

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JULIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PERDA DE SOLO EM ÁREA DE NASCENTES  
CARACTERIZADA POR ANÁLISE MULTIVARIADA E  
MODELOS DE GEOESTATÍSTICA**

Daniela Popim Miqueloni  
Engenheira Florestal

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL  
Janeiro de 2011

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JULIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PERDA DE SOLO EM ÁREA DE NASCENTES  
CARACTERIZADA POR ANÁLISE MULTIVARIADA E  
MODELOS DE GEOESTATÍSTICA**

Daniela Popim Miqueloni

Orientadora: Profa. Dra. Célia Regina Paes Bueno

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

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL  
Janeiro de 2011



## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**Daniela Popim Miqueloni** – nasceu em 18 de abril de 1985 em Araraquara-SP, filha de Osvaldo Rodrigues Miqueloni e Helena Maria Popim Miqueloni. cursou o ensino fundamental na Escola Estadual “Dorival de Carvalho” e o ensino médio na Escola Municipal “Adelino Bordignon”, Matão-SP. Graduou-se em Engenharia Florestal em 2007 pela Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), Piracicaba-SP. Realizou estágio profissionalizante em empresa florestal de grande porte na área de economia e trabalhou como engenheira florestal em empresa de *software* para gestão florestal. Atualmente desenvolve projetos de análise de perda de solo, utilizando estatística multivariada e geoestatística como ferramentas auxiliares na tomada de decisão para conservação do solo e planejamentos agroambientais.

*“A nossa ciência deveria ser baseada sobre uma percepção da verdade e não sobre a mera crença ou opinião. A informação recebida dos homens nos poderá apenas auxiliar na formação das opiniões, mas não constitui nenhum conhecimento. O real conhecimento consiste em um reconhecimento direto da verdade e este nos é ensinado pela própria natureza”*

*Paracelso*

À minha família,  
dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

À Profa Dra. Célia Regina Paes Bueno, pela orientação.

Ao Professor Antonio Sergio Ferraudo pelo apoio técnico nas análises multivariadas e no trabalho.

Aos doutorandos Adolfo Valente Marcelo e Alan Rodrigo Panosso pelo apoio laboratorial e geoestatístico.

Aos funcionários Cristiano, Luiz, Ademir, Gomes, Dejair e Célia pela análise laboratorial, coletas de campo e apoio administrativo e aos motoristas Washington e Manaces.

À minha família pelo incentivo.

A todos que contribuíram para a conclusão deste trabalho.

## SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
TÍTULO E RESUMO .....	xi
TITLE AND SUMMARY .....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Conservação do solo.....	5
2.1.1. <i>Microbacia hidrográfica como unidade de manejo</i> .....	7
2.1.2. <i>Perda de solo por erosão</i> .....	9
2.1.3. <i>Modelos para predição de perda de solo</i> .....	13
2.1.3.1. <i>Equação Universal da Perda de Solo</i> .....	15
2.1.3.2. <i>Fatores da perda de solo</i> .....	16
2.2. Análise Estatística dos Resultados.....	21
2.2.1. <i>Análise Multivariada</i> .....	21
2.2.1.3. <i>Análise de componentes principais</i> .....	23
2.2.1.4. <i>Análise de agrupamento</i> .....	24
2.3. Geoestatística.....	26
2.3.1. <i>Semivariograma e krigagem</i> .....	28
2.4. Uso integrado da Geoestatística e Análise Multivariada.....	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	32
3.1. Área de estudo .....	32
3.2. Amostragem e laboratório .....	34
3.3. Estimativa dos fatores e perda de solo.....	36
3.4. Análise dos dados .....	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	42
4.1. Estatística descritiva .....	42
4.2. Fator erodibilidade do solo .....	46
4.2.1. <i>Análise de agrupamento</i> .....	46
4.2.2. <i>Análise de componentes principais</i> .....	49
4.3. EUPS e PNE .....	55
4.3.1. <i>Análise de agrupamento</i> .....	55
4.3.2. <i>Análise de componentes principais</i> .....	58
4.3.3. <i>Análise geoestatística</i> .....	64
5. CONCLUSÕES.....	72
6. IMPLICAÇÕES .....	73
7. REFERÊNCIAS .....	74



**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Estatística descritiva para as variáveis, argila, areia, silte, matéria orgânica (MO), areia grossa (AG), areia media (AM), areia fina (AF), areia muito fina (AMF), fatores R, K, C, P, LS, potencial natural de erosão (PNE) e perda de solo (A atual).....	42
Tabela 2. Classes de ocorrência do fator topográfico definidas por BERTONI & LOMBARDI NETO (2008) e sua distribuição na área estudada. ....	44
Tabela 3. Coeficiente de correlação do PNE e da EUPS e os fatores R, K e LS. ....	45
Tabela 4. Autovalores gerados da matriz de covariância para a granulometria e matéria orgânica. ....	50
Tabela 5. Correlação entre cada fração de solo e um componente principal (CP). ....	51
Tabela 6. Autovalores gerados da matriz de covariância para os fatores de perda de solo. ....	58
Tabela 7. Correlação entre cada fator de perda de solo e um componente principal (CP). ....	59
Tabela 8. Modelos e parâmetros dos semivariogramas ajustados. ....	64

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Parâmetros do semivariograma.....	28
Figura 2. Localização da área de estudo.....	32
Figura 3. Mapa planialtimétrico e rede de drenagem.....	33
Figura 4. Mapa de uso e ocupação da área (Cana = área ocupada com cana-de-açúcar; APP = área de preservação permanente; Fragmento = vegetação remanescente).....	34
Figura 5. Esquematização amostral.....	35
Figura 6. Dendrograma resultante da análise de agrupamento hierárquico considerando teores de granulometria e matéria orgânica.....	47
Figura 7. Perfil dos centróides de cada grupo pelo método <i>k-means</i> . Arg% = porcentagem de argila; Silt% = porcentagem de silte; MO% = porcentagem de matéria orgânica; AG% = porcentagem de areia grossa; AM% = porcentagem de areia média; AF% = porcentagem de areia fina e AMF% = porcentagem de areia muito fina. ....	48
Figura 8. Distribuição no plano dos grupos formados para a granulometria e matéria orgânica pela análise de agrupamento de acordo a posição geográfica das amostras (coordenadas em UTM, Córrego Alegre S). ....	48
Figura 9. Gráfico Scree Plot dos autovalores da matriz de correlação. ....	50
Figura 10. Gráfico biplot para o componente principal 1 (CP1) e o componente principal 2 (CP2) projetadas no plano. AMF% = areia muito fina (%); AF% = areia fina (%); AM% = areia média (%); AG% = areia grossa (%); *Fator K = fator K(variável suplementar).....	52
Figura 11. Distribuição dos grupos formados por CP1 e CP2 para granulometria e matéria orgânica de acordo a posição geográfica das amostras (coordenadas em UTM, Córrego Alegre S). ....	53
Figura 12. Gráfico biplot para o componente principal 1 (CP1) e o componente principal 3 (CP3) projetadas no plano. AMF% = areia muito fina (%); AF% = areia fina (%); AM% = areia média (%); AG% = areia grossa (%); *Fator K = fator K(variável suplementar).....	54
Figura 13. Distribuição dos grupos formados por CP1 e CP3 para granulometria e matéria orgânica de acordo a posição geográfica das amostras.....	54
Figura 14. Dendrograma resultante da análise de agrupamento hierárquico considerando os fatores de perda de solo.....	56
Figura 15. Perfil dos centróides de cada grupo pelo método <i>k-means</i> para cada fator de perda de solo.....	57

Figura 16. Distribuição dos grupos formados para os fatores de perda de solo pela análise de agrupamento de acordo a posição geográfica das amostras (coordenadas em UTM, Córrego Alegre S). .....	57
Figura 17. Gráfico Scree Plot dos autovalores da matriz de correlação. ....	59
Figura 18. Gráfico biplot para o componente principal 1 (CP1) e o componente principal 2 (CP2) dos fatores de perda de solo projetadas no plano.....	61
Figura 19. Distribuição dos grupos formados para os fatores de perda de solo pela análise de agrupamento para CP1 e CP2 de acordo a posição geográfica das amostras (coordenadas em UTM, Córrego Alegre S). .....	61
Figura 20. Gráfico biplot para o componente principal 1 (CP1) e o componente principal 3 (CP3) dos fatores de perda de solo projetadas no plano.....	62
Figura 21. Distribuição dos grupos formados para os fatores de perda de solo pela análise de agrupamento para CP1 e CP3 de acordo a posição geográfica das amostras (coordenadas em UTM, Córrego Alegre S). .....	63
Figura 22. Semivariogramas ajustados para os três componentes principais (CP1, CP2 e CP3).....	65
Figura 23. Mapa de isolinhas para CP1 e os vetores de escoamento superficial. 66	
Figura 24. Mapa de isolinhas para CP2 e os vetores de escoamento superficial. 67	
Figura 25. Mapa de isolinhas para CP3 e os vetores de escoamento superficial. 67	
Figura 26. Distribuição da atuação dos fatores contida em CP1. (■) fatores R e P e (■) fator C. ....	68
Figura 27. Distribuição da atuação dos fatores contida em CP2. (■) fator LS e (■) fator K.....	69
Figura 28. Distribuição da atuação dos fatores contidos em CP3. (■) fatores K, LS e PNE. ....	70

## PERDA DE SOLO EM ÁREA DE NASCENTES CARACTERIZADA POR ANÁLISE MULTIVARIADA E MODELOS DE GEOESTATÍSTICA

**RESUMO** – Devido sua importância, a perda de solo das microbacias de cabeceira do Córrego do Tijuco-SP foi estimada por meio da EUPS, e a variabilidade espacial dos fatores do processo erosivo foi investigada pelas análises multivariada e geoestatística. A perda de solo média estimada foi considerada alta,  $118,50 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , e a correlação de Pearson confirmou o fator erodibilidade do solo como o fator mais importante no processo erosivo. A erodibilidade local é condicionada pela distribuição das frações granulométricas e matéria orgânica, sendo o solo basicamente de textura média/arenosa de baixa coesão. Próxima a zona urbana, a interação do fator erosividade da chuva e do fator práticas conservacionistas se mostrou proeminente evidenciando alta perda de solo devido à concentração de água oriunda da camada impermeabilizada urbana e da falta de controle da velocidade do escoamento superficial da água. Em contraste, o fator cobertura vegetal mostrou maior atuação nas áreas de vegetação permanente, localizadas principalmente nas nascentes e canais de escoamento. Nas áreas mais convexas do terreno, localizadas nos divisores de águas, a atuação do fator erodibilidade foi proeminente, em contraste com o fator topográfico, este em áreas côncavas de maior declividade. Foram observadas ainda áreas com atuação conjunta dos fatores topográfico e erodibilidade, refletindo locais de inclinação mais suave, porém com alto potencial natural de erosão. Os resultados das análises multivariadas e geoestatística permitiram uma estratificação da área estudada identificando locais com propriedades específicas quanto à perda de solo o que contribui na compreensão do processo erosivo para a aplicação das práticas conservacionistas.

**Palavras-Chave:** análise espacial, conservação do solo, erodibilidade do solo, erosão.

## **SOIL LOSS IN AREA OF SPRINGS CHARACTERIZED BY MULTIVARIATE ANALYSIS AND GEOSTATISTICS MODELS**

**SUMMARY** - Because of the importance of headwater watersheds of the Córrego do Tijuco-SP its soil loss was estimated by the USLE and the spatial variability of the erosion process factors was investigated by multivariate analysis and geostatistics. The estimated average soil loss was considered high,  $118.50 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ , and Pearson correlation confirmed the soil erodibility factor as the most important factor in the erosion process. Erodibility is conditioned by the local distribution of soil particle-size fractions and organic matter, and soil texture mostly medium/sandy of low cohesion. Near urban areas, the interaction of rainfall erosivity factor and conservation practices factor showed prominent high soil loss due to concentration of water coming from urban soil impermeabilization and the lack of speed control of runoff water. In contrast, the vegetation cover factor showed great performance in the areas of permanent vegetation, mainly located in the headwaters and drainage channels. In areas of more convex topography close to the watershed dividers, the action of erodibility factor was prominent, in contrast to concave areas of greater slope where the topographic factor was more prominent. We also observed areas with joint action of topographic factors and soil erodibility factor, with smoother topography, but with high natural potential of erosion. Results of multivariate and geostatistics analysis enabled to stratify the study area by identifying sites with specific properties of soil loss which helps in understanding the erosion process for the implementation of conservation practices.

**Keywords:** spatial analysis, soil conservation, soil erodibility, erosion.

## 1. INTRODUÇÃO

A rede de drenagem do Córrego Rico tem importância relevância para a região de Jaboticabal-SP, uma vez que é a principal fonte de captação de água para abastecimento público do município e sofre com os efeitos antrópicos devido ao lançamento de efluentes domésticos e agrícolas (ZANINI et al., 2010). As nascentes do Córrego do Tijuco têm um papel fundamental neste aspecto, pois reabastecem a rede do Córrego Rico e melhoram a qualidade da água na confluência das duas redes (ZANINI et al., 2010). Além disso, as microbacias de cabeceira desta região são as de maior grau de evolução morfológica da bacia hidrográfica do Mogi Guaçu, apresentando menor resistência à remoção de sedimentos e um processo erosivo mais intenso, com agravamento nas microbacias de nascentes do Córrego do Tijuco e do Córrego Rico, formadas por solos com baixo grau de coesão superficial (PISSARRA et al., 2006), o que indica as características do solo como o possível fator de maior atuação no processo erosivo local.

Dessa forma, a preocupação com o planejamento do uso do solo local e manutenção da qualidade da água é um fato a ser enfrentado pela população. Tendo em vista o grande impacto que apresenta a agricultura na qualidade e na quantidade da água disponível, torna-se fundamental estudos mais abrangentes de técnicas utilizadas nos sistemas conservacionistas que minimizem a degradação dos recursos hídricos e que considerem, em suas premissas, o desenvolvimento sustentável da agricultura.

A degradação da qualidade do solo por erosão acelerada caracteriza impacto irreversível sobre a qualidade do ambiente, e como consequência a poluição das águas superficiais por sedimentos, em conjunto com a contaminação das águas subsuperficiais por lixiviação de agroquímicos.

Os solos das propriedades agrícolas localizados próximos a cabeceiras de drenagem são utilizados em geral de forma não planejada, levando muitas vezes a manifestação de processos erosivos. Contudo, ao se planejar o uso dessas terras com base sustentáveis, os fatores ligados às perdas de solos permitem prognósticos

importantes para prevenção e controle dos processos erosivos e como consequência dos recursos hídricos.

Dos modelos existentes para estimar a erosão, a Equação Universal de Perdas de Solo – EUPS, proposta por WISCHMEIER & SMITH (1978) permite prognósticos importantes para prevenção e controle dos processos erosivos, pois envolve um conjunto principal de condicionantes da erosão, os do meio físico representados por erosividade das chuvas, erodibilidade dos solos e comprimento e declividades das encostas, e das intervenções humanas, as formas de uso e manejo e práticas de conservação dos solos.

A aplicação da EUPS, ou formulações similares deve ser cuidadosa em áreas com dimensões de bacias hidrográficas. No entanto, conhecido o significado dos seus resultados, a equação possibilita estabelecer paralelos com suscetibilidades naturais dos terrenos à erosão, quando a análise envolve apenas os fatores inerentes ao meio natural, e paralelos com os riscos atuais de erosão, quando são introduzidos os fatores antrópicos (STEIN et al., 2003).

Mesmo conhecendo estes paralelos entre o processo erosivo e os fatores de perda de solo, naturais e antrópicos, as interações inerentes ao processo devem ser analisadas e compreendidas de acordo com as características pontuais de cada área, possibilitando alternativas de controle e mitigação do problema de acordo com as possibilidades locais. O primeiro passo para o entendimento destas interações é a interpretação da variabilidade espacial dos dados gerados a partir de estudo local. A ferramenta ideal para isso é a geoestatística que, baseada na teoria das variáveis regionalizadas, oferece um interpolador ótimo para os dados não mensurados, isto é, sem tendência e com variância mínima (VIEIRA, 2000), e gera mapas onde a distribuição das variáveis é explicitada, possibilitando o planejamento e atuação nos pontos de interesse de forma otimizada.

Em complemento e respeitando a estrutura multivariada contida no conjunto de dados foram utilizadas técnicas de análise multivariada, entre elas a análise de componentes principais e a análise de agrupamento. As principais vantagens dessas técnicas são a redução das dimensões do processo analisado, condensando a

informação em conjuntos com menores dimensões com perda mínima da informação. A técnica de análise de componentes principais gera novas variáveis latentes, agregando a informação relevante responsável pela discriminação das amostras em cada uma delas. A análise de agrupamento organiza os dados em classes significativas com base em sua similaridade (HAIR et al., 2005). Estas técnicas podem gerar áreas homogêneas de solo permitindo caracterizá-los.

Considerando as vantagens dessas ferramentas vários estudos mostram a aplicação da estatística multivariada e da geoestatística na Ciência do Solo, onde vêm ganhando cada vez mais espaço, como na química e fertilidade (BUENO, 2001; MANZIONE et al., 2002; BORŮVKA et al., 2007; LIMA et al., 2009; SILVA, 2009), classificação de solos (VALLADARES et al., 2008; MELÉM JUNIOR et al., 2008) e relação perda de solo e produtividade (SALCHOW & LAW, 2001, ODLARE et al., 2005), e a geoestatística, aplicada em estudos morfológicos (SOUZA et al., 2004; SOUZA et al., 2006), de química e fertilidade (SANCHEZ et al., 2005) e perda de solo (SOUZA et al., 2003; SOUZA et al., 2005; MELLO et al., 2006; SANCHEZ et al., 2009). Ambas as análises sendo utilizadas uma como complemento da outra proporciona resultados mais convincentes que os feitos separadamente.

Assim, o objetivo deste estudo foi estimar a perda de solo em uma área de nascentes e analisar a variabilidade espacial dos fatores de perda de solo ao longo do relevo, na tentativa de compreender a influência da erodibilidade do solo no processo erosivo da área.



## 2. REVISÃO DE LITERATURA

A ascensão populacional associada à ocupação desordenada do território traz a necessidade do conhecimento da situação local, bem como o planejamento do uso da terra para seu manejo racional (DONZELI et al., 1992). A intensificação do uso e a mecanização agravam o desgaste e o empobrecimento do solo, afetando a produtividade agrícola, causando degradação ambiental e esgotando os recursos naturais. E conhecer e entender estes processos de deterioração é de extrema importância para mapear e controlar seus efeitos de forma a mitigar o problema (LOMBARDI NETO, 1992).

A erosão hídrica é o primeiro problema oriundo do mau uso do solo (LOMBARDI NETO, 1992), assim, o conhecimento de suas propriedades físicas, sobretudo àquelas relacionadas ao fluxo de água, é o que deve orientar o planejamento conservacionista, voltado, principalmente, à microbacia hidrográfica, que é considerada como “uma unidade de relevo que contribui para um único coletor de águas pluviais” (VIEIRA et al., 1992). Tal planejamento não considera os limites das propriedades, estando em função das informações de clima, solo, relevo e uso, determinando um manejo integrado e mais eficiente da unidade da microbacia (DE MARIA et al., 1992).

Dentro desta unidade, os elementos importantes na sua dinâmica hidrológica são as nascentes, que como pontos de passagem de água subterrânea para os canais de escoamento pluviais, garantem a disponibilidade de água e a manutenção dos rios para a constituição da microbacia (FELIPPE & MAGALHÃES JUNIOR, 2009). A perda de solo dessas áreas afeta diretamente a quantidade, o regime de vazão e a qualidade da água em toda a microbacia, tendo o monitoramento do solo papel importante na identificação das práticas de manejo não compatíveis com a sustentabilidade (FERRAZ, 2006). A natureza das partículas provenientes da perda de solo depende principalmente da cobertura vegetal, relevo, clima, geologia e tipo de solo e o manejo afeta a concentração e distribuição destes sedimentos (FERRAZ, 2006). Assim, solos mais suscetíveis à erosão, devido sua posição no relevo e propriedades físicas, devem

receber atenção especial, como os Argissolos, que associados a relevos movimentados são altamente suscetíveis à perda de solo, acarretando em prejuízos ambientais (RIBEIRO & ALVES, 2008). O conhecimento das particularidades de cada solo condiciona a otimização de seu uso e aliado às práticas conservacionistas de manejo tende a reduzir perdas e danos causados pela erosão (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2008). A adoção da agricultura conservacionista orientada pela caracterização ambiental e pelo planejamento adequado oriundo da pesquisa traz o máximo aproveitamento dos recursos de forma sustentada, proporcionando desenvolvimento econômico para o produtor rural e a conservação dos recursos naturais, como o solo, de acordo com sua capacidade de uso, que se convertem em benefício para toda a sociedade (FERRAZ et al., 2008).

### **2.1. Conservação do solo**

Devido às características edafoclimáticas, o Brasil ocupa uma posição de destaque no cenário agrícola mundial. O desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias no campo possibilitaram aumentar sua atuação no comércio internacional com produtos competitivos e de qualidade, fazendo do agronegócio o setor responsável por 40% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, com quase metade das exportações e empregando 37% da população economicamente ativa do país (EMBRAPA, 2008). No entanto, o aumento da produtividade aliada ao uso intensivo do solo acentuou o desequilíbrio ambiental que, por meio de fatores como a utilização indiscriminada de insumos químicos e a mecanização sem dimensionamento adequado, contribuem para a crescente perda de solo por processos erosivos, redução dos teores de matéria orgânica e fertilidade, perda de biodiversidade e contaminações (SANTOS-BREFIN, 2009).

No estado de São Paulo, BERTONI & LOMBARDI NETO (2008) apontam uma grande perda de solo anual explicada pela intensidade do cultivo agrícola, que se deu principalmente a partir da década de 1970. Até então o cultivo agropecuário e florestal predominantes eram de subsistência, o que não acarretavam em grandes danos

ambientais como a compactação do solo. Nas áreas de topografia mais movimentada, já no ano de 1939, o governo do Estado por meio do Serviço de Terraceamento, oferecia assistência para os produtores com maquinário e apoio técnico para a construção de terraços (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2008). BERTOL et al. (2010) destacam algumas práticas que faziam parte do manejo agropecuário da época como a queimada, que era utilizada no manejo como forma de limpeza da área e eliminação dos restos culturais, e o uso de implementos leves de tração animal, que trazia poucos prejuízos para a estrutura do solo e contribuía para a alta taxa de infiltração de água, mesmo sem cobertura vegetal. As pastagens eram geralmente nativas e sofriam menor intensidade de pastejo, uma vez que a pressão produtiva era baixa e supria a demanda dos animais por forragem. A produção madeireira era essencialmente extrativista e artesanal, oriunda principalmente de fragmentos de floresta nativa, onde muitas vezes ficavam os restos vegetais encobrendo o solo. A partir da década de 1970, com o cultivo intensivo, oriundo da maior demanda pela produção, o uso de insumos e implementos de tração mecânica pesada acentuou a degradação dos solos. Os produtores passaram a utilizar o preparo mecânico, pulverizando o solo e causando compactação sub-superficial, reduzindo a infiltração e aumentando o escoamento superficial causado pela água da chuva. Os sedimentos arrastados aos cursos de água aceleravam o assoreamento de rios e córregos, trazendo prejuízos locais, com a perda da camada fértil do solo, e regionais, com a contaminação da água.

O uso do terraceamento passou a ser menos eficiente, assim como os cultivos em contorno. Surge então o plantio direto como alternativa para a redução da perda de solo e manutenção da capacidade produtiva, principalmente na região Sul do país. A cada ano ocorre um considerável aumento em áreas e também ampliação do uso desta técnica para outras culturas como essências florestais, olerícolas e frutas (SMIDERLE et al., 2004). Trata-se de uma prática que consiste basicamente na semeadura sobre os restos de cultura anterior, não havendo preparo do solo, exceto nos sulcos ou covas de plantio. Sem movimentação do solo através de aração, gradagem e escarificação, a vegetação é mantida, sendo manejada com herbicidas de dessecação (SALOMÃO, 1990). A utilização da perda de solo como indicador de manejo enquadra o plantio

direto no sistema conservacionista, pois mantém a integridade do solo em relação ao plantio convencional (SPAROVEK, 1998).

Mesmo com descobertas técnico-científicas como o plantio direto e as geradas pela genética, fitotecnia, fitossanidade, nutrição de plantas entre outros, DERNARDIN et al. (2010) afirmam que atualmente são poucos os produtores rurais que aplicam os fundamentos e técnicas de conservação do solo, pois o conhecimento público sobre o tema é limitado, além disso, a legislação brasileira disciplina a utilização do solo, mas não prevê sua proteção adequada.

O *conservacionismo* é definido por DERNARDIN et al. (2010) como “a gestão da utilização dos elementos da biosfera, de modo a produzir benefícios à população humana, mantendo suas potencialidades necessárias às gerações futuras” e a *conservação do solo* como “a ciência que estuda e apregoa ações de preservação, manutenção e restauração ou recuperação das propriedades biológicas, físicas e químicas do solo, estabelecendo critérios para sua ocupação e utilização, sem comprometer suas potencialidades primitivas”. Deste modo, a agricultura conservacionista deve ser praticada visando minimizar os impactos do uso de insumos externos, utilizar o sistema de técnicas adequado ao local mantendo suas características primitivas e manejar de forma integrada o ambiente para a restauração e preservação dos recursos naturais disponíveis (BERTOL et al., 2010).

### **2.1.1. Microbacia hidrográfica como unidade de manejo**

Somado à preconização dos conceitos e técnicas da agricultura conservacionista, está a necessidade da adoção da microbacia hidrográfica como unidade geográfica básica do manejo integrado (CALEGARI & COSTA, 2010). A bacia hidrográfica é definida de forma prática por CAPECHE, et al. (2008) como “o conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes, onde normalmente a água se escoia dos pontos mais altos para os mais baixos”, e os pontos mais altos, denominados divisores de água, são seus limites. A microbacia se enquadra nesta definição como a menor unidade drenada por um curso de água neste conjunto (CALEGARI & COSTA,

2010). A utilização desta unidade de planejamento permite a integração de todos os fatores relacionados à microbacia, isto é políticos, econômicos, ambientais, sociais e culturais, possibilitando a participação de todos os envolvidos no planejamento e auxiliando o produtor rural, como principal atuante, na tomada de decisão (BRAGAGNOLO, 2010).

Neste sentido, a utilização racional dos recursos da microbacia deve atender às necessidades de todos os envolvidos, socialmente por meio do uso público urbano da água, economicamente no uso pela propriedade rural como irrigação e bebedouros, e ambientalmente por meio da manutenção do regime hídrico local, garantindo a disponibilidade de água periodicamente e o regime de vazão da microbacia (SÃO PAULO, 2009). O manejo racional e a conservação dos recursos podem contribuir para a mínima alteração da dinâmica do ecossistema das microbacias pela ação antrópica e garante a qualidade da produção de água através da conservação de matas ciliares e nascentes (AGUIAR NETTO, 2010). As nascentes são de extrema importância no contexto da microbacia por constituírem a passagem da água subterrânea para os canais de escoamento garantindo a disponibilidade de água para toda a microbacia, sendo suas características resultado da infiltração da água pela área de contribuição da microbacia. Assim, as técnicas de conservação do solo pelo manejo integrado são de extrema importância, combatendo a erosão e melhorando as características físicas, principalmente aquelas relacionadas à capacidade de infiltração de água, pois determinam a disponibilidade regular e a qualidade da água ao longo do tempo (SÃO PAULO, 2009).

Os resultados do manejo integrado nesta unidade são mais rápidos e claros, pois a maior participação da comunidade e governo favorece a execução de ações e o planejamento ambiental efetivo. É o que evidencia BRAGAGNOLO (2010) com os resultados de projetos da Emater de manejo integrado de microbacias nas regiões Sul e Sudeste do país com apoio do Banco Mundial e FAO. Trabalhando com mais 500 mil produtores em 5.500 microbacias, tais projetos mostram redução do índice de turbidez da água, no Paraná as águas monitoradas chegaram a uma redução de 49%, com conseqüente queda no custo de tratamento de água para as populações urbanas.

Aumentos de produtividade acima de 45% em Santa Catarina, com adequação de estradas e redução de manutenção das mesmas. Outro projeto como o Programa Produtor de Água, da Agência Nacional de Águas pretende recompensar financeiramente o produtor rural que contribuir com a recuperação e recomposição de áreas críticas. O objetivo é reduzir em pelo menos 50% a perda de solos nas microbacias participantes do projeto consideradas estratégicas para o país, contribuindo com a melhoria da qualidade das águas por meio de ações efetivas de conservação (SANTOS et al., 2010). Além de outros projetos, como o Programa Estadual de Microbacias Hidrográficas do Estado de São Paulo, com atuação da CATI em 966 microbacias por meio de assistência técnica a mais de 70 mil produtores rurais distribuídos em 514 municípios (CATI, 2007).

Assim, os estudos do processo erosivo dentro das microbacias possibilitam sua melhor compreensão, pois envolvem além dos processos locais, as áreas de transferência do material erodido (MINELLA et al., 2010). A caracterização da microbacia neste aspecto é essencial, pois fornece informações e suporte para o planejamento adaptado e integrado ao sistema local e proporciona um gerenciamento otimizado dos recursos (CAPECHE, et al., 2008).

### ***2.1.2. Perda de solo por erosão***

O primeiro passo da caracterização da microbacia é conhecer os tipos de solos presentes de modo a facilitar o entendimento de suas características e propriedades, orientando assim o planejamento e o manejo de cada unidade de solo (FERRAZ et al., 2008). Tais unidades são agrupadas de acordo com suas semelhanças como cor, estrutura, porosidade e textura, sendo esta uma das mais importantes características na determinação do uso do solo por condicionar as demais e influenciar diretamente no desenvolvimento das raízes das plantas (TOY et al., 2002, BERTONI & LOMBARDI NETO, 2008).

A textura, que consiste na proporção relativa das frações granulométricas existentes na fase sólida em um solo, é composta de três frações, areia, silte e argila,

que possuem tamanhos variáveis de acordo com o sistema de classificação. As classificações granulométricas adotadas no Brasil são o sistema desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), o da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS) e o Sistema Internacional (ISSS). Os sistemas USDA e SBCS incluem a areia e suas subdivisões entre 2 e 0,05 mm de diâmetro e o silte entre 0,05 e 0,002mm; o ISSS determina para a areia de 2 a 0,02 mm e silte de 0,02 a 0,002 mm de diâmetro; e para todos os sistemas a argila está abaixo de 0,002 mm de diâmetro (FERREIRA, 2010).

A estabilidade da textura do solo a torna indispensável como item na descrição, identificação e classificação de solos (FERREIRA, 2010). Além disso, ela atua intensamente na erosão, determinando maior ou menor grau de perda de acordo com a agregação das partículas, infiltração e capacidade de retenção de água, desprendimento de sedimentos, entre outros (TOY et al., 2002). Em associação com os teores de matéria orgânica e composição mineralógica, a textura determina o comportamento hídrico do solo tal como macro e microporosidade, superfície específica, densidades do solo e partículas e por consequência as propriedades de aeração, retenção de água, infiltração e drenagem, etc. (FERRAZ et al., 2008). Ao longo do perfil a textura apresenta maior variação, havendo diferenças também quanto à posição ocupada na paisagem, no entanto, ao longo do tempo é a característica que menos sofre alterações, o que ocorre somente com os fenômenos erosivos e interferência antrópica (FERRAZ et al., 2008).

De forma geral, o comportamento dos solos pode ser previsto e manejado de acordo com a sua textura, onde os solos arenosos podem absorver grande quantidade de chuva, sendo bem drenados retém pouca água e são mais leves no preparo para cultivo (BLANCO & LAL, 2010). No entanto, devido à baixa coesão entre suas partículas, sua suscetibilidade a erosão aumenta ainda mais em terrenos de topografia mais movimentada, podendo perder grande quantidade de massa e incrementar os sedimentos da enxurrada (HAAN et al., 1994). Já solos argilosos possuem propriedades contrárias, sendo mais resistente a erosão devido à maior retenção de água e menor macroporosidade e maior coesão entre as partículas (TOY et al., 2002, BERTONI &

LOMBARDI NETO, 2008; FERRAZ et al., 2008). Solos com maior teor de silte apresentam certa instabilidade estrutural e problemas com o selamento superficial (AMARO FILHO et al., 2008), dispondo a camada superficial do solo em forma de lâmina, tornando-o pouco permeável e dificultando a emergência de plântulas (FERRAZ et al., 2008). Segundo WISCHMEIER & SMITH (1978), a areia muito fina, de 0,1 a 0,05 mm, é comparada em erodibilidade ao silte e a maior acurácia dos resultados de perda de solo é atingida quando as proporções das frações são analisadas de forma combinada no solo.

A fase sólida do solo ainda compreende a matéria orgânica que atua em conjunto com a textura nas suas propriedades (TOY et al., 2002). A entrada de material orgânico no solo está relacionada com o aporte de resíduos de biomassa radicular e aérea das plantas e liberação de exsudados e ação da biota do solo (SILVA & MENDONÇA, 2007). Seu conteúdo depende das condições ambientais e climáticas, aeração e drenagem, mineralogia, entre outros (FERRAZ et al., 2008). Atuação da matéria orgânica envolve também a química do solo, com atributos como poder tampão, capacidade de troca de cátions e complexação de metais, e a física com atributos como a retenção de água, com a matéria orgânica retendo até 20 vezes sua massa em água (SILVA & MENDONÇA, 2007). Além da agregação de partículas, influenciando conforme a granulometria e mineralogia na estabilidade dos agregados e estruturação do solo (FERRAZ et al., 2008), o que contribui na redução de perda de solo (CAPECHE et al., 2008).

Dessa forma, de acordo com as características e propriedades o solo está sujeito a perda de massa oriunda do desgaste e conseqüente modificação da superfície das áreas ocasionada pela erosão (TOY et al., 2002). A perda de solo por erosão se manifesta pela atuação de dois agentes: o vento e a água. O primeiro atua na desagregação de rochas, pela abrasão que resulta do transporte de partículas, e deposição do material. O segundo é a principal causa de perda de solo do Brasil, oriunda do impacto da gota de chuva sobre a superfície descoberta, denominada erosão hídrica (FERRAZ et al., 2008).



O processo de erosão hídrica se baseia na desagregação, transporte e deposição das partículas do solo (TOY et al., 2002). Fortemente influenciado pela agregação, o impacto da gota de chuva pode ocasionar com o desprendimento de partículas o selamento superficial dos primeiros centímetros do solo, a redução da infiltração da água e o incremento do escoamento superficial (CAPECHE et al., 2008). O transporte é decorrente do escoamento superficial, ocasionado pela água não infiltrada no solo, que leva as partículas em volume variado, gerando os três principais tipos de erosão: laminar, sulcos e voçorocas (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2008). A deposição das partículas é o processo final e consiste no acúmulo de sedimentos nos canais de escoamento levando ao assoreamento dos cursos de água (CAPECHE et al., 2008).

A erosão laminar é a remoção progressiva dos horizontes superficiais do solo devido ao escoamento difuso das águas das chuvas (ALMEIDA FILHO, 2010). Aqui ocorre principalmente o transporte das partículas mais finas, isto é, as mais ativas quimicamente, sendo considerada a mais perigosa por ser de difícil percepção e pode variar o volume de material transportado de acordo com sua granulometria e presença de vegetação ou obstáculos (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2008). A detecção e mitigação podem prevenir seu progresso para formas mais críticas de erosão (FERRAZ et al., 2008). A erosão em sulcos decorre das irregularidades do terreno, que concentram a água em determinados pontos, aumentando seu volume e velocidade, o que acarreta perdas localizadas e mais visíveis. Tal ocorrência é comum com as chuvas de maior intensidade e em áreas de maior declive e geralmente podem ser desfeitas com o preparo do solo (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2008). As voçorocas são os casos extremos de perda de solo, podendo ocorrer pela progressão do processo erosivo (laminar e sulcos) ou pela ocorrência de um evento extremo diretamente a partir de um ponto de maior concentração de águas (ALMEIDA FILHO, 2010), sendo de controle extremamente difícil (CAPECHE et al., 2008).

A quantificação dos processos erosivos varia de acordo com o tipo de erosão, condições ambientais e práticas de manejo (CAPECHE et al., 2008). Para facilitar o processo de análise, as determinações de experimentos em campo visam repetir os

resultados da dinâmica natural em ambiente controlado, porém a complexidade dos fatores envolvidos pode não ser representada de forma isolada e suas inter-relações perdidas no processo (BERTONI et al., 1975b). Logo, a perda por erosão pode ser determinada por diferentes métodos, classificados por BERTONI et al., (1975b) como diretos e indiretos. No direto tem-se coleta, medição e análise de material erodido, verificando as perdas por impacto da gota de chuva, por arrastamento, esta a mais influente no estudo da conservação, e perdas por percolação. No indireto, a erosão é estudada por meio dos vestígios nos solos ou diferenças entre solos não erodidos, sendo de modo geral menos precisos que a medição direta. Estes são processos auxiliares no estudo da erosão, englobando avaliação de mudanças no relevo, por meio de exame dos graus de erosão, levantamento topográfico e monitoramento periódico, e alterações na constituição do solo, envolvendo análises físicas e químicas.

Outros métodos indiretos também visam estimar o processo erosivo quantitativamente por meio de técnicas cada vez mais avançadas que envolvem sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas e tecnologias de banco de dados e modelagem, trazendo subsídios não somente para o manejo conservacionista, mas gerando informações e dados que podem ser utilizados para contribuir com ferramentas de análise cada vez mais eficientes na conservação (SANTOS-BREFIN, 2009).

### ***2.1.3. Modelos para predição de perda de solo***

A demanda por informações relacionadas à perda de solo tem aumentado devido ao maior impacto que esta degradação possui nas atividades econômicas e ambientais e a modelagem matemática de dados entra neste contexto como uma ferramenta cada vez mais refinada e precisa na descrição e estimativa dos processos erosivos das microbacias (MINELLA et al., 2010). A modelagem de dados consiste na representação de processos, como a perda de sedimentos ou dinâmica de escoamento e transporte da água na superfície, por relações matemáticas que permitem explorar as implicações

nos sistemas reais e prever respostas a situações diversas para melhor compreender o processo estudado (PAIVA, 2008).

Atualmente, diversos modelos para estimativa de perda de solo estão disponíveis, cada um exigindo dados específicos e considerando processos característicos, o que gera diferentes graus de complexidade e respostas para os cenários. MINELLA et al. (2010) afirmam que o objetivo do uso deve determinar a escolha do modelo ideal para cada estudo, assim como as características do local e a disponibilidade de dados, e divide os diversos modelos, dentre as várias classificações usuais, de acordo com sua base conceitual: modelos empíricos, modelos conceituais e modelos de base física.

Os modelos empíricos têm sua base nas relações estatísticas entre as variáveis consideradas de maior importância em parcelas experimentais, estabelecendo-se assim as relações entre os fatores controladores e variáveis de interesse. Nestes modelos, o número de variáveis é relativamente menor, realizando boas estimativas e tornando-se muito úteis na identificação de áreas erosivamente críticas. Um exemplo é a *Universal Soil Loss Equation* (USLE) ou Equação Universal da Perda de Solo (EUPS), desenvolvida pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, com o objetivo de estimar a perda de solo em diversas combinações de condições específicas envolvendo tipo de solo, precipitação, topografia, práticas de manejo e culturas (WISCHMEIER & SMITH, 1978). Sua aplicação foi amplamente difundida, e gerou novas equações com pequenos ajustes como a *Modified Universal Soil Loss Equation* (MUSLE - Equação Universal da Perda de Solo Modificada) e a *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE - Equação Universal da Perda de Solo Revisada) (WISCHMEIER et al., 1978, citados por PAIVA, 2008).

Os modelos conceituais incorporam em sua estrutura mecanismos de geração e transferência de sedimentos. Seus parâmetros são obtidos por medição e a caracterização do seu desempenho dinâmico oferece uma descrição geral dos processos da bacia. Os modelos de base física resultam das relações de equações físicas de processos erosivos e hidrológicos, exigindo maior entrada de dados, o que a

torna inviável em áreas extensas ou com baixo nível de detalhamento de informações (MINELLA et al., 2010).

### **2.1.3.1. Equação Universal da Perda de Solo**

A Equação Universal da Perda de solo (EUPS – *Universal Soil Loss Equation*) foi desenvolvida a partir de 10 mil dados de 49 áreas onde o escoamento superficial de parcelas e perda de solo foram analisados pelo centro estatístico criado em 1954 pela *Science and Education Administration*, antigo *Agricultural Research Service*, em cooperação com a *Purdue University*. O estudo trouxe melhoras na acurácia e aplicabilidade do modelo como: índice de erosão hídrica a partir de dados de precipitação local; fator quantitativo de erodibilidade do solo, avaliado diretamente de dados das propriedades do solo e independente da topografia e da precipitação; método de cultivo e avaliação dos sistemas de manejo em relação às condições climáticas locais e contabilização para efeitos de interações entre sistema de cultivo, nível de produtividade, práticas de manejo e gestão de resíduos, o que ofereceu uma melhor concepção na avaliação e apoio às práticas de controle a erosão (WISCHMEIER & SMITH, 1978). A EUPS é um modelo para predizer em longo prazo a perda de solo no escoamento superficial em áreas com cultivo e sistema de manejo específicos e também é aplicável em áreas não agrícolas como construções. Com a seleção apropriada dos valores de cada fator, a equação resultará na média de perda de solo em um determinado período da rotação de cultura, sendo menos acurada em eventos climáticos extremos que nas condições médias do ano (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

A equação de perda de solo, segundo WISCHMEIER & SMITH (1978) é dada por:

$$A = R K L S C P$$

Onde:

A = perda de solo calculada por unidade de área, expressa em  $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ .

R = erosividade da chuva, em  $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ .

K = fator de erodibilidade do solo, em  $\text{Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ .

L = fator de comprimento de rampa, em m.

S = fator de declividade, em %.

C = fator de cobertura do solo.

P = fator de práticas conservacionistas

Nas condições de determinação da erodibilidade em parcela, todos os outros fatores mantidos constantes, L, S, C e P, assumem valor igual a 1 e o fator K se iguala a  $A/R$ , passando a determinar o coeficiente angular da curva de regressão das perdas de solo em função do fator erosividade da chuva (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

No Brasil, BERTONI et al. (1975a) desenvolveram trabalhos na década de 1970 com a EUPS a partir de dados experimentais obtidos para o Estado de São Paulo. Outros autores como LOMBARDI NETO & PASTANA (1972), DENARDIN (1990), LOMBARDI NETO & MOLDENHAUER (1992), SALES (1998) e LAGROTTI (2000) contribuíram para a adaptação da equação às características tropicais por meio de ajustes nos fatores da equação.

### **2.1.3.2. Fatores da perda de solo**

*Erosividade da chuva* – De forma geral, a presença de água no terreno, por meio da chuva, é exigida para o processo de erosão, uma vez que a erosão eólica é pouco expressiva no Brasil, sendo duração, intensidade e distribuição das chuvas as maiores influências na amplitude e no volume da perda total por erosão (LOMBARDI NETO & PASTANA, 1972). A erosividade é diretamente proporcional a relação entre energia cinética da chuva, decorrente da movimentação, e intensidade máxima em 30 minutos, calculados pelos diagramas de pluviógrafos, onde a soma desta relação resulta na quantificação da erosividade da chuva naquele período (WISCHMEIER & SMITH,

1978). A soma da média mensal para precipitações acima de 10 mm desta relação resulta no fator R anual (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2008).

No entanto, o trabalho de LOMBARDI NETO & MOLDENHAUER (1992), realizado em 1980, relacionou o índice de erosão com fatores climáticos de fácil medição e que não necessitam de registros de intensidade de chuva. Os autores encontram alto coeficiente de correlação entre a média mensal do índice de erosão e a média mensal do coeficiente de chuva, o que simplifica o método de cálculo do índice de erosão. A partir da equação obtida, LOMBARDI NETO et al. (1980), determinaram a erosividade das chuvas para 115 localidades do estado de São Paulo, que por meio de mapas de isoerodentes, linhas que ligam pontos de mesmo potenciais de erosão, podem ser aplicados para qualquer área do Estado de São Paulo.

A equação também foi utilizada como base para o desenvolvimento, a partir de redes neurais artificiais, de um *software* para obtenção do valor da erosividade da chuva para qualquer localidade do Estado de São Paulo denominado NetErosividade SP (MOREIRA et al., 2006).

*Fator erodibilidade do solo* – Este fator reflete as propriedades inerentes do solo, resultado das características físicas de textura, estrutura, agregação e porosidade (BLANCO & LAL, 2010). Dentre estas, principalmente as que afetam a velocidade de infiltração, permeabilidade e capacidade de armazenamento, resistência a forças de dispersão, abrasão e transporte pelo escoamento superficial (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2008), atuando na EUPS como a integração dos impactos da chuva e do escoamento sobre a perda para um dado tipo de solo (HAAN et al., 1994). Experimentações em campo e análises laboratoriais conseguiram uma aproximação de índices de erodibilidade, porém de forma pouco prática e custosa, pois incluíam a determinação de inúmeras variáveis de difícil obtenção. Além disso, os valores determinados internacionalmente não se aplicavam às condições dos solos brasileiros (DENARDIN, 1990). Dessa forma, experimentações visando à medição direta e o desenvolvimento de modelos matemáticos foram realizadas gerando valores

determinados para alguns tipos de solos do país (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2008).

Visando correlacionar as perdas de solos com algumas de suas propriedades de fácil determinação para obtenção de um índice de erodibilidade, LOMBARDI NETO & BERTONI (1975) estudaram dois agrupamentos de solos do Estado de São Paulo. Utilizando porcentagem de dispersão de argila, argila dispersa e umidade equivalente e a razão entre a relação de dispersão e a relação de argila dispersa e umidade equivalente, obtiveram as quantificações iniciais para cada agrupamento e verificaram que em solos com B textural há maior suscetibilidade a erosão que solos com B latossólico, além de observarem que para solos arenosos não havia correlação. Com o mesmo objetivo, DENARDIN (1990), utilizou parâmetros envolvendo relações granulométricas e tamanho de partículas, permeabilidade do solo e matéria orgânica, estabelecendo modelos ajustados com dados exclusivos das condições brasileiras e em conjunto com dados dos Estados Unidos, ambos com alto coeficiente de ajuste e que melhoraram a predição do fator erodibilidade para os solos do Brasil. Estudos posteriores sugerem que os modelos de predição devem ser determinados para cada classe específica de solos (SILVA et al., 1999; SILVA et al., 2000).

*Fator topográfico* – O comprimento de rampa e o grau de declive determinam os efeitos do relevo na erosão de solo (HAAN et al., 1994). O comprimento de rampa é definido como a distância do ponto de origem do escoamento superficial até o ponto onde há a deposição de sedimentos ou o ponto de entrada da água no canal de drenagem (WISCHMEIER & SMITH, 1978). Seus efeitos são inversamente proporcionais à sua distância, isto é, quanto menor o comprimento de rampa, em declividade mais acentuada, maior sua contribuição no processo erosivo, causando o maior acúmulo de escoamento nas encostas e aumentando a capacidade de desprendimento e transporte. Observa-se ainda maior influência dos fatores de manejo, práticas conservacionistas e principalmente precipitação, onde os efeitos da inclinação diminuem em períodos extremamente úmidos (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

As variações na paisagem como setores côncavos e convexos são considerados como uma unidade média, tendo, portanto valores subestimados para um e superestimados para outro. BERTONI & LOMBARDI NETO (2008) afirmam que quando a rampa é mais declivosa no final, o gradiente deve ser usado na reprodução do fator topográfico e no caso de declives côncavos, onde a deposição dos sedimentos ocorre na parte inferior, o grau de declive e o comprimento utilizado devem ser da parte superior, a partir do ponto de deposição.

*Fator cobertura do solo* – A cobertura do solo oferece proteção contra o processo erosivo diminuindo as perdas, sendo esta redução consequência de várias combinações como sequência da cultura e práticas de manejo, estágio de crescimento e desenvolvimento do plantio e período do ano, que caracteriza a época de chuvas (BERTONI et al., 1975a). Além disso, a massa de raízes resultantes no solo, os resíduos incorporados, a rugosidade da superfície e umidade interferem no fator de cobertura do solo, sendo classificados segundo HAAN et al. (1994) em *efeitos de cobertura*, onde a vegetação intercepta a gota da chuva, absorvendo sua energia de impacto e proporcionando o fluxo em gotejamento da água pela superfície, proveniente do escoamento pela estrutura de sustentação das plantas; *rugosidade*, com o impedimento da ação direta da chuva no solo, reduzindo as forças de cisalhamento e velocidade da enxurrada, resultado do escoamento superficial; e *efeitos de sub-superfície*, onde a atuação da massa radicular e a incorporação de resíduos, que resultam na reestruturação do solo, promovem a redução da compactação e aumento da umidade do solo, auxiliando nos processos de infiltração e armazenamento de água, contudo, tais efeitos são difíceis de quantificar devido às mudanças significativas durante o crescimento das plantas e as interações dos fatores ao longo do período de cultivo.

WISCHMEIER & SMITH (1978) ressaltam ainda que os efeitos do fator de cobertura do solo são difíceis de avaliar de forma independente dos efeitos das práticas de conservação devido à influência de suas importantes inter-relações, pois o tipo de cultura, período de rotação e resíduos vegetais são consequências diretas do manejo e



das práticas conservacionistas realizadas no campo. A proteção oferecida pela vegetação durante o período de cultivo é gradual, logo BERTONI & LOMBARDI NETO (2008) para fins práticos dividiram o ano agrícola, onde os efeitos de cobertura e manejo puderam ser considerados aproximadamente uniformes em cinco períodos, que vão do preparo do solo, plantio, estabelecimento da cultura, crescimento e maturação a geração de resíduo. Durante estes períodos a perda de solo é determinada em relação ao tipo de cultura e de acordo com seus níveis de produtividade, fertilidade do solo, quantidades de resíduos culturais, entre outros, que combinadas com a erosividade do período resultam nos valores de cada situação específica de plantio.

*Fator práticas conservacionistas* – Este fator é a relação entre a perda de solo esperada em um determinado sistema de manejo com a perda correspondente em um plantio no sentido do declive (WISCHMEIER & SMITH, 1978). Além do controle da erosão, o fator pode ser empregado para melhorar as condições físicas, químicas e biológicas dos solos (SALES, 1998). São consideradas práticas conservacionistas todos os métodos que protegem o solo contra o impacto das gotas de chuva, aumentam a infiltração de água, melhoram a estrutura do solo e reduzem a velocidade do escoamento superficial, tais como preparo do solo em contorno, plantio em faixas, terraceamento e alternância de capinas (BERTONI et al., 1975a; BERTONI & LOMABARDI NETO, 2008). WISCHMEIER & SMITH (1978) consideram ainda rotação de culturas, fertilização e aumento da quantidade de resíduos da cultura anterior, as quais são resultados diretos do fator C, isto é, cobertura do solo. No Brasil, BERTONI et al. (1975a) determinaram valores para o fator P em culturas anuais em relação à tolerância de perda de solo, considerando como controle efetivo de erosão perdas de solo menores que a tolerância determinada para o tipo de solo, sendo para o estado de São Paulo de 4,5 a 15 t ha ano<sup>-1</sup>, determinada de forma coletiva onde fatores físicos e econômicos foram considerados. As restrições do fator P quanto ao uso são em relação à inclinação do terreno, aumentando com a declividade, onde a eficiência do comprimento máximo da rampa para plantios em contorno é conseqüência da redução

do armazenamento superficial e da maior tendência para formação de sulcos em áreas inclinadas (HAAN et al., 1994).

Muitos estudos consideram a EUPS e seus fatores como uma ferramenta de boa aplicabilidade e estimativa, fornecendo parâmetros para o planejamento do uso e ocupação do solo. BUENO & STEIN (2004) determinaram a expectativa de erosão baseada nos fatores da EUPS e concluíram que a maior parte da área estudada apresentava ocupação adequada em relação à tolerância de perda de solo. LAGROTTI (2000) elaborou uma proposta de planejamento agroambiental municipal que incluía a EUPS e seus fatores na determinação do risco ambiental, observando áreas de ocupação inadequada com alto risco erosivo. Da mesma forma, MENDONÇA (2005), com a estimativa da EUPS e seus fatores concluiu que o uso e ocupação da microbacia estudada eram adequados e o risco erosivo local era baixo. FARINASSO et al. (2006) determinaram a perda de solo pela EUPS, verificando sua dependência espacial por geoestatística, e observaram que as áreas críticas estavam associadas a maiores declividades, solos rasos e uso e manejo inadequados.

## **2.2. Análise Estatística dos Resultados**

### ***2.2.1. Análise Multivariada***

A natureza é multivariada, assim como grande parte dos sistemas tecnológicos e de geração de informação das várias ciências, onde cada fenômeno estudado geralmente depende de muitos fatores. Dessa forma, a análise multivariada consiste em um conjunto de métodos utilizados para analisar múltiplas medições realizadas nas unidades amostrais (ESBENSEN, 2002). Historicamente, a maior parte das aplicações de técnicas de análise multivariada ocorreu no campo das ciências comportamentais e biológicas, no entanto, o interesse em métodos multivariados tem crescido em vários outros campos de pesquisa devido ao crescente desenvolvimento e aperfeiçoamento da informática, que por meio do grande poder computacional existente, tornaram possível

a execução de cálculos cada vez mais complexos, realizando diversas análises de forma rápida e fácil e incentivando a aplicação dos métodos analíticos multivariados (HAIR et al., 2005).

Na análise multivariada as variáveis devem ser correlacionadas. Devido à complexidade existente na estrutura multivariada contida nos dados, há a necessidade de estudar a estrutura subjacente contida nos dados para extrair informações relevantes e compreensíveis. Com este objetivo, as abordagens multivariadas procuram projetar em planos de poucas dimensões a variabilidade original de modo a expressar o resultado em conjunto de dimensões reduzidas por meio de técnicas exploratórias.

A análise multivariada é aplicada principalmente em três situações principais: descrição dos dados (estrutura de modelagem exploratória de dados), discriminação e classificação, regressão e predição (ESBENSEN, 2002). A primeira situação procura caracterizar os dados, oferecendo informações úteis e exibindo estruturas intrínsecas observáveis visualmente (gráficos). Neste ponto, medidas básicas como variância, que expressa a medida da dispersão dos valores das variáveis, e covariância, medida de associação linear entre duas variáveis, são essenciais, bem como as correlações, relação linear entre duas variáveis, e os modelos de regressão funcional. A Análise de Componentes Principais também é aplicada nesta situação, sendo um método frequentemente utilizado para descrição de dados e modelagem de estrutura exploratória de matrizes (HAIR et al., 2005). Uma segunda situação, discriminação e classificação, busca separar as amostras em grupos distinguindo os mais relevantes para o modelo com a divisão de uma matriz de dados em dois ou mais grupos, aqui também se pode utilizar a Análise de Componentes Principais como auxílio no tratamento de dados. E a última situação, regressão e predição, como um método para relacionar conjuntos de variáveis entre si, que corresponde à determinação do comportamento de uma variável dependente em função de outras variáveis independentes (TIMM, 2002) escolhidas satisfatoriamente e constituídos por mais de três variáveis (ESBENSEN, 2002), sendo amplamente utilizado em vários domínios científicos e tecnológicos.

### **2.2.1.3. Análise de componentes principais**

Pearson descreveu o conceito de Análise de Componentes Principais (ACP) no início do século XX, seguido de Hotteling na década de 1930, porém alguns delineamentos da ACP foram realizados ainda no século anterior de forma independente por outros pesquisadores (TIMM, 2002). JOLLIFFE (2002) comenta alguns aspectos históricos do desenvolvimento desta ferramenta de análise, como a afirmação de Pearson, que 50 anos antes do uso generalizado de computadores já garantia a aplicabilidade da análise em problemas numéricos e mesmo admitindo certo grau de dificuldade, assegurava a viabilidade de cálculos com quatro ou mais variáveis. Hotteling que, motivado pela possibilidade de haver um conjunto menor fundamental das variáveis independentes que determinavam os valores das variáveis originais, se aprofundou na pesquisa e chamou de “componentes” estas novas variáveis, batizando a ferramenta de “Método dos Componentes Principais”. Posteriormente outros pesquisadores aperfeiçoaram o método e as notações para a forma comumente utilizada.

A idéia central da análise de componentes principais, como preconizada por Hotteling, é reduzir as dimensões dos conjuntos de dados de um maior número de variáveis inter-relacionadas, mantendo tanto quanto possível a variação presente nos dados (JOLLIFFE, 2002). Isto se dá pela combinação linear das variáveis originais, gerando novas variáveis não correlacionadas entre si, chamadas componentes principais (MINGOTI, 2007), e que estão ordenadas de modo que as primeiras retenham a maior parte da variação dos dados originais (JOLLIFFE, 2002).

A análise de componentes principais envolve a decomposição da matriz dos dados originais em estrutura e ruído, transformando as variáveis em um sistema de coordenadas mais relevantes e reduzindo sua dimensionalidade, utilizando apenas os primeiros componentes principais que refletem a estrutura dos dados (ESBENSEN, 2002). Os componentes principais são usados para apontar e interpretar as dependências existentes entre as variáveis e examinar as relações que possam ocorrer

entre elas, podendo ainda ser utilizados para estabilizar as estimativas, avaliar a normalidade multivariada e detectar a presença de valores discrepantes (TIMM, 2002).

A interpretação é um item essencial na análise de dados de solos, principalmente quanto à qualidade, uma vez que sua avaliação é feita baseada em um conjunto de indicadores, os quais podem incluir características físicas, químicas e biológicas. O uso de métodos integrados que permitam a análise conjunta dos indicadores e de maior facilidade na interpretação dos resultados é de extrema importância para identificar mudanças qualitativas no solo resultantes dos processos de intervenção (CHAER, 2008). Atualmente a ACP tem sido amplamente utilizada, uma vez que permite avaliar estruturas complexas contidas em banco de dados condensando informações m-dimensionais em informações bi ou tridimensionais.

Utilizando a ACP, SALCHOW & LAW (2001) analisaram a relação da produtividade de milho e soja com as características de pedoformas e erosão que detectou o poder contrastante da produtividade com o aumento dos processos erosivos, resultado que não pôde ser visto somente por comparações de médias. VALLADARES et al. (2008), em estudos de Organossolos e solos afins utilizou a ACP na discriminação de variáveis específicas gerando um resultado satisfatório na classificação dos grupos de classes desses solos. MELÉM JUNIOR et al. (2008) da mesma forma utilizou a ACP para discriminar solos por meio de seus atributos químicos, também gerando resultados satisfatórios no agrupamento de classes de solos semelhantes. LIMA et al. (2009) em estudo de sobre fertilidade em áreas de café, observou por meio da ACP que os atributos de maior influência na determinação das zonas de manejo foram os relacionados à acidez com resultados satisfatórios na interpretação da fertilidade do solo em análise conjunta com a geoestatística.

#### ***2.2.1.4. Análise de agrupamento***

Na análise de agrupamento o objetivo é encontrar padrões no conjunto de dados de forma a agrupá-los de acordo com as semelhanças entre amostras tal que exista o máximo de distinção entre os grupos (JOLLIFFE, 2002). A análise de agrupamento

também pode ser usada para classificação e geração de padrões de reconhecimento, sendo aplicada em diversas áreas como saúde, sociologia, economia, geologia, sensoriamento remoto, etc. (RENCHEER, 2002).

O agrupamento de dados é feito por diversas técnicas que diferenciam por medidas de semelhança (similaridade ou dissimilaridade e por formas diversas de ligar os grupos). As técnicas de agrupamento são divididas em dois tipos: análise de agrupamento por método hierárquico e análise de agrupamento por método não hierárquico. A primeira é aplicada quando não se tem informação a priori do número de grupos contido na estrutura de grupos dos dados e a segunda é aplicada quando esse número é conhecido.

No processamento das análises de agrupamento por método hierárquico deve-se apontar uma medida para mensurar a semelhança entre duas amostras. Essas medidas podem ser de similaridade ou dissimilaridade. As medidas de similaridade são utilizadas para dados conferindo “ausência” ou “presença”. As medidas de dissimilaridade são utilizadas quando as amostras são separadas utilizando variáveis numéricas e dentre as mais utilizadas está a distância euclidiana simples.

Finalmente deve-se escolher um método de ligação dos grupos, em que se destaca o método de Ward, onde a estrutura é apresentada em um gráfico denominado dendrograma.

No processamento de análise de agrupamento por método não hierárquico é utilizado o algoritmo k-médias (*k-means*). Este método cria k-vetores utilizando três procedimentos para gerar valores iniciais dos centróides. Neste estudo foi utilizado o procedimento da referência paralela para iniciar a classificação das amostras de solo nos k-grupos, onde k foi adotado utilizando a estrutura definida no dendrograma da análise de agrupamento pelo método hierárquico. A cada passo de classificação os grupos dão reestruturados até a entrada do ultimo registro.

Alguns trabalhos utilizaram a análise de agrupamento, como SILVA (2009), que classificou, além de outras variáveis, os atributos do solo em grupos homogêneos, indicando ser um método eficiente na formação de grupos. Da mesma forma, BUENO

(2001), encontrou resultados satisfatórios no agrupamento de variáveis de solo, produtividade de cultura e componentes principais.

### 2.3. Geoestatística

A caracterização da dispersão espacial e temporal das variáveis que definem de forma quantitativa e qualitativa os recursos naturais é o objetivo da geoestatística, juntamente com a avaliação das medidas de incerteza (SOARES, 2006). Inicialmente desenvolvida para estudos de jazidas minerais, tratava-se de uma técnica empírica para estimar reservas minerais criada pelo engenheiro de minas Daniel Krige e o estatístico H.S. Sichel na África do Sul. Posteriormente, no início dos anos de 1960, foi estudada por Matheron que a denominou *Geoestatística*, isto é, o estudo das *variáveis regionalizadas* (variáveis com *dependência espacial*), e aperfeiçoou a ferramenta divulgando suas pesquisas a partir de então (LANDIM, 2006). A aplicação da geoestatística atualmente passa por diversas áreas como engenharia de minas, sociologia, saúde, ciências agrárias, entre outras (SOARES, 2006; CÂMARA et al., 2004; CAMARGO et al., 2004) e sua utilização auxilia no planejamento e na tomada de decisão dentro de cada uma dessas áreas por conter um conjunto de modelos dinâmicos desenvolvidos para a solução de problemas da caracterização de fenômenos espaciais (SOARES, 2006).

O principal conceito da análise geoestatística é a *dependência espacial*, isto é, a relação de continuidade das variáveis aleatórias georreferenciadas que dependente da distância, e é expresso pela *autocorrelação espacial*. Essa dependência pode ser medida por diversos indicadores com base na comparação do valor da amostra e seus vizinhos (CÂMARA et al., 2004). O indicador utilizado pela geoestatística é expresso por (VIEIRA, 2000):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Onde  $N(h)$  é o número de pares de observações  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i + h)$  separados por uma distância  $h$ . O gráfico de  $\gamma(h)$  versus os valores correspondentes de  $h$  é chamado *semivariograma*. Valores expressivos do índice de autocorrelação espacial são evidências de dependência espacial e indicam que a independência das amostras postulada pela estatística clássica não é válida e que os modelos de inferência para estes casos devem considerar a distância em suas estimativas (CÂMARA et al., 2004).

Contudo, para a aplicação do semivariograma, há a necessidade de satisfazer a condição de *estacionariedade* da variável, isto é, seus momentos estatísticos devem ser os mesmos para qualquer distância  $h$ , que para a geoestatística deve ser de *segunda ordem* (VIEIRA, 2000). Isso ocorre quando o valor esperado (E), ou média, é constante e a covariância (C) depende do vetor de distância relativa  $h$  entre todos os pares de pontos estudado, isto é, sem tendência, onde (CÂMARA et al., 2004):

$$E \{Z(u)\} = m \quad e$$

$$C(h) = E \{Z(u) Z(u + h)\} - E \{Z(u)\} E \{Z(u + h)\}$$

Onde  $Z(u)$  são realizações de uma função aleatória  $\{Z(u), u \in A\}$  para cada ponto  $u$  de uma região contínua  $A$ . O vetor de distância  $h$  compreende dois elementos, sendo eles distância e direção, e se a covariância for dependente somente da distância, não variando com a direção, o processo é chamado de *isotrópico*, caso seja dependente também da direção, passa a ser *anisotrópico* (CÂMARA et al., 2004).

A geração de mapas que representam a realidade das variáveis estudadas é o passo final da geoestatística, contudo, requer a modelagem da variabilidade espacial que deve ser feita com base em uma das três abordagens principais (CAMARGO et al., 2004):

- *modelos determinísticos de efeitos locais*, onde cada valor é estimado com base na interpolação de valores de amostras mais próximas, sem qualquer hipótese estatística sobre a variabilidade espacial;



- *modelos determinísticos de efeitos globais*, onde há a suposição de que a variação em larga escala é predominante, sem a variabilidade local e

- *modelos estatísticos de efeitos globais e locais* ou *krigagem*, onde cada valor é estimado pela interpolação dos valores dos vizinhos por meio de um estimador estatístico, não sendo tendencioso e com a minimização dos erros inferenciais. Determina ainda pesos a diferentes amostras por meio da geração de uma matriz de covariância espacial, trata a redundância dos dados, os pontos vizinhos a serem considerados no processo e o erro associado à estimação dos valores (CAMARGO et al., 2004).

### 2.3.1. Semivariograma e krigagem

O semivariograma é a ferramenta básica de suporte para a krigagem, sendo um estimador robusto de dependência espacial (CAMARGO et al., 2004). Ele fornece a medida do grau de dependência espacial por meio de parâmetros como a distância máxima de dependência das amostras, denominada *alcance* ( $a$ ), onde o valor correspondente é o *patamar* ( $C$ ), sendo aproximadamente igual à variância dos dados, e o *efeito pepita* ( $C_0$ ), descontinuidade do semivariograma na presença de tendência nos valores, isto é, valores não captados pela distância ou erros de amostragem.  $C_1$  é a subtração do efeito pepita no patamar (LANDIM, 2006) (Figura 1).

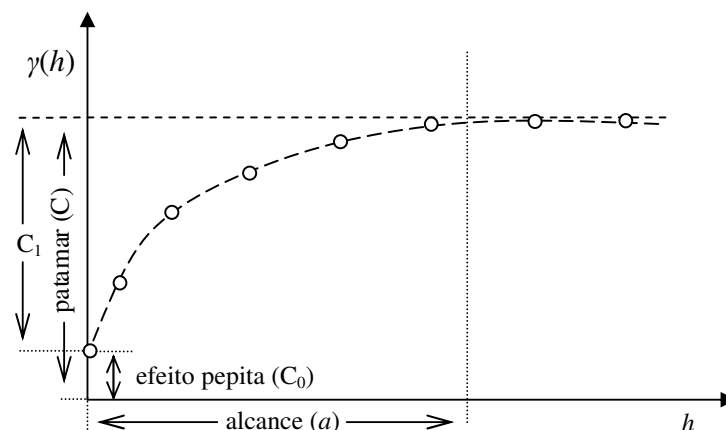


Figura 1. Parâmetros do semivariograma.

Os pontos no gráfico do semivariograma deverão ser ajustados a um modelo matemático que melhor represente a estimativa dos valores não amostrados (VIEIRA, 2000). Os modelos básicos isotrópicos são divididos entre aqueles com ou sem patamar. Os modelos que possuem patamar são transitivos, onde alguns atingem o patamar assintoticamente, tendo o valor de  $a$  arbitrariamente definido como correspondente a 95% do patamar e os modelos sem patamar, que são utilizados para modelar dados com dispersão infinita. Além dos modelos aninhados, que são combinações dos modelos simples, sendo muitas vezes necessários para explicar a variação de fenômenos decorrentes da combinação de fatores independentes de formação (CAMARGO et al., 2004).

A krigagem tem por objetivo encontrar ponderadores ótimos para que a variância do erro da estimativa dos valores não amostrados seja mínima e sem tendência (VIEIRA, 2000), isto é, a diferença entre valores estimados e observados é nula e apresenta a menor variância entre todos os estimadores não tendenciosos. A krigagem pode ser classificada de acordo com a hipótese considerada para a média e tendência como (CAMARGO et al., 2004):

- *Krigagem Simples*: considera a média constante e conhecida:  $E [ Z(u) ] = \beta_1$ ;
- *Krigagem Ordinária*: admite flutuações locais na média para os vizinhos locais, sendo esta constante localmente e desconhecida, devendo ser estimada:  $E [ Z(u) ] = \beta_1$ ;
- *Krigagem Universal ou não estacionária*: a média flutua sobre toda a área considerada, sendo determinada por um conjunto de funções básicas:  $E [ Z(u) ] = \sum_{j=1}^p \beta_j f_j$

As limitações do método estão na falta de garantia da semelhança dos parâmetros dos dados originais e o mapa da krigagem (ou de isolinhas), uma vez que o semivariograma mostra a medida do grau de dependência espacial dos valores em relação à distância, fornecendo estas informações para a krigagem para encontrar os pesos ótimos na estimativa dos valores, isto é, a variância da krigagem é independente dos valores dos pontos observados e mede apenas a configuração espacial dos dados (LANDIM, 2006).

Diversos trabalhos utilizaram a krigagem como ferramenta de análise de variabilidade espacial. SILVA et al. (2008) utilizaram a krigagem por meio da geoestatística para simular a perda de solo em uma microbacia, encontrando boa aplicabilidade na simulação e mapeamento da erosão. Da mesma forma, SOUZA et al. (2005), utilizaram a geoestatística na análise da dependência espacial dos fatores da EUPS gerando mapas por krigagem para a descrição dos padrões de distribuição dos fatores na paisagem. CAMPOS et al. (2008) observaram por meio da variabilidade espacial dos fatores da EUPS que o processo erosivo está relacionado aos ambientes geomórficos, da mesma forma SANCHEZ et al. (2009) concluíram que a pedofoma tem maior influência na variabilidade nos atributos do solo que o processo erosivo. MELLO et al. (2006) determinaram por geoestatística a variabilidade da perda de solo pela EUPS, além do Potencial Natural de Erosão e Expectativa de Erosão, encontrando maiores riscos de perda de solo para os Argissolos comparados aos Latossolos.

#### **2.4. Uso integrado da Geoestatística e Análise Multivariada**

O uso integrado da geoestatística e da análise multivariada de dados pode ser utilizado para buscar distribuições complexas na distribuição espacial em conjuntos de dados de solos sobre comportamentos e tendências que não seriam captadas nas análises efetuadas de forma independente. A análise multivariada busca condensar as informações relevantes, mostra possíveis tendências, gerando e validando hipóteses por meio das suas diversas técnicas. A geoestatística mede o grau de dependência espacial das amostras, determina o erro e analisa sua distribuição no espaço e tempo. O uso integrado dessas duas técnicas pode permitir uma interpretação conjunta das variáveis atuantes nos processos estudados.

O que pode ser observado por BUENO (2000), que analisou a variabilidade espacial de um conjunto de variáveis de solo, planta e produtividade com a aplicação da geoestatística nos componentes resultantes da análise de componentes principais e posterior análise de agrupamento, com resultados satisfatórios na formação de zonas de manejo e espacialização das variáveis. De forma semelhante, SILVA (2009) analisou

a variabilidade espacial da produtividade de áreas de café, determinando sua relação com os atributos do solo e o estado nutricional das plantas. MANZIONE et al. (2002), analisando as interações das variáveis relacionadas à acidez do solo para manejo a taxa variável utilizou a geoestatística por meio de semivariogramas cruzados em diversas escalas aplicando a análise de componentes principais para determinar a influência de cada variável na acidez, chegando à determinação de zonas de manejo. BORŮVKA et al. (2007) estudou a distribuição espacial de diversas características edafoclimáticas em relação à acidez do solo no declínio de florestas utilizando a análise de componentes principais e geoestatística, encontrando informações concisas quanto à distribuição das relações entre as características e seus efeitos nas florestas. ODLARE et al. (2005) analisou a combinação da análise de componentes principais e da geoestatística na avaliação da variação espacial do solo por refletância no infravermelho próximo, substituindo assim os dados convencionais de análises de solo por dados de espectroscopia, o que se mostrou uma ferramenta eficaz e promissora na determinação da variabilidade espacial do solo no campo.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Área de estudo

A área de estudo compreende uma área de nascentes, localizada entre as longitudes  $45^{\circ}19'50''$  e  $48^{\circ}27'26''$  W Gr, e latitudes  $21^{\circ}18'10''$  e  $21^{\circ}12'53''$ S, Datum horizontal Córrego Alegre, MG., e possui aproximadamente 800 ha. Está inserida na microbacia do Córrego do Tijuco pertence à bacia hidrográfica do Córrego Rico na Unidade de Gerenciamento do Rio Mogi Guaçu situada entre os municípios de Monte Alto e Jaboticabal, na porção centro-norte do Estado de São Paulo, região administrativa de Ribeirão Preto (Figura 2).

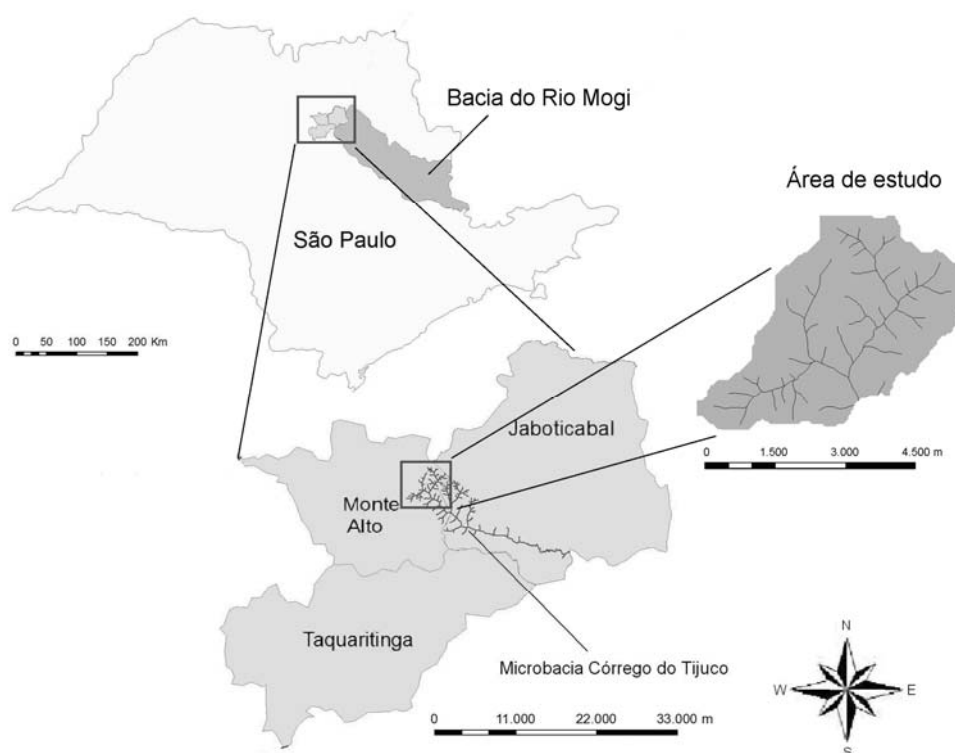


Figura 2. Localização da área de estudo.

O clima foi definido como Cwa, com inverno seco e verão chuvoso; a precipitação pluvial anual varia de 1100 a 1700 mm, e as temperaturas médias anuais são de 18°C nos meses mais frios e 22°C nos meses mais quentes.

A região possui embasamento rochoso das Formações Adamantina e Marília, pertencentes ao Grupo Bauru, constituídas por arenitos e arenitos com cimento carbonático (IPT, 1981a)

Inserida no Planalto Ocidental Paulista, a formação morfoestrutural explica relevo suave ondulado, com predomínio de colinas e morrotes, exceção os planaltos interiores de Monte Alto, formados basicamente por erosão diferencial que fez destacarem-se os maciços rochosos de forte cimentação carbonática (IPT, 1981b), com cotas variando entre 488 e 700 m, Datum vertical, Mareógrafo de Imbituba, SC. (Figura 3), onde predominam solos pertencentes à classe dos Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos, com ou sem caráter abrupto, textura arenosa/média ou média, horizonte A moderado (OLIVEIRA et al., 1999).

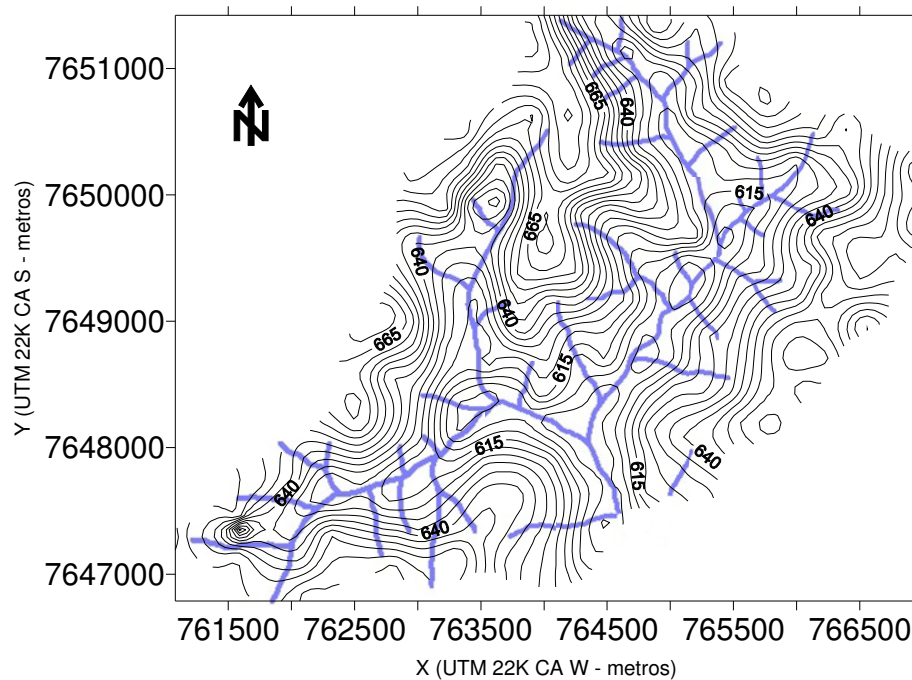


Figura 3. Mapa planialtimétrico e rede de drenagem.

O uso e ocupação do solo está dividido em atividade agrícola, principalmente cana-de-açúcar, além de pastagens, e outras como culturas perenes e hortaliças, fragmentos de vegetação residual em diferentes estágios de desenvolvimento e área urbana (Figura 4), sobre Latossolos de textura média e Argissolos de textura arenosa a média.

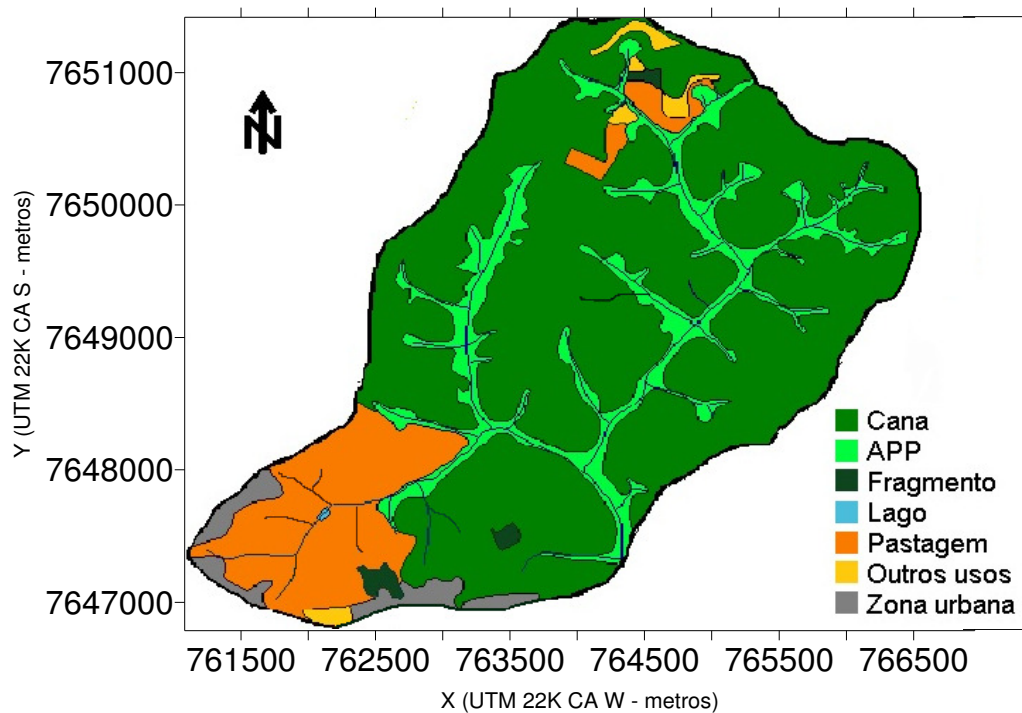


Figura 4. Mapa de uso e ocupação da área (Cana = área ocupada com cana-de-açúcar; APP = área de preservação permanente; Fragmento = vegetação remanescente).

### 3.2. Amostragem e laboratório

Com a finalidade de determinar a granulometria e estimar a erodibilidade do solo (fator K da EUPS), 239 amostras de solo georreferenciadas foram coletadas a partir de uma malha regular de 250 m na profundidade de 0 a 0,20 m, definida de forma a circundar o perímetro urbano, presente na porção sudoeste da área, e abrangendo de

forma sistemática a área total das microbacias de cabeceira da microbacia do Córrego do Tijuco (Figura 5). As amostras foram coletadas por trado holandês e acondicionadas em sacos plásticos, devidamente identificadas, secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com malha de 2 mm de abertura.

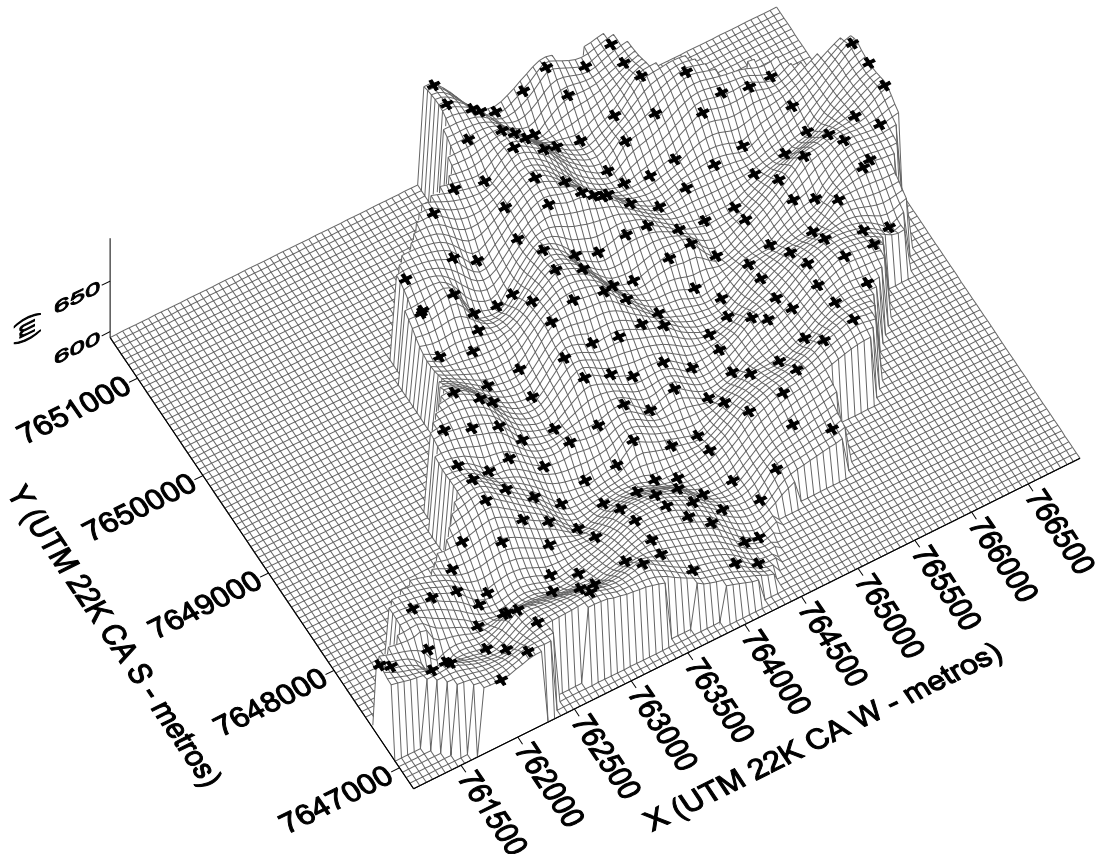


Figura 5. Esquematização amostral.

A análise granulométrica das amostras foi realizada pelo método da pipeta, por meio da dispersão de  $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ , e agitação lenta por 16 horas (DAY, 1965). As frações de partículas maiores que 0,1 mm foram separadas por peneiramento (peneira de 0,105 mm), e as frações de tamanho menor por sedimentação, segundo a lei de Stokes. A fração areia (2,0 a 0,053 mm) foi decomposta em cinco classes: areia muito grossa (2,0 a 1,0 mm), areia grossa (1,0 a 0,5 mm), areia média (0,5 a 0,25 mm), areia



fina (0,25 a 0,105 mm) e areia muito fina (0,105 a 0,053 mm). O silte foi determinado por diferença. A determinação da matéria orgânica foi realizada pelo método colorimétrico com a oxidação do ferro pela solução de dicromato de sódio e leitura pelo colorímetro (CANTARELLA et al., 2001).

### 3.3. Estimativa dos fatores e perda de solo

A perda de solo média anual (A) para a área foi estimada pela a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) (WISCHMEIER & SMITH, 1978), que consiste em um modelo multiplicativo dos fatores determinantes, expressa em Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>:

$$A = R K L S C P$$

O fator de erosividade da chuva (R), expresso em Mj mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, foi obtido pelo programa NetErosividade (MOREIRA et al., 2006), com os valores desenvolvidos para o Estado de São Paulo de acordo com equação proposta por LOMBARDI NETO & MOLDENHAUER (1992):

$$E_r = 89,823 \left( \frac{r_i^2}{P_i} \right)^{0,759}$$

sendo:

$E_r$  = média mensal do índice de erosão (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>);

$r_i$  = precipitação média mensal (mm);

$P_i$  = precipitação média anual (mm).

O fator erodibilidade do solo (K), expresso em Mg h Mj<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>, foi obtido segundo modelo proposto por DENARDIN (1990), a seguir:

$$K = 7,48 \cdot 10^{-6} M + 4,48059 \cdot 10^{-3} P - 6,31175 \cdot 10^{-2} DMP + 1,039567 \cdot 10^{-2} R$$

sendo:

$M$  (%) = (areia muito fina + silte) x [(areia muito fina + silte) + areia grossa];

$P$  = valor da permeabilidade, determinado pelos valores: 1 = muito rápida, 2 = rápida, 3 = moderada, 4 = lenta, 5 = muito lenta, 6 = imperfeitamente drenado, de acordo com as classes de solos;

$DPM$  = diâmetro médio ponderado das partículas de solo (mm);

$R$  = [areia grossa (teor de matéria orgânica/100)].

O fator topográfico (LS) determinado em um único fator pela associação do comprimento de rampa e declividade foi estimado pela equação proposta por BERTONI & LOMBARDI NETO (2008), a seguir:

$$LS = 0,00984 C^{0,63} D^{1,18}$$

onde:

$C$  = fator comprimento de rampa (m), (SALES, 1998);

$D$  = declividade (%).

Ambos obtidos pelo modelo numérico do terreno gerado no programa IDRISI 15.0 a partir da vetorização das curvas de nível das Folhas de Jaboticabal e Taiuva, das Cartas do Brasil.

O fator de uso e manejo ( $C$ ) foi determinado segundo metodologia de BERTONI & LOMBARDI NETO (2008), com atribuição de valores segundo a razão de perda de um solo cultivado em relação ao mesmo solo descoberto.

E o fator de práticas conservacionistas ( $P$ ) foi obtido segundo a equação determinada por LAGROTTI (2000), a seguir:

$$P = 0,69947 - 0,08991 D + 0,01184 D^2 - 0,000335 D^3$$

onde:

$D$  = declividade (%).

O Potencial Natural de Erosão (PNE) foi calculado pela equação:

$$PNE = R K LS$$

Os fatores R, K e LS dependem das condições naturais de clima, solo e relevo, enquanto que os fatores C e P relacionam-se com ações antrópicas por meio da forma de ocupação e uso-manejo das áreas.

Os vetores de escoamento superficial e as curvas do mapa planialtimétrico foram gerados por meio da krigagem a partir dos dados de cota do terreno realizada pelo programa GS+ e delineamento dos mapas de isolinhas pelo programa Surfer 8.0.

### **3.4. Análise dos dados**

Os dados obtidos foram analisados inicialmente segundo procedimentos da estatística descritiva, referentes às medidas de tendência central e variabilidade pelo teste de normalidade de Kolmogov-Smirnov a 5% e classificação do coeficiente de variação por WARRICK & NIELSEN (1980) para todas as variáveis. Os valores granulométricos considerados atípicos foram mantidos, pois apesar de serem únicos em sua combinação de valores, ainda se encontram no intervalo usual das variáveis e representam um segmento válido da população.

A correlação linear de Pearson a 5% foi aplicada às variáveis estimadas de perda de solo e seus fatores para determinar suas correlações. Análises de agrupamento foram realizadas com os valores granulométricos, matéria orgânica e com os fatores de perda do solo a fim de determinar grupos homogêneos para o fator K e para a EUPS e PNE. A análise de agrupamento por método hierárquico foi processada considerando a distância euclidiana simples e o método de Ward.

A análise de agrupamento por método hierárquico foi aplicada para avaliar a estrutura de grupos contida nos dados e com isso adotar um número  $k$  de grupos para processar, como complemento, a análise de agrupamento por método não hierárquico, utilizando o algoritmo *k-means*.

A análise de componentes principais (ACP) é processada com a finalidade de avaliar o poder discriminatório das variáveis na direção das unidades amostrais com propriedades específicas. Duas análises foram processadas: uma, utilizando teores granulométricos e de matéria orgânica e outra com os fatores de perda do solo R, K, LS, C e P.

O poder discriminatório de cada variável em cada componente principal é medido pela fórmula:

$$r_{\text{variável}j}(CP_h) = \frac{a_{jh} \sqrt{\lambda_h}}{s_j}$$

em que:

$r_{\text{variável}j}(CP_h)$  = correlação da variável  $j$  com o  $h$ -ésimo componente principal;

$s_j$  = desvio padrão da variável  $j$ ;

$a_{ij}$  = coeficiente da variável  $j$  no  $h$ -ésimo componente principal e

$\lambda_h$  = autovalor de cada dimensão  $h$ .

Os autovetores (CP1, CP2, ..., CP $h$ ) são construídos a partir dos autovalores da matriz de covariância das variáveis consideradas em ordem decrescente dos valores de  $\lambda$ , onde o CP1 é o componente que retém a maior variabilidade do conjunto original, enquanto o último componente retém a menor. A variância retida em cada componente principal foi calculada da seguinte forma:

$$CP_h = \frac{\lambda_h}{\text{traço}(C)} \times 100$$

em que:

$(CP_h)$  = componente principal  $h$ ;

$\lambda_h$  = autovalor  $h$ ;

$C$  = matriz de covariância e

$\vec{traço}(C) = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_h$ .

As novas variáveis  $(CP_h)$  são não correlacionadas entre si. Cada componente principal é uma combinação linear das variáveis originais reduzindo o conjunto original de dimensão  $p$  não interpretável num conjunto interpretável de menor dimensão  $k$  ( $k \ll p$ ).

As análises de agrupamento e componentes principais foram processadas pelo *software* Statistica 9.0 após a padronização das variáveis (média nula e variância unitária). As duas técnicas são consideradas de interdependência, onde as variáveis não são definidas como dependentes ou independentes e aplicadas na fase exploratória de dados.

A estrutura de dependência espacial entre as amostras de solo foi avaliada individualmente para cada componente principal por meio dos modelos geoestatísticos gaussiano e exponencial. Com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca (VIEIRA, 2000) os escores de cada componente foram modelados pelos semivariogramas e seus parâmetros utilizados no processo de interpolação por krigagem ordinária em blocos 2x2, relacionando acima de 50 pares por classe de distância e considerando uma vizinhança de 16 pontos. A modelagem foi realizada com base na menor soma de quadrados do resíduo, maior coeficiente de determinação e melhor desempenho da validação cruzada segundo ZIMBACK (2001). As expressões dos modelos utilizados são:

$$\text{- modelo gaussiano: } \gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - e^{\left( -3 \left( \frac{h}{a} \right)^2 \right)} \right] \quad 0 < h < a$$

- modelo exponencial:  $\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - e^{\left(-\frac{3h}{a}\right)} \right] \quad 0 < h < a$

Segundo LANDIM (2006), o modelo gaussiano indica pequenas variabilidades a curtas distâncias, já o exponencial representa mudanças erráticas (SOARES, 2006).

Para análise do índice de dependência espacial (IDE), foi utilizada a relação  $C/(C_0+C)$  e os intervalos propostos por ZIMBACK (2001) que considera a dependência espacial fraca ( $IDE < 25\%$ ), moderada ( $25\% \leq IDE < 75\%$ ) e forte ( $IDE \geq 75\%$ ).

Quando a dependência espacial entre amostras acontece, mapas contendo isolinhas orientam essa dependência. O ajuste dos modelos para cada componente principal foi feito pelo *software* GS<sup>+</sup> enquanto que os mapas de isolinhas pelo *software* Surfer 8.0.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados a seguir mostram a estatística descritiva das variáveis mensuradas (granulométricas e matéria orgânica) e as estimadas (perda de solo e seus fatores).

### 4.1. Estatística descritiva

A estatística descritiva para as variáveis granulométricas e matéria orgânica pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1. Estatística descritiva para as variáveis, argila, areia, silte, matéria orgânica (MO), areia grossa (AG), areia média (AM), areia fina (AF), areia muito fina (AMF), fatores R, K, C, P, LS, potencial natural de erosão (PNE) e perda de solo (A atual).

Variável	Média	Mediana	DP	Var	CV	CA	Curt	KS
Argila <sup>1</sup>	13,44	12,40	5,41	29,22	40,21	1,00	1,50	0,095
Silte <sup>1</sup>	5,82	5,20	3,02	9,11	51,86	2,93	14,45	0,135
M.O <sup>1</sup>	0,90	0,79	0,49	0,24	54,84	2,01	6,98	0,131
AG <sup>1</sup>	1,96	1,80	1,31	1,71	66,53	1,45	3,35	0,093
AM <sup>1</sup>	18,43	18,00	5,52	30,46	29,94	0,44	0,66	0,066*
AF <sup>1</sup>	41,89	42,00	5,76	33,13	13,74	-0,70	2,29	0,062*
AMF <sup>1</sup>	18,54	18,30	4,64	21,52	25,02	0,10	-0,01	0,039*
Fator R <sup>2</sup>	7924,30	7928,30	40,60	1646,30	0,51	-0,14	-0,60	0,069
Fator K <sup>3</sup>	0,04	0,02	0,05	0,003	146,06	6,01	44,53	0,230
Fator C <sup>4</sup>	0,24	0,32	0,14	0,02	59,16	-1,10	-0,79	0,142
Fator P <sup>4</sup>	0,53	0,50	0,21	0,04	39,11	1,06	1,38	0,056
Fator LS <sup>4</sup>	4,03	3,35	2,90	8,39	71,80	3,12	15,08	0,148
PNE <sup>5</sup>	1130,70	577,20	1720,60	2960328,40	152,17	5,29	42,49	0,241
A atual <sup>5</sup>	118,50	61,30	243,30	54895,8	197,72	7,78	86,73	0,289

Número de amostras para todas as variáveis: N = 239; DP = Desvio padrão; Var = Variância; CV = Coeficiente de variação; CA = Coeficiente de assimetria; Curt = Curtose; KS = Kolmogov-Smirnov; \*Não significativo a 5%; 1. unidade em %; 2. em MJ.mm.ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>; 3. em Mg.h.MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>; 4. fatores adimensionais; 5. em Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

Na análise granulométrica não foi detectada a fração areia muito grossa. Apenas a areia média (AM), areia fina (AF) e areia muito fina (AMF) apresentaram comportamento normal de acordo com o teste de Kolmogov-Smirnov a 5%. SOUZA et

al. (2003) em Latossolos no município de Jaboticabal-SP encontram distribuição normal para areia muito grossa, silte, matéria orgânica e fator K, tendo este último também distribuição normal para SOUZA et al. (2005) no mesmo tipo de solo em Guariba-SP. SANCHEZ et al. (2009) encontraram normalidade apenas para argila em um Argissolo Vermelho-Amarelo de Catanduva-SP.

As variáveis argila, fator P, fator R e fator C apresentaram reduzido afastamento em relação aos valores centrais, tendo os dois primeiros a mediana menor que a média, isto é, assimetria negativa e os dois últimos assimetria positiva. CAMPOS et al. (2008) consideram os valores próximos da média e mediana um comportamento com tendência à distribuição normal, mesmo com os coeficientes de assimetria e curtose altos. O restante das variáveis apresentou assimetria negativa (silte, matéria orgânica (MO), areia grossa (AG), fator K, fator LS, PNE e A atual). MELLO et al. (2006) também obtiveram dados de PNE e A atual com distribuição distante da normalidade devido a valores atípicos. A normalidade não é exigência para a análise de componentes principais e geoestatística, no entanto, a presença de caudas muito alongadas devido a valores atípicos deve ser considerada (LANDIM, 2006).

Valores semelhantes do fator R foram encontrados por MOREIRA et al. (2006) para o município de Monte Alto e por BERTONI & LOMBARDI NETO (2008), que determinaram para a região valores entre 7.500 e 7.750  $\text{Mj mm h}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ . Um dos principais agentes ativos na erosão do solo é a chuva, sendo o volume de perda de massa dependente de sua duração, intensidade e distribuição, tornando o fator R altamente relacionado à perda de solo (LOMBARDI NETO & PASTANA, 1972).

Para o fator K, valores médios, considerados altos por BERTONI & LOMBARDI NETO (2008), foram semelhantes aos encontrados para Argissolos Vermelho-Amarelos por SILVA (2008) e BUENO & STEIN (2004). A erodibilidade apresenta maior influência na determinação da perda de solo principalmente em áreas oriundas de solos com horizonte subsuperficial com acúmulo de argila. TOY et al. (2002) afirmam que as características inerentes dos solos, como teor de argila, silte e areia, interferem de forma significativa no comportamento do solo em relação à erosão, tornando os solos com horizonte B textural mais susceptíveis que os B latossólicos.



O fator LS indicou que a maior parte da área possui valores considerados de moderado a alto por BERTONI & LOMBARDI NETO (2008) (Tabela 2), mostrando um relevo de suave ondulado a ondulado nas áreas de nascentes (Figura 3). Tal característica tem importância crítica na área, uma vez que fator topográfico afeta a erosão pela água alterando a velocidade de escoamento de acordo com o comprimento de rampa e a declividade do terreno (SALES, 1998).

Tabela 2. Classes de ocorrência do fator topográfico definidas por BERTONI & LOMBARDI NETO (2008) e sua distribuição na área estudada.

Classificação	Classe definida (Adimensional)	Área (ha)	Área (%)
Muito baixo	< 1	0,0	0,0
Baixo	1 a 5	16,9	1,1
Moderado	5 a 10	837,4	54,4
Alto	10 a 20	685,4	44,5
Muito alto	> 20	0,0	0,0

Valores moderados do fator P, segundo LAGROTTI (2000), foram encontrados para 75% da área, 1.153,7 ha, o que corresponde aos plantios em contorno; 13% da área, 199,8 ha com valor 1, representando alta perda de solo em relação à prática conservacionista adotada; e 12%, 186,9 ha, valor de 0,2 correspondente aos cordões de vegetação permanente.

Para o fator C, de acordo com BERTONI & LOMBARDI NETO (2008), cerca de 74% da área, ocupada com cana-de-açúcar, pastagem e frutíferas (Figura 4) possui maior a porcentagem da relação perda observada e perda esperada de solo devido a cobertura superficial pelas culturas; 14,6% da área possui relação de perda moderada, com cobertura de culturas perenes e 11,3% possui relação de perda mínima devido a cobertura da vegetação ciliar.

Os valores de PNE e A atual mostraram maior variabilidade na área, principalmente devido à topografia, com valores médios considerados muito altos por BERTONI & LOMBARDI NETO (2008). Valores menores de PNE foram obtidos por MELLO et al. (2006) em Argissolo Vermelho-Amarelo na região de Monte Alto devido às

condições menos movimentadas de relevo. CASTRO & VALÉRIO FILHO (1997), para Argissolos encontraram altos valores de PNE em áreas de relevo ondulado, mostrando a influência da topografia nas determinações de perda de solo e atividades de manejo.

De acordo com a classificação do coeficiente de variação (CV) proposta por WARRICK & NIELSEN (1980), apenas o fator R obteve CV baixo (menor que 12%), as variáveis silte, matéria orgânica, areia média, areia fina e areia muito fina e os fatores C e P apresentaram CV médio (entre 12,1% e 60%) e a areia grossa e os fatores K e LS, PNE e A atual apresentaram alto CV (acima de 60%). A maior variabilidade concorda com os resultados obtidos por SOUZA et al. (2003), SOUZA et al. (2005) e MELLO et al. (2006). Segundo esses autores o comportamento assimétrico das variáveis se dá em razão da maior variabilidade das condições de cobertura vegetal, manejo e pedoformas, o que pode indicar classes de variabilidade de menor grau de homogeneidade das propriedades do solo.

Para os fatores de perda de solo, a correlação de Pearson com 95% de confiança (Tabela 3) do PNE e foi alta com o fator K, seguido pelo fator LS. Para o A atual, somente o fator K apresentou maior correlação. Em área de Latossolos, CAMPOS et al. (2008) observaram alta correlação do A atual e do PNE com o fator LS, e ARRAES (2009), em Argissolos Vermelho-Amarelos, o fator com maior correlação com o A atual foi o LS, seguido de C e P.

Tabela 3. Coeficiente de correlação do PNE e da EUPS e os fatores R, K e LS.

	Fator R	Fator K	Fator LS	Fator C	Fator P
A atual	-0,086	0,740	0,083	0,298	-0,074
PNE	0,066	0,731	0,451	-	-

## **4.2. Fator erodibilidade do solo**

A erodibilidade é um fator diretamente relacionado ao solo e varia significativamente, compondo a Equação Universal da Perda de Solo e o Potencial Natural de Erosão (MARQUES et al., 1997). O fator K representa o efeito integrado dos processos que regulam a infiltração de água e a resistência do solo à desagregação e transporte de partículas (HAAN et al., 1994). Os solos com horizonte B textural tornam-se mais susceptíveis aos processos erosivos que os B latossólicos de uma forma geral devido principalmente ao gradiente nos teores de argila em profundidade (TOY et al., 2002). Desse modo, observou-se uma boa correlação do fator K com a perda de solo e as análises de agrupamento e componentes principais foram aplicadas de forma a agrupar zonas homogêneas em relação à distribuição granulométrica e de matéria orgânica da área, uma vez que tais características condicionam o processo erosivo (HAAN et al., 1994).

### **4.2.1. Análise de agrupamento**

No dendrograma da Figura 6 é possível admitir uma divisão das amostras de solo em cinco grupos que reflete o comportamento das frações granulométricas e da matéria orgânica na área de estudo.

Considerando a divisão em cinco grupos, os dados foram submetidos à análise de agrupamento por método não hierárquico utilizando o algoritmo *k-means* o que possibilitou a adição de novas informações aos resultados já obtidos.

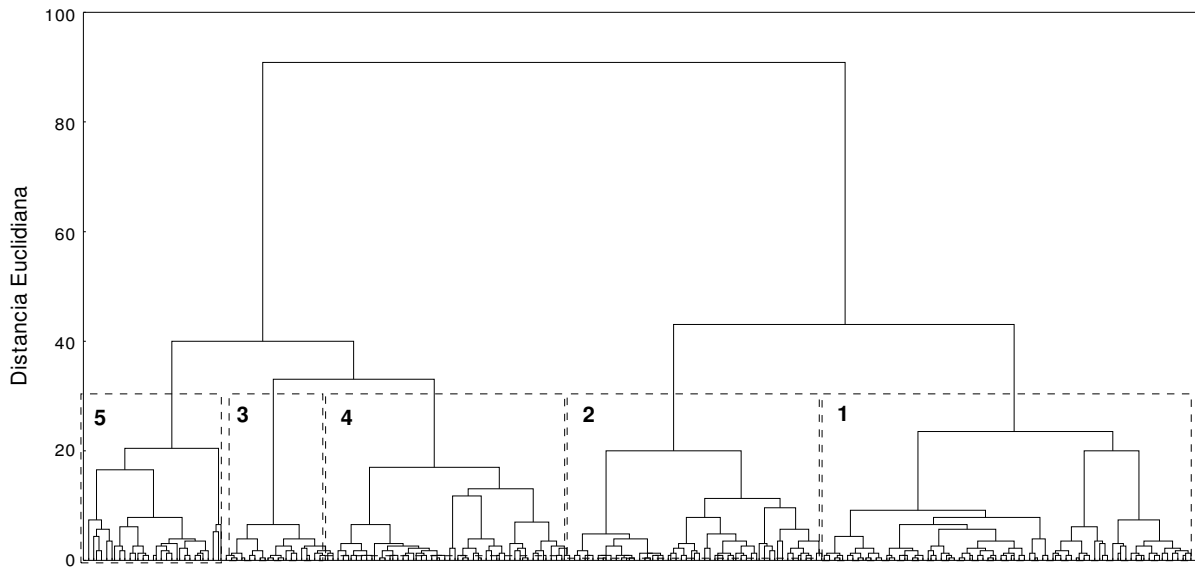


Figura 6. Dendrograma resultante da análise de agrupamento hierárquico considerando teores de granulometria e matéria orgânica.

O gráfico de perfil que representa o centróide de cada grupo pode ser observado na Figura 7. O grupo 1 possui valores de areia fina que se encontram na média (linha central de valor 0.0 no gráfico), valores pouco abaixo da média de argila, silte, matéria orgânica e areia muito fina. Contudo, o grupo se destaca pelos valores acima da média de areia grossa e principalmente areia média. O grupo 2 mostra valores de areia muito fina que se encontram na média e se destaca nos valores de areia fina acima da média, com o restante das frações abaixo da média. O grupo 3 mostra valores de argila e silte acima da média, com altos valores de areia muito fina e valores abaixo da média de matéria orgânica, areia grossa, areia fina e principalmente areia média. O grupo 4 possui alto teor de argila, com valores de silte e matéria orgânica na média e teores abaixo da média para o restante das frações granulométricas. O grupo 5 possui valores abaixo da média para areia fina e areia muito fina, valores de argila e matéria orgânica na média e valores acima da média de silte, areia muito fina, areia grossa e principalmente matéria orgânica. A localização de cada grupo pode ser observada na Figura 8. A Figura 3 (topografia da área) e a Figura 4 (uso e ocupação do solo) auxiliam no entendimento e visualização dos elementos de acordo com sua posição geográfica.

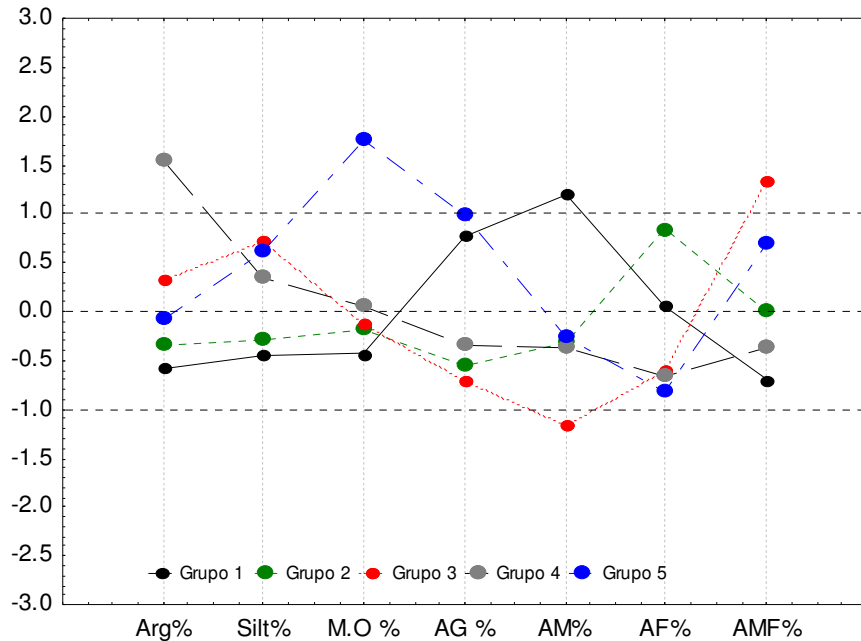


Figura 7. Perfil dos centróides de cada grupo pelo método *k-means*. Arg% = percentagem de argila; Silt% = percentagem de silte; MO% = percentagem de matéria orgânica; AG% = percentagem de areia grossa; AM% = percentagem de areia média; AF% = percentagem de areia fina e AMF% = percentagem de areia muito fina.

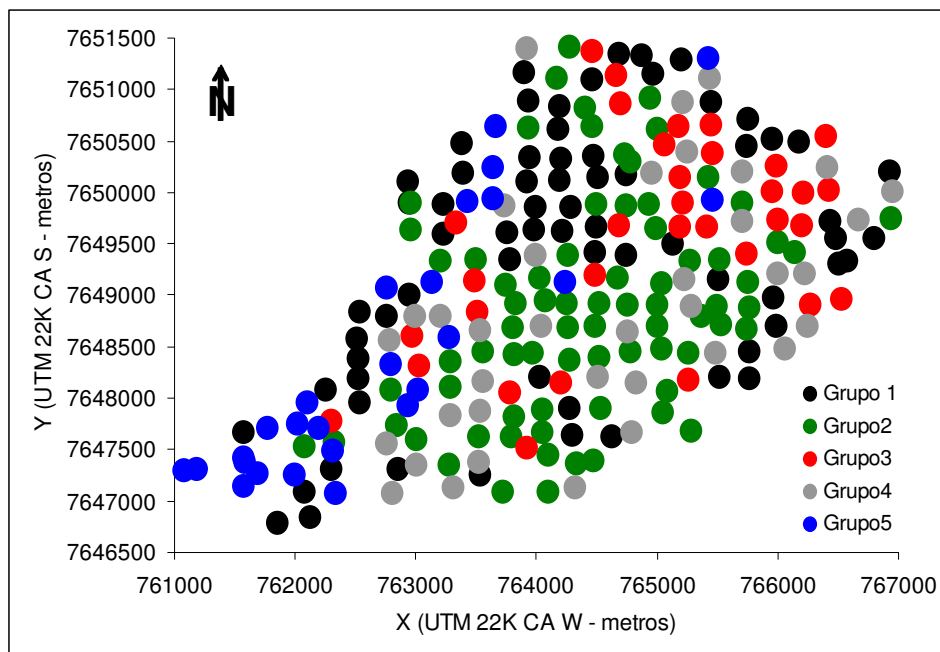


Figura 8. Distribuição no plano dos grupos formados para a granulometria e matéria orgânica pela análise de agrupamento de acordo com a posição geográfica das amostras (coordenadas em UTM, Córrego Alegre S).

Os grupos 1 e 5 se distribuem nas áreas de pastagem próximas à zona urbana (Figura 4 e Figura 8), e nas áreas planas de maiores cotas do terreno (Figura 3), estando o grupo 5 presente em áreas com detritos uranos. O grupo 2 aparece nas áreas de menores cotas, de declividades suaves e mais convexas. Os grupo 3 e 4 se distribuem pelas áreas de maior inclinação, sendo o último próximo à rede de drenagem. Resultados semelhantes para areia foram observados por LEÃO et al. (2010), que obtiveram maior teor de areia grossa e areia média nas áreas de maior cota e areia fina no sopé de encostas, e SOUZA et al. (2003), encontraram maior variabilidade das partículas mais finas em inclinações mais lineares. A presença de partículas de areia mais finas nas zonas de acúmulo de sedimento e de partículas maiores nas áreas mais elevadas evidencia o transporte seletivo de partículas, processo regulado pelo relevo (HAAN et al., 1994). A taxa de perda de solo depende da facilidade de desprendimento e transporte de partículas, estando em função principalmente da textura e matéria orgânica, além da estrutura e permeabilidade (TOY et al., 2002). Diversos trabalhos mostram que a topografia influencia na distribuição espacial da granulometria, sendo a distribuição superficial dependente da direção do fluxo de água e do manejo (SOUZA et al., 2003; SANCHEZ et al., 2005; LEÃO et al., 2010). Além disso, a remoção de partículas de solo difere de acordo com a forma da vertente, o que condiciona a variabilidade de seus atributos físicos (SOUZA et al., 2004).

#### ***4.2.2. Análise de componentes principais***

A análise de componentes principais discriminou as amostras de solo por meio das variáveis granulométricas e teor de matéria orgânica. As amostras contidas num hiperplano são filtradas nos componentes principais permitindo compreender relações complexas contidas nas amostras de solo. Três autovalores foram suficientes para condensar 74,53% (35,90% em CP1, 23,48% em CP2 e 15,14% em CP3) da variabilidade contida nos dados originais conforme Tabela 4 e Figura 9.

Tabela 4. Autovalores gerados da matriz de covariância para a granulometria e matéria orgânica.

Componentes Principais	Autovalores	Variância Total (%)	Autovalores acumulados	Variância acumulada (%)
1	2,513	35,90	2,513	35,90
2	1,644	23,48	4,157	59,38
3	1,060	15,14	5,217	74,53
4	0,903	12,89	6,119	87,42
5	0,635	9,07	6,755	96,49
6	0,174	2,49	6,920	98,98
7	0,071	1,02	7,000	100,00

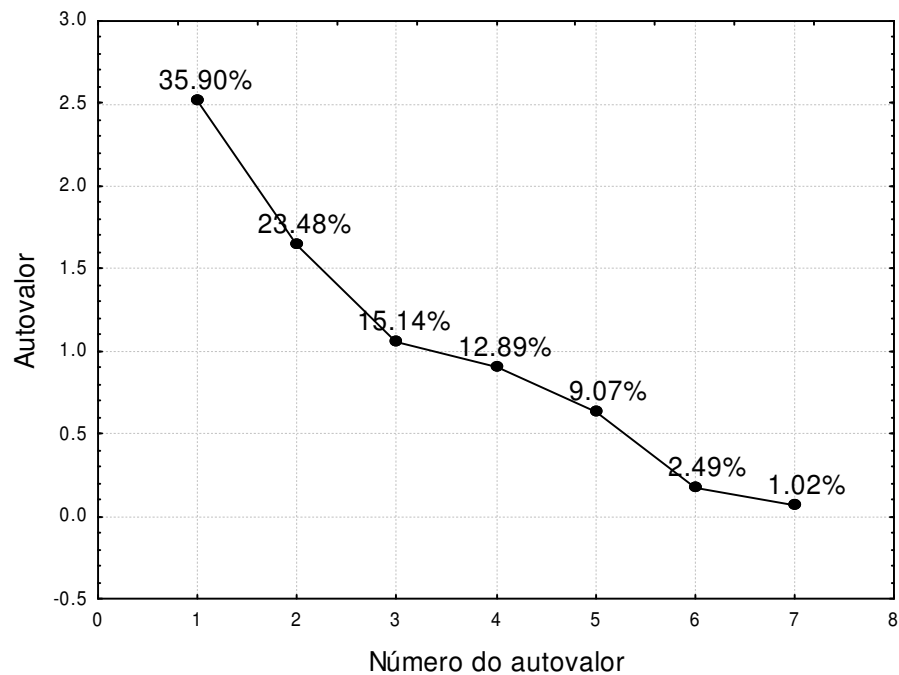


Figura 9. Gráfico Scree Plot dos autovalores da matriz de correlação.

O fator K foi utilizado como variável suplementar de modo a verificar sua correlação com as demais variáveis em cada componente principal e na Tabela 5 é possível observar as correlações das variáveis e dos componentes principais.

Tabela 5. Correlação entre cada fração de solo e um componente principal (CP).

Variáveis	CP1	CP2	CP3
Argila	0,580	-0,360	<b>0,659</b>
Silte	<b>0,602</b>	-0,136	-0,285
M.O	0,378	-0,435	-0,558
AG	-0,476	<b>-0,755</b>	-0,254
AM	<b>-0,891</b>	-0,355	-0,002
AF	-0,444	<b>0,761</b>	-0,234
AMF	<b>0,673</b>	0,175	-0,337
Fator K*	0,559	-0,156	-0,243

\* Variável suplementar. Valores em negrito = cargas relevantes nos componentes.

No CP1, o fator K possui correlação inversa (correlação negativa) com areia média, isto é, quanto maior o fator de erodibilidade, menor a quantidade de areia média; e correlação direta com silte e areia muito fina, mostrando que quanto maiores estas frações, maior a erodibilidade. Isso indica o desprendimento de partículas pelo processo de transporte seletivo (HAAN et al., 1994). No CP2 a areia grossa e fina aparecem inversamente correlacionados, com a primeira diretamente correlacionada ao fator K, mostrando que em algumas áreas a erosão é facilitada pela baixa coesão entre estas partículas (TOY et al., 2002). Para o CP3 o fator K tem correlação inversa com a argila, que possui maior agregação de solo.

A projeção das variáveis no gráfico bidimensional formado pelos autovetores CP1 e CP2, de acordo com as correlações observadas, ilustra visualmente sua importância na discriminação dos grupos de amostras (Figura 10).

É possível verificar uma ordenação das amostras de solo indicando a formação de cinco grupos, que foram comparados com os grupos obtidos pela análise de agrupamento não hierárquico de acordo com o perfil dos centróides. No gráfico biplot há a formação de um grupo central denominado “média” mostrando comportamento mediano. Já os outros grupos apresentam características específicas, isto é, localizam-se em regiões do plano onde há a predominância de uma ou mais variáveis.

A estrutura de grupos formados pela ACP é semelhante à formação de grupos obtidos pela análise de agrupamento, isto é, os elementos de cada grupo encontram-se



nas mesmas posições geográficas ou em posições distintas, mas nas pedofomas de mesmo padrão observadas na análise de agrupamento. É possível observar no gráfico biplot (Figura 10) que o grupo “AM-AG” está discriminado à esquerda de CP1 pelas variáveis areia média e areia grossa, em contraste com o grupo “Silte-AMF”, à direita, discriminado por silte e areia muito fina. A localização destes grupos (Figura 11) é semelhante à observada pelos grupos 1 e 2 da análise de agrupamento por método não hierárquico (Figura 8), discriminados pelas mesmas variáveis. O grupo “MO-Argila” e “AF” são contrastantes em CP2, onde o primeiro é discriminado na parte inferior pelas variáveis matéria orgânica e argila e o grupo “AF” na parte superior, discriminado pela areia fina, semelhantes aos grupos 5 e 4 da análise de agrupamento não hierárquico.

Na projeção das variáveis CP1 e CP3 também foi possível verificar uma ordenação de grupos, confirmando os resultados das análises de agrupamento e com um grupo mediano, semelhante à projeção de CP1 e CP2 (Figura 12).

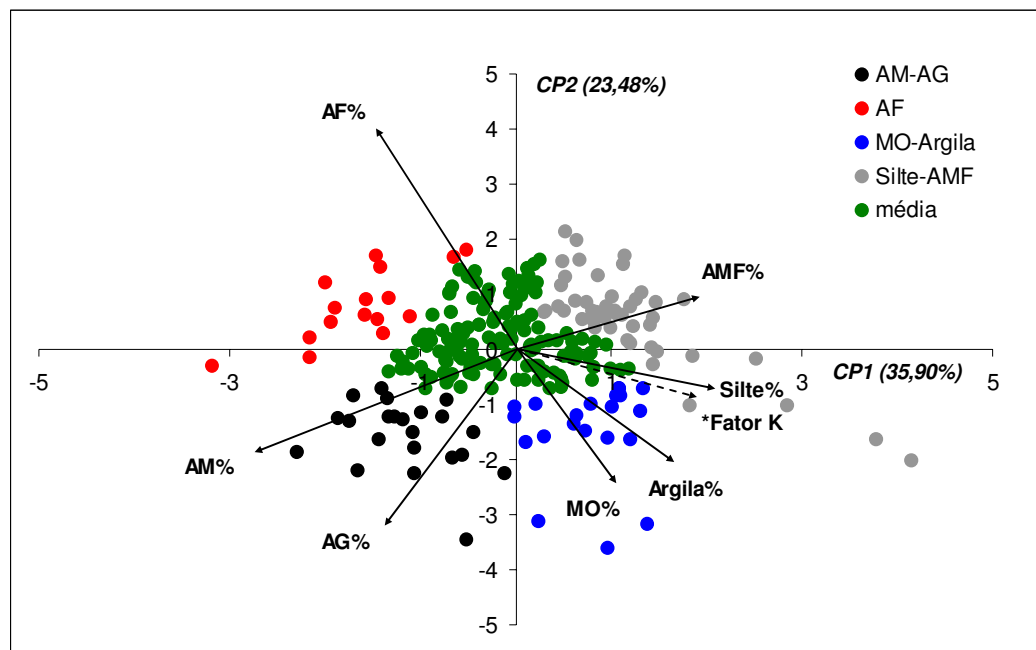


Figura 10. Gráfico biplot para o componente principal 1 (CP1) e o componente principal 2 (CP2) projetadas no plano. AMF% = areia muito fina (%); AF% = areia fina (%); AM% = areia média (%); AG% = areia grossa (%); \*Fator K = fator K (variável suplementar).

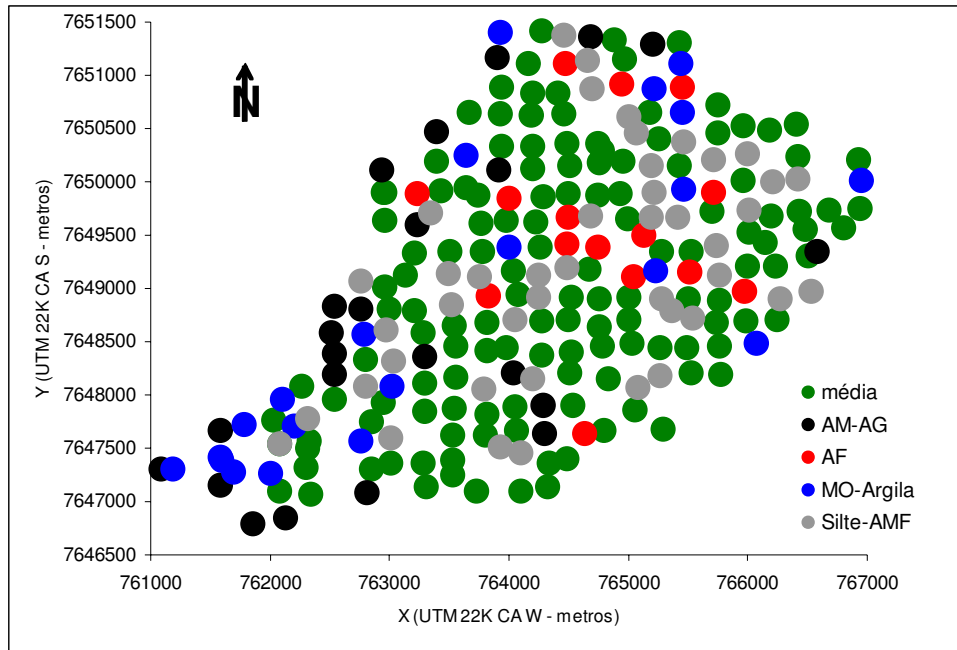


Figura 11. Distribuição dos grupos formados por CP1 e CP2 para granulometria e matéria orgânica de acordo a posição geográfica das amostras (coordenadas em UTM, Córrego Alegre S).

É possível verificar uma ordenação indicando a formação de cinco grupos, onde se observa o grupo central “média” mostrando comportamento mediano. Os grupos que apresentam características específicas da mesma forma foram semelhantes aos formados pelas análises de agrupamento, com a maioria dos elementos localizados nas mesmas posições geográficas ou em posições diferentes com o mesmo padrão de pedoforma. Observa-se no gráfico biplot que o grupo “AG-AF-AM” está discriminado à esquerda de CP1 pelas variáveis areia média, areia grossa e areia fina em contraste com o grupo “MO-AMF-Silte”, à direita, discriminado por silte, matéria orgânica e areia muito fina. A localização destes grupos (Figura 13) é semelhante à observada pelos grupos 1 e 5, discriminados na análise de agrupamento não hierárquico (Figura 8). Os grupos “Argila” e “AF-AG” são contrastantes em CP2, onde o primeiro é discriminado na parte superior pela argila e o grupo “AF-AG” na parte inferior, discriminado pela areia fina e areia grossa, semelhantes aos grupos 2 e 4 da análise de agrupamento não hierárquico.

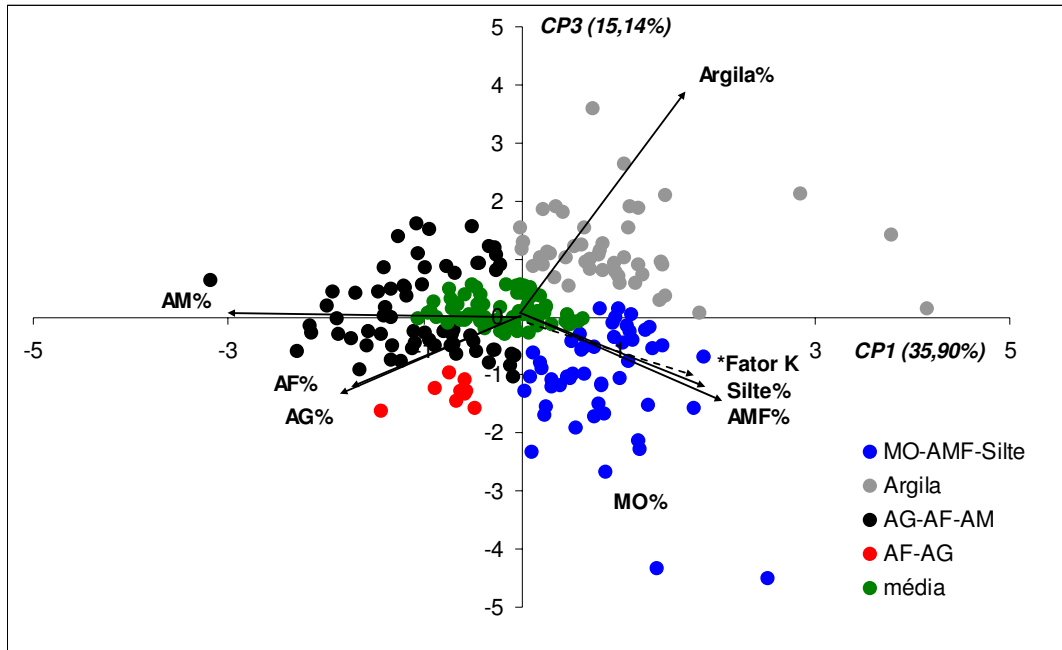


Figura 12. Gráfico biplot para o componente principal 1 (CP1) e o componente principal 3 (CP3) projetadas no plano. AMF% = areia muito fina (%); AF% = areia fina (%); AM% = areia média (%); AG% = areia grossa (%); \*Fator K = fator K (variável suplementar).

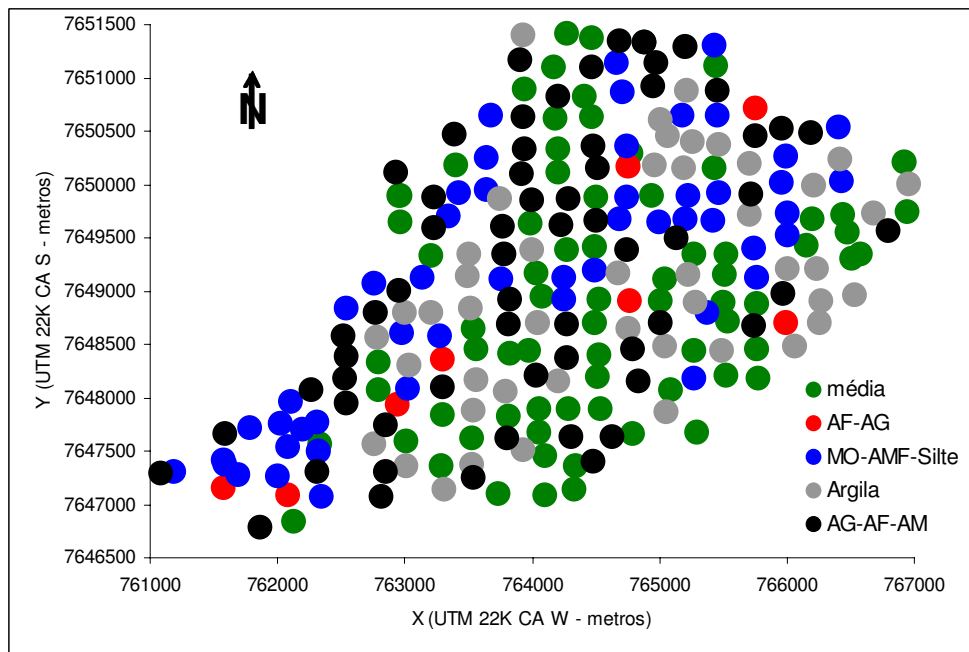


Figura 13. Distribuição dos grupos formados por CP1 e CP3 para granulometria e matéria orgânica de acordo a posição geográfica das amostras.

A convergência dos resultados mostra o comportamento granulométrico da área, que é suscetível ao processo erosivo devido às condições texturais superficiais e à movimentação do relevo. A baixa resistência da superfície oriunda do caráter textura média e arenosa (HAAN et al., 1994) e a distribuição granulométrica da área favorecem um intenso processo de perda de solo com maior produção de sedimentos. Como observado por PISSARRA et al., (2006), que classificaram a área como de grande probabilidade de transporte de material em maior escala, com tendência à menor resistência à remoção de solo superficial.

### **4.3. EUPS e PNE**

A atuação dos fatores de perda de solo ocorre de forma integrada, com práticas de manejo, tipo de cobertura vegetal, condições do relevo, tipo de solo e clima interagindo (WISCHMEIER & SMITH, 1978). Entender a influência dessa integração e determinar suas áreas de atuação consiste em um grande avanço na mitigação do processo erosivo. Na área estudada, além da influência da erodibilidade do solo, outros fatores como o topográfico e a cobertura vegetal mostraram importância. Desse modo, as análises de agrupamento, componentes principais e a geoestatística foram aplicadas na tentativa de compreender a distribuição espacial das amostras de solo bem como encontrar padrões que identifiquem as zonas de atuação e distribuição dessas interações na área estudada.

#### **4.3.1. Análise de agrupamento**

No dendrograma da Figura 14, considerando os fatores de perda de solo, é possível admitir uma divisão das amostras de solo em cinco grupos que reflete o comportamento dos fatores da perda de solo na área de estudo. Considerando a divisão em cinco grupos, os dados foram submetidos à análise de agrupamento por método não hierárquico utilizando o algoritmo *k-means* o que agregou novas informações aos resultados já obtidos.

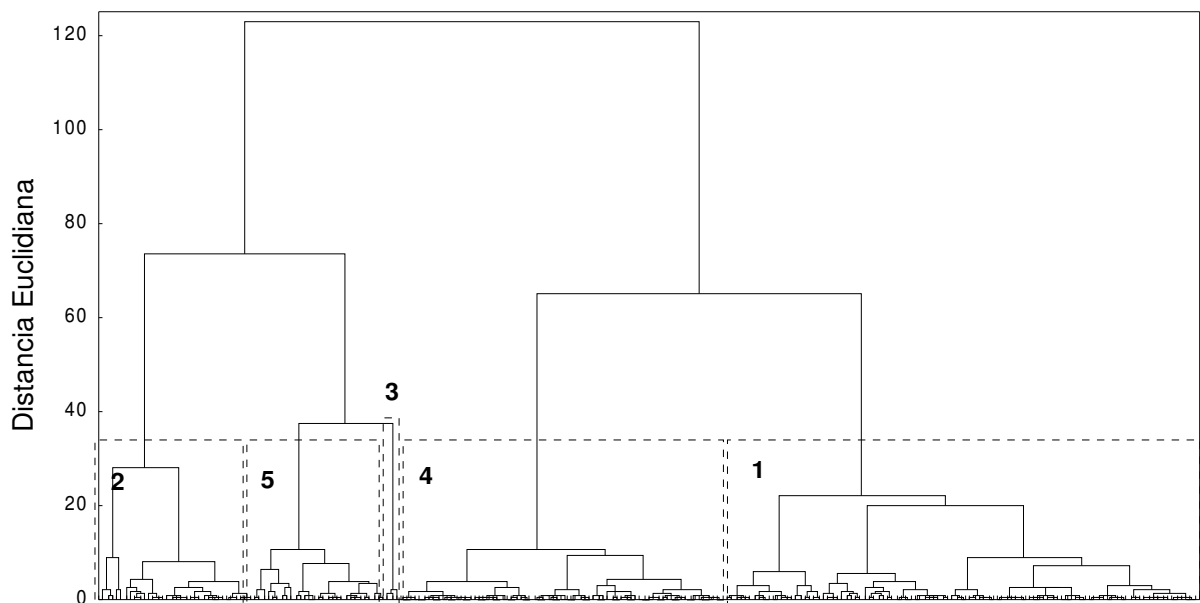


Figura 14. Dendrograma resultante da análise de agrupamento hierárquico considerando os fatores de perda de solo.

O gráfico de perfil que representa o centróide de cada grupo pode ser observado na Figura 15. O grupo 3 possui valores dos fatores R e LS abaixo da média (linha central do gráfico com valor 0, Figura 15), valores do fator P na média e valores acima da média do fator C e valores do fator K bem acima da média. O grupo 2 possui valores na média dos fatores K e LS, e valores acima da média dos fatores R e P em contraste com os valores abaixo da média do fator C. O grupo 5 mostra que os fatores possuem valores na média, exceto pelos dos fatores C e P, que possuem valores abaixo da média. O grupo 4 possui valores na média dos fatores K, C e LS, e valores abaixo da média para o fator R, em contraste com o fator C, acima da média. O grupo 1 se manteve com valores na média, exceto para os fatores R e C acima da média. A localização de cada grupo pode ser observada na Figura 16. A Figura 4 (uso e ocupação do solo) e a Figura 3 (topografia da área) auxiliam no entendimento e visualização dos elementos de acordo com sua posição geográfica.

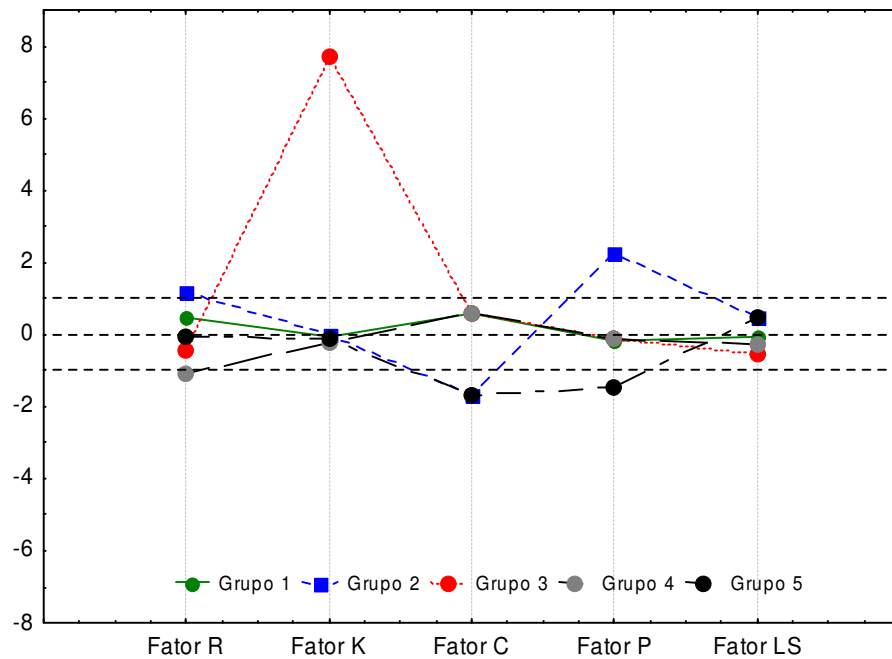


Figura 15. Perfil dos centróides de cada grupo pelo método *k-means* para cada fator de perda de solo.

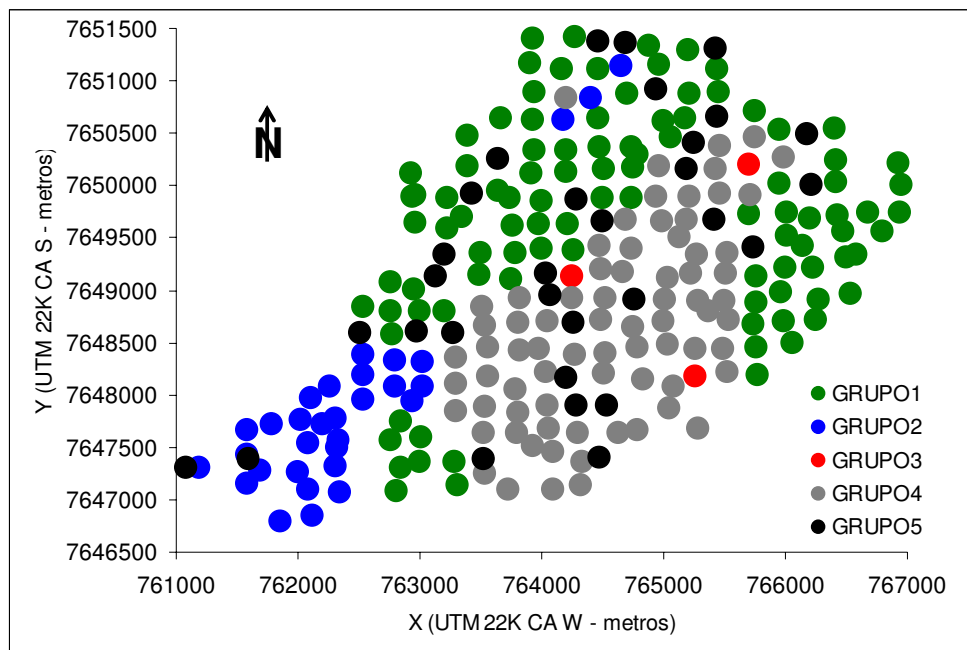


Figura 16. Distribuição dos grupos formados para os fatores de perda de solo pela análise de agrupamento de acordo a posição geográfica das amostras (coordenadas em UTM, Córrego Alegre S).

Os grupos 1 e 2 se distribuem nas áreas de pastagem próximas à zona urbana (Figura 4 e Figura 16), e nas áreas planas de maiores cotas do terreno (Figura 3). O grupo 4 aparece nas áreas de menores cotas, próximo à rede de drenagem. O grupo 5 está nas áreas de maior inclinação do terreno, principalmente nas mais côncavas. E o grupo 3 mostra maior especificidade aparecendo em locais próximo aos divisores de água, o que caracteriza áreas convexas. Estudos mostram que em áreas côncavas, com o acúmulo de sedimentos, apresentaram maior variabilidade em áreas convexas, condicionados pelo relevo, há maior atuação do processo erosivo, podendo representar limites de áreas específicas de manejo (SOUZA et al., 2003; SANCHEZ et al., 2005; SANCHEZ et al., 2009).

#### **4.3.2. Análise de componentes principais**

A análise de componentes principais discriminou as amostras de solo por meio dos fatores de perda do solo. Três autovalores foram suficientes para condensar 74,94% (35,22% em CP1, 20,49% em CP2 e 19,23% em CP3) da variabilidade contida nos dados originais conforme Tabela 6 e Figura 17.

As estimativas de perda de solo (A atual e PNE) foram utilizadas como variáveis suplementares para análise de sua correlação com as demais variáveis em cada componente principal e na Tabela 7 é possível observar as correlações das variáveis e dos componentes principais.

Tabela 6. Autovalores gerados da matriz de covariância para os fatores de perda de solo.

Componentes Principais	Autovalores	Variância Total (%)	Autovalores acumulados	Variância acumulada (%)
1	1,761	35,220	1,761	35,220
2	1,024	20,489	2,785	55,709
3	0,962	19,234	3,747	74,943
4	0,666	13,316	4,413	88,259
5	0,587	11,741	5,000	100,000

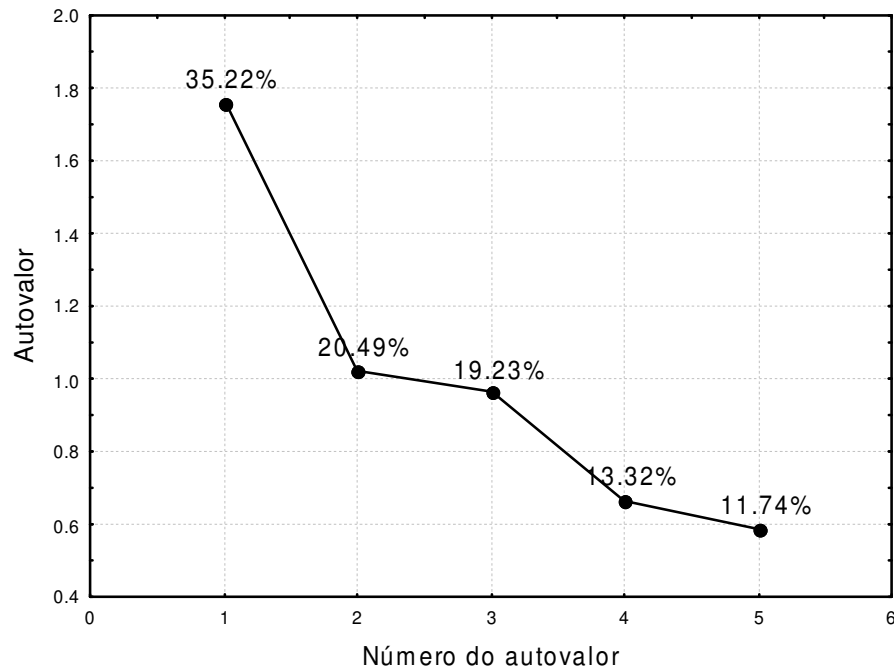


Figura 17. Gráfico Scree Plot dos autovalores da matriz de correlação.

Tabela 7. Correlação entre cada fator de perda de solo e um componente principal (CP).

Variáveis	CP1	CP2	CP3
Fator R	<b>0,761</b>	-0,158	0,195
Fator K	-0,045	<b>-0,791</b>	<b>-0,608</b>
Fator C	<b>-0,717</b>	-0,153	0,174
Fator P	<b>0,661</b>	-0,371	0,371
Fator LS	0,478	<b>0,460</b>	<b>-0,621</b>
PNE <sup>1</sup>	0,208	-0,378	<b>-0,737</b>
A atual <sup>1</sup>	-0,182	-0,539	-0,513

\* Variável suplementar. Valores em negrito = cargas relevantes nos componentes.

No CP1 a discriminação relevante, ou maior carga, foi da interação dos fatores R, P e C, onde os dois primeiros se correlacionam diretamente com o PNE e o último diretamente com o A atual (valores negativos de cargas do A atual e fator C e valores positivos do PNE e dos fatores R e P). Tal comportamento dos fatores antrópicos mostra que quanto melhores as práticas conservacionistas adotadas em relação à erosividade da chuva menor o efeito do uso e manejo do solo. Isto é, a perda de solo na área é fortemente influenciada pela chuva e pelo manejo, sendo minimizada pela



atuação da cobertura vegetal. No estudo de WEILL & SPAROVEK (2008), os fatores antrópicos foram responsáveis pela ordem de grandeza da estimativa da perda de solo quando mantido constante o fator R.

Para o CP2, onde os fatores naturais possuem maior poder discriminante, observa-se a correlação direta do fator K com a perda de solo, tendo o fator LS comportamento inverso. Resultados semelhantes foram observados por SALCHOW & LAL (2001) que indicaram os fatores naturais como os de maior influência nos componentes principais quanto à produtividade das culturas.

No CP3 o potencial natural de erosão e os fatores K e LS possuem discriminação relevante. A correlação ocorre neste componente de forma direta, mostrando a atuação conjunta dos fatores K e LS na perda potencial de solo em algumas áreas. CAMPOS et al. (2008) da mesma forma observaram a maior dependência dos fatores naturais de erosão ao relevo em área de Latossolos. Já SILVA (2008), independentemente do tipo de solo, observou maior influência do fator topográfico e menor interferência da erodibilidade do solo. A projeção das variáveis no gráfico bidimensional formado pelos autovetores CP1 e CP2, com 55,71% da variabilidade original dos dados, mostra a importância dos fatores na discriminação dos grupos das amostras de solos (Figura 18).

É possível verificar uma ordenação das amostras em seis grupos, onde o grupo 4 está discriminado à direita de CP1 pelos fatores R e P em contraste com o grupo 1 à esquerda, discriminado pelo fator C. O grupo 1 está localizado numa região de APP que é caracterizada pela cobertura vegetal (alto valor do fator C) enquanto que o grupo 4 está próximo da área urbana em uma região com alta concentração do fluxo de água e sem práticas conservacionistas o que resulta em perda de solo (elevados valores de R e P). Resultados semelhantes foram observados por TOMAZONI et al., (2006), onde os fatores R, C e P foram os mais expressivos na perda de solo. Para CARVALHO et al., (2009) as perdas de solo foram mais influenciadas pela cobertura vegetal, e SILVA et al., (2005) ressaltam a importância da cobertura vegetal e das práticas conservacionistas na compensação da perda de solo. A Figura 19 mostra o mapa de distribuição dos grupos segundo as coordenadas geográficas das amostras.

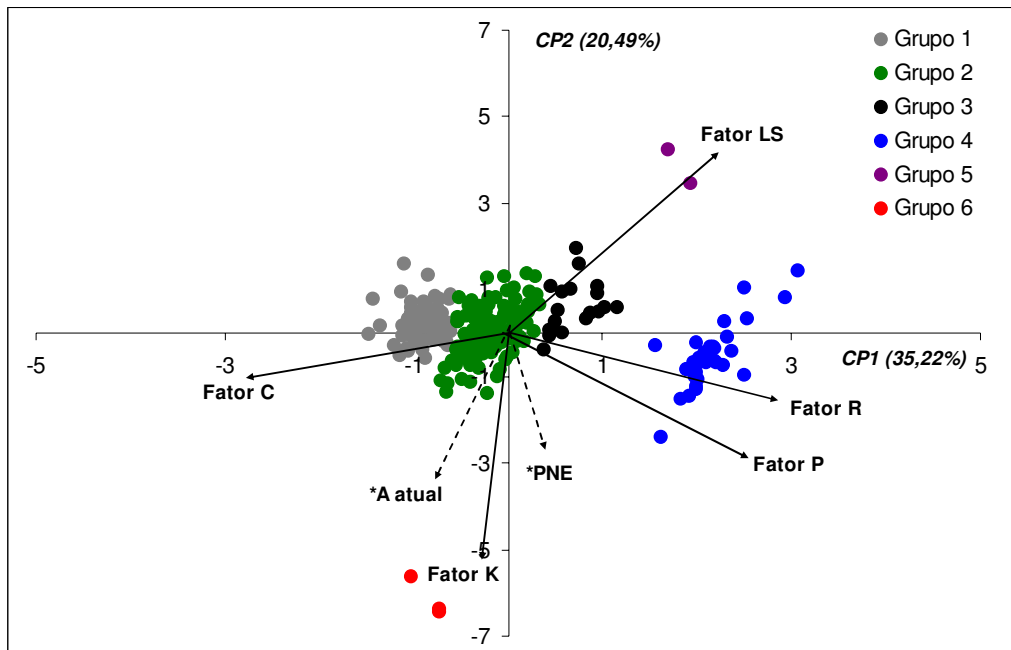


Figura 18. Gráfico biplot para o componente principal 1 (CP1) e o componente principal 2 (CP2) dos fatores de perda de solo projetadas no plano.

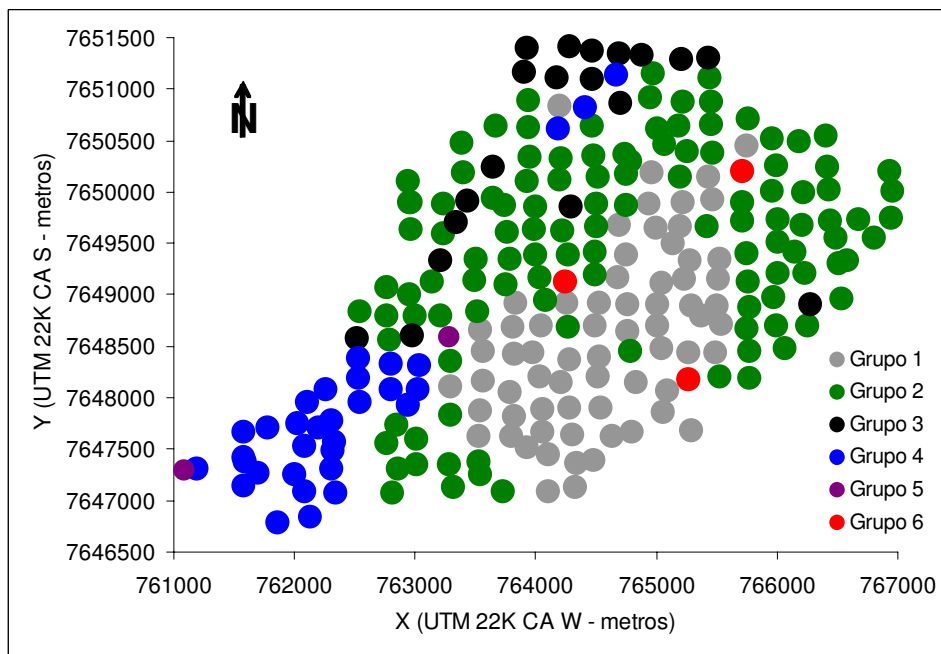


Figura 19. Distribuição dos grupos formados para os fatores de perda de solo pela análise de agrupamento para CP1 e CP2 de acordo a posição geográfica das amostras (coordenadas em UTM, Córrego Alegre S).

Os grupos 5 e 6 são contrastantes em CP2 onde o grupo 5 é discriminado na parte superior de CP2 pelo fator LS e o grupo 6 discriminado na parte inferior pelo fator K. O grupo 5 se encontra em áreas com inclinação côncava (elevado valor do fator LS) enquanto que o grupo 6 se localiza próximo aos divisores de água o que caracteriza áreas convexas (elevado valor do fator K) apresentando maiores valores de A atual e PNE, possivelmente pela exposição superficial destas pedoformas. O mesmo foi encontrado por SANCHEZ et al., (2009), que observaram altos valores de PNE e A atual em áreas convexas e CASTRO & VALÉRIO FILHO (1997) confirmaram a influência do fator K na perda de solo. CAMPOS et al., (2008) obtiveram alta relação espacial de perda de solo com o fator LS. Os grupos 2 e 3 não possuem valores específicos quanto aos fatores de perda de solo, sendo que o grupo 2 se localiza nas áreas com declividades e o grupo 3 em áreas planas.

Os componentes principais 1 e 3 explicaram 54,45% da variabilidade contida nos dados originais (Figura 20).

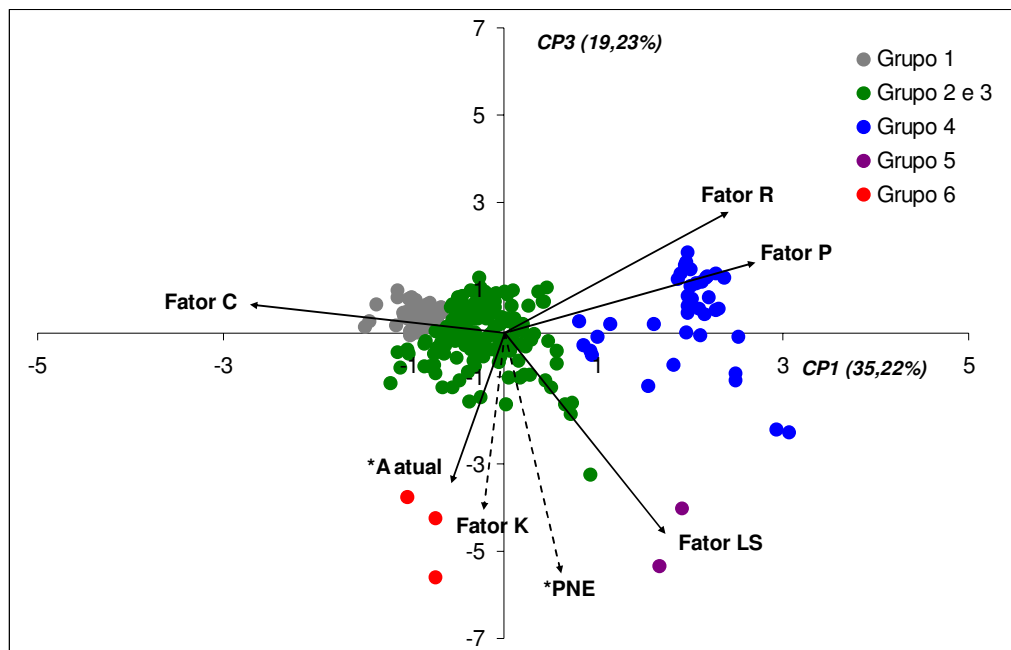


Figura 20. Gráfico biplot para o componente principal 1 (CP1) e o componente principal 3 (CP3) dos fatores de perda de solo projetadas no plano.

Nesta distribuição o terceiro componente principal discrimina os grupos 5 e 6 que é explicada pelos fatores K e LS diretamente associados com A atual e PNE, isto é, a interação dos fatores topográfico e erodibilidade do solo ocorre em áreas de maior perda de solo, concordando com os resultados de BUENO & STEIN (2004), SILVA et al., (2005) e CORREA et al., (2007). O grupo 1 está associado ao fator C e o grupo 4 aos fatores R e P. Os grupos 2 e 3 aparecem juntos, com comportamento mediano, isto é, sem influência de fatores específicos. A distribuição dos grupos pode ser observada na Figura 21.

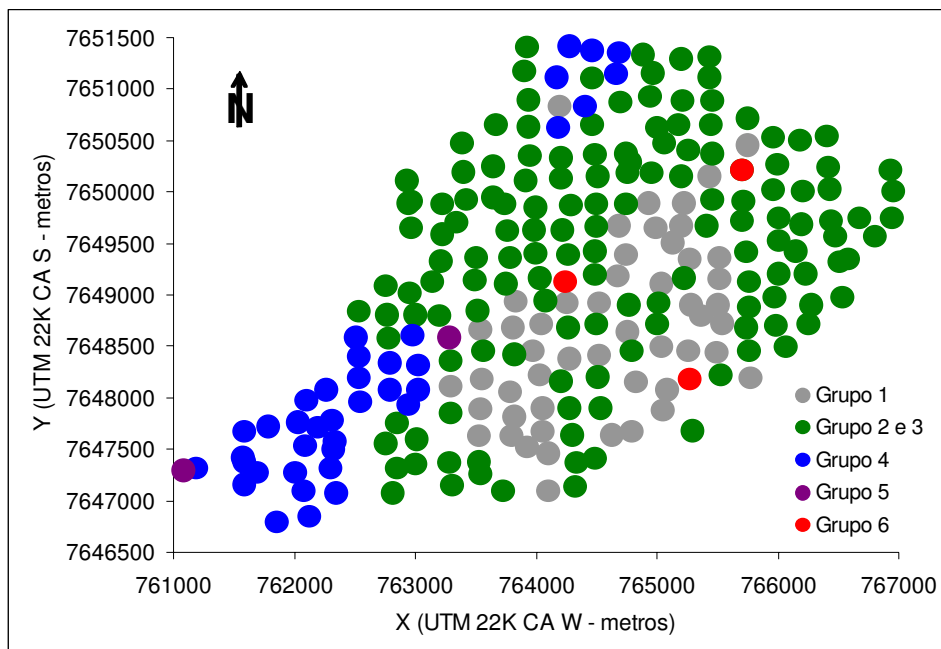


Figura 21. Distribuição dos grupos formados para os fatores de perda de solo pela análise de agrupamento para CP1 e CP3 de acordo a posição geográfica das amostras (coordenadas em UTM, Córrego Alegre S).

Os autovetores, fatores de ponderação que definem a contribuição de cada variável original para um componente principal, referentes aos três componentes principais estão descritos a seguir:

$$CP1 = 0,574(\text{Fator R}) - 0,034(\text{Fator K}) - 0,540(\text{Fator C}) + 0,498(\text{Fator P}) + 0,360(\text{Fator LS})$$

$$CP2 = -0,156(\text{Fator R}) - 0,782(\text{Fator K}) - 0,151(\text{Fator C}) - 0,367(\text{Fator P}) + 0,455(\text{Fator LS})$$

$$CP3 = 0,199(\text{Fator R}) - 0,620(\text{Fator K}) + 0,179(\text{Fator C}) + 0,379(\text{Fator P}) - 0,633(\text{Fator LS})$$

A variabilidade relevante contida na variabilidade original é explicada nos componentes pela carga de cada variável: em CP1 é concentrada nos fatores C (-0,540), R(0,574) e P(0,498); em CP2 nos fatores K(-0,782) e LS(0,455) e em CP3 nos fatores K(-0,620) e LS(-0,633). Estes autovetores podem ser utilizados como indicadores de perda de solo para a área a partir de novas amostras.

### 4.3.3. Análise geoestatística

A análise geoestatística foi realizada para cada componente principal, pelos respectivos escores dos três primeiros componentes, gerados a partir dos fatores de perda de solo. Os modelos de semivariogramas ajustados e seus parâmetros estão na Tabela 8 e Figura 22.

Tabela 8. Modelos e parâmetros dos semivariogramas ajustados.

Variáveis	Modelo	$C_0$	$C_0+C$	a	$C/(C_0+C)$	$r^2$	SQR
CP1	Gaussiano	0,2260	0,914	1060,02	75,3	0,993	0,002
CP2	Exponencial	0,2905	0,821	592,56	64,6	0,536	0,053
CP3	Exponencial	0,1108	0,494	642,00	77,6	0,813	0,011

$C_0$  = Efeito Pepita;  $C_0+C$  = patamar; a = alcance;  $C/(C_0+C)$  = Índice de dependência espacial (IDE);  $r^2$  = coeficiente de determinação; SQR = Soma dos quadrados dos resíduos.

Para os três primeiros componentes principais é observada dependência espacial, que é o aumento gradual da semivariância até a distância em que se estabiliza (patamar). O alcance do CP1 é de 1060 m, o que indica que até esta distância há a dependência espacial da atuação em conjunto dos fatores R e P com o contraste do fator C neste componente. O alcance de CP2 é 592 m, mostrando dependência espacial dentro desta distância do contraste dos fatores K e LS. E o alcance de 642 m para CP3, onde a dependência espacial dentro desta distância

mostra a atuação direta dos fatores K e LS com a perda de solo em determinadas áreas. A proximidade dos alcances do CP2 e CP3 pode ser explicada pela influência dos fatores naturais como discriminantes em ambos. Os pontos localizados dentro destas distâncias são semelhantes e quanto maior a distância, maior a variância e menor a covariância, aumentando a independência entre os pontos (LANDIM, 1998).

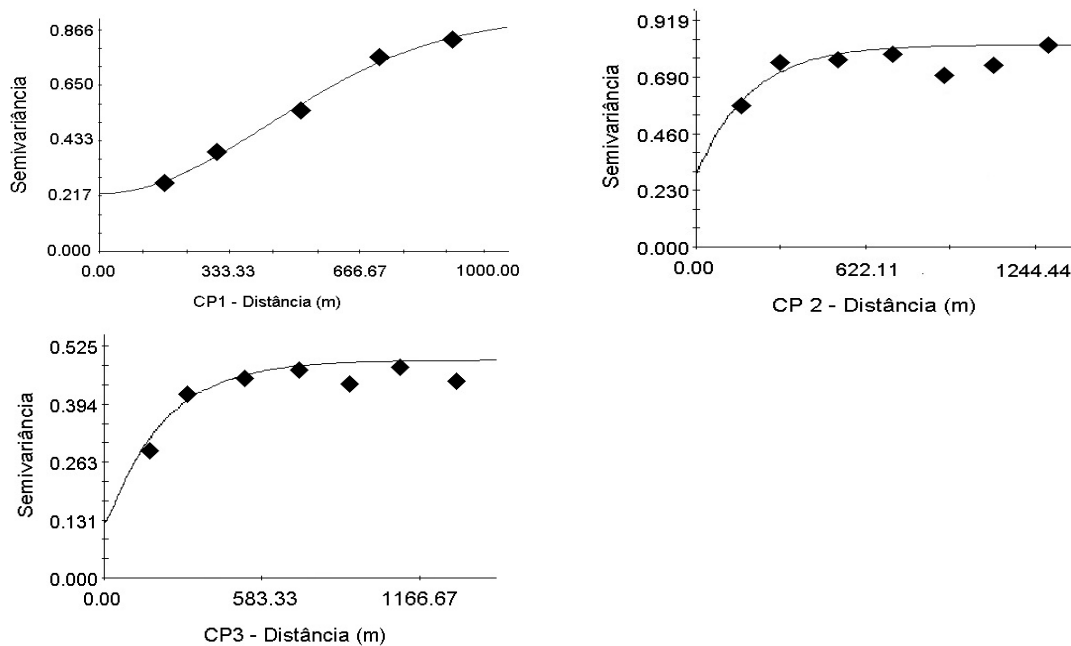


Figura 22. Semivariogramas ajustados para os três componentes principais (CP1, CP2 e CP3).

Os valores do efeito pepita foram próximos a zero para os três componentes principais. Considerando a distância da amostragem, esse parâmetro indica a variabilidade não explicada dos dados (SOARES, 2006), sendo mais precisa quanto menor seu valor (VIEIRA, 2000).

O índice de dependência espacial (IDE), de acordo com ZIMBACK (2001), mostrou uma forte dependência espacial para CP1 e CP3 (acima de 75%). Para CP2 foi moderada (64%), o que pode ser atribuído à localização pontual da atuação dos fatores de maior carga neste componente. Segundo VIEIRA (1997), a maior proporção da variância estrutural (C) e do patamar ( $C_0 + C$ ) indica maior confiança nas estimativas,

uma vez que a continuidade do fenômeno e a semelhança entre os valores próximos serão maiores (covariância) e a variância menor.

Posteriormente ao ajuste dos modelos e parâmetros, os dados foram interpolados pela krigagem ordinária com a finalidade de mapear a interação dos fatores de perda do solo, com base nos três componentes principais, resultando nos mapas de isolinhas (Figura 23, Figura 24 e Figura 25).

Os mapas de isolinhas refletem em conjunto 74,94% da variabilidade dos fatores de perda de solo contidos na área. A distribuição dos componentes principais revela a maior influência da textura e do relevo na perda de solo, mostrando a atuação dos fatores K e LS na maior parte da área. TOY, et al. (2002) afirmam que solos com altos teores de areia possuem maior permeabilidade, contudo, o horizonte textural restringe a infiltração da água e a baixa coesão de partículas facilita o desprendimento e transporte podendo resultar em aumentos significativos de erosão. O relevo também se mostra de maior influência, uma vez que compõe a paisagem em diferentes formas, resultando no direcionamento de fluxo do escoamento superficial (BLANCO & LAL, 2010).

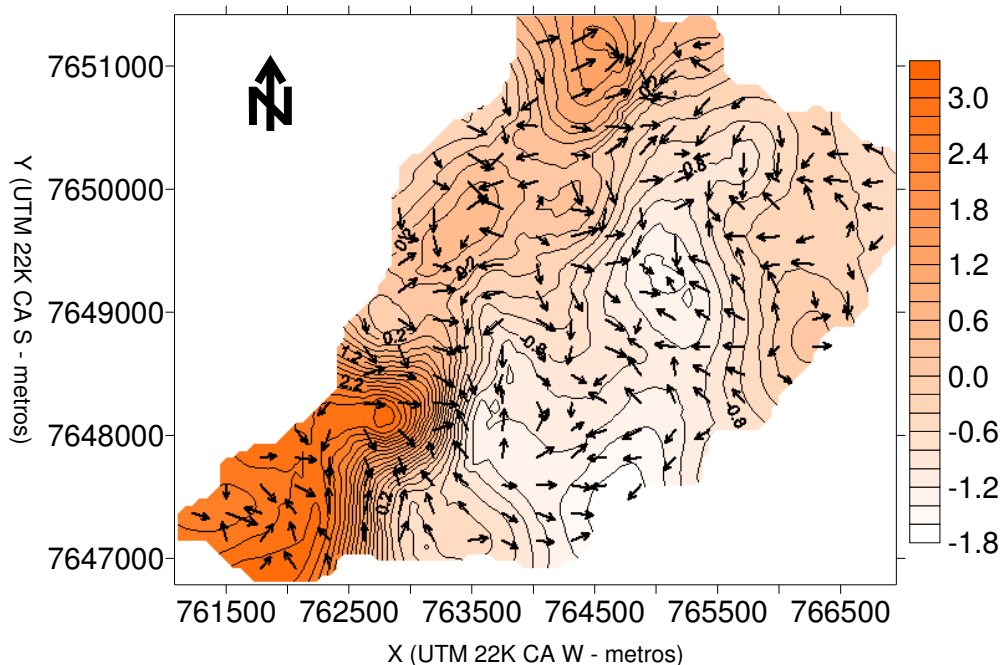


Figura 23. Mapa de isolinhas para CP1 e os vetores de escoamento superficial.

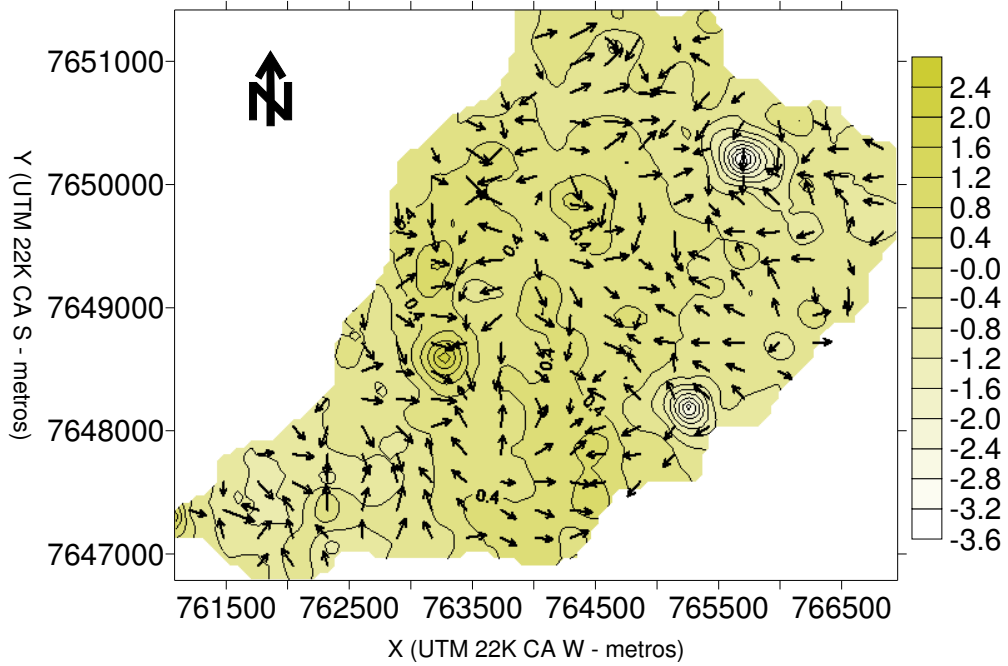


Figura 24. Mapa de isolinhas para CP2 e os vetores de escoamento superficial.

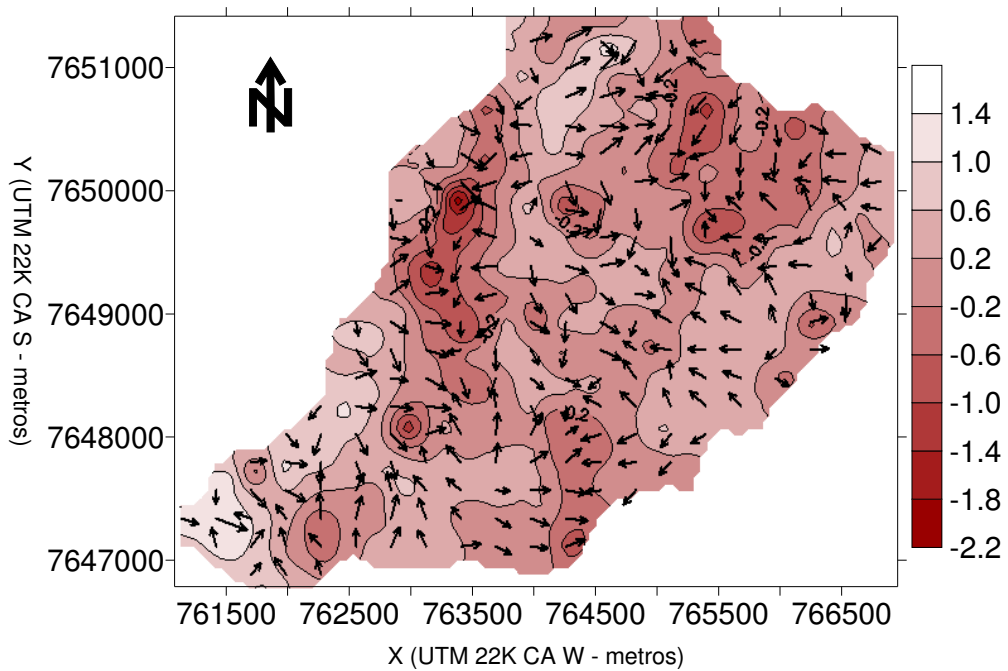


Figura 25. Mapa de isolinhas para CP3 e os vetores de escoamento superficial.



A distribuição dos fatores R e P em contraste com C contida em CP1 mostra menor variabilidade espacial com maior alcance e aparece altamente concentrado próximo a área urbana, nas maiores cotas do terreno (grupo 4 da ACP, discriminado pelos fatores R e P) (Figura 26).

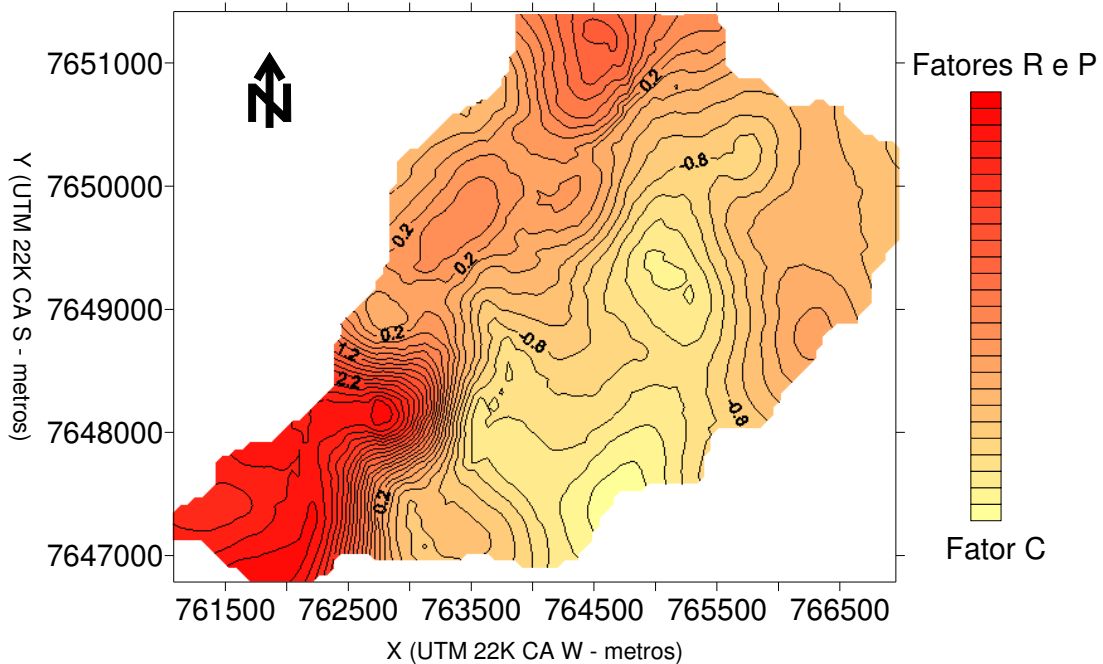


Figura 26. Distribuição da atuação dos fatores contida em CP1. (■) fatores R e P e (■) fator C.

Tal efeito pode ser explicado pela impermeabilização da área de entorno, impedindo a infiltração da água da chuva e potencializando seu escoamento superficial (BLANCO & LAL, 2010). Os pontos de vazão desta água tornam-se locais sensíveis, onde a perda de solo é pronunciada (FERRAZ ET AL., 2008). Tal resultado reflete a situação crítica da área, uma vez que apresenta um depósito irregular de resíduos urbanos e o crescente processo erosivo que aumenta a voçoroca já formada no local. Na parte superior do mapa também é possível observar uma área menor com influência do CP1, mostrando concentração do fluxo de água. Nas áreas de menor cota, próximos aos canais de escoamento, observa-se a influência da cobertura vegetal (grupo 1 da ACP) atuando nas áreas de proteção permanente e remanescentes (cobertura superficial permanente).

O contraste dos fatores K e LS contido em CP2 possui maior variabilidade espacial em relação a CP1 e mostra a atuação do fator K ocorrendo em áreas específicas (Figura 27). Estes fatores aparecem em escala gradual com o fator topográfico em áreas de menor altitude, principalmente em zonas côncavas, onde a influência do fator K é menor (grupos 5 e 6 da ACP). Estas áreas, com grande deposição de material sedimentar, mostram o papel do relevo no deslocamento de sedimentos, evidenciando a variação de perda de solo em relação à paisagem. Este resultado se aproxima do encontrado por SALCHOW & LAL (2001), que observaram pequena correlação entre o fator de erodibilidade e o fator topográfico, porém ambos de maior influência na ACP e de SOUZA et al. (2003) e SANCHES et al. (2009) que observaram maior variabilidade espacial nestas áreas. Já nas áreas pontuais com forte característica convexa a atuação do fator K é dominante, revelando menor influência do relevo.

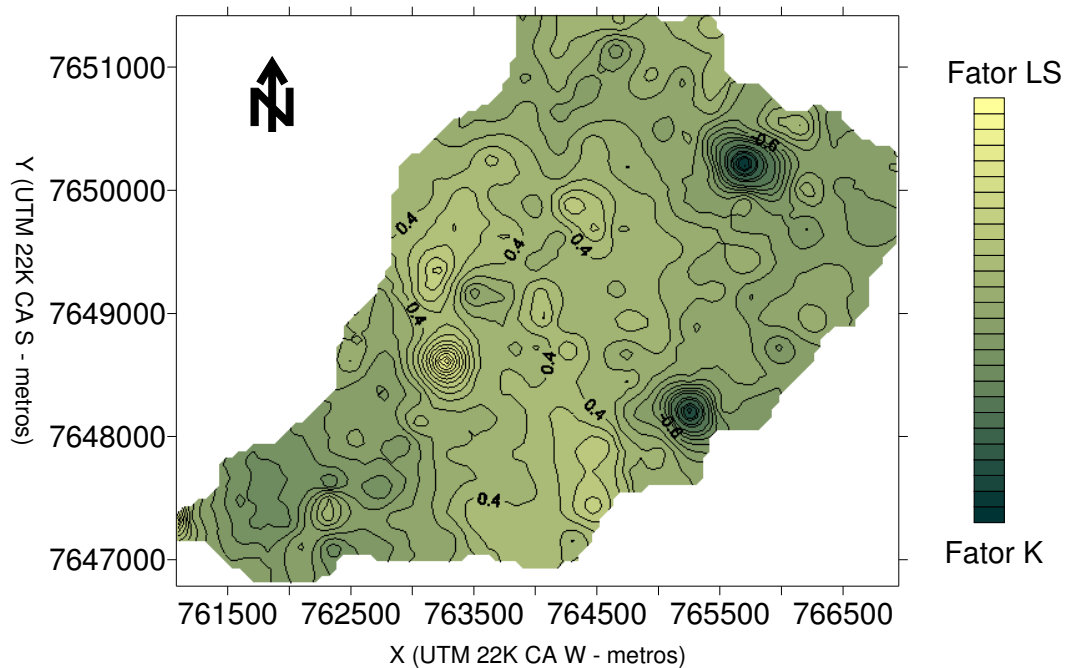


Figura 27. Distribuição da atuação dos fatores contida em CP2. (■) fator LS e (■) fator K.

A distribuição dos fatores K e LS diretamente relacionados aos PNE contida em CP3 também possui maior variabilidade espacial e encontra-se em áreas específicas, principalmente nas encostas de declive mais suavizado e côncavas (Figura 28). Segundo TOY et al. (2002) também observam a influência da erosividade da chuva nestes locais, uma vez que em tais setores da paisagem sua energia é potencializada, além do fator topográfico acentuar sua atuação na granulometria de baixa coesão (HAAN et al., 1994). Aqui, a atuação contrastante dos grupos com maior especificidade é destacada (grupos 5 e 6 da ACP) em função do potencial natural de erosão (PNE).

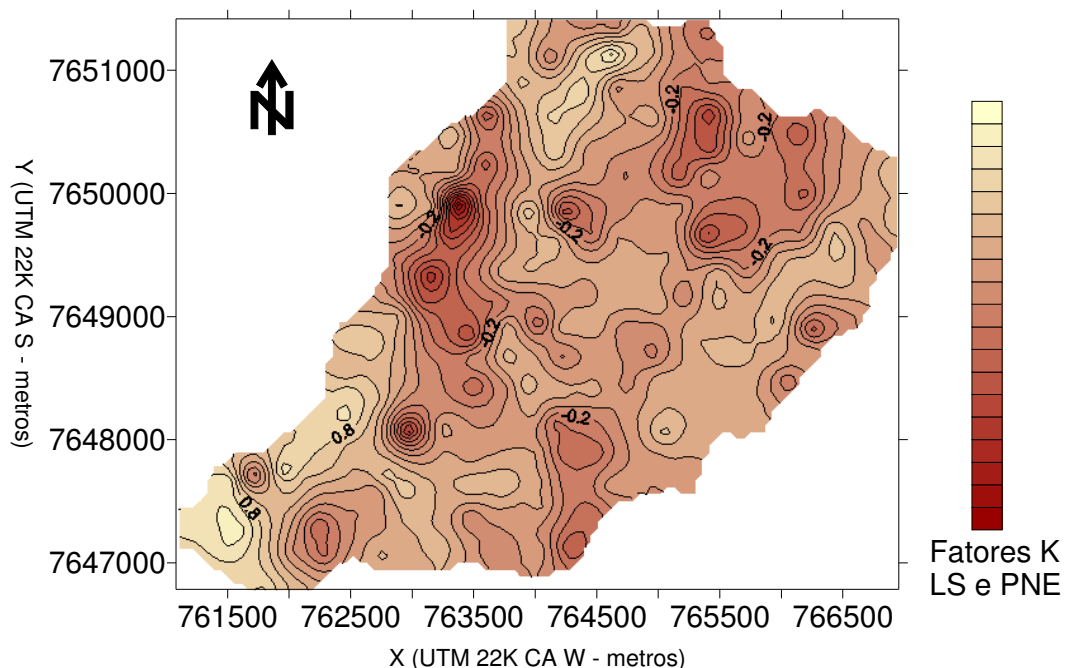


Figura 28. Distribuição da atuação dos fatores contidos em CP3. (■) fatores K, LS e PNE.

Assim, a área se mostra frágil com relação ao processo erosivo, como observado por PISSARRA et al. (2006), e de acordo com a correlação de Pearson isso ocorre pela atuação do fator K, devido ao caráter textural arenoso/médio. Já as análises multivariadas indicaram a atuação do fator K e de outros fatores em pontos específicos devido suas técnicas de maior sensibilidade. A fração areia, sendo predominante, é facilmente erodida, isto é, desagregada pelas gotas de chuva e transportada a longas

distâncias por alta velocidade de enxurrada potencializada pelo relevo (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2008). Deste modo, mesmo os solos arenosos sendo muito permeáveis, durante uma chuva intensa o escoamento superficial pode ocasionar maior perda de solo pela baixa coesão entre estas partículas (HAAN et al., 1994). Somado a isso, os resultados indicam que a influência dos demais fatores de perda de solo ocorre em zonas específicas da paisagem, o que permite o planejamento por meio da delimitação de zonas de manejo de acordo com suas características (SANCHEZ et al., 2005) e controle do processo erosivo, otimizando o uso de recursos e tornando as ações conservacionistas do solo mais efetivas.

## 5. CONCLUSÕES

As análises de agrupamento e de componentes principais forneceram componentes interpretáveis sendo o primeiro correlacionado com os fatores R e P em contraste com C, o segundo com o fator K em contraste com o LS e o terceiro com os fatores K e LS diretamente relacionados.

A análise multivariada em associação com a geoestatística permitiu a avaliação da variabilidade espacial dos fatores de perda de solo.

Os fatores de perda de solo se mostraram relevantes ao longo da área com influência da erodibilidade, segundo a correlação, e a análise de componentes principais mostrou a atuação dos outros fatores em áreas específicas.

## 6. IMPLICAÇÕES

O entendimento das interações locais dos fatores no processo erosivo é importante, pois além das informações essenciais de seu comportamento, traz novos elementos que complementam os subsídios para o planejamento do uso, manejo e conservação do solo de forma eficiente e otimizada.

Este estudo abordou várias metodologias para análise destas interações, que oferece juntamente com as informações essenciais uma melhor compreensão dessas interações, evidenciando de forma consistente e muitas vezes pontual, as estruturas de correlação que não seriam captadas pelas ferramentas clássicas de análise. Para o escopo deste trabalho, esta metodologia mostrou resultados satisfatórios e respondeu aos questionamentos propostos. No entanto, em relação aos estudos de perda e conservação do solo, alguns pontos devem ser observados e aprimorados para o entendimento e aplicação do conhecimento obtido.

Dentre eles, pode-se destacar, com relação à análise multivariada, a aplicação da Análise Fatorial, que permite o ajuste dos eixos fatoriais que após rotação facilita a interpretação dos resultados e tornando-os pragmaticamente mais significativos. E quanto a análise espacial, a decomposição dos fatores por meio da obtenção da matriz de covariâncias, de modo a se obter a dependência das variáveis no espaço.

Espera-se assim, que este trabalho contribua na compreensão dos processos da perda de solo e principalmente sobre a adoção e aplicação integrada das ferramentas analíticas disponíveis de forma ampla e efetiva.

## 7. REFERÊNCIAS

AGUIAR NETTO, A. de O. Manejo de bacias hidrográficas para a produção de água. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS E ÁGUA, 18., 2010, Teresina. **Anais...** CD-ROM.

AMARO FILHO, J.; ASSIS JUNIOR, R.N.; MOTA, J.C.A. **Física do solo**: conceitos e aplicações. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2008. 290p.

ANDRÉ, R.G.B.; MARQUES, V. da S.; PINHEIRO, F.M.A.; FERRAUDO, A.S. Identificação de regiões pluviometricamente homogêneas no Estado do Rio de Janeiro, utilizando-se valores mensais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 23, n. 4, p. 501-509, 2008.

BERTOL, I.; COGO, N.P.; BARBOSA, F.T.; SCHICK, J. Manejo e conservação do solo e da água no Brasil: uma retrospectiva até o presente e uma projeção para o futuro. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS E ÁGUA, 18., 2010, Teresina. **Anais...** CD-ROM.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 6. ed. São Paulo: Ícone, 2008. 355p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F.; BENATTI JUNIOR, R. **Equação de perdas de solo**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1975a. 25p. (Boletim Técnico, 21).

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F.; BENATTI JUNIOR, R. **Metodologia para a determinação de perdas por erosão**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1975b. 14p. (Circular, 44).

BLANCO, H.; LAL, R. **Principles of soil conservation and management**. New York: Springer, 2010. 617 p.

BORŮVKA, L.; MLÁDKOVÁ, L.; PENÍŽEK, V.; DRÁBEK, O.; VAŠÁT, R. Forest soil acidification assessment using principal component analysis and geostatistics. **Geoderma**, Amsterdam, n. 140, p. 374-382, 2007.

BRAGAGNOLO, N. Planejamento do uso da terra em microbacias hidrográficas. In: PRADO, R.B.; TURETTA, A.P.D.; ANDRADE, A.G. de (Ed.). **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. p. 137-139.

BUENO, B. de F. **Aplicação de técnicas multivariadas em mapeamento e interpretação de parâmetros do solo**. 2000. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

BUENO, C.R.P.; STEIN, D.P. Potencial natural e antrópico de erosão na região de Brotas, Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, Maringá, n. 26, v. 1, p. 01-05, 2004.

CALEGARI, A. COSTA, A. Sistemas conservacionistas de uso de solo. In: PRADO, R.B.; TURETTA, A.P.D.; ANDRADE, A.G. de (Ed.). **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. p. 279-307.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.; DRUCK, S.; CARVALHO, M.S. Análise espacial e geoprocessamento. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V. (Ed.) **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. p. 21-52.



CAMARGO, E.C.G.; DRUCK, S.; CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V. (Ed.) **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. p. 79-122.

CAMPOS, M.C.C.; MARQUES JUNIOR, J.; MARTINS FILHO, M.V.; PEREIRA, G.; SOUZA, Z.M. de; BARBIERI, D.M. Variação espacial de perda de solo por erosão em diferentes superfícies geomórficas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 9, p. 2485-2492, 2008.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B. Determinação da matéria orgânica. In: Van RAIJ, B.; ANDRADE, C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas: IAC, 2001. p. 173-180.

CAPECHE, C.L.; MACEDO, J.R. de; PRADO, R.B.; PIMENTA, T.S.; MELO, A. da S. Degradação do solo e da água: impactos da erosão e estratégias de controle. In: EMBRAPA SOLOS. **Curso de recuperação de áreas degradadas - a visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos e Petrobras, 2008. p. 105-133.

CARVALHO, D.F. de; CRUZ, L.S. da; PINTO, M.F.; SILVA, L.D.B.; GUERRA, J.G.M. Características da chuva e perdas por erosão sob diferentes práticas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, n. 13, v. 1, p. 3-9, 2009.

CASTRO, A.G.; VALÉRIO FILHO, M. Simulação da expectativa de perdas de solo em microbacia sob diferentes manejos florestais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 21, p. 419-426, 1997.

CATI – Coordenadoria de Assistência Técnica Integral. **Programa Estadual de Microbacias Hidrográficas do Estado de São Paulo**, 2007. Disponível em: <[http://www.cati.sp.gov.br/Cati/\\_projetos/pemh/pemh.php](http://www.cati.sp.gov.br/Cati/_projetos/pemh/pemh.php)> Acesso em: 06 set. 2010.

CHAER, G.M. Monitoramento de áreas recuperadas ou em recuperação. In: EMBRAPA SOLOS. **Curso de recuperação de áreas degradadas**: a visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação. Rio de Janeiro: Embrapa Solos e Petrobras, 2008. p. 212-228.

CORREA, A.M.C.; ROLOFF, G.; SILVA, I.C. Erosão real e estimada através da RUSLE em estradas florestais, em duas condições de solo e relevo e quatro perfis de solo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 76, p. 57-66, 2007.

DAY, P.R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 545-566.

DE MARIA, I. C.; VIEIRA, S. R.; LOMBARDI NETO, F.; DECHEN, S. F.; CASTRO, O. M. de. **Caracterização da variabilidade espacial da fertilidade do solo**. Microbacia do Córrego São Joaquim (Município de Pirassununga, SP). Campinas: IAC, 1992. p. 53-64 (Documentos, 29).

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

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; FAGANELLO, A.; COGO, N.P. Agricultura conservacionista no Brasil: uma análise do conceito à adoção. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS E ÁGUA, 18., 2010, Teresina. **Anais...** CD-ROM.

DONZELI, P. L.; VALÉRIO FILHO, M.; PINTO, S. dos A. F.; NOGUEIRA, F. de P.; ROTTA, C. L. LOMBARDI NETO, F. **Técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao diagnóstico básico para planejamento e monitoramento de microbacias hidrográficas**. Microbacia do Córrego São Joaquim (Município de Pirassununga, SP), Campinas: IAC, 1992. p. 91-119 (Documentos, 29).

EMBRAPA. Secretaria de Administração e Estratégia. **V Plano Diretor da Embrapa: 2008-2011-2023**. Brasília: Embrapa, 2008. 44 p.

ESBENSEN, K.H. **Multivariate data analysis: in practice**, 5th.ed. Oslo: Camo, 2002. 598 p.

FARINASSO, M; CARVALHO JUNIOR, O.A. de; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; RAMOS, V.M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS – Equação Universal da Perda de Solos utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba-PI-MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Campinas, n. 2, p. 73-85, 2006

FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES JUNIOR, A. P. Conseqüências da ocupação urbana na dinâmica das nascentes em Belo Horizonte – MG. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE MIGRAÇÕES: “migrações e desenvolvimento territorial”. CEDEPLAR/FACE/UFMG - Belo Horizonte, MG, 12 a 14 de agosto de 2009.

FERRAZ, F. F. de B. Sedimentos finos em microbacias hidrográficas. In: LIMA, W.P.; ZÁKIA, M.J.B. (Ed.). **As Florestas plantadas e a água: implementando o conceito da microbacia como unidade de planejamento**. São Carlos: Rima, 2006. p. 107 – 140.

FERRAZ, R.P.D.; DONAGEMMA, G.K.; ROSSI, C.Q.; POLIDORO, J.C. Fundamentos de morfologia, pedologia, física e química do solo de interesse no processo de

recuperação de área degradada. In: EMBRAPA SOLOS. **Curso de recuperação de áreas degradadas** - a visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação. Rio de Janeiro: Embrapa Solos e Petrobras, 2008. p. 09-63.

FERREIRA, M.M. Caracterização física do solo. In: JONG van LIER, Q. de (Ed.) **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 01-28.

HAAN, C.T.; BARFIELD, B.J.; HAYES, J.C. **Design Hydrology and sedimentology for small catchments**. San Diego: Academic Press, 1994. 578 p.

HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman. 2005. 593p.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. 1981a. São Paulo: Divisão de Minas e Geologia Aplicada. v. 1, n.6.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. 1981b. São Paulo: Divisão de Minas e Geologia Aplicada. v. 1, n.5.

JOLLIFFE, I.T. **Principal component analysis**, 2nd.ed. New York: Springer, 2002. 491 p.

LAGROTTI, C.A.A. **Planejamento agroambiental do município de Santo Antônio do Jardim – SP: estudo de caso na microbacia hidrográfica do córrego do Jardim**. 2000. 115f. Thesis (Doutorado em Engenharia Agrícola.) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas, 2000.

LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Ed. UNESP, 1998. 226 p.

LANDIM, P.M.B. Sobre Geoestatística e mapas. **Terræ Didática**, Campinas, v. 2, n. 1, p. 19-33, 2006.

LEÃO, M.G.A.; MARQUES JUNIOR, J.; SOUZA, Z.M. de; PEREIRA, G.T.; Variabilidade espacial da textura de um Latossolo sob cultivo de citrus. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 1, p. 121-131, 2010.

LIMA, J.S. de S.; OLIVEIRA, R. B. de; SILVA, S. de A. Estudo da fertilidade do solo em lavoura de café conilon utilizando análise multivariada e geoestatística. In: SIMPÓSIO DE GEOESTATÍSTICA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 2009, Botucatu. **Anais...** Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 2009. 1 CD-ROM.

LOMBARDI NETO, F. **Uso e manejo do solo e da água**: manejo e conservação do solo. Microbacia do Córrego São Joaquim (Município de Pirassununga, SP). Campinas: IAC, 1992. p. 65-84 (Documentos IAC, 29).

LOMBARDI NETO, F. BERTONI, J. **Índice de erodibilidade de solos do Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1975. 12p. (Boletim Técnico, 27).

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas. **Bragantia**, Campinas, v. 51, n. 2, p. 189-196, 1972.

LOMBARDI NETO, F.; PASTANA, F.I. Relação chuvas-perdas por erosão. **Bragantia**, Campinas, v. 31, n. 17, p. 221-234, 1972.

LOMBARDI NETO, F.; SILVA, I.R.; CASTRO, O.M. Potencial de erosão das chuvas no Estado de São Paulo. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 3., 1980, Recife, PE. **Anais...** 13.A.

MANZIONE, R.L.; RODRIGUES, J.B.T.; ZIMBACK, C.R.L. Análise multivariada aplicada na definição de zonas de manejo da acidez do solo. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2002, Viçosa, MG. **Anais...** Viçosa. Disponível em: < [www.centreinar.org.br/siap2007/siap2002/artigos/siap020.pdf](http://www.centreinar.org.br/siap2007/siap2002/artigos/siap020.pdf)>. Acesso em: 1 nov. 2010.

MARTÍN, N.F.; BOLLERO, G.; BULLOCK, D.G. Associations between field characteristics and soybean plant performance using canonical correlation analysis. **Plant and Soil**, The Hague, n. 273, p. 39-55, 2005.

MARQUES, J.J.G.S.M.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; LIMA, J.M.; SILVA, M.L.N.; CAROLINO de SÁ, M.A. Adequação de métodos indiretos para estimativa da erodibilidade de solos com horizonte B textural no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 21, p. 447-456, 1997.

MELÉM JUNIOR, N.J.; FONSECA, I.C. de B.; BRITO, O.R.; DECAËNS, T.; CARNEIRO, M.M.; MATOS, M. de F.A. de; GUEDES, M.C.; QUEIROZ, J.A.L. de; BARROSO, K. de O. Análise de componentes principais para avaliação de resultados analíticos da fertilidade de solos do Amapá. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, n. 3, p. 499-506, 2008.

MELLO, G. de; BUENO, C.R.P.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de perdas de solo, do potencial natural e risco de erosão em áreas intensamente cultivadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 315-322, 2006.

MENDONÇA, I.F.C. de. **Adequação do uso agrícola e estimativa da degradação ambiental das terras da microbacia hidrográfica do Riacho Uma, Sapé-PB.** 2005. 158f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MINELLA, J.P.G. MERTEN, G.H.; REICHERT, J.M.; CASSOL, E.A. Processos e modelagem da erosão: da parcela à bacia hidrográfica. In: PRADO, R.B.; TURETTA, A.P.D.; ANDRADE, A.G. de (Ed.). **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. p. 105-121.

MINGOTI, S.A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada.** Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2007. 297p.

MOREIRA, M.C.; CECÍLIO, R.A.; PINTO, F. de A.C.; LOMBARDI NETO, F.; PRUSKI, F.F. Programa computacional para estimativa da erosividade da chuva no Estado de São Paulo utilizando redes neurais artificiais. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 14, n. 2, p. 88-92, 2006.

ODLARE, M.; SVENSSON, K.; PELL, M. Near infrared reflectance spectroscopy for assessment of spatial soil variation in an agricultural field. **Geoderma**, Amsterdam, n. 126, p. 193-202, 2005.

OLIVEIRA, J.B. de; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida.** Campinas: Instituto Agrônômico; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 64p.

PAIVA, F.M. de L. **Estudo comparativo entre três modelos de base física na modelagem hidrossedimentológica em microbacias na região semi-árida paraibana.** 2008. 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) -

Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

PISSARRA, T.C.T.; BORGES, M.J.; GALBIATTI, J.A.; RODRIGUES, F.M.; POLITANO, W. Análise morfométrica da microbacia hidrográfica do córrego rico, região nordeste do Estado de São Paulo. **Cientifica**, Jaboticabal, v. 34, n. 2, p. 170-177, 2006.

RENCHER, A. **Methods of multivariate analysis**. 2nd. ed. New York: Wiley, 2002.715 p.

RIBEIRO, L. S.; ALVES, M. da G. Análise de Suscetibilidade à Erosão Laminar no Município de Campos dos Goytacazes/RJ através de Técnicas de Geoprocessamento. **Estudos Geográficos**, Rio Claro, n. 6, v. 1, p. 89-100, 2008

SALCHOW, E.; LAL, R. Relating crop yields to physiographic attributes in Ohio through principal component analysis. In: STOTT, D.E.; MOTHAR, R.H.; STEINHARDT, G.C. (Ed.). INTERNATIONAL SOIL CONSERVATION, 10., 1999, Pardue. **Sustaining the Global Farm**, p. 272-276, 2001.

SALES, S.J. **Análise Comparativa de metodologias para espaçamento entre terraços**. 1998. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

SALOMÃO, C.C. **Sistemas de plantio direto e convencional: um enfoque de análise de decisão**. 1990. 127f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

SANCHEZ, R.B.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T; SOUZA, Z.M. de. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em



diferentes superfícies geomórficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 489-495, 2005.

SANCHEZ, R.B.; MARQUES JUNIOR, J.; SOUZA, Z.M. de; PEREIRA, G.T. ; MARTINS FILHO, M.V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 4, p. 1095-1103, 2009.

SANTOS, D.G. dos. DOMINGUES, A.F.; GISLER, C.V.T. Gestão de recursos hídricos na agricultura: o Programa Produtor de Água. In: PRADO, R.B.; TURETTA, A.P.D.; ANDRADE, A.G. de (Ed.). **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. p. 353-376.

SANTOS-BREFIN, M. de L. M. **Plano de gestão estratégica para a Embrapa Solos, período de 2009 a 2012**: do contexto global ao cumprimento da missão e visão da Embrapa Solos – desafios. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. (Documentos, 111).

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Departamento de Proteção da Biodiversidade. *Cadernos da Mata Ciliar 1*. São Paulo: Cetesb, 2009. 35 p.

SILVA, A.M. da; RANZINI, M.; GUANDIQUE, M.E.G.; ARCOVA, F.C.S.; CICCO, V. de. Estudo integrado do processo erosivo numa microbacia experimental localizada no município de Cunha-SP. **Geociências**, São Paulo, n. 24, v. 1, p. 43-53, 2005.

SILVA, A.M. da; MELLO, C.R. de; CURI, N.; OLIVEIRA, P.M. de. Simulação da variabilidade espacial da erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica de Latossolos no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 32, p. 2125-2134, 2008.

SILVA, I.R. da; MENDONÇA, E. de S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.; V.H.; BARROS, N.F. de; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES,

J.C.L., (eds.). **Fertilidade do solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 275-374.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; LIMA, J.M. de; FERREIRA, D.F. Proposição de modelos para estimativa da erodibilidade de Latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 12, p. 2287-2298, 1999.

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

SILVA, S. de A. Variabilidade espacial de atributos de solo e folhas em lavouras de café arábica utilizando análise multivariada e geoestatística. 2009. 105f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal – Solo e Nutrição de Plantas) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2009.

SMIDERLE, O.J.; GIANLUPPI, D.; GIANLUPPI, V. **O Plantio Direto como Sistema de Produção**. Roraima: EMBRAPA, 2004. Disponível em: <<http://www.paginarural.com.br/artigo/784/o-plantio-direto-como-sistema-de-producao>> Acesso em : 6 set. 2010.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do meio ambiente**. 2. ed. Lisboa: IST Press, 2006. 214p.

SOUZA, C.K.; MARQUES JUNIOR, J.; MARTINS FILHO, M.V.; PEREIRA, G.T. Influência do relevo na variabilidade espacial de um Latossolo em Jaboticabal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 27, p. 1067-1074, 2003.

SOUZA, Z. M. de; MARQUES JUNIOR, J; PEREIRA, G.T; BENTO, M.J.C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar.

**Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Campina Grande, v. 8, n.1, p. 51-58, 2004.

SOUZA, Z. M. de; MARTINS FILHO, M.V.; MARQUES JUNIOR, J.M.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de fatores de erosão em Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Campina Grande, v. 25, n.1, p. 105-114, 2005.

SPAROVEK, G. **Indicadores para o planejamento conservacionista**. 1998. 70f. Tese (Livre-docência em Pedologia)– Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

STEIN, D.P.; PONÇANO, W.L.; SAAD, A.R. Erosão na bacia do Rio Santo Anastácio, oeste do Estado de São Paulo, Brasil. **Geociências**, São Paulo, v.22, n. 2, p. 143 - 162, 2003.

TIMM, N.H. **Applied multivariate analysis**. New York: Springer, 2002. 693 p.

TOMAZONI, J.C.; MANTOVANI, L.E.; BITTENCOURT, A.V.L.; ROSA FILHO, E.F. da. A sistematização da EUPS em SIG para quantificação da erosão laminar na bacia do Rio da Anta Gorda (PR). **Estudos Geográficos**, Coimbra, n. 3, v. 1, p. 1-21, 2006.

TOY, T.J.; FOSTER, G.R.; RENARD, K.G. **Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control**. New York: Willey, 2002.

VALLADARES, G.S.; GOMES, E.G.; MELLO, J.C.C.B.S. de; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C. dos; EBELING, A.G.; BENITES, V. de M. Análise dos componentes principais e método multicritério ordinais no estudo de Organossolos e solos afins. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 32, p. 285-296, 2008.

VIEIRA, S.R.; DE MARIA, I. C.; LOMBARDE NETO, F.; DECHEN, S. C. F.; CASTRO, O. M. de. **Caracterização da variabilidade espacial de propriedades físicas**. Microbacia do Córrego São Joaquim (Município de Pirassununga, SP). Campinas: IAC, 1992. p. 41-51 (Documentos, 29).

VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v. 56, n.1, p. 1-13, 1997.

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

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p.319-344.

WEILL, M. de A.; SPAROVEK, G. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP). I – Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 801-814, 2008.

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

ZANINI, H.L.H.T, AMARAL, L.A. do; ZANINI, J.R.; TAVARES, L.H.S. Caracterização da água da microbacia do Córrego Rico avaliada pelo índice de qualidade de água e de estado trófico. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 732-741, 2010.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.