

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

**QUALIDADE E ERODIBILIDADE DE LATOSSOLOS SOB
MATA E CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Ludmila de Freitas
Bióloga

2014

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

**QUALIDADE E ERODIBILIDADE DE LATOSSOLOS SOB
MATA E CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Ludmila de Freitas

Orientador: Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho

Co-orientador: Prof. Dr. José Carlos Casagrande

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)

F866q Freitas, Ludmila de
Qualidade e erodibilidade de Latossolos sob mata e cultivo de
cana-de-açúcar / Ludmila de Freitas. -- Jaboticabal, 2014
xiii, 125 p. : il. ; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2014
Orientador: Marcílio Vieira Martins Filho
Banca examinadora: Marcio Roberto Soares, Carolina Fernandes,
Zigomar Menezes de Souza, José Marques Júnior
Bibliografia

1. Atributos do Solo. 2. Multivariada. 3. Erosão. 4. Suscetibilidade
Magnética. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias.

CDU 631.41:633.61

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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: QUALIDADE E ERODIBILIDADE DE LATOSSOLOS SOB MATA E CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

AUTORA: LUDMILA DE FREITAS

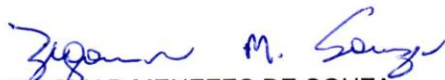
ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCILIO VIEIRA MARTINS FILHO

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE CARLOS CASAGRANDE

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



Prof. Dr. MARCILIO VIEIRA MARTINS FILHO
Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA
Departamento de Água e Solo / Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. MÁRCIO ROBERTO SOARES
Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental / Universidade Federal de São Carlos / Araras/SP



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



Profa. Dra. CAROLINA FERNANDES
Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Data da realização: 18 de junho de 2014.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

LUDMILA DE FREITAS – nascida no dia 09 de maio de 1984 em São José do Rio Preto – SP, graduada em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual Paulista– Campus de Ilha Solteira, SP (2007). Especialista em Gerenciamento Ambiental pela Universidade de São Paulo – ESALQ – Piracicaba – SP (2010) (Título da monografia: Parâmetros químicos e físicos de solo cultivado com cana-de-açúcar próximo a fragmentos florestal nativo – Bolsista CAPES). Mestre em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual Paulista (2010) – Campus de Rio Claro SP (2011) (Título da Dissertação: Influência de fragmentos florestais nativos sob os parâmetros químicos, físicos e microbiológicos de solos cultivados com cana-de-açúcar). Iniciou o doutorado em 2011 no curso de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) pela FCAV/UNESP Jaboticabal (Título do Projeto de Tese: Qualidade e erodibilidade de Latossolos sob mata e cultivo de cana-de-açúcar – Bolsista CAPES). Atua na área de Agronomia com ênfase em conservação do solo, nos temas de análise multivariada a fim de determinar o índice de qualidade do solo, através dos atributos químicos e físicos do solo, modelagem de erodibilidade do solo e técnicas de quantificação indireta de atributos químicos e físicos do solo e de erodibilidade do solo pela suscetibilidade magnética.

**"O solo não é uma herança que recebemos de nossos pais,
mas sim um patrimônio que tomamos emprestado de nossos filhos"**

Lester Brown

DEDICO

Ao Ivanildo Amorim de Oliveira, pelo companheirismo, carinho, paciência, dedicação e ajuda em todas as etapas deste trabalho. Obrigada por ser assim, tão especial.

OFEREÇO

Aos meus pais, Valtair e Angela, que através da simplicidade e amor de Deus, tiveram a sabedoria para orientar os meus passos por todo o esforço incondicional, dedicação, carinho, amor, paciência e estímulo que me ofereceram, dedico-lhes a conquista de mais um objetivo como gratidão.

A minha irmã, Larissa, pela amizade e carinho dedicados durante todo o caminho percorrido em nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por mais esta conquista e a iluminação durante essa jornada.

Ao Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho, pela oportunidade, confiança, ensinamentos, orientação e disposição durante a realização do curso e deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Carlos Casagrande, pela orientação, confiança, amizade e apoio nesses últimos 5 anos.

Aos meus pais Valtair e Angela, pela vida, amor, carinho, educação, formação moral e religiosa, pelo apoio, incentivo e dedicação em todos os momentos da minha vida.

A minha irmã Larissa, pelo convívio, amizade, ensinamentos e força nos momentos mais difíceis.

Ao Ivanildo Amorim de Oliveira, pelo apoio, ajuda nas coletas, análises de laboratório, paciência, revisão do trabalho e por estar presente em todos os momentos desse trabalho.

Ao Dr. Diego Siqueira, pela colaboração, pelas idéias, pelo amor no que faz e por não medir esforços em ajudar em nenhum momento, obrigada!

Ao mestrando Luiz Gabriel, pela ajuda na modelagem deste trabalho.

Ao grupo Raizen - Unidade Bonfin e a Usina São Martinho pela concessão das áreas experimentais e suporte de campo.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Adubos, em especial a Célia, Maria Inês, Dejair e Mauro, e ao funcionário e amigo Thiago Fieno pelo suporte durante as coletas, análises de laboratório e pelos momentos de descontração.

Aos funcionários da direção, Antônio Fieno e Luciana, por me socorrerem sempre que preciso em busca de encontrar o Prof. Marcílio.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por fomentar esse trabalho por meio da bolsa de doutorado.

Aos professores da Pós Graduação em Ciência do Solo, pela contribuição à minha formação profissional, em especial a professora Carolina Fernandes pela amizade e apoio em todos os momentos durante esta etapa.

Aos funcionários da Seção de Pós-Graduação, em especial a Gabriela, Diego e Márcia, por sempre estarem dispostos a esclarecer minhas dúvidas.

A Prof. Carolina Fernandes, Prof. José Eduardo Corá e Prof. José Marques Júnior pela liberação do uso do laboratório.

Aos professores José Marques Júnior, Carolina Fernandes, Newton La Scala Júnior e o Dr. Diego Silva Siqueira pela participação na Comissão Examinadora de Qualificação para Doutorado.

Aos professores da Banca de Defesa: Márcio Roberto Soares, Zigomar Menezes de Souza, José Marques Júnior e Carolina Fernandes que, por meio de suas sugestões e questionamento, contribuíram para o enriquecimento do trabalho, mas principalmente pelo meu crescimento profissional.

Aos amigos Thaísa Moretti, Aluísio Togoro e Fredgardson Costa Martins pela ajuda nas coletas de campo e análises no laboratório.

Aos amigos que fiz durante a minha estada em Jaboticabal, Iolanda, Liliane, Flávia, Ronny, Thiago, Renato, Ederlon, Eliza, Marilena, Saulo, Jussara, Thaisa, Vinícius, Aluísio, Juliana, Janaína, Junno e Nhayandra, pela amizade, pelos momentos de descontração e companhia durante o período do curso.

As minhas eternas amigas que tive a oportunidade de conhecer e conviver durante os anos de faculdade e que perdura até os dias de hoje, Monica, Nádia e Veronica, e ao nosso mascote Arthur, que embora distantes, sempre presentes em minha vida pessoal e profissional. Que esta amizade perdure por muitos e muitos 10 anos.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para o sucesso desse trabalho, e que embora não estejam citados, nunca serão esquecidos.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE ABREVIACÕES.....	x
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.1 Introdução e justificativas	1
1.2. Reviso de literatura	3
1.2.1 Aspectos conceituais de Qualidade de solo.....	3
1.2.2 Indicadores de qualidade de solo.....	5
1.2.3 Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo	7
1.2.4 Avaliação da qualidade do solo.....	9
1.2.5 Erodibilidade e a qualidade do solo	12
1.2.6 Uso de ferramentas na determinação indireta da erodibilidade do solo.....	14
1.2.7 Uso da suscetibilidade magnética na ciência do solo	16
1.3 Referências	19
CAPÍTULO 2 – ÍNDICE DE QUALIDADE PARA LATOSSOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR E MATA NATIVA NO NORDESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO	35
2.1 Introdução	36
2.2. Material e métodos.....	39
2.3. Resultados e discussão.....	50
2.4 Conclusões.....	64
2.5 Referências	65
CAPÍTULO 3- PREDIÇÃO DE ERODIBILIDADE DO SOLO POR MÉTODOS INDIRETOS EM ÁREAS SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	75
3.1 Introdução	76
3.2 Material e métodos.....	79
3.3 Resultados e discussão.....	86
3.4 Conclusões.....	93
3.6 Referências	94
CAPÍTULO 4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
APÊNDICES.....	105

LISTA DE ABREVIações

MO	Matéria orgânica
P	Fósforo
K ⁺	Potássio
Mg ²⁺	Magnésio
Ca ²⁺	Cálcio
CTC	Capacidade de troca de cátions
Al ³⁺	Alumínio
H+Al	Acidez potencial
SB	Soma de Bases
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
m%	Saturação por Alumínio
V%	Saturação por Bases
Macro	Macroporosidade
Micro	Microporosidade
Pt	Porosidade Total
Ds	Densidade do solo
DMP	Diâmetro Médio Ponderado (DMP)
K	Erodibilidade global
Ki	Erodibilidade em sulcos em entressulcos
Kr	Erodibilidade em entressulcos
τ_c	Tensão Cisalhante Crítica
SM	Suscetibilidade magnética
QS	Qualidade do solo
IQS	Índice de Qualidade do Solo
ACP	Análise de Componente Principal
CP	Componente Principal
Can	Canônica
MAP	Modelo Aditivo Ponderado
FPT	Função de Pedotransferência
RMSE	Erro padrão das estimativas normalizado
CD	Coeficiente de determinação
EF	Eficiência do modelo
CRM	Coeficiente de massa residual
ME	Erro máximo
MD	Diferença média

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 1. Autovalores e % da variância total dos dados pela Análise dos Componentes Principais para as análises do solo.	51
Tabela 2. Correlação entre cada componente principal e variáveis analisadas nos três ambientes estudados.	52
Tabela 3. Valores resultantes da análise discriminante canônica, evidenciando o peso de cada variável.	56
Tabela 4. Estrutura do modelo com as funções, os indicadores, os pesos relativos e os limites críticos.	60
Tabela 5. Análise de variância para o IQS do solo das áreas de cana-de-açúcar. ...	61

Capítulo 3

Tabela 1. Valores da estatística descritiva das variáveis analisadas nos ambientes estudados.	87
Tabela 2. Modelos para estimativas de erodibilidade global (K), em entressulcos (K _i) e em sulcos (K _r) e tensão cisalhante crítica (τ_c) de latossolos em função da suscetibilidade magnética (SM).	90
Tabela 3. Parâmetros estatísticos de desempenho de equações para a predição de erodibilidade global (K), em entressulcos (K _i) e em sulcos (K _r) e tensão cisalhante crítica (τ_c) de Latossolos em função da suscetibilidade magnética (SM).	92

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1. Diferentes tipos de comportamento magnético. 17

Capítulo 2

Figura 1. Localização das áreas no Estado de São Paulo e esquema de amostragem de solo..... 39

Figura 2. Funções de pontuação padronizada: (a) “mais é melhor”, (b) “valor máximo”, e (c) “menos é melhor” (L – limite inferior; B – linha base; U – limite superior; O – ótimo). Fonte: Adaptado de Wymore, 1993. 49

Figura 3. Análise de componentes principais das médias dos atributos do solo..... 53

Figura 4. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos (G) e sub-grupos (SB) segundo as variáveis selecionadas da análise de componente principal. 54

Figura 5. Agrupamento das áreas pela Análise Discriminante Canônica 1 e 2 (Can 1 e Can 2) das variáveis selecionadas na análise de componente principal..... 55

Figura 6. Proporção da variação no conjunto de dados físicos explicada pelo componente principal (PC) e contribuição de cada variável para explicação da variância total pelo método “scree plot” para os solos das áreas de mata..... 58

Figura 7. Proporção da variação no conjunto de dados químicos explicada pelo componente principal (PC) e contribuição de cada variável para explicação da variância total pelo método “scree plot” para os solos das matas..... 59

Figura 8. Proporção da variação no conjunto de dados químicos e físicos explicada pelo componente principal (PC) e contribuição de cada variável para explicação da variância total pelo método “scree plot” para os solos. 59

Capítulo 3

Figura 1. Localização das áreas no Estado de São Paulo e esquema de amostragem de solo..... 79

QUALIDADE E ERODIBILIDADE DE LATOSSOLOS SOB MATA E CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO - A avaliação da qualidade do solo é uma ferramenta importante para monitorar a sua degradação bem como planejar a implantação de práticas sustentáveis de manejo. O objetivo deste trabalho foi definir atributos físicos e químicos do solo para determinar a qualidade do solo e validar um modelo de índice de qualidade do solo, em Latossolos com produção de cana-de-açúcar e mata nativa. O estudo foi realizado nos municípios de Araras, Santa Ernestina e Guariba no estado de São Paulo. Foram coletadas 24 amostras de solo deformadas e indeformadas na profundidade de 0,0-0,10 m, em três áreas cultivadas com cana-de-açúcar e adjacentes de matas nativas. Foram avaliados os seguintes atributos do solo: a) químicos - pH em CaCl_2 , matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), acidez potencial (H+Al), alumínio (Al^{3+}) e enxofre (S); b) físicos: macro, microporosidade, densidade do solo (Ds), estabilidade de agregados, diâmetro médio ponderado (DMP), erodibilidade global (K), em sulcos (K_r), em entressulcos (K_i), tensão cisalhante (τ_c) e a susceptibilidade magnética (SM). Os dados foram submetidos a análises estatísticas multivariadas a fim de verificar as similaridades e/ou diferenças das áreas estudadas e para identificar os atributos indicadores de qualidade do solo bem como a determinação dos seus valores nas funções para determinar o índice de qualidade do solo (IQS). O estudo mostrou que a análise multivariada pelo método do *scree-plot* foi eficiente para determinar os atributos físicos e químicos que foram mais sensíveis em discriminar as áreas avaliadas sendo eles, a areia total, suscetibilidade magnética, argila, microporosidade, magnésio, cálcio, pH e matéria orgânica e que a área com maior teor de argila apresentou melhor qualidade do solo quando comparado com valores de referência de mata nativa enquanto que não houve diferenças entre as áreas quanto comparadas com os valores de referência agrônômicos. Porém, os índices de qualidade dos solos foram baixos evidenciam a necessidade da adoção de práticas de manejo para que a qualidade do solo seja recuperada. Por outro lado, os dados foram submetidos às funções de pedotransferência (FPT), para estimar os fatores K, K_i , K_r e τ_c em função da suscetibilidade magnética (SM) e foram modeladas por meio de análise de regressão linear e por validação cruzada. As equações analisadas permitiram boas estimativas dos valores de erodibilidade global (K), em entressulcos (K_i) e em sulcos (K_r) e tensão cisalhante crítica (τ_c) em função da SM, cujos resultados são compatíveis com registros da literatura. Testes adicionais são necessários para comprovar o uso acurado e eficiente das equações propostas e testadas, em condições diferentes das utilizadas no presente trabalho.

Palavras-chave: atributos do solo, multivariada, erosão, suscetibilidade magnética.

QUALITY AND OXISOLS ERODIBILITY UNDER FOREST AND SUGAR CANE CULTIVATION

ABSTRACT - The evaluation of soil quality is an important tool to monitor the degradation as well as planning the deployment of sustainable practices of management. The aim of this work was to define physical and chemical attributes of soil to determine soil quality and validate a model of index of soil quality, in Oxisols with sugar cane production and native forest. The study was carried out in the municipalities of Araras, Santa Ernestina and Guariba in the state of Sao Paulo. Twenty-four samples were collected from soil disturbed and undisturbed in the 0.0-0.10 m, in three areas cultivated with sugar cane and adjacent native forest. We evaluated the following attributes of the soil: (a) chemical - pH (in CaCl_2), organic matter (OM), phosphorus (P), potassium (K^+), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), potential acidity (H+Al), aluminum (Al^{3+}) and sulfur (S); (b) physical: macro, microporosity, soil bulk density (Ds), aggregate stability, diameter weighted average (DMP), global erodibility (K), in rill erodibility (Kr), interrill erodibility (Ki), critical shear stress (τ_c) and magnetic susceptibility (MS). The data were submitted to statistical analysis multivariate in order to check the similarities and/or differences in the areas studied with different textural gradient and to identify the attributes indicators of soil quality as well as the determination of their values in functions to determine the index of soil quality (ISQ). The study showed that the multivariate analysis by the method of the scree-plot was efficient to determine the physical and chemicals attributes that were more sensitive to discriminate between the evaluated areas being them, total sand, magnetic susceptibility, clay, microporosity, magnesium, calcium, pH and organic matter and that the area with the highest clay content had the best quality of soil when compared with reference values of native forest while there were no differences between the areas as compared with the reference values agronomist. However, the indices of soil quality were low demonstrate the need for adoption of management practices to ensure that the quality of the soil is recovered. On the other hand, the data were submitted to the functions of pedotransferencia (FPT) to estimate the factors K, Ki, Kr and τ_c according to the magnetic susceptibility (MS), and were modeled by linear regression analysis and by cross-validation. The equations analyzed allowed good estimates of the values K, Ki, Kr and τ_c as a function of MS, whose results are consistent with the literature. Additional tests are needed to prove the use accurate and efficient of equations proposed and tested in conditions different from those used in the present study

Keywords: soil attributes, multivariate, soil erosion, magnetic susceptibility.

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1.1 Introdução e justificativas

O solo é um recurso responsável pela produtividade agropecuária, pela manutenção da qualidade do meio ambiente e, conseqüentemente, pela sanidade de plantas, animais e seres humanos (SHARMA et al., 2005). No entanto, seu uso inadequado, tem ocasionado a degradação de seus atributos físicos, químicos e biológicos como, por exemplo, a desestruturação e compactação, redução da fertilidade, perda acelerada da matéria orgânica e diminuição da diversidade e quantidade de organismos no solo (LEITE et al., 2010) interferindo na qualidade do mesmo. No Brasil a expansão de cultivos com cana-de-açúcar em larga escala ocupou grandes áreas, principalmente no sistema de cultivo convencional. No estado de São Paulo, áreas cobertas por floresta natural foram gradativamente substituídas por canaviais e mantidas por períodos superiores a 60 anos (FREITAS, 2011), causando alterações nos atributos do solo e na sua qualidade.

Em se tratando da qualidade química, muitos estudos mostram que as modificações destes atributos são decorrentes dos diferentes sistemas de manejo agrícola (FREITAS, 2011; FREITAS et al., 2012a; OLIVEIRA, 2013). Ademais as alterações nos teores de nutrientes do solo e o conhecimento da fertilidade dos solos é um dos fatores primordiais para a obtenção de sucesso na atividade agrícola (FRAZÃO et al., 2008). No que se refere aos atributos físicos do solo, com a conversão de áreas naturais em sistemas agrícolas, provocam mudanças significativas conforme destacam Collares et al. (2008), em razão do seu revolvimento, tráfego contínuo de máquinas e equipamentos agrícolas, resultando em alteração estrutural, aumentos da densidade do solo, resistência do solo à penetração e redução da macroporosidade (RAPER, 2005).

Ao se pensar em qualidade do solo é necessário ter mente que a erosão é um fator que está diretamente relacionada com a sua qualidade, pois é um processo que altera os atributos do solo devido a perda de solo, nutrientes e a água. A erosão do solo é considerada a forma mais prejudicial de degradação (COGO; LEVIEN; SCHWARZ, 2003) e é o principal fator causador da insustentabilidade nos sistemas de produção agrícola (MEIRELLES et al., 2005). Além disso, estudos sobre a qualidade e erodibilidade do solo, muitas vezes necessitam de um grande número

de amostras, o que implica a elevação do custo, tempo de coleta e realização das análises dos atributos do solo e impacto ambiental provocado pela utilização de reagentes. Para amenizar este problema, o uso da suscetibilidade magnética é um método alternativo para estimar atributos físicos e químicos (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000) e a erodibilidade do solo (BARBOSA, 2014), que, por sua vez, reflete diretamente a composição e estrutura dos minerais presentes no solo e que variam sua força de atração sob influência de campos magnéticos (COSTA et al., 1999).

Uma maneira de avaliar a qualidade do solo é através da análise estatística multivariada que corresponde uma importante ferramenta para tal finalidade, pois esta é capaz de detectar e avaliar diversos tipos de variáveis ao mesmo tempo, por meio de combinações lineares, subsidiando informações relevantes (FERREIRA, 2008; MANLY, 2008) e auxilia na seleção de indicadores que contribuem efetivamente para a variância total dos dados, levando-se em conta fatores bióticos e abióticos que interferem na qualidade do solo (MALUCHE-BARETTA; AMARANTE; KLAUBERG FILHO, 2006). Outra forma de avaliar a qualidade do solo, é por meio de modelos que expressam a qualidade do solo a partir de ponderar valores nas funções do solo e seus atributos.

Neste contexto de avaliação da qualidade do solo visando à sustentabilidade dos sistemas de produção, a modelagem e a identificação da erosão e de seus componentes são importantes aspectos no monitoramento e controle da degradação ambiental dos solos tropicais, visto que os modelos podem ser usados para estabelecer mais conhecimentos sobre os sistemas ambientais no ajuste de métodos para prever o manejo desses ecossistemas (BEVEN, 1989; GRAYSON et al., 1992).

Assim este estudo se justifica sob a hipótese de que a qualidade do solo está diretamente relacionada com a perda de solo por erosão e a relação com os atributos químicos e físicos do mesmo. Ademais, tendo em vista que os sistemas de manejo alteram os atributos do solo e que estes podem afetar a qualidade do mesmo, o trabalho teve como objetivo definir quais atributos do solo possui a capacidade de determinar a qualidade do solo e validar um modelo para a determinação de índice de qualidade do solo, baseado nos atributos e indicadores de natureza química e física em áreas de produção de cana-de-açúcar e mata nativa.

1.2. Revisão de literatura

1.2.1 Aspectos conceituais de Qualidade de solo

O conceito qualidade do solo é relativamente recente e tem sido mais utilizado para avaliar a sustentabilidade de diferentes práticas de manejo no solo. Uma boa qualidade do solo constitui-se no mais importante elo entre as práticas agrícolas e a agricultura sustentável (SANTANA; BAHIA-FILHA, 1998). Por interferirem diretamente na produtividade das plantas, até pouco tempo atrás, apenas os atributos químicos e físicos do solo eram considerados na avaliação dos impactos e da capacidade produtiva (SCHOENHOLTZ; MIEGROET, BURGER, 2000). Contudo, a crescente valorização dos serviços ambientais, proporcionados pelos sistemas florestais, tem estimulado a inclusão de atributos biológicos do solo entre os parâmetros que avaliam as práticas de manejo e seus impactos ao meio ambiente (SILVA et al., 2009).

No início da década de 1990, a discussão sobre Qualidade do Solo (QS) foi intensificada, devido à comunidade científica estar consciente da importância do solo para a qualidade ambiental e para a sustentabilidade agrícola. Os precursores em alertar sobre a relação do manejo do solo e a sustentabilidade da agricultura foram Lal e Pierce (1991). Tais autores instigaram a comunidade científica a buscar sistemas de manejo inovadores, capazes de balancear o requerimento do solo e das culturas. “A ênfase não está em maximizar a produção, mas sim em otimizar o uso do recurso e sustentar a produtividade por um longo período”, alertaram eles.

Os pesquisadores Doran e Parkin (1994) propuseram um conceito de QS, que mais tarde foi reformulado por Doran (1997), sendo ainda utilizado nos dias atuais: **“Qualidade do solo é a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde das plantas, dos animais e dos homens”**. Em outras palavras, é a capacidade do solo exercer suas funções na natureza (DORAN, 1997), que são: funcionar como meio para o crescimento das plantas; regular e compartimentalizar o fluxo de água no ambiente; estocar e promover a ciclagem de elementos na biosfera; e servir como tampão ambiental na formação, atenuação e degradação de

compostos prejudiciais ao ambiente (LARSON; PIERCE, 1994, KARLEN et al., 1997). Portanto, QS esta relacionada com as funções que capacitam o solo a aceitar, estocar e reciclar água, nutrientes e energia (CARTER, 2001).

Segundo Karlen et al. (1994), a definição mais aceita atualmente de qualidade do solo é uma avaliação sistêmica desse recurso, que permite compreender a capacidade de um determinado solo desenvolver múltiplas funções no ambiente, mantendo a sustentabilidade do ecossistema. O processo de avaliação da qualidade do solo necessariamente envolve a seleção de indicadores, os quais são atributos e ou propriedades pedogenéticas naturais que podem ser utilizados para avaliar o comportamento de um solo específico.

Nessa mesma linha de pensamento, que busca a determinação de um Índice de Qualidade do Solo (IQS), alguns autores acreditam que a produtividade é a expressão final da qualidade de um solo, pois a alta produtividade das culturas ocorre quando atributos biológicos, físicos e químicos estão em boas condições. Lapen et al. (2004) afirmaram que bons níveis de variáveis relacionadas com alta produtividade significam que essas variáveis são boas para determinar QS.

Segundo Zilli et al. (2003), uma moderna concepção de qualidade de solo deve ser coerente com as particularidades inerentes a cada ecossistema. Deve considerar, por exemplo, que o principal problema nos solos tropicais é a degradação do solo e a carência de nutrientes, enquanto, nos solos temperados, a contaminação química costuma ser a maior preocupação. Esses mesmos autores afirmaram que uma abordagem diferenciada é essencial para que se encontrem soluções que efetivamente contribuam para o desenvolvimento de manejos sustentáveis do solo. Além disso, a difusão do conceito de qualidade do solo, tanto entre pesquisadores como entre agricultores, é um fator importante para o desenvolvimento de aspectos culturais voltados à agricultura.

No Brasil, pesquisadores da Ciência do solo estão buscando os indicadores mais adequados para avaliar QS nas condições brasileiras e, surgem propostas de indicadores físicos (FIDALSKI; TORMENA, 2007), químicos (RIBEIRO et al., 2007), biológicos (CHAER; TOTOLA, 2007; RIBEIRO et al., 2007) e a integração destes (ARAÚJO et al., 2007; FREITAS et al., 2012b).

A maioria do pensamento em relação à QS está centrada na identificação de um índice capaz de servir como indicador, assim como existem indicadores para qualidade do ar e da água. Cientistas do solo, agricultores e instituições

governamentais tem interesse em obter um indicador de qualidade do solo para avaliar terras, em relação a degradação, estimar necessidades de pesquisa e de financiamentos e julgar práticas de manejo, a fim de monitorar mudanças nas propriedades e nos processos do solo, na sustentabilidade e na qualidade ambiental, que ocorram no tempo, em resposta ao uso da terra e as práticas de manejo (DORAN; PARKIN, 1994; DORAN, 1997; KARLEN et al., 2001).

Contudo, o conceito de qualidade é abstrato, razão por que se faz necessário o desenvolvimento de sistemas de avaliação quantitativos, baseados em uma combinação de propriedades do solo ou em indicadores de qualidade que melhor reflitam as principais alterações em curso.

1.2.2 Indicadores de qualidade de solo

Até o presente, não existe um método prático e confiável para estimar a qualidade do solo (KARLEN et al., 1997). Porém, mudanças na qualidade do solo têm sido avaliadas por intermédio da mensuração de indicadores apropriados e pela sua comparação com valores desejáveis (limite crítico ou “threshold level”) em diferentes intervalos de tempo, para um fim específico em ecossistemas agrícolas, florestais, pecuários e naturais (ARAÚJO et al., 2012).

Segundo, Chaer e Tótola (2007), para avaliar a qualidade do solo, os indicadores devem ser identificados e analisados quanto à sua sensibilidade a mudanças causadas pelo manejo. Uma vez que tenham sido definidos, esses indicadores podem ser monitorados de forma a avaliar o impacto do manejo adotado sobre a qualidade do solo.

Embora quantificar a qualidade do solo não seja tarefa fácil, a dificuldade advém do fato de que a qualidade do solo depende de suas propriedades intrínsecas, de suas interações com o ecossistema e, ainda, de prioridades de uso, influenciadas inclusive, por aspectos socioeconômicos e políticos (COSTA; GOEDERT; SOUSA, 2006). Os indicadores devem fornecer algumas medidas da capacidade do solo de funcionar respeitando a vegetação e a produtividade biológica, a qualidade ambiental e a saúde humana e animal.

Para Chaer (2001), definir a qualidade “ideal” para um solo também é subjetivo, e o ideal irá diferir entre os vários tipos de solo e para cada cultura que está ou será estabelecida. Logo, é necessária a determinação de referenciais que possam servir

de base para a interpretação e comparação. O critério de referência pode ser um sítio específico que representa uma área com tipo de solo e condições climáticas similares ou pode ser temporal, quando o valor referencial é obtido na amostragem inicial. Tem sido sugerido adotar como critério de referência as condições prevalentes em solos que suportam uma vegetação nativa e que tenham sofrido mínimos distúrbios antropogênicos (DORAN; SARRANTONIO; JANKE, 1994, ISLAM; WEIL, 2000). Nesse caso, há uma larga aplicabilidade como medida de qualidade do solo com respeito à sustentabilidade, pois os atributos físicos, químicos e biológicos de solos que suportam uma vegetação nativa evoluíram para um estado de equilíbrio que assegura uma viabilidade de longo prazo do ecossistema circunvizinho (DORAN; SARRANTONIO; JANKE, 1994).

Para Islam e Weil (2000), os possíveis indicadores da qualidade do solo podem ser divididos em três grupos, a saber: 1) efêmeros, cujas alterações se dão rapidamente no tempo de acordo com o manejo, como a acidez, a disponibilidade de nutrientes e a compactação do solo, 2) intermediários, que dependem da influência dos processos que ocorrem no solo, tais como teor de carbono orgânico total, agregação e biomassa microbiana e, 3) permanentes, que são inerentes às características do solo, como profundidade, textura e mineralogia.

Essa avaliação é complexa e deve ser realizada em função de um conjunto de indicadores específicos, denominados atributos e suas inter-relações, já que se tem verificado que indicadores isolados não são suficientes para explicar a perda ou o ganho potencial dos cultivos de determinado solo (SANTOS, 2010). Observa-se que, com o aumento do conhecimento dos sistemas conservacionistas, verifica-se a necessidade da utilização de um conjunto de indicadores e, eventualmente, a inclusão deles em um modelo de avaliação da qualidade do solo (NICOLODI, 2006). Desta forma, estabelecer um índice de qualidade do solo é importante para identificar problemas e fazer estimativas realísticas, monitorar mudanças na sustentabilidade e qualidade ambiental em relação ao seu manejo, bem como orientar formas de manejo (SOUZA et al., 2003). Eles também devem ser usados para medir mudanças no funcionamento do solo ou limitações do ecossistema (SEYBOLD; HERRICK; BREJDA, 1997), ser compreensíveis e úteis para o agricultor e, preferencialmente, de fácil e barata mensuração (DORAN; ZEISS, 2000).

Nesse contexto, a QS é a integração dos atributos físicos, químicos e biológicos de solos, que o habilita a exercer suas funções na plenitude. No entanto,

apesar do crescente número de trabalhos envolvendo a análise de indicadores microbiológicos, a base de informações disponível para essas características ainda é pouco consistente para se fazer uma interpretação adequada e para se definir valores ótimos em diferentes situações, dada à escassez de informações e bancos de dados que possam ser usados para definir valores de referência para avaliar a magnitude da alteração na qualidade do solo relativa ao seu estado original (CHAER, 2008).

Em seu trabalho, Chaer (2001) e Bonilha (2012) utilizaram para determinar os limites críticos dos indicadores microbiológicos a maior média dos valores encontrados em seus tratamentos, sendo um local com vegetação natural. Assim, no presente trabalho, as análises microbiológicas não foram realizadas. Como alternativa, têm se usado áreas de vegetação natural próximas aos solos estudados para definir valores ótimos para indicadores biológicos. No entanto, é difícil garantir que esses valores são válidos quando se avalia ecossistemas completamente alterados, como é o caso de áreas degradadas, ou, quando o ecossistema já atingiu um ponto de equilíbrio entre os processos biológicos e de ciclagem de nutrientes bem distintos daquele presente no solo sob a condição original (CHAER, 2008).

1.2.3 Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo

Alguns indicadores químicos e físicos do solo podem ser usados para diagnosticar a sua capacidade em promover o desenvolvimento das plantas, mantendo a sua produtividade e a qualidade ambiental (MARTINAZZO, 2006).

A matéria orgânica (MO) é considerada o fator de maior importância na determinação da QS, por ser sensível às práticas de manejo do solo, em virtude de sua suscetibilidade de alteração em relação às práticas de manejo e por correlacionar-se com a maioria dos atributos do solo (MIELNICZUCK, 1999), podendo ser avaliada por meio do teor de carbono orgânico total. Pesquisadores consideram a MO um dos melhores indicadores de qualidade do solo (QS), fundamentando-se na relação de várias funções e processos biológicos, físicos e químicos que ocorrem no solo estarem relacionados diretamente com a presença de matéria orgânica (CARTER, 2001).

A MO é importante na formação dos agregados do solo. Após a aproximação das partículas minerais, a matéria orgânica apresenta importância fundamental

como um dos fatores determinantes da estabilização dos agregados (BAYER; MIELNICZUK, 1999), pois funciona como agente cimentante. Dessa forma, sistemas agrícolas que adotam menor revolvimento do solo e alta taxa de adição de resíduos podem deter o declínio da qualidade estrutural de solos cultivados, bem como promover a recuperação daqueles já degradados (PALADINI; MIELNICZUK, 1991) e evita o aumento da proporção de microagregados no solo, podendo levar a perda da qualidade do solo.

De acordo com Alvarez V, Mello e Dias (1994), o pH é um importante fator na produção agrícola, influenciando na disponibilidade de nutrientes às raízes das plantas, propiciando condições favoráveis ou de toxidez, e concorre para favorecer o desenvolvimento de micro-organismos que operam transformações úteis para melhorar as condições do solo, bem como para dar meio propício a micro-organismos causadores de doenças de plantas. A avaliação do pH torna-se essencial para analisar aspectos químicos de qualidade do solo, uma vez que fornecem uma medida da habilidade do solo em suprir nutrientes e funcionar como um tampão contra aditivos químicos e corretivos (DORAN; PARKIN, 1996).

Medidas que expressam a disponibilidade de nutrientes, como cálcio, magnésio, fósforo, potássio e micronutrientes, assim como suas relações são importantes para avaliar qualidade de solo entre diferentes sistemas de manejos (ARAÚJO et al, 2012).

A estrutura do solo é outro importante indicador de QS, uma vez que influi diretamente nas condições de adensamento, compactação, encrostamento, infiltração de água e, suscetibilidade do solo a erosão (DORAN, 1997). A melhoria da estrutura é acompanhada pelo aumento da permeabilidade, pelo decréscimo na erodibilidade e pela redução no escoamento superficial de água e, conseqüentemente, pela redução da erosão hídrica (WISCHMEIER, 1966). A dinâmica da agregação resulta da interação entre fatores ambientais, de manejo do solo, influência da planta e propriedades do solo, como: composição mineral, textura, carbono orgânico do solo, processos pedogenéticos, atividade microbiana, capacidade de troca catiônica, reserva nutricional e disponibilidade de água, sendo frequentemente expressa em termos de estabilidade de agregados (BRONICK; LAL, 2005). Segundo SÁ et al. (2000), a estabilidade de agregados é o atributo que melhor se correlaciona com a erodibilidade do solo, pois influencia na infiltração, na

retenção de água, na aeração, na resistência à penetração de raízes, no selamento e no encrostamento superficial, na erosão hídrica e eólica.

Outro atributo reflexo da estrutura do solo é a porosidade do solo, sendo os poros determinados pelo arranjo e geometria das partículas (AGUIAR, 2008). A porosidade do solo tem sido utilizada como indicadora da qualidade do solo, por tratar-se de propriedades dinâmicas, suscetíveis ao uso e de fácil determinação, estando relacionadas à compactação e à relativa restrição ao crescimento radicular (ARSHAD; LOWER; GROSSMAN, 1996). O manejo do solo pode influenciar nos macro e microporos e causar a redução no número dos macroporos devido à pressão mecânica de máquinas agrícolas, à compressão do ar nos microporos dos agregados, durante os ciclos de umedecimento e secagem do solo, à força cinética da gota da chuva, à aração profunda e ao entupimento dos microporos e ao baixo conteúdo de MO e nutrientes (AGUIAR, 2008).

A textura é indispensável para a classificação do solo e a predição do manejo e da aptidão de uso. Além disso, a textura é fator determinante das propriedades de retenção e capacidade de armazenamento de água e nutrientes, da distribuição de poros e, conseqüentemente, das propriedades de condução de água e gases, afetando a dinâmica das trocas com plantas e atmosfera (REICHARDT; TIMM, 2012) além de influenciar fortemente os processos erosivos do solo (FELLER; BEARE, 1997). A textura ainda interfere na resistência do solo à ação de implementos de mobilização do solo e nas propriedades térmicas do solo, tais como capacidade calorífica e condutividade térmica, estrutura do solo, teor de nutrientes e de matéria orgânica.

Tendo em vista as variações da maioria dos atributos físicos e químicos, estes isoladamente não constituem um adequado indicador de qualidade do solo, devendo ser associados com outras propriedades ou características do solo. É importante ressaltar que nenhum atributo do solo, avaliado isoladamente, seja ele químico, físico ou biológico será um bom indicador de qualidade do solo.

1.2.4 Avaliação da qualidade do solo

É sabido que existem vários métodos para monitorar e avaliar a qualidade da água e do ar, mas nenhum método isolado tem sido amplamente aceito para atribuir um índice de qualidade ao solo (GLOVER; REGANOLD; ANDREWS, 2000).

O solo é um ambiente complexo, onde interagem inúmeros processos químicos, físicos e biológicos os quais estão constantemente em fluxo, são de natureza heterogênea e, frequentemente, de difícil medição. Combinando esses fatores de complexidade do ambiente solo com a definição de qualidade do solo, que reconhece as suas múltiplas funções, pode se ter ideia que a medida de qualidade desse sistema é extremamente difícil (KELTING et al., 1999).

Conforme Melloni et al. (2008), o desafio dos estudos sobre sustentabilidade está relacionado ao desenvolvimento de métodos para avaliação da QS e do ambiente sob a interferência do homem. A seleção dos atributos do solo que servirão como indicadores de qualidade de solo, os níveis críticos desses atributos e como agregá-los em um IQS são algumas das dificuldades encontradas para quantificar a QS.

Uma metodologia que tem sido largamente proposta para superar a dificuldade de traduzir a natureza complexa e específica de cada solo em atributos mensuráveis, que possam refletir o seu estado de qualidade, é a definição de funções que consigam expressar os atributos de qualidade do solo, por meio de um conjunto mínimo de indicadores (DORAN; PARKIN, 1994; KARLEN; STOTT, 1994; LARSON; PIERCE, 1994).

Para auxiliar estudos deste porte, há um esforço multidisciplinar tentando quantificar diferentes atributos que estão relacionados com a sustentabilidade, traduzindo-os na forma de indicadores de qualidade do solo. Diversos trabalhos têm sido conduzidos com o objetivo de identificar os atributos indicadores da qualidade do solo e avaliar o efeito integrado dos mesmos, expressos por meio de índices (ARAÚJO et al., 2007; MELO FILHO et al., 2009; CARDOSO et al., 2011; FREITAS et al., 2012b). Dois diferentes enfoques têm sido propostos para estabelecer critérios de referência da qualidade do solo: aquele relacionado à área sob vegetação nativa, por representar as condições ecológicas de estabilidade do ambiente; e aquele relacionado a parâmetros agronômicos que maximizem a produção e conservem o meio ambiente (TÓTOLA; CHAER, 2002).

Entre os métodos mais utilizados para determinação do índice de qualidade do solo, destaca-se o proposto por Karlen e Stott (1994). Esse método apresenta uma estrutura de cálculo na qual as funções principais e seus respectivos indicadores são selecionados e ponderados de acordo com o grau de importância para a determinação do índice. Esses pesquisadores sugeriram a utilização de um

modelo desenvolvido por Wymore (1993) para normalização dos indicadores, gerando uma escala de 0 a 1, significando que, quanto mais próximo de 1, maior a qualidade do solo vinculada ao aspecto em análise. Nesta metodologia, são usados critérios arbitrários para selecionar, transformar e pesar os indicadores de qualidade do solo. Apesar desses parâmetros serem definidos por meio da opinião de especialistas, a falta de critérios objetivos permite a eventual definição de modelos bastante diferentes para avaliar um mesmo solo, com base em razões e julgamentos diferentes. Chaer (2002), Bonilha (2011) e Freitas et al. (2012b), utilizaram como critério para a escolha dos indicadores de qualidade do solo e seus respectivos pesos de acordo com o conhecimento e características locais das áreas a partir dos resultados brutos.

A alternativa que tem sido sugerida para reduzir a arbitrariedade na seleção de parâmetros em modelos de IQS é o uso da análise de componentes principais (ACP) para selecionar o conjunto mínimo de indicadores a partir de um grande grupo de características do solo, assim como para definir seus respectivos pesos no modelo (ANDREWS; CARROLL, 2001, ANDREWS et al., 2002). Seus principais objetivos são: a) reduzir o número de variáveis; b) analisar quais as variáveis ou quais conjuntos de variáveis explicam a maior parte da variabilidade total, revelando que tipo de relacionamento existe entre eles (BOUROCHE; SAPORTA, 1982). Essa ferramenta pode auxiliar na discriminação de unidades de solo e na investigação de atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos (GOMES et al., 2004)

Entretanto, os autores enfatizaram que o método requer a existência prévia de um extenso banco de informações, incluindo todos os solos considerados e, que o método é inadequado quando o número de indicadores ou observações é baixo (ANDREWS et al., 2002). Porém, este método tende a selecionar apenas as características do solo mais sensíveis como indicadores, independentemente de como elas efetivamente se relacionam com a QS ou do quanto elas são representativas ou não das principais funções do solo (CHAER, 2008). Araújo (2008) e Pamplona (2012) utilizaram a análise multivariada para auxiliar na seleção de indicadores que contribuíssem efetivamente para a variância total dos dados.

No presente trabalho, foi utilizado o modelo proposto por Karlen e Stott (1994). Porém utilizou-se a análise estatística multivariada para determinação dos indicadores e pesos das variáveis com o objetivo de se obter valores reais das

funções e de seus atributos, devido a grande dificuldade em se falar em qualidade do solo e definir quais atributos e valores que devem ser utilizados.

1.2.5 Erodibilidade e a qualidade do solo

A erodibilidade tem influência direta com a qualidade do solo, visto que está relacionada com a perda de solo e com perdas de nutrientes. Em áreas agrícolas, a erosão é um processo impactante que altera os atributos do solo, sendo considerada a forma mais prejudicial de degradação (COGO; LEVIEN; SCHWARZ, 2003) e o principal fator causador da insustentabilidade nos sistemas de produção agrícola (MEIRELLES et al., 2005). As perdas de solo, água e nutrientes resultantes da erosão são os principais responsáveis pelo empobrecimento das terras cultiváveis e declínio progressivo da produtividade (BERTOL et al., 2004), influenciando diretamente na qualidade do solo. Segundo os mesmos autores, a erosão hídrica pode ainda causar sérios danos ambientais, como assoreamento e poluição das fontes de água além de outros impactos (DECHEN; PROCHNOW, 2003).

A erodibilidade pode ser definida como a capacidade do solo em sofrer erosão a partir das forças que causam destacamento e transporte de suas partículas (SUMMERFIELD, 1991; MORGAN, 1995). É o fator que tem despertado maior interesse na pesquisa de erosão do solo propriamente dita, por ser, obviamente, relacionado ao solo e, portanto, variar significativamente de solo para solo. Para Morgan (1995), a erodibilidade varia com a textura do solo, a estabilidade dos agregados, a capacidade de infiltração, a composição química e orgânica do material além de fatores relacionados à resistência dos constituintes ao destacamento. Portanto, refere-se à sua predisposição à erosão. A quantificação das perdas de solo por erosão hídrica tem como objetivo principal auxiliar na definição das técnicas de manejo e práticas conservacionistas adequadas para cada região, minimizando desta forma os prejuízos ambientais e econômicos e, aumentar a qualidade do solo.

Um dos atributos que está intimamente relacionado com a erodibilidade é a textura do solo, sendo a resistência do solo à desagregação afetada pela sua distribuição granulométrica. Solos de textura mais arenosa são geralmente mais fáceis de desagregar, mas seus grandes sedimentos são difíceis de serem transportados. Os solos siltosos e com fraca agregação são mais suscetíveis à

erosão do que os solos argilosos, enquanto os solos francos e os arenosos apresentam um comportamento intermediário (MEYER; HARMON, 1984). Segundo Meyer e Harmon (1984), a argila age com agente cimentante, proporcionando uma maior estabilidade dos agregados e com isso, menor erodibilidade do solo.

Neste sentido, muitos trabalhos foram desenvolvidos para determinar o fator erodibilidade do solo. Nunes e Cassol (2008) trabalharam com diferentes Latossolos do Rio Grande do Sul e Albuquerque (1998) trabalhou com sete diferentes classes de solos no Rio Grande do Sul, dentre eles o Latossolo. Pode-se inferir que os solos com menor valor de fator erodibilidade, foram os solos com maiores teores de argila e óxidos de ferro e alumínio e menor grau de dispersão da fração argila. Estes mesmos autores propuseram modelos que determinam a erodibilidade do solo a partir de equações de regressão. Esses modelos são baseados em alguns atributos físicos e químicos que afetam a erodibilidade do solo. Albuquerque (1998) verificou que o parâmetro "M" (parâmetro de Wischmeier), que expressa a influência da distribuição de diâmetro das partículas e que engloba os teores de argila, silte e areia muito fina foi o que melhor se correlacionou com a erodibilidade do solo. Neste caso os teores de silte e areia muito fina aumentaram e o teor de argila diminuiu. Com base nestas constatações, pode-se afirmar que a textura é um dos principais atributos do solo que influencia diretamente na suscetibilidade do solo em sofrer erosão.

A determinação da propriedade erodibilidade é complexa pelas inúmeras variáveis envolvidas (SUMMERFIELD, 1991). Para se chegar aos valores correspondentes à erodibilidade do solo, existem basicamente três meios. O primeiro gira em torno da observação deste parâmetro em nível de campo em condição natural de chuva. Contudo, este é um método muito caro e demanda muito tempo para aquisição das informações. O segundo ocorre também em nível de campo, mas por meio de chuvas simuladas (WISCHMEIER; SMITH, 1978). O terceiro meio é a observação do fator K que ocorre de forma indireta, baseando-se em regressões múltiplas que contenham como variáveis independentes atributos mineralógicos, físicos, morfológicos e químicos do solo ou relações destes.

No entanto, os métodos tradicionais de observação dos fatores de erodibilidade do solo como dos atributos químicos, físicos e mineralógicos encontram algumas limitações. Estas limitações estão relacionadas ao alto custo, tempo necessário para adquirir e processar as informações (WISCHMEIER; SMITH

1978; MCBRATNEY et al., 2003), e no caso das análises mineralógicas, possuem um agravante, a produção de resíduos (TORRENT; BARRÓN, 2008).

Neste contexto, os modelos de predição de erosão do solo evoluíram de modelos empíricos, tais como a *Universal Soil Loss Equation* (USLE) (WISCHMEIER; SMITH, 1978) e a *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) (RENARD et al., 1991), para modelos baseados em princípios teóricos, como o *Water Erosion Prediction Project* (WEPP) (LANE; NEARING, 1989).

Dentro destes modelos, destacam-se o fator erodibilidade do solo, por ser o único parâmetro a ter caráter intrínseco ao solo. De acordo com Wischmeier, Johnson e Cross (1971), este fator abrange a quantidade de solo perdida por unidade de área por unidade de índice de erosividade adotados em condição padrão, ou melhor, é a erodibilidade do solo.

Apesar da grande variedade de modelos existentes para se calcular o fator K por meio de métodos indiretos (CECÍLIO et al., 2009; MARTINS et al., 2011; GOMEZ et al., 2013) é constante a preocupação, e a necessidade de se obter um modelo aplicável para grandes áreas.

Portanto, busca-se a utilização de um menor número de parâmetros, para estimar a erodibilidade do solo, os quais devem ser de determinação fácil, rápida e de baixo custo, em laboratório e retratar ao máximo as condições de campo. Apesar de as informações obtidas em laboratório representarem situações sob condições controladas, os mesmos devem ser semelhantes aos obtidos em campo.

1.2.6 Uso de ferramentas na determinação indireta da erodibilidade do solo

A utilização de novas técnicas que auxiliem na identificação de áreas com diferentes potenciais agrícolas promove maior eficiência do manejo do solo. Com a crescente preocupação sobre as questões ambientais relacionadas às práticas agrícolas, novas pesquisas vêm sendo desenvolvidas de forma a minimizar os impactos ambientais da agricultura tradicional.

Há um grande número de pesquisas e de estudos de técnicas alternativas utilizando modelos de quantificação indireta para fins de determinação de taxas de erosão do solo (VENTURA JR; NEARING; NORTON, 2001). Dentre os métodos utilizados nestes estudos, no modelo USLE (fator K) foi utilizada a equação proposta por Denardin (1990), e no modelo Wepp (fator K_i) foram utilizadas as equações

propostas por Flanagan e Livingston (1995) e também a suscetibilidade magnética (SM).

A maioria dos métodos e equações utilizados nos modelos de predição da erosão hídrica do solo foi desenvolvida para solos de regiões de clima temperado. São raros, se existentes, os modelos desenvolvidos para solos característicos do Brasil como, por exemplo, os Latossolos, visto que esses são solos em avançado estágio de intemperização e geralmente apresentam grande quantidade de óxidos, os quais, dependendo do tipo, favorecem a formação de agregados com alta estabilidade (NUNES, 2006). O entendimento dos processos e interações envolvidos na erosão hídrica de Latossolos pode representar uma contribuição para o uso de modelos de predição da erosão hídrica. Martins Filho (1999) trabalhou em áreas com cana-de-açúcar sob Latossolos próximos a região de Jaboticabal, e propôs modelos relacionando a erodibilidade entressulcos com algumas propriedades físicas, químicas e mineralógicas e determinou uma nova equação para a estimativa indireta de erodibilidade entressulcos nos Latossolos estudados.

A Equação Universal de Perdas de Solo (USLE ou EUPS) é um importante instrumento na predição das perdas de solo e no planejamento do controle da erosão hídrica. A EUPS foi desenvolvida nos Estados Unidos, por Wischmeier e Smith (1978), e tem sido utilizada em vários países. A EUPS, segundo Wischmeier e Smith (1978), é composta pelos seguintes fatores: perda de solo (fator A - expresso em $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$); erosividade da chuva (fator R - expresso em $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$); erodibilidade do solo (fator K - expresso em $\text{ha Mg h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$); fator topográfico (fator LS - adimensional), que considera a declividade (D - expresso em %) e o comprimento de rampa do solo (L - expresso em m); índice de cobertura vegetal (fator C - adimensional); e práticas conservacionistas (fator P - adimensional), sendo que, em muitos casos, o fator C pode ser determinado em associação com o fator P (CP). Na EUPS, a erodibilidade consiste no fator responsável pela suscetibilidade do solo à erosão hídrica, sendo condicionada, basicamente, por atributos mineralógicos, químicos, morfológicos, físicos e biológicos do solo (WISCHMEIER; MANNERING, 1969).

O modelo WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) é um dos mais relevantes (FLANAGAN; NEARINNG, 1995). Este modelo considera a erosão em entressulcos e em sulcos separadamente. No WEPP, o fator K_i expressa a erodibilidade do solo em entressulcos e o fator K_r representa a erodibilidade do solo em sulcos. Esses

fatores representam, respectivamente, a suscetibilidade do solo à desagregação pelo impacto das gotas de chuva e pelo escoamento superficial concentrado (ALBERTS et al., 1995). Na falta de dados locais obtidos experimentalmente, o modelo WEPP utiliza equações da rotina interna para estimar o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), os quais necessitam apenas dos teores de areia e argila (FLANAGAN; NEARING, 1995).

O mapeamento da SM vem destacando-se como um dos métodos indiretos mais utilizados para fins de estudo e caracterização ambiental (GRIMLEY; ARRUDA; BRAMSTEDT, 2004). Vários trabalhos utilizando a SM apresentaram resultados de correlação positiva com atributos físicos e químicos dos solos (HANESCH; SCHOLGER, 2005), atributos mineralógicos em diferentes classes de solos (CHEVRIER; MATHÉ, 2007), relação com atributos da cana-de-açúcar (MARQUES JR., 2009; SIQUEIRA et al., 2010) e perdas de solo por erosão (VENTURA JR; NEARING; NORTON, 2001). Assim, a SM pode auxiliar na aquisição mais rápida de informações sobre os diferentes potenciais de erosão ao longo da paisagem.

As vantagens de utilização de métodos indiretos para quantificar a erosão, são a rapidez na determinação da erodibilidade dos solos, em comparação com métodos direto e convencionais e, a possibilidade de sua estimativa por meio de parâmetros obtidos por análises laboratoriais de fácil execução.

1.2.7 Uso da suscetibilidade magnética na ciência do solo

A suscetibilidade magnética (SM) é uma característica dos minerais presentes nas rochas e no solo e pode ser definida como a medida da facilidade com que um material se magnetiza em presença de um campo magnético (VEROSUB; ROBERTS, 1995). Partindo deste princípio, pode-se afirmar que ela é afetada, principalmente, pelos mesmos fatores de formação do solo, ou seja, pelo clima (DEARING et al., 2001), material de origem (FONTES et al., 2000), relevo (JONG, PENNOCK; NESTOR, 2000) fauna/flora (DEARING; LEES; WHITE, 1995). Nesse sentido, Schachtschabel et al. (1998) afirmaram que a SM é sensível às variações dos fatores e processos de formação do solo, podendo ser expressa nas propriedades cristalográficas dos minerais presentes nos sedimentos e no solo.

São considerados 5 tipos básicos de comportamento magnético: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo (Figura 1).

Nos minerais diamagnéticos, o número de spins alinhados numa direção é igual ao número de spins na direção oposta. Logo os campos magnéticos anulam-se por possuírem camadas eletrônicas conhecidas (Exemplo: quartzo). Nos minerais paramagnéticos as camadas eletrônicas estão incompletas. A presença de um campo magnético externo faz com que os spins se alinhem (elétrons giram no mesmo sentido) e, mesmo após a retirada do campo magnético, alguns spins permanecem alinhados (Exemplo: olivina) (SIQUEIRA, 2010).

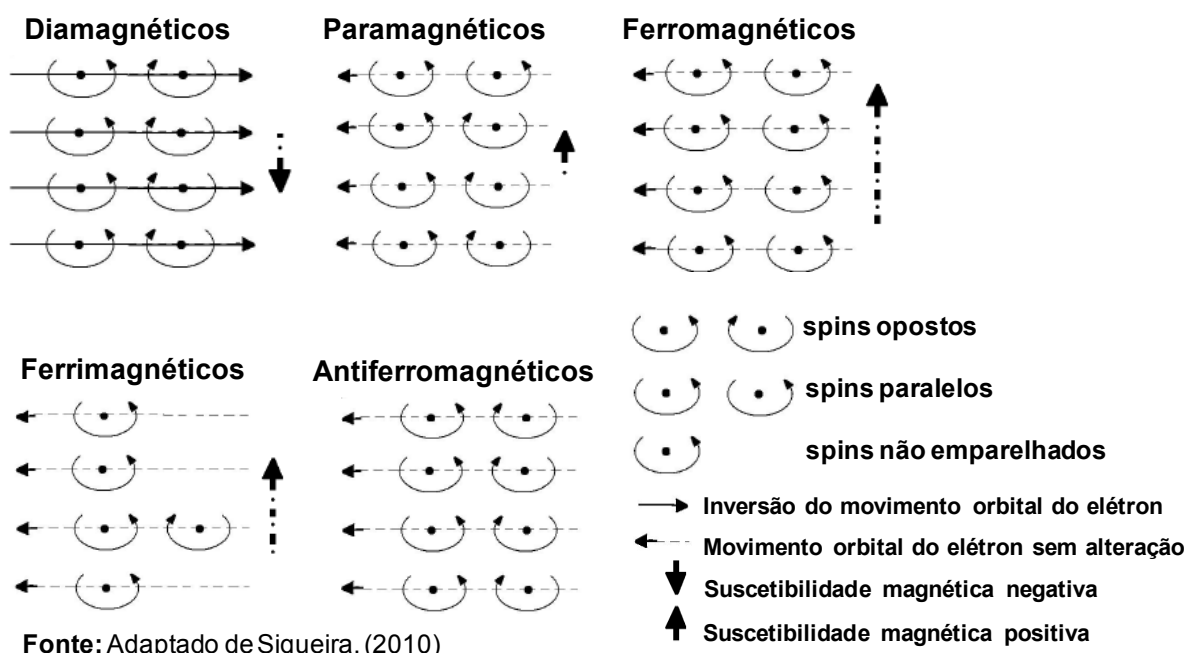


Figura 1. Diferentes tipos de comportamento magnético dos minerais presentes no solo

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 a campo magnético resultante do maior número de spins no mesmo

sentido (Exemplo: magnetita). Os minerais antiferromagnéticos não apresentam propriedades magnéticas (SIQUEIRA, 2010).

Na avaliação quantitativa de atributos do solo, a coleta e análise das amostras são as etapas mais intensivas e onerosas (McBRATNEY et al., 2003). Dearing et al. (1996) relataram que o uso da SM é ideal para a realização de estudos que requerem avaliação de grande quantidade de amostras de solo. Assim, pesquisadores têm apontado a suscetibilidade magnética (SIQUEIRA et al., 2010) como um atributo importante para a quantificação indireta de atributos químicos, físicos e mineralógicos do solo, além de estudar a erosão do solo (DEARING et al., 1996).

Segundo Marques Júnior (2009) e Siqueira et al. (2010), a SM corresponde a um importante indicador capaz de subsidiar informações para o planejamento e a sustentabilidade agrícola, auxiliando com veracidade o conhecimento acurado em campo. Em seu trabalho, Barrios (2012), ao avaliar o potencial da SM como indicador de qualidade do solo em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar, observou pela análise de componentes principais, que a SM apresentou forte poder discriminatório. Tal resultado sugere a veracidade na utilização desta como um atributo do solo que poderia auxiliar na avaliação dos efeitos dos sistemas de manejo em Latossolo. Para Siqueira (2013), a SM é uma técnica capaz de estimar atributos do solo de maneira não destrutiva, rápida e eficiente, o que permite a aplicação desta técnica em processos de mapeamento de pequenas ou grandes áreas.

Esta técnica foi utilizada com fins qualitativos nos primeiros levantamentos de solos do Estado de São Paulo, nas décadas de 1960 e 1970, unicamente para distinguir solos provenientes de diferentes materiais de origem (RESENDE; SANTANA; REZENDE, 1988). Mathé et al. (2006) mencionaram que os minerais magnéticos podem ser considerados como micromarcadores de atributos do solo, e que é possível estabelecer correlações entre a suscetibilidade magnética e os atributos químicos, físicos e mineralógicos do solo.

Segundo Marques Júnior e Siqueira (2014), um dos equipamentos mais utilizados para avaliação da SM é o sensor da Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B. A avaliação pode ser feita no campo, em laboratório, em amostras de terra fina seca ao ar (TFSA) ou fração argila, silte e areia. Para aplicações em estudos de pedometria, com foco no desenvolvimento de funções de

pedotransferência para quantificação, recomenda-se que sejam feitas avaliações em baixa frequência (0,47 kHz) (DEARING, 1994).

Estudos recentes demonstraram o potencial de métodos para quantificação indireta por meio de SM. Siqueira (2010) utilizou a suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar e observou que a SM pode ser utilizada para auxiliar na estimativa do teor de argila, matéria orgânica, saturação por bases (V%) e o teor de hematita de solos. Por outro lado, Matias et al. (2013) avaliaram modelos de paisagem e suscetibilidade magnética na identificação e caracterização do solo e concluiu que a SM demonstrou ter potencial para delimitação das superfícies geomórficas mapeadas no campo, o que indica seu potencial de uso na identificação e caracterização de áreas mais homogêneas e ambientes semelhantes. Em seu estudo, Barbosa (2014) utilizou a SM para estimar a erodibilidade do solo em áreas de cana-de-açúcar em Latossolos e concluiu que a SM possui correlação com a erodibilidade do solo e erodibilidade do solo em entressulco, bem como com os atributos relacionados a estes processos.

Mediante essas informações, nota-se o quão a suscetibilidade magnética é uma técnica vantajosa para estimar atributos do solo. Sendo assim, esta ferramenta pode ser utilizada para o uso e manejo do solo de forma sustentável, uma vez que diminui consideravelmente o impacto do estudo de solos.

1.3 REFERÊNCIAS

AGUIAR, M. I. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. 2008. 79 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

ALBERTS, E. E.; NEARING, M. A.; WELTZ, M. A.; RISSE, L. M.; PIERSON, F. B.; ZHANG, J. M. LAFLÉN, J. M.; SIMANTON, J.R. Soil component. In: FLANAGAN, D.C.; NEARING, M. A., eds. **Water Erosion Prediction Project - WEPP**. West Lafayette, USDA, 1995. p.1-47. (Report, 10).

ALBUQUERQUE, J. A. **Suscetibilidade de alguns solos do Rio Grande do Sul à erosão em entressulcos**. 1998. 154f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1998.

ALVAREZ V., V. H.; MELLO, J. W. V.; DIAS, L. E. **Acidez e calagem do solo**. Brasília: ABEAS/UFV, 1994. 68 p. (Curso de Fertilidade e Manejo do Solo - Módulo IV).

ANDREWS, S. S.; CARROLL, C. R. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management. **Ecological Applications**, Ithaca, v.1,n. 6, p.1573- 1585, 2001.

ANDREWS, S. S.; MITCHELL, J. P.; MANCINELLI, R.; KARLEN, D. L.; HARTZ, T. K.; HORWATH, W. R.; PETTYGROVE, G. S.; SCOW, K. M., MUNK, D. S. On-farm assessment of soil quality in California's central valley. **Agronomy Journal**, Davis, v.94, n.1 ,p.12-23, 2002.

ARAÚJO, E. A. **Qualidade do solo em ecossistemas de mata nativa e pastagens na região leste do Acre, Amazônia Ocidental**. 2008. 333f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, 2008.

ARAÚJO, E.A.; KER, J.C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v.5, n.1, p.187-206, 2012.

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.5, p.1099-1108, 2007.

ARSHAD, M.A.; LOWER, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In:DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds.). **Methods for assessing soil quality**. Soil Science Society of America, p.123- 141, 1996. (Special publication, 49).

BARBOSA, R. S. **Erodibilidade de latossolos predita pela suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa**. 2014. 64f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.

BARRIOS, M. R. **Suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem e indicador de qualidade do solo em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2012.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n.1, p. 105-112, 1997.

BERTOL, I.; GUADAGNIN, J. C.; CASOL, P. C.; AMARAL, A. J.; BARBOSA, F. T. Perdas de fósforo e potássio por erosão hídrica em um Inceptisol sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.485-494, 2004.

BEVEN, K. Changing ideas in hydrology-the case of physically based models. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.105, n.1/2, p.157-172, 1989.

BONILHA, R. M. **Caracterização da fertilidade do solo, distribuição do sistema radicular e índice de qualidade do solo no Ecossistema Restinga do Litoral Paulista**. 2012.74f. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2012.

BOUROCHE, J. M.; SAPORTA, G. **Análise de dados**. Rio de Janeiro: Zahar Ed, 1982. 116p.

BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, Amsterdam, v.124, n.1, p.3-22, 2005.

CARDOSO, E. L.; SILVA, M, L, N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; FREITAS, D. A. F.; Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no Pantanal Sul-Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa , v. 35, n. 2, p.613-622, 2011.

CARTER, M.R. Organic matter and sustainability. In: REES, B.C.; BALL, B.C.; CAMPBELL, C.D. & WATSON, C.A., eds. **Sustainable management of soil organic**. Wallingford, CAB International, p.9-22. 2001.

CECÍLIO, R. A.; RODRIGUEZ, R. G.; BAENA, L. G. N.; OLIVEIRA, F. G.; PRUSKI, F. F. Aplicação dos modelos RUSLE e WEPP para estimativa da erosão hídrica em microbacia hidrográfica de Viçosa (MG). **Revista Verde**, Mossoró, v.4, n.2, p.39-45, 2009.

CHAER, G. M. **Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos**. 2001. 90f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

CHAER, G. M. Monitoramento de áreas recuperadas ou em recuperação. In: S.R.L. Tavares; F.C. Balieiro. (Org.). Curso de Recuperação de Áreas Degradadas - **Visão da Ciência do Solo no Contexto do Diagnóstico, Manejo, Indicadores de monitoramento e Estratégias de Recuperação**. 1ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008, v. 103, p. 211-228.

CHAER, G.M.; TÓTOLA, M. R. Impacto do manejo de resíduos orgânicos durante a reforma de plantios de eucalipto sobre indicadores de qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.3, n.6, p.1381-1396, 2007.

CHEVRIER, V.; MATHÉ P. E. Mineralogy and evolution of the surface of Mars: a review. **Planetary and Space Science**, Elmsford, v.55, n.3, p.289–314, 2007.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.4, p.743-753, 2003.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.933-942, 2008.

COSTA, E. A.; GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. G. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 7, p. 1185-1191, 2006.

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 Clay Minerals**, New York, v. 47, n.4, p. 466-473, 1999.

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**, St. John's, v. 76–77, n.1. p. 43–56. 2001.

DEARING, J. A. **Environmental magnetic susceptibility**. Using the Bartington MS2 system. England: British Library, 1994, 104 p.

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

DEARING, J. A.; HAY, K. L.; BABAN, S. M. J.; HUDDLESTON, A. S.; WELLINGTON, E. M. H.; LOVELAND, P. J. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set. **Geophysical Journal International**, v.127, n.3, p.728-734, 1996.

DECHEN, S. C. F.; PROCHNOW, D. **Erosão e produtividade**. O Agrônomo, Campinas, v.55, n.1, p.22-24, 2003. (Informações Técnicas).

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

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BZEDICEK, D. F. e STEWART, B. A., eds. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America 1994. p.3-21. (Special Publication, 35).

DORAN, J. W.; SARRANTONIO, M.; JANKE, R. Strategies to promote soil quality and health. In: PANKHURST, C. E.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R.; GRACE, P. R. (eds.). **Soil Biota Management in sustainable farming systems**. Commonwealth Scientific Industrial Research Organization, p.230-237, 1994.

DORAN, J.W. Soil quality and sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. **Anais**. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD-ROM.

DORAN, J.W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds.). **Methods for assessing soil quality**. Wisconsin, USA: Soil Science Society American, 1996. p.25-37. (Special Publication, 49).

DORAN, J.W.; ZEISS, M.R. Soil Health and sustainability; managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, Lincoln, v.15, n.1, p.3-11, 2000.

FELLER, C.; BEARE, M.H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v.79, n.1, p.69-116, 1997.

FERREIRA, D. F. **Estatística multivariada**. 1. ed., Lavras: Editora UFLA, 2008. 662p.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Homogeneidade da qualidade física do solo nas entrelinhas de um pomar de laranjeira com sistemas de manejo da vegetação permanente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.6, p.637-645, 2007.

FLANAGAN, D. C.; LIVINGSTON, S. J. **USDA - Water erosion prediction project: WEEP user summary**. West Lafayette: National Soil Research Laboratory & USDA - Agricultural Research Service, 1995. p. 25-26. (Report, 11).

FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A., eds. **Water Erosion Prediction Project - WEPP**. West Lafayette, USDA, 1995. p.1-47. (Report, 10). McBRATNEY, A. G.; MENDONÇA SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v.117, n.1-2, p.3–52, 2003.

FONTES, M. P. F.; OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M.; CAMPOS, A. A. G.; Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials, **Geoderma**, Amsterdam, v. 96, n. 3, p. 81–99. 2000.

FRAZÃO, L. A; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Propriedades químicas de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado mato-grossense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília , v.43, n.2, p.641-648, 2008.

FREITAS, D. A. F.; NAVAES, M. L.; CARDOSO, E.L; CURI, N. Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.43, n.3, p.417-428, 2012a.

FREITAS, L; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; AQUINO, R. E. Análises multivariadas de atributos físicos em Latossolo Vermelho submetidos a diferentes ambientes. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.8, n.15, 126-139. 2012b.

FREITAS, L. **Influência de fragmentos florestais nativos sobre os parâmetros químicos, físicos e microbiológicos de solos cultivados com cana-de-açúcar.** 2011.115 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

GLOVER, J. D.; REGANOLD, J. P.; ANDREWS, P. K. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, New York ,v. 80, n 1-2, p.29-45, 2000.

GOMES, J. B. V.; CURI, N.; MOTTA, P. E. F.; KER, J. C.; MARQUES, J. J. G. S. M.; SCHULZE, D. G. Análise de componentes principais de atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos do bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n.1, p 137 -153, 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.209-210, n,209-210, p.86-97, 2013.

GRAYSON, R. B.; MOORE, I. D.; MCMAHON, T. A. Physically-based hydrologic modeling: II. Is the concept realist? **Water Resources Research**, Washington, v. 26, n.10, p.2659-2666, 1992.

GRIMLEY, D.A., VEPRASKAS, M.J. Magnetic Susceptibility for use in delineating hydric soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, n. 6, p.2174-2180, 2000.

GRIMLEY, D. A.; ARRUDA, N. K.; BRAMSTEDT, M. W. Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible, and precise delineation of hydric soils in the Midwestern USA. **Catena**, Amsterdam, v.58, n.2, p.183– 213, 2004.

HANESCH, M.; SCHOLGER, R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. **Geophysical Journal International**, Oxford, v.161, n.1, p.50–56, 2005.

ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Soil quality indicator properties in mid-atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.55, n.1 , p. 69-78, 2000.

JONG, E.; PENNOCK, D. J.; NESTOR, P. A. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada. **Catena**, Amsterdam, v. 40, n. 3, p. 291–305, 2000.

KARLEN, D. L.; SCOTT, D. E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: *Defining Soil Quality for a Sustainable Enviroment*. **Soil Science Society of America Journal**. Spec. Pub., 35: 53-72, 1994.

KARLEN, D. L.; WOLLENHAUPT, N. C.; ERBACH,D. C.; BERRY, E.C.; SWAN, J. B.; EASH, N.S.; JORDAHL, J. L. Long-term tillage effects on soil quality. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.32, n.4, p. 51-96, 1994.

KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE,R.G.; HARRIS, R.F.; SCHUMAN, G.E. Soil quality: Aconcept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.1, p.4-10, 1997.

KELTING, D.L.; BURGER, J.A.; PATTERSON, S.C.; AUST, W.M.; MIWA, M.; TRETTIN, C.C. Soil quality assessment in domesticated forests –a southern pine example. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.122, n.1-2, p.167-185, 1999.

LAL, R. & PIERCE, F.J. The vanishing resource. In: LAL, R. & PIERCE, F.J., eds. **Soil management for sustainability**. Ankeny, Soil Water Conservation Society, 1991. p.1-5.

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, 1989. p. A1-S1. (Report, 2).

LAPEN, D. R.; TOPP, G. C.; GREGORICH, E. G.; CURNOE, W. E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.78, n.2, p.151-170, 2004.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. **The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management**. In: Doran, J. W.; Coleman, D. C.; Bzedicek, D. F.; Stewart, B. A. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, WI, Soil Science Society of America, 1994, p. 37-52, (Special Publication, 35).

LEITE, L. F. C.; OLIVEIRA, F. C.; ARAUJO, A. S. F.; GALVÃO, S. R. S.; LEMOS, J. O.; SILVA, E. F. L. Soil organic carbon and biological indicators in an Acrisol under tillage systems and organic management in north-eastern Brazil. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.48, n.3, p.258-265, 2010.

MALUCHE-BARETTA, C. R. D.; AMARANTE, C. V. T.; KLAUBERG FILHO, O. Análise multivariada de atributos do solo em sistema convencional e orgânico de produção de maçãs. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 41, n. 10, p. 1531-1539, 2006.

MANLY, B. J. F. **Métodos estatísticos multivariados - uma introdução** –3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

MARQUES JÚNIOR, J. **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 2009. 113 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

MARQUES JÚNIOR, J; SIQUEIRA, D. S. Suscetibilidade Magnética nos Solos Tropicais - Uma Alternativa Promissora. **Pedometria**, p.2 -5, n.3, mar. 2014.

MARTINAZZO, R. **Diagnóstico da fertilidade de solos em áreas sob plantio direto consolidado**. 2006. 84 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

MARTINS, S. G.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FONSECA, S. Erodibilidade do solo nos tabuleiros costeiros. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n.3, p.322-327, 2011.

MATHÉ, V.; LÉVÊQUE, F.; MATHÉ, P.E.; CHEVALLIER, C.; PONS, Y. Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: Limits in the low magnetic amplitude case. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v.58, n.3, p.202–217, 2006.

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**, Goiânia, v.43, n.1, p.93-103, 2013.

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

MEIRELLES, M. S. P.; BUENO, M. C. D.; DIAS, T. C. S.; COUTINHO, H. L. C. Sistema de suporte a decisão para avaliação do risco de impactos ambientais em bacias hidrográficas por redes de dependência e lógica fuzzy. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XII. Goiânia-GO, abril 2005. **Anais...** Goiânia, INPE, p.2259-2266, 2005.

MELLONI, R.; MELLONI, E. G. P.; ALVARENGA, M. I. N.; VIEIRA, F. B. M. Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n.6, p. 2461-2470, 2008.

MELO FILHO, J. F.; CARVALHO, D. C.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; SILVEIRA, E. C. P. Índice de qualidade em um Latossolo amarelo coeso cultivado com citros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 31, n. 04, p. 1168-1177, 2009.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.48, n.5, p.1152- 1157, 1984.

MIELNICZUCK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. Cap.1, p.1-6.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and Conservation**. 2. ed. [S.l.]: Longman Group Limited, 1995.

NICOLODI, M. Desafios à caracterização de solo fértil em química do solo. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 6., Passo Fundo, 2006. **Anais...** Passo Fundo, Embrapa, 2006. CD-ROM.

NUNES, M. C. M. **Estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul**. 2006. 175 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 32, n.spe, p. 2839- 2845, 2008.

OLIVEIRA, I. A. **Caracterização de solos sob diferentes ambientes na região Sul do Amazonas**. 2013. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2013.

PALADINI, F. L. S.; MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um solo Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistema de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n.1 p. 135-140, 1991.

PAMPLONA, V. M. S. **Índices de Qualidade do Solo para Plantação de Açaí**. 2011.139f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Matemática e Estatística). Universidade Federal do Pará, Belém. 2011.

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v.42, n.3-4, p.259-280, 2005.

REICHARDT, R.; TIMM, L. C. **Solo Planta Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Manole. Barueri, São Paulo. 2012. p.524.

RENARD, G. K. FOSTER, G. R., WEESIES, G. A., PORTER, J. P. RUSLE-Revised universal soil loss equation. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.46, n.1, p.30-33, 1991.

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, 1988. p.78-108.

RIBEIRO, K. A.; OLIVIERA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; XAVIER, F. A. S.; MAIA, S. M. F.; SOUSA, H. H. F. Qualidade do solo na cultura do cajueiro anão precoce cultivado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n. 2, p.341-351, 2007.

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; DIAS JUNIOR, M. S. Comparison of methods for aggregate stability studies in soils. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.9, p. 1825-1834, 2000.

SANTANA, D. P.; BAHIA FILHO, A. F. C. **Qualidade do solo: Uma visão holística**. Boletim Informativo, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.27, n.2, 15-18, 2002.

SANTOS, V. B. **Atributos de solos sob cultivo de frutíferas em sistemas de manejo convencional, em transição e orgânico no norte do estado do Piauí.** 2010. 120f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Jaboticabal. 2010.

SCHACHTSCHABEL, P.; BLUME, H. P.; BRÜMMER, G.; HARTGE, K. H. SCHWERTMANN, U. **Lehrbuch der Bodenkunde** (Scheffer/Schachtschabel). 14th ed, Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, , p. 494. 1998.

SCHOENHOLTZ, S. H.; MIEGROET, H.; BURGER, J. A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 138, n.1-3, p. 335-356, 2000.

SEYBOLD, C. A.; HERRICK, J. E.; BREJDA, J. J. Soil resilienc: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, Baltimore, v. 164, n.4, p. 224-234, 1997.

SHARMA, K. L; U. K.; SRINIVAS, K. VITTAL, K. P. R.; MANDAL, B.; GRACE, J. K.; RAMESH, V; Longterm soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.83, n.2, p.246-259, 2005.

SILVA, L. G.; MENDES, I. C.; REIS JUNIOR, F. B.; FERNANDES, M. F.; MELO, J. T.; KATO, E. Atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo de cerrado em plantio de espécies florestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.6, p.613-620, 2009.

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. **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar.** 75 f. 2010. Dissertação de Mestrado (Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. 2010.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, 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**, Oxford, v. 26, n. 4, p. 425-431, 2010.

SOUZA, L. S.; SOUZA, L. D.; SOUZA, L. F. S. Indicadores físicos e químicos de qualidade do solo sob enfoque de produção vegetal: estudo de caso para citros em solos coesos de tabuleiros costeiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 29. 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP:SBCS, 2003, CD-ROM.

SUMMERFIELD, M. A. **Global Geomorphology**. Singapore: Longman Scientific & Technical, 1991. 535p.

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. n. 5. Soil Science Society of American, p. 367–387, 2008.

VENTURA JR, E.; NEARING, M. A.; NORTON, L. D.; Developing a magnetic tracer to soil study erosion. **Catena**. Amsterdam. v. 43, n.4, p. 277-291. 2001.

VEROSUB, K. L.; ROBERTS, A. P. Environmental magnetism: past, present and future. **Journal of Geophysical Research**, v.100, n.b2, p.2175-2192, 1995.

WISCHMEIER, W. H. Surface runoff in relation to physical and management factors. In: **Panamerican Soil Conservation Congress, 1.**, 1966, São Paulo. Proceedings São Paulo: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1966. p. 237-244.

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.26, n.5, p.189-193, 1971.

WISCHMEIER, W. H.; MANNERING, J. V. Relation of soil properties to its erodibility. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 33, n. 1, p. 131-137, 1969.

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).

WYMORE, A. W. **Model-based systems engineering: An introduction to the mathematical theory of discrete systems and to the tricotyledon theory of system design**. Boca Raton, CRC Press, 1993. 710p.

ZILLI, J.; RUMJANEK, N.G.; XAVIER, G. R.; COUTINHO, H. L. C; NEVES, M, C. P. Diversidade Microbiana como Indicador de Qualidade de Solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 20, n.3, p. 391- 411. 2003.

CAPÍTULO 2 – Índice de qualidade para Latossolos cultivados com cana-de-açúcar e mata nativa no nordeste do estado de São Paulo

RESUMO - A partir dos anos 90, o interesse no estudo sobre a qualidade do solo aumentou consideravelmente devido à comunidade científica estar consciente da importância do solo para a qualidade ambiental e para a sustentabilidade agrícola. O objetivo deste trabalho foi definir atributos físicos e químicos do solo para determinar a qualidade do solo e validar um modelo de índice de qualidade do solo, em Latossolos com produção de cana-de-açúcar e mata nativa. O estudo foi realizado nos municípios de Araras, Santa Ernestina e Guariba no estado de São Paulo. Foram coletadas 24 amostras de solo deformadas e indeformadas na profundidade de 0,0-0,10 m, em três áreas cultivadas com cana-de-açúcar e adjacentes de matas nativas. Foram avaliados os seguintes atributos do solo: a) químicos - pH em CaCl_2 , matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), acidez potencial (H+Al), alumínio (Al^{3+}) e enxofre (S); b) físicos: macro, microporosidade, densidade do solo (Ds), estabilidade de agregados, diâmetro médio ponderado (DMP), erodibilidade global (K), em sulcos (Kr), em entressulcos (Ki), tensão cisalhante (τ_c) e a susceptibilidade magnética (SM). Os dados foram submetidos a análises estatísticas multivariadas a fim de verificar as similaridades e/ou diferenças das áreas estudadas com diferentes gradientes texturais e para identificar os atributos indicadores de qualidade do solo bem como a determinação dos seus pesos nas funções para determinar o índice de qualidade do solo (IQS). O estudo mostrou que a análise multivariada foi eficiente para determinar os atributos físicos e químicos que mais sensíveis em discriminar as áreas avaliadas sendo eles, a areia total, SM, argila, microporosidade, Mg, Ca, pH e MO e que a área com maior teor de argila apresentou melhor qualidade do solo quando comparado com valores de referência de mata nativa enquanto que não houve diferenças entre as áreas quanto comparadas com os valores de referência agrônômicos.

Palavras-chaves: atributos do solo, modelo aditivo ponderado, estatística multivariada.

2.1 Introdução

O conceito qualidade do solo (QS) é relativamente recente e tem sido mais utilizado para avaliar a sustentabilidade de diferentes práticas de manejo no solo. Uma qualidade ideal do solo constitui-se no mais importante elo entre as práticas agrícolas e a agricultura sustentável (SANTANA; BAHIA-FILHO, 1998).

Embora existam vários métodos para monitorar e avaliar a qualidade da água e do ar, nenhum método isolado tem sido amplamente aceito para atribuir um índice de qualidade ao solo (IQS) (GLOVER; REGANOLD; ANDREWS, 2000). O solo é um ambiente complexo, onde interagem inúmeros processos químicos, físicos e biológicos os quais estão constantemente em fluxo, são de natureza heterogênea e, frequentemente, de difíceis medições. Combinando esses fatores de complexidade do ambiente solo com a definição da sua qualidade, que reconhece as suas múltiplas funções, pode-se ter ideia que a medida de qualidade desse sistema é extremamente difícil (KELTING et al., 1999).

Segundo Mendes, Melloni e Melloni (2006), o grande desafio dos estudos sobre sustentabilidade está relacionado com o desenvolvimento de métodos para avaliar a qualidade do solo e do ambiente sob a interferência antrópica. Há atualmente um esforço multidisciplinar para quantificar os diferentes atributos do solo, traduzindo-os na forma de IQS. Este desafio tem como uma das suas causas a necessidade de questionamento das formas convencionais de se avaliar os sistemas de manejo de recursos naturais (LOPES et al., 2009). Uma forma que tem sido proposta para superar essa dificuldade é definir explicitamente funções de qualidade do solo, identificando os atributos para cada função, e então, selecionar um conjunto mínimo de indicadores para a medição de cada atributo (DORAN; PARKIN, 1994; KARLEN; STOTT, 1994; LARSON; PIERCE, 1994).

Segundo Karlen et al. (1994) a definição mais aceita atualmente de qualidade do solo é a de uma avaliação sistêmica deste, que permita compreender a capacidade de um determinado solo desenvolver múltiplas funções no ambiente, mantendo a sustentabilidade do ecossistema. O processo de avaliação da qualidade do solo necessariamente envolve a seleção de indicadores, os quais são atributos e que podem ser utilizados para avaliar o comportamento de um solo específico.

As pesquisas sobre qualidade do solo no Brasil são recentes e pesquisadores da ciência do solo estão buscando os indicadores mais adequados para avaliar QS

nas condições brasileiras, e surgindo propostas de indicadores físicos (FIDALSKI; TORMENA, 2007), químicos (RIBEIRO et al., 2007), biológicos (CHAER; TOTOLA, 2007; RIBEIRO et al., 2007) e a interação destes (ARAUJO et al., 2007; BONILHA et al., 2012; FREITAS et al, 2012).

Uma moderna concepção de qualidade de solo deve ser coerente com as particularidades inerentes a cada ecossistema. Deve-se considerar, por exemplo, que o principal problema nos solos tropicais é a sua degradação e a carência de nutrientes, enquanto, nos solos temperados, a contaminação química costuma ser a maior preocupação (ZILLI et al., 2003). Esses mesmos autores afirmam que essa abordagem diferenciada é essencial, para que se encontrem soluções que efetivamente contribuam para o desenvolvimento de manejos sustentáveis do solo. Além disso, a difusão do conceito de qualidade do solo, tanto entre pesquisadores como entre agricultores, é um fator importante para o desenvolvimento de aspectos culturais voltados à agricultura.

Um desafio atual da pesquisa é como avaliar a qualidade de um solo de maneira simples e confiável. Para Araújo et al. (2007), ela pode ser medida por meio da quantificação de alguns atributos que possibilitem o monitoramento de mudanças, a médio e longo prazo, no estado da qualidade desse solo. Dessa forma, segundo Doran e Parkin (1994), a avaliação da qualidade do solo deve englobar o estudo de algumas de suas propriedades que são consideradas como atributos indicadores.

A complexidade do sistema solo, em decorrência da sua característica multivariada torna difícil estabelecer um indicador padrão de sustentabilidade para um projeto agrícola (ANDRADE et al., 2009). Nos dias atuais muitos são os pesquisadores que vêm empregando a Análise da Componente Principal em estudos de processos multivariados na busca de redução das variáveis sem perda da explicabilidade da variância dos resultados (CARNEIRO NETO et al., 2008). Essa análise permite a redução da dimensão de dados bem como os fatores determinantes da variância, facilitando a extração de informações que serão de grande relevância na avaliação da sustentabilidade pelos produtores (GIRÃO et al., 2007).

Contudo, o conceito de qualidade é abstrato, razão por que se faz necessário o desenvolvimento de sistemas de avaliação quantitativos, baseados em uma combinação de propriedades do solo ou em indicadores de qualidade que melhor

reflitam as principais alterações em curso. A partir do exposto, o objetivo deste trabalho foi definir quais atributos do solo permitem determinar a qualidade do solo e validar um modelo para a determinação de IQS, baseado nos atributos e indicadores de natureza química e física em áreas de produção de cana-de-açúcar e mata nativa.

2.2. Material e métodos

Descrição da área em estudo e sistema de amostragem

O estudo foi realizado em três áreas localizadas no interior do estado de São Paulo (Figura 1), sendo avaliados os atributos químicos e físicos das áreas cultivadas com cana-de-açúcar e com matas nativas adjacentes.

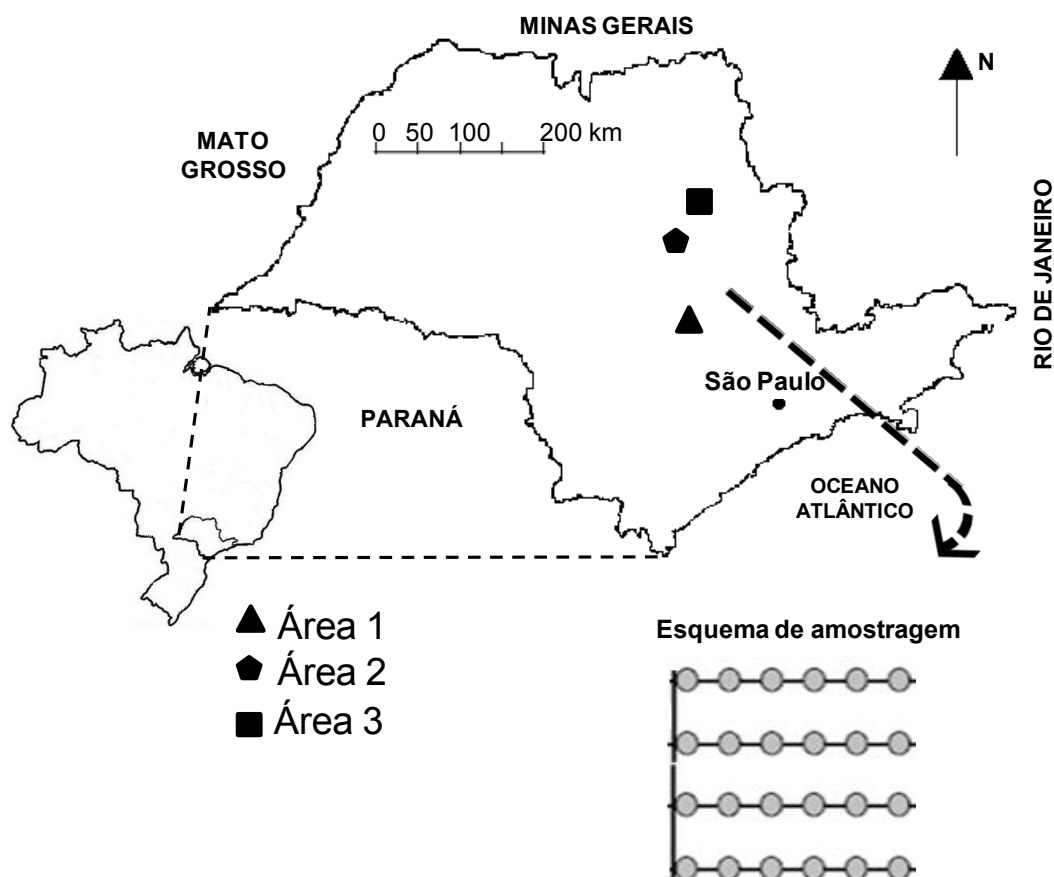


Figura 1. Localização das áreas no estado de São Paulo e esquema de amostragem de solo.

A área 1, está localizada no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos, no Município de Araras - São Paulo, nas coordenadas de latitude $22^{\circ}18'31''S$ e longitude $47^{\circ}23'13''O$, numa altitude 670 m. A segunda área está localizada em Santa Ernestina e a terceira área, no município de Guariba, sendo a área 2 situada nas coordenadas $21^{\circ}31'42''S$ e $48^{\circ}34'31''O$ e altitude média

de 600 m, e a área 3 situada nas coordenadas de 21°31'31"S e 48°19'25"O com altitude média de 680 m.

O solo da área 1, foi classificado como Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2013), apresentando textura argilosa e no ano de coleta a área se encontrava no terceiro corte e a variedade plantada era a RB92-5345, sendo a área plantada de 17 hectares (ha). Contígua à área cultivada com cana-de-açúcar, a área de mata nativa representa cerca de 10 ha e se constitui em floresta Estacional. Do ponto de vista geológico, a área está situada na Bacia do Paraná, compostas por rochas sedimentares com material de origem de argilitos da Formação Irati ou Corumbataí, Grupo Passa Dois (IPT, 1993). De acordo com a classificação de Thornthwaite, o clima desse município é B1rB'4^a, clima úmido, sem ou com pouca deficiência hídrica, com evapotranspiração anual média entre 997 e 1140 mm.

Na área 2 o solo foi classificado como Latossolo Amarelo (EMBRAPA, 2013), com textura franco-arenoso com área de cultivo de 27,3 ha, sendo a variedade predominante produzida a SP83-2847, e no ano de coleta a área se encontrava no terceiro corte. A área 3, o solo foi classificado como Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2013), com textura franco-argilo arenoso e área de cultivo de 17 ha, sendo a variedade predominante produzida a RB86-7515 e no ano de coleta a área se encontrava no terceiro corte. Contígua as duas áreas, a área de mata nativa representa cerca de 25 ha para a área 2 e cerca de 5 ha para área 3 e constituem em floresta Estacional. As áreas estão inseridas no Planalto Ocidental Paulista, próxima ao limite das Cuestas Basálticas (IPT, 1981a), no divisor litoestratigráfico arenito basáltico (IPT, 1981b). O material de origem está relacionado à transição Basalto do Grupo São Bento Formação Serra Geral, Depósito Colúvio-Eluvionar e Depósito Aluvionar (IPT, 1981b). 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.

Durante cerca de 40 anos, as áreas foram cultivadas com cana-de-açúcar e, pelo menos nos últimos 10 anos, foram adubadas no primeiro e no segundo corte com somente adubação de cobertura com torta de filtro. Nesses três ciclos de produção, a colheita foi realizada como cana crua, ou seja, sem queima ou despalha.

Nestas áreas foram coletadas aleatoriamente 24 amostras de solos deformadas e indeformadas em cada área (Figura 1). As amostras de solos foram coletadas nas profundidades de 0,0-0,10 m indicada, em vários estudos (Kondo; Dias Júnior 1999, Araújo et al. 2007), como sendo a que apresenta maior resposta das alterações destes atributos, em relação ao tipo de manejo efetuado, pelo acúmulo de resíduos orgânicos, manejo de implementos agrícolas e pressões físicas exercidas sobre o solo, em áreas cultivadas com cana-de-açúcar e mata nativa para os atributos químicos e físicos do solo.

Análises físicas

A análise granulométrica das amostras coletadas foi realizada pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante químico, e agitação mecânica em aparato de baixa rotação, por 16 horas, seguindo metodologia da EMBRAPA (1997). A fração argila foi separada por sedimentação, as areias muito grossa, grossa, média, fina e muito fina por tamisação e o silte foi calculado por diferença.

As amostras de solo com estrutura indeformada coletadas em anel volumétrico foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir cerca de 2/3 da altura do anel, para determinação da porosidade total (Pt) obtida pela diferença entre a massa do solo saturado e a massa do solo seco em estufa a 105° C durante 24 h (EMBRAPA, 1997). A microporosidade do solo foi determinada pelo método da mesa de tensão em 60%, segundo metodologia da Embrapa (1997). Pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade, obteve-se a macroporosidade. A densidade do solo (Ds) foi calculada pela relação entre a massa seca a 105 °C durante 24 h, e a amostra de solo do cilindro volumétrico e o volume do mesmo cilindro (EMBRAPA, 1997).

Em cada ponto amostral, foram coletadas amostras com estrutura preservada na forma de “torrão”, para determinação da estabilidade dos agregados do solo. Estas amostras foram levemente destorroadas, de forma manual e passadas em peneira com abertura de 8,0 mm e que as ficaram retidos em peneira com abertura de 4,00 mm e foram secas ao ar por 48 h. Esse material foi utilizado para a determinação da estabilidade de agregados em água usando uma modificação do método de Yoder (1936). Para tal, 20 g de agregados foram transferidos para um

conjunto de seis peneiras. A superior com aberturas de 4,00 mm foi encaixada sobre outras cinco peneiras com aberturas de 2,0 mm, 1,0 mm, 0,5 mm, 0,25 mm e 0,125 mm, formando um conjunto em ordem decrescente de acordo com suas respectivas aberturas. A separação e estabilidade dos agregados foram determinadas segundo Kemper e Chepil (1965), com modificações, nas seguintes classes de diâmetro, >2,0; 2,0-1,0 e < 1,00 mm. Os agregados foram colocados em contato com a água sobre a peneira de 4,0 mm por quinze minutos, ajustado para 31 ciclos min^{-1} , com amplitude de oscilação de 35 mm. A massa do material retido em cada peneira, foi colocada em estufa a 105°C. Os resultados foram expressos em percentual dos agregados retidos nas peneiras >2,0; 2,0-1,0 e < 1,0 mm, sendo determinado o diâmetro médio ponderado (DMP).

Análises químicas

Foram determinados os teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+) trocáveis, fósforo (P) disponível e a acidez potencial (H+Al) utilizando-se o método da resina trocadora de íons (RAIJ et al., 2001). A acidez trocável (Al^{3+}) foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Camargo et al. (1986).

O pH foi determinado potenciometricamente utilizando-se relação 1:2,5 de solo em água (EMBRAPA, 1997). O carbono total foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado por Yoemans e Bremner (1988), a matéria orgânica, por sua vez, foi estimada com base no carbono orgânico. O teor de enxofre (S) foi determinado pelo método extrator de acetato de cálcio, de acordo com Camargo et al. (1986).

Suscetibilidade magnética (SM)

A SM foi determinada na TFSA (terra fina seca ao ar) das amostras coletadas nas áreas com cana-de-açúcar e nas matas, no equipamento Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B. A avaliação foi feita em baixa frequência (0,47 kHz) (DEARING 1994). Segundo este autor, 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), sendo esta metodologia adotada neste trabalho. O potencial de uso em solos tropicais e a confiabilidade dos resultados deste método já foram comprovados por estudos anteriores (SIQUEIRA et al., 2010; MATIAS et al., 2013; SANTOS et al., 2013; PELUCO et al., 2013).

Cálculo dos fatores erodibilidade (K , K_i , K_r) e tensão cisalhante crítica (τ_c)

Para o cálculo da erodibilidade global do solo da USLE (fator K , $t\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}\ ha\ h$) foi utilizada a equação proposta por Denardin (1990), Equação 1:

$$K = 0,00000748 M + 0,00448059 p - 0,0631175 DMP + 0,01039567 X32 \quad (1)$$

em que,

M = novo silte (novo silte + nova areia);

p = permeabilidade codificada segundo Wischmeier et al. (1971);

DMP = diâmetro médio ponderado das partículas do solo inferiores a 2,00 mm;

$X32$ = nova areia ($MO/100$);

Novo silte = silte + areia muito fina, %;

Nova areia = areia muito grossa + areia grossa + areia média + areia fina, %.

Para o cálculo da erodibilidade em entressulcos do modelo Wepp (K_i , $kg\ s\ m^{-4}$) foram utilizadas as equações propostas por Flanagan e Livingston (1995), Eq. 2 e 3:

$$K_{i\ WEPP} = 2728000 + 192100\ AMF, \quad \text{areia} \geq 30\% \quad (2)$$

$$K_{i\ WEPP} = 6054000 - 55130\ ARG, \quad \text{areia} < 30\% \quad (3)$$

em que,

AMF = percentual de areia muito fina, %;

ARG = percentual de argila, %.

Para calcular a erodibilidade em sulcos (K_r , $s\ m^{-1}$) e a tensão cisalhante (τ_c , $N\ m^{-2}$) do modelo Wepp foram utilizadas as equações propostas por Flanagan e Livingston (1995) (Equações 8, 7. 8 e 9):

$$K_{r\ WEPP} = 0,00197 + 0,00030\ AMF + 0,03863\ e^{-1,84\ MO} \quad \text{areia} \geq 30\% \quad (4)$$

$$\tau_{c\ WEPP} = 2,67 + 0,065\ ARG - 0,058\ AMF \quad \text{areia} \geq 30\% \quad (5)$$

$$K_{r\ WEPP} = 0,0069 + 0,134\ e^{-0,20*ARG} \quad \text{areia} < 30\% \quad (6)$$

$$\tau_{c\ WEPP} = 3,5 \quad \text{areia} < 30\% \quad (7)$$

em que,

AMF = percentual de areia muito fina, %;

e = base dos logaritmos neperianos;

MO= percentual de matéria orgânica do solo, %;

ARG = percentual de argila, %;

Análise dos resultados

Análises multivariadas

Considerando-se a estrutura multivariada contida nos dados, foram empregadas técnicas estatísticas para verificar semelhanças entre as 3 áreas estudadas contendo os ambientes de cana-de-açúcar e mata nativa, na tentativa de agrupá-los usando-se os atributos físicos e químicos dos solos. Para reduzir os erros, devidos às escalas e as unidades das variáveis, os dados foram padronizados com média zero e variância 1. É importante ressaltar que não foram utilizados os atributos como soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por alumínio (m%) e saturação por bases (V%) para se evitar uma retroalimentação do sistema, uma vez que está sendo utilizado os atributos que os compõem, como o Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Al^{3+} .

Fez-se a análise de componentes principais (ACP) para obter um conjunto menor de combinações lineares das variáveis que preservasse a maior parte da

informação fornecida pelas variáveis originais (SILVA et al., 2010a). Esta análise possibilita avaliar qualitativamente as características de cada área e verificar as variáveis que mais estão relacionadas com cada uma delas.

A partir das variáveis mais discriminatórias obtidas através da análise de ACP realizou-se a análise de agrupamento por método hierárquico, usando a distância euclidiana como medida de semelhança entre os registros e o método de Ward, como estratégia de agrupamento. O dendrograma obtido pela análise de agrupamento apresenta no eixo vertical o nível de similaridade e, no eixo horizontal as áreas, formando as classes homogêneas. À medida que o nível de fusão aumenta o nível de similaridade decresce. Então, traçar uma linha horizontal no dendrograma significa traçar a Linha *Fenon* como é chamada, o que delimitará o número de grupos a se formarem. Além de buscar o menor nível de distorção que o processo aglomerativo possa trazer, é preciso ter conhecimento pelo pesquisador de seu objeto de pesquisa ao decidir o ponto a ser efetuado “o corte”.

A comparação das áreas foi realizada utilizando todas as variáveis conjuntamente, com a análise complementar que é a análise discriminante, uma matriz de classificação de dados. A partir desta análise é possível definir se as áreas estudadas são distintas, sendo estas representadas em um gráfico, no qual é possível verificar a separação entre elas.

Escolha dos atributos do solo para determinação do IQS

Após analisar as características de cada área foi possível verificar se estas áreas sofreram modificações em seus atributos químicos e físicos ao longo do tempo em função do manejo. Partindo desses resultados, buscou-se avaliar através destes atributos a qualidade do solo de cada área comparando com a sua mata nativa local, devido estes ambientes serem considerados como referência, pois acredita-se que solo com mata nativa presente a maximização das principais características julgadas favoráveis à conservação do ecossistema, e principalmente, que estejam em equilíbrio com a estabilidade ecológica da região.

De modo a auxiliar na seleção de indicadores que contribuíssem efetivamente para a variância total dos dados, utilizou-se também a estatística multivariada através da técnica exploratória de sintetização da estrutura de variabilidade dos dados denominada Análise de Componentes Principais (ACP).

O procedimento utilizado para a seleção do número de componentes principais (CPs), baseou-se no percentual cumulativo que explicasse 70% ou mais da variância dos dados (REGAZZI, 2006). Nesses componentes principais selecionados, detectaram-se as variáveis mais informativas, ou seja, aquelas que mais se correlacionassem com os CPs, utilizando como critério de escolha de cargas das variáveis ou "*loadings*", valores (em módulo) maiores ou iguais a 0,70.

Para isto, fez-se uma análise multivariada através da ACP pelo método *scree-plot* que é um gráfico dos autovalores em função da ordem das componentes principais, representando graficamente a porcentagem de variância explicada por cada atributo. Utilizaram-se as três áreas com mata nativa, somente com os atributos químicos e outra análise com os atributos físicos, para se conhecer os atributos que possuem maior poder discriminatório e assim, obter os pesos de cada atributo dentro de cada função (química e física). Após definir quais as variáveis físicas e químicas possuem maior poder discriminatório, fez-se novamente uma análise multivariada por meio da técnica de *scree-plot* conjuntamente com os atributos químicos e físicos que mais contribuíram com a variância total dos dados e, assim, com uma simples regra de três obteve-se o peso de cada função principal. Os atributos utilizados no IQS foram os que mais apresentaram valor discriminatório. Assim, foi determinado o peso de cada função (química e física), e o peso dos atributos dentro de cada função. A partir disto, fez-se o uso do modelo de qualidade do solo.

É importante ressaltar que se buscou com esta metodologia obter indicadores e valores reais das funções de seus atributos, a partir de análise estatística, devido à grande dificuldade em se falar em qualidade do solo e definir quais atributos e valores devem ser utilizados. A grande maioria dos trabalhos de qualidade do solo determinam seus indicadores e os valores dos pesos das funções de acordo com o conhecimento e características locais das áreas a partir dos dados brutos. Como por exemplo, em seus trabalhos, Chaer (2001), Bonilha (2012) e Freitas et al. (2012) assumiram para todas as funções a igualdade de importância e definiram por escolha os atributos e pesos a serem os mais importantes na qualidade do solo de seu estudo. Todas as análises estatísticas multivariadas foram processadas no software STATISTICA versão 7.0 (STATSOFT, 2004).

Modelo aditivo ponderado (MAP)

O modelo utilizado para a determinação do índice de qualidade do solo (IQS) foi o proposto por Karlen e Stott (1994). O modelo foi executado como realizado por Melo Filho et al. (2007) e Cardoso (2008), em duas etapas, conforme as equações 10 e 11:

$$QFPn = I1(W1) + I2(W2) + In(Wn) \quad (10)$$

$$IQS = QFP1(WFP1) + QFP2(WFP2) + QFP3(WFP3) + QFPn(WFPn) \quad (11)$$

em que,

QFPn - refere-se à qualidade da função principal do solo;

I - refere-se aos escores padronizados dos indicadores de qualidade relacionados a cada função principal;

w - refere-se aos ponderadores relacionados a cada indicador ou a cada função principal;

IQS – é o índice integrado da qualidade do solo.

Dois funções do solo relacionadas com a sustentabilidade do sistema foram definidas neste estudo para a obtenção do IQS: química (função A) e física (função B). Após atribuir pesos relativos às funções, pelas análises multivariadas foram identificados quais indicadores que mais influenciaram em cada função. Segundo esta metodologia, o somatório dos pesos de todas as funções principais deve resultar no valor 100%, sendo este o valor do IQS para um solo considerado ideal em relação ao objetivo proposto, sendo que no presente estudo foi utilizada a mata nativa. Após atribuir os pesos relativos para as funções, foram identificados e priorizados os indicadores e ponderadores que influenciam cada uma, em diversos graus, sendo o somatório geral dos pesos dos indicadores em cada nível igual a 100%.

Os indicadores de qualidade do solo por possuírem diferentes unidades de medida foram padronizados para escores que variam de 0 a 1, aplicando-se a função de padronização de escores, desenvolvida por Wymore (1993), conforme equação 12:

$$V = \frac{1}{1 + \left(\frac{B-L}{X-L}\right)^{2S(B+X-2L)}} \quad (12)$$

em que,

v - é a pontuação padronizada;

B - é o valor crítico ou limite-base do indicador, cuja pontuação equivale a 0,5;

L - é o limite inferior ou o menor valor do indicador, podendo ser zero;

S - é a inclinação da tangente da curva no limite-base ou no valor crítico do indicador;

x - é o valor do indicador medido no campo.

Para aplicar a equação de Wymore (1993), inicialmente foi necessário calcular a inclinação (S) da tangente da curva de pontuação no valor crítico do indicador, conforme equação 13:

$$S = \frac{\log\left(\frac{1}{v}\right) - 1}{\log\left(\frac{B-L}{X-L}\right)(2B+2X-4L)} \quad (13)$$

Segundo Karlen e Stott (1994), a curva de padronização do tipo “mais é melhor” possui declividade (S) positiva e é utilizada para padronização de indicadores em que maiores valores apontam para a melhoria da qualidade do solo, a exemplo da soma de bases, CTC efetiva, matéria orgânica, estabilidade de agregados, permeabilidade do solo saturado e carbono orgânico total (Figura 2a); as curvas de padronização do tipo “menos é melhor” possuem declividade negativa e padronizam indicadores como a densidade do solo, resistência do solo à penetração e saturação por alumínio, em que a qualidade está associada a menores valores dos mesmos (Figura 2b); e o “valor ótimo” possui inclinação positiva e é utilizada para indicadores que apresentam um efeito positivo na qualidade do solo até determinado valor, a partir do qual sua influência é negativa, a exemplo da porosidade total, macroporosidade e pH, (Figura 2c).

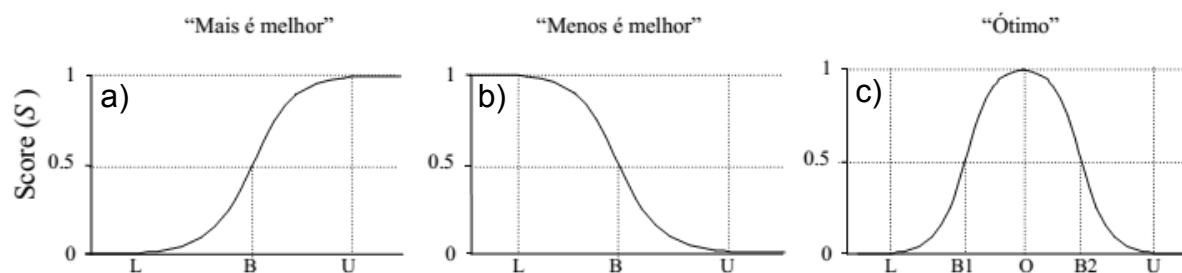


Figura 2. Funções de pontuação padronizada: (a) “mais é melhor”, (b) “valor máximo”, e (c) “menos é melhor” (L – limite inferior; B – linha base; U – limite superior; O – ótimo). Fonte: Adaptado de Wymore, 1993.

Conforme Melo Filho et al. (2007) e Freitas et al. (2012), na padronização dos atributos foram utilizados dois valores-limite dos indicadores de qualidade, o superior e o inferior, e um valor crítico que é aquele no qual a função de pontuação é igual a 0,5 e equivale aos pontos médios entre os valores limites do indicador de qualidade avaliado. O valor-limite superior foi aquele no qual a função de pontuação equivalerá a 1, quando o atributo do solo medido será considerado estar em nível ótimo. Os valor-limite inferior foi aquele no qual a função de pontuação equivalerá a 0 (zero), quando o atributo do solo será considerado estar em nível inaceitável. Um valor será considerado crítico quando a função de pontuação for igual a 0,5.

O escore de cada indicador foi calculado após o estabelecimento de limites inferiores e superiores e valores de linha base (ponto médio entre os valores limite de cada propriedade do solo considerada). Após a pontuação de todos os indicadores de qualidade do solo, a pontuação de cada uma das funções do solo é obtida pela soma dos produtos dos pesos numéricos e dos escores de seus indicadores associados. Para cada função foi atribuído um peso que multiplica o escore daquela função, originando um sub-índice de desempenho da função. A soma desses sub-índices origina o IQS, índice de qualidade do solo.

Os valores dos limites críticos para os indicadores das funções químicas, físicas utilizados no cálculo deste modelo foram obtidos com base na literatura disponível, na experimentação, na opinião de especialistas ou podem ser observados sob condições de solo próximas das consideradas ideais em locais preservados ou em culturas específicas (KARLEN et al., 1994; BURGER; KELTING, 1999), ou em áreas de mata nativa adjacente, consideradas como meu solo original. No caso dos indicadores químicos os valores foram obtidos do Boletim

100 (RAIJ et al., 1997). O valor crítico da microporosidade não foi encontrado na literatura, sendo assim, partiu-se do pressuposto de que a composição volumétrica do solo é constituído por partículas sólidas por água e ar. Em geral, se considera que o solo agrícola ideal deve ter 50% de parte sólida, 25% de solução do solo e 25% de ar (KIEHL, 1979). Essas proporções, entretanto, são bastante variáveis, dependendo do tipo de solo e de seus atributos físicos (principalmente textura, estrutura e densidade). Considerou neste trabalho, um valor crítico de microporosidade de 25%. Foram realizados os IQSs das 24 amostras coletadas em cada área, e feito a média de cada área para se ter um único valor de IQS.

Para a realização do cálculo dos IQS e respectivas análises estatísticas, foram confeccionadas planilhas eletrônicas totalmente associadas utilizando o software Excel (Microsoft EXCEL 2000) contendo: 1) as funções de pontuação padronizada; 2) os resultados obtidos para todas as características do solo que integram o modelo; 3) os valores dessas características padronizadas entre 0 e 1 por meio das funções de pontuação; 4) o modelo de índice de qualidade do solo e, 5) uma planilha na qual se realiza a análise de variância e o teste de médias dos índices obtidos para os diferentes solos analisados. Essa ferramenta computacional foi utilizada por facilitar a análise dos IQS. Assim, qualquer modificação no modelo ou nos valores dos parâmetros das funções de pontuação faz com que os índices sejam automaticamente recalculados e analisados estatisticamente. Os índices de qualidade do solo gerados foram avaliados pelo teste t ($p = 0,05$), sendo as análises conduzidas no software Minitab ®14(MINITAB INC., 2003).

2.3. Resultados e discussão

Caracterização das áreas

Com a análise de componentes principais (ACP) foi possível identificar as variáveis com maior potencial discriminatório para cada área e ambiente. As quatro primeiras componentes principais foram necessárias para explicar a variância total, devido estas componentes apresentarem elevados autovalores, e explicarem mais de 70% da variância total dos dados, conforme (HAIR, 2005), justificando o uso das quatro componentes (Tabela 1). Segundo Kaiser (1958), as CPs que apresentam autovalores superior a 1 (um) podem ser utilizados para uma ordenação

bidimensional dos acessos e das variáveis. Autovalores inferiores à unidade não dispõem de informação relevante. Por meio desta técnica foi possível identificar quais as variáveis que melhor se relacionaram com cada área e quais as que provocaram maior efeito na alteração das características do solo.

Tabela 1. Autovalores e % da variância total dos dados pela Análise dos Componentes Principais para as análises do solo.

Componente	Autovalores	% da Variância Total dos dados	% Cumulativas da Variância Total dos dados
1	7,57	31,58	31,58
2	5,88	24,43	56,01
3	2,77	11,54	67,55
4	1,43	5,97	73,52

Quanto ao percentual de variância explicada pelas CPs, verificou-se que, as quatro primeiras componente são responsáveis por 73,52% da variância total (Tabela 1). Loss et al. (2009), Silva et al. (2009) e Kummer et al. (2010), encontraram valores de variância acima de 70% em atributos físicos e químicos do solo, sendo esses valores, atribuídos a variabilidade destes atributos.

Os autovetores apresentados na Tabela 2 correspondem às principais componentes e podem ser considerados como uma medida da relativa importância de cada variável, em relação às componentes principais, sendo os sinais, positivos ou negativos, indicações de relações diretamente e inversamente proporcionais, respectivamente. No caso em questão, os coeficientes dos atributos ou seus pesos acima de 0,7, independentemente se positivos ou negativos, foram destacados, conforme Araújo (2008), que detectaram as variáveis mais informativas, ou seja, aquelas que mais se correlacionassem com os CPs, utilizando como critério de escolha de cargas das variáveis ou “loadings”, valores (em módulo) maiores ou iguais a 0,70.

De acordo com a Tabela 2, as variáveis que melhor explicaram ou mais contribuíram para a variância total dos dados foram: areia, argila, silte, matéria orgânica, Ca^{2+} , Mg^{2+} , fator K e SM na primeira componente principal; a macroporosidade, diâmetro médio ponderado, $>2,00$, $<1,00$ na segunda componente principal; e na quarta componente principal somente o fator Kr. No estudo de Oliveira (2013), os atributos argila, areia total, Ca^{2+} , Mg^{2+} , MO e SM foram os que mais contribuíam na discriminação dos ambientes.

Tabela 2. Correlação entre cada componente principal e variáveis analisadas nos três ambientes estudados.

TRIBUTOS	CP1	CP2	CP3	CP4
Argila	-0,790093	-0,249460	-0,442924	-0,115319
Silte	-0,828929	0,102820	-0,261187	0,017539
Areia total	0,879092	0,091225	0,380578	0,057962
Ds	0,496673	-0,639811	0,069494	0,119588
Macro	-0,094422	0,787792	-0,395269	0,114020
Micro	-0,684333	-0,417207	0,284197	-0,031535
DMP	-0,229054	0,910920	0,171043	-0,062449
> 2,00 mm	-0,238253	0,916374	0,167503	-0,056879
2,00-1,00 mm	-0,058175	-0,682905	-0,473966	-0,136408
<1,00 mm	0,293230	-0,883703	-0,062918	0,107908
P Resina	-0,193054	-0,549079	-0,165594	-0,495477
MO	-0,770273	0,287705	0,361897	-0,099090
pH	-0,588098	-0,470490	0,475716	0,166186
K ⁺	-0,510711	-0,115266	-0,322460	0,173713
Ca ²⁺	-0,756838	0,223323	0,387137	0,066972
Mg ²⁺	-0,823799	-0,023077	0,249589	0,276612
H+Al	0,252750	0,658181	-0,578567	-0,125866
Al ³⁺	0,488903	0,638297	-0,381033	-0,075700
S	-0,102149	0,195705	0,350594	-0,380784
K	-0,785407	0,205387	0,165708	0,146602
Ki	-0,454582	0,041093	-0,315839	0,150458
Kr	-0,039963	-0,090798	-0,353841	0,735984
τ_c	-0,513529	-0,283682	-0,147602	-0,449391
SM	-0,825321	-0,076675	-0,505313	-0,048416

Valores em negrito são os mais discriminatórios; CP1= componente principal 1; CP2= componente principal 2; CP3= componente principal 3; CP4= componente principal 4.

Analisando a Figura 3, observa-se que as variáveis com maior poder discriminatório (correlação com as variáveis com maiores pesos) para a área 1 foram a argila, o fator K e SM. Um dos atributos que está correlacionado com a erodibilidade do solo é a textura, e visto que este possui solos com altos teores de argila, as partículas de argila agem como agente cimentante, proporcionando maior estabilidade dos agregados e com isso, menor erodibilidade do solo em entressulcos. O fator K por estar relacionado com a perda de solo, em solos argilosos como é o caso, as partículas de argila agem como agente cimentante, proporcionando maior estabilidade dos agregados e com isso, menor erodibilidade do solo (MEYER; HARMON, 1984). Os solos arenosos, segundo Brady e Weil (2002), em geral apresentam menor agregação. Por este solo ser argiloso, este possui maiores teores de argila e silte, e menos areia (médias de 42%, 32% e 26% de argila, silte e areia total, respectivamente) (Apêndice 1).

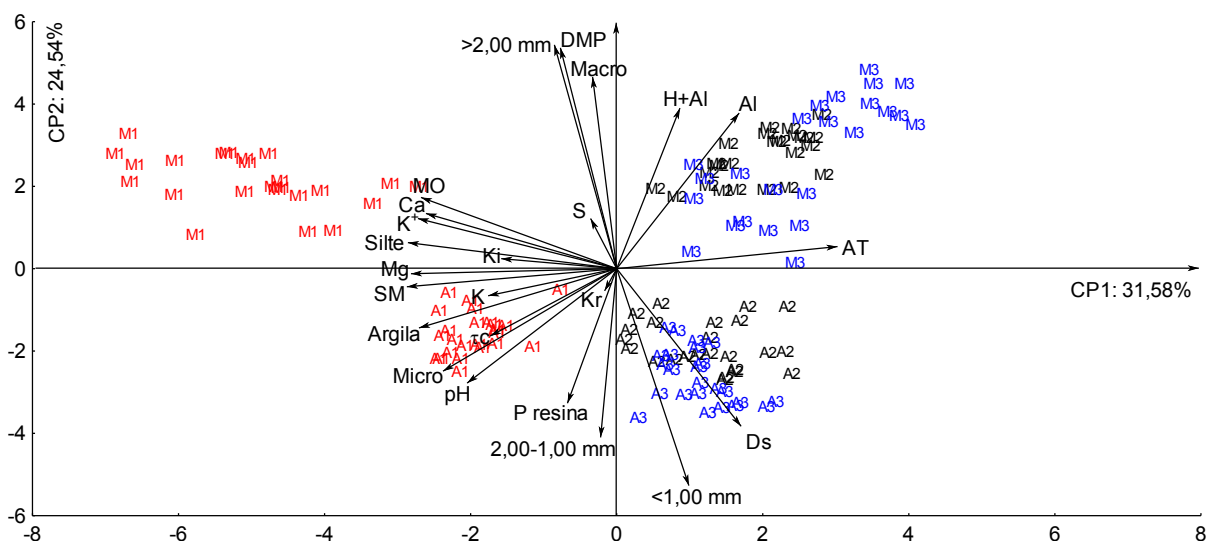


Figura 3. Análise de componentes principais das médias dos atributos do solo.

Legenda: A1= Área 1; A2= Área 2; A3= Área 3; M1=Mata 1; M2=Mata 2; M3=Mata 3.

A SM está relacionada a área 1 e segundo Fontes et al. (2000), afirmam que o comportamento magnético é mais evidente em solos cuja fração argila é maior. Isso ocorre porque, na fração areia, a magnetita é oxidada diretamente a hematita, enquanto que na fração argila a magnetita é oxidada em maghemita, que possui maior SM do que a hematita. No estudo de Siqueira (2010), a SM pode ser utilizada para auxiliar na estimativa do teor de argila com uma confiança de 30%.

A mata 1, contígua a área 1 foi correlacionada mais fortemente com as variáveis MO, Ca^{2+} , e silte (Figura 3). Quanto aos maiores valores de MO, Genu et al (2013) afirmam que elevados teores de MO estão relacionados a maiores teores de argila nos solos. Quanto a alta correlação com Ca deste ambiente, justifica-se pelos altos valores de MO, responsável pela retenção. Nota-se que as áreas de matas 2 e 3 ficaram próximas espacialmente no gráfico biplot, tendo assim características semelhantes, com o atributo que mais influenciou sua característica, a areia total, visto que esses solos possuem textura média arenosa e, por serem de ambiente de mata sem a ação do manejo.

Nas áreas 2 e 3 cultivadas com cana-de-açúcar, como pode ser observado na Figura 3, os agregados <1,00 mm tiveram maior poder discriminatório, o que demonstra a influência da areia na perda da estrutura dos agregados em solos que sofreram a ação do manejo, pois segundo Meyer e Harmon (1984), solos mais arenosos geralmente têm maior taxa de desagregação que solos argilosos, sendo a agregação de suas partículas muito menor do que em solos mais argilosos. Esses

mesmos autores salientam o fato que em solos argilosos as partículas de argila agem como agente cimentante, proporcionando uma maior estabilidade dos agregados.

A partir dos atributos com maiores poderes discriminatórios, realizou-se a análise de agrupamento. Com esta análise, foi possível observar a separação das áreas (Figura 4), as quais foram agrupadas com base no grau de semelhança em grupos homogêneos.

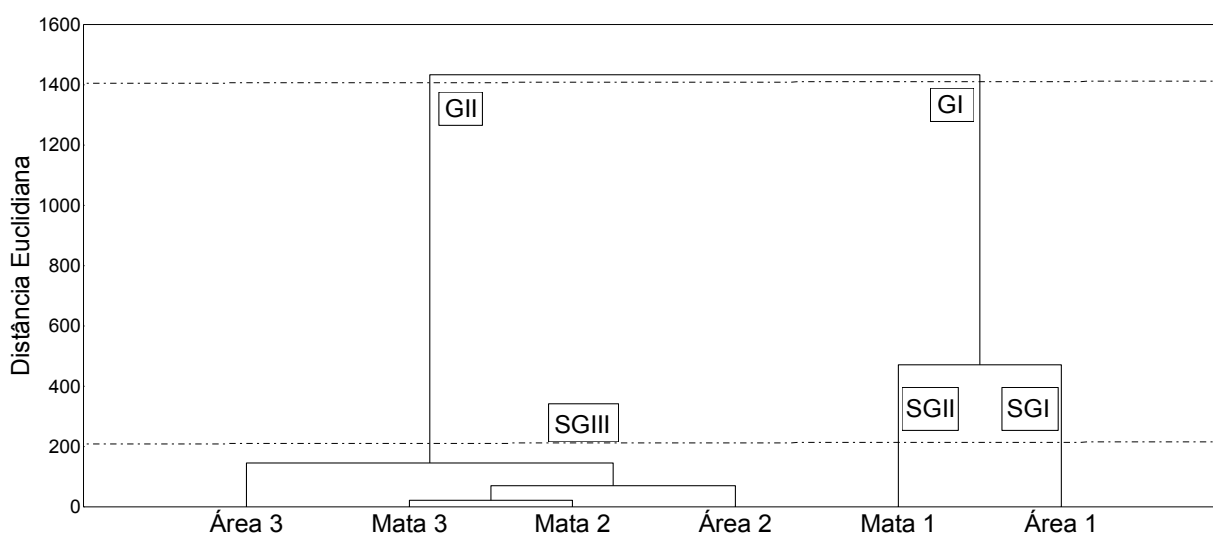


Figura 4. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos (G) e sub-grupos (SB) segundo as variáveis selecionadas da análise de componente principal.

Foi admitido um corte na distância euclidiana de 1400, o que favoreceu uma divisão de grupos, indicando que com o uso conjunto dos atributos químicos e físicos, é possível ordenar os dados em dois grupos: o GI, englobando os dados formados pela área 1 e mata 1, e o GII formado pelas áreas 2 e 3 e as matas 2 e 3 (Figura 4). O grupo formado por mais de uma área (GII), provavelmente, se deve a fato de apresentarem atributos químicos e físicos similares, mesma classe textural, material de origem e clima iguais ou semelhantes, haja vista a formação de um único agrupamento. Esta informação está de acordo com a afirmativa de Yemefack, Rossiter e Njomgang (2005) de que esta técnica permite agrupar variáveis com características semelhantes entre si e com aumento de variabilidade entre os agrupamentos formados. Diminuindo a distância euclidiana, com um corte na distância de 200, nota-se a formação de 4 sub-grupos: o SBGI formado pela área 1,

contendo cana-de-açúcar, o SBGII formado pela mata 1 e o SBGIII formado pelas áreas 2 e 3, matas 2 e 3.

Com o objetivo de verificar as associações entre os ambientes e seus atributos químicos e físicos e identificar quais deles foram mais relevantes na separação das áreas amostradas foi aplicado a técnica complementar de análise discriminante (Figura 5 e Tabela 4), o que permitiu classificar, os resultados obtidos para todas as áreas.

Pela análise discriminante, 96,83% da variabilidade das relações estudadas foram explicados nas duas primeiras raízes. A primeira raiz canônica (Can 1) apresentou 90,96%, e a segunda raiz canônica (Can 2) 5,87% (Figura 5).

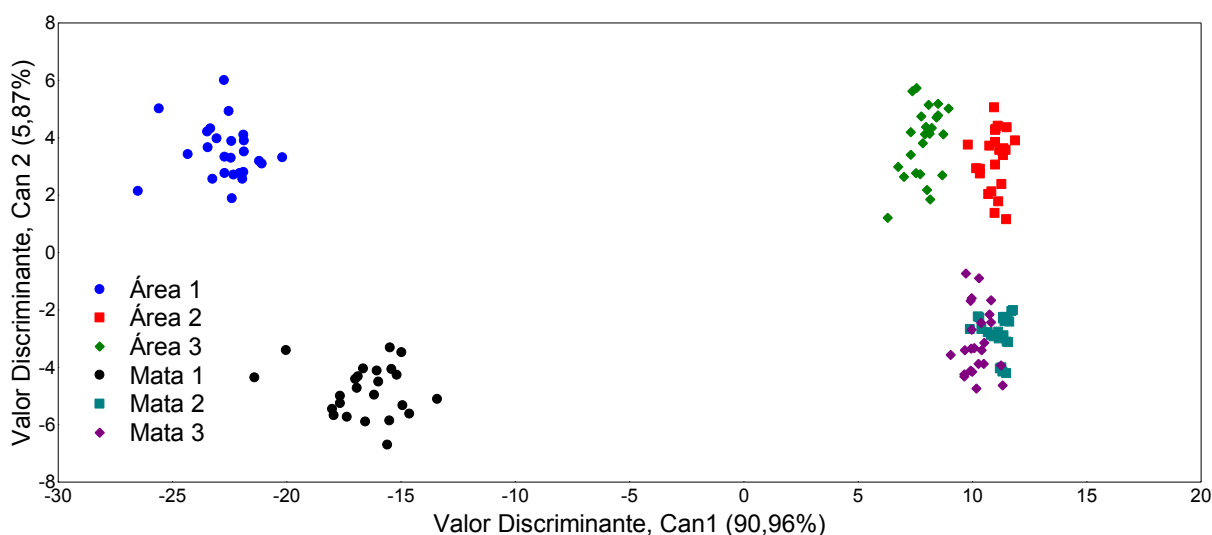


Figura 5. Agrupamento das áreas pela Análise Discriminante Canônica 1 e 2 (Can 1 e Can 2) das variáveis selecionadas na análise de componente principal.

Nota-se que a área com solo argiloso (área 1) em ambos os ambientes (mata nativa e cana-de-açúcar) é totalmente diferente das demais áreas se analisarmos o eixo da Can 1. A análise discriminante demonstra que a Can 1 é responsável pela separação da área argilosa (Área 1 e mata 1) das outras áreas, sendo que este solo confere características mais distante dos demais. Esta afirmativa está de acordo com a análise de componentes principais (Figura 3).

Os atributos com maior poder na discriminação das áreas são areia, agregados >2,00 e <1,00, matéria orgânica, fator K e SM (Tabela 3). Estes resultados demonstram que esses atributos físicos são os que mais contribuem para

a separação das áreas. Oliveira (2013) encontrou a MO das áreas avaliadas com maior poder discriminatório entre os atributos.

Tabela 3. Valores resultantes da análise discriminante canônica, evidenciando o peso de cada variável.

Atributos	Raiz 1	Raiz 2	Raiz 3	Raiz 4
Argila	0,2575	0,04342	0,54375	0,030550
Silte	0,2176	-0,17995	0,31796	-0,027091
Areia total	0,7562*	-0,10149	1,02269*	-0,257553
Macro	-0,0469	-0,17377	0,43214	0,028576
DMP	-0,0035	-0,31562	0,08250	0,545337
> 2,00 mm	0,1233	-1,23072*	-0,13099	0,015789
<1,00 mm	0,1295	-0,71147*	-0,08556	0,745748*
MO	-0,9238*	-0,26851	-2,01881*	0,106117
Ca ²⁺	0,5514	-0,08397	0,29775	0,099965
Mg ²⁺	-0,3466	0,06923	0,10380	0,416756
Al ³⁺	0,0441	-0,07080	-0,17663	-0,448738
K	0,6042	0,13071	1,97993*	0,260278
SM	-0,9968*	-0,01234	0,07293	-0,142267

* Caracterização principal das relações canônicas.

A análise de componente principal e a análise discriminante (Figura 3 e 5) mostram de forma clara a ligação ou as alterações nos solos, quando se aplica um manejo específico. Quando se compara a mata nativa, um ambiente em equilíbrio, com a cana-de-açúcar nota-se que há separação de ambientes. Percebe-se que as áreas e suas respectivas matas ficam próximas (áreas 2 e 3 e matas 2 e 3). Porém é possível observar que apesar de próximas, a área 1 é a que mais se diferencia das demais espacialmente. Este comportamento pode ser um indicativo que a textura, material de origem e clima sejam os principais fatores que causam tal separação e de sua influência com atributos avaliados, visto que as áreas 2 e 3 são as áreas com texturas, clima e material de origem semelhantes, e a área 1, por possuir textura mais argilosa, clima e material de origem diferente das demais áreas, uma vez que a área 1 está situada sob material de origem de argilitos da formação Iratí, enquanto que as área 2 e 3 estão situada sob material origem de arenitos da formação Serra Geral.

Neste sentido, avaliando as Figuras 3 e 5, observa-se que, a área 1 apresenta-se com maior distância gráfica da área da mata correspondente, enquanto que as demais áreas (áreas 2 e 3) encontram-se nos mesmos quadrantes

da área de mata e cana-de-açúcar, demonstrando que estes ambientes apresentam características mais semelhantes. Assim, por meio das técnicas multivariadas foi possível identificar quais as variáveis que melhor se relacionaram com cada área, quais as que provocaram maior efeito na alteração das características do solo, bem como o efeito do uso do solo na sua degradação.

Determinação dos valores e Indicadores de qualidade do solo

Após analisar as características de cada área foi possível verificar que estas áreas sofreram modificações em seus atributos químicos e físicos ao longo do tempo em função do manejo. Partindo desses resultados, buscou-se avaliar através destes atributos a qualidade do solo de cada área comparando com a mata nativa, devido este ambiente ser considerado como referência, pois se acredita que sob esse uso tenha-se a maximização das principais características julgadas favoráveis à conservação do ecossistema e, principalmente, que estejam em equilíbrio com a estabilidade ecológica.

Para isto, fez-se uma análise multivariada, uma ACP (Apêndice 2) que através do método *scree-plot* das três áreas com mata nativa foi possível determinar quais são os atributos que mais influenciaram a caracterização das áreas. Fez-se uma análise de ACP somente com os atributos físicos e obtiveram-se quatro importantes atributos, conforme Figura 6. Em seu trabalho, Araújo (2008) e Pamplona (2012) realizaram a ACP para selecionar quais atributos são os melhores indicadores da qualidade do solo.

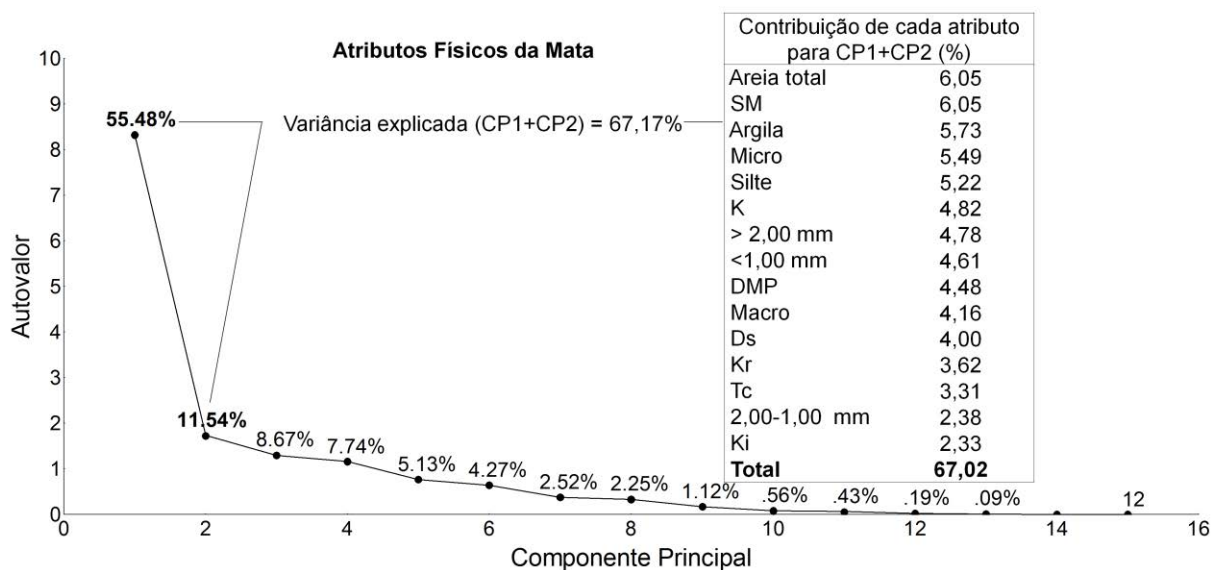


Figura 6. Proporção da variação no conjunto de atributos físicos explicada pelo componente principal (PC) e contribuição de cada variável para explicação da variância total pelo método “scree plot” para os solos das áreas de mata.

Os resultados indicam que os atributos físicos que possuem maior contribuição para a explicação dos pesos das variáveis a serem utilizados como IQS na função principal do modelo aditivo ponderado (MAP) foram: areia, suscetibilidade magnética, argila e microporosidade. A partir desta análise, é possível ainda determinar qual o valor de cada variável (peso) por uma simples regra de três (Apêndice 4). Logo, tem-se que dentro da função principal de atributos físicos o valor do peso da areia total é de 26,05%, a SM com 26,44%, a argila com 24,68% e a microporosidade com 22,83% e, pela soma das quatro funções tem se o valor total de 100%.

A mesma ACP foi realizada para os atributos químicos do solo do ambiente da mata (Apêndice 3). De acordo com a Figura 7, os atributos químicos que possuem maior contribuição para a explicação dos pesos das variáveis a serem utilizados como IQS na função principal do MAP foram: Ca^{2+} , Mg^{2+} , pH e MO. Por uma regra de três simples (Apêndice 5) obteve-se os pesos das variáveis químicas: Ca com 26,24%, o Mg^{2+} com 24,88%, o pH com 24,45% e a MO com 24,43% e, pela soma das quatro funções tem se o valor total de 100%.

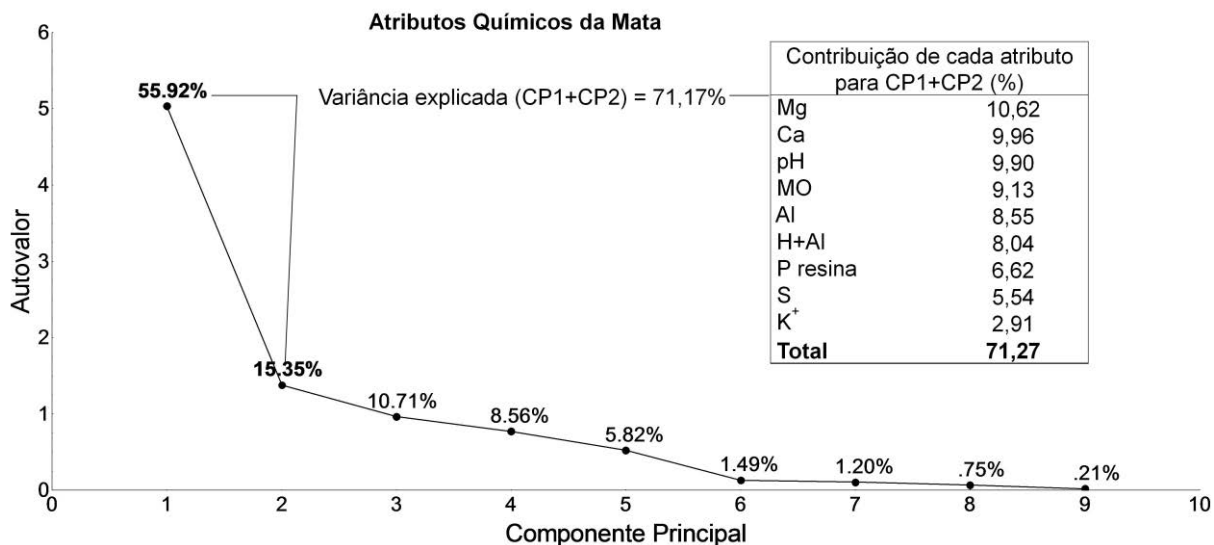


Figura 7. Proporção da variação no conjunto de atributos químicos explicada pelo componente principal (PC) e contribuição de cada variável para explicação da variância total pelo método “scree plot” para os solos das matas.

A partir dos resultados dos atributos químicos e físicos que mais contribuíram para a variância total dos dados fez-se novamente a análise de ACP, pelo método scree-plot somente com as 8 variáveis (areia total, SM, argila, microporosidade, Ca^{2+} , Mg^{2+} , pH e MO) (Figura 8).

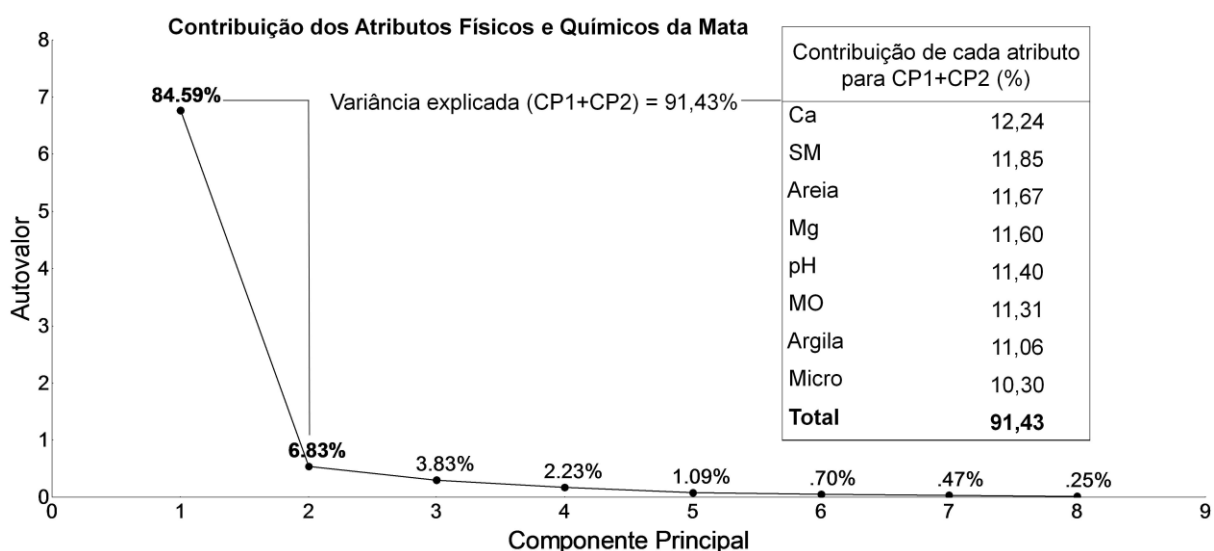


Figura 8. Proporção da variação no conjunto de dados químicos e físicos explicada pelo componente principal (PC) e contribuição de cada variável para explicação da variância total pelo método “scree plot” para os solos.

Com isso obteve-se os pesos das funções principais para a determinação do IQS (Apêndice 6). Nota-se que ambas as funções obtiveram valores muito próximos com 49% da função principal de atributo químico e 51% da função principal do atributo físico, sendo a soma igual a 100%, o que demonstra que o ambiente da mata nativa está em equilíbrio.

No entanto, uma das limitações nesse procedimento é em considerar a mata como referência, uma vez que a floresta não necessariamente representa o estágio ideal para o cultivo agrícola, porém representa uma condição em que a mata nativa, a princípio, estaria em equilíbrio. Assim, em algumas situações, tornará necessário estabelecer limites críticos para os indicadores utilizados. Nesse caso, o processo utilizado para o cálculo do IQS foi comparar os limites críticos existentes na mata nativa das áreas estudadas e os valores agrônômicos encontrados em referências literárias. Assim, obteve-se a estrutura do modelo para gerar o IQS, conforme Tabela 4.

Nota-se que na Tabela 4, há dois limites críticos, o encontrado nos dados coletados e os encontrados nas referências bibliográficas. Dessa forma, foi efetuado o cálculo de IQS com os modelos de acordo com os seus limites críticos e comparados entre si, com o objetivo de verificar se há diferenças entre eles.

Tabela 4. Estrutura do modelo com as funções, os indicadores, os pesos relativos e os limites críticos.

Funções do solo	A	Indicadores	B	Limite Crítico Referência	Referência Agrônômica	Limite Crítico Mata*	Unidades
Função Física	0,49	Areia	0,2605	15	(Silva et al., 2010)	27	%
		SM	0,2644	7458	(Peluco et al., 2013)	1969	$10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$
		Argila	0,2468	15	(Silva et al., 2010)	41	%
		Micro	0,2283	25	(Kiehl, 1979)	44,8	%
Total			1,0				
Função Química	0,51	Ca ²⁺	0,2624	3,0	Raij et al., 1997	24	$\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$
		Mg ²⁺	0,2488	4,0	Raij et al., 1997	62	$\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$
		pH	0,2445	5,0	Raij et al., 1997	6,3	CaCl ₂
		MO	0,2443	25	Raij et al., 1997	145	g dm^{-3}
Total	1,0		1,0				

A= peso das funções; B= peso dos indicadores; * valores das três áreas das matas estudadas

Determinação do índice de qualidade do solo

Na Tabela 5, estão apresentados os valores de IQS em cada localidade e de acordo com o valor crítico adotado, se mata nativa ou valores agronômicos de referência a partir dos 24 IQSs de cada área (Apêndice 7).

Tabela 5. Análise de variância para o IQS do solo das áreas de cana-de-açúcar.

	Área 1	Área 2	Área 3
IQS Literatura	0,38aA	0,41aA	0,39aA
IQS Mata	0,22aB	0,17bB	0,166bB

*Valores com mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si e valores com mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os IQSs com valores críticos retirados da literatura demonstram que não houve diferença estatística entre as três áreas. Isso mostra que apesar dessas áreas estarem em regiões diferentes, possuírem material de origem e climas diferentes (área 1 com as áreas 2 e 3), a influência do efeito do manejo foi maior sobre as condições do solo, conforme Tabela 5. Porém, quando comparados com os valores críticos da mata nativa, estes são todos diferentes. Segundo Perusi (2005), os diferentes sistemas de uso e manejo do solo influenciam a formação e estabilidade dos seus agregados. Este mesmo autor, afirma que o intenso revolvimento das camadas superficiais, a maior incorporação da matéria orgânica, a constante movimentação de implementos agrícolas contribuem para provocar alterações na estrutura do solo, que promovem a alteração de outras propriedades, como a densidade e a porosidade, resultando no comprometimento da capacidade produtiva deste recurso natural. Nessas condições, a qualidade estrutural do solo passa a ser uma ferramenta de avaliação da sustentabilidade dos seus sistemas de uso e manejo.

Porém, quando se compara os IQSs das áreas obtidos a partir dos valores críticos da mata nativa, observa-se que a área 1 foi a que apresentou maior IQS entre elas, visto que nas condições da área 1 o solo mais argiloso possui maiores teores de argila, maior microporosidade, maiores teores de MO, maior estabilidade de agregados e menor perda de solo por erosão entre sulcos (Apêndice 1). Para Nunes e Cassol (2008), solos com maiores teores de argila, óxidos e matéria orgânica apresentam agregados mais estáveis e por consequência menor erodibilidade do

solo em entressulcos, com maior qualidade do solo. Neste caso, como se trata de solos sob vegetação natural, estes não sofrem o efeito do manejo, sendo as características intrínsecas do solo responsáveis por sua qualidade. Segundo Addiscott (1992), geralmente não ocorrem variações nos conteúdos de matéria orgânica e demais atributos ao longo do tempo, em razão, principalmente, da igualdade das quantidades de material orgânico adicionado e perdido. A área 1 portanto, é a área com maior IQS do solo.

Na Tabela 5, os valores de IQSs calculados a partir dos valores críticos da mata nativa são inferiores aos calculados pela literatura agronômica. Assim, os valores tidos como referência da mata podem mascarar negativamente os valores reais das áreas uma vez que os valores dos parâmetros de matas nativas são bastante distintos daqueles valores utilizados como critérios agronômicos, o que normalmente, caso sejam utilizados valores da literatura, faz com que os valores de IQS destes locais sejam muito baixos. Ao definir uma área de referência pode-se pensar em outras implicações, por mais que os valores de IQS das áreas com matas nativas não sejam elevados e supor que estes valores foram obtidos devido à situação de equilíbrio estável em que estes locais se encontram, e, portanto valores superiores ou inferiores são piores, ou seja, há uma espécie de situação ótima do local.

Neste contexto, é importante ressaltar, que em condições naturais, os principais fatores que interferem na ciclagem de nutrientes são o clima, a composição das espécies vegetais, o status sucessional da floresta (tempo após alguma perturbação) e a fertilidade do solo (VITOUSEK; SANFORD, 1986). Em geral, a manutenção destes ecossistemas ocorre por meio da ciclagem de nutrientes. As perdas de elementos são pequenas. Qualquer intervenção na dinâmica deste processo pode modificar a sincronia entre a disponibilidade de nutrientes oriundos da decomposição dos resíduos vegetais e a demanda nutricional das plantas, gerando, na maioria das vezes, uma maior perda de nutrientes do solo (MYERS et al., 1994).

Quanto à utilização do MAP são necessários alguns questionamentos em relação à influência dos valores de IQS obtidos, quando o modelo for empregado por diferentes cientistas do solo, visto que a grande maioria dos pesquisadores, a exemplo, Chaer (2001), Bonilha (2011) e Freitas et al. (2012), utilizam como critério para a escola dos indicadores de qualidade do solo e seus respectivos pesos de

acordo com o conhecimento e características locais das áreas a partir dos dados brutos. Certamente não se deve esperar grandes mudanças quanto às funções escolhidas, uma vez que é condição essencial o conhecimento do ambiente a ser avaliado para viabilizar a própria aplicação do modelo.

Por outro lado, deve-se também enfatizar que os valores de IQS obtidos não serão sempre iguais (semelhantes), independentemente das funções e indicadores escolhidos e seus respectivos pesos. A utilização de funções e/ou indicadores não condizentes com a realidade do ambiente em estudo irá acarretar em valores de IQS errôneos, que não retratam a qualidade do mesmo. Desta forma, seria mais pertinente utilizar a ACP como forma de seleção de atributos relevantes no momento da coleta dos dados nas áreas a serem estudadas, para a determinação do peso de cada função e de cada indicador. Araújo (2008), em seu trabalho, utilizou a ACP de modo a auxiliar na seleção de indicadores que contribuíssem efetivamente para a variância total dos dados. Um IQS adequado pode variar entre locais, dependendo do tipo ou uso do solo, de quais funções do solo são necessárias e dos fatores de formação deste (ARSHAD; COEN, 1992).

Vale ressaltar, que para a aplicação do modelo aditivo ponderado há necessidade de atribuir valores para as funções estabelecidas, assim como para os parâmetros que compõem tais funções. Como os valores dos parâmetros são seus limites críticos, deve-se considerar o referencial para atribuir tais valores. Para tanto foram empregados dois referenciais: valores considerados da mata em equilíbrio e aqueles obtidos da literatura. No primeiro caso, trata-se de valores do ecossistema natural ou ecológico, enquanto no segundo caso com parâmetros agrônômicos. Estas duas abordagens geram situações distintas quanto ao enfoque que se está buscando: a) avaliação comparativa das diferentes situações, tendo-se em mente o estágio atual dos parâmetros do solo da floresta, em equilíbrio, ou seja o estágio ecológico que deve ser atingido; b) avaliação comparativa tendo em vista o que deveria ser feito para a recuperação de uma área com baixa fertilidade, não estando em equilíbrio.

Dessa forma, deve-se atribuir maior importância para o monitoramento quando trata-se de parâmetros de áreas com mata nativa em equilíbrio, uma vez que aí está presente a ciclagem de nutrientes, responsável pela manutenção da floresta. Ou seja, o solo pode estar com baixa qualidade, mas a ciclagem está estabelecida, garantindo a continuidade do ecossistema. Por outro lado, quando se

trata de áreas dando enfoque agrônomo aos parâmetros avaliados, refere-se a recuperação ou restauração, iniciando o processo ou já em desenvolvimento.

Nota-se que o fator de erodibilidade não foi um atributo com forte influência no poder discriminatório na ACP dos atributos físicos (Figura 6), quando da avaliação das áreas em conjunto tendo como referência a mata nativa para os indicadores de qualidade do solo. Porém, é importante ressaltar que a erodibilidade tem influência direta com a qualidade do solo, visto que está relacionada com a perda de solo e com perdas de nutrientes. Segundo Cogo (2004), a perda de solo por erosão é considerado um dos maiores e mais alarmantes problemas ambientais, o que causa declínio dos rendimentos das culturas, aumentando os custos de produção, diminuindo, por conseguinte, a lucratividade da lavoura, entre outros danos, que em conjunto influenciam a qualidade de vida na Terra.

Neste sentido, o monitoramento das perdas de solo por erosão hídrica, é imprescindível para o manejo adequado e sustentável das atividades agrícolas (SILVA et al., 2002). Sendo assim, calculou-se de maneira indireta a erodibilidade das áreas avaliadas no próximo capítulo.

2.4 Conclusões

1. O estudo mostrou que a análise multivariada pelo método do *scree-plot* foi eficiente para determinar os atributos físicos e químicos que foram mais sensíveis em discriminar as áreas avaliadas sendo eles, a areia total, suscetibilidade magnética, argila, microporosidade, magnésio, cálcio, pH e matéria orgânica.
2. A área com maior teor de argila apresentou melhor qualidade do solo quando comparado com valores de referência de mata nativa enquanto que não houve diferenças entre as áreas quanto comparadas com os valores de referência agrônomicos.
3. Os índices de qualidade dos solos foram baixos evidenciam a necessidade da adoção de práticas de manejo para que a qualidade do solo seja recuperada

2.5 Referências

ADDISCOTT, T. M. Entropy and sustainability. **European Journal of Soil Science**, Exeter, v.46, n.2, p.161-168, 1992.

ANDRADE, E. M.; CARNEIRO NETO, J. A.; ROSA, M. F.; PALÁCIO, H. A. Q.; RODRIGUES, J. O. Classificação da sustentabilidade das unidades de produção agrícola no Perímetro Irrigado Araras Norte, Ceará. **Revista Scientia Agrária**, Curitiba, v.10, n.2, p.157-164, 2009.

ARAÚJO, E. A. **Qualidade do solo em ecossistemas de mata nativa e pastagens na região leste do Acre, Amazônia Ocidental**. 2008. 333f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.5, p.1099-1108, 2007.

ARSHAD, M. A.; COEN, G. M. Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. **American Journal of Alternative Agriculture**, Greenbelt, v.7, n.1, p. 25-32, 1992.

BARTINGTON. **Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System**. Disponível em: <http://www.bartington.com/Literaturepdf/Operation%20Manuals/om0408%20MS2.pdf>. Acesso em: 26 de abril. 2014.

BONILHA, R. M. **Caracterização da fertilidade do solo, distribuição do sistema radicular e índice de qualidade do solo no Ecossistema Restinga do Litoral Paulista**. 2012.74f. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2012.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 13. ed. New Jersey: Prentice Hall do Brasi, 2002. 960 p.

BURGER, J. A.; KELTING, D. L. Using soil quality indicators to assess forest stand management. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.122, n.1-2, p.155-166, 1999.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1986.94p. (IAC - Boletim Técnico, 6).

CARDOSO, E. L. **Qualidade do solo em sistemas de pastagens cultivada e nativa na sub-região da Nhecolândia, Pantanal Sul Mato-Grossense**. 2008. 154f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

CARNEIRO NETO, J. A.; ANDRADE, E. M.; ROSA, M. F.; MOTA, F. S. B.; LOPES, J. F. B. Índice de Sustentabilidade Agroambiental para o perímetro irrigado Ayres de Souza. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 4, p. 1272-1279, 2008.

CHAER, G.M.; TÓTOLA, M. R. Impacto do manejo de resíduos orgânicos durante a reforma de plantios de eucalipto sobre indicadores de qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.3, n.6, p.1381-1396, 2007.

CHAER, G.M. **Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos**. 2001. 90f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

COGO, N. P.; DENARDIN, J. E.; BERTOL, I.; KOCHHANN, R. A. Retomada, redefinição e intensidade da pesquisa em erosão do solo no Brasil. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, MANEJO INTEGRADO A CIÊNCIA DO SOLO NA PRODUÇÃO DE ALIMENTOS, 15., Santa Maria, 2004. **Anais**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. p.1-26.

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 em Solos e Nutrição e Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BZEDICEK, D. F.; STEWART, B. A., eds. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America 1994. p.3-21. (Special Publication, 35).

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.

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.; LIVINGSTON, S. J. **USDA - Water erosion prediction project: WEEP user summary**. West Lafayette: National Soil Research Laboratory & USDA – Agricultural Research Service, 1995. p. 25-26. (Report, 11).

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Homogeneidade da qualidade física do solo nas entrelinhas de um pomar de laranjeira com sistemas de manejo da vegetação permanente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.6, p.637-645, 2007.

FONTES, M. P. F.; OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M.; CAMPOS, A. A. G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma**, Amsterdam, v.96, n.1-2, p.81-99, 2000.

FREITAS, D. A. F.; NAVAES, M. L.; CARDOSO, E. L.; CURI, N. Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.43, n.3, p.417-428, 2012.

GENU, A. M.; DEMATTÊ, J. A. M.; NANNI, M. R. Caracterização e comparação do comportamento espectral de atributos do solo obtidos por sensores orbitais (ASTER e TM) e terrestre (IRIS). **Ambiência**, Guarapuava, v.9 n.2 p. 279 – 288, 2013.

GIRÃO, E. G.; ANDRADE, E. M.; ROSA, M. F.; ARAÚJO, L. F. P.; MEIRELES, A. C. M. Seleção dos indicadores da qualidade de água no Rio Jaibas pelo emprego da análise da componente principal. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 38, n.1, p. 17-24, 2007.

GLOVER, J. D.; REGANOLD, J. P.; ANDREWS, P. K. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, New York, v. 80, n 1-2, p.29-45, 2000.

HAIR J. R.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre. 2005. 211p.

IPT. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo**. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo, 1981a. v. 1. Escala 1:1.000.000.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Mapa Geológico do Estado de São Paulo. São Paulo, 1981b. v. 1. Escala 1:500.000.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 1993. Mapa geológico da folha de Campinas. São Paulo: DIGEO. 1 mapa: cópia heliográfica. Escala 1:250.000.

KAISER, H.F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, New York, v. 23,n.3, p.187-200, 1958.

KARLEN, D. L.; STOTT, D. E. **A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality**. In: Doran, J. W.; Coleman, D. C.; Bzedicek, D. F.; Stewart, B. A. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. SSSA Special Publication n. 35, Soil Science Society of America Journal, Madison, WI, p. 53 – 72, 1994.

KARLEN, D. L.; WOLLENHAUPT, N. C.; ERBACH, D. C.; BERRY, E.C.; SWAN, J. B.; EASH, N.S.; JORDAHL, J. L. Long-term tillage effects on soil quality. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.32, n.4, p. 51-96, 1994.

KELTING, D. L.; BURGER, J. A.; PATTERSON, S. C.; AUST, W. M.; MIWA, M.; TRETTIN, C. C. Soil quality assessment in domesticated forests –a southern pine example. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.122, n.1-2, p.167-185, 1999.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D. D., WHITE, J. L.; ENSMINGER, L. E.; CLARCK, F. E. eds. **Methods of soil analysis**. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science of America, 1965. Part I. p.499-510.

KIEHL, E. J. **Manual da edafologia**. São Paulo, Ceres, 1979. 262p.

KONDO, M. K.; DIAS JÚNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 211-218, 1999.

KUMMER, L.; MELO, V. F.; BARROS, Y. J.; AZEVEDO, J. C. R. Uso da análise de componentes principais para agrupamento de amostras de solos com base na granulometria e em características químicas e mineralógicas. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.11, n.6, p.469-480, 2010.

LARSON, W. E.; PEIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: Doran, J. W.; Coleman, D. C.; Bzedicek, D. F.; Stewart, B. A. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, WI, Soil Science Society of America, 1994, p. 37-52, (Special Publication, 35).

LOPES, F. B.; ANDRADE, E. M.; OLIVEIRA, L. J.; CANAFÍSTULA, L. J. O.; SOARES, J. B. Indicadores de sustentabilidade do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, Ceará, empregando a análise multivariada. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 1, p. 17-26, 2009.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L. H. C.; SILVA, E. M. R. Atributos químicos e físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo em sistema integrado de produção agroecológica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.1, p.68-75, 2009.

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**, Goiania, v.43, n.1, p.93-103, 2013.

MELO FILHO, J. F.; CARVALHO, D.C.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; SILVEIRA, E. C. P. Índice de qualidade em um Latossolo amarelo coeso cultivado com citros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 31, n. 04, p. 1168-1177, 2009.

MENDES, F. G.; MELLONI, E. G. P.; MELLONI, R. Aplicação de atributos físicos do solo no estudo da qualidade de áreas impactadas em Itajubá/MG. **Revista Cerne**. Lavras, v.12, n.3, p.211-220, 2006.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.48, n.5, p.1152- 1157, 1984.

MYERS, R.J.K.; PALM, C.A.; CUEVAS, E.; GUNATILEKE, I.U.N.; BROSSARD, M. The synchronisation of nutrient mineralisation and plant nutrient demand. In: WOOMER, P.L.; SWIFT, P.L. (Ed.). **The biological management of tropical soil fertility**. New York: J. Wiley, 1994. p.81-116.

MINITAB Inc. **Release 14 for Windows**. State College, USA, 2003.

NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 32, n.spe, p.2839-2845, 2008.

OLIVEIRA, I. A. **Caracterização de solos sob diferentes ambientes na região Sul do Amazonas**. 2013. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2013.

PAMPLONA, V. M. S. **Índices de Qualidade do Solo para Plantação de Açaí**. 2011.139f. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-graduação em Matemática e Estatística). Universidade Federal do Pará, Belém. 2011.

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**, Brasília, v.48, n.6, p.661-672, 2013.

PERUSI, M. C. **Discriminação de Argissolos e avaliação da estabilidade de agregados por vias seca e úmida em diferentes sistemas de uso e manejo.** 2005. 113 f. Tese (Doutorado Agronomia - Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2005.

RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas, Instituto Agrônomo, 2001. 285p.

RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** 2.ed. rev. e atual. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).

REGAZZI, A. J. **Análise Multivariada, Notas de aula EST 746.** Departamento de Informática da Universidade Federal de Viçosa, v.2, 2006.

RIBEIRO, K. A.; OLIVIERA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; XAVIER, F. A. S.; MAIA, S. M. F.; SOUSA, H. H. F. Qualidade do solo na cultura do cajueiro anão precoce cultivado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.341-351, 2007.

SANTANA, D. P.; BAHIA FILHO, A. F. C. **Qualidade do solo: Uma visão holística.** Boletim Informativo, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.27, n.2, 15-18, 2002.

SILVA, A.P.; TORMENA, C. A.; DIAS JÚNIOR, M. S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V. A. Caracterização física do solo. In: FERREIRA, M.M, Q., ed. **Física do solo.** Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010b. p.1-27.

SILVA, L. G.; MENDES, I. C.; REIS JUNIOR, F. B.; FERNANDES, M. F.; MELO, J. T.; KATO, E. Atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo de cerrado em plantio de espécies florestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.6, p.613-620, 2009.

SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; LEITE, F. P.; CARVALHO NÓBREGA, D. V. Tolerância de perdas de solo por erosão hídrica no Vale do Rio Doce da região Centro Leste do Estado de Minas Gerais. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO, 14., 2002, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. 1 CD ROM.

SILVA, M. O.; FREIRE, M. B. G. S.; MENDES, A. M. S.; FREIRE, F. J.; CAMPOS, M. C. C.; AMORIM, L. B. Discriminação de diferentes classes de solos irrigados com águas salinas, na região de Mossoró, RN, com o uso de análise multivariada. **Ambiência**, Guataparava, v.2, n.2, p. 261-270, 2010a.

SIQUEIRA, D. S. **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar**. 75 f. 2010. Dissertação de Mestrado (Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. 2010.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR., 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**, Oxford, v. 26, n. 4, p. 425-431, 2010.

STATISTICA. **Statistica 7.0**. EUA Software. Tucksá: StatSof. Baltimore, 2005. 250p.

THORNTHWAITE, C. W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, London, v. 38, n.1, p. 55-94, 1948.

VITOUSEK, P. M.; SANFORD JUNIOR, R. L. Nutrient cycling in moist tropical forest. **Annual Review Ecology Science**, Palo Alto, v.17, n.1, p.137-167, 1986.

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.26, n.5, p.189-193, 1971.

WYMORE, A. W. **Model-based systems engineering: An introduction to the mathematical theory of discrete systems and to the tricotyledon theory of system design**. Boca Raton, CRC Press, 1993. 710p.

YEMEFACK, M.; ROSSITER, D. G.; NJOMGANG, R. Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon. **Geoderma**, Amsterdam, v.125, n.1-2, p. 117-143, 2005.

YOEMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**. New York, v.19, n.13, p.1467-1476, 1988.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of America Society of Agronomy**, Madson, v.28, n.5, p.337- 351, 1936.

ZILLI, J.; RUMJANEK, N. G.; XAVIER, G. R.; COUTINHO, H. L. C.; NEVES, M. C. P. Diversidade Microbiana como Indicador de Qualidade de Solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 20, n.3, p. 391-411. 2003.

CAPÍTULO 3- Predição de erodibilidade do solo por métodos indiretos em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar

RESUMO- A dificuldade na determinação direta da erodibilidade exige o desenvolvimento de métodos para estimá-la a partir de outras características dos solos de mais fácil obtenção. Entretanto, ainda não existe um método indireto considerado o melhor para a estimativa da erodibilidade do solo, visando ao estabelecimento de um manejo conservacionista adequado para cada região. O estudo foi realizado em três áreas localizadas no interior do Estado de São Paulo com o objetivo de testar equações para estimar as erodibilidades global (K), em entressulcos (K_i), em sulcos (K_r) e a tensão cisalhante crítica (τ_c), em Latossolos cultivados com cana-de-açúcar, a partir da suscetibilidade magnética (SM). Realizaram-se as análises das frações granulométricas de areia, argila, teor de matéria orgânica (MO), suscetibilidade magnética e calcularam-se os parâmetros de erodibilidade K, K_i , K_r e τ_c . As funções de pedotransferência (FPT), para estimar os fatores K, K_i , K_r e τ_c 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. As equações analisadas permitiram boas estimativas dos valores de erodibilidade global (K), em entressulcos (K_i) e em sulcos (K_r) e tensão cisalhante crítica (τ_c) em função da SM, cujos resultados são compatíveis com registros da literatura. Os valores médios estimados de K foram iguais a $0,02 \text{ t ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha h}$, para K_i de $2,760 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, para K_r de $0,0061 \text{ s m}^{-1}$ e τ_c de $3,975 \text{ N m}^{-2}$. Testes adicionais são necessários para comprovar o uso acurado e eficiente das equações propostas e testadas, em condições diferentes das utilizadas no presente trabalho.

Palavras-chave: atributos físicos, erosão, pedometria, suscetibilidade magnética.

3.1 Introdução

A erodibilidade do solo representa a facilidade com que partículas de solo são destacadas e transportadas. Segundo Bertoni & Lombardi Neto (1995), as propriedades do solo que influenciam a sua erodibilidade são as mesmas que afetam a velocidade de infiltração da água no solo, a permeabilidade e a capacidade de absorção de água; e aquelas que modificam a resistência à dispersão, ao salpicamento, à abrasão e às forças de transporte da enxurrada.

A determinação da propriedade erodibilidade (fator K) é complexa pelas inúmeras variáveis envolvidas (SUMMERFIELD, 1991). Para se chegar aos valores correspondentes à erodibilidade do solo, existem basicamente três meios. O primeiro gira em torno da observação deste parâmetro em nível de campo em condição natural de chuva. Contudo, este é um método muito caro e demanda muito tempo para aquisição das informações. O segundo ocorre também em nível de campo, mas por meio de chuvas simuladas (WISCHMEIER; SMITH, 1978), porém baseia-se na quantificação da erodibilidade em razão das perdas de solo e do fator erosividade, sob condições de chuva simulada. O terceiro meio é a observação do fator K que ocorre de forma indireta, baseando-se em regressões múltiplas que contenham como variáveis independentes atributos mineralógicos, físicos, morfológicos e químicos do solo ou relações destes.

Em geral, além da erodibilidade do solo, os modelos de predição da erosão necessitam do conhecimento de vários outros parâmetros. 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, a aplicação prática desses modelos pode tornar-se difícil, pois, para a obtenção dos valores de cada parâmetro, é necessária uma grande quantidade de determinações em campo e/ou laboratório, incorrendo em maior tempo e elevado custo.

Segundo Amorim (2003), diversos modelos matemáticos vêm sendo desenvolvidos e aperfeiçoados, desde a década de 50, com o intuito de prever a magnitude das perdas de solo por erosão, visando implementar ferramentas que possibilitam avaliar as perdas de solo com propósitos de auxiliar no planejamento agrícola, principalmente em locais onde as perdas de solo são superiores aos limites toleráveis. Os modelos de predição de erosão do solo evoluíram de modelos

empíricos, tais como a Universal Soil Loss Equation (USLE), para modelos baseados em princípios teóricos, como o Water Erosion Prediction Project (WEPP). 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 e escoamento (BESKOW et al., 2009).

Assim, os estudos sobre erodibilidade do solo tornam-se um desafio, fazendo com que 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.

Uma das ferramentas importantes na observação de atributos do solo que podem ser usadas nessas FPT é a suscetibilidade magnética (SM). O mapeamento da SM vem destacando-se como um dos métodos indiretos mais utilizados para fins de estudo e caracterização ambiental (GRIMLEY; ARRUDA; BRAMSTEDT, 2004). Assim, a SM pode auxiliar na aquisição mais rápida de informações sobre os diferentes potenciais de erosão ao longo da paisagem. Segundo Siqueira (2013), 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.

Encontra-se na literatura, várias pesquisas onde é possível verificar a ocorrência de muitos trabalhos, principalmente em solos tropicais, que investigam a aplicação de modelos indiretos para estimar erodibilidade (DENARDINI, 1990; VENTURA JR; NEARING; NORTON, 2001; NUNES; CASSOL, 2008; AMORIM; SILVA; PRUSKI, 2009; AMORIM et al., 2010; EDUARDO et al., 2012; BARBOSA, 2014). Porém a carência de dados básicos e a indefinição do melhor método para determinação da erodibilidade de maneira indireta, que possibilite enquadrar os Latossolos brasileiros em classes de resistência à erosão, constituem problemas na utilização da EUPS, na avaliação da qualidade do solo em relação à erosão hídrica e na elaboração de estratégias de desenvolvimento de uso do solo de forma sustentada.

Diante do exposto, nota-se a necessidade de estudos que correlacionem a erodibilidade com atributos do solo e que estes forneçam subsídios para o surgimento de novos modelos que utilizem estes atributos como agentes preditores para Latossolos. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a erodibilidade do solo a partir da estimativa da erodibilidade do solo por métodos indiretos de latossolos na região nordeste do estado de São Paulo, Brasil.

3.2 Material e métodos

Descrição da área em estudo e sistema de amostragem

O estudo foi realizado em três áreas localizadas no interior do Estado de São Paulo (Figura 1), sendo avaliados os atributos químicos e físicos das áreas cultivadas com cana-de-açúcar e com matas nativas adjacentes.

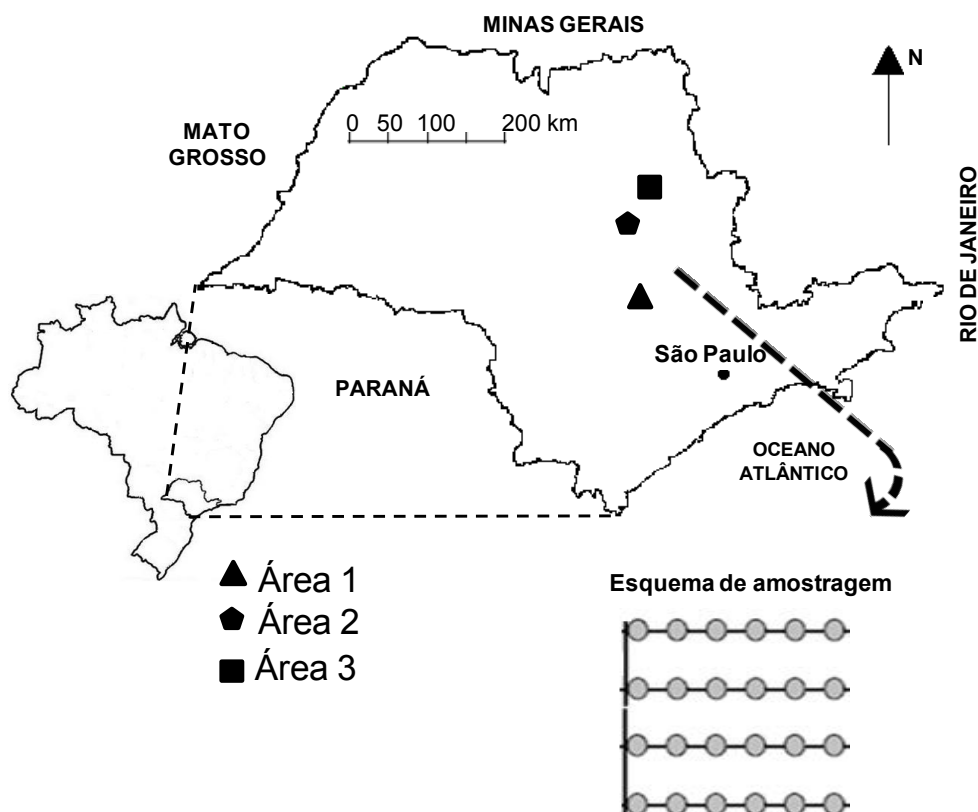


Figura 1. Localização das áreas no Estado de São Paulo e esquema de amostragem de solo.

A área 1, está localizada no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos, no Município de Araras - São Paulo, nas coordenadas de latitude $22^{\circ}18'31''S$ e longitude $47^{\circ}23'13''O$, numa altitude 670 m. A segunda área está localizada em Santa Ernestina e a terceira área, no município de Guariba, sendo a área 2 situada nas coordenadas $21^{\circ}31'42''S$ e $48^{\circ}34'31''O$ e altitude média de 600 m, e a área 3 situada nas coordenadas de $21^{\circ}31'31''S$ e $48^{\circ}19'25''O$ com altitude média de 680 m.

O solo da área 1, foi classificado como Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2013), apresentando textura argilosa e no ano de coleta a área se encontrava no

terceiro corte e a variedade plantada era a RB92-5345, sendo a área plantada de 17 hectares (ha). Contígua à área cultivada com cana-de-açúcar, a área de mata nativa representa cerca de 10 ha e se constitui em floresta Estacional. Do ponto de vista geológico, a área está situada na Bacia do Paraná, compostas por rochas sedimentares com material de origem de argilitos da Formação Irati ou Corumbataí, Grupo Passa Dois (IPT,1993). De acordo com a classificação de Thornthwaite, o clima desse município é B1rB'4^a, clima úmido, sem ou com pouca deficiência hídrica, com evapotranspiração anual média entre 997 e 1140 mm.

Na área 2 o solo foi classificado como Latossolo Amarelo (EMBRAPA, 2013), com textura franco-arenoso com área de cultivo de 27,3 ha, sendo a variedade predominante produzida a SP83-2847. A área 3, o solo classificado como Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2013), com textura franco-argilo arenoso e área de cultivo de 17 ha, sendo a variedade predominante produzida a RB86-7515. Contígua as duas áreas, a área de mata nativa representa cerca de 25 ha para a área 2 e cerca de 5 ha para área 3 e constituem em floresta Estacional. As áreas estão inseridas no Planalto Ocidental Paulista, próxima ao limite das Cuestas Basálticas (IPT, 1981a), no divisor litoestratigráfico arenito basáltico (IPT, 1981b). O material de origem está relacionado à transição Basalto do Grupo São Bento Formação Serra Geral, Depósito Colúvio-Eluvionar e Depósito Aluvionar (IPT, 1981b). 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.

Durante cerca de 40 anos, as áreas foram cultivadas com cana-de-açúcar e, pelo menos nos últimos 10 anos, foram adubadas no primeiro e no segundo corte com somente adubação de cobertura com torta de filtro. Nesses três ciclos de produção, a colheita foi realizada como cana crua, ou seja, sem queima ou despalha. Nestas áreas foram coletadas aleatoriamente 24 amostras de solos deformadas e indeformadas em cada área (Figura 1). As amostras de solos foram coletadas nas profundidades de 0,0-0,10 m indicada, em vários estudos (Kondo; Dias Júnior 1999, Araújo et al. 2007), como sendo a que apresenta maior resposta das alterações destes atributos, em relação ao tipo de manejo efetuado, pelo acúmulo de resíduos orgânicos, manejo de implementos agrícolas e pressões físicas exercidas sobre o solo, em áreas cultivadas com cana-de-açúcar e mata nativa para os atributos químicos e físicos do solo.

Análises físicas

A análise granulométrica das amostras coletadas foi realizada pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ como dispersante químico, e agitação mecânica em aparato de baixa rotação, por 16 horas, seguindo metodologia da EMBRAPA (1997). A fração argila foi separada por sedimentação, as areias muito grossa, grossa, média, fina e muito fina por tamisação e o silte foi calculado por diferença.

As amostras de solo com estrutura indeformada coletadas em anel volumétrico foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir cerca de 2/3 da altura do anel, para determinação da porosidade total (Pt) obtida pela diferença entre a massa do solo saturado e a massa do solo seco em estufa a 105°C durante 24 h (EMBRAPA, 1997). A microporosidade do solo foi determinada pelo método da mesa de tensão, segundo metodologia da EMBRAPA (1997). Pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade, obteve-se a macroporosidade. A densidade do solo (D_s) foi calculada pela relação entre a massa seca a 105°C durante 24 h da amostra de solo do cilindro volumétrico e o volume do mesmo cilindro (EMBRAPA, 1997).

Em cada ponto amostral, foram coletadas amostras com estrutura preservada na forma de “torrão”, para determinação da estabilidade dos agregados do solo. Estas amostras foram levemente destorroadas, de forma manual e passadas em peneira com abertura de 8,0 mm e que as ficaram retidos em peneira com abertura de 4,00 mm foram secos ao ar por 48 h. Esse material foi utilizado para a determinação da estabilidade de agregados em água usando uma modificação do método de Yoder (1936). Para tal, 20 g de agregados foram transferidos para um conjunto de seis peneiras. A superior com aberturas de 4,00 mm foi encaixada sobre outras cinco peneiras com aberturas de 2,0 mm, 1,0 mm, 0,5 mm, 0,25 mm e 0,125 mm, formando um conjunto em ordem decrescente de acordo com suas respectivas aberturas. A separação e estabilidade dos agregados foram determinadas segundo Kemper e Chepil (1965), com modificações, nas seguintes classes de diâmetro, $>2,0$; $2,0-1,0$ e $< 1,00$ mm. Os agregados foram colocados em contato com a água sobre a peneira de 4,0 mm por quinze minutos, ajustado para $31 \text{ ciclos min}^{-1}$, com amplitude de oscilação de 35 mm. A massa do material retido em cada peneira, foi colocada em estufa a 105°C . Os resultados foram expressos em percentual dos

agregados retidos nas peneiras >2,0; 2,0-1,0 e < 1,0 mm, sendo determinado o diâmetro médio ponderado (DMP).

Análises químicas

O carbono total foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado por Yoemans e Bremner (1988), a matéria orgânica, por sua vez, foi estimada com base no carbono orgânico.

Suscetibilidade magnética

A SM foi determinada na TFSA (terra fina seca ao ar) das amostras coletadas nas áreas com cana-de-açúcar, no equipamento Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B. A avaliação foi feita em baixa frequência (0,47 kHz) (DEARING 1994). Segundo este autor, 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), sendo esta metodologia adotada neste trabalho. O potencial de uso em solos tropicais e a confiabilidade dos resultados deste método já foram comprovados por estudos anteriores (SIQUEIRA et al., 2010; MATIAS et al., 2013; SANTOS et al., 2013; PELUCO et al., 2013).

Cálculo dos fatores erodibilidade (K, K_i, K_r) e tensão cisalhante crítica (τ_c)

Para o cálculo da erodibilidade global do solo da USLE (fator K, t ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹ ha h) foi utilizada a equação proposta por Denardin (1990) (Eq. 1):

$$K = 0,00000748 M + 0,00448059 p - 0,0631175 DMP + 0,01039567 X32 \quad (1)$$

em que,

M = novo silte (novo silte + nova areia);

p = permeabilidade codificada segundo Wischmeier et al. (1971);

DMP = diâmetro médio ponderado das partículas do solo inferiores a 2,00 mm;

X32 = nova areia (MO/100);

Novo silte = silte + areia muito fina, %;

Nova areia = areia muito grossa + areia grossa + areia média + areia fina, %.

Para o cálculo da erodibilidade em entressulcos do modelo Wepp (K_i , kg s m^{-4}) foram utilizadas as equações propostas por Flanagan e Livingston (1995) (Eq. 2 e 3):

$$K_{i \text{ WEPP}} = 2728000 + 192100 \text{ AMF}, \quad \text{areia} \geq 30\% \quad (2)$$

$$K_{i \text{ WEPP}} = 6054000 - 55130 \text{ ARG}, \quad \text{areia} < 30\% \quad (3)$$

em que,

AMF = percentual de areia muito fina, %;

ARG = percentual de argila, %.

Além das equações (2) e (3) foram utilizadas outras duas equações (4 e 5) para cálculo de K_i (kg s m^{-4}) para Latossolos, as quais foram obtidas a partir de dados de Martins Filho (1999) como:

$$K_i \times 10^{-6} = 1,738 + 0,000117 \text{ AMF} - 0,00655 \text{ MO}, \quad K_i \times 10^{-6} \leq 1,639 \quad (4)$$

$$K_i \times 10^{-6} = 0,845 + 0,024033 \text{ AMF} - 0,04439 \text{ MO}, \quad K_i \times 10^{-6} > 1,639 \quad (5)$$

em que,

AMF = teor de areia muito fina, g kg^{-1} ;

MO = teor de matéria orgânica do solo, g kg^{-1} .

Para calcular a erodibilidade em sulcos (K_r , s m^{-1}) e a tensão cisalhante (τ_c , N m^{-2}) do modelo Wepp foram utilizadas as equações propostas por Flanagan e Livingston (1995) (Eq. 6, 7, 8 e 9):

$$K_{r \text{ WEPP}} = 0,00197 + 0,00030 \text{ AMF} + 0,03863 e^{-1,84 \text{ MO}} \quad \text{areia} \geq 30\% \quad (6)$$

$$\tau_{c \text{ WEPP}} = 2,67 + 0,065 \text{ ARG} - 0,058 \text{ AMF} \quad \text{areia} \geq 30\% \quad (7)$$

$$K_r_{WEPP} = 0,0069 + 0,134 e^{-0,20 \cdot ARG} \quad \text{areia} < 30\% \quad (8)$$

$$\tau_c_{WEPP} = 3,5 \quad \text{areia} < 30\% \quad (9)$$

em que,

AMF = percentual de areia muito fina, %;

e = base dos logaritmos neperianos;

MO= percentual de matéria orgânica do solo, %;

ARG = percentual de argila, %;

Também foram utilizadas as equações propostas por Luca Junior e Martins Filho (2008) para estabelecer valores de K_r e τ_c em latossolos como (Eq. 10 e 11):

$$K_r = 0,000063 \text{ AMF} + 0,000053 \text{ VTP} \quad (10)$$

$$\tau_c = 0,007484 \text{ NSilte} + 1,378876 \text{ ds} \quad (11)$$

em que,

AMF = teor de areia muito fina, g kg^{-1} ;

VTP = volume de poros totais, %;

NSilte = silte + AMF, g kg^{-1} ;

ds = densidade do solo, kg m^{-3} .

Análises estatísticas

Foram calculados os valores de média, desvio padrão, coeficiente de variação, mínimo e máximo das variáveis determinadas em laboratório (atributos do solo) e dos fatores K , K_i , K_r , τ_c e SM.

As FPT, para estimar os fatores K , K_i , K_r e τ_c em função da SM, foram modeladas por meio de análise de regressão linear simples e não linear, utilizando 24 pontos, e que fossem representativos dos tipos de solos e material de origem da área.

Os valores de K_{est} , K_{iest} , K_{rest} e τ_{cest} foram estimados por SM com as FPT para um conjunto de 20 pontos diferentes do modelo original. Os valores de K_{est} ,

K_{iest} , Kr_{est} e $\tau_{c_{est}}$ foram comparados com os valores de K , K_i , Kr e τ_c calculados. Esse procedimento é conhecido como validação externa e evita o erro devido à retroalimentação de modelos.

As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o programa estatístico STATISTICA (STATSOFT, 1994). No processo de validação foi realizada uma medida da acuracidade das previsões de modelos utilizados neste estudo, pela análise do grau de coincidência destes valores estimados para com aqueles observados no campo. O programa foi utilizado, ainda, para análises de variância, regressões lineares e não lineares. Para os testes de validação dos modelos, propostos na literatura, foram utilizados parâmetros estatísticos propostos por Loague e Green (1991) e Lengnick e Fox (1994), tais como (Eq. 12, 13, 14 e 15):

Erro padrão da estimativa normalizado (RMSE),

$$RMSE = \left[\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n \right]^{0.5} (100/O) \quad (12)$$

Coefficiente de determinação (CD),

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - O)^2} \quad (13)$$

Eficiência do modelo (EF),

$$EF = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \right] \quad (14)$$

Coefficiente de massa residual (CRM),

$$CRM = \left(\frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right) \quad (15)$$

em que,

O_i - valor observado;

P_i - valor predito;

i - índice de 0 a n ;

n - espaço amostral; e

O - média dos valores observados.

Os parâmetros RMSE e CD têm limite inferior igual a zero. O RMSE é semelhante ao coeficiente de variação e foi utilizado para comparar a acurácia da simulação para os tratamentos. O máximo valor para EF é a unidade. EF e CRM podem ser negativos. Para os casos em que EF foi menor que 1, considerou-se que o modelo prediz valores piores que o simples uso da média dos valores observados. O CD foi utilizado como uma medida da proporção da variância total explicada pelos dados preditos.

Como não há um padrão para a validação de modelos, considerou-se, quando os valores preditos e observados são os mesmos, que os parâmetros estatísticos RMSE, CD, EF e CRM assumem valores iguais a 0, 1, 1, 0,0 e 0, respectivamente (MARTINS FILHO, 1999; CERQUETANI; MARTINS FILHO, 2006; SANTOS et al., 2013).

Como valores observados (O_i) considerou-se, no presente trabalho, aqueles obtidos com as equações (1) a (11). Já como valores preditos ou estimados (P_i) considerou-se aqueles obtidos com as equações (16) a (22).

Os cálculos da estatística descritiva e regressão linear simples foram realizados por meio do software STATISTICA.

3.3 Resultados e discussão

Valores de erodibilidade

As áreas de estudo apresentam valores de K variando de 0,0022 a 0,011 t h MJ⁻¹ mm⁻¹ (Tabela 1). Conforme levantamento feito por Denardin (1990) e Tomazoni e Guimarães (2005), foi avaliado 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. Barbosa (2014), avaliou o fator K em Latossolos no nordeste do estado de São Paulo, sob cultivo de cana-de-açúcar e apresentou valores de K variando de 0,010 a 0,036 h MJ⁻¹ mm⁻¹, com valores médios de K de 0,021 MJ⁻¹ mm⁻¹, valores médios estes encontrados no presente estudo), semelhante ao encontrado por Lima et al. (1990) em 31 Latossolos Vermelho Escuro (0,022 t h MJ⁻¹ mm⁻¹).

Tabela 1. Valores da estatística descritiva das variáveis analisadas nos ambientes estudados.

Variáveis	Estatística				
	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	CV
Área 1					
Argila	424,2	43,6	339,5	480,5	10,5
AT	321,3	37,1	246,7	404,6	11,5
Silte	254,1	49,3	125,4	361,7	19,4
DMP	2,2	0,4	1,4	3,5	17,3
MO	22,5	2,5	17,0	28,0	11,3
K	$1,9 \times 10^{-2}$	$3,1 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-2}$	16,3
K_i WEPP	$4,43 \times 10^6$	$8,22 \times 10^5$	$3,41 \times 10^6$	$6,7 \times 10^6$	18,6
K_r WEPP	$6,2 \times 10^{-3}$	10×10^{-3}	$4,9 \times 10^{-3}$	$8,6 \times 10^{-3}$	16,0
τ_c WEPP	4,34	0,67	3,5	5,3	15,5
K_i	$1,68 \times 10^6$	$3,73 \times 10^5$	$1,56 \times 10^6$	$3,27 \times 10^6$	22,23
K_r	$8,73 \times 10^{-3}$	$1,75 \times 10^{-3}$	$4,15 \times 10^{-3}$	$1,28 \times 10^{-2}$	20,07
τ_c	4,61	0,30	4,21	5,29	6,43
SM	2096	95,2	1988	2367	4,5
Área 2					
Argila	217,3	17,34	175,1	250,5	7,98
AT	675,5	50,2	486,5	736,5	7,43
Silte	107,2	50,3	36,0	294,1	46,9
DMP	1,9	0,5	0,8	2,5	28,3
MO	13,6	2,56	9,0	16,0	20,3
K	$1,7 \times 10^{-2}$	$1,16 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^{-3}$	$3,8 \times 10^{-2}$	66,05
K_i WEPP	$3,5 \times 10^6$	$6,1 \times 10^5$	$1,7 \times 10^6$	$4,8 \times 10^6$	17,7
K_r WEPP	$6,3 \times 10^{-3}$	2×10^{-3}	4×10^{-4}	$1,1 \times 10^{-2}$	40,88
τ_c WEPP	3,83	0,21	3,44	4,47	5,6
K_i	$1,45 \times 10^6$	$1,92 \times 10^5$	$1,11 \times 10^6$	$1,87 \times 10^6$	13,22
K_r	$4,94 \times 10^{-3}$	$8,00 \times 10^{-4}$	$2,39 \times 10^{-3}$	$6,23 \times 10^{-3}$	16,21
τ_c	3,32	0,27	2,80	3,91	8,23
SM	138,7	7,48	126	161	5,4
Área 3					
Argila	280,0	17,5	246,5	305,5	6,3
AT	613,9	18,07	588,1	652,8	2,9
Silte	97,38	30,1	42,7	158,1	30,9
DMP	1,8	0,6	1,0	3,0	34,1
MO	21,2	2,3	18,0	27,0	11,1
K	$1,4 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-3}$	2×10^{-3}	$1,1 \times 10^{-2}$	47,25
K_i WEPP	$3,9 \times 10^6$	$2,2 \times 10^5$	$3,2 \times 10^6$	$4,1 \times 10^6$	5,84
K_r WEPP	$4,6 \times 10^{-3}$	$5,1 \times 10^{-4}$	$3,3 \times 10^{-3}$	$5,4 \times 10^{-3}$	11,27
τ_c WEPP	4,14	0,11	3,9	4,3	2,72
K_i	$1,60 \times 10^6$	$1,24 \times 10^5$	$1,46 \times 10^6$	$2,11 \times 10^6$	7,72
K_r	$5,85 \times 10^{-3}$	$1,00 \times 10^{-3}$	$4,03 \times 10^{-3}$	$8,79 \times 10^{-3}$	17,11
τ_c	3,61	0,45	3,03	5,06	12,56
SM	254,3	44,8	183	343	17,6

AT=Areia total, g kg⁻¹; DMP=Diâmetro Médio Ponderado, mm; MO=Matéria Orgânica, g kg⁻¹; K=Erodibilidade do solo, t ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹ ha h; K_i = Erodibilidade em entressulcos, kg s m⁻⁴; K_r = Erodibilidade em sulcos, kg N⁻¹s⁻¹; τ_c = tensão cisalhante, N m⁻²; SM= Suscetibilidade magnética, m³ kg⁻¹; CV=Coefficiente de variação (%).

O valor médio de K_i foi $3,95 \times 10^6$ kg s m⁻⁴ (Tabela 1), corroborando com os trabalhos de Bezerra e Cantalice (2006), Franco et al. (2012) e Barbosa (2014).

Dentre os três Latossolos estudados, o mais argiloso apresentou os maiores valores do fator de erodibilidade em entressulcos, fato este que não corrobora trabalho de Nunes & Cassol (2008). Estes pesquisadores obtiveram valores de K_i variando em Latossolos de $0,76 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ a $1,48 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, porém os solos com maiores teores de argila e de óxidos de Fe e com maior estabilidade de agregados em água apresentaram menor suscetibilidade à erosão em entressulcos. Com base em resultados de Martins Filho (1999), o qual obteve sob chuva artificial valores de K_i entre $0,864 \times 10^6$ a $3,479 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ cuja média ficou estabelecida em $1,639 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, o que se pode inferir que os valores médios encontrados no presente estudo foram semelhantes ($1,60 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$). Este último valor médio de K_i é 2,4 vezes menor que o obtido como K_i WEPP, o que pode ter superestimado os valores, visto que este modelo é baseado em solos formados com taxas de intemperismo menores que os Latossolos brasileiros. Deste modo, parece justificável a proposição ou o uso de novas equações como as (5), (6), (10) e (11) do presente texto.

De acordo com a Tabela 1, os valores encontrados neste estudo de K_r wepp variaram entre $4,0 \times 10^{-4}$ a $1,1 \times 10^{-2} \text{ kg N}^{-1}\text{s}^{-1}$ e o K_r com os valores obtidos pelo modelo proposto por Luca Júnior e Martins Filho (2008) variaram entre $4,15 \times 10^{-3}$ a $1,28 \times 10^{-3} \text{ kg N}^{-1}\text{s}^{-1}$, o que demonstra que os valores obtidos por este modelo e adotado nesta pesquisa estão coerentes, com valores médios variando entre $4,0 \times 10^{-4}$ a $1,1 \times 10^{-2} \text{ kg N}^{-1}\text{s}^{-1}$. A τ_c encontrada nos modelos propostos pelo WEPP e por Luca Júnior e Martins Filho (2008), obtiveram valores entre 3,44 a 5,3 N m^{-2} e 2,8 a 5,3 N m^{-2} , respectivamente. Estes valores estão de acordo com os encontrados na literatura (LUCA JÚNIOR, MARTINS FILHO, 2008)

A caracterização da SM é 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 126 a 2367 $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. Os altos valores de SM são típicos de solos formados em regiões tropicais e subtropicais (TORRENT; BARRÓN; LIU, 2006), o que faz da SM um importante indicador pedoambiental (TORRENT; BARRÓN; LIU, 2010). No trabalho de Barbosa (2014) que investigou a eficiência da utilização da suscetibilidade magnética em funções de pedotransferência para estimar os fatores K e K_i em Latossolos no nordeste do estado de São Paulo, sob cultivo de cana-de-açúcar, os valores de SM encontrados variaram de 510 a 7458 $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, porém o Latossolo estudado teve maiores teores de argila variando de 160 a 614 g kg^{-1} .

Becegato e Ferreira (2005) constataram que os valores de SM nos solos mais argilosos foram maiores do que nos solos mais arenosos, em função, principalmente, da maior disponibilidade de minerais magnéticos. Alguns autores (FONTES et al. 2000; JONG et al. 2000; DEARING et al. 2001), atribuem tais magnitudes da SM às variações da granulometria e condições de drenagem do solo. FONTES et al. (2000), estudando a SM em solos de materiais de origem diferentes, observou sua associação à presença de magnetita na fração areia e maghemita na fração argila. A permanência de magnetita na fração argila é pouco provável, em virtude da facilidade que a magnetita tem em transforma-se no mineral maghemita por oxidação do Fe II (RESENDE et al. 1988).

O teor de argila variou de 175 a 480 g kg⁻¹, o teor de silte varou de 36 a 361,7 g kg⁻¹ e o teor de areia variou de 125,4 a 736,5 g kg⁻¹(Tabela 1). Estes resultados são reflexos da influência dos diferentes materiais de origem, clima e textura das áreas estudadas. Os resultados indicaram também que as área 1 e 2 possuem um grande aporte de MO, com média em torno de 22 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). A área 2 apesar de ser considerada como textura média está inserida em um solo mais arenoso, logo, a justificativa para um menor aporte de MO.

Os valores de DMP das áreas estudadas variaram de 0,8 a 3,5 mm. Essa propriedade é considerada por alguns autores como importante indicador de qualidade do solo, tendo em vista o fato de que, quanto maior a agregação e a estabilidade desses, maior a resistência à erosão hídrica (BARBOSA et al., 1998; CHAVES; CALEGARI, 2001). Notou-se que os maiores valores de DMP são encontrados na área 1, pois decorrem do teor de argila médio do solo de 424 g kg⁻¹, superior ao teor de areia (321,3 g kg⁻¹), mas, sobretudo, do maior teor de matéria orgânica e conseqüentemente, de elevado teor de argilominerais, um dos principais agentes na formação e estabilização dos agregados (AZEVEDO; DALMOLIN, 2004). Assim, solos com maiores teores de argila, óxidos e matéria orgânica apresentam agregados mais estáveis e por conseqüência menor erodibilidade do solo em entressulcos (NUNES; CASSOL, 2008).

Modelagem de fatores da erosão do solo pela suscetibilidade magnética

Na Tabela 2, estão apresentados modelos para estimativas da erodibilidade global (K), em entressulcos (K_i) e em sulcos (K_r) e tensão cisalhante crítica (τ_c) de latossolos, em função da suscetibilidade magnética (SM). Os modelos foram gerados a partir de análises de regressão linear segmentada com ponto de quebra e linear simples, para valores de K, K_i , K_r e τ_c em função do valor de SM.

Tabela 2. Modelos para estimativas de erodibilidade global (K), em entressulcos (K_i) e em sulcos (K_r) e tensão cisalhante crítica (τ_c) de latossolos em função da suscetibilidade magnética (SM).

Variável (y)	Equação	Variável = a + b *SM		Condição
		a	b	
K	(16)	0,016868	-0,000043	SM ≤ 393
		0,022429	-0,000002	SM > 393
$K_{i\text{ WEPP}}$	(17)	3510141	386,3212	$K_i \leq 3,930 \times 10^6$
		3882080	218,2673	$K_i > 3,930 \times 10^6$
K_i	(18)	1375177	134,2651	$K_i \leq 1,577 \times 10^6$
		1648560	-23,1219	$K_i > 1,577 \times 10^6$
$K_{r\text{ WEPP}}$	(19)	0,004844	0,00000047	$K_r \leq 0,005656$
		0,007060	-0,0000004	$K_r > 0,005656$
K_r	(20)	0,005875	0,0000017	
$\tau_{c\text{ WEPP}}$	(21)	4,084127	-0,000293	$\tau_c \leq 4,102935$
		4,120833	0,000203	$\tau_c > 4,102935$
τ_c	(22)	2,699633	0,001083	

K = Erodibilidade do solo, $t\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}\ ha\ h$; K_i = Erodibilidade em entressulcos, $kg\ s\ m^{-4}$; K_r = Erodibilidade em sulcos, $s\ m^{-1}$; τ_c = tensão cisalhante crítica, $N\ m^{-2}$; SM = Suscetibilidade magnética, $m^3\ kg^{-1}$; $y = a + b\ SM$, a = coeficiente linear e b = coeficiente angular.

No trabalho de Barbosa (2014), que trabalhou com os mesmos métodos indiretos para calcular K e $K_{i\text{ WEPP}}$, em Latossolos do interior do Estado de São Paulo, propôs modelos similares para K em função da SM ($K = 0,0022 + 0,000006\ SM$), enquanto que para K_i foi proposta a seguinte equação: $K_i = 0,0000044 - 320\ SM$.

Alguns autores têm utilizado com eficiência a SM com fins quantitativos, para avaliação indireta de atributos do solo (MARQUES JUNIOR, 2009; SIQUEIRA, 2010) e para estimar valores de erodibilidade global e em entressulcos (BARBOSA, 2014). Os fatores K e K_i são dependentes de características intrínsecas do solo, como textura e características estruturais. Contudo, existem variações nos dados de erodibilidade de K e K_i entre autores como citado por Franco et al. (2012). Geralmente, os valores de K_i são menores em solos de textura mais argilosa, com maior teor de óxidos de ferro de baixa cristalinidade e com maior estabilidade de agregados em água (FRANCO et al., 2012). Deste modo, as equações propostas para estimar K , K_i , K_r e τ_c (Tabela 2) são promissoras e podem representar um importante método, para uso em modelos de previsão de perdas de solo por erosão como USLE e WEPP. Para tanto, é necessário testar a validade de tais equações para o mencionado uso.

Validação dos modelos

Os dados experimentais não utilizados para a calibração ou testes iniciais de modelagem foram os empregados no processo de validação. Para cada solo, 20 valores de taxa de erosão entressulcos, em sulcos, erosão global e tensão cisalhante crítica foram utilizados. Os testes de validação são apresentados na Tabela 3.

Os coeficientes de determinação (CD) foram utilizados para uma avaliação da proporção dos valores observados, explicados pelos valores preditos, Segundo Martins Filho (1999), o valor ideal para CD é 1,0 quando se obtém um ajuste perfeito entre os valores observados e estimados. De acordo com a Tabela 3, os menores valores de CD observados foram para o $K_{r_{wepp}}$, os quais variaram de 0,87372 a 2,450651, Os referidos coeficientes (CD) possibilitaram inferir que, na maioria dos casos testados, apresenta um valor próximo ao ideal, à exceção do K que não permitiu boas estimativas dos valores observados. Isso pode ter ocorrido, provavelmente, devido o modelo ter subestimado ou superestimado os valores observados.

Tabela 3. Parâmetros estatísticos de desempenho de equações para a predição de erodibilidade global (K), em entressulcos (K_i) e em sulcos (K_r) e tensão cisalhante crítica (τ_c) de Latossolos em função da suscetibilidade magnética (SM).

Variável	Equação	RMSE	CD	EF	CRM*
K	(16)	25,3784	2,450651	0,818649	0,007257
K_i WEPP	(17)	8,245138	1,066408	0,993307	0,028482
K_r WEPP	(18)	25,56918	0,87372	0,938396	0,114285
τ_c WEPP	(19)	9,887436	1,170922	0,990334	-0,07883
K_i	(20)	16,65863	1,185243	0,973007	0,070542
K_r	(21)	18,67196	1,371307	0,957029	-0,11771
τ_c	(22)	14,65536	1,069246	0,979122	-0,0599

K = Erodibilidade do solo, $t\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}\ ha\ h$; K_i = Erodibilidade em entressulcos, $kg\ s\ m^{-4}$; K_r = Erodibilidade em sulcos, $s\ m^{-1}$; τ_c = tensão cisalhante crítica, $N\ m^{-2}$; SM = Suscetibilidade magnética, $m^3\ kg^{-1}$; RMSE é o erro padrão das estimativas normalizado, %; CD é o coeficiente de determinação; EF é a eficiência do modelo; CRM é o coeficiente de massa residual; * têm as mesmas unidades das variáveis testadas.

Com relação à eficiência (EF), pode-se inferir que as equações (16) a (22) foram eficientes na predição dos valores de K, K_i , K_r e τ_c , mesmo com a erodibilidade global possuindo uma eficiência de 0,818649. Segundo Risse et al. (1993), o parâmetro EF compara os valores observados à linha 1:1, na qual valores medidos e estimados são iguais. O parâmetro EF não apenas avalia a linearidade dos valores observados, mas também as diferenças relativas entre valores observados e estimados (RISSE et al., 1993; MARTINS FILHO et al., 2004). Um valor igual a 1,0 para EF indica um modelo perfeito, o que não é o caso, mas os valores de EF são muito próximos a 1,0 para as equações de (13) a (18).

O CRM variou de -0,07883 a 0,114285 (Tabela 3). Segundo Loague e Green (1991) e Barbosa (2014), esse índice estatístico confirma que os ajustes das variáveis são bons, devido a estes apresentarem desvios próximos de zero. Os valores estimados dos atributos avaliados alternaram situações de tendência à subestimação e superestimação dos valores observados. Valores de CRM positivos indicam uma tendência em subestimar a variável predita, enquanto que valores negativos indicam uma outra em superestimar a variável predita por um modelo (LOAGUE; GREEN, 1991; ZACHARIAS; HEATWOLE; COAKLEY, 1996). Assim, CRM > 0,0 indica que os valores observados são subestimados, pelos valores preditos. Deste modo, as equações (16), (17), (18) e (20) geram valores estimados

que subestimam os valores observados. Já o contrário ocorre com as equações (19), (21) e (22).

Os erros-padrão foram baseados no RMSE, o qual representa o erro-padrão da estimativa normalizado (Tabela 3), O RMSE variou de 8,24% a 25,56% na validação externa. Em função do exposto, pôde-se inferir que existe confiabilidade e acuracidade das estimativas dos valores de K_i , K_r e τ_c por SM usando as variáveis modeladas neste trabalho. 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; BARBOSA, 2014). Deste modo, quanto ao RMSE de 25,3784% a equação (12) não pode ser considerada totalmente confiável. Cumpre ressaltar que todas as equações são relativamente simples e baseadas num único parâmetro, a suscetibilidade magnética (SM), o que no caso de Latossolos pelo exposto é promissor.

3.4 Conclusões

1. As equações analisadas permitem boas estimativas dos valores de erodibilidade global (K), em entressulcos (K_i) e em sulcos (K_r) e tensão cisalhante crítica (τ_c) em função da suscetibilidade magnética compatíveis com registros da literatura nacional;
2. Os valores médios estimados de K foram iguais a $0,02 \text{ t ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha h}$, para K_i de $2,760 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, para K_r de $0,0061 \text{ s m}^{-1}$ e τ_c de $3,975 \text{ N m}^{-2}$.
3. Testes adicionais são necessários para comprovar o uso acurado e eficiente das equações propostas e testadas, em condições diferentes das utilizadas no presente trabalho.

3.6 Referências

ALBERTS, E. E.; NEARING, M. A.; WELTZ, M. A.; RISSE, L. M.; PIERSON, F. B.; ZHANG, J. M. LAFLEN, J. M.; SIMANTON, J. R. Soil component. In: FLANAGAN, D.C.; NEARING, M. A., eds. **Water Erosion Prediction Project - WEPP**. West Lafayette, USDA, 1995. p.1-47. (Report, 10).

AMORIM, R. S. S. **Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para condições edafoclimáticas brasileiras**, 2003, 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2003.

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, 2009, p,74-107.

AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE E WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.6, p.1046-1049, 2010.

AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D. **Solos e Ambiente: uma introdução**. Santa Maria: Pallotti, 2004, 100p.

BARBOSA, R. S. **Erodibilidade de Latossolos predita pela suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa**, 2014. 64f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.

BARBOSA, Z.; BAHIA, V. G.; PAULA, M. B. Atuação da biota do solo na formação e estabilização de agregados e na estruturação dos solos, influenciando o controle da erosão. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v,19, n,191, p, 59-65, 1998.

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.

BARTINGTON. **Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System**. Disponível em: <http://www.bartington.com/Literaturepdf/Operation%20Manuals/om0408%20MS2.pdf>. Acesso em: 26 de abril. 2014.

BECEGATO, V. A.; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 23, n. 4, p.371-405, 2005.

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. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos em um Podzólico Vermelho-Escuro franco-arenoso. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Campinas, v.20, n.1, p.127-134, 1996.

CERQUETANI, G. E.; MARTINS FILHO, M. V. Rotina computacional e equação simplificada para modelar o transporte de sedimentos num Latossolo Vermelho distrófico. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.2, p. 617-626, 2006.

CHAVES, J. C. D.; CALEGARI, A. Adubação verde e rotação de culturas. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 212, p.53-60, 2001.

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**, Clarkson, 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. **Irriga**, Botucatu, 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.

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.

DYONISIO, H. A. F. Erosão hídrica: susceptibilidade do solo. **Revista eletrônica Thesis**, São Paulo, v.1, n.13, p.15-25, 2010.

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**, Viçosa, v.37, n.3, p.796-803, 2013.

ELLIOT, W. J.; LIEBENOW, A. M.; LAFLEN, J. M.; KOHL, K. D. **A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987/88**. West Lafayette: The Ohio State University/USDA-Agricultural Research Service, 1989. p.A2-A25. (NSERL Report, 3).

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 3, Ed. Brasília: Embrapa, 2013, 353p.

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, 50p. (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), McBRATNEY, A. G.; MENDONÇA SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v.117, n.1-2, p.3–52, 2003.

FLANAGAN, D. C.; LIVINGSTON, S. J. **USDA - Water erosion prediction project: WEPP user summary**. West Lafayette: National Soil Research Laboratory & USDA – Agricultural Research Service, 1995. p. 25-26. (Report, 11).

FONTES, M. P. F.; OLIVEIRA, T. S. de; COSTA, L. M. da; CAMPOS, A. A. G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma**, Amsterdam, v. 96, n. 3, p. 81–99, 2000.

FOSTER, G. R. Modelling the erosion process. In: HAAN, C.T.; JOHNSON, H.D.; BRAKENSIEK, D. L. eds. **Hidrologic modeling of small watersheds**. St. Joseph, ASAE, 1982. Cap.8, p.297-380. (ASAE Monograph,5).

FRANCO, A. M. P.; CASSOL, E. A.; PAULETTO, E. P; INDA, A. V. Erodibilidade do solo em entressulcos determinada experimentalmente e por modelos matemáticos em um Argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.18 n. 2-4, p175-187, 2012.

GIASSON, E.; CASSOL, E. A. Relações da erosão em sulcos com vazões aplicadas e doses de resíduos de trigo incorporados a um plintossolo franco- argilo-arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n.1, p.117-125, 1996.

GRIMLEY, D. A.; ARRUDA, N. K.; BRAMSTEDT, M. W. Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible, and precise delineation of hydric soils in the midwestern USA. **Catena**, Amsterdam, v. 58, n. 2, p.183– 213, 2004.

IPT. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo**. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo, 1981a. v. 1. Escala 1:1.000.000.

IPT. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo**. Mapa Geológico do Estado de São Paulo. São Paulo, 1981b. v. 1. Escala 1:500.000.

IPT. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo**. 1993. Mapa geológico da folha de Campinas. São Paulo: DIGEO. 1 mapa: cópia heliográfica. Escala 1:250.000.

JONG, E.; PENNOCK, D. J.; NESTOR, P. A. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada. **Catena**, Amsterdam, v. 40, n. 1, p. 291–305, 2000.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates, In: BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; WHITE, J. L.; ENSMINGER, L. E.; CLARCK, F. E. eds, **Methods of soil analysis**, Madison, American Society of Agronomy, Soil Science of America, 1965, Part I, p,499-510.

LENGNICK, L. L.; FOX, R. H. Simulation by NCSWAP of seasonal nitrogen dynamics in corn: I, soil nitrate. **Agronomy Journal**, Madison, v.87, n.1, p.167-75, 1994.

LOAGUE, K.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models:overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, Amsterdam, v.7, n.1, p.51-73, 1991.

LUCA JUNIOR, P.R.; MARTINS FILHO, M. V. Relações entre erodibilidade em sulcos, tensão cisalhante crítica e propriedades físicas de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. In: **16º SIICUSP - Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP**, 2008, Piracicaba - SP. 16º SIICUSP - Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP. Piracicaba, 2008.

MARQUES JÚNIOR, J. **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 2009. 113 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

MARTINS FILHO, M. V.; PEREIRA, V. P.; MARQUES JUNIOR, J. Efeitos da densidade do solo na erosão de um Latossolo Vermelho devido ao tráfego. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.21, n.1, p.23-31, 2001.

MARTINS FILHO, M. V. **Modelagem do processo de erosão entressulcos em latossolos de Jaboticabal – SP**. 1999. 140 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

MARTINS FILHO, M. V.; ENGLER, M. P. C.; IZIDORIO, R.; COTRIN, F. B.; SERRA, E. A.; AMARAL, N. S.; SOUZA, Z. M. Modelos para a estimativa do subfator cobertura-manejo (C_{III}) relativo à erosão entressulcos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n. 3, p. 603-611, 2004.

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**, Goiânia, v.43, n.1, p.93-103, 2013.

NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 32, n.spe, p. 2839- 2845, 2008.

NUNES, M. C. M. **Estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul**. 2006. 175 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PARSONS, A. J.; WAINWRIGHT, J.; FUKUWARA, T.; ONDA, Y. Using sediment travel distance to estimate medium-term erosion rates: a 16-year record. **Earth Surface Processes and Landforms**, Sussex, v.35, n.14, p.1694-1700, 2010.

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**, Brasília, v.48, n.6, p.661-672, 2013.

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, n.13-14, p.1724–1734, 2009.

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, p. 233–258,1988.

RISSE, L. M.; NEARING, M. A.; NICKS, A. D.; LAFLEN, J. M. Error assessment in the universal soil loss equation. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 57, n.3, p. 825-33, 1993.

SANTOS, H.; 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.

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 JÚNIOR., 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**, Oxford, v. 26, n. 4, p. 425-431, 2010.

SIQUEIRA, D. S. **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar**. 75 f. 2010. Dissertação de Mestrado (Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. 2010.

SOUZA, L. S.; SOUZA, L. D.; SOUZA, L. F. S. Indicadores físicos e químicos de qualidade do solo sob enfoque de produção vegetal: estudo de caso para citros em solos coesos de tabuleiros costeiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 29. 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP:SBCS, 2003, CD-ROM.

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**, Jaboticabal, v.34, n.1, p.31-38, 2006.

STATISTICA, **Statistica 7,0**, EUA Software, Tucks: StatSof, Baltimore, 2005, 250p.

THORNTHWAITE, C, W, An aproach towards a rationalclassification of climate, **Geographical Review**, London, 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**, Rio de Janeiro, v.57, n.3, p.235-244, 2005.

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**, Amsterdam, v.154, n.3-4, p.465-472, 2010.

TORRENT, J.; BARRÓN, V.; LIU, Q. S. Magnetic enhancement is linked to and precedes hematite formation in aerobicsoil. **Geophysical Research Letters**, v.33, n.6, p.1-4, 2006.

VENTURA JR. E.; NEARING, M. A.; NORTON, L. D.; Developing a magnetic tracer to soil study erosion. **Catena**, Amsterdam, v.43, n.4, p.277-291, 2001.

VOLK, L. B. S.; COGO, N. P. Inter-relação biomassa vegetal subterrânea estabilidade de agregados-erosão hídrica em solos submetidos a diferentes formas de manejo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.32, n.4, p.1713-1722, 2008.

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**. Ankeny, v.26, n.5, 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),

YODER, R.E, A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses, **Journal of America Society of Agronomy**, Madson, v,28, n,5, p,337- 351, 1936.

YOEMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.19, n.13, p.1467-1476, 1988.

ZACHARIAS, S.; HEATWOLE, C.D.; COAKLEY, C.W. **Robust quantitative techniques for validating pesticide transport models**. Transactions of the ASAE, St, Joseph, v. 39, n. 1, p. 47-54, 1996.

CAPÍTULO 4 - Considerações Finais

Quantificar a qualidade do solo é uma tarefa complexa cuja abordagem tem evoluído desde a década de 90 quando o debate sobre o tema se intensificou. Alguns pesquisadores afirmam que o grande desafio dos estudos sobre sustentabilidade está relacionado com o desenvolvimento de métodos para avaliar a qualidade do solo e do ambiente sob a interferência antrópica.

Há atualmente um esforço multidisciplinar para quantificar os diferentes atributos do solo. A resposta mais adequada parece ser a utilização de características ou indicadores que sejam indicativas do estado de qualidade do solo, traduzindo-os na forma de IQS. Porém, embora muitos esforços tenham sido empregados e resultados obtidos, existem ainda limitações que dificultam a correlação dos diversos indicadores com o conceito de qualidade do solo.

Os resultados deste estudo indicaram que o modelo para obtenção de índice de qualidade do solo empregado mostrou-se uma ferramenta efetiva para avaliar o efeito do manejo do solo sobre a sua qualidade, bem como da mudança da vegetação nativa para a cultura de cana-de-açúcar. Os indicadores químicos e físicos mostraram-se sensíveis para avaliar as mudanças na qualidade do solo decorrentes do manejo do solo. A análise multivariada de componentes principais pelo método scree-plot e o modelo desenvolvido para a determinação de IQS permitiram diferenciar alterações na qualidade do solo nas áreas estudadas e identificar os atributos que mais influenciaram as áreas como indicadores.

É importante salientar a diferença básica entre as duas metodologias utilizadas para a avaliação da qualidade do solo, a análise multivariada e o modelo de IQS. A primeira constitui-se em uma metodologia qualitativa enquanto que a segunda é quantitativa. A distribuição espacial dos tratamentos no gráfico da análise de componentes principais permite apenas detectar mudanças ou diferenças na qualidade do solo, porém, sem distinguir se esta mudança é para melhor ou para pior. Essa distinção somente pode ser feita se for considerada uma área ou tratamento como sendo um referencial de qualidade. O modelo de IQS, no entanto, baseado no conhecimento dos indicadores de qualidade e da sua dinâmica nos ecossistemas permite relacioná-los adequadamente às funções do solo e definir valores ótimos para determinado tipo de solo e cultura. Desse modo, permite-se a

quantificação da qualidade do solo, ou seja, pode-se afirmar que índices mais elevados indicam solos com melhor qualidade e vice-versa.

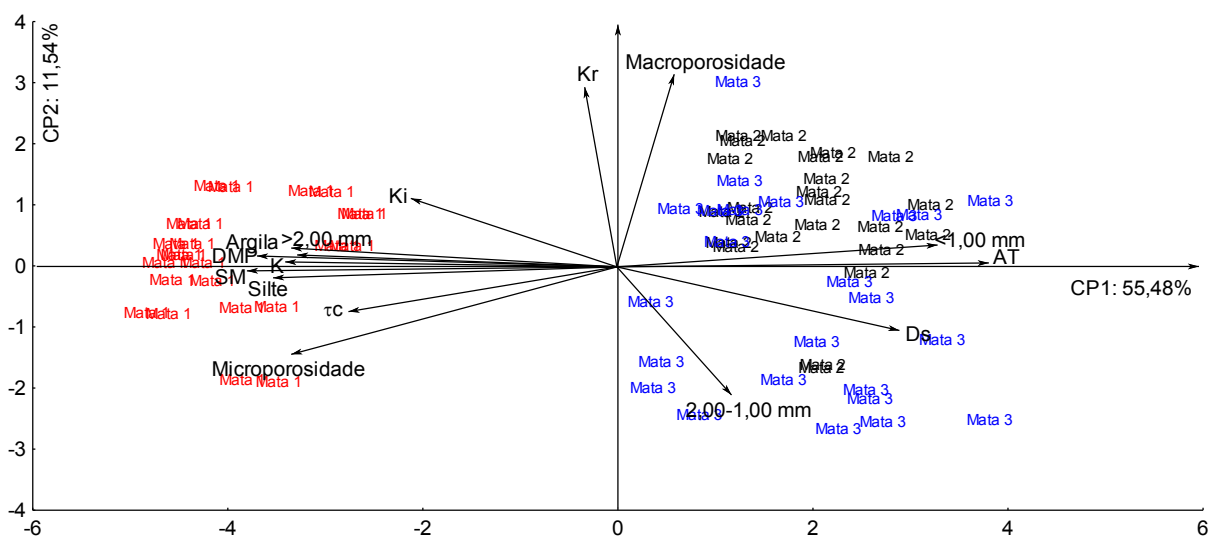
É necessário o aumento dos bancos de dados para os indicadores, principalmente aqueles de caráter biológico que normalmente não são determinados nas rotinas de análise de solo. No futuro, a melhor adequação das funções de pontuação dos indicadores deverá ser feita como resultado do avanço do conhecimento novo gerado por especialistas e da integração dos atributos químicos, físicos e biológicos.

Visto que o fator de erodibilidade não foi um atributo com forte influência no poder discriminatório na ACP dos atributos físicos e é sabido que a erodibilidade tem influência direta com a qualidade do solo, pois está relacionada com a perda de solo e com perdas de nutrientes, calculou-se de maneira indireta a erodibilidade das áreas avaliadas. As equações analisadas permitiram boas estimativas dos valores de erodibilidade global (K), em entressulcos (K_i) e em sulcos (K_r) e tensão cisalhante crítica (τ_c) em função da SM, cujos resultados são compatíveis com registros da literatura. Porém, testes adicionais são necessários para comprovar o uso acurado e eficiente das equações propostas e testadas, em condições diferentes das utilizadas no presente trabalho.

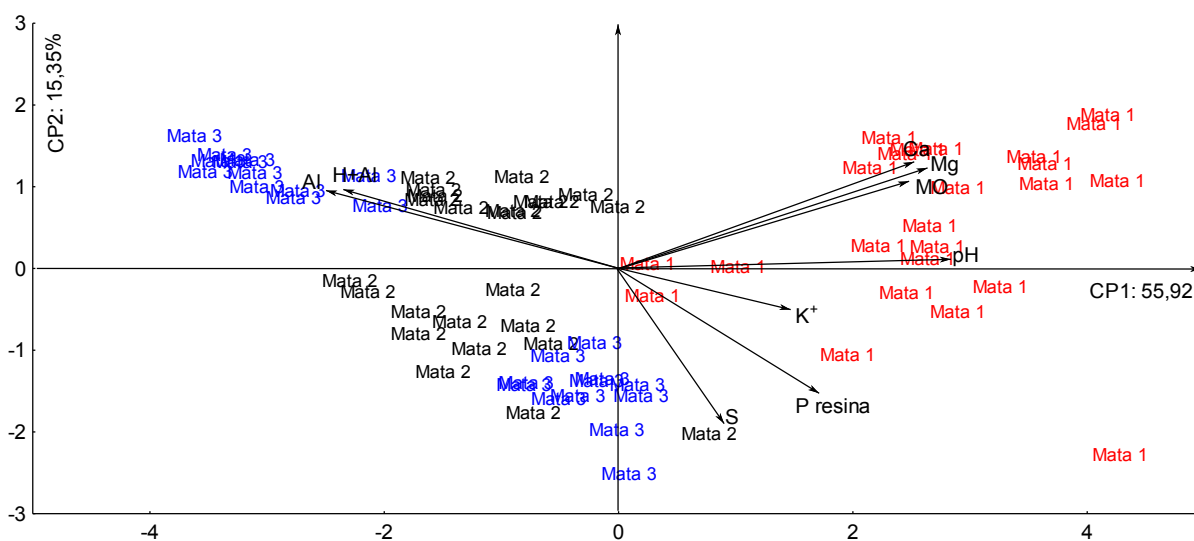
APÊNDICES

Apêndice 1. Média dos atributos físicos e químicos das áreas estudadas.

Atributos	Unidade	Áreas de Estudo					
		Área 1	Área 2	Área 3	Mata 1	Mata 2	Mata 3
Argila	g kg ⁻¹	424,62	217,35	280,02	377,88	207,46	198,83
Silte	g kg ⁻¹	254,09	107,18	97,38	295,12	99,62	113,60
Areia total	g kg ⁻¹	321,28	675,47	613,96	327,00	692,93	687,56
Areia muito fina	g kg ⁻¹	99,18	50,34	62,38	87,59	52,14	58,18
Areia fina	g kg ⁻¹	134,67	250,45	3,26	136,24	247,00	6,10
Areia média	g kg ⁻¹	64,23	297,10	32,19	72,25	321,66	51,76
Areia grossa	g kg ⁻¹	14,45	76,62	187,43	19,46	69,04	225,82
Areia muito grossa	g kg ⁻¹	8,75	4,33	325,94	11,46	3,09	345,70
Ds	kg dm ⁻³	1,37	1,56	1,47	1,07	1,27	1,32
Macro	m ³ m ⁻³	26,18	15,65	12,57	29,60	37,00	26,83
Micro	m ³ m ⁻³	28,47	26,61	25,59	32,36	16,03	17,12
DMP	mm	2,14	1,96	1,85	5,16	4,40	4,47
> 2,00 mm	%	33	30	26	89	74	78
2,00-1,00 mm	%	16	8	11	3	3	4
<1,00 mm	%	49	62	63	8	23	18
P Resina	mg dm ⁻³	26,42	9,88	35,79	16,17	9,21	9,54
MO	g dm ⁻³	24,42	21,79	21,17	73,13	18,13	21,25
pH	CaCl ₂	4,78	5,37	5,31	5,68	4,25	4,20
K ⁺	mmol _c dm ⁻³	7,13	3,54	2,74	6,38	3,46	1,93
Ca ²⁺	mmol _c dm ⁻³	7,57	10,18	10,39	51,51	6,81	4,18
Mg ²⁺	mmol _c dm ⁻³	8,69	8,92	5,51	15,29	5,31	2,97
H+Al	mmol _c dm ⁻³	39,29	21,25	20,79	29,96	42,67	50,38
Al ³⁺	mmol _c dm ⁻³	2,04	0,65	0,84	0,89	6,17	9,68
S	mg dm ⁻³	12,04	10,79	17,67	20,58	15,17	22,42
K	h MJ ⁻¹ mm ⁻¹	0,019	0,018	0,005	0,034	0,015	0,006
Ki	kg s m ⁻⁴	331326,7	3552117,0	3876005,6	3216187,5	3329609,4	3545637,8
Kr	Kg N ⁻¹ s ⁻¹	0,006	0,006	0,005	0,006	0,006	0,005
τ _c	Pa	4,34	3,84	4,14	4,27	3,72	3,62
SM	10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹	2094,04	138,75	254,33	1637,08	161,08	160,08



Apêndice 2. Análise de componentes principais dos físicos do solo das matas.



Apêndice 3. Análise de componentes principais dos químicos do solo das matas

Apêndice 4. Valores dos pesos dos atributos físicos para a determinação do Índice de Qualidade do solo

Pesos dos atributos Físicos					
SM	100,00	—	91,43		
	x	—	11,85	→	12,958%
	100,00	—	49		
	x	—	12,958	→	26%
Areia	100,00	—	91,43		
	x	—	11,67	→	12,766%
	100,00	—	49		
	x	—	12,766	→	26%
Argila	100,00	—	91,43		
	x	—	11,06	→	12,1%
	100,00	—	49		
	x	—	12,093	→	25%
Micro	100,00	—	91,43		
	x	—	10,30	→	11,26%
	100,00	—	49		
	x	—	11,26	→	23%

Apêndice 5. Valores dos pesos dos atributos químicos para a determinação do Índice de Qualidade do solo.

Pesos dos atributos Químicos				
Ca²⁺	100,00	—	91,43	
	x	—	12,24	→ 13,388247%
	100,00	—	51	
	x	—	13,39	→ 26%
Mg²⁺	100,00	—	91,43	
	x	—	11,60	→ 12,6882495%
	100,00	—	51	
	x	—	12,69	→ 25%
pH	100,00	—	91,43	
	x	—	11,40	→ 12,4704250%
	100,00	—	51	
	x	—	12,47	→ 24%
MO	100,00	—	91,43	
	x	—	11,31	→ 12,3713715%
	100,00	—	51	
	x	—	12,37	→ 24%

Apêndice 6. Valores dos pesos químicos e físicos para a determinação do Índice de Qualidade do solo

Pesos Químicos e Físicos				
Peso Químico	100,00	-	91,43	
	x	-	46,55	→ 51%
Peso Físico	100,00	-	91,43	
	x	-	44,87	→ 49%

Apêndice 7. Valores de IQS para as áreas de cana-de-açúcar

Amostras	Área 1		Área 2		Área 3	
	IQS ₁	IQS ₂	IQS ₁	IQS ₂	IQS ₁	IQS ₂
1	0,4992	0,25654	0,5208	0,209643	0,4775	0,188198
2	0,4724	0,235969	0,4136	0,204683	0,4337	0,167398
3	0,4057	0,225112	0,4167	0,188532	0,4419	0,162366
4	0,4095	0,235681	0,4387	0,216257	0,4581	0,170994
5	0,3812	0,226613	0,3200	0,148675	0,4999	0,220134
6	0,3244	0,213563	0,3514	0,156094	0,3548	0,149279
7	0,3853	0,230409	0,2898	0,143623	0,3163	0,145552
8	0,3965	0,226156	0,4296	0,161725	0,3517	0,151579
9	0,3601	0,213535	0,5090	0,172627	0,4303	0,170083
10	0,3632	0,222681	0,5461	0,176983	0,4074	0,20161
11	0,3713	0,241772	0,5727	0,187996	0,4438	0,180953
12	0,3427	0,223964	0,4261	0,173122	0,3442	0,155302
13	0,4414	0,230607	0,2980	0,14363	0,3526	0,155606
14	0,3585	0,221454	0,3854	0,169994	0,4169	0,190282
15	0,3534	0,221672	0,4419	0,188675	0,3633	0,153919
16	0,3453	0,230499	0,4229	0,172859	0,2881	0,144463
17	0,3314	0,211013	0,4498	0,183601	0,2991	0,144853
18	0,3781	0,232461	0,4350	0,17572	0,2766	0,14147
19	0,3636	0,227714	0,4542	0,197495	0,3427	0,151259
20	0,3617	0,2272	0,4381	0,175601	0,4167	0,178911
21	0,392	0,233958	0,3976	0,164375	0,3834	0,162288
22	0,3785	0,243049	0,3218	0,150005	0,4508	0,182461
23	0,4050	0,223405	0,2901	0,146525	0,4093	0,161261
24	0,3708	0,221365	0,2969	0,152257	0,3419	0,155234
Média	0,38297	0,22818	0,41109	0,17336	0,38754	0,16606

IQS₁= Referência agronômicaIQS₂= Limite Crítico da mata nativa