt+Hm)	0,26	0,14
Fe_{DCB} (g kg ⁻¹)	-0,67*	-0,42*
Fe_O (g kg ⁻¹)	-0,40*	-0,69*

Ct, caulinita; Gb, gibsitita; Gt, goethita; Hm, hematita; Fe_{DCB} , ferro extraído por ditionito bicarbonato de cálcio; Fe_O , ferro extraído por oxalato; K, erodibilidade do solo; Ki, erodibilidade em entressulcos. *Significativo pelo teste T a 5% de probabilidade.

Os fatores K e Ki não apresentaram correlação significativa com as relações Ct/(Ct+Gb) e Gt/(Gt+Hm) (Tabela 7). Kämpf e Curi (2000) afirmam que os óxidos de Fe são importantes componentes em solos tropicais caracterizam-se como indicadores pedoambientais sensíveis. Neste trabalho os teores de Fe_{DCB} e Fe_O apresentaram correlação negativa significativa com os fatores K e Ki, indicando que solos altamente intemperizados tendem a apresentar menor suscetibilidade à erosão. Esse comportamento pode estar associado ao fato dos óxidos de ferro influenciarem positivamente na cimentação das partículas primárias do solo, o que resulta em agregados de alta estabilidade (Veiga et al. 1993; Duiker et al. 2003; Nunes e Cassol 2008).

3.3.2 Espectros do solo

As assinaturas espectrais de materiais são definidas pela sua reflectância, ou absorvância, em função do comprimento de onda (Brown et al. 2006). Na Fig. 10 é possível observar estas assinaturas de uma amostra de solo (seleccionada aleatoriamente) adquirido com os equipamentos Cary 5000 (Vis-NIR), Labspec 4 ADS® (Vis-NIR) e Tensor 27 (MIR) separadamente.

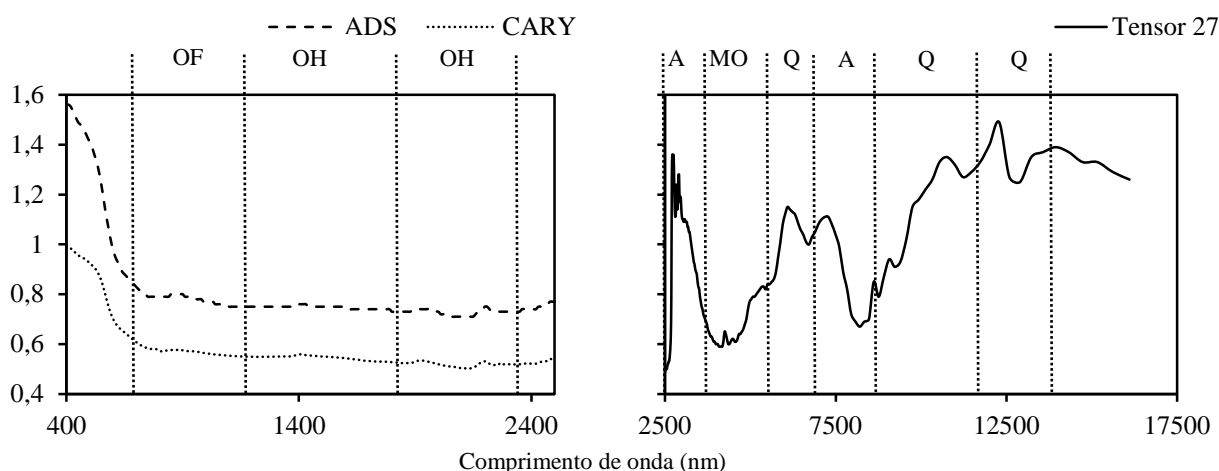


Figura 10. Espectros de uma amostra de solo obtidos nas faixas Vis-NIR-MIR. Estão descritos nos espectros alguns componentes dominantes no solo em determinados picos de absorção. OF, óxidos de ferro; OH, compostos com grupo OH; A, argila; MO, matéria orgânica; Q, quartzo.

Estão descritos nos espectros alguns componentes dominantes no solo em determinados picos de absorção. Na faixa Vis-NIR não foi possível verificar com clareza a presença dos óxidos de ferro e compostos com grupo OH, não pela sua baixa ocorrência, mas pela escala de visualização em que estão os espectros (Figura 10). No entanto, com as informações adquiridas na faixa do MIR, verificam-se picos característicos de alguns componentes importantes, como Argila, MO e Quartzo. As pontuações dos componentes principais revelando a estrutura geral dos dados estão apresentados na Figura 10 e verifica-se que não foram detectados valores discrepantes dentro dos dados.

O posicionamento dos picos de absorção dos componentes do solo estão de acordo com Viscarra Rossel et al. (2006) (Figura 10). A pequena expressão de picos na faixa do Vis-NIR, tanto do equipamento Cary como ADS, quando comparado com o MIR, está relacionada com a interação da intensidade de radiação eletromagnética dos compostos orgânicos e minerais do solo, sendo que na faixa MIR, ocorre na forma de vibrações moleculares fundamentais, enquanto que na faixa Vis-Nir, a mesma se dá por vibrações secundárias resultantes das fundamentais (Janik e Skjemstad 1995; Janik et al. 1998; Karoui et al. 2006; Viscarra Rossel et al. 2006).

Fazendo uma analogia intrínseca do Vis-NIR comparando os equipamentos de bancada (Cary) e de campo (ADS), pode-se afirmar que, apesar de apresentarem posicionamento do espectro diferente (ADS acima e Cary abaixo), a localização e a expressividade dos picos ocorrem na mesma região em ambos, corroborando com os resultados obtidos por Cañasveras et al. (2012). Essa diferença no posicionamento se dá pela diferença no sistema de captação das reflectâncias: enquanto que o Cary 5000 possui uma esfera de reflectância que permite captar a maior parte dos reflexos difusos, o Labspec 4 ADS® possui apenas um receptor de fibra ótica em um ângulo estreito que, ao mesmo tempo, limita a radiação capturada e fornece ao equipamento praticidade para seu uso no campo.

3.3.3 Análises PLS

Estão representados na Tabela 8, os valores correspondentes às estatísticas da validação cruzada das propriedades do solo pela aplicação de PLS aos valores de ERD separadamente e combinados. Os melhores resultados estão marcados em itálico e os valores correspondentes de VIP e os gráficos de validação para os fatores K e Ki, estão representados nas Figuras 11 e 12 respectivamente.

Apesar de Ferraresi et al. (2012) afirmarem que seleção de bandas provoca perda de informações, resultando em calibrações menos precisas, neste trabalho, observou-se que o local onde foi possível estimar as variáveis estudadas de forma mais precisa e eficiente, foi na faixa espectral MIR. Cañasveras et al. (2012) também concluíram em seu trabalho que a melhor faixa espectral para prever as variáveis do solo é o MIR. Merry e Janik (2001), afirmam que a faixa espectral do Vis-NIR é insensível a alguns compostos do solo, como por exemplo, o quartzo,

que é influenciado pelo tamanho das partículas e pelos processos físicos de reflexão da luz, decorrentes da distribuição espacial das partículas de areia e argila.

Quando se trata da granulometria do solo, existe uma atenção especial sobre o teor de argila, pois ela tem forte influência sobre a estrutura do solo e dinâmica da água por meio da promoção da formação de agregados de solo (Stenberg 1999; Stenberg et al. 2010). E foi justamente o teor de argila que a apresentou, dentre as frações granulométricas, melhores valores de predição por ERD na faixa do MIR ($R^2_{adj} = 0,86$ e $RDP = 2,81$), seguida pela ADA, areia ($R^2_{adj} = 0,70$ e $RDP = 1,88$) e silte ($R^2_{adj} = 0,62$ e $RDP = 1,67$) respectivamente (Tabela 8). A ERD é uma importante técnica para quantificar os atributos granulométricos do solo (Ben-Dor e Banin 1995), principalmente em solos altamente intemperizados (Jindaluang et al. 2013) que é o caso dos latossolos brasileiros.

A ERD também foi capaz de prever os atributos Fe_{DCB} e Fe_O de forma confiável, uma vez que apresentaram $RPD=2,73$ e $RPD=1,47$, respectivamente. Fernandes et al. (2004) sugerem o uso da ERD na caracterização de solos brasileiros, especialmente os latossolos, por terem alto nível de intemperismo. O fato da variável Fe_{DCB} ter tido maior valor de RPD pode estar relacionado ao fato de estar em maior ocorrência em relação à variável Fe_O .

Tabela 8. Valores estatísticos da validação cruzada de atributos do solo pela aplicação da regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR) para três sistemas espectroscópicos isolados e combinados.

Variáveis	ERD	PLS	R^2_{adi}	RMSE	RPD	Variáveis	ERD	PLS	R^2_{adi}	RMSE	RPD
Areia (g kg ⁻¹)	Vis-NIR (Cary)	3	0,55	103,9	1,54	Fe _{DCB} (g kg ⁻¹)	Vis-NIR (Cary)	4	0,58	23,9	1,60
	Vis-NIR (ADS)	4	0,44	116,7	1,37		Vis-NIR (ADS)	4	0,60	23,3	1,64
	MIR (Tensor 27)	4	0,70	85,0	1,88		MIR (Tensor 27)	4	0,85	14,0	2,73
	Vis-NIR-MIR (Cary+Tensor 27)	4	0,68	87,8	1,82		Vis-NIR-MIR (Cary+Tensor 27)	3	0,84	14,6	2,62
	Vis-NIR-MIR (ADS+Tensor 27)	4	0,62	96,4	1,66		Vis-NIR-MIR (ADS+Tensor 27)	4	0,83	15,1	2,53
Silte (g kg ⁻¹)	Vis-NIR (Cary)	4	0,33	83,6	1,24	Fe _o (g kg ⁻¹)	Vis-NIR (Cary)	5	0,30	4,2	1,20
	Vis-NIR (ADS)	5	0,43	76,9	1,35		Vis-NIR (ADS)	5	0,40	3,8	1,31
	MIR (Tensor 27)	4	0,62	62,2	1,67		MIR (Tensor 27)	4	0,51	3,4	1,47
	Vis-NIR-MIR (Cary+Tensor 27)	4	0,62	61,8	1,68		Vis-NIR-MIR (Cary+Tensor 27)	2	0,47	3,5	1,42
	Vis-NIR-MIR (ADS+Tensor 27)	4	0,61	63,0	1,65		Vis-NIR-MIR (ADS+Tensor 27)	2	0,41	3,7	1,34
Argila (g kg ⁻¹)	Vis-NIR (Cary)	4	0,62	70,0	1,68	K (t h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	Vis-NIR (Cary)	4	0,26	0,005	1,18
	Vis-NIR (ADS)	4	0,67	64,7	1,82		Vis-NIR (ADS)	4	0,40	0,004	1,32
	MIR (Tensor 27)	3	0,86	41,8	2,81		MIR (Tensor 27)	2	0,55	0,004	1,56
	Vis-NIR-MIR (Cary+Tensor 27)	3	0,85	42,9	2,74		Vis-NIR-MIR (Cary+Tensor 27)	2	0,54	0,004	1,54
	Vis-NIR-MIR (ADS+Tensor 27)	4	0,86	41,9	2,81		Vis-NIR-MIR (ADS+Tensor 27)	3	0,52	0,004	1,50
ADA (g kg ⁻¹)	Vis-NIR (Cary)	4	0,40	27,5	1,32	Ki (kg s m ⁻⁴)	Vis-NIR (Cary)	3	0,55	30361	1,55
	Vis-NIR (ADS)	3	0,40	27,2	1,33		Vis-NIR (ADS)	4	0,49	32578	1,45
	MIR (Tensor 27)	2	0,74	17,5	2,06		MIR (Tensor 27)	4	0,57	29955	1,57
	Vis-NIR-MIR (Cary+Tensor 27)	2	0,74	17,9	2,03		Vis-NIR-MIR (Cary+Tensor 27)	4	0,55	30671	1,54
	Vis-NIR-MIR (ADS+Tensor 27)	3	0,73	18,0	2,01		Vis-NIR-MIR (ADS+Tensor 27)	4	0,55	30701	1,54
MO (g kg ⁻¹)	Vis-NIR (Cary)	4	0,30	5,1	1,21						
	Vis-NIR (ADS)	5	0,36	4,9	1,28						
	MIR (Tensor 27)	5	0,42	4,7	1,33						
	Vis-NIR-MIR (Cary+Tensor 27)	4	0,38	4,9	1,28						
	Vis-NIR-MIR (ADS+Tensor 27)	5	0,35	5,1	1,24						

As melhores correlações da validação cruzada para cada atributo estão mardacas em itálico.

Dentre os parâmetros de erodibilidade, o que apresentou melhor ajuste, foi o K_i , com $R^2_{adj} = 0,57$ e $RDP = 1,57$. No entanto, o uso do MIR para prever K também é válido, uma vez que o $R^2_{adj} = 0,55$ e $RDP = 1,56$. Alguns dos componentes do solo envolvidos nos processos que regulam a erodibilidade do solo são, principalmente, argila e areia (Denardin 1990; Flanagan e Livingston 1995), uma vez que estes são importantes no processo de agregação do solo (Oades 1993; Silva et al. 2012). Portanto a eficiência da ERD na predição dos fatores K e K_i pode estar relacionada ao fato de que esta técnica ser eficiente também na caracterização da argila e da areia (Ferraresi et al. 2012). As previsões de K e K_i foram menos precisas na faixa Vis-NIR e tiveram menores valores de R^2_{adj} em comparação com MIR (Tabela 8). Isso ocorreu provavelmente pelo fato de que na faixa do MIR existe maior capacidade de discriminação de quartzo e minerais de argila, dentre outros (Viscarra Rossel et al. 2006).

Mesmo com os resultados de precisão dos modelos de K e K_i não cercarem os 90% (Tabela 8; Fig. 11), a técnica de análise da ERD das amostras de solo por meio do MIR se mostram confiáveis e aplicáveis para a predição dos fatores K e K_i , pois apresentam precisão acima dos 50% e acurácia acima do limite confiável estabelecido por Chang et al. (2001) essa é uma técnica rápida e de baixo custo (Torrent e Barrón 2008).

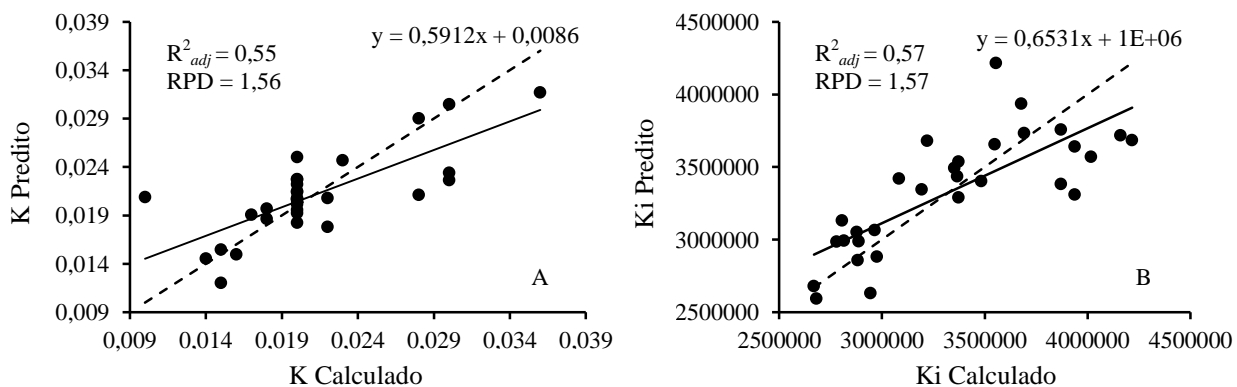


Figura 11. Valores preditos vs observados (validação cruzada) de (A) erodibilidade do solo e (B) erodibilidade em entressulco.

As variáveis que apresentam maiores valores de VIP em um cálculo de regressão PLS são as que possuem maior relevância para predição da variável dependente (Yan et al. 2013). Neste estudo, os maiores valores de VIP, tanto para o fator K como para o fator K_i , estão posicionados nas regiões dos espectros (faixa do MIR) referentes a argila e quartzo (Fig. 12). A

importância da fração argila na predição de K e Ki pode estar relacionada à sua influência na cimentação e estabilização dos agregados do solo (Loch e Rosewell 1992; Camargo et al. 2008) o que diminui a erodibilidade do solo (Wischmeier e Smith 1978). O quartzo está relacionado principalmente à fração areia do solo. Portanto, a importância da areia na predição de K e Ki pode estar relacionada à influência da areia muito fina no selamento superficial do solo (Santos et al. 2008), que aumenta os índices de erodibilidade do solo (Nunes e Cassol 2008).

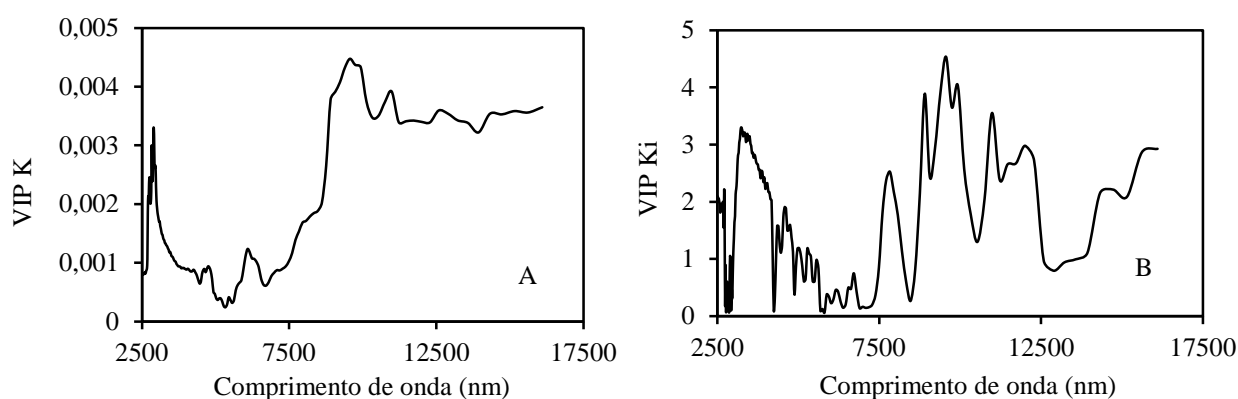


Figura 12. Índice VIP para as melhores correlações de (A) erodibilidade do solo e (B) erodibilidade em entressulcos.

Os resultados desta pesquisa mostram que a ERD pode ser usada para a avaliação simultânea de vários atributos do solo, inclusive os parâmetros de erodibilidade (fator K e Ki). Segundo Viscarra Rossel et al. (2006), a escolha do sistema espectroscópico (Vis-NIR-MIR) vai depender da precisão das previsões, do custo da tecnologia e da quantidade de amostras necessárias. Levando em consideração que obteve-se precisão e acurácia nos modelos gerados, utilizando apenas 30 amostras de solo e ao fato de que as técnicas espectroscópicas são processos analíticos de baixo custo (Gúzman et al. 2013), pode-se afirmar que essa técnica possui aplicabilidade para mapear os parâmetros de erodibilidade do solo, principalmente na faixa do MIR.

3.4 Conclusões

Os fatores K e Ki possuem correlação com alguns atributos mineralógicos que regem a agregação e estabilização das partículas do solo.

O uso da técnica de espectroscopia de reflectância difusa, principalmente na faixa do MIR, é eficiente na predição dos fatores K e Ki em latossolos da região nordeste do estado de São Paulo.

Agradecimentos: A Cordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelas concessões das bolsas de doutorado e de doutorado sanduíche no exterior (Processo N° 18732-12-7). A UNESP (Campus de Jaboticabal) e Universidade de Córdoba (Espanha) pela estrutura cedida para a realização da pesquisa. A usina São Martinho por ceder a área onde foi realizada a amostragem.

3.5 Considerações finais

A problemática desta pesquisa gira em torno da importância da erodibilidade do solo como fator de forte influência na erosão do solo e dos problemas na quantificação direta dessa característica, principalmente no que diz respeito ao tempo e recurso financeiro demandados para esta avaliação.

A erodibilidade do solo, quando diagnosticada previamente, possibilita tomadas de decisões no âmbito do manejo do solo de tal forma que os efeitos da erosão sejam minimizados. Neste trabalho, reintera-se que as funções de petotransferência podem ser utilizadas para estimar a erodibilidade utilizando como agentes pedométricos atributos que são expressos em resposta à mineralogia do solo.

Um desses atributos, a suscetibilidade magnética, foi estudada no capítulo 2. Nesse capítulo, verifica-se que a da suscetibilidade magnética ocorre em resposta à mineralogia do solo e, como tal, é um atributo de forte aplicabilidade em estimar grande parte dos atributos do solo, inclusive os que interferem diretamente na erodibilidade. A simplicidade na sua observação facilita a aplicação em estudos onde é necessário grande número de amostras, a exemplo de estudos de variabilidade especial, como foi visto neste capítulo. Apesar de ser de medição rápida e fácil, a aplicação da suscetibilidade magnética como atributo preditor da

erodibilidade encontra alguns entraves. Estes entraves estão relacionados a necessidade de uma expressão magnética do solo, que não é uma característica comum a todos os solos. Esta expressão magnética está relacionada, dentre outros, ao material de origem.

Já a espectroscopia de reflectância difusa, que foi estudada no capítulo 3, possibilita a obtenção de um grande número de informações também relacionadas à mineralogia do solo, principalmente quando se utiliza a banda do infravermelho médio (MIR). Essa técnica possui, assim como a suscetibilidade magnética, eficiência em estimar a erodibilidade do solo. Contudo, ela se destaca em relação à suscetibilidade magnética por poder ser aplicada indistintamente em todas as classes de solos.

3.6 Literatura Consultada

- AKAIKE, H. **Information theory and an extension of maximum likelihood principle**. In: PETROV BN, CSÁKI F (eds.) International Symposium on Information Theory .Akadémia Kiadó, Budapest, pp. 267-281, 1973.
- ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, A. O. Óxidos de ferro e de alumínio e a mineralogia da fração argila deferrificada de Latossolos Ácricos. **Scientia Agrícola**, v.52, n.3, p.416-421, 1995.
- BEN-DOR, E.; BANIN, A. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. **Soil Science Society American Journal**, v.59, n.2; p.364-372, 1995.
- BENNETT, H.H. The geographical relation of soil erosion to land productivity. **Geographical Review**.18, n.4, p.579-605, 1928.
- BEZERRA, A.S.; CANTALICE, J. R. B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.3, p.565-573, 2006.
- BROWN, D. J.; SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G.; MAYS, M. D.; REINSCH, T. G. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, v.132, n.3-4, p.273-290, 2006.
- BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. **Model Selection and Inference: a Practical Information-Theoretic Approach**. Springer, New York, 1998.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas do relevo: II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2279-2288, 2008.
- CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Instituto Agronomico de Campinas, Campinas, 1986.
- CAÑASVERAS, J. C.; BARRÓN, V.; DEL CAMPILLO, M. C.; TORRENT, J.; GÓMEZ, J. A. Estimation of aggregate stability indices in Mediterranean soils by diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, v.158, n.1-2, p.78-84, 2010.

- CAÑASVERAS, J. C.; BARRÓN, V.; DEL CAMPILLO, M. C.; VISCARRA ROSSEL, R. A. Reflectance spectroscopy: a tool for predicting soil properties related to the incidence of Fe chlorosis. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.10, n.4, p.1133-1142, 2012.
- CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, L.; MARQUES JR, J.; MARCHIORI, D. G. Características de latossolos roxos desenvolvidos de rochas alcalinas e básicas de Jaboticabal, SP. **Scientia Agrícola**, v.52, n.2, p.226-232, 1995.
- CHANG, C. W.; LAIRD, D. A.; MAUSBACH, M. J.; HURBURGH JR, C. R. Near-infrared reflectance spectroscopy-principal components regression analysis of soil properties. **Soil Science Society of American Journal**, v.65, n.2, p.480-490, 2001.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Serviço Geológico do Brasil. Geobank: mapa geológico do Estado de São Paulo – escala 1:750.000**. Disponível em: http://geobank.sa.cprm.gov.br/pls/publico/Projetos.Projeto.Cadastro?p_cod_ Acesso 1 outubro 2012.
- DENARDIN, J. E. **Erodibilidade do solo estimado por meio de parâmetros físicos e químicos**. 1990. 114 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.
- DENEK, K.; SIX, J.; MERCKX, R.; PAUSTIAN, K. Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy. **Soil Science Society of American Journal**, v.68, p.1935–1944, 2004.
- DUIKER, S.W.; RHOTON, F. E.; TORRENT, J.; SMECK, N. E.; LAL, R. Iron (hydr)oxide crystallinity effects on soil aggregation. **Soil Science Society of American Journal**, v.67, n.2, p.606-611, 2003.
- EDUARDO, E. N.; DE CARVALHO, D. F.; MACHADO, R. L.; SOARES, P. F. C. Erodibility, soil cover and management and conservation practices in rainfed ultisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, n.3, p.796-803, 2013.
- EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. **An introduction to the bootstrap**. Monographs on statistics and applied probability, 57. Chapman and Hall, Boca Raton, p 436, 1994.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997, 212p.
- FERNANDES, R. B. A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; FONTES, M. P. F. Quantificação de óxidos de ferro de Latossolos brasileiros por Espectroscopia de Reflectância Difusa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.2, p.245-257, 2004.
- FERRARESI, T. M.; SILVA, W. T. L.; MARTIN-NETO, L.; SILVEIRA, P. M.; MADARI, B. E. Espectroscopia de infravermelho na determinação da textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.6, p.1769-1777, 2012.
- FERRARINI, H. **Determinação de teores nutricionais do milho por espectroscopia no infravermelho e calibração multivariada**. 2004. Tese (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- FERREIRA, M. M. C.; ANTUNES, A. M.; MELGO, M. S.; VOLPE, P. L. O. Quimiometria I: Calibração Multivariada, um tutorial. **Química Nova**, v.22, n.5, p.724-731, 1999.
- FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A., eds. **Water Erosion Prediction Project - WEPP**. West Lafayette, USDA, 1995. p.1-47. (Report, 10).
- FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: HAAN, C. T. (Ed.). **Hydrologic modeling of small watersheds**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1982. p. 297-380. (ASAE Monograph, 5).

- GOMEZ, C.; LE BISSONNAIS, Y.; ANNABI, M.; BAHRI, H.; RACLOT, D. Laboratory Vis-NIR spectroscopy as an alternative method for estimating the soil aggregate stability indexes of Mediterranean soils. **Geoderma**, v.209, p.86-97, 2013.
- GOMEZ, C.; VISCARRA ROSSEL, R. A.; McBRATNEY, A. B. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field Vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. **Geoderma**, v.146, n.3-4, p.403-411, 2008.
- GÚZMAN, G.; QUINTON, J. N.; NEARING, M. A.; MABIT, L.; GÓMEZ, J. A. Sediment tracers in water erosion studies: current approaches and challenges. **Journal of Soil and Sediments**, v.13, n.4, p.816-833, 2013.
- JANIK, L. J.; MERRY, R. H.; SKJEMSTAD, J. O. Can mid infra-red diffuse reflectance analysis replace soil extractions? **Australian Journal Experimental Agriculture**, v.38, n.7, p.681-696, 1998.
- JINDALUANG, W.; KHEORUENROMNE, I.; SUDDHUPRAKARN, A.; SINGH, B. P.; SINGH, B. Influence of soil texture and mineralogy on organic matter content and composition in physically separated fractions soils of Thailand. **Geoderma**, v.195-196, p.207-219, 2013.
- KÄMPF, N.; CURI, N. **Óxidos de ferro: Indicadores de ambientes pedogênicos**. In: Novais RF, Alvarez VVH, Schaefer CEGR. Tópicos em ciência dosolo, Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1. p.107-138, 2000.
- KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Avaliação da estimativa de substituição de Fe por Al em hematitas de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.209-213, 1998.
- KAROUI, R.; MOUAZEN, A. M.; DUFOUR, É.; SCHOONHEYDT, R.; BAERDEMAEKER, J. D. A comparison and joint use of VIS-NIR and MIR spectroscopic methods for the determination of some chemical parameters in soft cheeses at external and central zones: a preliminary study. **European Food Research and Technology**, v.223, n.3, p.363-371, 2006.
- LAL, R. **Erodibility and erosivity**. In: LAL, R. et al. Soil erosion research methods. Washington: Soil and Water Conservation Society, pp. 141-160, 1988.
- LANE, L. J.; NEARING, M. A. **USDA - Water erosion prediction project: hillslope profile model documentation**. West Lafayette: National Soil Research Laboratory, USDA – Agricultural Research Service. pp. A1-S1, 1989.
- LEE, J. H.; HEO, J. H. Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea. **Journal of Hydrology**, v.409, n.1-2, p.30-48, 2011.
- LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B.; LIBARDI, P. L.; SOUZA FILHO, A. P. **Comparative evapotranspiration of Eucalyptus, Pine and natural cerrado vegetation measured by the soil water balance method**. IPEF International, v.1, p.5-11, 1990.
- LOCH, R. J.; ROSEWELL, C. J. Laboratory methods for measurement of soil erodibilities (K-factors) for the Universal Soil Loss Equation. **Australian Journal of Soil Research**, v.30, n.2, p.233-248, 1992.
- MADARI, B. E.; REEVES, J. B.; MACHADO, P. L. O. A.; GUIMARÃES, C. M.; TORRES, E.; McCARTY, G. W.; Mid- and near-infrared spectroscopic assessment of soil compositional parameters and structural indices in two Ferralsols. **Geoderma**, v.136, n.1-2, p.245-259, 2006.
- MALLEY, D.F.; MARTIN, P.D.; BEN-DOR, E. **Application in Analysis of Soils**. In: Roberts, C.A., Workman, J., Reeves, J.B.I.I.I. (Eds.), Near-Infrared Spectroscopy in Agriculture. Soil Science Society of America, WI:729–784, 2004.
- MARTÍNEZ-CARRERAS, N.; KREIN, A.; UDELHOVEN, T.; GALLART, F.; IFFLY, J. F.; HOFFMANN, L.; PFISTER, L.; WALLING, D. E. A rapid spectral-reflectance-based

- fingerprinting approach for documenting suspended sediment sources during storm runoff events. **Journal of Soil and Sediments**, v.10, n.3, p.400-413, 2010.
- MASSART, D. L.; VANDEGINSTE, B. G. M.; BUYDENS, L. M. C.; DE JONG, S.; LEWI, P. J.; SMEYERS-VERBEKE, J. **Handbook of chemometrics and qualimetrics** Part A. Elsevier Science, Amsterdam, 1998.
- MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clay by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, v.7, p.317-327, 1960.
- MERRY, R. H.; JANIK, L. J. **Mid infrared spectroscopy for rapid and cheap analysis of soils**. In: Proceedings of the Tenth Australian Agronomy Conference, 2001. Disponível em <http://www.regional.org.au/au/asa/2001/3/c/merry.htm> Acesso 1 outubro 2012
- MINITAB Inc. **Release 14 for Windows**, State College, USA, 2003.
- NANNI, M. R.; DEMATTE, J. A. W. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. **Soil Science Society American Journal**, v.70, n.2, p.393-407. 2006.
- NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.spe, p.2839-2845, 2008
- OADES, J. M.; The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma**, n.1-4, v.56, p.377-400, 1993.
- OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; SOBRINHO, T. A.; PANACHUKI, E.; WENDLAND, E. Use of SRTM data to calculate the (R) USLE topographic factor. **Acta Science Technology**, v.35, n.3, p.507-513, 2013.
- RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Fundação Cargill, pp.107, 1987.
- SANCHEZ, R. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; MARTINS FILHO, M. V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedofomas. **Bragantia**, v.68, n.4, p.1095-1103, 2009.
- SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA JUNIOR, V. P. Erosão hídrica e perda de carbono orgânico em diferentes tipos de cobertura do solo no semiárido, em condições de chuva simulada. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.13, n.2, p.113-125, 2008.
- SCHWERTMANN, U. Use of oxalate for Fe extraction from soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v.53, n.2, p.244-246, 1973.
- SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of Southern and Central Brazil. **Soil Science**, v.139, p.344-350, 1985.
- SILVA, G. R. V.; SOUZA, Z. M.; MARTINS FILHO, M. V.; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. Soil, water and nutrient losses by interrill erosion from green cane cultivation. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.36, n.3, p.963-970, 2012.
- SILVERSTEIN, R. M.; FRANCIS, X. R.; KIEMLE, D. J. W. Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de análise Instrumental**. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- SKOOG, D. A.; LEARY, J. J. **Principles of Instrumental Analysis**. Saunders College Publishing: USA, 2002.
- SOUZA, C. K.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; PEREIRA, G. T. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um Latossolo em Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.6, p.1067-1074, 2003.

- SOUZA, Z. M.; BEUTLER, A. N.; PRADO, R. M.; BENTO, M. J. C. Efeito de sistemas de colheita de cana-de-açúcar nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho. **Científica** v.34, n.1, p.31-38, 2006.
- STENBERG, B. Monitoring soil quality of arable land: Microbiological indicators. **Acta Agriculture Scandinavica**, v.49, p.1–24, 1999.
- STENBERG, B.; VISCARRA ROSSEL, R. A.; MOUAZEN, A. M.; WETTERLIND, J. Chapter Five – Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. **Advanced in Agronomy**, v.107, p.163-215, 2010.
- THORNTHWAITE, C. W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n.1, p. 55-94, 1948.
- UEHARA, G. **Acric properties and their significance to soil classification**. In: International Soil Classification Workshop, 8., Rio de Janeiro: Embrapa/Snlcs, p.19-22, 1988.
- VEIGA, M.; CABEDA, M. S. V.; REICHERT, J. M. Erodibilidade em entressulcos de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.17, p.289-298, 1993.
- VISCARRA ROSSEL, R. A. ParleS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v.90, n.1, p.72-83, 2008.
- VISCARRA ROSSEL, R. A.; WALVOORT, D. J. J.; McBRATNEY, A. B.; JANIK, L. J.; SKJEMSTAD, J. O. Visible, near-infrared, mid-infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, v.131, n.1-2, p.59–75, 2006.
- VISCARRA ROSSEL, R. A.; WALVOORT, D. J. J.; McBRATNEY, A. B.; JANIK, L. J.; SKJEMSTAD, J. O. Visible, near-infrared, mid-infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, v.131, n.1-2, p.59–75, 2006.
- WILLIAMS, P. C. E.; NORRIS, K. H. **Near infrared technology in the agricultural and food industries**. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, 1990.
- WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.26, p.189-193, 1971.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation planning**. Washington: Department of Agriculture, 1978. 58 p. (Agriculture Handbook 537).
- WOLD, S.; SJÖSTRÖM, M.; ERIKSSON, L. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v.58, n.2, p.109-130, 2001.
- WYSZECKI, G.; STILES, W. S. **Color Science: concepts and methods, quantitative data and formulae**. (2nd ed.). New York: Wiley, 1982.
- YAN, B.; FANG, N. F.; ZHANG, P. C.; SHI, Z. H. Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: An assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression. **Journal of Hydrology**, v.484, p.26-37, 2013.