

UNICAMP

Número: 420/2010

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

GLAUCIELEN FARIA RIBEIRO

**ESTUDO DOS FATORES DO MEIO FÍSICO QUE INFLUENCIAM A
CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DAS ÁGUAS DA BACIA
HIDROGRÁFICA VARGENS DE CALDAS, MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências
como parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Geociências.

Orientador: Profa. Dra. Sueli Yoshinaga Pereira

Co-orientador: Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva

CAMPINAS - SÃO PAULO

Agosto – 2010

Catálogo na Publicação elaborada pela Biblioteca do Instituto de Geociências/UNICAMP

Ribeiro, Glaucielen Faria.
F225e Estudo dos fatores do meio físico que influenciam a capacidade de
infiltração das águas da bacia hidrográfica Vargens de Caldas, Minas
Gerais/ Glaucielen Faria Ribeiro-- Campinas,SP.: [s.n.], 2010.

Orientador: Sueli Yoshinaga Pereira, Benedito Cláudio da Silva.
Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas,
Instituto de Geociências.

1. Bacia hidrográfica – Poços de Caldas (MG). 2. Infiltração.
3. Hidrologia. I. Pereira, Sueli Yoshinaga. II. Silva, Benedito Cláudio.
III. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.
IV. Título.

Título em inglês: Study of the factors that influence the infiltration capacity of water in the
basin Vargens de Caldas, Poços de Caldas/Minas Gerais.

Keywords: - Hydrographic basin – Poços de Caldas (MG);
- Infiltration;
- Hydrology.;

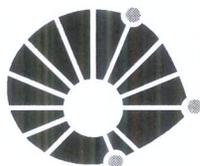
Área de concentração: Geologia e Recursos Naturais

Titulação: Mestre em Geociências.

Banca examinadora: - Sueli Yoshinaga Pereira;
- Alexandre Campana Vidal;
- Gerson Cardoso da Silva Junior.

Data da defesa: 17/08/2010

Programa de Pós-graduação em Geociências



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS NA
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

AUTORA: Glaucielen Faria Ribeiro

“Estudo dos Fatores do Meio Físico que Influenciam à Capacidade de Infiltração das Águas da Bacia Hidrográfica Vargens de Caldas, Minas Gerais.”

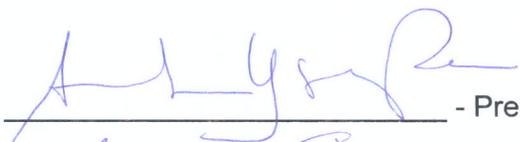
ORIENTADORA: Profa. Dra. Sueli Yoshinaga Pereira

Co-orientador: Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva

Aprovada em: 17 / 08 / 2010

EXAMINADORES:

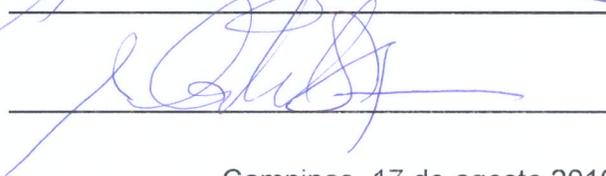
Profa. Dra. Sueli Yoshinaga Pereira

 - Presidente

Prof. Dr. Alexandre Campane Vidal



Prof. Dr. Gerson Cardoso da Silva Junior



Campinas, 17 de agosto 2010.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha querida mãe Elci (in memoriam) que sempre me apoiou nos estudos e sempre me incentivou a seguir em frente nos meus objetivos, por mais que os obstáculos se parecessem difíceis e intransponíveis.

Quando nada parecer surtir efeito em minha profissão, eu vou observar o Geólogo que trabalha as rochas, e o observo martelando sua rocha cerca de uma centena de vezes antes que ela dê o menor sinal de rachadura. Mas a centésima primeira martelada a divide em duas, e eu fico sabendo que isso não é obra dessa última martelada- e sim de todas as que vieram antes.

Jacob Riis

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela oportunidade da Vida.

À Profa. Dra. Sueli Yoshinaga Pereira pela orientação na aprendizagem, o que só foi possível mediante a confiança e respeito que a mim dedicou.

Ao CNPq pelo financiamento da pesquisa que resultou na minha dissertação de mestrado e ao Instituto de Geociências-UNICAMP por viabilizarem toda a infra-estrutura necessária ao desenvolvimento do meu trabalho.

Às secretárias da Pós-Graduação: Valdirene, Edinalva e Gorete pelo apoio, carinho e especial atendimento.

Aos meus pais Geraldo e Elci (*in memoriam*), por serem a razão e a certeza da minha vida, e assim por me conduzirem pelos caminhos mais corretos, por me lapidar para que eu realizasse tudo, que não fosse de outro modo, a não ser por amor.

Aos meus irmãos Glaucilene, Glaudecir e Gláucia, a minha cunhada Luciana e meu sobrinho Luckas pelo amor, respeito, apoio e confiança de uma vida sempre juntos.

Aos amigos do IG, pelos momentos de descontração: Bienvenido, Lobinho, Lenita, Sérgio, Veridiana, Sam, Rodrigo Dutra, Bruno, Melina, Lívia, Gracieli, Taty, Emílio, Sr. Aníbal, Guerreiro, Laércio e Cláudia.

Aos meus amigos especiais de Minas: Geraldo, Rafael e Paula pela amizade, força e pelas longas conversas de incentivo.

Às pessoas especiais: Fábio Iwashita pelo apoio e discussões no trabalho de campo e nas análises de geoestatística; Marquinhos pelo apoio sempre nas horas mais complicadas e urgentes; Rodrigo Salles pelo apoio principalmente no geoprocessamento; Andréa pelos ensinamentos da estatística e geoestatística; ao meu pai Geraldo pelo grande apoio no segundo trabalho de campo, pois sem ele não seria possível realizá-lo;

Enfim, a todos que eventualmente me ajudaram, preenchendo os espaços vazios, criados no decorrer deste “momento de mestrado”. Ao longo deste processo ficaram algumas certezas: não há produção individual! Não sou autora, sou co-autora, pois escrevi inspirada e iluminada por uma fonte inesgotável que jorra a partir dos escritos, das experiências vividas, e por tantos anônimos e veneráveis contribuidores, nessa e em tantas outras dimensões.

MUITO OBRIGADA!

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação e Justificativa	1
1.2 Objetivos.....	3
CAPÍTULO II	5
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Capacidade de Infiltração	5
2.2 Ensaios com Permêmetro <i>Guelph</i> em campo	7
2.3 Análise Morfométrica em Bacia hidrográfica	12
2.3.1 Área de drenagem e Perímetro	13
2.3.2 Forma da Bacia hidrográfica.....	13
2.3.2.1 Coeficiente de Compacidade.....	14
2.3.2.2 Fator de forma	14
2.3.2.3 Índice de Circularidade.....	15
2.3.3 Características do Relevo	15
2.3.4 Ordem dos cursos d'água.....	16
2.3.5 Densidade de drenagem	16
2.3.6 Sinuosidade do curso d'água	17
2.3.7 Fator de Assimetria	17
2.4 Estatística	18
2.4.1 Correlação.....	18
2.4.2 Análise de Componentes Principais.....	19
2.4.3 Geoestatística.....	20
2.4.3.1 Krigagem	23
2.5 Avaliação Multicriterial em SIG.....	24
CAPÍTULO III	29
ÁREA DE ESTUDO	29
CAPÍTULO IV	31
MÉTODOS E TÉCNICAS DA PESQUISA	31
4.1 Morfometria da bacia hidrográfica	31
4.2 Ensaios com o Permêmetro <i>Guelph</i> em campo, para determinação da Conductividade hidráulica	33
4.2.1 Procedimentos dos ensaios de campo com o Permêmetro <i>Guelph</i>	38

4.3 Granulometria.....	39
4.4 Cálculo da Condutividade hidráulica do campo saturado, pelo método do Permêmetro <i>Guelph</i>	40
4.4.1 Método de uma altura de carga (LAPLACE & GARDNER, 1958)	41
4.4.2 Método de uma altura de carga (REYNOLDS & ELRICK, 1985).....	42
4.4.3 Método de uma altura de carga (REYNOLDS & ELRICK, 1989).....	43
4.5 Análise Estatística	44
4.5.1 Correlação.....	45
4.5.2 Geoestatística.....	45
4.6 Avaliação Multicritérios	46
4.6.1 Procedimentos metodológicos.....	46
4.6.2 Espacialização dos Critérios.....	47
4.6.2.1 Permeabilidade do Solo	48
4.6.2.2 Uso e Ocupação do Solo.....	50
4.6.2.3 Declividade do terreno.....	51
4.6.2.4 Densidade de Lineamentos.....	55
4.7 Padronização dos Fatores.....	57
4.8 Definição dos Pesos dos Fatores	61
4.9 Mapa da Capacidade de infiltração da Bacia Hidrográfica Vargens de Caldas.....	63
CAPÍTULO V	65
RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
5.1 Morfometria da Bacia Hidrográfica Vargens de Caldas.....	65
5.2 Análise da Condutividade hidráulica obtida nos ensaios do primeiro campo	71
5.3 Análise da Condutividade hidráulica obtida nos ensaios do segundo campo.....	73
5.4 Granulometria.....	77
5.5 Estatística	79
5.5.1 Correlação.....	79
5.5.2 Geoestatística.....	81
5.6 Avaliação Multicritérios	85
CAPÍTULO VI	91
CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Permêmetro <i>Guelph</i> (Soto, 1999 <i>apud</i> Bielschowsky, 2005) e foto de um ensaio.	9
Figura 2.2 Bulbo de saturação de água no solo. Fonte: SOIL MOISTURE, 1991.	10
Figura 3.1 Localização geográfica da área de estudo.	30
Figura 4.1 Localização dos pontos de amostragem dos ensaios em campo com o Permêmetro <i>Guelph</i>	37
Figura 4.2 Permêmetro <i>Guelph</i> durante ensaios em campo.	39
Figura 4.3 Preparação das amostras para análise granulométrica.	40
Figura 4.4 Determinação do Fator de forma "C". Fonte: Elrick et al., (1985).	42
Figura 4.5 Mapa da condutividade hidráulica derivado da interpolação por Krigagem Ordinária.	49
Figura 4.6 Mapa de uso e ocupação do solo derivado de classificação supervisionada.	53
Figura 4.7 Mapa da distribuição da declividade de acordo com a área da bacia hidrográfica Vargens de Caldas.	54
Figura 4.8 Cálculo da densidade de lineamentos. Modificado de ESRI, 2010.	55
Figura 4.9 Mapa de densidade de lineamentos, com lineamentos de direção Norte. ...	56
Figura 5.1 Mapa da rede de drenagem. Ordenamento dos cursos d'água, segundo classificação de Strahler (1957).	69
Figura 5.2 Mapa da variação altimétrica da bacia hidrográfica Vargens de Caldas.	70
Figura 5.3 Comparação dos resultados dos valores da condutividade hidráulica calculados por	72
Figura 5.4 Análise comparativa dos valores da condutividade hidráulica do campo saturado.	76
Figura 5.5 Representação gráfica da distribuição granulométrica (%).	78

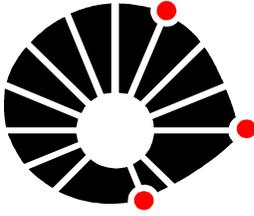
Figura 5.6 Análise das Componentes Principais entre as variáveis.	81
Figura 5.7 Histograma da variável condutividade hidráulica.....	82
Figura 5.8 Semivariograma isotrópico ajustado com o modelo Gaussiano na direção 0º (esquerda).	85
Figura 5.9 Mapa da variável condutividade hidráulica, calculado pela Krigagem Ordinária (direita).....	85
Figura 5.10 Mapa da capacidade de infiltração da bacia hidrográfica Vargens de Caldas.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Índices morfométricos calculados para a bacia hidrográfica Vargens de Caldas.	31
Tabela 4.2 Classificação da declividade segundo De Biase (1993).	32
Tabela 4.3 Características dos 32 pontos amostrais.	36
Tabela 4.4 Valores do parâmetro α sugeridos para tipos de solos.	43
Tabela 4.5 Escala de valores para comparação pareada dos fatores na Avaliação Multicritérios.	61
Tabela 4.6 Matriz de comparação pareada entre os fatores.	62
Tabela 5.1 Parâmetros morfométricos obtidos da bacia hidrográfica Vargens de Caldas.	66
Tabela 5.2 Distribuição das classes de declividade da bacia hidrográfica Vargens de Caldas.	68
Tabela 5.3 Coeficiente de condutividade hidráulica calculada por diferentes métodos.	71
Tabela 5.4 Coeficiente de condutividade hidráulica calculada por diferentes métodos.	74
Tabela 5.5 Resultados da granulometria e classificação textural dos solos.	78
Tabela 5.6 Matriz de correlação de Pearson.	80
Tabela 5.7 Parâmetros da estatística descritiva para a variável condutividade hidráulica.	82
Tabela 5.8 Pesos obtidos através da comparação pareada dos fatores.	85
Tabela 5.9 Valores de ocorrência de classes em km ² e percentuais relativos a área estudada.	90

LISTA DE SIGLAS

K_{fs} :	condutividade hidráulica do campo saturado
Φ_m :	Potencial matricial de fluxo
K:	condutividade hidráulica
ACP:	Análise de Componentes Principais
r:	Coeficiente de Pearson
VR:	Variáveis Regionalizadas
BLUE:	Best Linear Unbiased Estimate
SIG:	Sistema de Informação Geográfica
AMC:	Avaliação Multicritérios
CLP:	Combinação Linear Ponderada
MPO:	Média Ponderada Ordenada
PHA:	Processo Hierárquico Analítico
MCE:	MultiCriteria Evaluation
K_c :	Coeficiente de Compacidade
F:	Fator de Forma
IC:	Índice de Circularidade
MDE:	Modelo Digital de Elevação
Dd:	Densidade de drenagem
Sin:	Índice de sinuosidade
FA:	Fator de Assimetria
H:	Altura da carga hidráulica
FEAGRI:	Faculdade de Engenharia Agrícola
TFSA:	Terra fina seca ao ar
C:	Fator de forma
SPOT:	Systeme Probatoire d'Odsevation de La Terre
TIN:	Triangular Irregular Network
CETEC:	Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
Pós-Graduação em Geociências
Área de Geologia e Recursos Naturais**

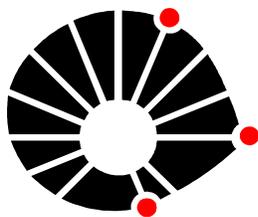
Estudo dos fatores do meio físico que influenciam à capacidade de infiltração das águas da Bacia Hidrográfica Vargens de Caldas, Minas Gerais

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Glaucielen Faria Ribeiro

O presente estudo se propõe a apresentar uma metodologia que permitirá analisar à capacidade de infiltração das águas da Bacia Hidrográfica Vargens de Caldas, com base nos elementos do meio físico natural e modificado. A área de estudo está localizada no município de Poços de Caldas, Sudoeste do Estado de Minas Gerais, e compreende uma área de cerca de 42km². Este estudo tem como objetivo analisar quais fatores do meio físico apresentam maior ou menor influência na capacidade de infiltração da bacia. O método utilizado para analisar à capacidade de infiltração foi à técnica de Tomada de Decisão Multicritérios, que combina e transforma dados espaciais e não-espaciais (entrada) em uma decisão resultante (saída). O SIG Idrisi 32 foi empregado como plataforma de gerenciamento, combinação e geração de novos dados, especialmente porque possui rotinas de apoio à decisão. Os planos de informação empregados na Avaliação Multicritérios foram: declividade do terreno, permeabilidade do solo (condutividade hidráulica), uso e ocupação do solo e densidade de lineamentos. Para cada plano de informação foi atribuído um peso, que simboliza a importância desse fator na análise da capacidade de infiltração. A sobreposição dos mapas foi realizada por meio do método da Avaliação Multicritérios denominado Combinação Linear Ponderada (CLP), que resultou no mapa da capacidade de infiltração em classes que variam de muito baixa a alta. As áreas com alta capacidade de infiltração estão situadas na margem direita e sul da bacia, região de montante, onde se encontram áreas com significativas manchas de cobertura vegetal de matas e reflorestamento; enquanto as áreas de baixa capacidade de infiltração situam-se na margem esquerda da bacia, região a jusante, são áreas onde predominam elevada taxa de ocupação urbana. Na planície aluvionar do Ribeirão das Vargens, as condições de infiltração são baixas, devido aos solos estarem em boa parte impermeabilizados, em função da ocupação humana intensa. Uma vez que parte expressiva destas áreas está comprometida, nesse aspecto faz com que tenha uma redução na capacidade de infiltração.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica Vargens de Caldas, Avaliação Multicritérios, Capacidade de infiltração.



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
Pós-Graduação em Geociências
Área de Geologia e Recursos Naturais**

**Study of the factors that influence the infiltration capacity of water in the basin
Vargens de Caldas, Poços de Caldas/Minas Gerais.**

ABSTRACT

**Master Degree Dissertation
Glaucielen Faria Ribeiro**

The current study intends to present a methodology that will allow the analysis of infiltration capacity of the studied hydrographic basin, based on natural and modified environment elements. The studied area is the Vargens de Caldas hydrographic basin at the Poços de Caldas municipality, Minas Gerais State, and it comprises an area of 42 km². The main objective of this study is to analyse which environmental factors have major or minor influence over the basin infiltration capacity. The method chosen was the Decision Support Multi-criteria that combines and transform spatial and non-spatial data (input) to a resultant decision (output). The GIS, Idrisi 32 was used as a management platform, combination and new data generation, because it has a decision support. The potential explanatory variables used in the multi-criteria evaluation were: terrain declivity, soil permeability (hydraulic conductivity), geology and soil use and soil occupation. To each layer was attributed a different weight corresponding to the proportional influence of this factor over the infiltration capacity. The criteria maps combination was carried out using the multi-criterion analysis, through the Weighed Linear Combination (WLC) method, creating a final map of infiltration capacity in class that range from low to high. The areas with high infiltration capacity are located in the right margin and south of the basin, where presents areas with significant presence of vegetation of forests and reforestation; while areas of low infiltration capacity are located in the left margin of the basin, predominate in these areas high rate of urban occupation. In the alluvial plain of Ribeirão of the Vargens, the conditions of infiltration are low because that the soils are largely impermeable, due to the intense human occupation. Since a significant proportion of these areas is compromised, this aspect makes that has a reduced in infiltration capacity.

Keywords: Vargens de Caldas basin, Multicriteria Evaluation, infiltration capacity.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação e Justificativa

A grande questão que permeia no Brasil e no mundo, principalmente no século XXI, é a questão da disponibilidade dos recursos hídricos, que ganharam atenção de pesquisadores, políticos e da sociedade em geral, preocupados com a diminuição da disponibilidade de água potável e o aumento dos conflitos relacionados ao seu uso. A situação atual de utilização e preservação inadequada dos recursos naturais tem como principal agente o homem, que é parte integrante do ecossistema e que muitas vezes atua como elemento ativo capaz de modificar paisagens, alterar solos, vegetações, condições hidrológicas e outras alterações propiciando um estado de desequilíbrio no sistema.

Segundo Tucci et al., (2007) os sistemas urbanos criam superfícies impermeáveis que não existem nas bacias hidrográficas, com isso geram desequilíbrios significativos que alteram os componentes do ciclo hidrológico natural. O ônus causado pela urbanização desordenada das bacias hidrográficas traz sérias conseqüências, por alterar substancialmente a drenagem e por causar agravos e desastres provocados pelo desequilíbrio no escoamento das águas. O autor ainda menciona que, os potenciais efeitos causados por uma ocupação desordenada numa bacia hidrográfica são: aumento do escoamento superficial e redução do tempo de escoamento, que provocam aumento nas vazões máximas e antecipam os picos de cheias; redução do escoamento subterrâneo, que causam rebaixamento do nível do lençol freático; redução nos processos de evapotranspiração e redução da infiltração da água no solo.

Neste contexto, a ausência de ações conservacionistas e o uso inadequado dos recursos hídricos têm comprometido muitas bacias hidrográficas. Embora ainda não seja considerada crítica, em sua totalidade, muitas bacias hidrográficas brasileiras indicam condições de comprometimento de seus componentes ambientais e estresse hídrico.

Portanto, a área de estudo está inserida numa região caracterizada como uma importante província mineral do Sudeste brasileiro, destacando-se pela diversidade e

quantidade de bens minerais de valor econômico.

O município de Poços de Caldas tem passado por um crescente processo de expansão e adensamento populacional, principalmente sobre áreas ambientalmente frágeis, como: várzeas, encostas e, por um processo dinâmico de crescimento econômico, resultante da expansão das atividades agrícola, turística, industrial e extração de bens minerais (Moraes, 2008).

Com base nas considerações da autora pode-se inferir que, a indústria e o setor de turismo são atividades antagônicas no que se refere à questão ambiental: o desenvolvimento do turismo baseado nas águas termais é fortemente dependente da conservação do meio ambiente, com prioridade para os recursos hídricos; enquanto as indústrias, juntamente com a mineração, se comportam como atividades econômicas potencialmente impactantes e poluidoras do meio ambiente. Na atividade agrícola, destaca-se através das observações de campo, o crescimento da atividade do cultivo de eucalipto, cujo uso deve ser feito mediante práticas intensivas de conservação, que nem sempre são observadas na área de estudo, levando a perdas de solo com prejuízo à produtividade, risco na disponibilidade hídrica da bacia, bem como o aumento de erosões e assoreamento dos corpos d'água.

Neste contexto, a área escolhida para o desenvolvimento desse estudo foi oportuna, pois a bacia do Ribeirão das Vargens desempenha um papel fundamental na região do Planalto de Poços de Caldas, principalmente no abastecimento de água subterrânea, e também por estar passando por ocupações irregulares sem maiores considerações com o meio físico e os recursos hídricos.

Nesse sentido, é fundamental estabelecer o uso e ocupação das terras de forma ordenada na bacia, pois se torna primordial para garantir a disponibilidade e regularidade hídrica dos mananciais, da manutenção do nível e da qualidade da água subterrânea, como formas de garantir a continuidade destas atividades econômicas pelas futuras gerações.

Portanto, há necessidade de identificar estratégias e diretrizes que equilibrem os diferentes interesses que regem a ocupação do espaço poços caldense e o uso dos recursos hídricos, através de ações que visam minimizar o risco de diminuição na disponibilidade hídrica da bacia, bem como no comprometimento dos fatores de

recarga; como por exemplo, diminuição das áreas de cobertura vegetal nos mananciais e redução da capacidade de infiltração da bacia.

Cabe salientar que, diante de uma realidade de recursos hídricos escassos, tanto para ações estruturais (estações de tratamento de água e esgoto e projetos de redução de perda de água) como para ações não estruturais (reflorestamento, conservação do solo) a elaboração de um mapa que estabeleça a condição espacial da infiltração se constitui numa importante ferramenta de planejamento territorial. Além disso, o tipo de informação que se pretende analisar no presente trabalho é fundamental para a adequada gestão integrada dos seus recursos hídricos, de forma a garantir à disponibilidade e a regularidade hídrica da bacia.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é analisar quais fatores do meio físico natural ou modificado influenciam a capacidade de infiltração das águas da bacia hidrográfica Vargens de Caldas, de forma a definir áreas potencialmente favoráveis à infiltração, gerando como produto um mapa da capacidade de infiltração da bacia.

Os **objetivos específicos** incluem:

- Identificar áreas na bacia que estão susceptíveis à redução da capacidade de infiltração, como consequência da intervenção antrópica (atividades urbanas, industriais, agrícolas, exploração mineral, etc);
- Elaborar mapas temáticos dos elementos do meio físico (hidrografia, fraturas, declividade do terreno, permeabilidade do solo, hipsometria) e um mapa do atual estágio de uso e ocupação do solo;
- Elaborar um banco de dados no Sistema de Informação Geográfica (SIG), a partir da seleção dos principais condicionantes do meio físico.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Capacidade de Infiltração

O conceito de capacidade de infiltração é aplicado ao estudo da infiltração para diferenciar o potencial que o solo tem de absorver água pela sua superfície, em termos de lâmina por tempo, da taxa real de infiltração que acontece quando há disponibilidade de água para penetrar no solo.

A precipitação, na sua forma mais comum que é a chuva, ao atingir o solo pode seguir várias direções: uma vez atingindo o solo, a água pode correr pela superfície ou infiltrar no solo. Outra parte do volume precipitado sofre interceptação pela vegetação, interceptando em folhas e caules. A taxa de interceptação é alta no início da precipitação e declina exponencialmente com o decorrer do tempo. Se a chuva é de baixa intensidade e duração, uma grande parcela pode ser interceptada. Por outro lado, se a chuva for forte e longa somente uma pequena parcela da água pode ser interceptada.

Tucci et al., (2007) descreve que se uma precipitação atinge o solo com intensidade menor que a capacidade de infiltração, toda a água penetra no solo, provocando uma progressiva diminuição da própria capacidade de infiltração, já que o solo encontra-se em condições de umedecimento. Se a precipitação continuar, pode ocorrer, dependendo da sua intensidade, um momento em que a capacidade de infiltração diminui tanto que sua intensidade se iguala à da precipitação. A partir deste momento, a parcela não infiltrada da precipitação escoar superficialmente e tem como destino imediato a rede de drenagem, que se encarrega de transportá-la à seção de saída da bacia.

Martins & Paiva (2001) definem capacidade de infiltração como sendo a taxa máxima com que um determinado solo pode absorver água em uma determinada condição. Os autores ainda salientam que, as condições de umidade, permeabilidade, temperatura do solo, profundidade, grau de compactação do solo e as condições de cobertura vegetal são os principais fatores que influenciam na capacidade de infiltração.

A condição ideal para uma alta capacidade de infiltração é um solo inicialmente seco; nestas condições, os efeitos entre as partículas do solo e a água mostram uma tensão que dirige a unidade para baixo no perfil de solo através da capilaridade. Com o aumento do teor de umidade do solo, as forças capilares diminuem, conseqüentemente a capacidade de infiltração também diminui.

Diante do exposto, serão mencionados a seguir alguns trabalhos envolvendo análises da capacidade de infiltração em bacias hidrográficas.

Estudos realizados por Mendonça (2001) em áreas preservadas na Floresta Nacional do Araripe para áreas desmatadas mostraram um aumento na densidade aparente dos solos e uma redução na matéria orgânica, umidade, porosidade e condutividade hidráulica. A alteração destes parâmetros levou à redução na capacidade de infiltração e um possível esgotamento do solo com conseqüente empobrecimento florestal.

Em estudos envolvendo a capacidade de infiltração pode ser citado o trabalho de Soares (2005) que analisou em escala regional as possíveis áreas com maior capacidade de infiltração da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, mais especificamente na porção paulista da bacia. O autor considerou como critérios de análise os elementos do meio físico que compõem a paisagem (geologia, geomorfologia, declividade, densidade de drenagem, pedologia, uso do solo e a precipitação). Utilizou a técnica de atribuição de pesos para cada elemento do meio físico, onde aplicou um fator de escala de 1 a 5, que por sua vez corresponde a maior (5) ou menor (1) influência deste elemento na capacidade de infiltração. Os resultados evidenciaram que as melhores áreas de infiltração situam-se nos contrafortes da Serra do Mar e em parte dos terrenos colinosos relacionados à bacia sedimentar de Taubaté.

Costa (2006) fez um estudo com base em princípios da ecologia da paisagem. Utilizou como critérios de análise os elementos do meio físico para determinação de áreas que representam a maior ou menor capacidade de infiltração: geologia, pedologia, hipsometria, uso e cobertura vegetal das terras e pluviosidade. Esses fatores foram ponderados com índices qualitativos e pesos relativos de acordo com o grau de influência da variável no processo de infiltração. Como resultado, foi obtido um mapa

das Zonas homogêneas segundo a capacidade de infiltração dos elementos da paisagem na Zona média e alta da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, SP.

Ainda nessa linha de abordagem, Pinheiro et al., (2009) determinaram a capacidade de infiltração dos solos da bacia experimental do Ribeirão Concórdia, Santa Catarina, em função do tipo de uso da terra e do manejo agrícola. O estudo foi desenvolvido a partir de ensaios de infiltração em diferentes manejos de solo agrícola e a capacidade de infiltração foi determinada em cada ponto amostral, com o emprego das equações de Horton e Kostiakov ajustadas. Como resultado obtido tem-se que, nos pontos amostrais em que a atividade desenvolvida era o cultivo do milho, o maior valor observado de capacidade de infiltração foi para o cultivo mínimo e o menor para as áreas com plantio direto. Já nas áreas com rotação de culturas, a capacidade de infiltração foi superior para o plantio convencional, devido à movimentação do solo ocasionado. Comparando-se as diferentes atividades exercidas nos pontos amostrais, os autores ainda observaram que os maiores valores de capacidade de infiltração se localizavam nas matas nativas e os menores, nos locais onde a atividade é a pastagem.

2.2 Ensaios com Permêmetro *Guelph* em campo

O Permêmetro *Guelph* é um permêmetro de furo e de carga hidráulica constante que mede a condutividade hidráulica saturada de campo acima do lençol freático. Foi desenvolvido por Reynolds & Elrick (1983), e posteriormente aperfeiçoado pelos mesmos na University of *Guelph*, Canadá.

É um aparelho leve e de fácil operação em campo, que possibilita a realização de ensaios de infiltração *in situ* para obtenção da condutividade hidráulica saturada (K_{fs}) e potencial matricial de fluxo (ϕ_m).

O permêmetro pode ser utilizado para efetuar medições de permeabilidade na superfície ou no perfil do solo por meio do fornecimento de água nos reservatórios, mantendo-se uma carga hidráulica constante. Para os cálculos da condutividade hidráulica, podem ser aplicadas nos ensaios duas ou mais cargas hidráulicas, sendo a altura máxima permitida pelo equipamento de 25,0cm. A limitação do número de alturas de cargas hidráulicas depende da capacidade do reservatório do permêmetro, visto que o reabastecimento da água durante o andamento do ensaio provoca o

aparecimento de parâmetros negativos (K_{fs}) ou valores de condutividade hidráulica menor do que os reais, devido à inclusão de ar preso durante a continuação do ensaio, fato esse verificado por Reynolds & Elrick (1985).

Cabe salientar que, permeabilidade e condutividade hidráulica têm significados similares, porque refletem uma propriedade intrínseca do solo que é a capacidade do mesmo de se deixar atravessar pela água. Assim, podemos ter os seguintes conceitos para cada denominação:

- Permeabilidade: é a capacidade que o solo possui de permitir o escoamento da água entre os seus espaços vazios.

- Condutividade hidráulica: parâmetro que representa a facilidade que o fluido tem para percolar, através do solo.

Frente à semelhança desses conceitos, permeabilidade e condutividade hidráulica possuem o mesmo significado no presente estudo.

O Permêmetro *Guelph* é composto por dois reservatórios de água, sendo um reservatório interno baseado no princípio de Mariotte, que controla a carga constante de água dentro do furo; e um reservatório externo, denominado tubo de acrílico com uma régua graduada, onde a água é introduzida; um tripé, que permite adaptar o aparelho em terrenos irregulares (Figura 2.1). Além disso, estão incluídas ferramentas como trado para abertura dos furos de sondagens, uma escova, uma bomba de vácuo e recipientes de água, que podem ser transportados facilmente para efetuar medições em locais de difícil acesso.

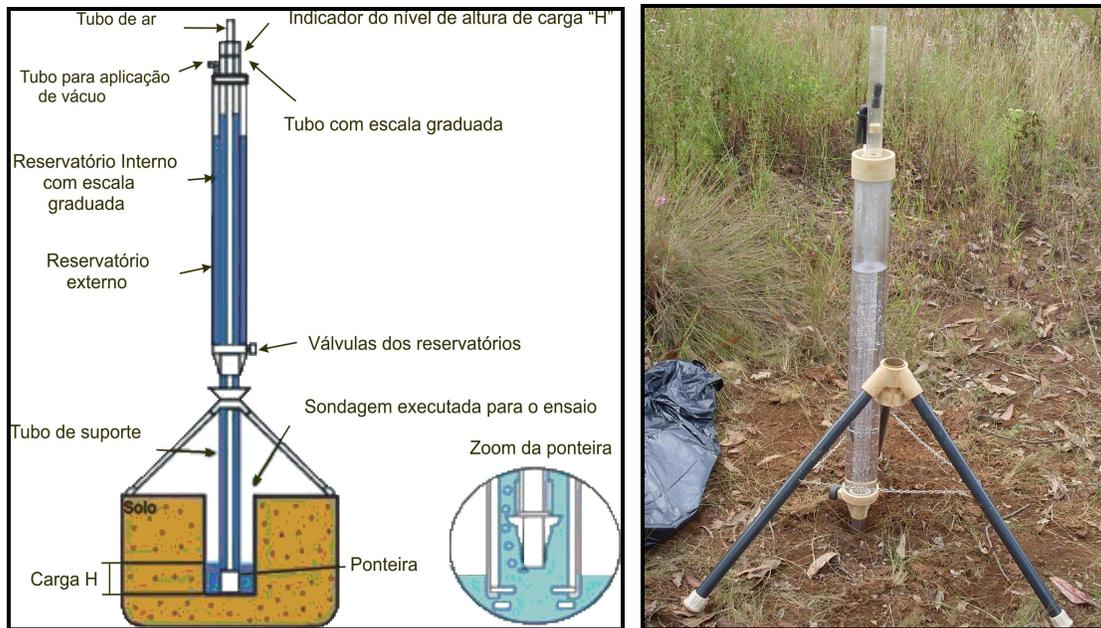


Figura 2.1 Permêmetro *Guelph* (Soto, 1999 *apud* Bielschowsky, 2005) e foto de um ensaio.

Ensaio em campo com o Permêmetro *Guelph* consistem primeiramente na abertura de furos de sondagem no solo, com auxílio de um trado manual até a profundidade a ser ensaiada. Em seguida, faz-se o abastecimento dos reservatórios (interno e externo) com água, pois estes permitem medir a taxa de fluxo de saída de água durante a realização do ensaio. Recomenda-se, para estudos em solos com condutividade hidráulica baixa, usar o reservatório interno, de forma a obter uma melhor resolução na medição da taxa de fluxo. Quando se trabalha com solos com condutividade hidráulica alta, recomenda-se a utilização do reservatório combinado (interno e externo). No topo e na base do reservatório existem válvulas que permitem encher os reservatórios e selecionar qual reservatório será utilizado no ensaio. Em seguida, estabelece-se à altura de carga hidráulica que será aplicada no permêmetro e posteriormente inicia-se o ensaio.

Cabe ressaltar que, durante o ensaio em campo, e após algum tempo da aplicação da carga hidráulica constante no permêmetro, uma pequena área ao redor do furo de sondagem estará saturada, formando um bulbo de saturação, conforme ilustra a Figura 2.2. Nesta região, o fluxo se torna constante possibilitando o cálculo da condutividade hidráulica do campo saturado (K_{fs}).

As características e dimensões deste "bulbo" de saturação da água no solo durante a execução de um ensaio variam com as características do solo ensaiado.

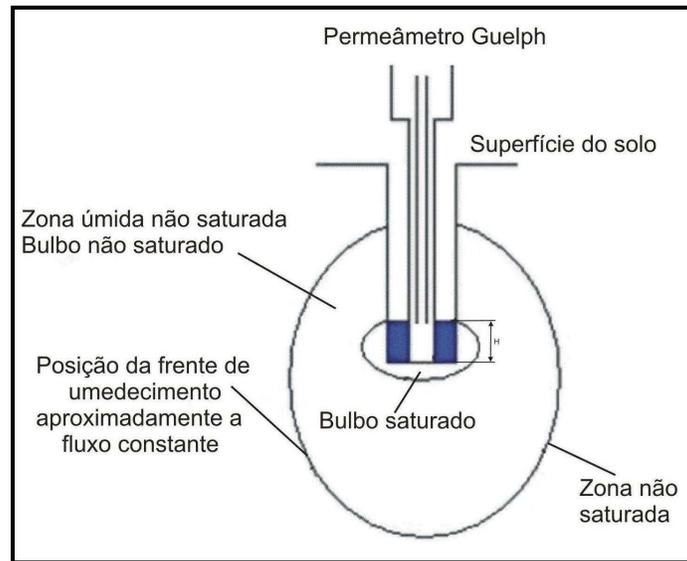


Figura 2.2 Bulbo de saturação de água no solo. Fonte: SOIL MOISTURE, 1991.

Diene (2004) ressalta que, na prática não se consegue a saturação total do solo, e sim uma chamada saturação de campo, identificando-se duas hipóteses que explicariam a permanência de ar nos vazios do solo: (i) diferentes velocidades do avanço da frente de saturação; (ii) altos valores de sucção, inibindo em certas regiões o avanço da frente da saturação. Entretanto, esta saturação de campo não se configura como uma desvantagem do ensaio, visto que a saturação total é muito difícil de ser atingida em uma situação real. Logo, a condutividade obtida em campo será a condutividade hidráulica da saturação de campo (K_{fs} – hydraulic conductivity at field saturation).

Para o cálculo da condutividade hidráulica do campo saturado (K_{fs}) o manual do Permêmetro *Guelph* sugere as seguintes equações:

$$K_{fs} = (0,0041)(Y)(R_2) - (0,0054)(Y)(R_1) \quad (1)$$

$$K_{fs} = (0,0041)(X)(R_2) - (0,0054)(X)(R_1) \quad (2)$$

onde:

K_{fs} = condutividade hidráulica do campo saturado, expressa em cm/s;

X e Y = constantes correspondentes à área dos reservatórios utilizados. Os

valores empregados para cálculo são $X= 2,17\text{cm}^2$ e $Y= 35,59\text{cm}^2$;

R_1 e R_2 = taxas de infiltração estabilizadas correspondentes a H_1 e H_2 respectivamente, em cm/s.

Com essas equações propostas pelo manual do Permêmetro *Guelph* podem ocorrer valores negativos da condutividade hidráulica, ocasionados por fenômenos das ações de capilaridades (sucção) ou por características anisotrópicas do solo que irão influenciar nos valores das vazões obtidas no ensaio.

Cabe ressaltar que, relatos de utilização do Permêmetro de *Guelph* no Brasil podem ser citados em alguns trabalhos:

Soto (1999) realizou ensaios com o Permêmetro *Guelph* em solos residuais, um no campo experimental da USP e outro no bairro de Jardim Medeiro em São Carlos/SP. O autor observou que, as condutividades hidráulicas saturadas nos solos foram praticamente iguais, quer se considerem os resultados de campo ou de laboratório. Os resultados de campo mostraram-se mais consistentes para o solo argiloso qualquer que tenha sido a técnica de interpretação do ensaio com o Permêmetro *Guelph*.

Aguiar (2001) estudou a viabilidade e eficiência do uso do Permêmetro de *Guelph* na medição da permeabilidade de coberturas de aterros e outros meios porosos heterogêneos relacionados a resíduos sólidos. Além disso, verificou a influência de diferentes fluidos na permeabilidade, utilizando como líquidos percolantes: água natural, água destilada e solução concentrada de sulfato de cálcio. Segundo o autor os resultados mostraram que, os valores das condutividades hidráulicas foram coerentes para os diferentes meios analisados, e indiferentes ao líquido percolante utilizado nos ensaios.

Lisboa (2006) realizou ensaios de campo com o Permêmetro *Guelph*, e ensaios de laboratório utilizando-se métodos indiretos que se apóiam na curva de retenção de água, obtidas em câmaras de pressão. O autor estudou a condutividade hidráulica em solos residuais não saturados da região de Viçosa/MG. Como resultado, fez-se uma comparação dos valores da condutividade hidráulica não saturada fornecidos pelo Permêmetro *Guelph* com os obtidos no laboratório. Verificou-se que, os valores da condutividade hidráulica saturada obtida no campo mostrou-se muito próximas das obtidas no laboratório. Isto se deve ao fato de que as condutividades hidráulicas

saturadas de campo (K_{fs}) e de laboratório (k) são similares e os parâmetros α não divergem muito em ambas as determinações.

Ainda nessa linha de abordagem Costa & Nishiyama (2007) analisou a influência dos diferentes tipos de usos do solo sobre a recarga da zona freática na bacia hidrográfica do Rio Uberabinha, MG.

Portanto, realizou ensaios *in situ* no qual utilizou o Penetrômetro de Impacto para obter o índice de compactação do solo e o Permêmetro *Guelph* para obter o coeficiente de permeabilidade (k) em diferentes condições de usos do solo. Os resultados evidenciaram uma significativa diferença nos valores de compactação e de infiltração da água entre as áreas ocupadas por atividades agrícolas e pecuárias, e nas áreas onde ainda se preservam as condições naturais. As condições impostas pela agricultura, à compactação dos solos e à infiltração de água influem diretamente sobre a dinâmica hídrica de toda a bacia. Além disso, o Permêmetro *Guelph* e o Penetrômetro de Impacto mostraram ser eficientes para estudos no âmbito do gerenciamento de bacias hidrográficas e gestão de recursos hídricos.

2.3 Análise Morfométrica em Bacia hidrográfica

A caracterização morfométrica de uma bacia é um dos mais comuns procedimentos executados quando se realiza qualquer estudo numa bacia hidrográfica, e tem como objetivo elucidar várias questões relacionadas ao entendimento da dinâmica hidrológica e ambiental da bacia. Pois conhecendo a dinâmica hidrológica de uma bacia, é possível minimizar enchentes e direcionar o fluxo de água pluvial para pontos estratégicos da bacia.

A dinâmica da água numa bacia hidrográfica é definida de acordo com as características físicas da mesma, uma vez que, dessas características as mais utilizadas são as morfométricas.

Segundo Tucci et al., (2007) as características morfométricas de uma bacia hidrográfica são aquelas que podem ser obtidas através de mapas, fotografias aéreas e imagens de satélite, como áreas, comprimentos, declividades e coberturas de solo.

Guerra & Guerra (2003) definem características morfométricas como sendo o estudo quantitativo das formas de relevo. No entanto, a morfometria fluvial corresponde ao estudo das bacias hidrográficas com vista a uma análise linear, areal e hipsométrica.

Para Villela & Mattos (1975) as características físicas de uma bacia constituem elementos importantes para avaliação de seu comportamento hidrológico, pois, ao estabelecerem-se relações e comparações entre eles e dados hidrológicos, podem determinar indiretamente os valores hidrológicos em locais nos quais não apresentam-se dados.

Christofolletti (1970) ressalta ainda que, a análise de aspectos relacionados à drenagem, relevo e geologia pode levar à elucidação e compreensão de diversas questões associadas à dinâmica ambiental local da bacia.

Assim sendo, a caracterização morfométrica objetiva obter índices quantitativos, através de parâmetros que caracterizam a forma da bacia, do relevo e da rede de drenagem. Portanto, os parâmetros morfométricos determinados para a caracterização da bacia hidrográfica Vargens de Caldas são os descritos a seguir:

2.3.1 Área de drenagem e Perímetro

A área de drenagem de uma bacia é o elemento básico para o cálculo de outros índices morfométricos. Corresponde a um volume total de água que pode ser gerado na bacia.

O perímetro da bacia corresponde ao comprimento de uma linha imaginária ao longo do divisor de água.

2.3.2 Forma da Bacia hidrográfica

De acordo com Villela & Mattos (1975) a forma da bacia é uma das características físicas que variam de acordo com a estrutura geológica do terreno.

A forma influencia no tempo de concentração que leva para a água dos limites da bacia chegar até o ponto de saída, que é seu exutório.

Os índices morfométricos que determinam a forma das bacias são: coeficiente de compacidade (K_c), fator de forma (F) e índice de circularidade (IC).

2.3.2.1 Coeficiente de Compacidade

O coeficiente de compacidade (K_c) é um índice que relaciona a forma da bacia com um círculo. Representa a relação entre o perímetro da bacia com uma circunferência de área igual ao da bacia hidrográfica.

Segundo Villela & Mattos (1975), o coeficiente de compacidade é um número adimensional que varia de acordo com a forma da bacia. Um coeficiente próximo à unidade corresponde à bacia circular, sendo que esta será mais susceptível a sofrer enchentes acentuadas. Enquanto, mais irregular e alongada for uma bacia maior será o coeficiente de compacidade, seu valor será significativamente superior a 1. O coeficiente de compacidade (K_c) foi determinado pela seguinte equação:

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (6)$$

sendo:

K_c = coeficiente de compacidade;

P = perímetro da bacia (km);

A = área de drenagem da bacia (km²).

2.3.2.2 Fator de forma

É outro índice que indica se a bacia possui maior ou menor tendência em sofrer enchentes. Uma bacia que exibe fator de forma baixo indica que é menos sujeita à enchentes que outra de mesmo tamanho, porém com fator de forma alto. Numa bacia com fator de forma alto, há maior possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrirem toda sua extensão, na qual a concentração de todo o deflúvio da bacia se dá num só ponto.

O fator de forma (F) relaciona a forma da bacia com um retângulo e, corresponde à relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia. O comprimento axial da bacia (L) é determinado, medindo axialmente do exutório até o ponto mais alto do talvegue. O fator de forma foi determinado, utilizando-se a seguinte equação:

$$F = \frac{A}{L^2} \quad (7)$$

sendo:

F = fator de forma;

A = área de drenagem da bacia (km²);

L = comprimento do eixo da bacia (km).

2.3.2.3 Índice de Circularidade

O valor do índice de circularidade da bacia que tende para o valor 1, indica que a bacia se aproxima da forma circular, favorecendo os processos de inundação (cheias rápidas). Quando o índice de circularidade for afastado da unidade, indica que a bacia tende a forma alongada, favorecendo o processo de escoamento. Para tanto, utilizou-se a seguinte equação:

$$IC = \frac{12,57 * A}{P^2} \quad (8)$$

sendo:

IC = índice de circularidade ;

A = área de drenagem (km²);

P = perímetro da bacia (km).

2.3.3 Características do Relevo

O relevo de uma bacia hidrográfica é um elemento que possui grande influência sobre os fatores hidrológicos e meteorológicos, pois o tempo de concentração da água e a velocidade de escoamento são determinados pela declividade do terreno. Além disso, a variação da altitude e a elevação média da bacia são importantes, por exercerem influência sobre a precipitação, evaporação, transpiração e sobre o deflúvio médio.

A declividade do terreno controla a velocidade do escoamento superficial,

afetando o tempo que leva para a água da chuva concentrar-se nos leitos fluviais. Além disso, a declividade influencia na magnitude dos picos de enchente, no teor de infiltração da bacia, na ocorrência de erosões nos solos. Todos esses fatores dependem da rapidez com que ocorre o escoamento da água sobre os terrenos da bacia.

Quanto à declividade do álveo, pode ser obtida dividindo-se a diferença entre a cota máxima (cabeceira) e a cota mínima (foz) do curso d'água principal pelo seu comprimento. A declividade do álveo representa a declividade dos canais fluviais, que define a velocidade de escoamento de um curso d'água.

2.3.4 Ordem dos cursos d'água

A ordem dos cursos d'água evidencia o grau de ramificação dos rios no interior da bacia. O ordenamento dos rios pode ser determinado seguindo os critérios introduzidos por Horton (1945) e Strahler (1957). Neste estudo, adotou-se a classificação proposta por Strahler (1957) e citado por Villela & Mattos (1975), em que todos os canais sem tributários, os que iniciam a rede de drenagem são designados de rios de primeira ordem. Quando dois canais de primeira ordem se unem é formado um rio de segunda ordem, e a união de dois rios de segunda ordem forma um rio de terceira ordem, podendo também receber tributários de primeira ordem, e assim sucessivamente (Tucci et al., 2007).

2.3.5 Densidade de drenagem

A rede de drenagem de uma bacia é formada pelo curso d'água principal e seus afluentes. Seu estudo evidencia a maior ou menor velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica, além de indicar a eficiência da rede de drenagem da bacia.

Villela & Mattos (1975) definiram densidade de drenagem como: a relação entre o comprimento total dos cursos d'água pela área de drenagem da bacia. Portanto, a densidade de drenagem é calculada pela seguinte equação:

$$Dd = \frac{L}{A} \quad (9)$$

onde:

Dd = densidade de drenagem (km/km²);

L = comprimento total dos cursos d'água (km);

A = área de drenagem da bacia (km²).

2.3.6 Sinuosidade do curso d'água

Indica a relação entre o comprimento do rio principal e o comprimento de seu talvegue, medido em linha reta. A sinuosidade é um dos fatores controladores da velocidade de escoamento no canal. A equação para cálculo do índice de sinuosidade é descrita como:

$$Sin = \frac{L}{Lt} \quad (10)$$

sendo:

Sin = índice de sinuosidade;

L = comprimento do canal principal (km);

Lt = comprimento do talvegue (km).

2.3.7 Fator de Assimetria

O fator de assimetria de uma bacia reflete o componente de deslocamento lateral do seu rio principal, perpendicularmente à direção de seu eixo. Esta migração é causada por processos fluviais internos e/ou forças tectônicas.

De acordo com Keller & Pinter (1996), se o fator de assimetria exibir valor maior que 50, indica que houve basculamento de blocos para a esquerda da bacia, mas se o fator de assimetria exibir valor menor que 50, isso indica que o basculamento de blocos ocorreu para à direita da bacia. O fator de assimetria foi calculado pela seguinte equação:

$$FA = 100 * \left(\frac{Ad}{At} \right) \quad (11)$$

sendo:

FA = fator de assimetria;

Ad = área da margem direita da bacia de drenagem (km);

At = área total da bacia de drenagem (km).

2.4 Estatística

2.4.1 Correlação

Em linhas gerais, pode-se dizer que o coeficiente de correlação consiste na intensidade de associação entre duas variáveis. Quando a variação de uma variável está de algum modo associada com a variação da outra variável, pode-se dizer que, as duas variáveis estão correlacionadas.

O comportamento entre essas variáveis quantitativas é medida através de coeficientes de correlação estatística, que indicam se há, ou não, uma relação entre as duas variáveis, num sistema cartesiano de coordenadas.

Dessa forma, o coeficiente de correlação que será utilizado nesse estudo é a correlação de Pearson, que por sua vez, é empregado na análise de dados que possuem distribuição normal, sendo o coeficiente de correlação designado pela letra r . Este examina o grau de associação de duas variáveis e mede até que ponto são interdependentes ou covariantes.

A correlação de Pearson (r) é uma medida de associação linear entre variáveis e é expressa pela seguinte equação:

$$r = \frac{1}{n - 1} \sum \left(\frac{xi - \bar{X}}{Sx} \right) \left(\frac{yi - \bar{Y}}{Sy} \right) \quad (3)$$

onde:

r = coeficiente de correlação;

n = número de pares de valores para x_i e y_i , variáveis com distribuição normal;

\bar{x} e \bar{y} = são os valores médios para x_i e y_i ;

S_x e S_y = valores dos desvios-padrão para x_i e y_i .

A correlação de Pearson é uma medida adimensional e varia entre -1 a +1, expressando desde comportamento totalmente inverso até comportamento totalmente coincidente entre as duas variáveis.

A magnitude dos valores dos coeficientes de correlação são interpretados como: quanto mais próximo de 1 (independente do sinal) maior é o grau de dependência estatística linear entre as variáveis e quanto mais próximo de 0 (zero), menor é a relação entre as variáveis.

Todavia, usa-se o termo *correlação positiva* quando $r = 1$ ocorre quando o aumento de uma variável corresponde, de um modo geral, ao aumento da outra variável.

Quando o coeficiente $r = -1$, nesse caso diz-se *correlação negativa*, onde à medida que uma variável cresce, de um modo geral a outra variável diminui.

Quando o coeficiente for nulo $r = 0$, não indica ausência de relação, indica que não há relação linear entre x e y .

Portanto, uma correlação perfeita ocorre quando o coeficiente de correlação for igual a um ($r = 1$) ou coeficiente igual a menos um ($r = -1$), indica que todos os pontos no gráfico de dispersão caem exatamente numa linha reta. No outro oposto, uma correlação de valor zero ($r = 0$) indica que não há relação linear entre as variáveis.

2.4.2 Análise de Componentes Principais

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica estatística que deve ser empregada quando se pretende analisar dados multivariados. Esta técnica consiste em reescrever as variáveis originais em novas variáveis denominadas de componentes principais, ou seja, a estrutura dos dados não é alterada embora mudem os eixos coordenados.

Entre as principais aplicações da Análise de Componentes Principais (ACP), está sua capacidade em reduzir o número de variáveis em uma amostra e a detecção de

estruturas a partir das inter-relações entre os componentes de um conjunto de dados específicos. No presente estudo, a ACP foi usada com o primeiro propósito, ou seja, reduzir o número das variáveis em um único fator.

As componentes principais podem ser geradas a partir de uma matriz de variância e covariância ou de uma matriz de correlação. Isso ocorre através de uma transformação matemática realizada sobre as variáveis originais. Esta operação matemática está disponível em diversos softwares estatísticos especializados.

Entretanto, na ACP cada componente principal (fator) é uma combinação linear de todas as variáveis originais. Quando os componentes principais conseguem reter cumulativamente quantidade suficiente da informação total contida no conjunto das variáveis originais, então, podem-se visualizar os dados respostas em duas novas variáveis (fator 1 e fator 2). Isso possibilita sua localização como um ponto em um gráfico bidimensional onde, quanto mais próximos forem os pontos, maiores tenderão a serem suas semelhanças.

2.4.3 Geoestatística

A geoestatística está consagrada como tópico especial da estatística aplicada e diferencia-se da mesma pela espacialidade da variável, ou seja, a variável em estudo é considerada não só pela sua quantificação, mas também pelo posicionamento no espaço e sua relação com os demais pontos amostrados.

A geoestatística teve início com Daniel G. Krige (1951) que foi o pioneiro a introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas de mineração.

Krige (1951), trabalhando com dados de concentração de ouro, concluiu que a informação dada pela variância não seria suficiente para explicar o fenômeno em estudo, portanto, seria necessário considerar a distância entre as observações. A partir daí surge a geoestatística que leva em consideração a posição geográfica e a dependência espacial das variáveis.

Matheron (1963) baseou-se nas observações realizadas por Krige e desenvolveu a Teoria das Variáveis Regionalizadas (V.R).

Segundo Landim (2003), uma Variável Regionalizada consiste em variáveis com condicionamento espacial, as quais têm uma aparente continuidade no espaço, demonstrada pela tendência de pontos amostrais próximos apresentarem valores próximos, que se diferenciam cada vez mais à medida que os pontos se distanciam.

Ainda de acordo com Landim (2003), o comportamento de uma variável pode ser estacionário para todo o fenômeno ou ocorrer somente numa zona de vizinhança bastante restrita, com os valores esperados variando de maneira regular. A medida do grau de dependência espacial entre amostras, num suporte específico, pode ser obtida usando os valores obtidos quando se assume uma ergodicidade nos incrementos.

Portanto, para se constatar a presença de dependência espacial entre variáveis e desta forma saber se a geoestatística convém ser aplicada, as ferramentas da própria geoestatística permitem a análise da dependência espacial e devem ser usadas para verificar se a variável em estudo é ou não regionalizada, ou seja, se apresenta continuidade espacial, pois, caso contrário, não se justifica o uso da técnica, podendo, então, fazer-se uso dos métodos clássicos. Para o desenvolvimento da metodologia geoestatística é necessário realizar o estudo da Variável Regionalizada (V.R), primeiramente através de uma análise exploratória dos dados e em seguida uma análise variográfica que são usados posteriormente, na parametrização da estimação a ser desenvolvida com as técnicas da Krigagem.

A análise exploratória dos dados apoia-se na estatística descritiva, que analisa o comportamento das amostras observadas. Através da elaboração de histogramas verifica-se a distribuição da população e outras medidas são necessárias à compreensão das variáveis em estudo, tais como: média, mediana, moda, variância, curtose, máximo, mínimo, desvio padrão, coeficiente de variação e assimetria.

A análise variográfica é fundamental num estudo geoestatístico, pois através dela, são definidas as estruturas da distribuição espacial da variável (ou variáveis) em evidência. A análise variográfica se faz através do estudo de semivariograma, que expressa o grau de dependência espacial entre amostras ao longo de um suporte específico.

Analogamente, o semivariograma é construído por meio da seguinte equação:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \cdot \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

onde:

$\gamma(h)$ = semivariograma estimado para a distância h ;

$N(h)$ = número de pares de dados que distam h entre eles;

$Z(x_i) - Z(x_i + h)$ = valor da diferença de um par de dados que distam h entre eles.

Após a construção do semivariograma experimental deve ser realizado um ajuste a um modelo teórico. Dependendo do ajuste obtido, pode ou não redefinir o modelo, até obter um que seja considerado satisfatório. Com o modelo teórico ajustado, ele irá representar o modelo real nos estudos geoestatísticos.

Segundo Iwashita (2003) esse procedimento é um dos mais delicados da análise variográfica e, portanto, de toda a análise geoestatística, pois envolve o conhecimento e a experiência do pesquisador acerca do fenômeno e da área em estudo.

Dentre os diversos modelos teóricos existentes, os mais utilizados nos estudos geoestatísticos são: modelo exponencial, modelo esférico, modelo linear e o modelo gaussiano, cujas equações normalizadas de cada modelo são apresentadas a seguir:

Modelo Esférico:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1,5 \left(\frac{h}{A} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{A} \right)^3 \right], 0 < h \leq A$$

$$C_0 + C, h > A$$

Modelo Exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{A} \right) \right], 0 < h \leq A$$

$$C_0 + C, h > A$$

Modelo Gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp \left(-\frac{h^2}{A^2} \right) \right], 0 < h \leq A$$

$$C_0 + C, h > A$$

Modelo Linear:

$$\gamma(h) = C_0 + \left[h \left(\frac{C}{A} \right) \right]$$

onde:

C_0 = efeito pepita;

C = variância;

A = alcance;

h = passo (*lag*).

Após a escolha do modelo teórico e de seus parâmetros, todo o processo de interpolação por krigagem será baseado nos valores preditos pela função escolhida.

2.4.3.1 Krigagem

A Krigagem é um método de interpolação geoestatístico que fornece estimadores exatos, ou seja, se um ponto a ser estimado coincidir com um dos pontos da amostragem, o valor estimado deverá ser igual ao valor amostrado.

A Krigagem é o único método de interpolação que ajusta um modelo para o comportamento da variância espacial dos dados brutos, e usa esse modelo, para estimar os valores dos pontos de uma grade regular. Além disso, a técnica leva em consideração as características espaciais e sua base conceitual está fundamentada na teoria das Variáveis Regionalizadas (V.R).

Portanto, se num estudo for constatado que a variável não possui continuidade espacial, logo, não há sentido lógico interpolar os dados usando-se a técnica da Krigagem.

Existem diversos modelos de Krigagem, sendo as de usos mais comuns a Krigagem Simples, Krigagem Ordinária, Krigagem Universal e Krigagem Indicativa. Portanto, este estudo limita-se a apresentar somente a técnica da Krigagem Ordinária.

Segundo Landim (1998) a Krigagem ordinária é uma técnica de estimativa linear para uma variável regionalizada que satisfaz a hipótese intrínseca com média desconhecida. Por ser linear o estimador tem a seguinte forma:

$$Z^*(x_o) = \sum [\lambda_i \cdot Z(x_i)] \quad (5)$$

onde:

$Z^*(x_o)$ = valor estimado para local x_o não amostrado;

$Z(x_i)$ = valor obtido por amostragem em campo;

λ_i = pesos aplicados em cada $Z(x_i)$.

De acordo com Landim (1998), a construção do estimador $Z^*(x_o)$ na Krigagem Ordinária não requer o conhecimento inicial da média estacionária da amostragem, mas requer que a somatória dos pesos seja igual a 1 ($\sum \lambda_i = 1$).

É notório ressaltar que, a Krigagem Ordinária é um estimador linear não-tendencioso *BLUE* (*Best Linear Unbiased Estimate*), ou seja, é um estimador linear que assume o valor desconhecido e pode ser estimado por uma combinação linear dos pesos dos valores observados nas amostras vizinhas. Por ser um estimador não-tendencioso, assume que a média global dos erros, ou seja, a média das diferenças entre os valores estimados e os valores observados seja nula (Soares, 2000).

Dentro deste contexto, a Krigagem Ordinária é vista como melhor método de interpolação, porque pretende que a variância dos erros de estimação seja mínima.

2.5 Avaliação Multicriterial em SIG

Atualmente, a necessidade de tomar decisões referentes ao planejamento dos recursos naturais, sobretudo, dos recursos hídricos tem sido uma tarefa difícil, uma vez que as decisões devem atender objetivos e critérios e, nem sempre as conseqüências dessas decisões podem ser previstas. Entretanto, há várias alternativas possíveis a serem tomadas, sendo desejável a opção pela qual melhor satisfaça os objetivos em questão, portanto, uma técnica que tem sido empregada para auxiliar ou apoiar na tomada de decisão é a avaliação multicritérios.

Segundo Malczewski (2004) a avaliação por multicritérios é uma técnica que combina e transforma dados espaciais em uma resposta para a tomada de decisão. Segundo o autor, essa metodologia integrada ao SIG, é amplamente flexível e representa um avanço significativo em relação às abordagens convencionais de sobreposição de planos de informação (overlay) de mapas. Essa integração permite que as ações sejam direcionadas para uma tomada de decisão.

No ambiente SIG, essa técnica multicriterial tem sido empregada em diversos

estudos, podendo ser citados: risco e prevenção de incêndios florestais, planejamento do uso da terra, definição de áreas mais adequadas para instalação de empreendimentos, análise de risco ambiental, gerenciamento de recursos hídricos, planejamento de áreas verdes urbanas, zoneamentos agrícolas, dentre outros.

O Sistema de Informação Geográfica tem se mostrado uma excelente interface de apoio a decisão. Para tanto, podem ser utilizadas três abordagens no ambiente SIG, como: sobreposição de informações espaciais, inteligência artificial e avaliação multicritérios.

De acordo com Eastman (1998), apesar dos sistemas de apoio à decisão serem uma das mais importantes funções de um SIG, as ferramentas desenhadas especialmente para este fim existem em número relativamente pequeno na maior parte dos softwares de SIG. O autor ressalta que o *software Idrisi for Windows*, inclui vários módulos especialmente desenvolvidos para auxiliar no processo de tomada de decisão: trata-se de módulos que incorporam o erro ao processo, ajudam na construção de mapas de aptidão através de critérios múltiplos, e atendem a decisões sobre localização, quando objetivos múltiplos estão envolvidos.

Com base na abordagem multicriterial, vários métodos vêm sendo utilizados no ambiente SIG, dentre os quais podem ser citados: o método Booleano, a Combinação Linear Ponderada (CLP), Média Ponderada Ordenada (MPO) e Processo Hierárquico Analítico (PHA). Desses métodos a Combinação Linear Ponderada (CLP) e o método Booleano são os mais diretos e mais frequentemente empregados. Portanto, este estudo limita-se a apresentar somente o método da *Combinação Linear Ponderada* que será empregado na avaliação multicritérios.

De acordo com Malczewski (2004) o método da *Combinação Linear Ponderada* (CLP), consiste numa das regras de decisão mais amplamente utilizada na análise multicriterial, devido à fácil implementação em SIG's e usa operações de álgebra de mapas e modelagem cartográfica.

O autor ainda ressalta que, uma das vantagens do método é a compensação entre os fatores, ou seja, o grau com que um fator pode compensar o outro é determinado pelo peso relativo atribuído a cada um dos fatores. Por exemplo, um alto escore de aptidão de declividade num local pode compensar um baixo escore de aptidão de uso e

ocupação do solo no mesmo local. No cenário inverso, um alto escore de aptidão em uso e ocupação do solo pode compensar um baixo escore de aptidão em declividade do terreno. Portanto, o grau com que cada fator impacta o resultado final é limitado pelo seu peso. Em termos de risco relativo ou compensação, o método da *Combinação Linear Ponderada* (CLP) está exatamente no meio de um contínuo entre uma MCE *Booleana*, que usa a operação lógica AND embora seja muito conservadora e contrária a riscos, e uma operação OR, que aceita riscos. Assim, esse método da CLP é caracterizado por uma compensação plena e risco médio.

Diante dessa abordagem, independentemente do método empregado, a avaliação envolvendo múltiplos critérios está presente em muitos trabalhos nas mais diversas áreas de aplicação.

Portanto, embora haja uma literatura razoavelmente extensa sobre tomada de decisão nos mais variados campos de aplicação, a seguir serão mencionados alguns exemplos de trabalhos dentro do contexto da tomada de decisão em ambiente SIG.

Ferraz & Vettorazzi (2003) utilizaram a avaliação multicritérios (AMC) para identificar áreas apropriadas à recomposição florestal, com espécies nativas, com base em princípios da ecologia da paisagem. Os autores consideraram cinco critérios para determinação de áreas para recomposição: fertilidade do solo, presença de mata nativa, corpos d'água, declividade do terreno e suscetibilidade do solo à erosão. Como resultado, foi obtido um mapa das áreas adequadas à recomposição florestal.

Taglani (2003) empregou a avaliação multicritérios em ambiente SIG, com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade de ambientes costeiros na região da planície costeira do Rio Grande do Sul. Como critérios utilizou a declividade, a capacidade de uso do solo, a vegetação, os recursos hídricos e a idade dos terrenos. Para a ponderação dos critérios foram empregados os métodos *Processo Analítico Hierárquico* (PHA) e a *Combinação Linear Ponderada* (CLP). Segundo o autor, essa metodologia, integrada ao SIG, é amplamente flexível e permite a inclusão de dados complementares ou a reavaliação das informações temáticas e critérios, a partir do qual se pode chegar a um consenso e a tomada de decisão.

Na área de proteção dos recursos hídricos deve ser citado o trabalho de Randhir et al., (2001). Segundo os autores, o manejo da qualidade da água numa bacia

hidrográfica é um elemento importante para a proteção dos recursos hídricos. Portanto, nesse trabalho foi desenvolvido um modelo de priorização para proteção da qualidade de água em nível de microbacia. O estudo foi realizado numa microbacia do Rio Ware, em Massachusetts, EUA. Os autores utilizaram a abordagem multicriterial e constataram que essa abordagem pode ser adaptada para priorizar uma grande variedade de decisões relativas ao uso da terra na bacia, tais como: a preservação de áreas florestais, a proteção de habitats, planejamento de áreas para recreação e para planejamento ecológico-econômico.

CAPÍTULO III

ÁREA DE ESTUDO

O município de Poços de Caldas localiza-se no Sudoeste do Estado de Minas Gerais, na divisa com o Estado de São Paulo. O município tem uma população de aproximadamente 145.000 habitantes (IBGE, 2007) e, está a 1.189 metros de altitude.

Segundo a classificação de Koppen (1948), o clima predominante de Poços de Caldas é do tipo Cwb, clima mesotérmico, caracterizado por inverno seco e verão brando, com precipitação variando entre 1300mm e 1700mm e com temperaturas médias variando entre 18°C e 22°C.

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica Vargens de Caldas que está situada na porção sul do município, entre as coordenadas geográficas 21°50'29"S e 46°34'02"W (Figura 3.1). A bacia em questão ocupa uma área de drenagem de aproximadamente 42,45 km² e é formadora do Ribeirão das Vargens, sendo um importante afluente na margem direita do grande dreno Ribeirão das Antas.

A área em questão está inserida no contexto geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, que está encaixado em rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino constituído por rochas Arqueanas do Complexo Varginha (gnaiesses, migmatitos, granulitos) e por rochas Nefelinas Sienitos (Tinguaítos, Fonolitos e Foiaitos), de idade Mesozóica-Cenozóica que completam o quadro geológico da região (Christofolletti, 1970).

Na área de estudo, encontram-se principalmente, solos dos tipos Cambissolo Háplico e Neossolo Regolítico, sendo os Cambissolos os de maior expressão espacial na bacia (Moraes, 2008).

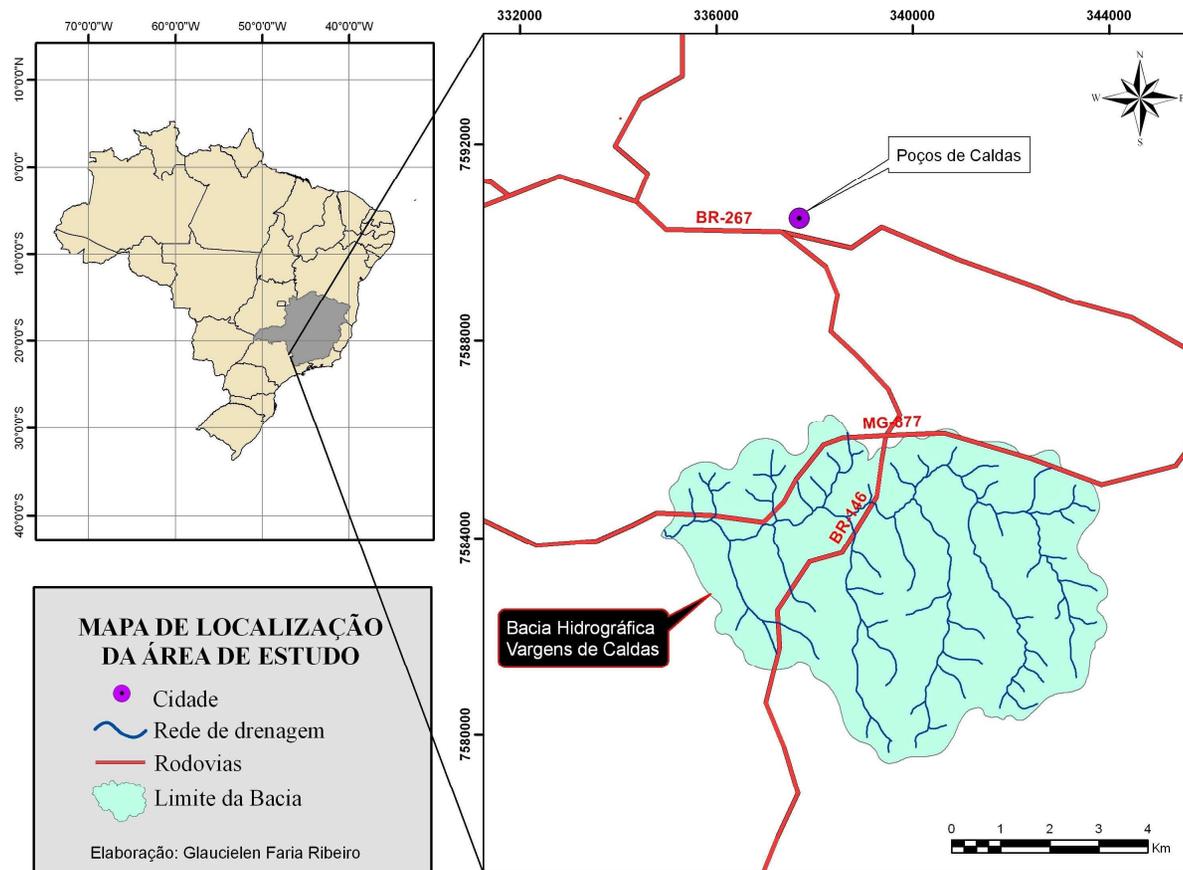


Figura 3.1 Localização geográfica da área de estudo.

CAPÍTULO IV

MÉTODOS E TÉCNICAS DA PESQUISA

4.1 Morfometria da bacia hidrográfica

Para realizar a caracterização morfométrica da bacia hidrográfica Vargens de Caldas, foi utilizado um SIG através do software *ArcMap 9.3*, que permite gerenciar bancos de dados georreferenciados e realizar análises espaciais e bases cartográficas digitais no formato *vetorial* e *raster*.

Os parâmetros morfométricos foram calculados de acordo com os conceitos propostos por Villela & Mattos (1975), conforme descritos anteriormente. A morfometria da bacia hidrográfica Vargens de Caldas foi representada pelas características e pelos índices apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Índices morfométricos calculados para a bacia hidrográfica Vargens de Caldas.

Características Geométricas	
Área de drenagem	Índice de circularidade
Perímetro	Índice de sinuosidade
Coeficiente de compacidade	Padrão de drenagem
Fator de forma	
Características do Relevo	
Declividade mínima	Altitude média
Declividade média	Altitude máxima
Declividade máxima	Amplitude altimétrica
Altitude mínima	Declividade do álveo
Características da Rede de Drenagem	
Comprimento total dos canais	Densidade de drenagem
Comprimento do canal principal	Fator de assimetria
Ordem da bacia (Strahler, 1957)	

Os parâmetros morfométricos que relacionam a bacia com formas geométricas, como: o fator de forma (F), coeficiente de compacidade (Kc) e o índice de circularidade (IC) foram calculados a partir das equações propostas por Villela & Mattos (1975). Enquanto a área de drenagem e perímetro da bacia foram calculados utilizando a ferramenta *Surfaces Analysis/ Calculate Area and Volume*, do módulo *3D Analyst*.

Quanto às características do relevo, o Modelo Digital de Elevação (MDE) foi utilizado como base para a geração dos mapas de declividade e hipsométrico. O MDE foi criado a partir da vetorização das curvas de nível extraídas da carta topográfica de Poços de Caldas (IBGE, 1972), escala 1:50.000. O MDE foi gerado através da ferramenta *Create/modify TIN*, módulo *3D Analyst*, que gerou um MDE de grade triangular, que posteriormente foi convertido para grade regular (GRID).

A carta de declividade do terreno foi gerada a partir do modelo TIN, na ferramenta *Surfaces Analysis/Slope*, do módulo *Surface Analyst*. As classes de declividade foram reclassificadas em seis intervalos de acordo com a classificação proposta por De Biase (1993), como mostra a Tabela 4.2. A área entre as faixas de declividade foi calculada utilizando a opção *Surfaces Analysis/ Calculate Area and Volume*, do módulo *3D Analyst*.

Tabela 4.2 Classificação da declividade segundo De Biase (1993).

Classes de Declividade (%)	Relevo
0 - 3	Várzea
3 - 6	Plano a suave ondulado
6 - 12	Suave ondulado a ondulado
12 - 20	Ondulado a forte ondulado
20 - 40	Forte ondulado a montanhoso
> 40	Montanhoso

A carta hipsométrica da bacia foi gerada de modo semelhante à carta de declividade, a partir do modelo TIN no módulo *Surface Analyst*. Optou-se pela definição de oito classes de altitude, variando de 30m em 30m, de modo que melhor evidenciou as variações altimétricas da bacia.

Quanto às características da rede de drenagem, os parâmetros densidade de drenagem (Dd) e fator de assimetria (FA) foram calculados a partir das equações propostas por Villela & Mattos (1975).

O ordenamento dos cursos d'água foi estabelecido seguindo a metodologia proposta por Strahler (1957). O comprimento total dos cursos d'água e do curso d'água

principal foram calculados utilizando a ferramenta *Surfaces Analysis/ Calculate Area and Volume*, do módulo *3D Analyst*.

4.2 Ensaio com o Permêmetro *Guelph* em campo, para determinação da Condutividade hidráulica

A determinação da condutividade hidráulica do solo pode ser realizada por métodos de campo e de laboratório. No laboratório, é possível atingir um grau de precisão muito superior ao campo, devido ao elevado grau de controle das condições experimentais. Por outro lado, nas condições de campo não obstante o grau de complexidade, as medidas são feitas em condições naturais e com perturbação mínima do solo.

Pereira et al., (2001) consideram que os métodos de campo são mais realistas, porém, os autores salientam que, normalmente a condutividade hidráulica medida no campo é menor que a medida em laboratório, devido a formação de bolhas de ar no solo quando se inicia o processo de infiltração. Essa variação entre medidas de laboratório e campo podem ser devida às diferenças inerentes de cada método. Exemplificando, o Permêmetro *Guelph* mede a componente horizontal e vertical de K_{fs} sob condições anisotrópicas, enquanto o método de laboratório determina os valores verticais da condutividade hidráulica. Portanto, os autores ressaltam que, comparar valores obtidos da condutividade hidráulica por diferentes métodos não leva a conclusões objetivas.

Portanto, este estudo apoiou-se no método de campo para determinação da condutividade hidráulica, através de ensaios de permeabilidade do solo *in situ*, utilizando o Permêmetro *Guelph* (modelo 2800K1).

Diversas vantagens foram encontradas para se utilizar o Permêmetro *Guelph* na medição da permeabilidade do solo na área de estudo, dentre elas estão:

- É um equipamento apropriado para locais de difícil acesso, sendo de fácil transporte;
- Fornece a medida da Vazão *in situ*;
- Produz pouca perturbação no solo;

- É um equipamento simples de operar e pode ser utilizado por uma única pessoa.

Todavia, para o levantamento dos dados da condutividade hidráulica foram realizados dois trabalhos de campo: o primeiro campo realizado em março de 2009 (período chuvoso) e o segundo campo realizado em julho de 2009 (período seco).

Cabe ressaltar que, o Permêmetro *Guelph* e os acessórios necessários para a realização dos ensaios em campo foram cedidos pelo Prof. Dr. George de Paula Bernardes da Faculdade de Engenharia/UNESP de Guaratinguetá, SP.

- **Primeiro trabalho de campo:**

O primeiro campo foi realizado em março de 2009 e consistiu na realização de ensaios de infiltração *in situ* com o Permêmetro *Guelph* à carga constante segundo o procedimento sugerido pelo Manual do Permêmetro *Guelph*.

Em campo, uma malha irregular foi formada contendo 10 pontos amostrais, localizados em solos do tipo Cambissolo Háplico e Neossolo Regolítico (Moraes, 2008). A escolha de cada ponto para a realização dos ensaios levou-se em consideração a facilidade e permissão de acesso e os tipos de uso do solo e do manejo agrícola desenvolvidos.

Os ensaios foram realizados a 75,0cm de profundidade, optou-se pela mesma profundidade, buscando assim uma padronização na amostragem.

Devido às condições meteorológicas, foi possível realizar somente 10 ensaios em toda a área de estudo. Durante a execução do experimento em campo ocorreram chuvas, mas em cada ponto amostrado a saturação do solo foi promovida pelo Permêmetro *Guelph*, necessitando de um tempo maior para efetuar as leituras, visando a garantir que o bulbo formado com o permêmetro estivesse saturado. Deste modo, se evitou um aumento da variação espacial da condutividade hidráulica, devida a não-saturação do solo, fato este verificado por Nielsen et al., (1973).

- **Segundo trabalho de campo:**

O segundo campo foi realizado em julho de 2009 e consistiu na realização de ensaios de infiltração *in situ* com o Permêmetro *Guelph*.

Na área de estudo formou-se uma malha irregular composta por 32 pontos amostrais, cujos ensaios foram realizados a 75,0cm de profundidade, sendo que, nos primeiros dez pontos os ensaios foram repetidos nos mesmos locais do primeiro campo, e os vinte e dois pontos restantes foram escolhidos aleatoriamente em campo.

Para maiores detalhes dos pontos amostrais, a Tabela 4.3 a seguir apresenta as condições de uso do solo dos 32 pontos ensaiados.

Durante a execução dos experimentos em campo não ocorreram chuvas, o que contribuiu para uma maior quantidade de ensaios realizados.

É importante ressaltar que, a condutividade hidráulica depende do tipo de fluido e do tipo do material do solo, portanto, nos 32 pontos ensaiados foram coletadas amostras deformadas de solo a 75,0cm de profundidade, utilizando-se um trado manual. As amostras foram posteriormente encaminhadas para laboratório para análise das frações granulométricas (areia, silte e argila).

A Figura 4.1 a seguir, ilustra a localização na área de estudo dos 32 pontos dos ensaios com o Permêmetro *Guelph*.

Tabela 4.3 Características dos 32 pontos amostrais.

Ponto	Altitude (m)	Uso do solo
1	1257	Pastagem, vinculada ao manejo de gado.
2	1292	Solo sem cobertura vegetal, com presença de erosão.
3	1303	Mata ciliar, com cobertura vegetal densa e conservada.
4	1314	Solo sem cobertura vegetal com presença de erosão.
5	1323	Reflorestamento de <i>Eucalyptus</i> ssp. interceptada com campos.
6	1359	Presença de cobertura vegetal (campos).
7	1298	Área agrícola com plantação de batata, sem rotação de culturas.
8	1326	Pastagem sem degradação em terreno plano.
9	1326	Reflorestamento de <i>Eucalyptus</i> ssp. em área de declividade acentuada.
10	1350	Reflorestamento de <i>Eucalyptus</i> ssp. interceptada com campo sujo.
11	1320	Áreas de Campo sujo.
12	1256	Áreas de Campo sujo com fragmentos de mata.
13	1286	Área urbana com presença de vegetação de gramíneas.
14	1277	Solo sem cobertura vegetal interceptado com campos.
15	1321	Área de cobertura vegetal (campos).
16	1357	Presença de cobertura vegetal densa e sem degradação do solo.
17	1326	Reflorestamento de <i>Eucalyptus</i> ssp.
18	1350	Reflorestamento de <i>Eucalyptus</i> ssp. interceptada com campo sujo.
19	1264	Atividade agrícola, com culturas de ciclo curto em área de várzea.
20	1321	Área com pastagem, sem degradação do solo.
21	1427	Pastagem, vinculada a manejo de gado em área de encosta íngreme.
22	1303	Área agrícola com plantação de milho na área de várzea.
23	1290	Área com cobertura vegetal (campo) em encosta íngreme.
24	1269	Terreno de várzea com presença de cobertura vegetal (gramíneas).
25	1272	Área de pastagem de manejo de gado, intercalada com cobertura vegetal densa (mata ciliar).
26	1394	Reflorestamento de <i>Eucalyptus</i> ssp. em declividade acentuada.
27	1331	Presença de cobertura vegetal (campos) sem degradação.
28	1292	Presença de cobertura vegetal (campos).
29	1353	Reflorestamento de <i>Eucalyptus</i> ssp. intercalada com campo sujo.
30	1286	Campo sujo, a presença irregular e espaçada de vegetação herbácea, interceptada como abandono de área de pastagem.
31	1273	Área urbana.
32	1336	Solo sem cobertura vegetal em encosta íngreme próximo a mineração.

336000 338000 340000 342000 344000 346000

BACIA HIDROGRÁFICA VARGENS DE CALDAS

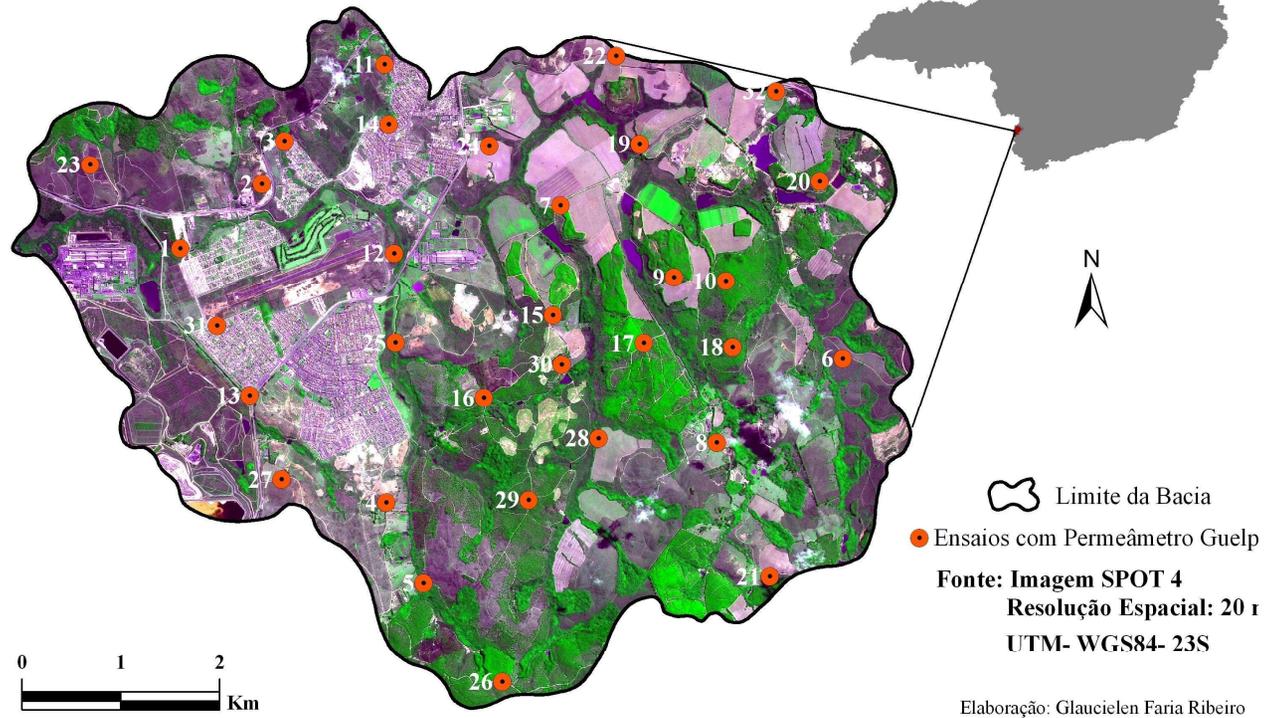


Figura 4.1 Localização dos pontos de amostragem dos ensaios em campo com o Permêmetro *Guelph*.

4.2.1 Procedimentos dos ensaios de campo com o Permêmetro Guelph

Para medir a condutividade hidráulica em campo foi utilizado o Permêmetro *Guelph* a carga constante, na zona não-saturada do solo. O procedimento adotado para a realização dos ensaios em campo foi o proposto pelo Manual do Permêmetro. Este determina que, a partir da aplicação de uma carga hidráulica constante por meio do permêmetro, obtêm-se as vazões de água infiltrada no solo e, portanto, pode-se calcular o coeficiente de condutividade hidráulica do material ensaiado (Soil Moisture, 1991).

Os ensaios em campo consistiram primeiramente na seleção dos locais a serem ensaiados, em seguida, a abertura dos furos de sondagem de 0,5cm de diâmetro e 75,0cm de profundidade com auxílio de um trado manual.

Nesta fase, tomou-se o cuidado no acabamento das paredes do furo e na base, de forma a evitar o fechamento dos poros ou a compactação do solo por aplicação da força exercida pelo processo de tradagem.

Em seguida, procedeu-se a montagem e abastecimento dos reservatórios do permêmetro com água. Neste procedimento, teve-se o cuidado em abastecer os reservatórios antes de posicionar o permêmetro no furo de sondagem, de forma a impedir o fluxo a partir do reservatório. Posteriormente, utilizou-se a bomba de vácuo para evitar quedas de água indesejada que produzam alagamentos nos furos de sondagem, invalidando os ensaios.

Cabe salientar que, foi aplicado vácuo de 20kPa no permêmetro para todos os ensaios, pois não se atingiu a capacidade máxima de água nos reservatórios. A seguir, posicionou-se o equipamento no furo de sondagem, ajustando o tripé de forma que o aparelho ficasse nivelado. Foi prudente nesse momento, evitar golpear as paredes e a base do furo de sondagem. A partir deste ponto, estabeleceu-se a altura de carga hidráulica a ser ensaiada, por meio de uma escala graduada de 0,0 a 25,0cm no permêmetro. Para todos os ensaios realizados foi aplicada uma única altura de carga hidráulica de 5,0cm no permêmetro ($H= 5,0\text{cm}$).

A partir desse momento inicia-se o ensaio, fazendo leituras com uma planilha de campo anotando o fluxo de saída de água do permêmetro para o solo, que é indicado pelos registros de queda do nível de água no reservatório graduado, em intervalos de

tempos regulares.

A Figura 4.2 a seguir ilustra o Permêmetro *Guelph* durante ensaios em campo.



Figura 4.2 Permêmetro *Guelph* durante ensaios em campo.

4.3 Granulometria

Em campo, foram coletadas 32 amostras deformadas de solo, na profundidade de 75,0cm com a utilização de um trado manual. As amostras foram dispostas em sacos plásticos e identificadas conforme o ponto de coleta e sua respectiva localização geográfica. Posteriormente, o material foi encaminhado para laboratório, para determinação das frações granulométricas: areia, silte e argila.

A análise granulométrica foi realizada no laboratório de solos da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI-UNICAMP) utilizando o Método da Pipeta, segundo os procedimentos do método de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas (Camargo et al., IAC, 1986) e não segue nenhuma norma técnica. Quanto aos grãos mais grossos foram peneirados e os mais finos pipetados, fazendo-se combinar tais métodos.

As amostras de solo foram secas ao ar (TFSA), destorroadas e passadas na peneira de abertura de malha de 2,0mm. Para as análises texturais pesou-se 10,0g de solo seco numa balança com precisão de duas casas decimais. Foi adicionado ao material dispersante químico hexametáfosfato de sódio e posteriormente colocado num agitador elétrico por 14 horas para o ataque químico. Em seguida, a mistura foi transferida para proveta graduada, completando o volume com água destilada até 500

ml e realizou-se o balanceamento. Esse material ficou em repouso e, em seguida pipetou-se 10 ml de volume da suspensão que foi levado à estufa para secagem a 105°C e pesado. Na suspensão do solo foi determinada a quantidade de argila e o silte foi determinado pela diferença. A areia foi fracionada, por peneiramento, passando por cinco fracionamentos (areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina e areia muito fina) de acordo com o Instituto Agrônomo de Campinas (Camargo et al., IAC, 1986).

Na determinação da classe textural do solo, os valores em gramas relativos a cada fração granulométrica, foram convertidos em porcentagem e, posteriormente plotados no triângulo textural denominado de Diagrama Triangular Americano (Santos et al., 2005) para classificação textural das amostras. A Figura 4.3 ilustra a preparação das amostras em laboratório para a análise granulométrica.



Figura 4.3 Preparação das amostras para análise granulométrica.

4.4 Cálculo da Condutividade hidráulica do campo saturado, pelo método do Permêmetro *Guelph*

Para interpretar os resultados dos ensaios com o Permêmetro *Guelph* foram utilizados três métodos de cálculo da condutividade hidráulica do campo saturado (K_{fs}), sendo o primeiro método de Laplace & Gardner (1958), o segundo método de Reynolds & Elrick (1985) e o terceiro método de Reynolds & Elrick (1989).

Na análise dos resultados, foi realizado um estudo comparativo dos três métodos aplicados, neste momento foi pertinente a escolha do método adotado neste trabalho.

Assim, o equacionamento proposto pelos métodos destes autores consideram apenas uma altura de carga hidráulica aplicada no ensaio. Os métodos e suas equações para cálculo da condutividade hidráulica são descritos a seguir.

4.4.1 Método de uma altura de carga (LAPLACE & GARDNER, 1958)

Este método proporciona o cálculo de K_{fs} para fluxo permanente e consiste na aplicação de uma altura de carga hidráulica ($H= 5,0\text{cm}$) constante durante o ensaio.

Neste procedimento de cálculo, os autores desprezam a componente capilar da infiltração, logo atribuem toda a infiltração na componente saturada.

Assim, a determinação da Vazão (Q) e da condutividade hidráulica do campo saturado (K_{fs}) podem ser obtidos através das Equações 12 e 13:

$$Q = \frac{v}{t} = \frac{\Delta h \cdot A}{t} \quad (12)$$

onde:

Q = vazão de água no solo (cm^3/s);

Δh = variação da altura do nível d'água (cm);

A = área do reservatório (cm^2);

v = volume (cm^3);

t = tempo (s).

$$K_{fs} = \frac{C \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot H^2 + C \cdot \pi \cdot a^2} \quad (13)$$

onde:

K_{fs} = condutividade hidráulica do campo saturado (cm/s);

C = parâmetro denominado “fator de forma” que depende do tipo de solo e da relação H/a (Figura 4.4);

Q = vazão de água no solo (cm^3/s);

H = altura da carga hidráulica estabelecida no furo de sondagem (cm);

a = raio do furo de sondagem (cm).

O fator de forma “C” é obtido de acordo com o gráfico da Figura 4.4, que depende do tipo de solo (textura e macroporosidade) e da razão H/a , onde “H” é a altura da carga hidráulica constante aplicada no furo de sondagem, igual a 5,0cm, enquanto “a” corresponde ao raio do orifício aberto pelo trado no solo igual a 2,5cm.

Portanto, para resolver a Equação 13, deve-se obter um valor do fator de forma, que de acordo com a textura dos solos da área de estudo, o valor de “C” foi 0,85, segundo a Figura 4.4 corresponde a Solos Desestruturados.

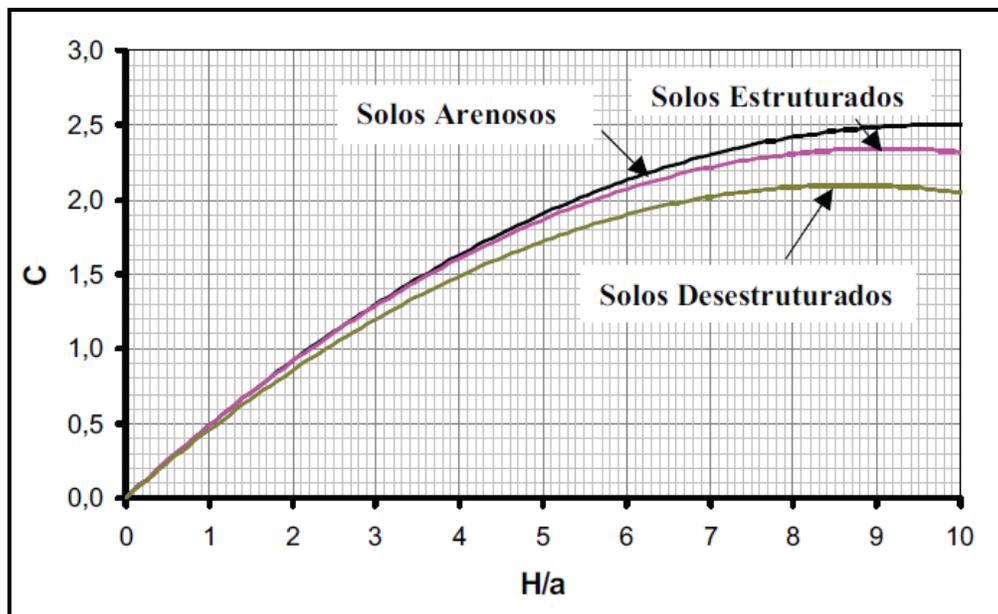


Figura 4.4 Determinação do Fator de forma "C". Fonte: Elrick et al., (1985).

4.4.2 Método de uma altura de carga (REYNOLDS & ELRICK, 1985)

Este método consiste na aplicação de uma altura de carga hidráulica ($H= 5,0\text{cm}$) constante no permêmetro e quando o regime permanente é atingido, a condutividade hidráulica do campo saturado (K_{fs}) é determinada pela seguinte equação:

$$K_{fs} = \frac{C.Q}{2.\pi.H^2 + C.\pi.a^2 + \alpha^*} \quad (14)$$

sendo:

K_{fs} = condutividade hidráulica do campo saturado (cm/s);

C = parâmetro denominado “fator de forma” que depende do tipo de solo e da relação H/a (Figura 4.4);

Q = vazão de água no solo (cm³/s);

H = altura da carga hidráulica estabelecida no furo de sondagem (cm);

a = raio do furo de sondagem (cm);

α^* = parâmetro que depende das propriedades do solo e textura (Tabela 4.4).

Para proceder à resolução matemática da Equação 14, deve-se optar por um valor do parâmetro α^* . É importante ressaltar que, durante a realização dos ensaios em campo, foi feita uma avaliação visual do solo em cada ponto ensaiado para estimar o valor de α^* , dentro dos valores sugeridos por Elrick et al., (1989), de acordo com a Tabela 4.4.

Neste estudo, o valor do parâmetro α^* adotado foi 0,04 cm⁻¹, que corresponde a solos de textura fina, sem macroporos e fissuras.

Tabela 4.4 Valores do parâmetro α sugeridos para tipos de solos.

TIPO DE SOLO	α^* (cm ⁻¹)
Materiais argilosos compactados e estruturados	0,01
Materiais com grãos finos (argilosos) e não estruturados	0,04
Argilas até areias finas com alta a moderada quantidade de macroporos e fissuras	0,12
Areia grossa inclui solos estruturados com fissuras e macroporos	0,36

Fonte: Elrick et al., (1989).

4.4.3 Método de uma altura de carga (REYNOLDS & ELRICK, 1989)

Este método também consiste em aplicar uma altura de carga hidráulica constante no permêmetro. Para evitar a aparição de valores negativos no cálculo de K_{fs} , Reynolds & Elrick (1989) obtiveram uma equação empírica onde, os três termos do denominador representam respectivamente, a contribuição da pressão hidráulica, a gravidade e a capilaridade para o total do fluxo externo do orifício.

Dessa maneira, a condutividade hidráulica do campo saturado pode ser obtida por meio da seguinte equação:

$$K_{fs} = \frac{C.Q}{2.\pi.H^2 + C.\pi.a^2 + \left(\frac{2.\pi.H}{\alpha^*}\right)} \quad (15)$$

onde:

K_{fs} = condutividade hidráulica do campo saturado (cm/s);

C = parâmetro denominado “fator de forma” que depende do tipo de solo e da relação H/a (Figura 4.4);

Q = vazão de água no solo (cm³/s);

H = altura da carga hidráulica estabelecida no furo de sondagem (cm);

a = raio do furo de sondagem (cm);

α^* = parâmetro de acordo com o tamanho dos poros (Tabela 4.4).

4.5 Análise Estatística

Neste estudo, foram aplicadas técnicas da estatística descritiva e da geoestatística para investigar o comportamento dos dados obtidos em campo e laboratório. A estatística descritiva foi utilizada para analisar a distribuição dos dados da variável condutividade hidráulica, de modo a verificar se os dados possuem distribuição normal, além disso, foram calculados os parâmetros estatísticos da tendência central (média e mediana) e de sua variabilidade (valor máximo, valor mínimo e desvio padrão). O coeficiente de correlação também foi empregado, com o objetivo de examinar o grau de relação entre as variáveis (altitude, declividade do terreno, condutividade hidráulica e textura do solo).

A geoestatística foi empregada para analisar a variabilidade e dependência espacial da variável condutividade hidráulica.

4.5.1 Correlação

No presente estudo, a correlação estatística foi empregada com o propósito de investigar o grau de relação da variável condutividade hidráulica do solo com demais variáveis, como: altitude, declividade do terreno, areia, silte e argila.

Para tal verificação, este estudo apoiou-se na análise de correlação de Pearson, que avaliou o grau de relação linear entre as variáveis de estudo. Todavia, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson ao nível de 5% de significância para a análise das variáveis.

4.5.2 Geoestatística

Para se aplicar a metodologia geoestatística em um estudo, primeiramente deve-se fazer uma análise variográfica que caracteriza a variabilidade espacial do fenômeno em estudo, e deve ser aplicada preliminarmente como forma de evitar erros no procedimento. Quando se deseja aplicar a Krigagem Ordinária, o emprego do semivariograma deve caracterizar a realidade da distribuição das amostras. Isso permite maior confiabilidade com relação aos dados estimados e uma minimização dos erros associados à interpolação.

Portanto, a metodologia de análise geoestatística é utilizada neste estudo com o objetivo de determinar a variabilidade e dependência espacial da variável condutividade hidráulica, obtida em campo.

Os dados estão disponíveis na forma de amostras pontuais, com um total de trinta e dois pontos amostrados, que estão distribuídos de maneira relativamente uniforme na área de estudo.

Primeiramente, na análise estatística exploratória, foram analisados os parâmetros estatísticos de tendência central (média e mediana), de dispersão (desvio padrão, coeficientes de variação). Assim, podem-se descrever as variações do conjunto de dados e o comportamento da variável em torno da média, possibilitando interpretações mais confiáveis e detecção de possíveis erros (Landim, 1998).

Em seguida, partiu-se para a análise da variabilidade espacial que foi feita a partir do estudo do semivariograma.

Após a construção do semivariograma experimental foi realizado um ajuste de um modelo teórico, tais como: Gaussiano, Esférico, Exponencial, Linear que foram superpostos à sequência de pontos, de modo que foi escolhida a curva que melhor se ajustou aos pontos amostrais. Este é um dos procedimentos mais delicados da análise variográfica e, portanto, de toda a análise geoestatística, pois envolve o conhecimento e a experiência do pesquisador acerca do fenômeno e da área em estudo, pois o modelo teórico descreve essencialmente a variabilidade espacial que será considerada no processo de interpolação (Iwashita, 2003).

Uma vez definido e validado o modelo variográfico, a etapa seguinte consistiu na interpolação espacial dos dados por meio de um método de interpolação geoestatístico. O método de interpolação adotado neste estudo foi a Krigagem Ordinária, que consiste num estimador linear não-viciado com mínima variância para a interpolação da variável medida em posições não-amostradas (Isaaks & Srivastara, 1989).

O ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental e a interpolação por Krigagem Ordinária foram realizados através do *software Surfer 8.0* (Golden Software, Inc. 2002).

O mapa interpolado da variável condutividade hidráulica será posteriormente integrado ao banco de dados no ambiente SIG (Idrisi 32), onde será combinado com demais mapas na avaliação multicritérios.

4.6 Avaliação Multicritérios

4.6.1 Procedimentos metodológicos

Tendo como objetivo da aplicação da metodologia de avaliação multicritérios, em definir áreas potenciais de infiltração sob a ótica da capacidade de infiltração da bacia Vargens de Caldas, tornou-se necessário no primeiro momento, a definição dos critérios (fatores e restrições) que serão considerados na avaliação multicritérios. Para tanto, a escolha dos fatores que serão considerados na análise da capacidade de infiltração da bacia foi baseada nos seguintes critérios: (1) a partir da interrelação dos elementos do meio físico natural e modificado é possível analisar a capacidade de infiltração de uma bacia hidrográfica; (2) a base cartográfica disponível (Soares, 2005).

Após a definição dos critérios é necessário a elaboração de cada critério de forma espacializada, através de planos de informação. Cada plano de informação deve ser reescalado para um intervalo comum de valores, para que possam ser combinados na avaliação por multicritérios. Posteriormente, são atribuídos os pesos simbolizando a importância relativa de cada fator e sua influência na capacidade de infiltração e, em seguida realizada a avaliação multicritérios, gerando o mapa final que estabeleça a capacidade de infiltração da bacia.

Cabe salientar que, os procedimentos da avaliação por multicritérios foram realizados no *software Idrisi 3.2* a partir do módulo *Apoio à Decisão*. Esse módulo consiste num conjunto seqüencial de diálogos, cuja função é guiar o analista ao longo do processo de modelos para resolver problemas de tomada de decisão multicritérios.

Segundo Eastman (1998) o *Idrisi* é um software para processamento de imagens, desenvolvido pela *Graduate School of Geography da Clark University*. Segundo o autor o software cobre todo o espectro de necessidades do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e constitui num sistema auxiliado por computador para aquisição, armazenamento, análise e visualização de dados geográficos e de sensoriamento remoto e permite uma rápida integração dos resultados de análise.

4.6.2 Espacialização dos Critérios

Com o objetivo de analisar a capacidade de infiltração da bacia hidrográfica Vargens de Caldas, foram considerados relevantes neste estudo, basicamente quatro fatores: uso e ocupação do solo, permeabilidade (condutividade hidráulica), declividade do terreno e densidade de lineamentos. Assim, a escolha de cada fator que será considerado na análise da infiltração são descritos a seguir:

O mapa de uso e ocupação do solo foi considerado um elemento do meio físico importante nesse estudo, pois dependendo do tipo de uso e ocupação do solo, haverá variação na resposta à infiltração da água no solo.

O mapa de permeabilidade constitui num fator que influencia na capacidade de infiltração de um determinado solo. Logo, as condições de textura, profundidade e estrutura do solo são variáveis que influenciam na permeabilidade do solo, sobretudo, na quantidade de água que infiltra no solo.

Quanto ao mapa declividade do terreno constitui num elemento do meio físico indispensável para estudos hidrológicos, uma vez que a inclinação do terreno é determinante da sua taxa de infiltração, pois quanto maior a declividade da encosta, menor a infiltração da água no solo e vice-versa.

Por fim, o mapa de lineamentos foi considerado relevante neste estudo, pois fornece informações sobre a densidade de fraturamentos.

O mapa de densidade de fraturas evidencia áreas de intenso fraturamento, pois estas são mais favoráveis à infiltração, circulação e armazenamento de água. Zonas homólogas com maior densidade de traços de fraturas refletem rochas de maior grau de ruptibilidade, portanto, essas condições representam as direções preferenciais de fluxo da água de maneira concentrada pelas fraturas dessas rochas.

Cabe salientar que, os dados espaciais representados em mapas temáticos foram elaborados no ambiente SIG, através dos softwares *ArcMap 9.3* e *Surfer 8.0* (Golden Software, Inc. 2002) e, posteriormente convertidos para o formato *raster* com mesmo número de linhas e colunas (resolução), para serem integrados no software *Idrisi 32* para a avaliação multicritérios.

4.6.2.1 Permeabilidade do Solo

O mapa de permeabilidade do solo foi baseado em dados de condutividade hidráulica, que foram obtidos a partir de ensaios realizados em campo.

De uma forma geral, estes dados estão disponíveis na forma de amostras pontuais, e para utilizá-los de forma efetiva em um ambiente SIG, necessita-se de um procedimento de interpolação, para gerar uma representação na forma de grade regular.

As amostras são valores representativos do fenômeno estudado, e que apresentam consistência de metodologia e unidade. Portanto, para gerar superfícies que aproximem o fenômeno estudado de forma realista, é necessário modelar sua variabilidade espacial. Assim, para gerar uma superfície bidimensional a partir das amostras pontuais, utilizou-se como método de interpolação espacial à Krigagem Ordinária, que gerou um mapa de superfície bidimensional interpolada da variável condutividade hidráulica (Figura 4.5).

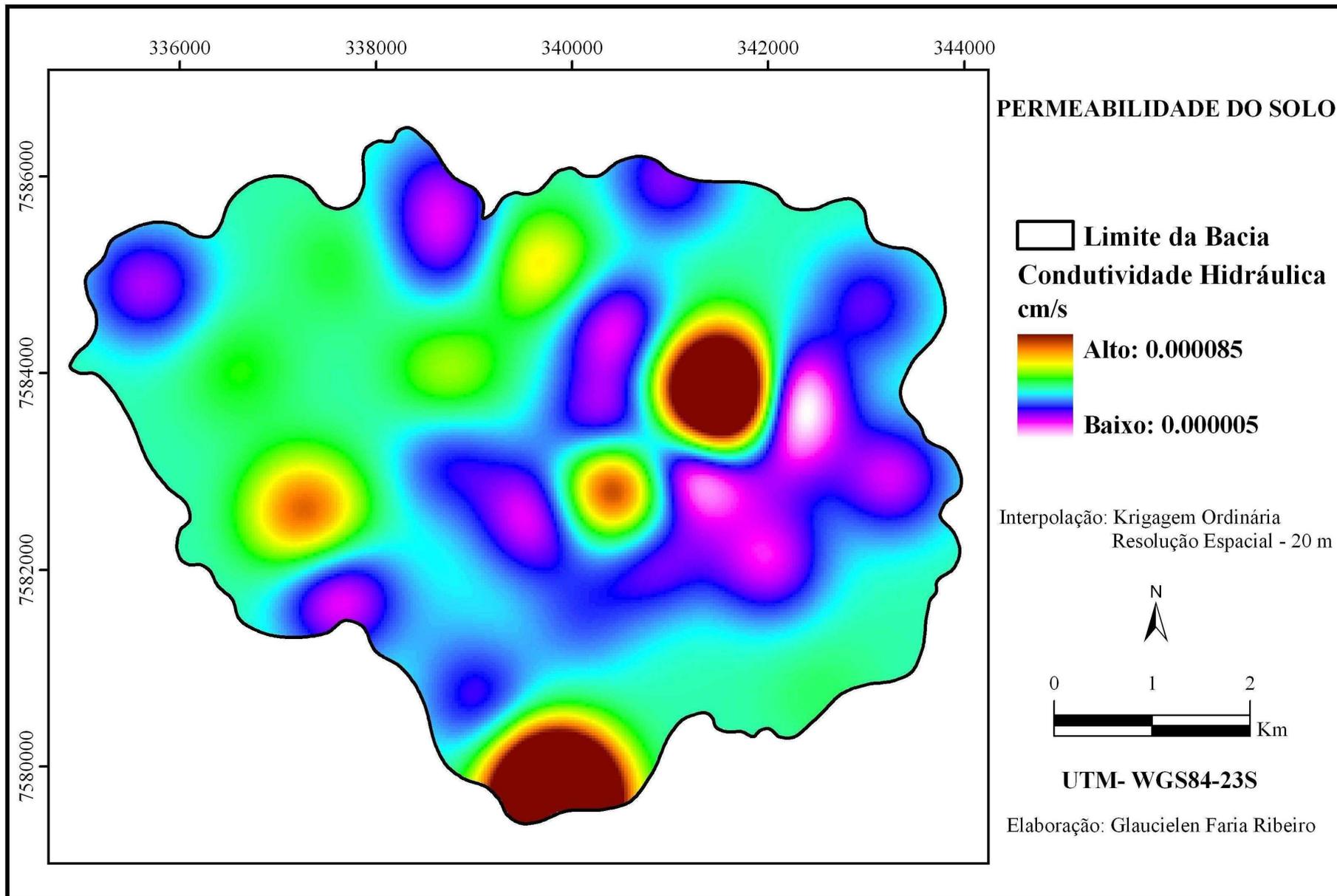


Figura 4.5 Mapa da condutividade hidráulica derivado da interpolação por Krigagem Ordinária.

4.6.2.2 Uso e Ocupação do Solo

O mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado a partir da interpretação visual de uma imagem do satélite *SPOT 4* (*Système Probatoire d'Observation de la Terre*), imageada em julho de 2003, com resolução espacial de 20 metros. Foi realizada uma composição colorida falsa-cor 312, que melhor realçou as feições dos alvos da superfície, facilitando a interpretação visual. Posteriormente, foram extraídos pontos de treinamento que foram definidos interativamente, onde selecionou-se por meio de feições geométricas de polígonos, áreas representativas à cada classe de uso do solo. Em seguida, no *software ArcMap 9.3* foi realizada uma classificação supervisionada por meio do algoritmo Máxima Verossimilhança, resultando no mapa de uso e ocupação do solo (Figura 4.6).

Para a análise do uso e ocupação do solo foram definidas sete classes pertinentes de uso que representariam de forma fidedigna as características espaciais da bacia, sendo elas: agricultura, campos, eucaliptos, mata, solo exposto, corpos d'água e área urbana. As classes foram definidas por meio de identificação realizadas em campo, apoiadas com a interpretação da imagem *SPOT 4*. A seguir, são descritas as classes consideradas:

- Mata: formação vegetal caracterizada pela predominância de indivíduos arbóreos adultos e dossel fechado, com composição de espécies indefinida, ou seja, enquadram-se nesta categoria os diversos tipos florestais presentes na bacia, que foram enquadrados em uma única categoria, denominada de mata.

- Eucalipto: caracteriza-se como floresta plantada, denominada de plantio homogêneo de espécies exóticas, para fins comerciais.

- Área urbana: corresponde aos núcleos urbanos, incluindo as áreas de expansão urbana. São caracterizadas pela presença de lotes e impermeabilização da estrutura urbana. Na bacia, concentram-se diferentes categorias de uso urbano representadas por uso residencial, comercial e industrial.

- Campos: tipo de vegetação que se caracteriza por uma cobertura predominantemente graminóide e herbácea. Nesta categoria enquadram-se os campos limpos e de altitudes e as áreas de pastagens.

- Agricultura: caracterizam-se as áreas de uso rural ocupada por culturas permanentes ou temporárias. Na área de estudo têm-se destaque culturas de ciclo curto, tais como: cultivo de batata, milho e feijão para comercialização com predomínio de pequenas e médias propriedades.

- Solo exposto: são áreas que caracterizam ausência de cobertura vegetal, onde há forte possibilidade de surgimento de erosões, que geram um carregamento de partículas para os cursos d'água. Nesta categoria enquadram-se os loteamentos e as áreas de minerações.

4.6.2.3 Declividade do terreno

A carta de declividade representa um excelente instrumento para caracterizar a declividade das vertentes, podendo os dados serem apresentados em graus ou porcentagem.

Assim, a carta de declividade foi elaborada a partir da vetorização das linhas altimétricas extraídas da carta topográfica Poços de Caldas (IBGE, 1972), escala 1:50.000, que por meio de uma interpolação matemática, utilizando o método de triangulação de Delaunay no *software ArcMap 9.3*, gerou-se uma superfície contínua triangular, denominado TIN (*Triangular Irregular Network*). O TIN consiste num tipo de Modelo Digital de Elevação (MDE) que representa a superfície por meio de um conjunto de faces triangulares interligadas, possibilitando a representação mais correta das variações de altura do terreno.

Assim, tendo como dado de entrada a superfície TIN, pelo método da triangulação, foi gerada a carta de declividade expressa em porcentagem (Figura 4.7). Para obter uma melhor visualização das áreas com diferentes inclinações, a imagem foi reclassificada em seis intervalos de declividade (0-3%; 3-6%; 6-12%; 12-20%; 20-40% e maiores que 40%). Os intervalos foram definidos a partir da metodologia proposta por De Biase (1993), que apresenta uma classificação do relevo a partir da declividade, conforme os intervalos de inclinação, e são descritos a seguir:

As faixas de declividade de 0 a 3% são consideradas áreas de várzeas (ou aluvionares), superfície topográfica onde os desnivelamentos são muito pequenos. Para a faixa de 3-6%, corresponde a relevo plano a suave ondulado, onde a superfície é

pouco movimentada com declives suaves. Para o intervalo de 6-12%, corresponde ao relevo suave ondulado a ondulado, com superfície pouco movimentada e com declives levemente acentuados. A faixa de 12-20% é representada por superfícies pouco movimentadas, mas com declives acentuados. Para o intervalo de 20-40%, o relevo predominante é o forte ondulado a montanhoso, apresentando uma topografia movimentada e com declives fortes. Por último, a faixa >40%, corresponde a relevo montanhoso, cuja superfície topográfica apresenta predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídas por morros, montanhas, apresentando desnivelamentos relativamente grandes e declives fortes e muito fortes.

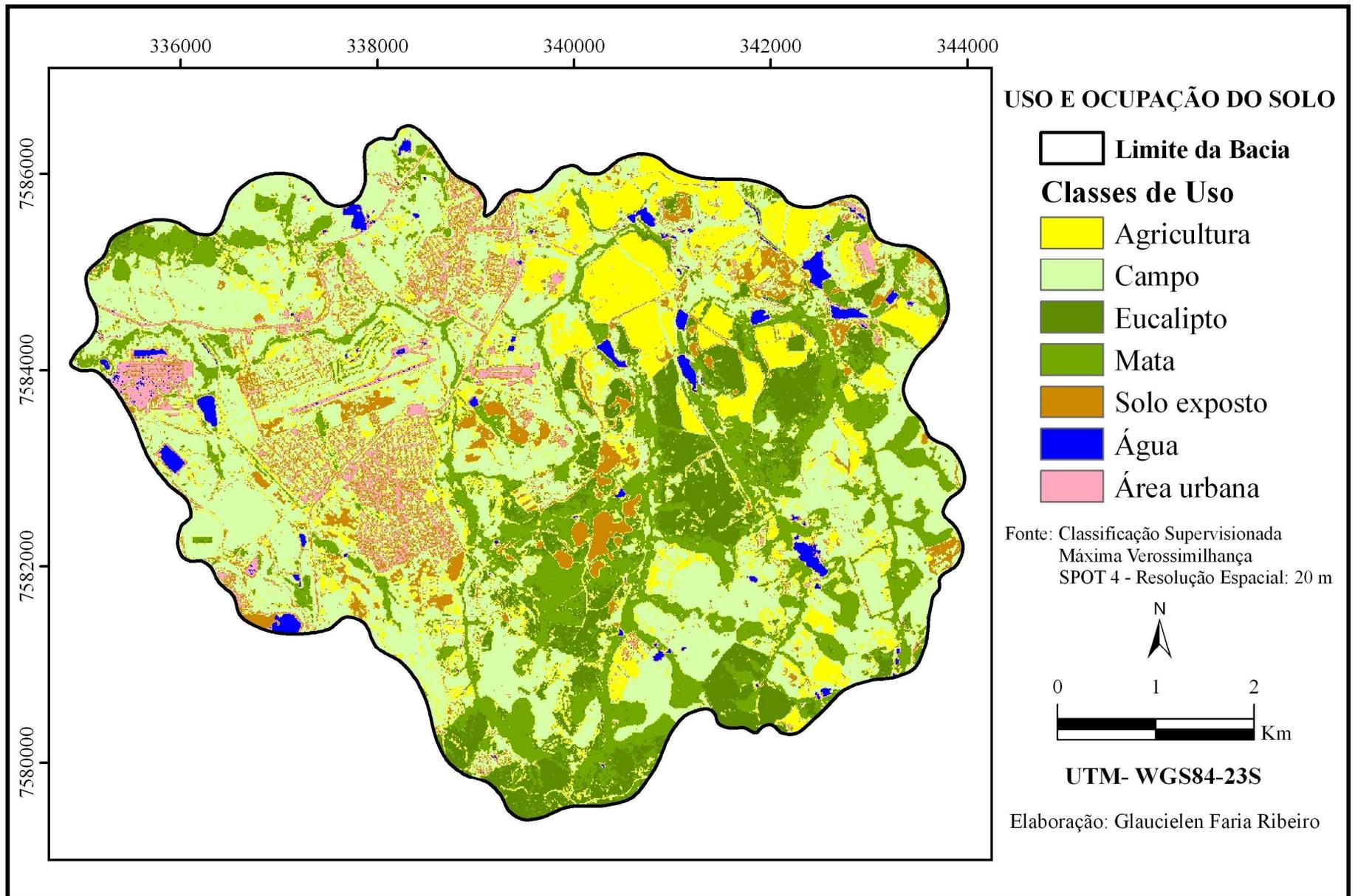


Figura 4.6 Mapa de uso e ocupação do solo derivado de classificação supervisionada.

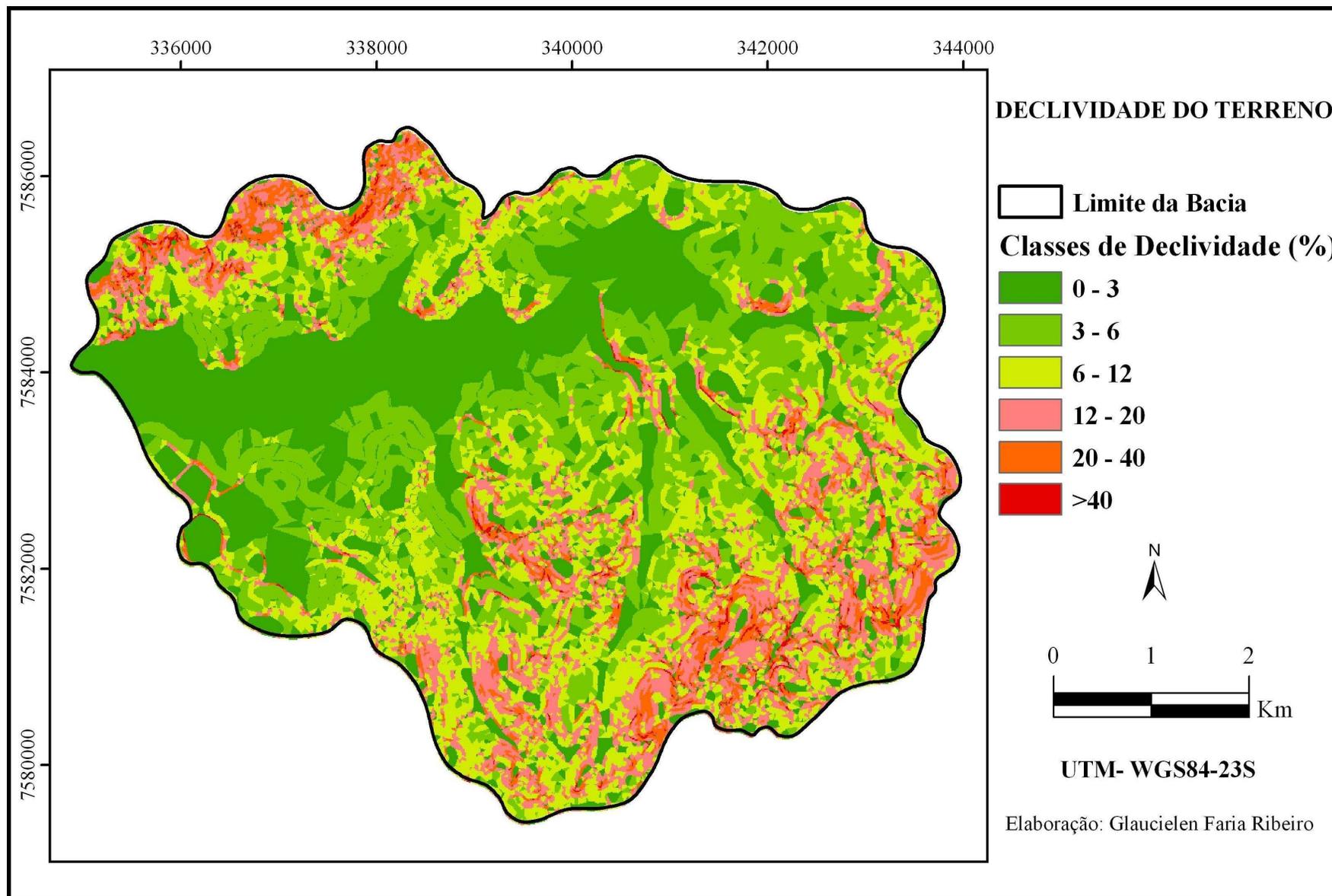


Figura 4.7 Mapa da distribuição da declividade de acordo com a área da bacia hidrográfica Vargens de Caldas.

4.6.2.4 Densidade de Lineamentos

O mapa de densidade de lineamentos foi gerado a partir de uma carta de fraturas contendo os lineamentos estruturais (Figura 4.9). A carta de fraturas foi elaborada pela CETEC (Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1987) e disponibilizada no formato de arquivo vetorial, escala 1:50.000, cuja orientação dos lineamentos estruturais seguem à direção N (Norte).

Através da ferramenta *Density* do software *ArcMap 9.3* foi calculado a densidade de cada lineamento ao redor de cada pixel do *raster* de saída. Para isso, é necessário estabelecer parâmetros de entrada na rotina *Density*. Assim, os parâmetros de entrada estabelecidos foram o estimador de cálculo por Kernel e raio de busca de 350 metros. Posteriormente, é realizado o cálculo da densidade a partir de um círculo que é desenhado ao redor de cada pixel, utilizando um raio de busca (Figura 4.8).

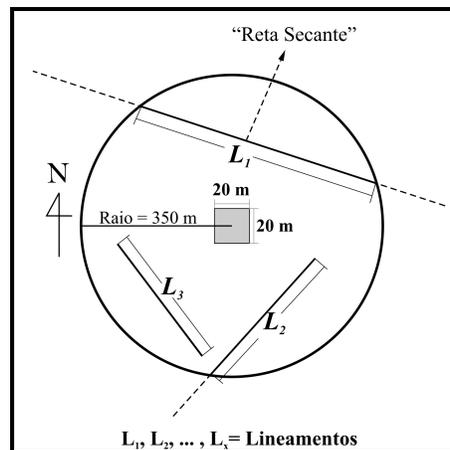


Figura 4.8 Cálculo da densidade de lineamentos. Modificado de ESRI, 2010.

A faixa de comprimento de cada lineamento que cair dentro da área do círculo é multiplicada pelo valor da população de linhas dentro do círculo e soma-se o total. Em seguida, divide-se pela área do círculo, conforme apresentado pela equação abaixo.

$$Densidade = \frac{(L1 * V1) + (L2 * V2)}{A} \quad (16)$$

onde:

$L1, L2$ = faixas de comprimentos de cada lineamento (km);

$V1, V2$ = população de linhas dentro do círculo;

A = área do círculo (km²).

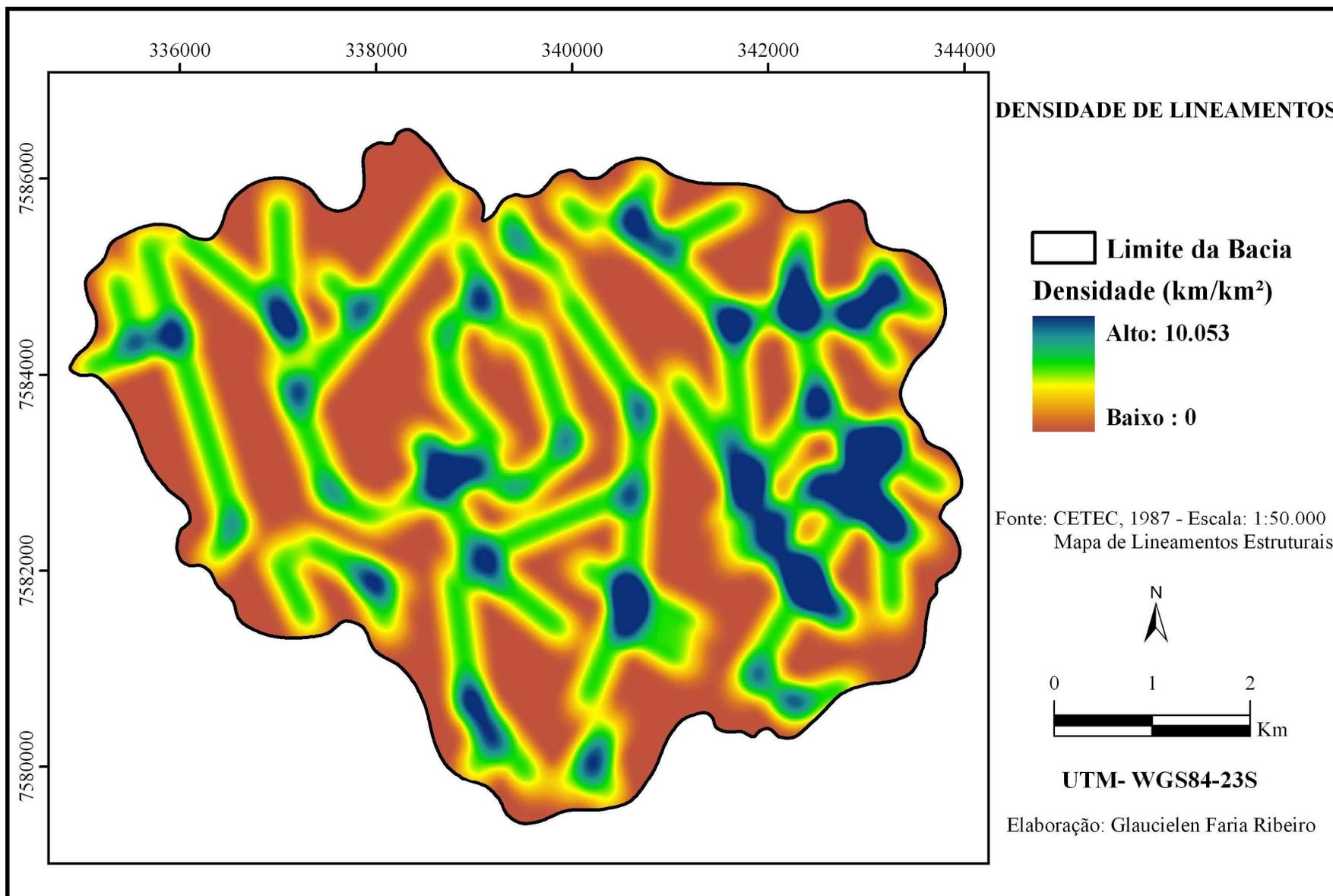


Figura 4.9 Mapa de densidade de lineamentos, com lineamentos de direção Norte.

4.7 Padronização dos Fatores

A partir dos planos de informação selecionados foram gerados os mapas de fatores e de restrições a serem empregados na avaliação multicritérios.

Para que os mapas sejam combinados na avaliação multicritérios, estes necessitam ser reescalados para um intervalo numérico comum, um processo denominado de *padronização*. A padronização é necessária em razão de cada critério (fator) estar em uma unidade diferente.

Os critérios podem ser padronizados através do método *booleano* (método baseado na lógica binária), atribuindo intervalo de valores entre 0.0 a 1.0, ou ainda, serem reescalados através do método *fuzzy*, atribuindo intervalo em nível de byte, entre 0 a 255, utilizando-se alguma função de pertinência *fuzzy* específica para cada critério.

O método *booleano* considera cada variável (fator) um nível de evidência, sendo que a combinação desses níveis elabora uma hipótese, onde cada componente de um nível é classificado como não satisfazendo (0.0) ou satisfazendo (1.0) a hipótese a ser considerada.

A análise *booleana* possui operadores lógicos como AND e OR, sendo que, o operador *booleano* AND indica que a combinação de variados níveis gera uma imagem binária, onde o valor (1.0) indica que a área satisfaz todas as condições, e o valor (0.0), indica que a área não satisfaz as condições, correspondendo a uma operação lógica de intersecção. Por outro lado, o operador *booleano* OR, indica que a combinação de diferentes níveis gera uma imagem binária, onde o valor (1.0) indica que a área satisfaz apenas uma das condições, e o valor (0.0) indica que a área não satisfaz nenhuma das condições, correspondendo a uma operação lógica de união.

O método *fuzzy* é caracterizado por uma possibilidade que varia entre 0.0 a 1.0 ou 0.0 a 255, indicando um incremento contínuo de não pertinência até a pertinência completa. A teoria sobre conjuntos *fuzzy* proporciona uma base matemática para o entendimento dos problemas de decisão e construção de regras em avaliação e combinação de critérios.

Segundo Eastman (2001) o módulo *fuzzy* do Idrisi 32 foi projetado para a construção de funções de pertinência de conjuntos *fuzzy*, que na avaliação multicritérios, a função de pertinência é usada para normalização do critério. O Idrisi 32 oferece quatro diferentes formas de função de pertinência *fuzzy*: sigmoidal, linear, em forma de J e a forma definida pelo usuário. A forma da função a ser utilizada depende do entendimento da relação entre o critério e o conjunto escolhido (decision set). Além da forma da curva, o módulo *fuzzy* também requisita posições ao longo do eixo X de quatro pontos (parâmetros) de inflexão da função de pertinência.

A escolha da função e dos pontos de inflexão para normalização dos critérios nem sempre puderam ser baseados em informações da literatura e dependeram, portanto, da avaliação subjetiva do autor.

Assim, os dados categóricos foram normalizados através do módulo *Stretch*, que é usado para aumentar o contraste de uma imagem e também como uma rotina de reescalonamento de imagens para o nível de 0 a 255 bytes. Enquanto os dados numéricos foram padronizados pelo módulo *fuzzy*, para um intervalo em nível de byte, 0 a 255. A padronização de cada critério é descrito a seguir:

Fator Declividade do terreno

O fator declividade do terreno foi padronizado utilizando como critério de análise os intervalos de classes de declividade proposto por De Biase (1993), conforme anteriormente apresentado na (Tabela 4.2). A partir dos intervalos das classes considerou-se que, as áreas com declividades inferiores a 20% representam as melhores condições de infiltração, menor escoamento da água, portanto, maior a capacidade de infiltração. As áreas com declividade acima de 20% favorecem o maior escoamento superficial, menor a infiltração e, conseqüentemente, menor a capacidade de infiltração da água.

A função de pertinência sigmoidal decrescente foi adotada para normalizar os valores de declividade. Considerou-se o primeiro ponto de inflexão, onde a curva começa a decrescer abaixo do valor máximo, o valor de declividade de 0%. Na imagem significa que, as baixas declividades terão maiores valores de pertinência. No segundo

ponto de inflexão adotado foi o valor de declividade de 20%, ponto intermediário até a base da curva de onde o valor começa a se aproximar de zero. Na imagem, significa que as maiores declividades têm os menores valores de pertinência.

Fator Uso e Ocupação do Solo

Para reescalonar os dados categóricos de uso e ocupação do solo para o intervalo de 0 a 255 níveis foram usados como critério o ordenamento hierárquico, atribuindo-se a cada categoria de uso do solo um valor em função da sua capacidade de infiltração.

A padronização foi realizada através do módulo *Assign* do Idrisi 32, onde se atribuiu o valor 255 para a categoria mata, devido à presença de cobertura vegetal densa indicando melhores condições de infiltração e, conseqüentemente, maior capacidade de infiltração. As áreas de reflorestamento de *Eucalyptus ssp* representam situação intermediária, recebendo o valor 200, as áreas de agricultura recebem o valor 150, por apresentarem culturas de plantio direto o solo ainda encontra-se protegido por uma cobertura, o que promove a redução da velocidade de impacto da água, aumentando o tempo de infiltração da água no solo. As áreas de campo por apresentarem uma cobertura vegetal baixa recebe valor 100, o solo exposto pela inexistência de cobertura vegetal recebe valor 50, considerando condições pouco favoráveis de infiltração. As áreas urbanas representam as piores condições de infiltração e, conseqüentemente, menor capacidade de infiltração, devido à impermeabilização do solo, recebeu o menor valor 10. As demais categorias, como represas, lagos, lagoas são inaptas e representam restrições absolutas e recebe valor 0, pois não contribui para análise de infiltração.

Fator Permeabilidade do solo

A imagem do fator permeabilidade do solo foi normalizada a partir da função sigmoideal monotonamente crescente no módulo *fuzzy*. Os valores dos pontos de inflexão foram determinados a partir dos dados estatísticos retirados da imagem, tais como: o valor do desvio-padrão (46) e valor máximo (220).

Ao executar o *fuzzy*, o primeiro ponto de controle, onde a curva começa a crescer até o valor máximo, considerou-se o valor mínimo (46). Na imagem, os baixos valores

de condutividade hidráulica têm os maiores valores de pertinência. O segundo ponto de controle foi o valor máximo (220), ponto intermediário até a base da curva de onde o valor começa a se aproximar de zero. Na imagem, os maiores valores de condutividade hidráulica têm os menores valores de pertinência.

Fator Densidade de Lineamentos

O fator densidade de lineamentos foi reescalado com base no critério de que as regiões com maiores valores de densidade de lineamentos determinam áreas de intenso fraturamento, nessas zonas as rochas apresentam maior grau de ruptibilidade, porém, ocorre à percolação de fluidos de maneira concentrada pelas fraturas, dessa forma são favorecidos os processos de infiltração, circulação e armazenamento de água.

O fator densidade de lineamentos foi normalizado pela função de pertinência sigmoidal monotonamente crescente. Os valores considerados nos pontos de controle da função foram os dados estatísticos como desvio-padrão (69) e valor máximo (250).

No módulo *fuzzy*, o primeiro ponto de inflexão, onde a curva começa a crescer até o valor máximo, considerou-se o valor mínimo (69). Na imagem, significa que os baixos valores de densidade de lineamentos possuem os maiores valores de pertinência. O segundo ponto de inflexão será o valor de máximo (250), ponto intermediário até a base da curva de onde o valor começa a se aproximar de zero. Os maiores valores de densidade de lineamento na imagem têm os menores valores de pertinência.

Imagem de Restrições

Uma imagem de restrição *booleana* foi gerada com valores variando entre 0.0 a 1.0, onde os limites dos corpos d'água são as áreas consideradas de não interesse na análise da capacidade de infiltração, portanto, foram consideradas as restrições nesse estudo.

Restrições são critérios *booleanos* que cerceiam a análise a regiões geográficas específicas. Neste caso, a restrição representada pelos limites dos corpos d'água foi atribuído o valor (0) e demais áreas foi atribuído o valor (1).

Assim, a imagem *booleana* atuou como uma máscara no mapa final com a função de excluir as áreas que não foram consideradas na avaliação multicritérios.

4.8 Definição dos Pesos dos Fatores

Embora existam na literatura diversos métodos de atribuição de pesos para variáveis, este estudo apoiou-se no método de comparação par a par entre fatores, que no contexto do processo de tomada de decisão é denominado PHA (*Processo Analítico Hierárquico*).

O *Processo Analítico Hierárquico* constitui uma técnica de avaliação multicritérios, desenvolvida por Saaty (1980) e consiste em comparar par a par os diferentes fatores que influenciam na tomada de decisão, e um critério de importância relativa é atribuído ao relacionamento entre estes fatores, conforme uma escala pré-definida (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 Escala de valores para comparação pareada dos fatores na Avaliação Multicritérios.

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extremamente	Muito fortemente	Fortemente	Moderadamente	Igualmente Importante	Moderadamente	Fortemente	Muito fortemente	Extremamente
Menos importante					Mais importante			

Fonte: Saaty (1980).

Cada fator (uso e ocupação do solo, permeabilidade do solo, declividade do terreno, densidade de lineamentos) foi analisado e comparado criteriosamente par a par, de acordo com sua importância e influência na capacidade de infiltração. Com os valores retirados da escala pré-definida, estes por sua vez são inseridos numa matriz de comparação pareada, que indica qual o fator mais importante e, quanto este fator (coluna da esquerda) é mais importante que os demais fatores (linha superior) aos quais está sendo comparado.

A matriz construída desta forma facilita a valoração do grau de importância dos critérios (fatores), diminuindo, assim, a inconsistência dos julgamentos dos decisores.

Com base na definição dos valores de importância retirados da escala de valores foi elaborada a matriz de julgamento dos fatores, conforme mostra a Tabela 4.6.

Tabela 4.6 Matriz de comparação pareada entre os fatores.

FATORES	Uso e Ocupação do solo	Permeabilidade do Solo	Declividade do terreno	Densidade de Lineamentos
Uso e Ocupação do solo	1			
Permeabilidade do solo	1/5	1		
Declividade do terreno	1/3	1/3	1	
Densidade de Lineamentos	1/7	1/3	1/2	1

A matriz por sua vez é simétrica, portanto, necessitando que seja preenchida somente a metade triangular, pois as células remanescentes serão as recíprocas das preenchidas. A diagonal que segue do canto superior esquerdo ao canto inferior direito da matriz é preenchida com o valor 1, indicando que quando um fator é comparado com ele mesmo é considerado igualmente importante.

Concluída a comparação pareada dos fatores, o peso de cada fator é calculado através do método de derivação de pesos PHA (*Processo Analítico Hierárquico*), que consiste no cálculo do autovetor principal da matriz de comparação pareada. Os pesos são estabelecidos com o objetivo de expressar a importância de cada critério em relação aos outros. Quanto maior o peso, maior a importância do fator em relação à avaliação global.

Esse procedimento foi realizado no módulo *Weight* do Idrisi 32, onde o processo resulta em um peso para cada fator e numa razão de consistência da comparação pareada. O cálculo dos pesos pode ser feito interativamente várias vezes, retornando-se à matriz de comparação pareada, ajustando-se os escores e calculando pesos até que uma razão de consistência aceitável seja alcançada.

Segundo Saaty & Vargas (1991) a razão de consistência indica o grau de consistência atingido no desenvolvimento dos pesos. Qualquer inconsistência que tenha ocorrido durante o processo de comparação pareada dos fatores, o procedimento *Weight* analisa a matriz para determinar onde se encontram as inconsistências lógicas. Assim, o procedimento somente aceita os pesos quando uma razão de consistência seja inferior a 0,10.

4.9 Mapa da Capacidade de infiltração da Bacia Hidrográfica Vargens de Caldas

O mapa da capacidade de infiltração da bacia Vargens de Caldas foi gerado a partir do cruzamento dos critérios de uso e ocupação do solo, permeabilidade do solo, declividade do terreno e densidade de lineamentos.

O cruzamento dos critérios foi realizado através do módulo de avaliação por critérios múltiplos *MCE* do Idrisi 32. O módulo *MCE* exige que o analista escolha um método de avaliação por multicritérios, assim, o método de agregação utilizado neste estudo foi o denominado de *Combinação Linear Ponderada* (CLP).

O método CLP permite uma compensação completa entre todos os fatores. Exemplificando, um alto escore de declividade num local pode compensar um baixo escore de uso do solo no mesmo local. No cenário inverso, um alto escore do uso do solo pode compensar um baixo escore de declividade. O grau com que um fator pode compensar outro é determinado pelo seu peso.

No Idrisi, o procedimento da avaliação multicritérios inicia-se solicitando a entrada dos mapas de critérios padronizados com seus respectivos pesos. Em seguida, deve-se especificar o método de agregação por multicritérios, neste ponto o método adotado foi a *Combinação Linear Ponderada* (CLP). Assim, o método CLP inicia-se multiplicando cada mapa de fator padronizado pelo seu peso correspondente, este cálculo é feito pixel a pixel e a seguir somam-se os resultados.

Em seguida, o último passo no método CLP é multiplicar as restrições *booleanas*, correspondente aos limites dos corpos d'água, de forma a eliminar as áreas que não serão consideradas de interesse na avaliação multicritérios. O resultado desse processo constitui uma imagem da capacidade de infiltração, cujos valores variam de 0 a 255 níveis. Essa imagem foi posteriormente reclassificada em classes que designam de forma qualitativa a capacidade de infiltração.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Morfometria da Bacia Hidrográfica Vargens de Caldas

A Tabela 5.1 a seguir apresenta os resultados dos parâmetros morfométricos calculados para a bacia hidrográfica Vargens de Caldas.

Verifica-se que, a bacia Vargens de Caldas apresenta uma área de drenagem de 42,45km² e perímetro de 29,25km, indicando que a bacia possui boas condições de controle dos fatores hidrológicos que ali interferem.

Quanto à forma da bacia foi definida através de índices que relacionam a mesma com formas geométricas, tais como: coeficiente de compacidade, fator de forma e índice de circularidade. A forma de uma bacia hidrográfica constitui numa importante característica morfométrica, pois determina o tempo de concentração, ou seja, o tempo necessário que leva para a água cobrir a bacia e chegar até o ponto de saída (exutório). De acordo com Villela & Mattos (1975) quanto maior o tempo de concentração, menor será a vazão máxima de enchente, se mantidas constantes as outras características físicas da bacia.

Verifica-se que, a bacia em estudo apresenta baixo tempo de concentração da água da chuva em função do coeficiente de compacidade exibir valor próximo da unidade 1,27 e de seu fator de forma exibir valor alto 0,22. Esses valores indicam que a bacia possui formato semelhante ao de uma circunferência, ou seja, sua forma tende a ser mais próxima de bacia circular. Tal fato pode ainda ser comprovado pelo índice de circularidade que exibiu valor próximo da unidade 0,61, indicando que a bacia tende a forma circular, favorecendo os processos de inundação, uma vez que um evento de precipitação intensa cubra toda a extensão da bacia concentrando grande volume de água em um único ponto, que é seu curso d'água principal.

Tabela 5.1 Parâmetros morfométricos obtidos da bacia hidrográfica Vargens de Caldas.

Características Geométricas		
Parâmetros	Valores	Unidades
Área de Drenagem	42,45	km ²
Perímetro	29,25	km
Coeficiente de compacidade	1,27	
Fator de forma	0,22	
Índice de Circularidade	0,61	km
Índice de Sinuosidade	1,66	
Padrão de drenagem	dendrítico	
Características do Relevo		
Declividade mínima	1,0	%
Declividade média	3,31	%
Declividade máxima	40	%
Altitude mínima	1250	m
Altitude média	1318	m
Altitude máxima	1480	m
Amplitude altimétrica	230	m
Declividade do álveo	12,59	m/km
Características da Rede de Drenagem		
Comprimento total dos canais	69,17	km
Comprimento do canal principal	13,89	km
Ordem da bacia (Strahler, 1957)	4	
Densidade de drenagem	1,62	km/km ²
Fator de Assimetria	42	

Pode-se inferir que, a bacia Vargens de Caldas sendo propensa a sofrer cheias, gera por consequência um desequilíbrio no seu comportamento hidrológico, principalmente ocorrências de vazões de pico, acima do valor máximo considerado para a capacidade das obras de drenagem.

A bacia em estudo apresenta uma média capacidade de densidade de drenagem (1,62 km/km²), que de acordo com Villela & Mattos (1975) os valores de densidade de drenagem podem variar de 0,5 km/km² em bacias com drenagem pobre a 3,5 km/km², ou mais, para bacias bem drenadas

O sistema de drenagem apresenta uma hierarquia fluvial de quarta ordem, quanto mais ramificada for à rede de drenagem, mais eficiente é o sistema de drenagem. A Figura 5.1 a seguir, ilustra o ordenamento dos cursos d'água da bacia, segundo

metodologia proposta por Strahler (1957).

Quanto ao fator de assimetria encontrado foi inferior a 50, indicando que a área à esquerda dos rios é predominantemente superior à direita, tal fato indica que o terreno tenha sofrido basculamento de blocos para a margem direita. A partir do basculamento de blocos devido à ação de eventos tectônicos, redirecionou os segmentos de drenagem que originalmente são do tipo dendrítico.

Keller & Pinter (1996) ressaltam que, se o fator de assimetria exibir valor maior que 50 têm-se basculamento de blocos para a esquerda da bacia, se o fator de assimetria for menor que 50, indica basculamento para a sua direita. Entretanto, fator de assimetria muito inferior ou muito superior a 50 a bacia têm grande probabilidade de ser tectonicamente controlada.

Em relação ao índice de sinuosidade que exibiu o valor 1,66, indicando que o canal principal, o Ribeirão das Vargens tem formas transicionais, regulares e irregulares. De acordo com Lana et al., (2001), a sinuosidade dos canais é influenciado pela carga de sedimentos, pela compartimentação litológica, estruturação geológica e pela declividade dos canais.

A declividade média da bacia é de 3,31%, sendo valor condizente com o relevo ondulado da área. Esse parâmetro possui grande influência sobre o escoamento superficial, afetando o tempo que leva para a água da chuva concentrar-se nos leitos fluviais.

Na Figura 4.7 ilustra a distribuição da declividade do terreno em seis intervalos de classes e a Tabela 5.2 mostra a reclassificação da declividade e as informações quantitativas associadas. Observa-se que, a grande parte do relevo da bacia corresponde ao ondulado a forte ondulado (faixa de declividade de 12-20%), representando 26,31% da área total da bacia. Há forte predominância também de áreas de várzeas (faixa de declividade de 0-3%), representando 25,79% da área total.

Tabela 5.2 Distribuição das classes de declividade da bacia hidrográfica Vargens de Caldas.

Declividade - (%)	Relevo	Área (km²)	% da bacia
0 - 3	Várzea	10,951	25,79
3 - 6	Plano a suave ondulado	1,7255	4,06
6 - 12	Suave ondulado a ondulado	6,644	15,65
12 - 20	Ondulado a forte ondulado	11,1696	26,31
20 - 40	Forte ondulado a montanhoso	10,2664	24,18
> 40	Montanhoso	1,6918	3,98

A declividade, dentre outros fatores é relevante por influenciar no tempo de concentração da água na bacia, na magnitude dos picos de enchentes, nos teores de infiltração e na susceptibilidade à erosão dos solos, dependendo da rapidez com que ocorre o escoamento sobre os terrenos da bacia.

A altitude da bacia varia de 1250m a 1480m (Figura 5.2) e a altitude média é de 1318m. A variação altimétrica de uma bacia é um elemento importante no que confere na quantidade de radiação, evapotranspiração, temperatura e precipitação. Assim, grandes variações na altitude ocasionam diferenças significativas na temperatura e variações na evapotranspiração.

Portanto, o estudo das características morfométricas mostrou que a bacia hidrográfica Vargens de Caldas aponta para uma bacia de forma mais circular, evidenciando maior susceptibilidade a sofrer enchentes acentuadas.

Conclui-se com esse estudo que, a morfometria de bacias hidrográficas constitui elementos importantes para melhor compreensão de diversas questões associadas à dinâmica hidrológica e ambiental. Dessa forma, nenhum dos parâmetros morfométricos, devem ser entendidos e analisados isoladamente, de maneira a simplificar a complexa dinâmica de uma bacia hidrográfica, na qual tem variação temporal.

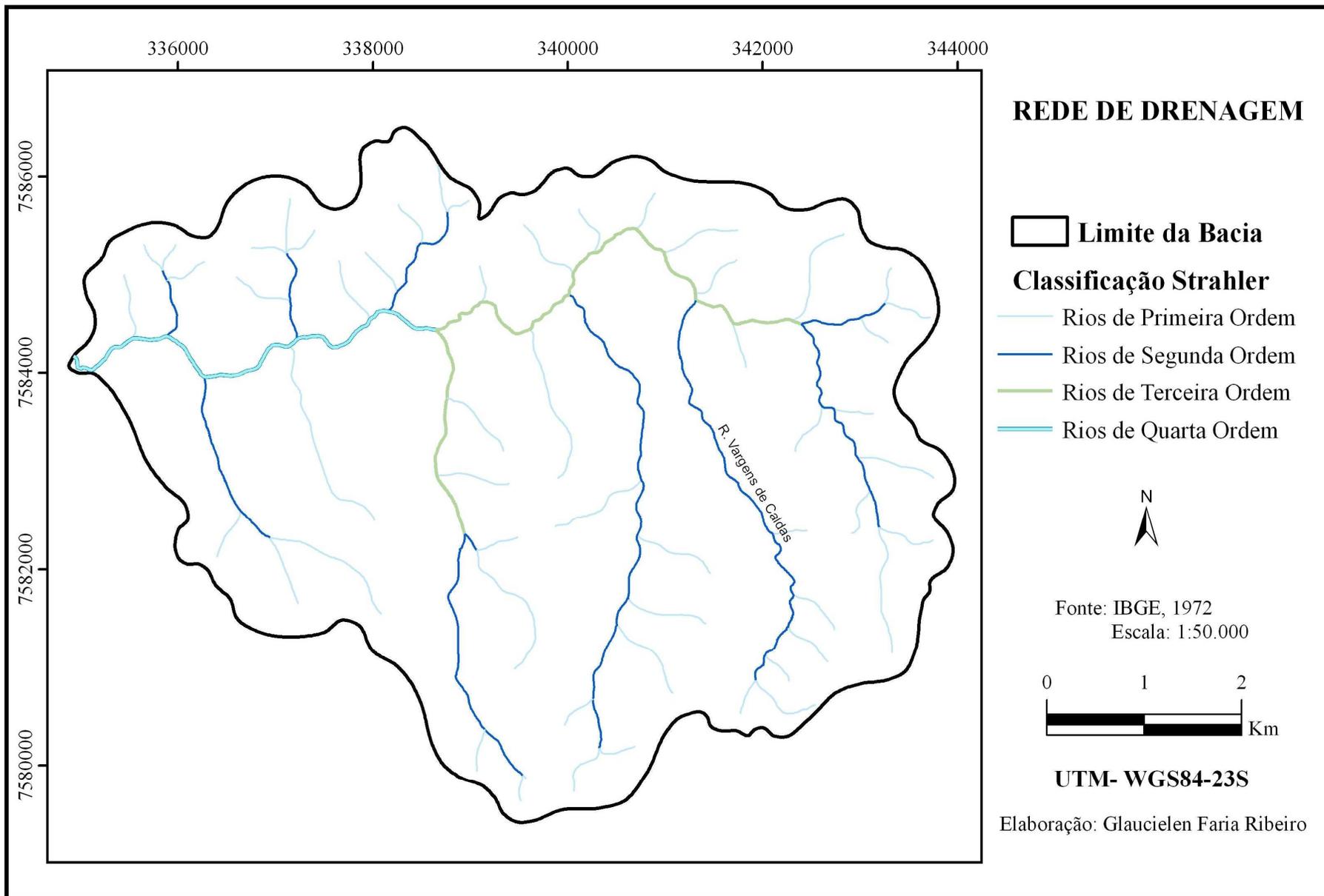


Figura 5.1 Mapa da rede de drenagem. Ordenamento dos cursos d'água, segundo classificação de Strahler (1957).

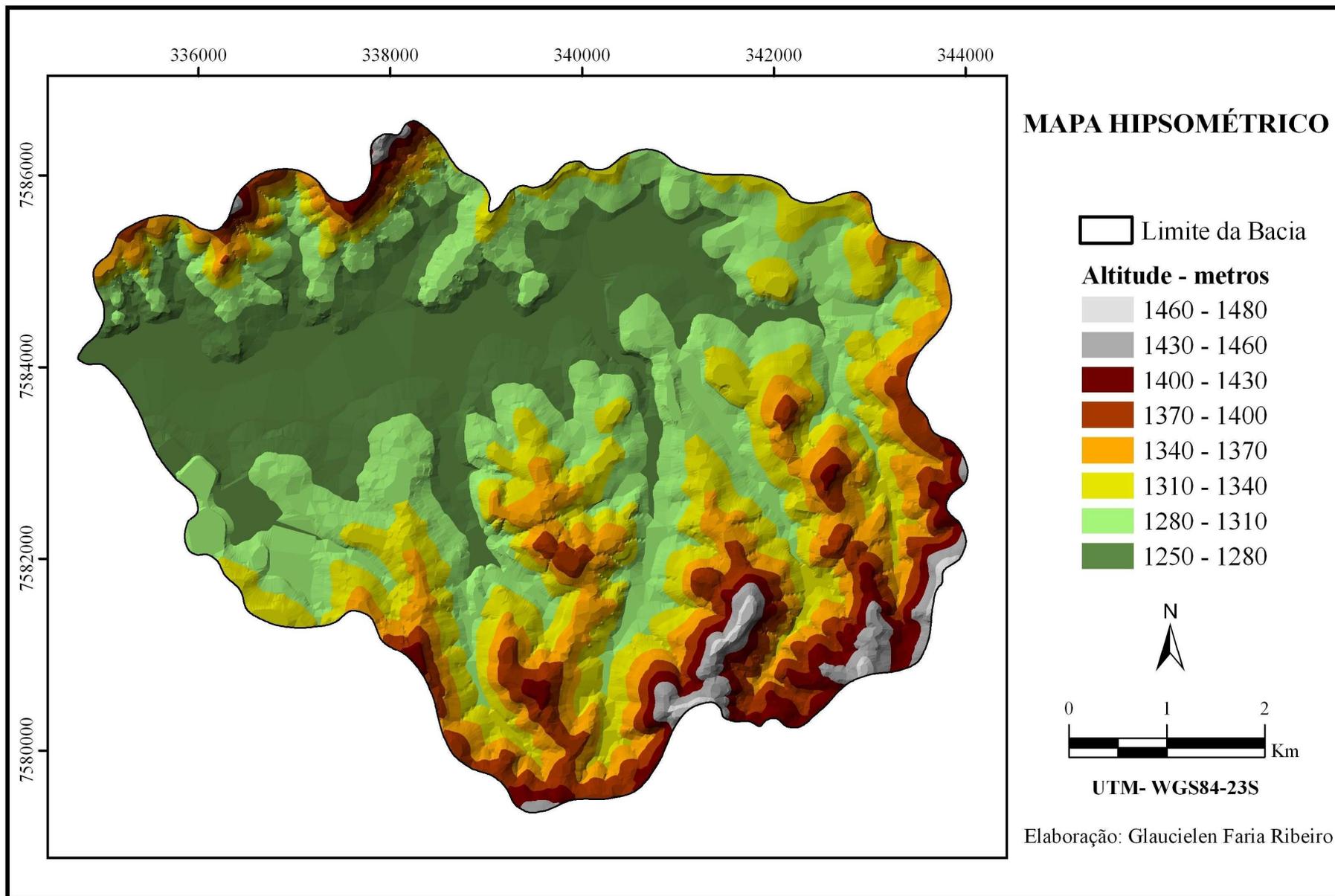


Figura 5.2 Mapa da variação altimétrica da bacia hidrográfica Vargens de Caldas.

5.2 Análise da Condutividade hidráulica obtida nos ensaios do primeiro campo

Os resultados da condutividade hidráulica do campo saturado (K_{fs}) dos dez ensaios obtidos com o Permêmetro *Guelph*, calculados a partir dos três métodos de cálculo citados anteriormente, são apresentados na Tabela 5.3.

Os resultados mostram que, os valores da condutividade hidráulica calculados pela equação de Laplace & Gardner (1958), quando comparados com o obtido pela equação Reynolds & Elrick (1985), resultou em valores muito próximos, onde os parâmetros K_{fs} se mantiveram na mesma ordem de grandeza para todos os ensaios.

O método de Reynolds & Elrick (1989) forneceu os menores valores de K_{fs} e muitos valores chegando à diferença de uma ordem de grandeza. A diferença observada nos parâmetros K_{fs} por este método deve-se ao fato de que Reynolds & Elrick (1989), a fim de evitar variações ou valores negativos da condutividade hidráulica, inseriram um terceiro denominador na equação ($2\pi H/\alpha$), que denominaram de capilaridade, e deduziram que a determinação do parâmetro K_{fs} é dependente da escolha do valor de α^* . Isso explicaria que o parâmetro α^* (parâmetro que relaciona a textura e a estrutura do solo), pode ter influenciado nos resultados da condutividade hidráulica do campo saturado (K_{fs}).

Tabela 5.3 Coeficiente de condutividade hidráulica calculada por diferentes métodos.

Condutividade hidráulica (cm/s)				
Ensaio	Q (cm ³ /s)	Método Laplace & Gardner (1958)	Método Reynolds & Elrick (1985)	Método Reynolds & Elrick (1989)
P01	0,002347	1,15 x 10 ⁻⁵	1,15 x 10 ⁻⁵	2,08 x 10 ⁻⁶
P02	0,001808	8,85 x 10 ⁻⁶	8,85 x 10 ⁻⁶	1,60 x 10 ⁻⁶
P03	0,000411	2,01 x 10 ⁻⁶	2,01 x 10 ⁻⁶	3,64 x 10 ⁻⁷
P04	0,002813	1,38 x 10 ⁻⁵	1,38 x 10 ⁻⁵	1,12 x 10 ⁻⁵
P05	0,191745	9,38 x 10 ⁻⁴	9,38 x 10 ⁻⁴	1,70 x 10 ⁻⁴
P06	0,017140	8,39 x 10 ⁻⁵	8,39 x 10 ⁻⁵	1,52 x 10 ⁻⁵
P07	0,003709	1,82 x 10 ⁻⁵	1,81 x 10 ⁻⁵	3,29 x 10 ⁻⁶
P08	0,165098	8,08 x 10 ⁻⁴	8,08 x 10 ⁻⁴	1,46 x 10 ⁻⁴
P09	1,064211	5,21 x 10 ⁻³	5,21 x 10 ⁻³	9,44 x 10 ⁻⁴
P10	0,002331	9,79 x 10 ⁻⁶	9,79 x 10 ⁻⁶	1,77 x 10 ⁻⁶

Analisando a Tabela 5.3 observa-se ainda que, o menor valor de K_{fs} encontrado nos ensaios foi no ponto P03 ($3,64 \times 10^{-7}$ cm/s), isso mostra a presença de um material

mais fino (silte/argila). Enquanto, o valor mais alto de condutividade hidráulica encontrado, corresponde ao ensaio P09 ($5,21 \times 10^{-3}$).

De um modo geral, essa variabilidade pode ser explicada pela heterogeneidade das características físico-hídricas do solo, tais como: textura, estrutura e porosidade do solo, que influenciam diretamente à condutividade hidráulica saturada, de maneira que a mesma varia de um local a outro.

A Figura 5.3 mostra as curvas da variável condutividade hidráulica do campo saturado, calculados a partir dos três métodos aplicados nos dez pontos ensaiados. Observa-se que, as curvas do método de Laplace & Gardner (1958) e Reynolds & Elrick (1985) praticamente se coincidem, em função que os resultados de K_{fs} foram muito próximos. No ensaio 04, é possível notar uma pequena queda na curva de Laplace & Gardner (1958), nesse ponto o valor de K_{fs} foi menor comparado com Reynolds & Elrick (1985), mas manteve-se na mesma ordem de grandeza. Tal fato pode ser explicado pela heterogeneidade do solo, essa heterogeneidade está relacionada à compactação, desnudação e macroporosidade, pois se o solo tiver uma maior heterogeneidade os valores de K_{fs} são afetados (Soto, 1999).

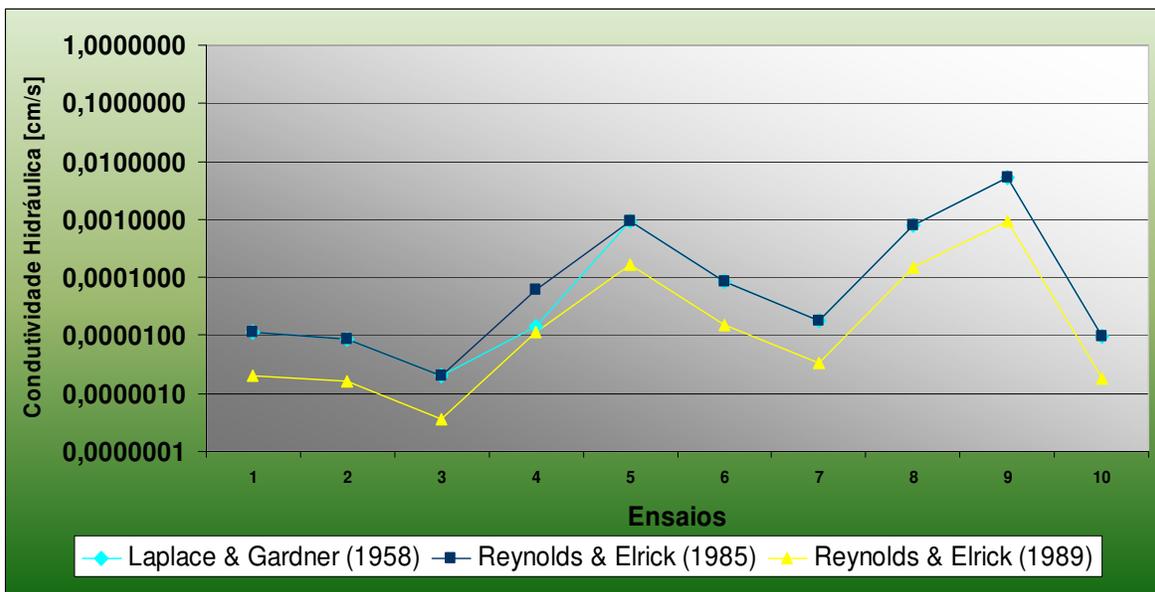


Figura 5.3 Comparação dos resultados dos valores da condutividade hidráulica calculados por diferentes métodos.

Por outro lado, a curva do método de Reynolds & Elrick (1989) se afasta das demais, em função dos valores de K_{fs} interpretados por este método exibirem valores mais baixos, comparados com os demais métodos. Além disso, observa-se ainda que, nos ensaios P05, P08 e P09, foram encontrados os maiores valores de condutividade hidráulica, no gráfico denota um pico acentuado nas três curvas, provavelmente esses solos apresentam características hidráulicas similares. Apesar de estes solos apresentarem texturas diferentes, esta semelhança deve estar associada à macroporosidade desses solos, aparentemente muito parecidas e aos valores da condutividade hidráulica do campo saturado, que são muito próximos.

5.3 Análise da Condutividade hidráulica obtida nos ensaios do segundo campo

Os resultados da variável condutividade hidráulica do campo saturado dos 32 ensaios foram calculados a partir dos três métodos descritos anteriormente e são apresentados a seguir na Tabela 5.4.

Dos resultados, verifica-se que a variável K_{fs} calculado pela equação de Laplace & Gardner (1958), também forneceu resultados muito próximos aos de Reynolds & Elrick (1985) e os valores de K_{fs} mantiveram-se na mesma ordem de grandeza.

Quando se aplicou a equação de Reynolds & Elrick (1989), os resultados da condutividade hidráulica passaram a ser menores e com diferença de uma ordem de grandeza para quase todos os ensaios. Assim, a diferença observada nos valores da variável condutividade hidráulica por este método deve-se que, sua equação utiliza três denominadores, onde os dois primeiros denotam pressão hidráulica e gravidade e o terceiro denominou-se de capilaridade, que depende fortemente do valor de α^* .

Na Equação 15, o parâmetro α^* afeta diretamente o valor da condutividade hidráulica, que por sua vez está relacionado com a macroporosidade do solo, sendo que, o atributo macroporosidade é o que mais explica essa variação da condutividade hidráulica. Fisicamente isto pode ser interpretado como: um solo com maior valor de α^* possui uma maior macroporosidade, onde os efeitos matriciais deste (potencial matricial e sucção) são menos atuantes, o que implica uma grande diminuição da condutividade hidráulica com pequenas mudanças de sucção.

Tabela 5.4 Coeficiente de condutividade hidráulica calculada por diferentes métodos.

Condutividade hidráulica (cm/s)				
Ensaio	Q (cm³/s)	Método Laplace & Gardner (1958)	Método Reynolds & Elrick (1985)	Método Reynolds & Elrick (1989)
P01	0,0189	$9,23 \times 10^{-5}$	$9,23 \times 10^{-5}$	$1,67 \times 10^{-5}$
P02	1,5986	$7,82 \times 10^{-3}$	$7,82 \times 10^{-3}$	$1,42 \times 10^{-3}$
P03	0,0178	$8,71 \times 10^{-5}$	$8,71 \times 10^{-5}$	$1,58 \times 10^{-5}$
P04	0,01137	$5,56 \times 10^{-5}$	$5,56 \times 10^{-5}$	$1,01 \times 10^{-5}$
P05	0,00652	$3,19 \times 10^{-5}$	$3,19 \times 10^{-5}$	$5,78 \times 10^{-6}$
P06	0,00206	$1,01 \times 10^{-5}$	$1,01 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-6}$
P07	0,00162	$7,93 \times 10^{-6}$	$7,93 \times 10^{-6}$	$1,44 \times 10^{-6}$
P08	0,00075	$3,67 \times 10^{-6}$	$3,67 \times 10^{-6}$	$6,65 \times 10^{-7}$
P09	0,0680	$3,33 \times 10^{-4}$	$3,33 \times 10^{-4}$	$6,03 \times 10^{-5}$
P10	0,01013	$4,96 \times 10^{-5}$	$4,95 \times 10^{-5}$	$8,98 \times 10^{-6}$
P11	0,00335	$1,64 \times 10^{-5}$	$1,64 \times 10^{-5}$	$2,97 \times 10^{-6}$
P12	0,0213	$1,04 \times 10^{-4}$	$1,04 \times 10^{-4}$	$1,89 \times 10^{-5}$
P13	0,0316	$1,55 \times 10^{-4}$	$1,55 \times 10^{-4}$	$2,80 \times 10^{-5}$
P14	0,00316	$1,55 \times 10^{-5}$	$1,55 \times 10^{-5}$	$2,81 \times 10^{-6}$
P15	0,01028	$5,03 \times 10^{-5}$	$5,03 \times 10^{-5}$	$9,12 \times 10^{-6}$
P16	0,00278	$1,36 \times 10^{-5}$	$1,36 \times 10^{-5}$	$2,47 \times 10^{-6}$
P17	0,00532	$2,60 \times 10^{-5}$	$2,60 \times 10^{-5}$	$4,72 \times 10^{-6}$
P18	0,00232	$1,14 \times 10^{-5}$	$1,14 \times 10^{-5}$	$2,06 \times 10^{-6}$
P19	0,0142	$6,97 \times 10^{-5}$	$6,97 \times 10^{-5}$	$1,26 \times 10^{-5}$
P20	0,00535	$2,62 \times 10^{-5}$	$2,62 \times 10^{-5}$	$4,74 \times 10^{-6}$
P21	0,0168	$8,22 \times 10^{-5}$	$8,22 \times 10^{-5}$	$1,49 \times 10^{-5}$
P22	0,00434	$2,12 \times 10^{-5}$	$2,12 \times 10^{-5}$	$3,85 \times 10^{-6}$
P23	0,00332	$1,62 \times 10^{-5}$	$1,62 \times 10^{-5}$	$2,94 \times 10^{-6}$
P24	0,0249	$1,22 \times 10^{-4}$	$1,22 \times 10^{-4}$	$2,21 \times 10^{-5}$
P25	0,00684	$3,35 \times 10^{-5}$	$3,35 \times 10^{-5}$	$6,07 \times 10^{-6}$
P26	0,0963	$4,71 \times 10^{-4}$	$4,71 \times 10^{-4}$	$8,54 \times 10^{-5}$
P27	0,00197	$9,64 \times 10^{-6}$	$9,64 \times 10^{-6}$	$1,75 \times 10^{-6}$
P28	0,00637	$3,12 \times 10^{-5}$	$3,12 \times 10^{-5}$	$5,65 \times 10^{-6}$
P29	0,00786	$3,85 \times 10^{-5}$	$3,85 \times 10^{-5}$	$6,97 \times 10^{-6}$
P30	0,0320	$1,57 \times 10^{-4}$	$1,57 \times 10^{-4}$	$2,84 \times 10^{-5}$
P31	0,5395	$2,64 \times 10^{-3}$	$2,64 \times 10^{-3}$	$4,78 \times 10^{-4}$
P32	0,2052	$1,00 \times 10^{-3}$	$1,00 \times 10^{-3}$	$1,82 \times 10^{-4}$

Um ponto importante que influencia nos ensaios de condutividade hidráulica, é a heterogeneidade do solo. Essa heterogeneidade está relacionada com as condições do mesmo (compactação, macroporosidade) e até mesmo o tipo de uso do solo (Soto, 1999).

Conforme a análise do autor, na prática verificou-se que em algumas situações que os ensaios realizados por vezes em locais relativamente próximos, apresentaram diferença no valor de K_{fs} de uma ordem de grandeza. Portanto, tal fato pode ser explicado pela heterogeneidade do solo, que pode ter influenciado nos valores de K_{fs} , o que torna a condutividade hidráulica uma variável extremamente difícil de ser espacializada.

Comparando ambos os métodos de cálculo de K_{fs} verificou-se que, a diferença entre um método e outro está relacionado em considerar ou não o efeito da capilaridade na formação do bulbo de saturação durante o ensaio. O método de Laplace & Gardner (1958) despreza a componente capilar da infiltração e considera apenas o bulbo de saturação que é formado abaixo da carga hidráulica aplicada. Enquanto o método de Reynolds & Elrick (1985) e Reynolds & Elrick (1989), consideram o efeito da capilaridade e além do bulbo de saturação formado abaixo da carga hidráulica, os autores consideram também o bulbo que se forma no solo ao redor do furo de sondagem durante a realização dos ensaios.

Assim, mediante os resultados da condutividade hidráulica do campo saturado calculada por qualquer das metodologias utilizadas, os resultados mostraram-se consistentes com o tipo e textura do solo da área de estudo.

Portanto, analisando e comparando conjuntamente os resultados da condutividade hidráulica obtido nos dez pontos do primeiro campo (Tabela 5.3), com os resultados obtidos nos dez primeiros pontos do segundo campo (Tabela 5.4), para os solos ensaiados na mesma localidade e profundidade (75,0cm), os resultados mostram como esperado, variações nos valores de K_{fs} .

A Figura 5.4 mostra o comportamento da variável condutividade hidráulica dos dez ensaios do primeiro campo, com os dez ensaios do segundo campo, calculados a partir da equação de Reynolds & Elrick (1989).

Essas variações nos valores de K_{fs} são explicadas pela umidade e heterogeneidade do solo, são fatores que podem ter comprometido nos resultados da condutividade hidráulica. De acordo com Reynolds & Elrick (1989), se o solo apresentar um maior grau de heterogeneidade, produto da macroporosidade entre uma medição e

outra em campo, os valores de K_{fs} são afetados, resultando em variações ou resultados negativos.

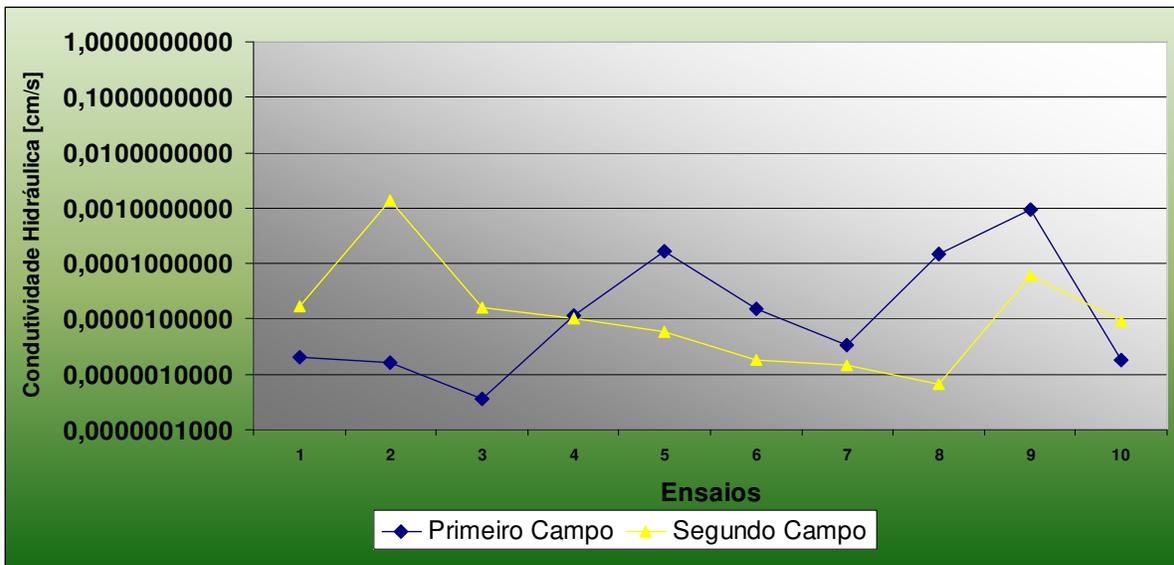


Figura 5.4 Análise comparativa dos valores da condutividade hidráulica do campo saturado obtidos nos dez pontos do primeiro campo com os dez pontos do segundo campo.

A umidade do solo seria outro fator que explicaria as variações das condutividades hidráulicas do primeiro campo em relação ao segundo campo. Os ensaios do primeiro campo foram realizados num período chuvoso, mesmo o solo a 75,0cm de profundidade, encontrava-se úmido e com maior índice de vazios. Enquanto os ensaios do segundo campo foram realizados no período seco, o solo encontrava-se em condições de umidade mais baixas.

De acordo com Soto (1999) a condutividade hidráulica varia em função da umidade do solo, sendo que, a condutividade hidráulica será maior quanto mais úmido estiver o solo, atingindo seu valor máximo na saturação (condutividade hidráulica saturada).

Após as análises dos resultados, pode-se inferir que, dentre os três métodos de cálculo de K_{fs} aplicados, o método que será adotado neste estudo é o modelo teórico de Reynolds & Elrick (1989). Este método e sua equação têm sido muito empregados na literatura e cuja equação foi revisada e melhorada.

5.4 Granulometria

Os resultados da análise granulométrica nos 32 pontos da área de estudo e sua respectiva classificação textural podem ser evidenciados na Tabela 5.5, onde as diferentes classes texturais foram delimitadas, de acordo com as proporções de areia total, silte e argila.

Os resultados mostram uma elevada porcentagem de argila no solo para quase a totalidade das amostras. Nota-se também que, a porcentagem de silte aparece de forma bem significativa nas amostras e a porcentagem de areia em menor proporção.

Percebe-se que, a textura do solo é predominantemente argilosa, com estrutura variada. De acordo com Mitchell (1976), quanto maior a quantidade de argila num solo, maior é a sua plasticidade, compressibilidade e coesão, menor é a sua permeabilidade.

De acordo com a classificação textural pode-se inferir que o solo da área de estudo é de textura muito argilosa a argila-siltosa.

Verificou-se em campo que, ao manusear as amostras de solo o material apresentava textura fina e plasticidade, no entanto, as observações feitas em campo comprovam com o estudo da granulometria.

A Figura 5.5 a seguir ilustra graficamente a distribuição granulométrica em porcentagem das frações areia, silte e argila nos trinta e dois pontos amostrados.

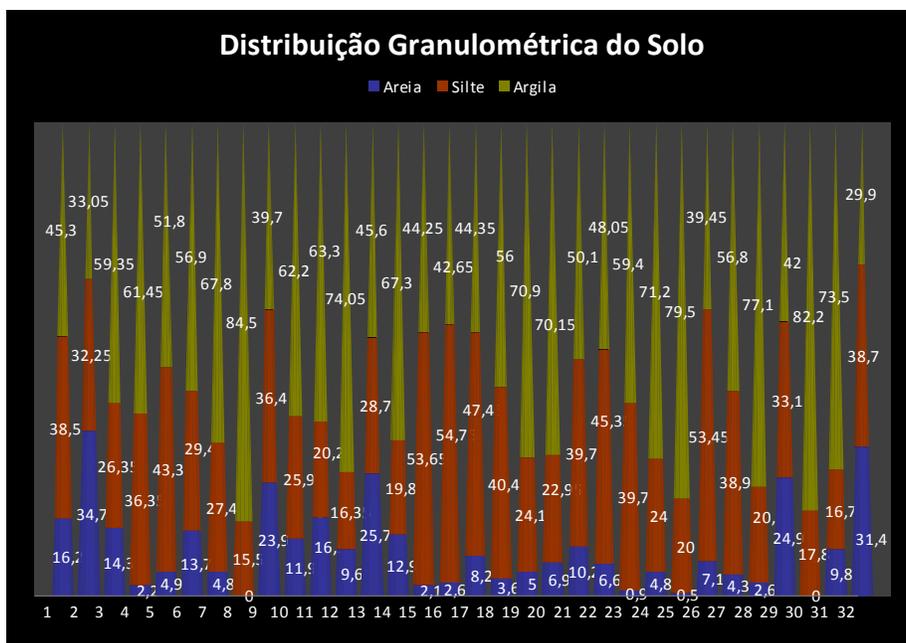


Figura 5.5 Representação gráfica da distribuição granulométrica (%).
 Tabela 5.5 Resultados da granulometria e classificação textural dos solos.

Amostra		Fração Granulométrica (%)			Classificação Textural
Solo	Prof. (cm)	Areia	Silte	Argila	
01	75,0	16,2	38,5	45,3	Argila siltosa
02	75,0	34,7	32,2	33,1	Franco Argilosa
03	75,0	14,3	26,3	59,4	Argila
04	75,0	2,2	36,4	61,4	Muito Argiloso
05	75,0	4,9	43,3	51,8	Argila siltosa
06	75,0	13,7	29,4	56,9	Argila
07	75,0	4,8	27,4	67,8	Muito Argiloso
08	75,0	0,0	15,5	84,5	Muito Argiloso
09	75,0	23,9	36,4	39,7	Franco Argilo Siltoso
10	75,0	11,9	25,9	62,2	Muito Argiloso
11	75,0	16,5	20,2	63,3	Muito Argiloso
12	75,0	9,6	16,4	74,0	Muito Argiloso
13	75,0	25,7	28,7	45,6	Argila
14	75,0	12,9	19,8	67,3	Muito Argiloso
15	75,0	2,1	53,7	44,2	Argila siltosa
16	75,0	2,6	54,8	42,6	Argila siltosa
17	75,0	8,2	47,5	44,3	Argila siltosa

18	75,0	3,6	40,4	56,0	Argila siltosa
19	75,0	5,0	24,1	70,9	Muito Argiloso
20	75,0	6,9	23,0	70,1	Muito Argiloso
21	75,0	10,2	39,7	50,1	Argila
22	75,0	6,6	45,4	48,0	Argila siltosa
23	75,0	0,9	39,7	59,4	Argila siltosa
24	75,0	4,8	24,0	71,2	Muito Argiloso
25	75,0	0,5	20,0	79,5	Muito Argiloso
26	75,0	7,1	53,5	39,4	Franco Argilo Siltoso
27	75,0	4,3	38,9	56,8	Argila
28	75,0	2,6	20,3	77,1	Muito Argiloso
29	75,0	24,9	33,1	42,0	Argila
30	75,0	0,0	17,8	82,2	Muito Argiloso
31	75,0	9,8	16,7	73,5	Muito Argiloso
32	75,0	31,4	38,7	29,9	Franco argiloso

5.5 Estatística

5.5.1 Correlação

A Tabela 5.6 apresenta os índices de correlação de Pearson para as variáveis: declividade do terreno, elevação, uso do solo, areia total, silte, argila e condutividade hidráulica. Em negrito, estão as correlações significativas com teste bi-caudal com nível de significância $\alpha = 0,05$.

Verificou-se que, as variáveis que melhor se correlacionaram com a condutividade hidráulica foram areia e argila, que mostraram um coeficiente de correlação de 0,278 e -0,326, respectivamente. A correlação positiva de K_{fs} e areia está associada ao fato de que solos arenosos são mais porosos, portanto mais condutivos, enquanto solos argilosos são menos porosos, i.e. altos teores de argila estão ligados a baixos valores de condutividade hidráulica.

As demais variáveis não apresentaram correlação significativa com a condutividade hidráulica, como o uso do solo que exibiu um coeficiente -0,020, indicando que a relação linear entre as mesmas é fraca ou inexistente. Tal resultado pode estar relacionado ao fato dos ensaios terem sido conduzidos a uma profundidade

de 75,0cm onde os impactos da cobertura do solo sobre a textura e a condutividade hidráulica são amenizados.

Tabela 5.6 Matriz de correlação de Pearson.

VARIÁVEIS	K_{fs}	Declividade	Elevação	Areia	Silte	Argila	Uso do solo
Cond. hidráulica	1						
Declividade	-0,039	1					
Elevação	0,226	0,366	1				
Areia	0,278	-0,238	0,171	1			
Silte	0,200	0,256	0,521	-0,063	1		
Argila	-0,326	-0,093	-0,515	-0,492	-0,838	1	
Uso do solo	0,020	-0,160	0,115	-0,045	0,111	-0,072	1

Observa-se ainda que, as variáveis elevação e teor de silte apresentaram fraca correlação com a condutividade hidráulica e apresentaram coeficientes de 0,226 e 0,200, embora relativamente altos, são considerados valores não significativos.

Outro resultado que deve ser mencionado é a correlação da elevação com as frações texturais. A correlação negativa da argila com a elevação implica em proporções maiores de argila em regiões mais planas da bacia, possivelmente relacionado ao transporte e acúmulo da argila nos terrenos de várzea, contrastando com a elevada proporção de areia e silte nas regiões mais altas da bacia.

A Figura 5.6 a seguir, permite visualizar o comportamento conjunto das variáveis: altitude, declividade, uso do solo, areia total, silte e argila com a variável condutividade hidráulica no plano bidimensional.

Através da Figura 5.6 observa-se que, as duas primeiras componentes são responsáveis por 58% da variância presente no conjunto de dados. A disposição das variáveis reflete a matriz de correlação (Tabela 5.6), onde o teor de areia está positivamente relacionado com a condutividade hidráulica (K_{fs}), enquanto o teor de argila se correlaciona negativamente com K_{fs} . Enquanto o teor de areia e a declividade explicam à maior parte da variância da componente dois, assim, mesmo não apresentando correlação significativa com a condutividade hidráulica calculada, a declividade deve ser considerada como variável preditiva, pois a matriz de correlação

identifica apenas relações lineares, não conseguindo lidar com ordens maiores de correlação.

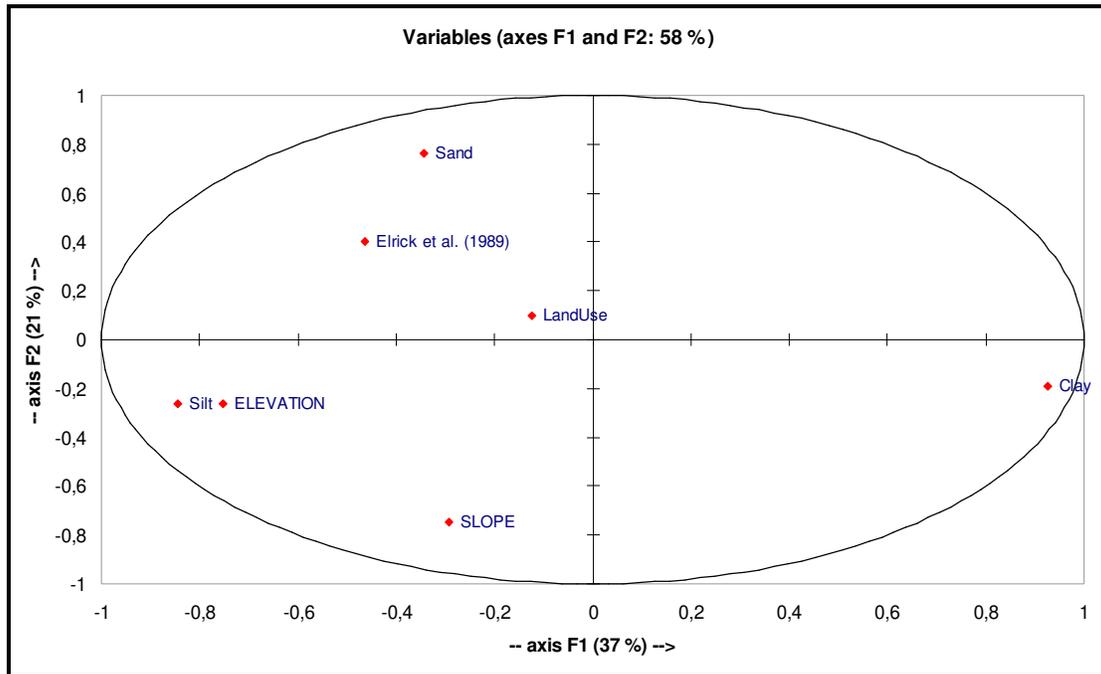


Figura 5.6 Análise das Componentes Principais entre as variáveis.

Dos resultados obtidos verifica-se que, das variáveis analisadas as frações areia e argila, foram as que melhor se correlacionaram com K_{fs} (Tabela 5.6), e que a textura do solo também tem relação com variáveis topográficas. Tal fato evidencia que a textura do solo possui estrutura espacial, exercendo influência sobre o comportamento hidráulico dos solos, o que é demonstrado através do cálculo do semivariograma. Além disso, solos com diferentes classes texturais podem apontar para uma distribuição contrastante na sua porosidade e, por consequência, na condutividade hidráulica.

5.5.2 Geoestatística

Apoiando-se na análise da estatística descritiva, a Tabela 5.7 apresenta as estatísticas da variável condutividade hidráulica. Como pode ser observado, os valores da média e mediana, medidas que procuram caracterizar o centro da mesma distribuição de frequências, encontram-se bem afastados (0,00018994 e 0,000007) respectivamente, indicando um comportamento assimétrico e não gaussiano da variável.

Tabela 5.7 Parâmetros da estatística descritiva para a variável condutividade hidráulica.

Atributo	Número de dados	\bar{X}	Med	Min	Max	S
condutividade hidráulica (cm/s)	30	0,00018994	0,000007	0,000007	0,00181941	0,00035153

\bar{X} - média; Med - mediana; Min - valor mínimo; Max - valor máximo; s – desvio padrão.

Para a distribuição dos dados estatísticos, foi construído o histograma para os dados da variável condutividade hidráulica (Figura 5.7).

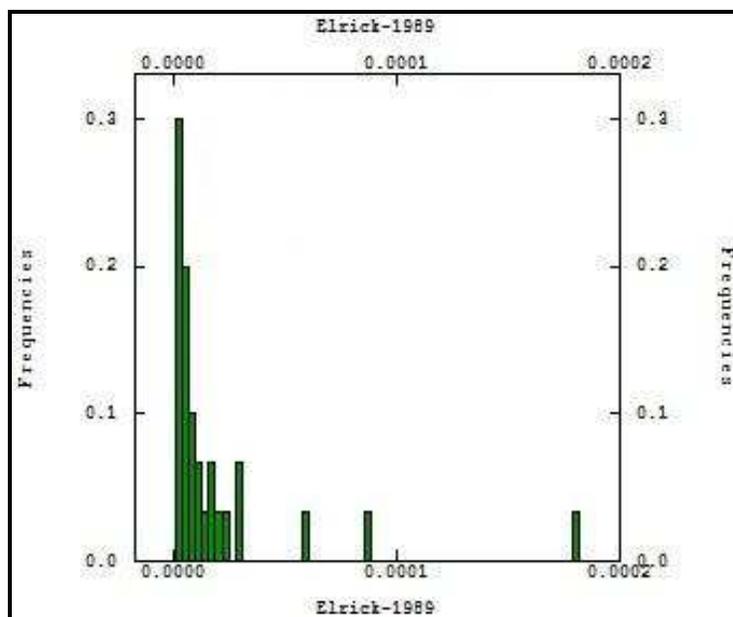


Figura 5.7 Histograma da variável condutividade hidráulica.

Na Figura 5.7, é possível observar que, a variável em estudo segue uma tendência de distribuição logarítmica e assimétrica.

É notório ressaltar que, num estudo geoestatístico o uso do semivariograma para a estimativa por Krigagem não exige que os dados tenham distribuição normal, mas a presença de distribuição assimétrica, com muitos valores anômalos que deve ser considerado, pois a Krigagem é um estimador linear (Iwashita, 2003). Nessa direção, para a construção do semivariograma foram desconsideradas duas amostras do conjunto de dados, sendo considerados valores anômalos.

No tocante a análise da variabilidade espacial, o modelo teórico que melhor se ajustou ao semivariograma experimental foi o modelo Gaussiano, isotrópico, com Patamar de $7,7 \times 10^{-10}$ e alcance de 600m, sem efeito pepita (Figura 5.7).

O modelo transitivo Gaussiano ou Parabólico descreve variações suaves em distâncias pequenas e altas em distâncias médias (Landim, 1998). O patamar do semivariograma indica que existe uma autocorrelação entre as observações até uma distância aproximada de 600m, a partir da qual o fenômeno passa a ser aleatório.

Além disso, a Figura 5.8 ilustra que, o conjunto das amostras apresenta estruturado espacialmente e possuem dependência espacial comprovada pela existência de um semivariograma bem estruturado.

Segundo Landim (1998) o semivariograma é uma medida da variabilidade geológica em relação à distância e como tal variabilidade pode-se apresentar diferente quando consideradas diferentes direções, apontando para um comportamento anisotrópico do fenômeno, tornando-se necessário o cálculo de diversos semivariogramas. Tal procedimento pode ser efetuado com a construção de uma “superfície variográfica” que contemple todas as possíveis direções (Iwashita et al., 2005). Depois de obtido o semivariograma experimental mais representativo da variabilidade presente, foi necessário o ajuste a um ou mais modelos teóricos.

Neste estudo, aderiu-se a aplicação de um modelo variográfico isotrópico (omnidirecional) em razão do número restrito de amostras, onde o padrão da estrutura espacial é o mesmo em todas as direções.

Como resultado, a Figura 5.9 ilustra o mapa de contornos resultante da Krigagem Ordinária, permitindo a visualização de valores mais altos e mais baixos assumidos pela variável condutividade hidráulica.

Com base nos resultados observou-se que, a condutividade hidráulica teve comportamento diferenciado em relação às feições do relevo. A natureza das encostas côncavas e convexas (do topo do morro ao fundo do vale) refletiu variações de K_{fs} , evidenciando maiores valores de condutividade hidráulica nas feições de relevo plano, com baixa declividade. Em contraposição, os valores mais baixos de K_{fs} foram encontrados nas feições de relevo variando de suave a medianamente ondulados.

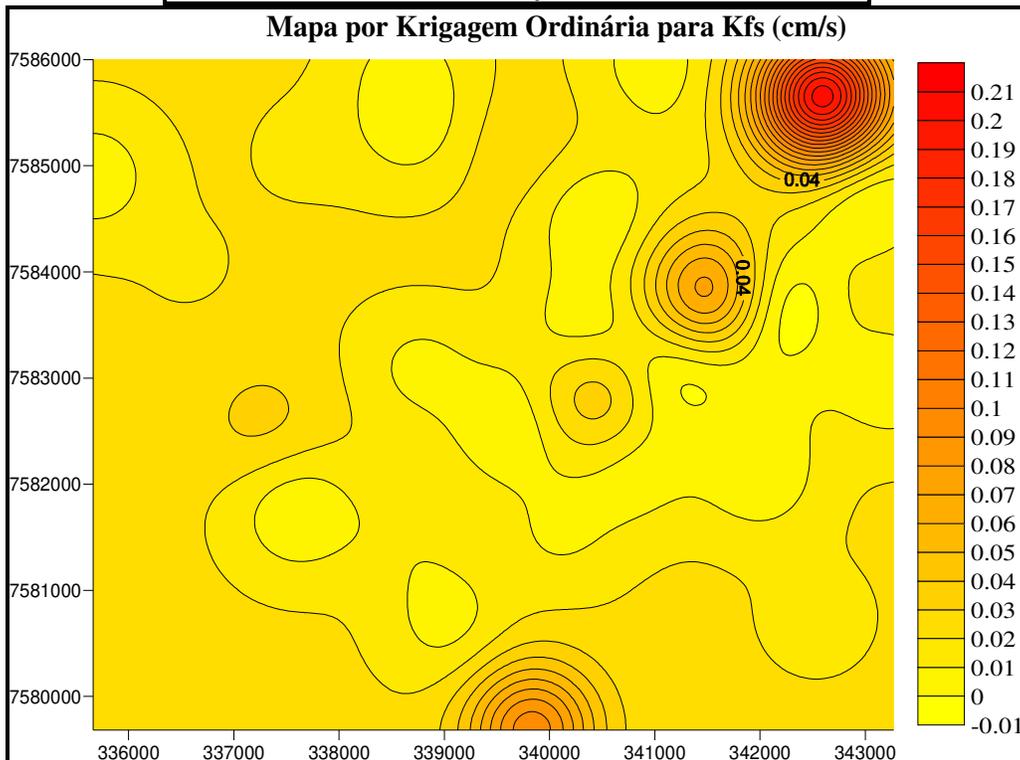
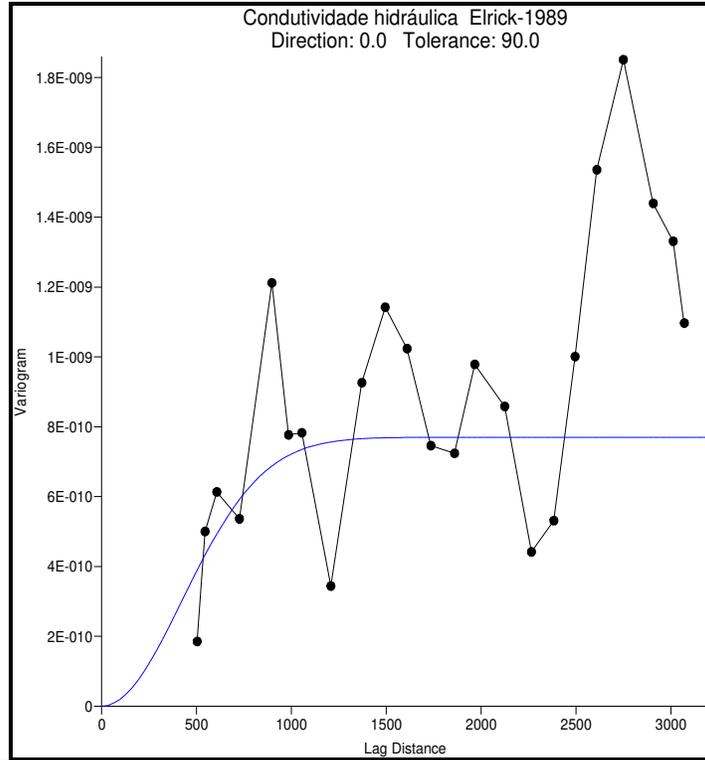


Figura 5.8 Semivariograma isotrópico ajustado com o modelo Gaussiano na direção 0° (esquerda).

Figura 5.9 Mapa da variável condutividade hidráulica, calculado pela Krigagem Ordinária (direita).

5.6 Avaliação Multicritérios

Conforme mencionado anteriormente, a relação de importância entre cada elemento do meio físico ao processo de infiltração foi analisado por meio da matriz de comparação pareada, que resultou no peso de cada fator, conforme apresentado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 Pesos obtidos através da comparação pareada dos fatores.

FATOR	PESOS
Uso e ocupação do solo	0,5930
Permeabilidade do solo	0,2147
Declividade do terreno	0,1248
Densidade de lineamentos	0,0675

Observa-se que, pelo método de agregação por multicritérios *Combinação Linear Ponderada*, os fatores que obtiveram os maiores pesos na análise foram: uso e ocupação do solo (0,5930), seguido da permeabilidade do solo (0,2147), declividade do terreno (0,1248) e densidade de lineamentos (0,0675), respectivamente.

Portanto, no processo de comparação pareada dos fatores foram admitidos os maiores pesos relativo à infiltração para o uso e ocupação do solo, pois dependendo do tipo de uso e ocupação, haverá variação na resposta à infiltração da água no solo. Em seguida, o fator permeabilidade do solo recebeu o maior peso, pois este parâmetro depende da textura e das condições de cobertura do solo.

A razão de consistência (RC) obtida para a matriz de comparação pareada foi de 0,09, valor este inferior a 0,10, indicando que a matriz tem consistência aceitável e as razões de importância estabelecidas na matriz são coerentes.

O mapa resultante da avaliação multicritérios foi uma imagem cujos valores variam de 0 a 255, idêntica aos mapas de fatores padronizados. Esse mapa consiste numa imagem muito mais detalhada que uma simples análise booleana, sendo possível definir áreas em função da capacidade de infiltração. Desta forma, o valor (0) indica áreas com menor capacidade de infiltração e o valor (255) indica áreas com maior capacidade de infiltração.

Para melhor expressar o comportamento das áreas segundo sua capacidade de infiltração, o mapa final foi reclassificado em cinco classes que designam de forma qualitativa a capacidade de infiltração da referida bacia (Figura 5.10), a saber: Muito Baixo, Baixo, Moderado, Médio e Alto.

De acordo com a Figura 5.10, as regiões classificadas como alta e média capacidade de infiltração representam as melhores condições para que a água infiltre no solo. Nas regiões de moderada capacidade de infiltração representam as áreas onde condicionantes do meio físico de certa forma inviabilizam a infiltração da água no solo. Logo, as áreas classificadas como baixa e muito baixa capacidade de infiltração representam as condições menos favoráveis de infiltração.

É notório ressaltar que, embora as classes de cada plano de informação respondam de maneira individual, suas características quanto a capacidade de infiltração estão ligadas à integração dos elementos do meio físico e constituem-se numa abordagem interessante na análise da distribuição espacial da infiltração.

Os resultados obtidos demonstram que as áreas no extremo leste da bacia apresentam boa capacidade de infiltração, pois diversos condicionantes do meio físico são favoráveis à infiltração, tais como: relevo com superfície pouco movimentada e com baixa declividade (6-12%), permeabilidade alta e condições de uso e ocupação do solo muito favorável, pois nessa região se concentram áreas de vegetação nativa e reflorestamento. No extremo sul da bacia, existe uma faixa com boa capacidade de infiltração, sendo caracterizada por fatores como relevo de superfícies pouco movimentadas, mas com declives acentuados (12-20%), alta permeabilidade do solo, área com interconectividade de fraturas e condições de uso e ocupação do solo favorável, com presença de vegetação nativa e cultivo de *Eucalyptus ssp.*

Na porção noroeste da área de estudo, ainda ocorre uma estreita faixa com boas condições de infiltração. Nesta área, a topografia é pouco movimentada e contrastando com uma declividade acentuada das encostas e baixa permeabilidade do solo.

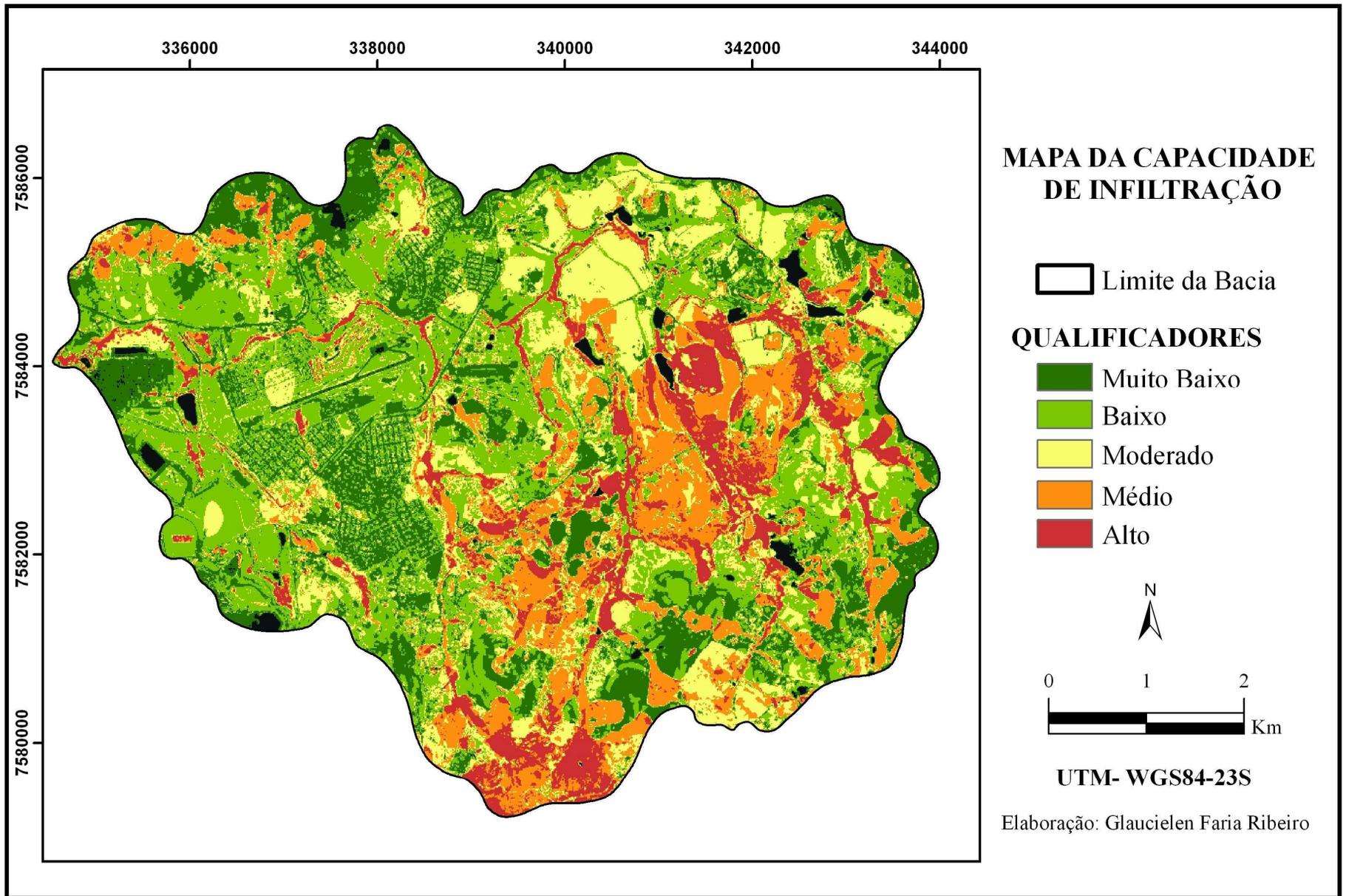


Figura 5.10 Mapa da capacidade de infiltração da bacia hidrográfica Vargens de Caldas.

De uma maneira geral, essas condições não são muito favoráveis à infiltração, mas de acordo com o mapa de drenagem (Figura 5.1), nesta região é caracterizada pela presença de nascentes, que está sob proteção de cobertura florestal densa, o que favorece e aumenta as condições de infiltração da água no solo.

De acordo com Tucci et al., (2007) as matas de topos de morros funcionam como verdadeiras esponjas, que absorvem grande parte da água das chuvas e liberam lentamente para o solo, propiciando à infiltração da água.

Enquanto as áreas de menores capacidades de infiltração (verde escuro e claro) foram identificadas, sobretudo, na margem esquerda da bacia, área que possui maior taxa de ocupação, facilitado pelas condições do relevo plano a suave ondulado, com baixa declividade e largas planícies laterais. Nessa região, as condições de infiltração são baixas, devido à elevada impermeabilização da estrutura urbana. Na margem direita da bacia, as áreas com baixíssima infiltração são caracterizadas por fatores como relevo acidentado, baixa permeabilidade do solo e declividades acentuadas. Os solos nessa região são ocupados por pastagens pouco produtivas e por solos sem cobertura vegetal, condições que não favorecem à infiltração. Os terrenos com pastagem encontram-se mal manejados e devido à compactação da superfície do solo acelera o processo de escoamento superficial e reduz à infiltração da água. Enquanto os terrenos com solo exposto encontram-se sem proteção da cobertura vegetal, reduzem o armazenamento da água no solo, sendo mais susceptível a água escoar superficialmente do que infiltrar.

Na planície aluvionar do Ribeirão das Vargens, as condições de infiltração variam de muito baixa a moderada, devido às condições de baixa e média permeabilidade dos solos. Esses solos de várzea tendem a apresentar altos teores de matéria orgânica e argila, o que confere condições pouco favoráveis à infiltração da água.

Cabe salientar que, nas áreas de várzeas da bacia, os solos encontram-se em boa parte impermeabilizados, em função da ocupação humana intensa. Uma vez que, parte expressiva destas áreas está comprometida, nesse aspecto faz com que tenha uma redução na capacidade de infiltração.

A faixa no extremo nordeste da bacia corresponde às condições de baixa declividade e terrenos de várzea, condições necessárias para uma boa infiltração.

Nessa região, as condições de infiltração são moderadas (amarelo), podendo ser explicado, pela intensa atividade agrícola, dado que o relevo permite a mecanização do solo. Devido à movimentação do solo ocasionado pelos diferentes tipos de culturas e manejos, as propriedades físicas dos solos sofrem alterações o que influem diretamente na infiltração e retenção da água.

A Tabela 5.9 apresenta para cada classe qualitativa a distribuição em área e em percentagem da bacia hidrográfica Vargens de Caldas, segundo sua capacidade de infiltração. Dos resultados obtidos observa-se que, 72,91% do total da área da bacia representam a qualificação “Muito baixa a Moderada”, segundo sua capacidade de infiltração. As áreas com capacidade “Média a Alta” de infiltração correspondem a 27,09% da área da bacia.

Tabela 5.9 Valores de ocorrência de classes em km² e percentuais relativos a área estudada segundo à capacidade de infiltração.

QUALIFICADORES	ÁREA (Km²)	% DA BACIA
Muito Baixo	8,54	20,12
Baixo	13,95	32,86
Moderado	8,46	19,93
Médio	7,00	16,49
Alto	4,50	10,60
TOTAL DA ÁREA:	42,45	100,00

Mediante estes valores pode-se inferir que, torna-se primordial identificar estratégias e diretrizes que equilibrem os diferentes interesses que regem a ocupação do solo e o uso dos recursos hídricos na bacia Vargens de Caldas, visando uma maior efetividade de ações preferenciais que visam minimizar o risco de diminuição na disponibilidade hídrica, bem como no comprometimento dos fatores de recarga, como por exemplo, diminuição das áreas de cobertura vegetal nos mananciais e principalmente à redução da capacidade de infiltração, de forma a garantir a disponibilidade e a regularidade hídrica da bacia.

CAPÍTULO VI

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

O presente trabalho se insere numa proposta de definir áreas de maior e menor capacidade de infiltração da bacia hidrográfica Vargens de Caldas. Assim sendo, a interação de diversos elementos do meio físico natural e modificado foi primordial para o entendimento do processo de infiltração da bacia.

A metodologia adotada neste trabalho para a determinação da capacidade de infiltração, através da avaliação multicritérios, atendeu com eficiência as necessidades da pesquisa, possibilitando de forma integrada a combinação dos elementos do meio físico (natural e modificado).

Dos resultados obtidos verifica-se que, as melhores áreas de infiltração situam-se na margem direita e sul da bacia, região de montante, que é predominantemente rural, onde se encontram áreas com significativas manchas de cobertura vegetal de matas e reflorestamento. Esta região exerce um importante papel como reservatório de água no solo, devido à presença de cobertura vegetal, que aumenta a capacidade de absorção e infiltração da água; na margem esquerda da bacia, região a jusante, onde predomina elevada taxa de ocupação urbana, indicando modificação na estrutura do solo (impermeabilização) têm-se as piores condições de infiltração.

Tal fato pode ser observado através da Figura 5.10, que mostra as regiões onde a atividade desenvolvida é a agricultura com plantio convencional e, levando-se em consideração as diferentes práticas de manejo do solo, a capacidade de infiltração foi superior em relação às áreas de campo e pastagem. As maiores capacidades de infiltração foram observadas nas áreas onde o uso do solo é caracterizado com reflorestamento de *Eucalyptos ssp* e matas, pois os solos apresentam-se com os maiores conteúdos de matéria orgânica e umidade, condições que favorecem a retenção de água no solo; as menores capacidades de infiltração foram observadas nas áreas antropizadas da planície aluvionar e nas áreas de pastagem.

Verificou-se ainda que, a dinâmica do uso e ocupação do solo é o fator que mais interfere na capacidade de infiltração da bacia, fato este também verificado nos trabalhos de Soares (2005) e Costa (2006).

Assim, considerando o cenário atual da dinâmica de uso e ocupação do solo da bacia Vargens de Caldas, denota-se que suas planícies aluviais denunciam a insustentabilidade ambiental e hídrica da bacia, decorrente das ocupações inadequadas e das atividades antrópicas ali exercidas. De acordo com a atual condição de ocupação do solo da bacia, evidencia-se a necessidade de se adotar mecanismos de controle de ocupação, de forma a não por em risco a disponibilidade hídrica para os diversos usos múltiplos da água.

Neste contexto, a diminuição da capacidade de infiltração numa bacia hidrográfica contribui para a diminuição da quantidade de água armazenada no solo, e para o aumento de estresse hídrico na vegetação local, contribuindo com a redução da recarga dos aquíferos.

Portanto, a gestão de bacias hidrográficas é fundamental para garantir a manutenção e disponibilidade da água para os usuários tanto da jusante quanto da montante. Dessa maneira, este estudo procura contribuir com o conhecimento da distribuição espacial da infiltração da bacia Vargens de Caldas, fornecendo uma documentação técnica como o mapa da capacidade de infiltração, que constitui numa importante fonte de informação para o planejamento e execução de políticas públicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, A.B. *O emprego do Permêmetro Guelph na determinação da permeabilidade do solo, de camadas de lixo e sua cobertura*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. *Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas*. Campinas: Instituto Agrônomo, 1986. 94p. (IAC, Boletim Técnico, 106).

CHRISTOFOLETTI, A. *Análise morfométrica das bacias hidrográficas do Planalto de Poços de Caldas - MG*. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras (Rio Claro - SP, 215p), 1970.

COSTA, M.A. *Seleção de áreas potenciais para recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, São Paulo*. Dissertação de Mestrado em Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2006.

COSTA, F.P.M; NISHIYAMA, L. *Utilização do Permêmetro de Guelph e Penetrômetro de Impacto em estudos de uso e ocupação dos solos em bacias hidrográficas*. Revista Caminhos de Geografia, Uberlândia, v. 8, n. 24, p. 131-143, 2007.

DE BIASE, M. *A carta clinográfica: os métodos de representação e sua confecção*. Revista de Geografia, São Paulo, v.6, p.45-60, 1993.

DIENE, A. A. *Desenvolvimento de tensiômetros para sucção elevada ensaiados em lisímetros de laboratório*. Dissertação de Mestrado - COPPE - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

EASTMAN, J. R. *Idrisi for Windows: Manual do Usuário*. Porto Alegre: UFRG, 1998.

EASTMAN, J. R. *Idrisi 32 Release 2: IDRISI Help System*. Worcester: Clark University, 2001.

ESRI GIS and Mapping Software: < <http://www.esri.com/>.> Acessado em 12/04/2010.

FERRAZ, S.F.B; VETTORAZZI, C.A. *Identificação de áreas para a recomposição florestal com base em princípios de Ecologia da Paisagem*. Revista Árvore, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 575-583, 2003.

GUERRA, A.T.; GUERRA, A.J.T. *Novo dicionário Geológico-geomorfológico*. 3º ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. 652p.

HORTON, R.E. *Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology* New York: Geological Society of American Bulletin, v. 56, p. 807-813, 1945.

IBGE; <http://www.ibge.com.br>> Acessado em 10/05/2010.

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

IWASHITA, F. *Uso do Matlab na análise espacial de nutrientes presentes no solo do parque estadual da Ilha do Cardoso, São Paulo*. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.

IWASHITA, F.; MONTEIRO, R. C.; LANDIM, P. M. B. *An alternative method for calculating variogram surfaces using polar coordinates*. Computers & Geosciences, p. 801-803, 2005.

KELLER, E. A.; PINTER, N. *Active Tectonics: earthquakes, uplift, and landscape*. New Jersey: Prentice-Hall, 1996. 338 p.

KOEPPEN, W. *Climatologia*. México: Ed. Fondo de Cultura Econômica, 1948.

KRIGE, D.G. *A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand*. J. Chem. Metal. Min. Soc., 52:119-139, 1951.

LANA, C. E.; ALVES, J. M. de P.; CASTRO, P.T.A. *Análise Morfométrica da Bacia do Rio do Tanque, MG-BRASIL*. REM. Ouro Preto-MG, 2001, Vol 54(2), p. 121-126.

LANDIM, P. M. B. *Análise estatística de dados geológicos*. São Paulo. Fundação Editora da Unesp, 1998. 225p.

LANDIM, P. M. B. *Análise estatística de dados geológicos*. 2.ed. atual. e ampl. São Paulo/SP: Fundação Editora da UNESP/FEU, 2003.

LAPLACE, S. R; GARDNER W. R. *Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table*. Soil Sci., vol. 85: pags. 228-232, 1958.

LISBOA, R. L. L. *Determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos residuais com o Permêmetro Guelph e ensaios de laboratório*. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2006.

MALCZEWSKI, J. *GIS - based land-use suitability analysis: a critical overview*. Progress in Planning. v. 62, n.1, p. 3-65, Jul. 2004.

MARTINS, E. S. P. R.; PAIVA, J. B. D. *Quantidade dos recursos hídricos*. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. (org) *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 531-566.

MATHERON, G. *Principles of geostatistics*. Economic Geology. Lancaster, v.58, p. 1246- 1266, 1963.

MENDONÇA, L.A.R. *Recursos hídricos da Chapada do Araripe*. 193 p. Tese de Doutorado, Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2001.

MITCHELL, J.K. *Fundamentals of Soil Behavior*, 1976.

MORAES, F. T. *Zoneamento geoambiental do planalto de Poços de Caldas, MG/SP a partir de análise fisiográfica e pedoestratigráfica*. Tese (Livre Docência) Universidade Estadual Paulista - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro/SP, 173 p. 2008.

NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W.; EHR, K. T. *Spatial variability of field-measured soil water properties*. Hilgardia, Berkley, v. 42, n. 7, p. 215-259, Nov. 1973.

PEREIRA, F.A.de C.; FONSECA, A.A.O.; ALMEIDA, E.C.de; MOREIRA, C.S.; MACEDO, D.J.B; DA CRUZ, J.D. *Comparação entre condutividade hidráulica saturada determinada em campo e laboratório*. Cruz das Almas. Magistra, v.13, n.1, 2001.

PINHEIRO, A; TEIXEIRA, L. P; KAUFANN, V. *Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola*. Revista Ambiente & Água, Taubaté, v. 4, n. 2, p. 188-199, 2009.

RANDHIR, T.O.; O'CONNOR, R.; PENNER, P.R.; GOODWIN, D.W. *A watershed-based land prioritization model for water supply protection*. Forest Ecology and Management, Amsterdam, v. 143, n. 1/3, p. 47-56, 2001.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. *In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the guelph permeameter*. Soil Science, Philadelphia, v.140, n.4, 1985.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. *A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the conductivity-pressure head relationship*. Ground Water Monitoring Review, v.6, nº.1, pp. 84-95, 1989.

SAATY, T.L. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill. New York, 1980.

SAATY, T.L; VARGAS, L.G. *Prediction, Projection and forecasting*. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, USA. 1991. 251p.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005.

SOARES, A. *Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente*, IST Press, Lisboa, 206. ISBN: 972-8469-10-1, 2000.

SOARES, P.V. *As interrelações de elementos do meio físico natural e modificado na definição de áreas potenciais de infiltração na porção paulista da bacia do Rio Paraíba do Sul*. Tese de Doutorado em Geociências – Universidade Estadual de Campinas, 2005.

SOIL MOISTURE EQUIPMENT CORP. *2800K1 operating instructions*. Soil moisture equipment Corp. Santa Bárbara, CA. 27 pp, 1991.

SOTO, M.A.A. *Estudo da Condutividade hidráulica em Solos Não Saturados*. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

STRAHLER, A.N. *Quantitative analysis of watershed geomorphology*. Transactions: American Geophysical Union, 38:913-920, 1957.

TAGLANI, C. R. A. *Técnicas para avaliação da vulnerabilidade de ambiental de ambientes costeiros utilizando um sistema geográfico de informações*. In: Congresso Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2003, MG. Anais em CD-ROM. Belo Horizonte: INPE - SELPER, p. 1657-1664.

TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. et al. *Hidrologia - Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: 4ª Ed. UFRGS, 2007.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. *Hidrologia Aplicada*. São Paulo: McGraw – Hill do Brasil, 245p, 1975.