



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5442-TDI/488

**DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO E PARÂMETROS DO
MEIO FÍSICO APLICADOS À REGIONALIZAÇÃO
DE BACIAS HIDROGRÁFICAS**

Marcos César Ferreira

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada
pelo Dr. Hermann Kux, aprovada em outubro de 1991.

INPE
São José dos Campos
1991

528.711.7

FERREIRA, M.C.

Dados de sensoriamento remoto e parâmetros do meio físico aplicados à regionalização de bacias hidrográficas. / M.C.Ferreira. -- São José dos Campos: INPE, 1991. 134p. -- (INPE-5442-TDI/488)

1. Bacias hidrográficas. 2. Regionalização. I.Título

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Sensoriamento Remoto

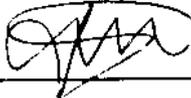
Dr. Hermann Johann Heinrich Kux


Orientador/Presidente

Dr. Mário Valério Filho


Membro da Banca

Dra. Tânia Maria Sausen


Membro da Banca

Dr. Natálio Felipe Koffler


Membro da Banca
- Convidado -

Candidato: Marcos Cesar Ferreira

São José dos Campos, 03 de outubro de 1991

À Marta e à Pagu.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Hermann Kux pela orientação recebida.

Ao Departamento de Cartografia e Análise da Informação Geográfica da UNESP-Campus de Rio Claro-SP, que possibilitou o uso do Laboratório de Sensoriamento Remoto e Informática.

A Elen Andreolli Prochnow, pela confecção das Figuras e dos Mapas.

A Luiz Rodolpho Araujo Ferrari, pelo serviço de datilografia.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta metodológica para a regionalização de bacias hidrográficas que não dispõem de dados de vazão fluvial. A regionalização sugerida é baseada no levantamento dos seguintes parâmetros hidrológicos de superfície das bacias: coeficiente de cobertura vegetal (CCV), coeficiente médio de impermeabilidade (CMI) e fator topográfico (FTP). O parâmetro CCV é obtido através de processamento e classificação digital de imagens TM-LANDSAT, onde é mapeado o índice perpendicular de vegetação (IPV). O parâmetro CMI é obtido pela reclassificação qualitativa das unidades pedológicas das bacias segundo um fator de impermeabilidade. O parâmetro FTP é obtido através da análise morfométrica das bacias hidrográficas, onde são considerados o índice de circularidade, a frequência de canais de primeira ordem e a relação de relevo. Estes três parâmetros, são utilizados para a classificação das bacias hidrográficas segundo o método da análise de agrupamento pela distância euclidiana. Como resultado final da metodologia proposta, é apresentada uma regionalização das bacias hidrográficas que poderá ser avaliada futuramente segundo a relação entre a vazão máxima e a vazão média de cada região homogênea obtida. Utilizou-se como área-teste a Bacia do Ribeirão do Feijão, afluente do Rio Jacaré-Guaçu, próxima da cidade de São Carlos-SP.

REMOTE SENSING DATA AND ENVIRONMENTAL PARAMETERS APPLIED
TO DRAINAGE BASINS REGIONALIZATION

ABSTRACT

This study presents a methodology to regionalization of watersheds where runoff data are not available. The proposed classification is based on the following watersheds parameters: vegetation cover coefficient (CCV), average impermeability coefficient (CMI) and topographic factor (FTP). CCV is obtained by processing and digital classification of TM-LANDSAT image, using the perpendicular vegetation index (IPV). CMI is obtained by a qualitative reclassification of soil units using an impermeability factor. FTP is obtained by the morphometric analysis of watersheds using the circularity index, the frequency of first order channels and the relief ratio. The CCV, CMI e FTP parameters are used to classify watersheds according to the cluster analysis method. The final result presents a regionalization of watersheds that should be evaluated, by ratio of the maximum and average runoff of each homogeneous region defined.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	xvi
LISTA DE TABELAS.....	xviii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xx
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</u>	<u>1</u>
<u>CAPÍTULO 2 - LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO.....</u>	<u>4</u>
2.1 - Localização e justificativas.....	4
2.2 - Compartimentação geomorfológica regional.....	11
2.3 - Biótopos.....	11
2.3.1 - Brejos e planícies aluviais.....	11
2.3.2 - Colinas amplas e vales abertos.....	12
2.3.3 - Colinas médias e vales intermediários.....	12
2.3.4 - Morros isolados, inselbergs e formas runei- formes.....	12
2.3.5 - Vales encaixados e canyons.....	13
2.4 - Ecossistemas e mosaicos.....	13
<u>CAPÍTULO 3 - REVISÃO DA LITERATURA.....</u>	<u>16</u>
3.1 - Utilização de dados de sensoriamento remoto or- bital no levantamento de parâmetros hidrológi- cos úteis na previsão de cheias em bacias hi- drográficas.....	16
3.2 - Comportamento espectral da cobertura vegetal..	23
3.2.1 - Fatores que afetam a resposta espectral da cobertura vegetal.....	26
3.3 - Índices de vegetação.....	29
3.3.1 - Razão entre bandas.....	30
3.3.2 - Índices ortogonais de vegetação.....	32
3.4 - A morfometria no estudo do escoamento das ba- cias hidrográficas.....	38
3.4.1 - Área de captação.....	39
3.4.2 - Densidade de drenagem.....	40
3.4.3 - Relação de relevo.....	41
3.4.4 - Índice textura-declive.....	42
3.4.5 - Índice de forma e índice de circularidade...	43
3.4.6 - Fator topográfico.....	44
3.5 - Classificação hidrológica dos solos.....	46

3.6 - Métodos aplicados à identificação de regiões hidrológicas homogêneas.....	50
<u>CAPÍTULO 4 - MATERIAL E MÉTODOS.....</u>	<u>54</u>
4.1 - Material.....	54
4.1.1 - Material cartográfico.....	54
4.1.2 - Material fotográfico.....	56
4.1.3 - Material de fotointerpretação.....	56
4.1.4 - Imagens orbitais.....	56
4.1.5 - Material de apoio computacional.....	57
4.1.6 - Equipamento para ampliação e projeção da imagem temática sobre a base cartográfica.....	57
4.2 - Metodologia e técnicas utilizadas.....	58
4.2.1 - Metodologia.....	58
4.2.2 - Técnicas utilizadas.....	63
4.2.2.1 - Cálculo do coeficiente de cobertura vegetal (CCV).....	63
4.2.2.2 - Cálculo do fator topográfico (FTP) das sub-bacias.....	71
4.2.2.3 - Cálculo do coeficiente médio de impermeabilidade (CMI).....	74
4.2.2.4 - Classificação das sub-bacias hidrográficas: análise de agrupamento e teste de significância.....	79
<u>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</u>	<u>81</u>
5.1 - Mapeamento da rede de drenagem.....	81
5.2 - Delimitação das sub-bacias hidrográficas.....	81
5.3 - Fator topográfico.....	84
5.4 - Coeficiente médio de impermeabilidade (CMI)...	89
5.5 - Coeficiente de cobertura vegetal (CCV).....	93
5.5.1 - Geocodificação da imagem TM-Landsat.....	93
5.5.2 - Análise das principais componentes.....	97
5.5.3 - Índice de vegetação das classes de uso da terra.....	97
5.5.4 - Mapeamento dos grupos hidrológicos do uso da terra.....	109
5.5.5 - Coeficiente de cobertura vegetal.....	111
5.6 - Regionalização das sub-bacias hidrográficas...	114
5.6.1 - Formação dos grupos.....	114
5.6.2 - Análise do Discriminante.....	120

<u>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES</u>	122
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	123

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Mapa de localização da área de estudo.....	5
2.2 - Unidades pedológicas da área de estudo.....	7
2.3 - Catena da associação entre as unidades pedológicas, geomorfológicas e geológicas da Bacia do Ribeirão do Feijão.....	9
2.4 - Biótopos da Bacia do Ribeirão do Feijão.....	10
2.5 - Ecossistemas da Bacia do Ribeirão do Feijão...	14
3.1 - Espectro de reflectância de uma folha verde...	24
3.2 - Espectro de reflectância, absortância e transmitância de uma folha verde.....	25
3.3 - Padrões de reflectância da grama verde, da grama morta e do solo.....	29
3.4 - Diagrama representando o índice de vegetação do tipo razão simples entre bandas e o índice de vegetação transformado.....	31
3.5 - Diagrama ilustrando o princípio de obtenção do índice perpendicular de vegetação.....	32
3.6 - O plano de Kauth representando as regiões espectrais definidas pelas bandas MSS-5 e MSS-7.	34
3.7 - Relação entre o índice perpendicular de vegetação e a porcentagem de cobertura do solo.....	37
3.8 - Relação entre a diferença normalizada e a porcentagem de cobertura do solo.....	37
3.9 - Relação entre a área da bacia e a intensidade anual das cheias.....	40
3.10 - Relação entre o escoamento médio anual e a densidade de drenagem em 13 pequenas bacias no Wyoming (EUA).....	41
3.11 - Características da curva de deflúvio e a relação de relevo de diferentes bacias hidrográficas.....	42
3.12 - Relação entre o produto textura-declive e o escoamento médio anual de pequenas bacias hidrográficas.....	43
3.13 - Relações entre a forma das bacias hidrográficas e as características da curva de deflúvio.....	44
3.14 - Taxa de infiltração dos solos PV-1, PV-2, PV-3 e TE.....	49
4.1 - Fluxograma do procedimento metodológico utilizado no desenvolvimento do trabalho.....	60

4.2 - Fluxograma do procedimento metodológico utilizado no tratamento digital da imagem TM-Landsat.....	64
5.1 - Mapa da rede de drenagem da Bacia do Ribeirão do Feijão.....	83
5.2 - Mapa das sub-bacias hidrográficas da Bacia do Ribeirão do Feijão.....	84
5.3 - Grupos hidrológicos de solos da área de estudo.....	92
5.4 - Mapa dos pontos de controle utilizados para a geocodificação da imagem da área de estudo....	95
5.5 - Banda TM-3 geocodificada e não geocodificada..	96
5.6 - Principal componente 1 (PC1).....	98
5.7 - Principal componente 2 (PC2).....	99
5.8 - Principal componente 3 (PC3).....	99
5.9 - Composição colorida (PC1/R, PC2/G, PC3/B).....	99
5.10 - Mapa de localização das amostras pré-classificadas em campo.....	100
5.11 - Plano de Kauth definido pelas bandas TM-3 e TM-4 e pela linha de reflectância do solo nú para a área de estudo.....	104
5.12 - Posicionamento das amostras das classes de uso da terra no plano de Kauth.....	107
5.13 - Imagem IV (índice de vegetação).....	109
5.14 - Imagem temática IV.....	110
5.15 - Mapa dos grupos hidrológicos do uso da terra..	112
5.16 - Dendograma obtido pela distância euclidiana..	116
5.17 - Mapa das regiões homogêneas definidas por sub-bacias hidrográficas, segundo a distância euclidiana entre os parâmetros FTP, CMI e CCV.....	119

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Características físicas das unidades pedológicas da Bacia do Ribeirão do Feijão.....	8
3.1 - Especificação da resolução espacial e da frequência de aquisição de dados requeridos para a aplicação em hidrologia.....	18
3.2 - Valores do CN (Curve Number) de escoamento fluvial obtidos a partir de dados de cobertura do terreno em imagens TM-Landsat.....	20
3.3 - Habilidade do interprete em reconhecer as classes de cobertura do terreno de importância hidrológica em imagens TM-Landsat.....	22
4.1 - Material cartográfico utilizado no desenvolvimento do trabalho.....	55
4.2 - Material fotográfico utilizado no desenvolvimento do trabalho.....	56
4.3 - Valores de profundidade média do solo das unidades pedológicas da área de estudo.....	76
4.4 - Valores de percentual de argila no horizonte A das unidades pedológicas da área de estudo....	77
4.5 - Valores de percentual de argila no horizonte mais impermeável das unidades pedológicas da área de estudo.....	78
4.6 - Valores do índice de anisotropia para as unidades pedológicas da área de estudo.....	78
5.1 - Valores dos parâmetros morfométricos das sub-bacias hidrográficas, utilizados para o cálculo do fator topográfico (FTP).....	85
5.2 - Valores de frequência de canais de primeira ordem (FI) das sub-bacias hidrográficas.....	86
5.3 - Valores de relação de relevo (Rh) das sub-bacias hidrográficas.....	87
5.4 - Valores do índice de circularidade (C) das sub-bacias hidrográficas.....	88
5.5 - Valores do fator topográfico (FTP) das sub-bacias hidrográficas.....	89
5.6 - Valores do fator de impermeabilidade das unidades pedológicas da Bacia do Ribeirão do Feijão.....	90
5.7 - Valores do coeficiente médio de impermeabilidade (CMI) das sub-bacias hidrográficas.....	93

5.8 - Valores de resíduo em módulo para os pontos de controle utilizados na geocodificação da imagem TM-Landsat.....	94
5.9 - Matriz de classificação MAXVER das amostras de classes de uso de terra da área de estudo.....	102
5.10 - Valores do nível de cinza das amostras de solo nú nas bandas TM-4 e TM-3.....	103
5.11 - Valores médios de nível de cinza das classes de uso da terra.....	104
5.12 - Valores de IPV das classes de uso da terra...	105
5.13 - Grupos hidrológicos de uso da terra segundo o IPV e a classificação de Chow (1964).....	108
5.14 - Legenda da imagem temática IV.....	111
5.15 - Área ocupada por grupo hidrológico de uso da terra em cada sub-bacia hidrográfica.....	113
5.16 - Valores dos coeficientes da equação 4.4 utilizados para o cálculo do CCV.....	114
5.17 - Valores dos parâmetros FTP, CMI e CCV das 14 sub-bacias hidrográficas utilizadas na regionalização.....	115
5.18 - Características geológicas, geomorfológicas, pedológicas e de uso da terra das regiões de finidas por sub-bacias hidrográficas.....	117
5.19 - Valores de $F_{crítico}$ considerando um nível de significância de 0.01, segundo o grau de liberdade.....	121

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Percentual de argila no horizonte A, %
Ab	- Área da bacia hidrográfica, km ²
Ac	- Área do círculo com diâmetro igual ao perímetro da bacia hidrográfica, km ²
An	- Índice de anisotropia
C	- Índice de circularidade
CCV	- Coeficiente de cobertura vegetal
CMI	- Coeficiente médio de impermeabilidade
CN	- Curve Number
Dd	- Densidade de drenagem, km ⁻¹
d	- Distância euclidiana
F	- Índice de forma
FI	- Frequência de canais de primeira ordem km ⁻²
Fi	- Fator de impermeabilidade
FTP	- Fator topográfico
H	- Amplitude altimétrica, m
I	- Percentual de argila no horizonte mais impermeável
IPV	- Índice perpendicular de vegetação
L	- Comprimento total dos canais de drenagem, km
Lb	- Comprimento da bacia hidrográfica, km
ND	- Diferença normalizada
P	- Profundidade média do solo, cm
Rh	- Relação de relevo
Td	- Índice textura-declive

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A intensidade com que os ecossistemas naturais vem sendo convertidos em áreas de produção agrícola, conduziu determinados setores da comunidade científica a desenvolverem modelos de simulação para previsão de impactos resultantes da alteração no equilíbrio dos processos hidrológicos. Estes impactos dizem respeito à ocorrência de cheias excepcionais, bem como a retirada e o transporte de sedimentos a nível de bacias hidrográficas.

Contudo, a implementação e o desenvolvimento destes modelos, exige a disponibilidade de uma grande quantidade de dados hidrometeorológicos, na maioria das vezes só compatíveis com uma estrutura de informações típica de países desenvolvidos. Por exemplo, o sucesso de alguns modelos depende de um número razoável de estações meteorológicas e fluviométricas, bem como de levantamentos aerofotogramétricos de curta periodicidade, que constituem investimentos nem sempre prioritários em países como o Brasil.

Por outro lado, é na maior parte destes países que se observa uma ocupação territorial de caráter de sordenado, que menospreza os distúrbios hidrológicos decorrentes das transformações espaciais causadas pelas atividades agrosilvopastoris e pela expansão urbana.

Desta forma, é pertinente a preocupação em buscar alternativas para a implementação de técnicas de gerenciamento dos recursos hídricos, coerentes com a realidade do quadro físico e com a base de dados disponível no país.

É neste contexto que as técnicas de sensoria-mento remoto orbital vêm ganhando importância cada vez maior nos países subdesenvolvidos. Estas técnicas têm sido empregadas no estudo de bacias hidrográficas desprovidas de dados hidrométricos convencionais, a partir da inferência do comportamento do escoamento superficial em função da qualificação e quantificação espectrais da cobertura do terreno.

As informações de imagens orbitais são necessariamente de menor custo por quilômetro quadrado, quan-

do comparadas às fotografias obtidas de sistemas aerotransportados, principalmente se forem considerados o potencial das técnicas de processamento e de classificação digital, bem como a repetitividade temporal e as resoluções espectral e radiométrica.

A fundamentação para a interface entre os dados orbitais e a dinâmica do escoamento superficial das bacias hidrográficas, está no pressuposto de que é possível a associação entre as informações espectrais e os valores de densidade de cobertura vegetal no terreno. Assim, os dados orbitais se tornam compatíveis com as abordagens que consideram a retenção e a infiltração da precipitação devido à presença ou ausência da cobertura vegetal, como um fator chave no comportamento da curva de deflúvio (hidrografa) da bacia.

Por outro lado, como poderá ser visto neste trabalho, diversos estudos têm mostrado a possibilidade de se efetuar avaliações indiretas sobre o potencial do escoamento superficial, a partir de dados hidromorfológicos ou morfométricos das bacias, obtidos de cartas topográficas e fotografias aéreas ou de imagens orbitais. A maior parte destes estudos baseia-se na premissa de que a morfologia da bacia hidrográfica é um fator de controle da velocidade e da intensidade do escoamento da precipitação.

Outro fator de reconhecida importância hidrológica em uma bacia é o tipo de material de cobertura, originado pela ação dos processos morfogenéticos e pedogenéticos. A granulometria, a estrutura, a profundidade do perfil do solo, o tipo de substrato rochoso e a declividade do terreno são parâmetros que caracterizam o comportamento hidrológico do material pedogeneizado. Com base nestes parâmetros, é possível classificar as unidades pedológicas quanto ao seu potencial de geração de escoamento superficial e a consequente contribuição para o comportamento da curva de deflúvio da bacia hidrográfica.

No entanto, estas diferentes metodologias têm sido utilizadas isoladamente, muitas vezes não se considerando que a cobertura vegetal, a morfometria e a cobertura pedológica, atuam de forma integrada na dinâmica hidrológica de superfície de uma bacia hidrográfica.

A regionalização de bacias hidrográficas pa

ra fins de avaliação indireta da resposta hidrológica, tem sido feita principalmente com base nas chamadas características das bacias, ou seja, no conjunto de informações ambientais responsável direta ou indiretamente pelo balanço hídrico dos sistemas de drenagem. Geralmente são consideradas como características das bacias, a cobertura vegetal, a litologia predominante, a cobertura pedológica, a morfometria, bem como, a precipitação média anual, a evapotranspiração, entre outras.

A importância deste procedimento está na possibilidade de se conhecer a curva de frequência de cheias de bacias sem informações hidrológicas, a partir da especialização dos dados obtidos de bacias instrumentalizadas.

A definição dos grupos de bacias hidrológicamente homogêneas é comumente feita com base em técnicas de análise de agrupamentos (cluster analysis), segundo as quais, são identificados grupos de bacias similares, de acordo com um determinado conjunto de variáveis que descrevem as características das bacias.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia de regionalização de bacias hidrográficas fundamentado na integração de dados orbitais de índice de vegetação obtidos de imagens TM-LANDSAT, com dados morfométricos obtidos de cartas topográficas e fotografias aéreas e dados sobre as propriedades hidrológicas dos solos da bacia hidrográfica.

A proposição de um estudo desta natureza, justifica-se em função da precariedade das informações hidrológicas de bacias hidrográficas, principalmente nas regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste do território brasileiro. Este quadro requer a disponibilidade de métodos de avaliação hidrológica indireta, que possibilitem a um baixo custo, um levantamento extensivo das condições dos recursos hídricos nacionais, sem a perda da qualidade científica, nem o desprezo ao instrumental tecnológico hoje disponível em algumas localidades do país.

CAPÍTULO 2

LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 - LOCALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVAS

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi escolhida como área teste a Bacia do Ribeirão do Feijão, localizada na porção centro-ocidental do Estado de São Paulo, tendo como coordenadas geográficas: $22^{\circ}01'36''$ e $22^{\circ}13'12''$ de latitude Sul e $47^{\circ}45'00''$ e $47^{\circ}50'00''$ de longitude Oeste (Figura 2.1).

A escolha desta área foi devida principalmente aos fatores abaixo referidos por ordem de importância:

- a) a relativa diversidade de unidades ambientais e de características hidrológicas particulares,
- b) a disponibilidade de dados fluviométricos e pluviométricos que possibilitam uma continuidade deste trabalho, e
- c) a proximidade do local de realização das atividades de laboratório deste trabalho, ou seja, do Departamento de Cartografia e Análise da Informação Geográfica, da UNESP, Campus de Rio Claro. Isto proporciona uma facilidade no tocante ao retorno frequente ao campo para elucidar dúvidas.

Cabe ressaltar aqui, que o Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada da Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos, mantém como base para estudos hidrológicos, a bacia representativa do Rio Jacaré-Guaçu. Nesta bacia encontram-se instalados pluviômetros, pluviógrafos, linímetros e linígrafos para a coleta de dados. A Bacia do Ribeirão do Feijão está situada à montante desta bacia representativa, ocupando parte dos municípios de São Carlos e Anilândia, dentro dos limites da área de Proteção Ambiental das Cuestas de São Pedro e Anilândia (SP).

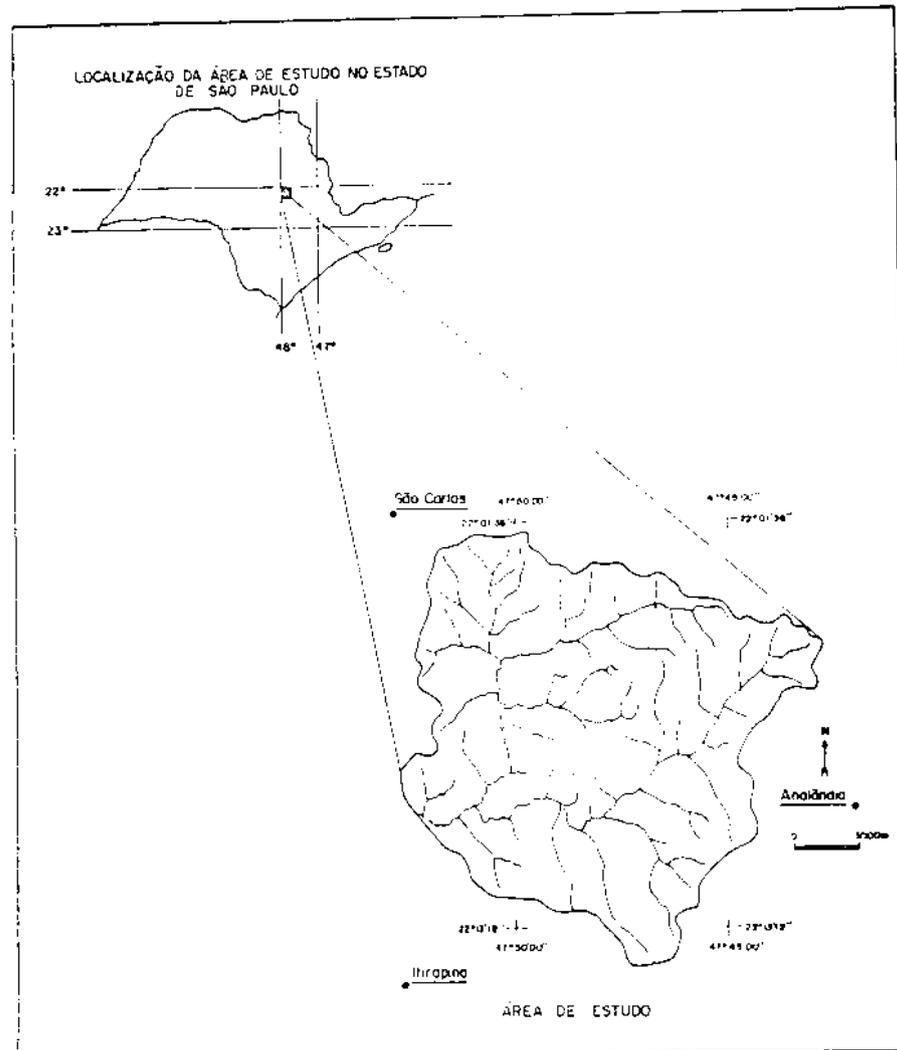


Fig. 2.1 - Mapa de localização da área de estudo.

A Bacia do Ribeirão do Feijão distribui-se sobre as litologias do Grupo São Bento. Este grupo é composto pelos arenitos das Formações Botucatu e Pirambóia e pelos basaltos da Formação Serra Geral. O afloramento destas rochas ocorre principalmente nas bordas das escarpas das Cuestas Basálticas e dos morros testemunhos.

Os arenitos da Formação Botucatu, segundo Oliveira e Prado (1984), foram parcialmente responsáveis pelo material de origem das Areias Quartzosas Profundas, dos Latossolos Vermelho-Amarelos textura-média (Unidades Coqueiro e Laranja Azeda) e também de parte dos Solos Litólicos substrato arenito Botucatu-Pirambóia. As características físicas dos solos da área encontram-se na Tabela

2.1. A distribuição espacial destas unidades pode ser verificada nas Figuras 2.2 e 2.3.

Os arenitos que compõem a Formação Pirambóia, ainda segundo os mesmos autores, são responsáveis pelo material de origem dos Latossolos Vermelho-Amarelos textura média, parte das Areias Quartzosas Profundas, dos Podzólicos Vermelho-Amarelos e ainda de parte dos Solos Litólicos substrato Botucatu-Pirambóia.

Já as rochas da Formação Serra Geral, segundo Oliveira e Prado (1984), foram responsáveis pelo material de origem dos Latossolos Roxos distróficos (Unidade Ribeirão Preto), da Terra Roxa Estruturada e de parte do Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa (Unidade Limeira). Aquelas rochas, ainda deram origem aos Litossolos substrato basalto e diabásio. A decomposição dos arenitos com contribuição de rocha básica, resultou na formação dos Latossolos Vermelho-Escuros textura média.

Ocorrendo junto às porções mais elevadas da bacia, a Formação Itaqueri, uma cobertura sedimentar pós-basáltica constituída de arenitos com cimento argiloso, folhelhos e conglomerados (Almeida e Barbosa, 1953), e responsável pelo material de origem dos Latossolos Vermelho-Amarelos de textura argilosa (Unidade Canchim) associados aos Plintossolos Concrecionários.

O Mapa dos biótopos da Bacia é apresentado na Fig. 2.4.

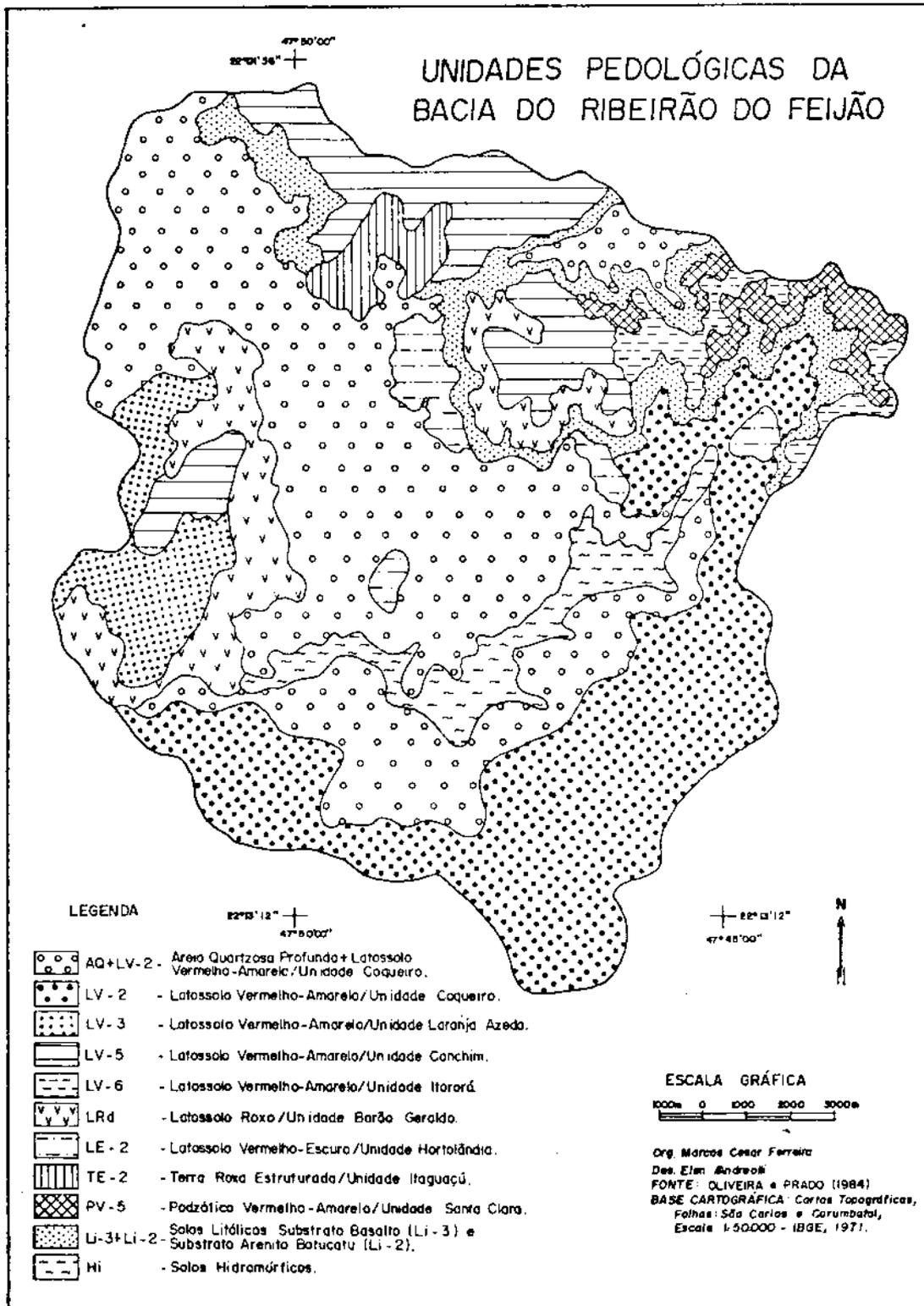


Fig. 2.2 - Unidades pedológicas da área de estudo.
Baseada em Oliveira e Prado (1984).

TABELA 2.1 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS UNIDADES PEDOLÓGICAS DA BACIA DO RIBEIRÃO DO FEIJÃO

UNIDADE	PROFUND. (cm)	GRANULOMETRIA - Hor. A e B (%)									
		ARGILA (%)		AREIA FINA (%)		AREIA GROSSA (%)		SILTE (%)			
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
AQ	250	9.0	12.0	52.0	47.0	38.0	40.0	1.0	1.0	1.0	1.0
LV-2	300	15.0	20.0	43.0	34.0	42.0	45.0	1.0	1.0	1.0	1.0
LV-3	300	19.0	25.0	46.0	45.0	34.0	28.0	2.0	2.0	2.0	2.0
LV-5	300	35.0	41.0	24.0	23.0	38.0	33.0	2.0	2.0	2.0	2.0
LV-6	300	52.0	66.0	19.0	16.0	23.0	15.0	6.0	3.0	3.0	3.0
LE-2	300	23.0	27.0	42.0	42.0	33.0	29.0	3.0	2.0	2.0	2.0
LRd	250	56.0	56.0	22.0	23.0	11.0	12.0	11.0	9.0	9.0	9.0
TE-2	250	58.0	64.0	22.0	17.0	10.0	12.0	11.0	8.0	8.0	8.0
PV-5	100	37.0	64.0	22.0	7.3	27.0	19.6	14.0	9.0	9.0	9.0
Li-3	40	26.0	-	38.0	-	18.0	-	18.0	-	-	-
Li-2	40	12.0	-	78.0	-	7.0	-	3.0	-	-	-

AQ - Areia Quartzosa profunda alíca, A Fraco ou moderado
LV-2 - Latossolo Vermelho-Amarelo alíco, A moderado, textura média, Unidade Coqueiro
LV-3 - Latossolo Vermelho-Amarelo alíco, A moderado, textura média, Unidade Laranja Azada
LV-5 - Latossolo Vermelho-Amarelo alíco, distrófico, textura argilosa, Unidade Canchim
LV-6 - Latossolo Vermelho-Amarelo alíco, A proeminente, textura muito argilosa, Unidade Ipororo
LE-2 - Latossolo Vermelho-Escuro alíco, A moderado, textura média, Unidade Hortolândia
LRd - Latossolo Roxo epieutrófico ou distrófico, A moderado, textura argilosa ou argilosa, Unidade Barão Geraldo
LE-2 - Terra Roxa Estruturada distrófica ou eutrófica intermediária para Latossolo Roxo, A moderado
PV-5 - Podzólico Vermelho Amarelo, argila de atividade baixa, distrófico, A moderado ou chermozênico, textura média argilosa, pouco profundo, Unidade Santa Clara
Li-3 - Solos Litólicos eutróficos, A moderado, ou chermozênico, textura argilosa, substrato basalto ou diabásio

baseada em Oliveira e Prado (1984), p. 24-167.

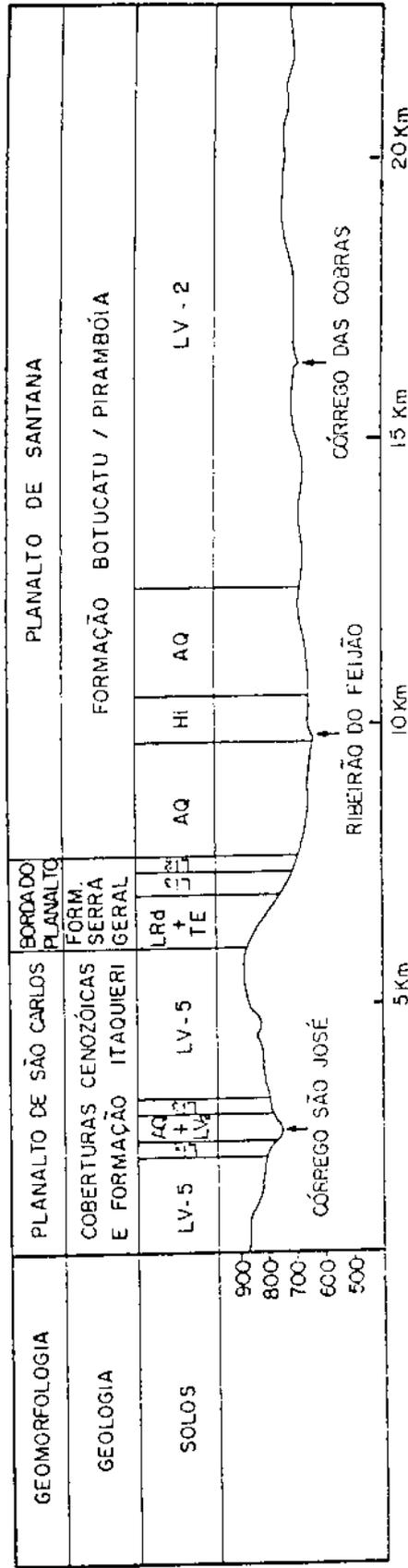
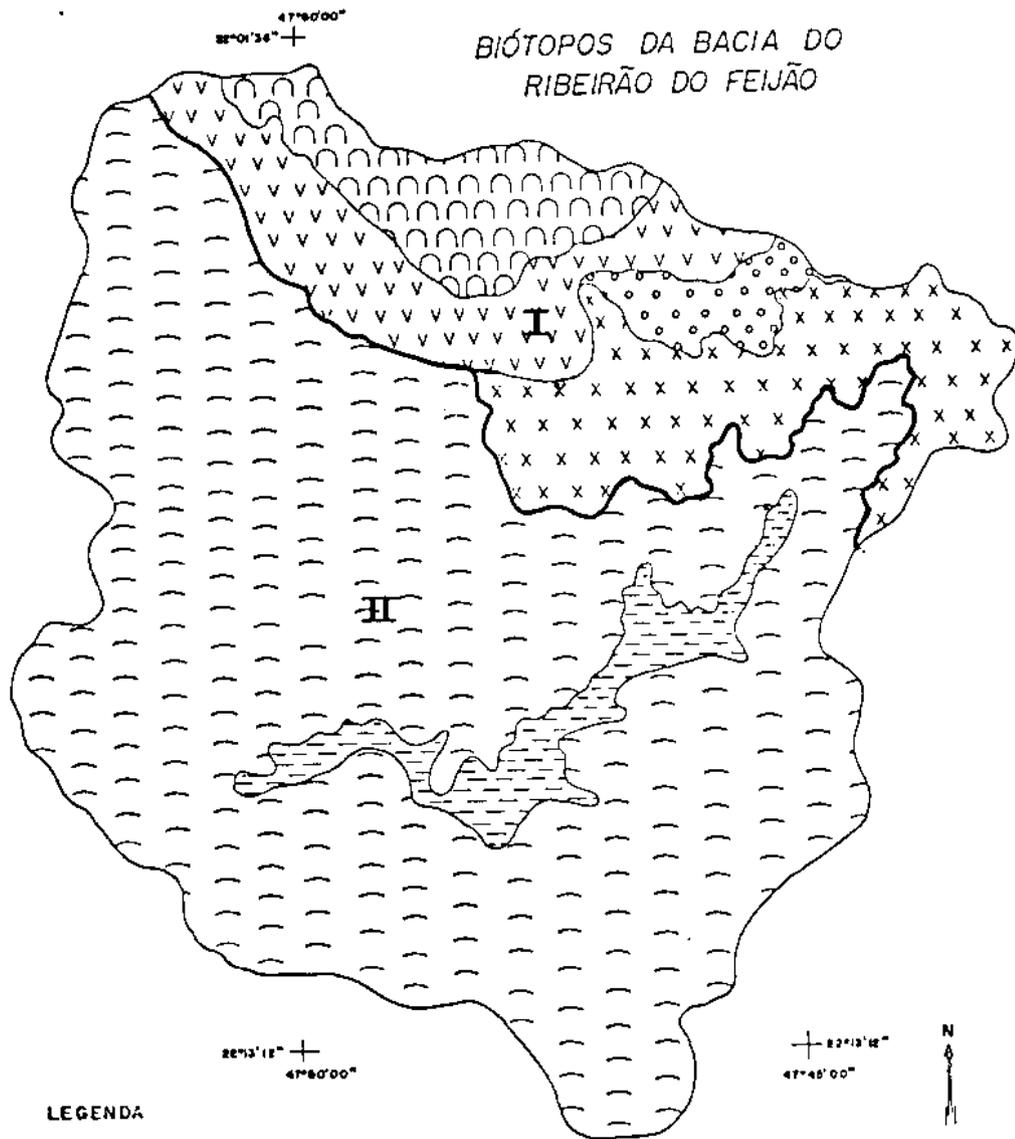


Fig. 2.3 - Catena da associação entre as unidades geológicas, geomorfológicas e pedológicas da Bacia do Ribeirão do Feijão. Adaptado de Oliveira e Prado (1984), p. 10.



LEGENDA

-  Brejos e Planícies Aluviais
-  Morros Isolados, Inselberg e Formas Runiformes
-  Anfiteatros voltados para o Norte
-  Vales Encaixados e "Canyons"
-  Colinas Amplas e Vales Abertos
-  Colinas Médias e Vales Intermediários
-  Limite entre os Planalto de São Carlos e Santana
- I** Planalto de São Carlos
- II** Planalto de Santana

ESCALA GRÁFICA
 1000m 0 1000 2000 3000m

Org. Marcos Cesar Ferrero
 Des. Elen Andreoli
 FONTE: MORAES (1985)
 BASE CARTOGRÁFICA: Cartas Topográficas,
 Folhas São Carlos e Corumbataí,
 Escala 1:80.000 - IBGE, 1971.

Fig. 2.4 - Biotópos da Bacia do Ribeirão do Feijão.
 Adaptada de Moraes (1985), p. 92.

2.2 - COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOLÓGICA REGIONAL

A Bacia do Ribeirão do Feijão situa-se no Planalto Ocidental Paulista (Almeida, 1964). Localmente, este planalto está dividido em duas sub-unidades, ou seja, o Planalto de São Carlos e o Planalto de Santana (Figura 2.4).

O Planalto de Santana está situado entre 700 e 820 metros de altitude e, segundo Ab Saber (1949), possui evolução genética similar a Depressão Periférica. O planalto apresenta um relevo composto por colinas esculpidas na formação sedimentar arenosa que capeia as camadas de basaltos e o arenito Botucatu. A Superfície de Santana, como também é chamado este planalto, se constitui em nível intermediário entre o Planalto de São Carlos e a Depressão Periférica.

Neste compartimento geomorfológico, se desenvolveram as Areias Quartzosas (AQ) e os Latossolos Vermelho-Amarelos textura média (LV-2). Nas amplas planícies aluvionares, principalmente a do Ribeirão do Feijão, os processos morfopedológicos deram origem a solos hidromórficos (Hi).

O Planalto de São Carlos, situado entre 850 e 1.030 metros de altitude, apresenta um relevo suavemente ondulado com declives de 3 a 5 %, com solos do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo Unidades Canchim (LV-5), Unidade Itororó (LV-6) e o Latossolo Roxo (Oliveira e Prado, 1984).

2.3 - BIÓTOPOS

Moraes (1985) efetuou um mapeamento dos biótopos e dos ecossistemas da Área de Proteção Ambiental das Cuestas de São Pedro e de Analândia (A.P.A.), na escala 1:100.000. Com base neste trabalho, foi possível a identificação daquelas unidades ambientais que ocorrem na Bacia do Ribeirão do Feijão, visto que a área de estudo localiza-se na porção nordeste da A.P.A. A Figura 2.4 apresenta o Mapa dos Biótopos da bacia.

2.3.1 - BREJOS E PLANÍCIES ALUVIAIS

Constituem pequenos compartimentos situados na posição altimétrica mais baixa da bacia, junto aos cur

tos d'água principais. São faixas de terreno Quaternárias, coletoras de sedimentos arenosos e de escoamento superficial. Estas unidades estão sujeitas à inundações periódicas, mesmo na estação seca, possuindo o lençol freático muito próximo à superfície.

2.3.2 - COLINAS AMPLAS E VALES ABERTOS

Presentes principalmente no Planalto de Santana, esta unidade se caracteriza por apresentar interflúvios com área superior a 4 km², sendo os topos aplainados e extensos. As vertentes apresentam perfis retilíneos e convexos, com declividades baixas, no máximo em torno de 9 %.

O relevo, de maneira geral, possui amplitudes inferiores a 100 metros e os vales são abertos, ocorrendo nas áreas mais baixas planícies aluviais representativas e eventuais lagoas perenes ou intermitentes, de grande importância faunística. A rede de drenagem é de baixa densidade, predominando o padrão subdendrítico. Em termos hidrogeológicos, esta unidade apresenta o aquífero Botucatu, o qual é responsável por 80 % do potencial aquífero da Bacia do Paraná.

2.3.3 - COLINAS MÉDIAS E VALES INTERMEDIÁRIOS

Situando-se no Planalto de São Carlos, esta unidade apresenta um relevo colinoso com interflúvios que variam de 1 a 4 km², topos planos e vertentes com perfis convexos a retilíneos. As planícies aluviais são restritas e os vales semi-fechados, predominando uma rede de drenagem de média densidade e um padrão dendrítico a sub-angular. Suas águas subterrâneas pertencem ao denominado aquífero Bauru.

2.3.4 - MORROS ISOLADOS, INSELBERGS E FORMAS RUNIFORMES

Este biótopo está localizado na transição entre os Planaltos de São Carlos e o de Santana, caracterizando-se por dois tipos principais de relevo: os morros e o relevo residual. Os morros se constituem em formas apresentando topos arredondados, as vezes achatados, com vertentes de perfis convexos a retilíneos.

O relevo residual agrupa mesas basálticas,

morros testemunhos isolados com topos planos e arredondados, vertentes com perfis retilíneos apresentando localmente paredes rochosas. As amplitudes variam de 100 a 300 metros, e as declividades podem às vezes superar os 25%. Predominam as rochas eruptivas básicas associadas aos arenitos da Formação Botucatu, e a densidade de drenagem varia de média a alta sendo que o padrão da drenagem pode variar desde sub-dendrítico à pinulado e sub-paralelo. Raras vezes, junto aos inselbergs, pode ser encontrado o padrão radial.

2.3.5 - VALES ENCAIXADOS E CANYONS

Também localizado na transição interplanáltica, este biótopo se apresenta como um ambiente de alta energia gravitacional onde atuam intensamente os processos de degradação em substrato arenítico.

Devido ao grande aprofundamento da rede de drenagem e ao condicionamento estrutural, a amplitude do relevo supera os 100 metros, e as declividades estão acima dos 18%. As vertentes apresentam perfis retilíneos e convexos e os vales são predominantemente fechados.

Esta unidade apresenta trechos escarpados onde afloram os arenitos Botucatu e Pirambóia. A densidade de drenagem varia de média a alta e o padrão de drenagem mais marcante é o pinulado.

2.4 - ECOSSISTEMAS E MOSAICOS

Estudos realizados por Moraes (1985), identificaram a presença de sete ecossistemas na área: Mata Tropical Latifoliada, Mata Galeria, Campo, Culturas, Reflorestamento, Cerradinho/Campo Cerrado e Brejos. Foi também constatada a existência de dois tipos de mosaicos predominantes: predomínio de Reflorestamento sobre Culturas e Campos com algumas áreas de Cerrado (Figura 2.5).

Atualmente a Bacia do Ribeirão do Feijão vem sofrendo intensas modificações nos seus ecossistemas primitivos, principalmente na Mata Tropical e no Campo Cerrado e Cerrado. Estas unidades vem sendo convertidas rapidamente em citricultura e cultura canavieira, dada a facilidade da mecanização do biótopo Colinas Amplas e Vales Abertos, área core de cerrados e campos.

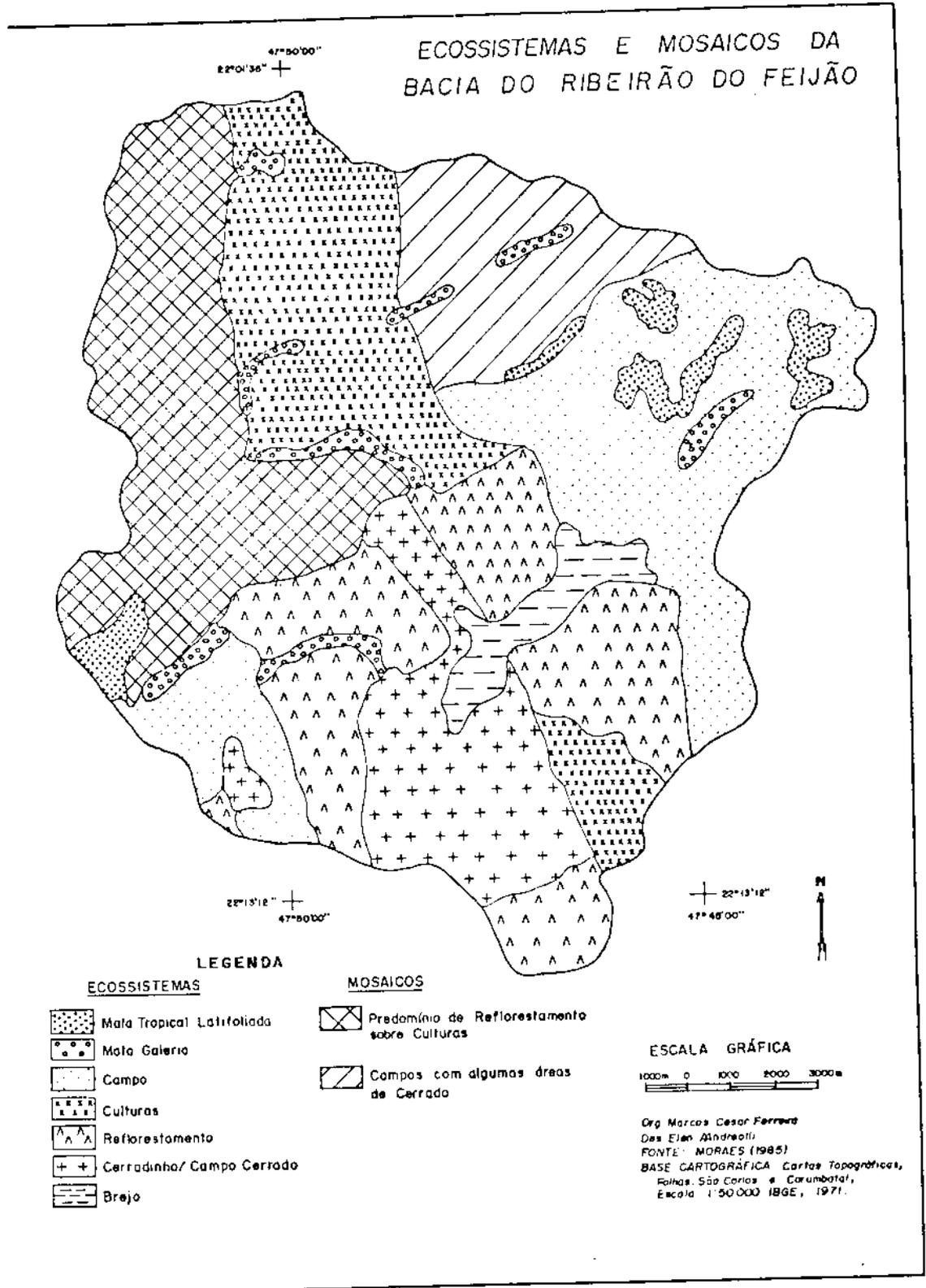


Fig. 2.5 - Ecossistemas e mosaicos da Bacia do Ribeirão do Feijão.
Adaptada de Moraes (1985), p. 98.

O reflorestamento de Eucaliptus sp. e Pinus spp. tem ocupado notadamente as coberturas arenosas da Formação Botucatu, junto aos interflúvios amplos, onde predominam as Areias Quartzosas e os Latossolos Arenosos. Em algumas áreas restritas vê-se o avanço das pastagens, mas sem a significância da cultura canavieira, da citricultura e do reflorestamento.

As Matas Tropicais ocupam uma superfície quase desprezível em relação às áreas antrópicas da bacia. Encontram-se atualmente restritas às bordas do Planalto de São Carlos junto às Cuestas Basálticas, principalmente nos biótopos Morros Isolados, Inselbergs e Formas Runciformes, bem como nos Vales Encaixados e Canyons. Esta posição atual das matas, deve-se principalmente a inconveniência da morfologia do terreno para a ocupação agrícola e à dificuldade de acesso. No entanto, estas áreas tem sido alteradas pelo desmatamento esporádico com objetivo de retirada de madeira para lenha e serraria.

CAPÍTULO 3

REVISÃO DA LITERATURA

3.1 - UTILIZAÇÃO DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL NO LEVANTAMENTO DE PARÂMETROS HIDROLÓGICOS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

A maioria dos estudos envolvendo a aquisição e interpretação de imagens orbitais para a identificação de elementos da superfície terrestre, baseia-se na interação entre parâmetros do sistema sensor-produto de sensoriamento remoto (resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal) e os parâmetros do alvo (reflectância espectral e radiância). Tais relações são fundamentais para outros estudos direcionados para avaliar a exatidão das classificações digital e visual das imagens orbitais.

Um dos fatores de grande importância para o sucesso da utilização de imagens orbitais é a resolução espacial do sistema sensor. Tal parâmetro pode ser responsável pela ocorrência de erros na classificação digital e visual da cobertura do terreno (Cushnie, 1987; Singh, 1987 e Kenk et al., 1988). Um dos principais problemas resultantes da resolução espacial de alguns sistemas sensores é a amostragem da radiância dos alvos determinada pelo IFOV (Instantaneous Field of View), o qual limita a quantificação e a discriminação dos alvos terrestres.

Por outro lado, tem sido desenvolvidos modelos para a correção dos efeitos devidos a relação entre a resolução espacial e a geometria da iluminação da cena imageada. Estes efeitos se devem a topografia, a qual por não se comportar como uma superfície lambertiana, provoca erros na interpretação da radiância coletada pelo sistema sensor (Jones et al., 1988 e Crippen et al., 1988). Tais modelos propiciam uma otimização da classificação digital das imagens multiespectrais.

Salomonson et al. (1975), estudaram o papel da resolução espacial dos dados orbitais quando estes são utilizados em associação com modelos hidrológicos. Segundo estes autores, para o caso do MSS-LANDSAT, com resolução espacial aproximada de 80 metros, as imagens proporcionariam erros desprezíveis em relação à confiabilidade dos modelos hidrológicos. Estes resultados, mostraram que a ques

tão da resolução espacial das imagens LANDSAT não se apresenta como um agravante na interpretação e quantificação de alguns parâmetros de importância hidrológica.

Resultados apresentados por Novo (1986), em um estudo onde a autora avalia as características espaciais, espectrais e temporais das imagens MSS-LANDSAT, mostraram os potenciais e as limitações do uso deste produto na interpretação visual da rede de drenagem. Em relação a resolução espacial, a autora ressalta que as imagens MSS devem ser empregadas somente para o estudo de bacias hidrográficas com área superior a 100 km^2 . Esta constatação foi efetuada pela autora com base em especificações da W.M.O. (World Meteorological Organization), no que se refere aos tipos de sistemas sensores que devem ser utilizados no estudo de bacias de drenagem de diferentes magnitudes (Tabela 3.1).

Se por outro lado analisarmos as especificações da W.M.O. no que tange à resolução espacial do sistema sensor TM-LANDSAT, ou seja, aproximadamente 30 m, poderemos constatar que é possível se estudar bacias com área inferior a 100 km^2 , e delas se obter informações sobre canais de drenagem com exatidão em torno de 95 %. Já em relação à cobertura do terreno, a exatidão é menor que 99 % e em relação às medidas de área está em torno de 99 %.

Em relação às características espectrais do MSS, a autora define algumas diretrizes a serem consideradas na interpretação visual da rede de drenagem. Observa que a banda 5 é a mais adequada para se mapear a drenagem secundária em áreas de cerrado, pois nesta faixa espectral é possível se diferenciar a mata de galeria da vegetação de cerrado. No entanto, o mesmo não acontece em áreas de floresta densa, pois nesta banda é praticamente impossível a discriminação entre mata de galeria de mata de terra firme. Neste sentido, a autora sugere a utilização da banda 7 para o mapeamento da rede de drenagem secundária em áreas de mata densa. Isto se deve ao fato de que nesta faixa espectral há a maior possibilidade de se diferenciar a mata de galeria da mata de terra firme, em função da possibilidade de uma resposta espectral distinta nas áreas onde o lençol freático está mais próximo à superfície.

TABELA 3.1 - ESPECIFICAÇÃO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL E FREQUÊNCIA DE AQUISIÇÃO DE DADOS REQUERIDOS PARA A APLICAÇÃO EM HIDROLOGIA

INFORMAÇÃO HIDROLÓGICA	RESOLUÇÃO (m)			EXATIDÃO	FREQUÊNCIA
	A	B	C		
EXTENSÃO DE CORPOS D'ÁGUA	10	30	100	5 %	1-4 DIAS
EXTENSÃO DE ÁREAS INUNDADAS	10	30	100	5 %	1-24 DIAS
LIM. DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO	10	30	100	5 %	5 ANOS
UMIDADE DO SOLO	100	300	1000	10 %	1-3 DIAS
ÁREA DA BACIA HIDROGRÁFICA	30	30	100	1 %	10 ANOS
CARACTERÍSTICAS CANAL FLUVIAL	30	30	100	5 %	5 ANOS
USO E COBERTURA DO SOLO	100	100	100	1 %	1 ANO
DECLIVIDADE	30	30	100	5 %	5 ANOS

FONTE: Novo (1986), p. 8.

- A = Bacias Hidrográficas menores que 100 km²
- B = Bacias Hidrográficas entre 100 km² e 1000 km²
- C = Bacias Hidrográficas maiores que 100 km²

France et al. (1986), efetuaram estudos com parando imagens TM e MSS, e fotografias aéreas na escala 1:50.000, no sentido de avaliar o potencial destes produtos para o mapeamento da rede de drenagem. Os autores utilizaram técnicas digitais para a classificação da rede de drenagem, tais como: combinação de bandas, análise individual de bandas, análise das componentes principais e técnicas de realce de bordas. Segundo os autores, as bandas 4 e 5 do TM revelaram maiores detalhes da rede de drenagem. Os autores ainda ressaltam no entanto que a combinação de bandas apresenta melhor definição dos canais fluviais na imagem, sugerindo portanto o uso da combinação 145, atribuindo-se respectivamente o azul, o verde e o vermelho. Para o realce de bordas os autores utilizaram filtros do tipo Laplaciano, filtragem direcional em máscara 3 x 3 e operadores de Sobel. No caso das imagens MSS, o realce da rede de drenagem foi melhor obtido pela combinação das bandas 457.

Os parâmetros morfológicos das bacias hidrográficas têm sido considerados há muito tempo como tendo um importante papel no tempo de resposta hidrológica. Trabalhos efetuados por Chorley (1973), Rodda (1973), Pilgrim (1983) e Beven e Wood (1983), dentre outros, demonstram como os atributos morfométricos (os quais refletem as caracte

terísticas morfológicas da bacia) interferem no comportamento da curva de deflúvio das bacias.

Drayton e Chidley (1985), avaliaram a utilização de imagens MSS na identificação de parâmetros morfológicos de bacias hidrográficas, tais como: área, densidade de drenagem e frequência de canais fluviais. Para a obtenção destes parâmetros, os autores efetuaram a interpretação visual de imagens MSS, banda 7, escala 1:250.000, em quatro datas. Quanto à área da bacia, os autores observaram uma correlação de 0.98 entre os dados das imagens e dos mapas. Por outro lado, eles encontraram uma baixa correlação entre os valores de densidade de drenagem do mapa e das imagens. Isto é devido ao fato da dificuldade encontrada na identificação dos canais de 1ª e 2ª ordem através das imagens orbitais. Os autores concluem que para uma identificação mais exata dos canais de drenagem inferiores, é necessária uma interpretação multitemporal das imagens, devido ao fator sombreamento do relevo, resultante do ângulo de elevação solar e ao estado fenológico da cobertura vegetal.

Algazi e Minsoo (1977), afirmam ser a cobertura do terreno o fator-chave na identificação da resposta hidrológica das bacias através de imagens orbitais. Uma série de trabalhos relacionados ao comportamento hidrológico das bacias, desde os pioneiros como Anderson (1954), elegem a cobertura do terreno como um fator que não deve ser desprezado nos estudos sobre o escoamento superficial e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica.

A hipótese da utilização de imagens orbitais para a identificação da cobertura do terreno como um parâmetro hidrológico, foi verificada por Ragan e Salomonson (1978). Este foi o primeiro estudo a modificar um modelo hidrológico já existente, para adequá-lo aos dados de cobertura do terreno obtidos de imagens orbitais. Neste trabalho foram conseguidos resultados encorajadores, na medida em que o escoamento fluvial da bacia obtido pelo índice CN (Curve Number)¹, o qual foi baseado em medidas de re

¹ O Curve Number (CN) é um valor inteiro que caracteriza a curva de vazão de uma bacia hidrográfica. Seu valor situa-se entre 0 e 100, aumentando proporcionalmente ao potenci

flectância obtidas pelo sistema sensor MSS, ficou muito próximo dos dados obtidos de maneira convencional (Tabela 3.2).

Ragan e Salomonson (1978), mostraram que embora a interpretação das classes de cobertura do terreno realizada em imagens orbitais estejam sujeitas a erros de exatidão de classificação, tais erros não afetam a estimativa do coeficiente de deflúvio das bacias hidrográficas. Os autores afirmam que os erros inerentes aos modelos hidrológicos são maiores que aqueles resultantes da classificação digital ou visual das imagens orbitais.

TABELA 3.2 - VALORES DE CN (CURVE NUMBER) DE ESCOAMENTO FLUVIAL, OBTIDOS A PARTIR DE DADOS DE COBERTURA DO TERRENO INTERPRETADOS EM IMAGENS MSS-LANDSAT, ASSOCIADOS AOS GRUPOS HIDROLÓGICOS DE SOLOS

USO DA TERRA	GRUPO HIDROLÓGICO DE SOLO			
	A	B	C	D
FLORESTAS	25	55	70	77
ÁREAS VERDES (GRAMADOS, ESPAÇOS LIVRES)	36	60	73	78
ÁREAS ALTAMENTE IMPERMEÁVEIS (COMERCIAL, INDUSTRIAL, ESTACIONAMENTOS, ETC)	90	93	94	95
ÁREAS RESIDENCIAIS	60	74	83	87
SOLO NÚ	72	82	88	90

FONTE: Ragan e Salomonson (1978), p. 492.

A associação entre solos e cobertura vegetal, foi utilizada por Chow (1964) como um parâmetro para a estimativa do escoamento de uma bacia hidrográfica. O autor mostra que para a utilização desta técnica, os solos devem ser agrupados em quatro grandes grupos hidrológicos (A, B,

al de escoamento superficial da bacia e depende de três parâmetros: cobertura vegetal, permeabilidade relativa dos solos e condições antecedentes de umidade. O CN foi obtido pelo uso do modelo hidrológico SCS (Soil Conservation Service, USDA - EUA), sendo recomendado para bacias de pequeno porte e relativamente homogêneas.

C e D):

GRUPO A (baixo potencial de escoamento superficial) - São solos que apresentam alta taxa de infiltração, consistindo de areias e cascalhos, são profundos e bem drenados. Estes solos têm uma alta taxa de transmissão hídrica.

GRUPO B - Solos que apresentam taxas moderadas de infiltração quando úmidos, de moderadamente profundos a profundos, moderadamente drenados, com textura de moderadamente fina a grosseira. Estes solos têm uma taxa lenta de transmissão hídrica.

GRUPO C - Solos que possuem baixa taxa de infiltração quando úmidos, apresentando um horizonte que impede o movimento vertical da água, textura de moderadamente fina a fina e apresentam uma baixa taxa de infiltração.

GRUPO D (alto potencial de escoamento superficial) - São solos que apresentam taxas de infiltração muito baixas quando úmidos, textura argilosa, solos com lençol freático permanente ou com material impermeável próximo a superfície. São solos com uma taxa de transmissão hídrica muito baixa.

Sasso et al. (1978) compararam três técnicas de levantamento da cobertura do terreno (fotointerpretação, coletas de dados em campo e classificação digital de imagens MSS, do tipo MAXVER), em relação à exatidão da estimativa do CN (Curve Number) de uma bacia. Os resultados mostraram que a aplicação das três técnicas produziu um erro inferior a 7 % na previsão do escoamento fluvial máximo. Porém, se forem comparados os custos de aquisição dos dados em relação às três técnicas, continuam os autores, a classificação digital MAXVER é a de menor custo por quilômetro quadrado da bacia.

Trolier e Philipson (1986) avaliaram a interpretação visual de classes de cobertura do terreno hidrológicamente importantes, a partir de imagens TM. Os autores analisaram as sete bandas individualmente e duas composições coloridas, no sentido de averiguar o melhor produto para a análise visual dos dados orbitais (Tabela 3.3). Em relação à interpretação individual das bandas, os autores elegeram as bandas 3, 4 e 5 como as mais adequadas, ressaltando que a banda 3 apresentou maior capacidade de realce

de alvos com alta impermeabilidade (classes de áreas urbanas como: residenciais, comerciais e industriais).

A banda 4, ainda segundo os autores, apresentou maior separação espectral entre a água e a vegetação e entre a água e o solo nu. Isto se explica pelo fato da faixa do infravermelho possuir informações sobre a absorção da radiação infra-vermelha pela água e sobre a alta refletância da vegetação. A banda 5, segundo os autores, foi útil na identificação visual de áreas agrícolas, áreas úmidas, lagos e vegetação arbustiva. Em termos de composição de bandas, os autores observaram que a composição 345 é a mais aplicada ao mapeamento da cobertura do terreno.

TABELA 3.3 - HABILIDADE DO INTÉRPRETE EM RECONHECER AS CLASSES DE COBERTURA DO TERRENO DE IMPORTÂNCIA HIDROLÓGICA EM IMAGENS TM-LANDSAT

CLASSES	BANDAS E COMPOSIÇÕES - TM - LANDSAT									
	1	2	3	4	5	6	7	234	354	
AREAS RURAIS										
Culturas	D	D	S	S	S	N	S	S	S	
Pastagens	N	N	N	N	N	N	N	N	D	
Solo Nu	S	S	S	N	D	D	S	S	S	
Florestas	S	S	S	D	D	S	S	S	S	
Arbustos	N	N	N	N	N	N	N	N	N	
Pântanos	N	N	N	S	S	N	D	S	S	
Corpos d'água	D	D	D	S	S	S	S	S	S	
AREAS URBANAS										
Comercial	D	D	S	S	S	N	D	S	S	
Industrial	D	D	S	S	D	D	S	S	S	
Transportes	S	S	S	S	D	N	S	S	S	
Gramados	N	N	N	S	S	N	N	S	S	
Residencial	D	S	S	S	N	N	N	S	S	

FONTE: Trolier e Philipson (1986), p. 1536.

S - Sim, N - Não, D - Duvidosa

Há a necessidade, no entanto, de ressaltar aqui duas limitações quanto ao uso destes resultados em outras áreas. Primeiramente, de certa forma não é válida para o caso do Brasil, a afirmação dos autores verificada na Tabela 3.3, onde é mostrada a impossibilidade da identificação visual das pastagens nas sete bandas do TM-LANDSAT e

também na composição colorida 234, onde os autores afirmam ser duvidosa a sua interpretação.

No que diz respeito à impossibilidade da interpretação visual da vegetação arbustiva em qualquer uma das bandas e das composições coloridas, não é válida no que diz respeito aos ambientes tropicais. O trabalho de Santos et al. (1981), serve como referência às considerações aqui expostas.

Novo e Santos (1981), realizaram os primeiros testes no sentido de verificar se os dados MSS-LANDSAT permitiam a identificação de seções mais atingidas pelas inundações ao longo do vale do Rio Doce (MG). Para isto, os autores utilizaram técnicas de processamento digital para a superposição de imagens de diferentes estações climáticas. Este estudo possibilitou a continuidade de outros trabalhos, cujo objetivo foi o aperfeiçoamento das técnicas de sensoriamento remoto úteis para a estimativa de áreas inundadas.

Pinto et al. (1985) avaliaram o emprego de dados multitemporais do MSS-LANDSAT, banda 7, para o estudo de áreas da planície fluvial sujeitas a inundações. Para tanto os autores utilizaram técnicas de análise visual de imagens, para mapear a largura da lâmina d'água em períodos de cheia e de vazante no Rio Paraná. Os autores concluíram que a superposição temporal dos dados MSS-LANDSAT possibilita a detecção da variação da lâmina d'água entre situações de cheia e vazante. Por outro lado, para o estudo de determinação de áreas com maior potencial de inundação em planícies fluviais, os autores ressaltam a necessidade de dados consistentes da geometria do canal fluvial.

3.2 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA COBERTURA VEGETAL

Os diversos estudos baseados na obtenção de informações sobre a vegetação através de sensoriamento remoto, apoiam-se no fenômeno resultante da interação entre a luz e os objetos, conhecido como reflectância.

Segundo o Manual of Remote Sensing (American Society of Photogrammetry, 1975), a reflectância é definida como a razão entre a radiação eletromagnética incidente em um objeto e a radiação eletromagnética refletida deste mesmo objeto.

A reflectância possui uma dependência espectral, ou seja, apresenta valores diferentes em cada região do espectro eletromagnético ótico. Por isto torna-se mais coerente a atribuição do termo reflectância espectral, o qual está relacionado ao padrão da curva de reflectância espectral de um objeto. Esta curva é utilizada de maneira geral para individualizar determinado objeto ou alvo terrestre, sobre o qual se pretende obter informações. A Figura 3.1 apresenta a curva de reflectância de uma folha verde.

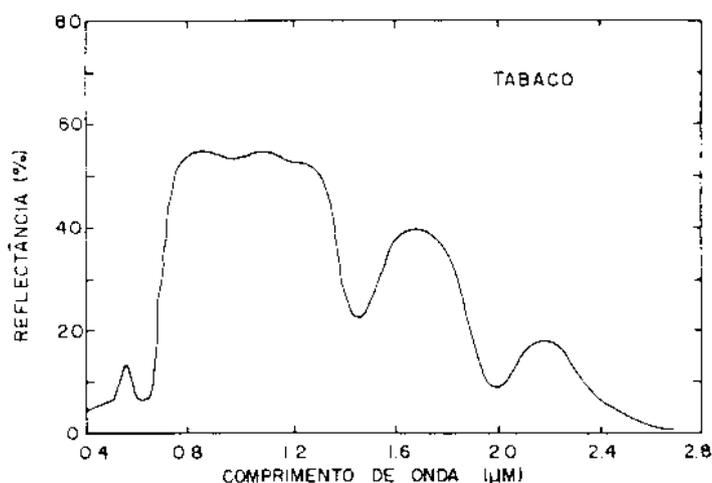


Fig. 3.1 - Espectro de reflectância de uma folha verde.
FONTE: Knipling (1969), p. 155.

Pode-se observar pela figura, segundo Knipling (1969), que na região espectral do visível ($0,40 \mu\text{m} - 0,70 \mu\text{m}$), a reflectância da folha verde é baixa, ao redor de 10 %, possuindo um máximo valor em torno de 0,55.

Porém, é na região do infra-vermelho próximo ($0,70 \mu\text{m} - 1,3 \mu\text{m}$), que a vegetação atinge valores máximos de reflectância espectral, ou seja, em torno de 50 %.

Os mecanismos de reflectância da folha verde dependem principalmente da quantidade da energia incidente que é absorvida pela folha (Knipling, 1969). A absorção é alta na região do visível devido aos pigmentos da folha (clorofila, carotenóides, xantofilas e antocianinas). Este fator é de grande importância na obtenção de informações

sobre as condições fisiológicas de uma cobertura vegetal, pois no caso de distúrbios em uma determinada cultura, a sensibilidade da clorofila às disfunções metabólicas determinará uma menor absorção da radiação incidente e consequentemente a reflectância aumentará na região do visível.

Segundo Ray (1972), a absorção do caroteno se dá em $0.45 \mu\text{m}$ e segundo Hoffer (1978) a absorção da clorofila é maior em $0.65 \mu\text{m}$.

É na região do infravermelho próximo que se observam as faixas de absorção da radiação devido à presença de água. Estes intervalos situam-se em torno de $1.3 \mu\text{m} - 1.9 \mu\text{m}$ (Figura 3.2). Podemos constatar pela Figura 3.2 que a absorção na faixa $0.7 \mu\text{m} - 1.3 \mu\text{m}$ é próxima de zero e obviamente a reflectância será máxima, para o caso da vegetação com biomassa predominantemente verde.

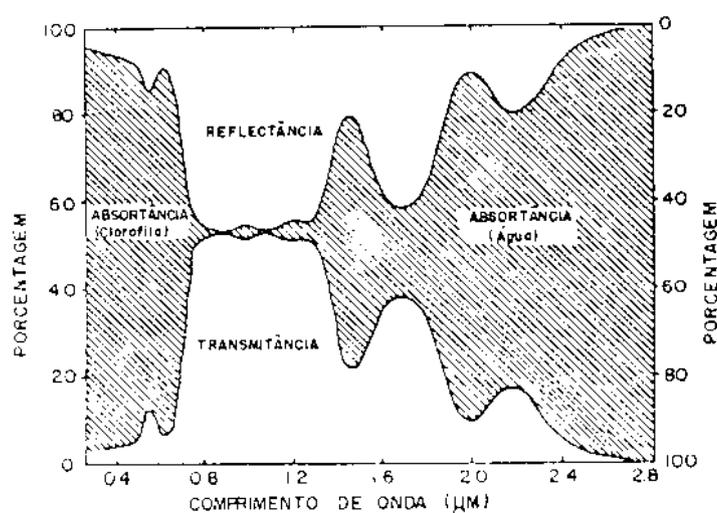


Fig. 3.2 - Espectro de reflectância, absortância e transmitância de uma folha verde.

FONTE: Knipling (1969), p. 156.

Segundo Myers et al. (1966), a maior parte da energia do infravermelho incidente é transmitida através das folhas superiores, e posteriormente refletida das folhas inferiores e retransmitida de volta às folhas superiores da cobertura vegetal, realçando desta forma a reflectância do infravermelho próximo em relação à faixa do vermelho.

Colwell (1974) afirmou que a reflectância hemisférica isolada, proveniente apenas das folhas, é insuficiente para descrever completamente a reflectância da cobertura vegetal, ou para determinar as tonalidades das imagens de sensoriamento remoto. Segundo o autor, os alvos de vegetação são misturas de diferentes componentes, incluindo folhas e outras estruturas da planta, substrato e sombras. Estes componentes estão orientados de diferentes formas e ângulos em relação à fonte de radiação incidente.

A reflectância relativa a cobertura vegetal é considerada por Colwell (1974) como reflectância espectral bidirecional, a qual é responsável pela tonalidade relativa da imagem orbital multiespectral. A reflectância espectral bidirecional, segundo o autor, é um parâmetro mais adequado para descrever os alvos de vegetação, pois associa a geometria da iluminação da cena imageada às características da inter-relação entre as plantas, tais como: densidade, grau de sobreposição, sombreamento e estrutura espacial.

Duggin (1985) estudando a reflexão da radiação eletromagnética dos alvos terrestres, demonstrou que a reflectância espectral bidirecional depende da distribuição polar do fluxo irradiante incidente, do vetor polar da radiação espalhada na atmosfera, da radiação espectral incidente do disco solar, do ângulo zenital solar e da latitude.

3.2.1. - FATORES QUE AFETAM A RESPOSTA ESPECTRAL DA COBERTURA VEGETAL E OS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Diversos fatores podem interferir na resposta espectral da cobertura vegetal, na interpretação destes alvos em imagens multiespectrais e nos valores obtidos para os índices de vegetação.

Colwell (1974), mostrou que a área foliar da planta pode ocasionar alterações na reflectância. Segundo o autor, uma diminuição no índice de área foliar pode provocar uma queda na reflectância do infravermelho e um aumento da reflectância na faixa do vermelho.

Vinogradov (1969) concluiu que a quantidade de sombras influencia o comportamento espectral da cobertura vegetal. Segundo ele, a quantidade de sombras pode pro-

vocar leituras incorretas da densidade de vegetação na região do visível, principalmente na faixa do vermelho.

Kimes (1984), mostrou que a reflectância da vegetação tipo planifolia, apresenta menor dependência em relação ao ângulo solar, devido à disposição horizontal das folhas. Por outro lado, segundo o autor, as folhas do tipo erectifolia sofrem maiores influências do ângulo solar devido a distribuição do retroespalhamento em diversas direções.

Outro importante fator que altera o comportamento da reflectância espectral da uma cobertura vegetal é a reflectância do substrato, ou seja, do conjunto de elementos como: grama, folhas mortas, solo e rochas. Este tipo de interferência é verificado principalmente em alvos com baixa porcentagem de cobertura do terreno.

Segundo Colwell (1974), a reflectância na faixa do vermelho em uma floresta que possui grama como substrato do tipo rochoso. Contudo, na faixa do infravermelho próximo ocorre o inverso.

De maneira geral, pouca atenção tem sido dispensada na bibliografia, em relação à influência de fatores ambientais no comportamento dos índices de vegetação. Para Curran (1981) e Wardley (1984), muitos destes fatores podem alterar as relações entre os valores de um determinado índice de vegetação e os valores de parâmetros da cobertura vegetal. Um dos principais fatores é a geometria de visada do sistema sensor, a qual descreve as condições de iluminação e de detecção do alvo terrestre.

Wardley (1984) estudou o comportamento de cinco índices de vegetação, em relação às variáveis da geometria de visada do sensor. Os IV comparados foram: ND (Diferença Normalizada), Razão Simples entre Bandas, TND (Diferença Normalizada Transformada), IPV-V (Índice Perpendicular de Vegetação Vertical) e IPV-A (Índice Perpendicular de Vegetação Angular). As variáveis da geometria de visada foram: ângulo de elevação solar, azimuth solar, e o ângulo de visada do sistema sensor. Os resultados obtidos pelo autor mostram que o índice TND sofre menor variação com o ângulo de azimuth solar. O autor também constatou que os índices ND e Razão Simples tendem a minimizar os efeitos da variação do ângulo de elevação solar, para vários ângulos

de visada e para qualquer ângulo de azimute solar.

Concluiu também Wardley (1984) que, para todos os índices de vegetação, o efeito de variação do ângulo de visada no sensor versus vários ângulos de elevação solar, é mínimo para 90° e máximo para 180° . Foi notado também que o TND possui o menor coeficiente de variação em relação ao ângulo de visada do sensor. Finalmente, o autor confirma que os índices baseados em razões entre bandas, tendem a normalizar os efeitos angulares e desta forma apresentam menor dependência em relação ao ângulo de elevação solar, quando comparados aos índices do tipo ortogonais.

Colwell (1974) afirmou que os dados espectrais coletados de uma cobertura, representam na verdade dados relativos a uma mistura complexa composta de plantas, sombras e contribuição espectral do solo ou de rocha exposta.

Elvidge e Lyon (1985) avaliaram a influência da variação espectral do substrato (solo/rocha) nos Índices de Vegetação. Concluíram que os índices do tipo razão entre bandas (ND, TND e Razão Simples) sofrem maior interferência da componente espectral do substrato que os índices do tipo ortogonais. Segundo Huete et al. (1985), nos índices ND e TND, a densidade de biomassa da cobertura vegetal diminui com o aumento do albedo do solo, se considerarmos constante a quantidade de vegetação no terreno. Já o índice TND apresenta valores de densidade de biomassa que aumentam com o albedo do solo. Os autores ressaltam que, a influência da componente espectral do solo tende a diminuir com o desenvolvimento da cobertura.

De maneira geral, podemos enumerar os seguintes fatores que afetam a reflectância da cobertura vegetal:

- a) Reflectância hemisférica da folha
- b) Área foliar
- c) Orientação foliar
- d) Reflectância hemisférica da estrutura da planta
- e) Reflectância efetiva do substrato
- f) Ângulo zenital solar, ângulo de visada do sistema sensor e ângulo azimutal
- g) Morfologia do terreno (azimute, altitude e declividade)

3.3 - ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Uma das abordagens utilizadas em sensoriamento remoto orbital para avaliar qualitativa e quantitativa mente a vegetação, é a redução dos dados espectrais obtidos nas diversas bandas dos sistemas sensores existentes, a um único DN (Digital Number). Este valor é empregado na estimativa de parâmetros relativos a cobertura vegetal, tais como: área foliar, fitomassa, taxa de cobertura do terreno, entre outros. Estes valores de DN, obtidos através de transformações lineares entre duas ou mais bandas espectrais, são denominados de maneira geral como índices de vegetação (IV).

A maioria dos IVs baseiam-se em razões entre bandas, ou entre combinações lineares de duas ou mais bandas. Estas transformações exploram as diferenças espectrais existentes entre os padrões de reflectância da vegetação verde e do solo nú (Figura 3.3).

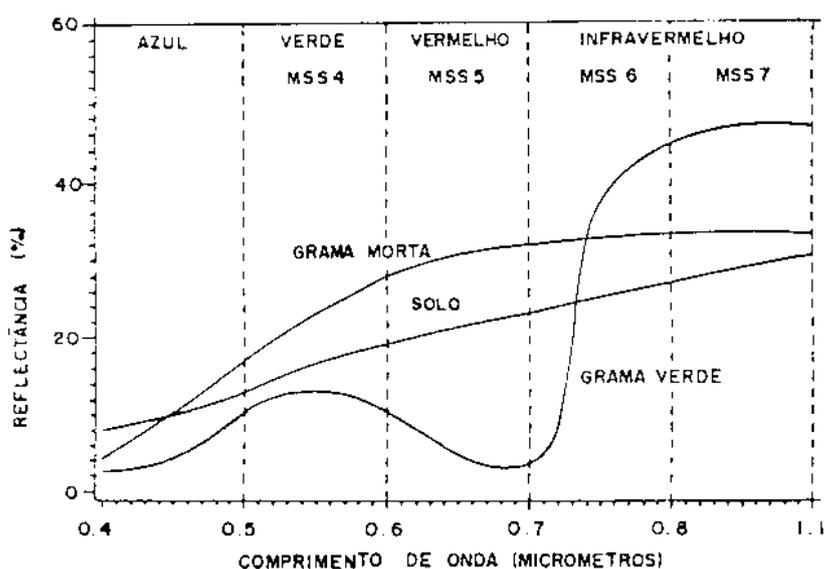


Fig. 3.3 - Padrões de reflectância da grama verde, da grama morta e do solo.

FONTE: Deering et al. (1975), p. 1171.

Huete et al. (1985) subdividiram os diferentes IVs em dois grupos distintos: os índices obtidos a partir de razão entre bandas e aqueles obtidos através de transformações ortogonais.

3.3.1 - RAZÃO ENTRE BANDAS

Os IVs obtidos através de razão entre bandas, utilizam DNs corrigidos em termos da influência atmosférica e não requerem dados de terreno para a sua obtenção (Elvidge e Lyon, 1985). Estes índices são dispostos graficamente em um plano R^2 , cujas coordenadas são os valores digitais de reflectância no infra-vermelho versus os valores digitais de reflectância no vermelho (Infrared x red, ou IR x R). Os valores dos IVs no gráfico apresentam-se como um conjunto de pontos dispostos sobre retas que partem da origem do plano IR x R (Huete et al., 1985). Estas linhas representam a variação da densidade de fitomassa verde na cobertura em relação ao solo nu, a qual aumenta proporcionalmente ao ângulo formado entre as retas e o eixo das abcissas (Figura 3.4).

Os índices de vegetação do tipo razão entre bandas, além de proporcionarem informações sobre determinados parâmetros da cobertura, também minimizam os efeitos da atmosfera e da reflectância do substrato (Tucker, 1979). Os tipos de índices mais utilizados em sensoriamento remoto orbital são:

- a) razão simples entre bandas
- b) diferença normalizada (ND)
- c) diferença normalizada transformada (TND).

Os IVs obtidos pela razão simples entre bandas, baseiam-se na divisão dos DNs de duas bandas espectrais de um determinado sistema sensor. Tucker (1979), Perry e Lautenschlager (1984), Gallo e Daugtry (1987), entre outros, reconhecem que a razão simples entre as bandas do infravermelho e do vermelho, tem alta correlação com variáveis, agrônomicas como índice de área foliar, radiação fotossinteticamente ativa e biomassa seca e úmida da cobertura.

Blad et al. citados em Gardner et al. (1985), avaliaram 15 razões entre bandas do TM-LANDSAT, diferenciando entre si pelos valores das bandas no denominador e numerador. Os resultados mostraram que as razões $TM4/TM3$, $TM4/TM2$, $TM4/TM1$ e $TM4/TM7$, são aquelas que possuem o maior potencial como índice de vegetação. Entretanto, a razão entre a banda 4 e qualquer outra banda do TM, pode, de certo modo, ser considerada razoavelmente útil como IV, ressal

tando-se porém que a razão $TM4/TM3$ é a mais adequada como índice de vegetação.

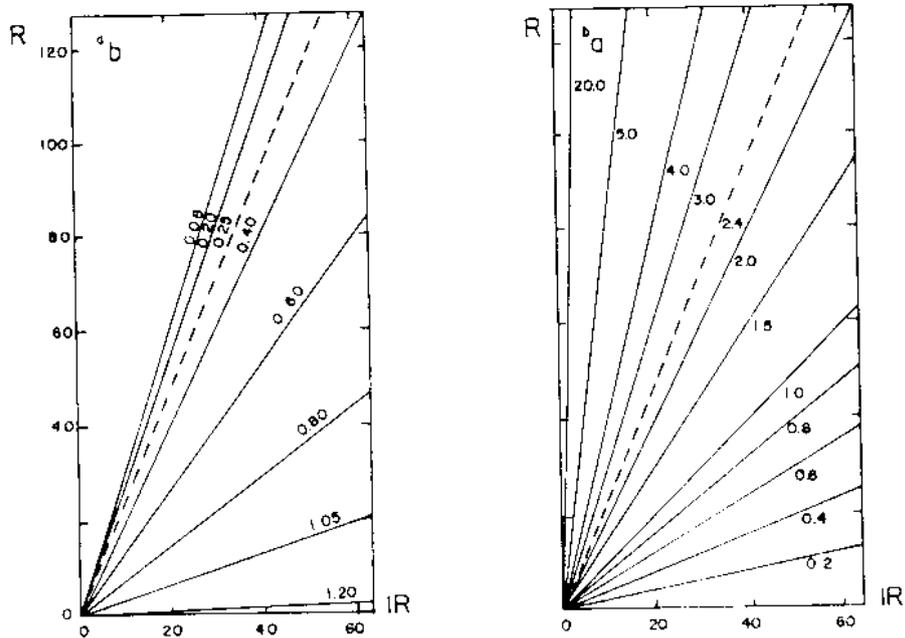


Fig. 3.4 - Diagramas representando o IV do tipo razão simples entre bandas (a) e o IV transformado (TND) (b).

FONTE: Richardson e Wiegand (1977), p. 1547.

Gardner et al. (1985) estudando os parâmetros da cobertura vegetal com maior potencial de identificação nas bandas do TM, constataram que a banda 4 é o numerador mais utilizado nas razões entre bandas empregadas como IV. Segundo estes autores, a banda 4 é a única que responde às múltiplas camadas de folhas da cobertura e os autores interpretam-na como um indicador do índice de área foliar. O outro termo, o denominador, é interpretado como o principal fator relativo à resposta espectral do solo nu.

A Diferença Normalizada (ND), foi inicialmente proposta por Rouse et alii (1973) como medida para o monitoramento da vegetação e foi definida como:

$$ND = (BANDA A - BANDA B) / (BANDA A + BANDA B) \quad (3.1)$$

Gallo e Daughtry (1987), afirmam que a ND pode ser melhor definida como um IV, através da seguinte re

lação genérica:

$$ND = (IR - VISIVEL)/(IR + VISIVEL) \quad (3.2)$$

Deering et al. (1975) propuseram o índice de vegetação transformado ou a diferença normalizada transformada (TND), o qual foi definido como:

$$TND = (ND + 0.5)^{0.5} \quad (3.3)$$

Esta transformação, segundo os autores, evita a ocorrência de resultados negativos na diferença normalizada.

3.3.2 - ÍNDICES DE VEGETAÇÃO ORTOGONAIS

Os índices de vegetação do tipo transformação ortogonal diferem da razão entre bandas devido ao fato de que as linhas de igual teor de vegetação verde não convergem para a origem do plano IR x R, mas permanecem paralelas ao eixo espectral de solo, chamado também de linha de reflectância do solo (Figura 3.5).

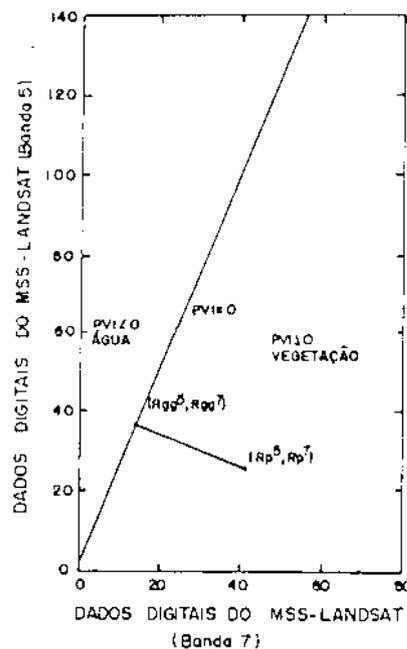


Fig. 3.5 - Diagrama ilustrando o princípio de obtenção do índice perpendicular de vegetação.

FONTE: Richardson e Wiegand (1977), p. 1547.

Segundo Richardson e Wiegand (1977), a obtenção do teor de vegetação no terreno através do uso deste índice, é feita a partir do valor escalar de um vetor ortogonal a linha de solo. Ao contrário dos índices obtidos por razões entre bandas, que são calculados em um plano R^2 , os IVs ortogonais pertencem ao espaço R^n , pois são medidos com base na distância perpendicular entre a linha de reflectância do solo estabelecida pela combinação de duas ou mais bandas e o ponto correspondente ao alvo sobre o qual se quer conhecer o teor de biomassa.

Kauth e Thomas (1976) utilizaram um diagrama bi-dimensional definido pelas bandas 5 e 7 do MSS-LANDSAT, para o estudo da reflectância do solo nua e da cobertura vegetal em diversos estágios de desenvolvimento. Aqueles autores determinaram que a distribuição dos pontos correspondentes à reflectância do solo neste diagrama, aproxima-se de uma reta. Observaram também que a variação da reflectância devida ao desenvolvimento da vegetação, cresce com a distância perpendicular à linha do solo. Desta forma, ainda segundo Kauth e Thomas (1976), quanto mais distante esteja situado um ponto correspondente à cobertura vegetal, maior é o desenvolvimento ou a biomassa foliar.

Richardson e Wiegand (1977) propuseram o índice perpendicular de vegetação (IPV), o qual é baseado na distância perpendicular entre um ponto espectral correspondente a vegetação e a linha de reflectância do solo (Figura 3.5), e é dado pela equação:

$$IPV = ((Rv_5 - Rs_5)^2 + (Rv_7 - Rs_7)^2)^{0.5} \quad (3.4)$$

onde: - Rv é a reflectância de um ponto correspondente a vegetação
 - Rs é a reflectância de um ponto situado na linha de solo, o qual corresponde ao ponto Rv
 - 5 e 7 são as bandas do MSS-LANDSAT

Richardson e Wiegand (1977), também propuseram outro índice de vegetação ortogonal, denominado de índice diferença de vegetação (IDV), o qual é obtido pela equação:

$$IDV = 2.40 \text{ MSS7} - \text{MSS5} \quad (3.5)$$

onde 2.40 se refere ao ângulo da linha de solo definida pe

las bandas 5 e 7. Segundo os autores, este índice é mais simples de calcular que o IPV, porém apresenta a desvantagem da impossibilidade de se determinar as coordenadas dos pontos de reflectância do solo no plano.

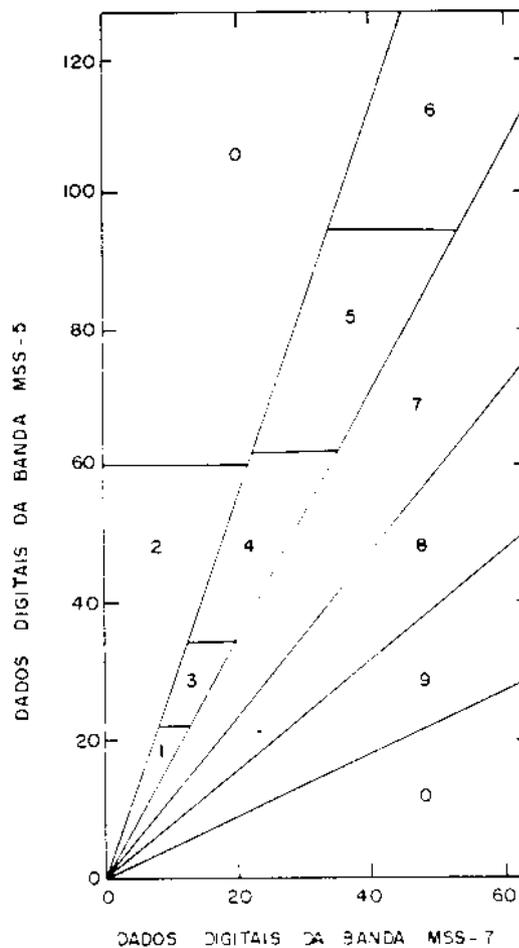


Fig. 3.6 - O Plano de Kauth representando as regiões espectrais definidas pelas bandas MSS-5 e MSS-7.
 FONTE: Kauth e Thomas (1976), p. 49.

Kauth e Thomas (1976) propuseram dois índices de vegetação, baseados na transformação ortogonal de informações do espaço quadridimensional do MSS (bandas 4, 5, 6 e 7). Estes índices foram denominados respectivamente de índice de albedo do solo (SBI) e de índice de vegetação verde (GVI), definidos como:

$$\text{SBI} = 0.43(\text{MSS4}) + 0.63(\text{MSS5}) + 0.58(\text{MSS6}) + 0.26(\text{MSS7}) \quad (3.6)$$

$$\text{GVI} = -0.29(\text{MSS4}) + 0.56(\text{MSS5}) + 0.60(\text{MSS6}) + 0.49(\text{MSS7}) \quad (3.7)$$

Estudos envolvendo a aplicação dos IVs para a avaliação da biomassa verde no terreno, nas situações brasileiras, têm recentemente apresentado importantes resultados.

Pereira (1986), avaliou a correlação existente entre os dados de fitomassa foliar obtidos no campo de forma destrutiva, com dados espectrais obtidos pelo sistema sensor MSS e por radiometria de campo. Para tanto, a autora efetuou a comparação entre IVs obtidos a partir de imagens e a partir de radiometria de campo, com a pesagem da biomassa foliar coletada em campo. Os resultados mostraram que a correlação entre os dados de biomassa foliar obtidos no campo com as respostas espectrais (medidas de radiômetro em campo e reflectância em imagens orbitais), apresentou coeficientes significativos. Os IVs foram melhor correlacionados com o teor de umidade da vegetação do que com os dados de biomassa foliar fresca. Ainda segundo o autor, observou-se um coeficiente de correlação da ordem de 0.96, entre os dados radiométricos de campo e os dados de imagens orbitais MSS-LANDSAT.

Batista et al. (1988) avaliaram os parâmetros agrônômicos de duas variedades de soja (biomassa foliar verde, porcentagem de cobertura do terreno e altura das plantas), a partir da resposta espectral obtida através de radiometria de campo. Os resultados mostraram que o IV do tipo Razão Simples entre as bandas do infravermelho e do vermelho, apresentou uma correlação significativa com todos os parâmetros agrônômicos analisados, explicando 80 % da variação da biomassa verde.

Santos (1988) estudou o potencial do índice de vegetação TND nas formas TND_{4,3} e TND_{5,3} na estimativa da fitomassa do cerrado, utilizando dados do sistema sensor TM-LANDSAT. Os resultados mostraram que o IV do tipo TND_{4,3} apresentou o melhor desempenho na estimativa da fitomassa foliar seca do cerrado, enquanto o TND_{5,3} apresentou-se mais satisfatório na estimativa do teor de água presente na massa foliar da cobertura vegetal.

Epiphânio e Formaggio (1990) realizaram um estudo com o objetivo de determinar as relações entre a resposta espectral das culturas de trigo e de feijão e seus valores correspondentes de índice de área foliar, porcentagem de cobertura do solo e radiação fotossinteticamen

te ativa absorvida. O estudo foi elaborado através da coleta de dados agrônômicos em campo e de dados espectrais em imagem TM-LANDSAT 5, nas bandas 3 e 4.

Estes mesmos autores consideraram como parâmetros espectrais o Índice Perpendicular de Vegetação (IPV) e a Diferença Normalizada (DN). Para o cálculo destes índices foram utilizados dados de imagens digitais orbitais, os quais foram anteriormente corrigidos para efeitos atmosféricos. O IPV foi obtido através da coleta de amostras de valores digitais para os diversos tipos de solos da área de estudo e para as áreas de cultivo de trigo e feijão. Estes dados foram utilizados para a obtenção do IPV através do cálculo da distância perpendicular entre os pontos da linha de solo e os pontos correspondentes à reflectância das culturas. O índice DN foi obtido pela transformação linear entre as bandas TM3 e TM4 e posteriormente coletados os valores digitais correspondentes para a elaboração dos gráficos de correlação entre parâmetros biofísicos e espectrais das culturas em questão.

Entre outros importantes resultados, os autores mostraram que tanto o IPV como a DN apresentam uma alta correlação com a porcentagem de cobertura do solo (Fig. 3.7 e Fig. 3.8). Os pesquisadores ressaltaram que a porcentagem de cobertura do solo é um parâmetro que experimenta saturação quando atinge o valor de 100 %, no caso do uso da Diferença Normalizada. Isto faz com que na região de saturação, as variações na resposta espectral não tenham um correspondente aumento na porcentagem de cobertura do solo. A saturação é mostrada pelo relacionamento curvilíneo entre os parâmetros, revelando fortes sinais de saturação para valores elevados de cobertura do solo.

Epiphany e Formaggio (1990) concluíram que a resposta espectral das culturas, obtidas via imagem orbital TM-LANDSAT, pode ser utilizada com segurança para a estimativa de parâmetros agrônômicos como porcentagem de cobertura do solo, índice de área foliar, e densidade de clorofila.

Pode-se concluir pela avaliação deste estudo que a obtenção do IPV através de imagens orbitais é possível de ser realizada e possibilita a minimização do efeito da reflectância do solo bem como da saturação devido a altos valores de porcentagem de cobertura do solo.

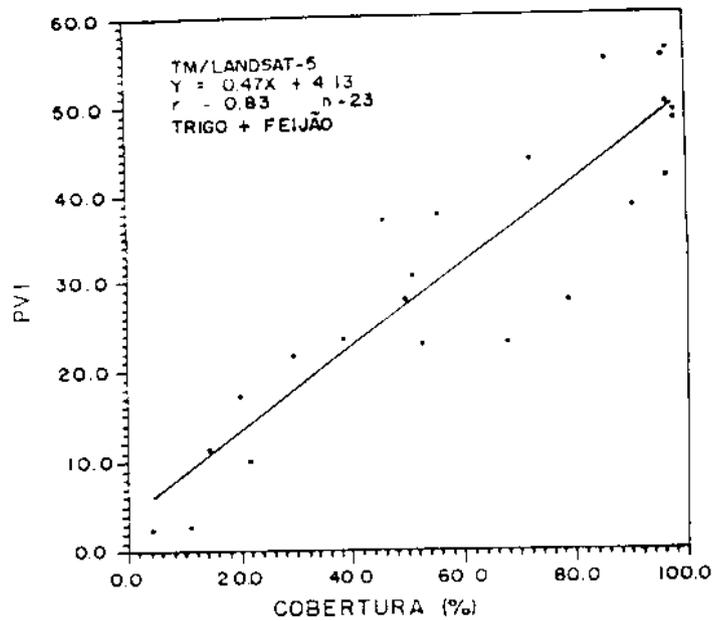


Fig. 3.7 - Relação entre o Índice Perpendicular de Vegetação (IPV) e a porcentagem de cobertura do solo.
 FONTE: Epiphanyo e Formaggio (1990), p. 801.

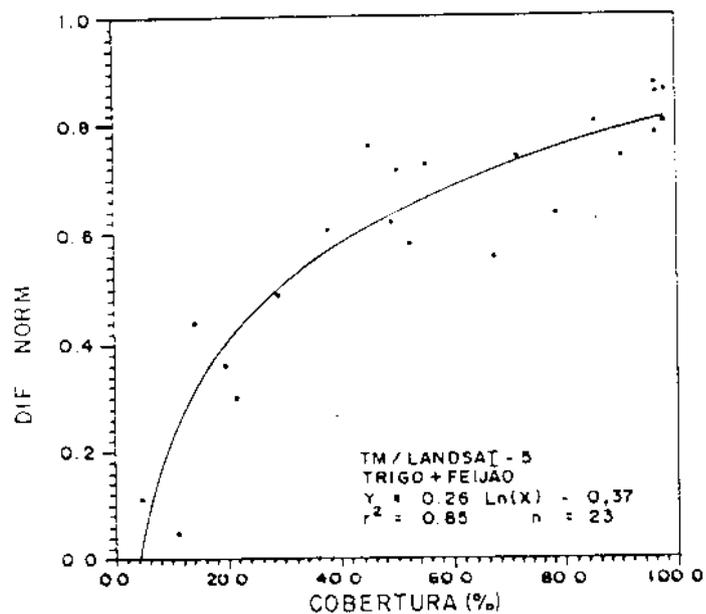


Fig. 3.8 - Relação entre a Diferença Normalizada (DN) e a porcentagem de cobertura do solo.
 FONTE: Epiphanyo e Formaggio (1990), p. 802.

3.4 - A MORFOMETRIA NO ESTUDO DO ESCOAMENTO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

Os parâmetros quantitativos (lineares e areais) das bacias hidrográficas tem sido amplamente utilizados como auxiliares na pesquisa geomorfológica e pedológica. No Brasil, estes tipos de estudos tiveram início em 1952, com um trabalho de Freitas, onde analisa a relação entre a textura da drenagem e a compartimentação geomorfológica.

Posteriormente, trabalhos similares foram apresentados por Tolentino et al. (1968), que estudaram a morfometria das bacias hidrográficas próximas a São Carlos e França (1968), que estudou as relações existentes entre os padrões de solos na região de Piracicaba e diversos parâmetros morfométricos.

A partir de 1970, Christofolletti tem publicado continuamente inúmeros trabalhos sobre a relação entre a morfometria das bacias hidrográficas e a geomorfologia. Christofolletti (1970) observou a existência de uma relação direta entre alguns parâmetros morfométricos e a compartimentação lito-estrutural do Planalto de Poços de Caldas. Christofolletti e Arana (1976) estudaram bacias hidrográficas desenvolvidas no Grupo Bauru e observaram uma coerência entre a permeabilidade do solo e a lei do número de canais de drenagem. Outros trabalhos de igual importância podem ser observados em Christofolletti (1971) e Christofolletti e Machado (1977).

Valério Filho (1984) utilizou parâmetros quantitativos da rede de drenagem e do relevo para a caracterização de solos, a partir do uso de fotografias aéreas, cartas topográficas e imagens Landsat. O autor concluiu que a densidade de drenagem, a declividade média e o comprimento médio das vertentes foram os índices mais representativos na diferenciação dos solos.

Uma leitura nos estudos realizados por Schumm (1977), nos faz concluir que uma outra importante aplicação da geomorfologia à hidrologia é a possibilidade de se efetuar a previsão de picos de vazão e do comportamento geral da curva de escoamento, a partir de alguns parâmetros quantitativos que descrevem a morfologia das bacias hidrográficas. Entretanto, no Brasil, a bibliografia

a respeito de experimentos utilizando conjuntamente a morfometria e a hidrologia é escassa e pouco representativa.

A utilização de informações geomorfológicas como base para a avaliação hidrológica de sistemas de drenagem, é feita a partir de expressões quantitativas das características geomórficas da bacia. Estas expressões, também conhecidas como parâmetros morfométricos ou hidromorfológicos, relacionam as variáveis geomorfológicas a variáveis hidrológicas (Schumm, 1977).

Segundo Patton e Baker (1976), os estudos nesta linha de abordagem hidrológica se fundamentam na análise das relações entre a precipitação, a morfometria e o escoamento da bacia.

A aplicação de parâmetros quantitativos relativos a morfologia das bacias hidrográficas e a estudos hidrológicos não é recente. Horton (1932) e Langbein (1947) foram os primeiros a estudar as relações entre as propriedades morfométricas e as características da curva de deflúvio de uma bacia.

Os parâmetros morfométricos mais frequentemente utilizados para estudos hidrológicos de bacias hidrográficas são: área da bacia, densidade de drenagem, frequência de canais de 1ª ordem, relação de relevo, índice de circularidade e índice de rugosidade topográfica.

3.4.1 - ÁREA DE CAPTAÇÃO

O parâmetro morfométrico mais frequentemente empregado na estimativa do deflúvio de uma bacia hidrográfica é a área de captação. Diversos estudos importantes como Benson (1962), por exemplo, mostraram o papel da área de captação no condicionamento do nível máximo absoluto de cheias em diferentes tipos de climas.

Chorley (1973), afirmou que a área de uma bacia é hidrológicamente importante devido aos seus efeitos na amplitude da curva de deflúvio. Patton e Baker (1976), mostraram a existência de uma correlação significativa ($r^2 = 0.86$) entre a área da bacia e a vazão máxima de um canal fluvial.

Gregory e Walling (1973) afirmaram que a

cheia de uma bacia decresce em intensidade, a medida em que aumenta a sua área de captação. Segundo estes autores, devido a ocorrência localizada de maior intensidade de precipitação por unidade de área de uma bacia pequena, o seu escoamento fluvial médio anual tende a aumentar com a diminuição da área de captação (Figura 3.9). Isto se deve ao fato de que quanto menor a área da bacia, maior será a Relação de Relevo (Rh), o que determina um maior declive da bacia e um conseqüente maior escoamento da precipitação por unidade de área (óbviamente se comparadas bacias com idênticas condições de solos e taxa de cobertura vegetal).

Por outro lado, as bacias maiores possuem maior capacidade de retenção do escoamento em lagos ou canais, perdas maiores por evapotranspiração, o que facilita um retardamento e diminuição da amplitude da curva de flúvio.

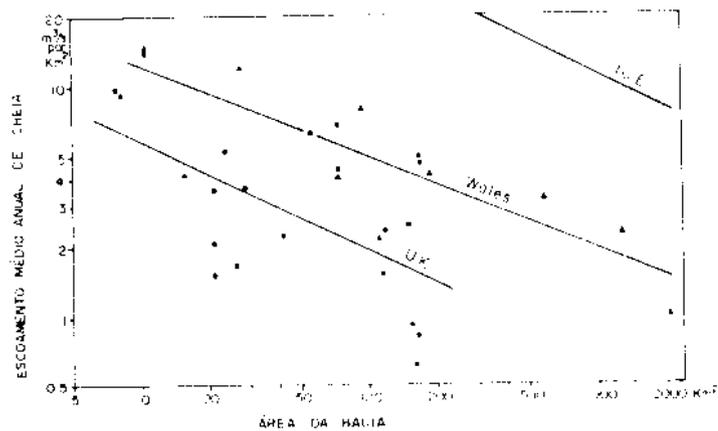


Fig. 3.9 - Relação entre a área da bacia e a intensidade média anual das cheias.

FONTE: Gregory e Walling (1973), p. 226.

3.4.2 - DENSIDADE DE DRENAGEM

Um outro parâmetro morfométrico de importância relevante em hidrologia é a densidade de drenagem da bacia (Dd), definida por Horton (1932) como a razão entre o comprimento total dos canais de drenagem (L) e a área da bacia (A):

$$Dd = L/A \quad (3.8)$$

Segundo Patton e Baker (1976), a densidade de drenagem é uma medida de eficiência do sistema de drenagem em remover o excesso da precipitação que se transforma em escoamento superficial da bacia. As bacias com alto valor de Dd possuem um tempo rápido de concentração das cheias.

Schumm (1977) afirmou que a densidade de drenagem pode informar sobre o tempo decorrido entre a precipitação máxima da bacia e a vazão máxima no canal fluvial principal. O mesmo autor mostrou que o escoamento médio anual de uma bacia aumenta com a densidade de drenagem (Figura 3.10).

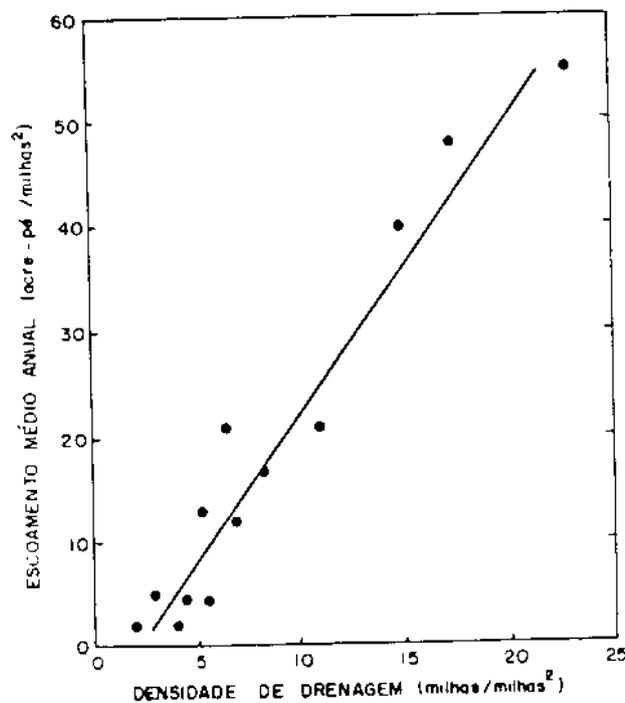


Fig. 3.10 - Relação entre o escoamento médio anual e a densidade de drenagem em 13 pequenas bacias no Wyoming (EUA).

FONTE: Schumm (1977), p. 142.

3.4.3 - RELAÇÃO DE RELEVO

Vários trabalhos como Sherman (1932) e Strahler (1958), têm relatado que a Relação de Relevo (Rh) é um parâmetro fundamental para a caracterização hidromorfológica de uma bacia. Schumm (1956) o definiu como razão entre a amplitude altimétrica (H) e o comprimento máximo da bacia medido ao longo do canal principal (Lb):

$$Rh = H/Lb \quad (3.9)$$

Segundo Patton e Baker (1976), quanto maior o valor de Rh , maior tendem ser as declividades das vertentes, maior o gradiente dos canais fluviais, o que determina um aumento na concentração do escoamento fluvial e um aumento no pico das cheias do canal fluvial da bacia.

Gregory e Walling (1973) mostraram que Rh interfere também na morfologia da curva de deflúvio de uma bacia, que pode ser constatado na Figura 3.11.

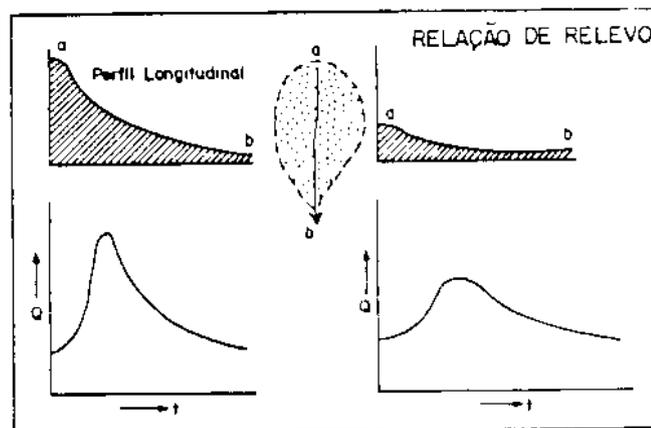


Fig. 3.11 - Características da curva de deflúvio e a Relação de Relevô de diferentes bacias hidrográficas.

FONTE: Gregory e Walling (1973), p. 269.

3.4.4 - ÍNDICE TEXTURA-DECLIVE

A partir das constatações das relações entre a densidade de drenagem, a relação de relevô e o comportamento do escoamento superficial de uma bacia, Schumm (1977) propôs o produto textura-declive (Td). Este índice procura integrar os parâmetros fundamentais da morfologia da bacia, que exercem um papel decisivo no escoamento. O produto Textura-Declive (Td) foi definido como:

$$Td = Dd \cdot Rh \quad (3.10)$$

onde Dd é a densidade de drenagem e Rh é a relação de relevô. O produto Td integra os efeitos gravitacionais com a eficiência do sistema de drenagem da bacia. Schumm (1977) mostrou que o produto Td é diretamente proporcional ao es

coamento médio anual da bacia (Figura 3.12).

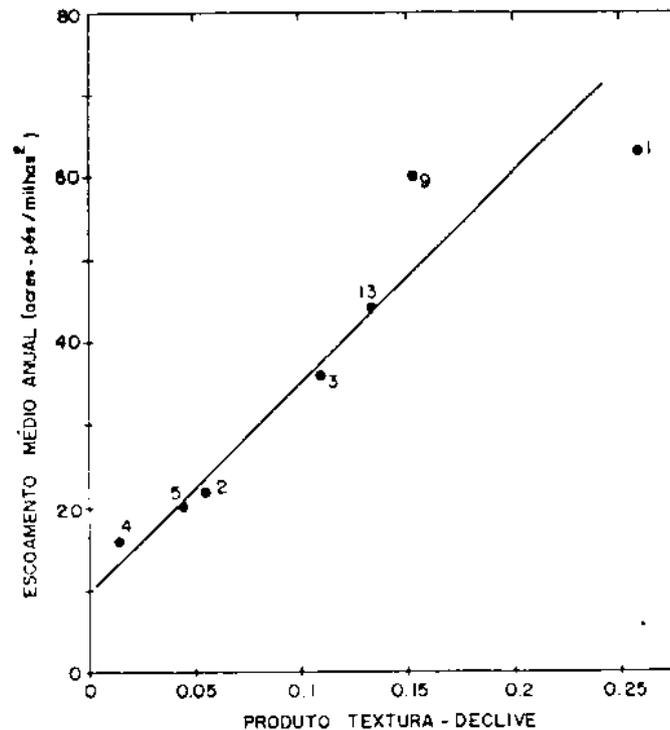


Fig. 3.12 - Relação entre o produto Textura-Declive e o escoamento médio anual de pequenas bacias hidrográficas.

FONTE: Schumm (1977), p. 140.

Segundo Patton e Baker (1976), as áreas com um potencial de ocorrência de cheias rápidas possuem um índice de rugosidade elevada, pois adiciona a malha de drenagem ao comprimento do fluxo superficial através das vertentes e a altos valores de gradientes dos canais de drenagem.

3.4.5 - ÍNDICE DE FORMA E ÍNDICE DE CIRCULARIDADE

A forma da bacia hidrográfica é um fator de grande importância hidromorfológica devido às suas relações com a forma do hidrograma unitário (Gregory e Walling, 1973). Este parâmetro interfere na altura do pico de vazão, no tempo necessário para se atingir este pico e no tempo de duração da cheia (Figura 3.13).

Para a avaliação quantitativa da forma de uma bacia, foram propostos dois índices que possibilitam uma análise precisa deste parâmetro hidromorfológico: o í

dice de Forma (F) e o Índice de Circularidade (C).

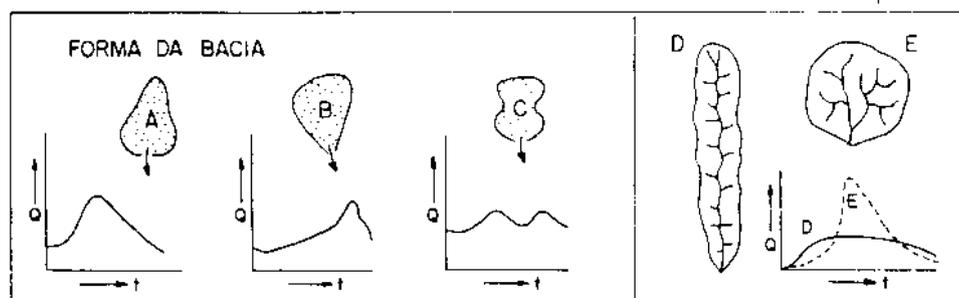


Fig. 3.13 - Relações entre a forma das bacias hidrográficas e as características da curva de deflúvio.
 FONTE: Gregory e Walling (1973), p. 269.

O Índice de Forma (F), foi proposto inicialmente por Horton (1932), que o definiu como sendo a razão entre a área da bacia (A) e o quadrado do comprimento máximo da bacia (L^2):

$$F = A / L^2 \quad (3.11)$$

Quanto maiores os valores de F, mais circulares tendem ser as bacias e quanto menores os valores de F, mais alongadas serão as mesmas.

Outro índice também criado para eliminar a subjetividade na caracterização da forma das bacias hidrográficas, é o Índice de Circularidade (C). Este índice foi proposto por Miller (1953) e definido como a relação existente entre a área da bacia (A) e a área de um círculo de mesmo perímetro (A_c), ou seja:

$$C = A/A_c \quad (3.12)$$

O valor máximo obtido para C em uma bacia é 1.0 e quanto maior o seu valor, mais próxima da forma circular será a bacia analisada.

3.4.6 - FATOR TOPOGRÁFICO

Os diferentes estudos mencionados até o presente momento, no que se refere ao papel da morfometria no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, têm seu valor pela análise exhaustiva da relação entre um parâmetro morfométrico e a curva de deflúvio da bacia. Perce-

be-se nos trabalhos apresentados, que mais de um parâmetro pode explicar as características do escoamento de uma bacia, como é o caso da densidade de drenagem, relação de relevo, circularidade, entre outros. Neste sentido, é importante a definição de parâmetros que além de apresentarem a menor margem de erro na estimativa do pico de vazão de cheia de uma bacia, também independam da área da bacia.

Morisawa (1962) realizou um estudo com o objetivo de verificar quais os fatores geomórficos da bacia que controlam a relação precipitação/vazão. O estudo foi baseado na verificação da correlação existente entre fatores hidrológicos e parâmetros morfométricos. No tocante aos fatores hidrológicos, o autor selecionou o pico de vazão de cheia, o escoamento médio anual e a vazão média anual das bacias analisadas. Neste estudo foram considerados os seguintes índices e parâmetros morfométricos: área da bacia, índice de circularidade, a relação de relevo, densidade de drenagem, frequência de canais, frequência de canais de primeira ordem, taxa de bifurcação e gradiente do canal principal.

Os resultados da análise de regressão múltipla encontrados por Morisawa (1962), mostraram que o escoamento de uma bacia está diretamente relacionado ao comprimento total dos canais de drenagem, à área de captação, e à frequência de canais de primeira ordem, e inversamente relacionado ao gradiente do canal principal, à circularidade e à relação de relevo. Desta forma a relação precipitação x vazão em uma bacia (Q) pode ser expressa em função da morfometria pela seguinte equação:

$$Q = F (A, L, 1/FI, 1/S, 1/C, 1/Rh) \quad (3.13)$$

onde:

- A é a área da bacia
- L é o comprimento total dos canais de drenagem
- FI é a frequência de canais de primeira ordem
- S é o gradiente do canal principal
- C é o índice de circularidade
- Rh é a relação de relevo

No sentido de sintetizar e diminuir a margem de erro quando da utilização da equação 3.13, a autora propôs o uso de um fator FTP (Fator Topográfico da bacia), definido em função da circularidade, da relação de relevo, e

da frequência de canais de primeira ordem, que pode ser expresso da seguinte maneira:

$$FTP = FI \cdot C \cdot Rh \quad (3.14)$$

Esta relação integra a forma, a declividade e a composição da rede de drenagem de uma bacia. O uso do fator FTP, segundo Morisawa (1962), reduz consideravelmente a margem de erro na estimativa do pico de vazão e do escoamento médio anual da bacia.

3.5 - CLASSIFICAÇÃO HIDROLÓGICA DOS SOLOS

Um dos conceitos mais importantes para a caracterização hidrológica do solo é a capacidade de infiltração ou infiltrabilidade. Hillel (1980) a definiu como o volume de água que se distribui ao longo do perfil, por unidade de área da superfície do solo. A capacidade de infiltração do solo depende da umidade inicial, textura, estrutura e uniformidade do perfil do solo e é comandada pela intensidade de precipitação, condutividade hidráulica, condições da superfície e presença de camadas impermeáveis ao longo do perfil do solo.

Hillel (1980) ressalta que a condutividade hidráulica do solo é o fator mais importante para a caracterização da capacidade de infiltração, a qual depende de granulometria do solo. Quanto mais alta a condutividade hidráulica do solo, mais alta tende a ser a sua capacidade de infiltração.

Os estudos sobre a capacidade de infiltração do solo podem ser considerados como pertencentes a dois grupos: aqueles preocupados em desenvolver modelos de infiltração considerando o solo composto de um perfil homogêneo e aqueles que consideram o solo composto de um perfil heterogêneo (perfil real). Os estudos situados no primeiro grupo, segundo Hillel (1980), estão voltados ao desenvolvimento de equações de infiltração aplicáveis somente a perfis uniformes. Neste aspecto, o solo é entendido como possuindo um perfil de um horizonte contínuo e de granulometria constante ao longo do eixo vertical à superfície do solo. Neste caso, a condutividade hidráulica saturada é considerada constante, o que facilita a adoção de modelos matemáticos de infiltração.

No entanto, solos com perfis uniformes dificilmente são encontrados na natureza. Dada a complexidade que caracteriza os solos na natureza, torna-se de certa forma difícil adotar uma abordagem quantitativa para estudar as suas condições reais de infiltração. Segundo Hillel (1980), o caminho mais conveniente para o estudo da infiltração em solos com perfis heterogêneos ou reais é a adoção de uma abordagem qualitativa, através do levantamento das características que controlam o processo de infiltração em perfis com horizontes diferenciados.

Hillel e Talpaz (1977), desenvolveram um modelo de dinâmica hidrológica de solos com perfil heterogêneo. Este modelo está baseado inicialmente na escolha de três tipos hipotéticos de solos fundamentados em seus atributos texturais, ou seja, o arenoso, o argiloso e o silteoso. Cada tipo de solo tem sua curva característica de umidade. A partir destas curvas, são obtidas as funções de condutividade hidráulica de cada um dos tipos hipotéticos de solo.

Uma das principais características deste modelo é a possibilidade de classificar as unidades pedológicas com base na eficiência de retenção hídrica. A eficiência de retenção hídrica é definida por Hillel e Talpaz (1977) como a porcentagem do total de precipitação que é retida no perfil do solo durante um determinado período de simulação. Este conceito avalia a quantidade de água que se movimenta ao longo do perfil, pois o conceito de retenção pressupõe a existência de fatores que interfiram na infiltração e na drenagem interna (vertical e lateral) do solo.

Estes mesmos autores afirmam que os valores mais altos encontrados para a eficiência de retenção hídrica foram os solos com perfis do tipo horizonte superficial de textura arenosa sobre horizonte subsuperficial de textura argilosa. Nota-se neste caso que o arranjo dos horizontes pedológicos favorece tanto a infiltração superficial quanto a drenagem lateral sobre o horizonte argiloso (comum em solos podzolizados), onde ocorre o fluxo subsuperficial intenso em função da anisotropia (Zaslavsky e Ruggowski, 1969). Por outro lado, os autores mostraram que os menores valores de eficiência de retenção hídrica são observados em solos com perfis do tipo horizonte superficial argiloso sobre horizonte subsuperficial arenoso. Nes

te caso, a baixa condutividade hídrica do horizonte superficial favorece uma maior perda de água pela evaporação.

Diversos outros autores têm mostrado que a textura dos horizontes pedológicos é um fator decisivo no comportamento hidrológico do solo, como pode ser visto em Gupta e Larson (1979) e Cosby et alii (1984) entre outros.

Cosby et al. (1984) realizaram um detalhado estudo estatístico visando identificar quais propriedades hidráulicas podem ser descritas a partir das propriedades físicas do solo. Os resultados mostraram que a condutividade hidráulica pode ser conhecida através da textura do solo. Devido a significância estatística do estudo, os valores de condutividade hidráulica de cada horizonte pedológico podem ser obtidos a partir de sua respectiva classe textural.

Além da textura, outros fatores têm sido considerados para a avaliação hidrológica dos solos. Jarboe e Haan (1974) utilizaram também a profundidade do perfil de alteração para a caracterização hidrológica do solo. Dugan (1984), discutindo as propriedades que afetam a resposta hídrica dos solos, relata ainda os seguintes fatores a serem considerados: profundidade sazonal do lençol freático e declividade do terreno.

Jorge e Prado (1988) estudaram em condições de campo, as propriedades hídricas de três solos Podzólicos Vermelho-Amarelo (PV-1, PV-2 e PV-3) e de uma Terra Roxa Estruturada (TE). Os resultados mostraram que em relação a taxa de infiltração, não houve diferença básica entre o PV-1 e PV-2. No entanto, os autores verificaram uma significativa diferença entre a taxa de infiltração do PV-3 e da TE, sendo constatados valores superiores para a Terra Roxa Estruturada (Figura 3.14).

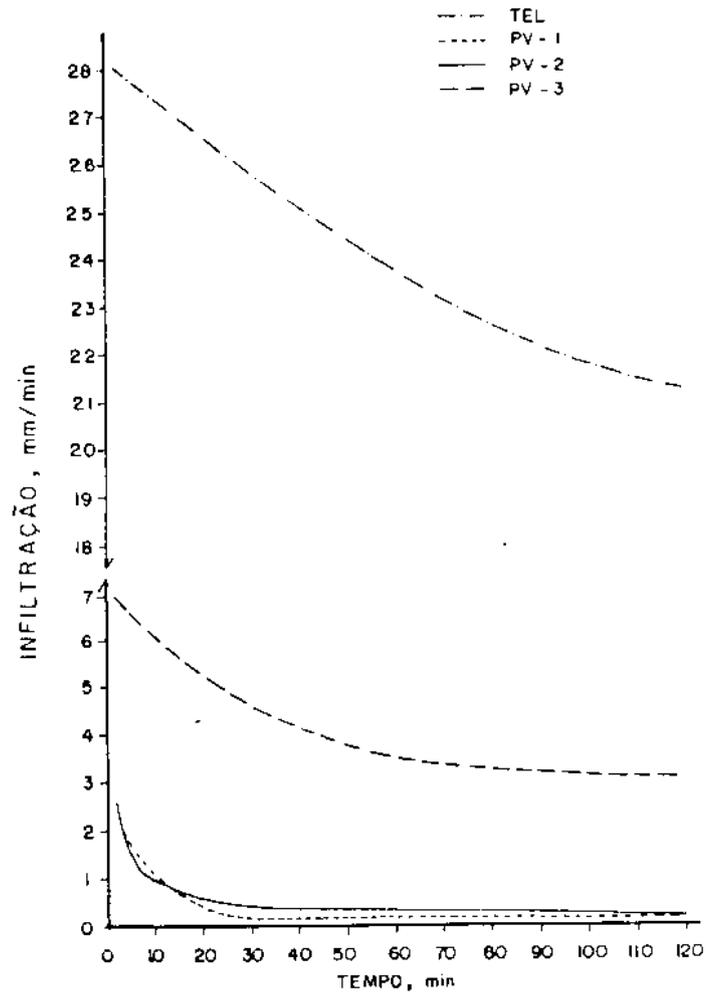


Figura 3.14 - Taxa de infiltração nos solos PV-1, PV-2, PV-3 e TE.
 FONTE: Jorge e Prado (1988), p. 8.

Seguem abaixo as características das unidades pedológicas apresentadas na Figura 3.14:

- PV-1 - Podzólico Vermelho-Amarelo, abrupto, distrófico, textura argilosa, A moderado.
- PV-2 - Podzólico Vermelho-Amarelo, abrupto, álico, A moderado, textura média-argilosa.
- PV-3 - Podzólico Vermelho-Amarelo, abrupto, eutrófico, A moderado espesso, textura areno-argilosa.
- TE - Terra Roxa Estruturada eutrófica, textura argilosa ou muito argilosa, A moderado.

Jorge et al. (1988) avaliaram alguns parâmetros hídricos de quatro unidades pedológicas do Estado de São Paulo. As unidades estudadas foram as seguintes: Areia Quartzosa Profunda (AQ), Latossolo Vermelho-Escuro textura argilosa (LE-2), Unidade Limeira, Latossolo Vermelho-Amarelo álico textura argilosa, Unidade Mato Dentro (LVa) e Latossolo Vermelho, distrófico (LVd), textura média, Unidade Campininha, constatando que as unidades estudadas apresentam um comportamento hídrico distinto. Quanto à taxa de infiltração, os autores constataram que a unidade Limeira apresentou a mais baixa taxa de infiltração (2.7 mm/min). Por outro lado, a unidade Mato Dentro foi a de taxa mais rápida, ou seja, 13.0 mm/min.

3.6 - MÉTODOS APLICADOS À REGIONALIZAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Jarboe e Haan (1974) utilizaram elementos fisiográficos como solos, geologia e topografia para prever o comportamento da curva de vazão em bacias hidrográficas não instrumentalizadas. Para tanto os autores relacionaram quatro parâmetros hidrológicos aos elementos fisiográficos de um modelo desenvolvido por Haan (1972), através de equações de regressão múltipla. Os parâmetros do modelo utilizados foram: taxa de infiltração máxima, capacidade diária de retenção de umidade, taxa diária de perda por recarga de lençol e fração da recarga de lençol que foi transformada em escoamento fluvial. Os elementos fisiográficos considerados foram: precipitação, dados geomórficos, dados de solos e dados geológicos.

No tocante aos dados geomórficos, Jarboe e Haan (1974) levaram em consideração a área da bacia, a relação de relevo, o comprimento do canal principal, o gradiente do canal principal e a área de lagos e pântanos. Os dados de solos considerados pelos autores como hidrológicamente importantes foram: capacidade média de água disponível, permeabilidade média, permeabilidade média do horizonte A, profundidade média do solo. Estes dados foram obtidos a partir de equações de regressão envolvendo as características físicas dos solos.

Os dados geológicos utilizados para as bacias foram a permeabilidade do substrato rochoso e o volume de rocha drenado por um canal fluvial. Desta forma, os autores construíram equações de regressão múltipla, onde os

parâmetros hidrológicos foram considerados como variáveis dependentes e os elementos fisiográficos foram considerados como variáveis independentes. Posteriormente, as equações foram utilizadas para a definição de regiões hidrológicamente homogêneas, com base nos parâmetros hidrológicos obtidos a partir dos elementos fisiográficos.

Magette et al. (1976) apresentaram um método para estimar os melhores parâmetros do modelo hidrológico KWM (Kentucky Watershed Model), possíveis de serem obtidos a partir das características fisiográficas da bacia. Os autores propuseram várias equações de regressão linear, relacionando os parâmetros do modelo KWM às características fisiográficas da bacia. Foram selecionados os seguintes parâmetros do modelo: índice de retenção hídrica, índice de variação sazonal de retenção, índice de perda de umidade do solo pela evapotranspiração e índice de variação sazonal da taxa de infiltração do solo.

Quanto às variáveis fisiográficas das bacias, Magette et al. (1976) selecionaram, entre outras: a área da bacia, o coeficiente de compactidade, a densidade de drenagem, o fator forma, a declividade do canal principal, a relação de relevo, a porcentagem de área coberta por vegetação e a profundidade do substrato rochoso. A partir das equações de regressão múltipla obtidas, os autores aplicaram-nas em bacias não instrumentalizadas, onde foi possível uma razoável estimativa dos parâmetros do modelo KWM, a partir das características fisiográficas das mesmas.

Wandle Jr. (1983), desenvolveu um modelo do tipo precipitação-deflúvio para a estimativa de picos de vazão de cheia em pequenas bacias situadas em áreas rurais. O modelo é baseado na relação existente entre as variáveis fisiográficas e o comportamento da curva de vazão da bacia. Os autores utilizaram a área de drenagem, declividade do canal principal, altitude média da bacia e porcentagem em área de lagos pantanos e planícies fluviais, para a estimativa do pico de vazão de cheia. A estimativa foi efetuada através de técnicas de análise de regressão múltipla, envolvendo dados de vazão fluvial e os elementos fisiográficos.

Laut et al. (1985), desenvolveram um procedimento para determinar as relações existentes entre as características fisiográficas e aspectos do comportamento hi

droológico de bacias situadas na Austrália. Para tanto os autores utilizaram uma abordagem fundamentada em ordenação e classificação numérica, no sentido de obter índices fisiográficos, índices de precipitação e de vazão fluvial das bacias. Posteriormente os autores desenvolveram equações inter-relacionando estes índices, com o objetivo de estimar parâmetros de vazão fluvial em bacias sem dados hidrológicos disponíveis.

Acreman e Sinclair (1986), desenvolveram uma metodologia para classificação de bacias hidrográficas, baseada na similaridade entre as propriedades físicas das mesmas. O objetivo deste estudo foi o de proporcionar medidas para a estimativa da vazão média anual de bacias onde os dados hidrológicos inexistem. A classificação foi efetuada, segundo os autores, a partir do agrupamento de bacias segundo a similaridade dos seguintes parâmetros: área, comprimento e declividade do canal principal, precipitação média anual, déficit de umidade do solo, tipo de solo, e retenção do escoamento em lagos ou pântanos.

A análise de agrupamento efetuada de acordo com estas propriedades, resultou em grupos homogêneos de bacias, os quais foram utilizados pelos autores para a definição de regiões hidrológicamente homogêneas. Finalmente os autores obtiveram para cada uma destas regiões, uma curva característica da frequência de cheias, a qual relaciona a vazão média anual à vazão máxima no ano. Segundo os autores, existem regiões hidrológicamente homogêneas nas quais as séries de vazão máxima anual para todas as estações são identicamente distribuídas, quando divididas pelas suas respectivas médias.

Wiltshire (1986) propôs um procedimento para a identificação de regiões hidrológicamente homogêneas, voltado para a análise de frequência de cheias em bacias desprovidas de informações sobre a vazão fluvial. O autor sugere um esquema de levantamento integrado das propriedades físicas das bacias, o qual otimiza o procedimento estatístico para descrever a eficiência dos agrupamentos.

A identificação das regiões homogêneas, segundo o método de Wiltshire (1986), foi elaborada a partir da similaridade existente entre as seguintes variáveis que controlam a frequência das cheias em bacias hidrográficas: área, precipitação média anual, duração efetiva da precipi

tação diária com um período de recorrência de cinco anos, déficit médio de umidade do solo, potencial de retenção da precipitação, frequência de canais de drenagem, declividade do canal principal, proporção de bacia que é drenada para um lago e proporção da bacia ocupada por áreas urbanas. O autor afirma que a utilização deste procedimento, resulta em uma definição de regiões hidrológicamente homogêneas, estatisticamente confiável no que se refere às características das curvas de frequência de cheias dos agrupamentos definidos.

Cook et al. (1988), realizaram um estudo voltado para o desenvolvimento de um modelo hidrológico estatístico, de nível regional, baseado na estimativa de índices de vazão fluvial a partir de dados fisiográficos e de pluviosidade. Os dados utilizados neste trabalho foram coletados em mapas temáticos e topográficos e em postos pluviométricos existentes ao longo das bacias. Um dos principais objetivos dos autores foi a proposição de uma metodologia para a extrapolação de índices de vazão fluvial obtidos em bacias instrumentalizadas, para outras onde os dados hidrométricos são inexistentes. Este procedimento foi efetuado de acordo com a similaridade existente entre as diferentes bacias, baseada nos elementos fisiográficos e na precipitação média.

Os atributos fisiográficos considerados para cada bacia dizem respeito à topografia (declividade, altitude e exposição), à hidrologia (existência de lagos, rede de drenagem, planícies de inundação), à geologia e à cobertura vegetal (tipo e densidade de cobertura do terreno). O atributo precipitação foi considerado segundo a frequência e a extensão dos dados das estações existentes. Pelos resultados obtidos, os autores verificaram que é perfeitamente viável a transposição de dados hidrológicos de bacias instrumentalizadas para outras não instrumentalizadas, com base em dados fisiográficos e pluviométricos.

CAPÍTULO 4

MATERIAL E MÉTODOS

4.1 - MATERIAL

O material utilizado para o desenvolvimento deste trabalho pode ser dividido, quanto a sua natureza, em material cartográfico, material fotográfico, material de fotointerpretação, imagens orbitais, bem como material de apoio computacional e de ampliação.

4.1.1 - MATERIAL CARTOGRÁFICO

O conjunto cartográfico utilizado constituiu-se em cartas topográficas nas escalas 1:50.000 e 1:1.000.000, e uma carta temática relativa aos solos da área de estudo, na escala 1:100.000 (Tabela 4.1).

As cartas topográficas foram fundamentais para a definição de uma base cartográfica adequada ao posicionamento de coleta dos dados e à representação gráfica das informações temáticas. A coleta dos dados morfométricos, hidrográficos e orbitais foi orientada segundo um referencial cartográfico na projeção U.T.M. (Universal Transversa de Mercator), na escala 1:50.000. Esta base foi utilizada tanto para a geocodificação da imagem TM-LANDSAT, como para a representação temática da imagem classificada (Cap. 5, seq. 5.5.1).

Por outro lado, a mesma base cartográfica serviu para a retificação e representação da rede de drenagem fotointerpretada, mapeamento dos limites das sub-bacias hidrográficas e aquisição de dados morfométricos (Cap. 5, seq. 5.3).

A carta ao milionésimo foi utilizada para o posicionamento e representação da área de estudo em um contexto regional, definindo assim a sua situação em relação a um conjunto geográfico maior.

Por fim, a carta temática de solos se constituiu na base de dados pedológicos de semi-detalle das sub-bacias estudadas.

TABELA 4.1 - MATERIAL CARTOGRÁFICO UTILIZADO NO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

TIPO DE INFORMAÇÃO	ESCALA	DATA	NOME DA FOLHA	REFERÊNCIA	AUTOR
TOPOGRÁFICA	1:50.000	1971	São Carlos-SP	SF-23-Y-A-1-1	IBGE
		1971	Corumbataí-SP	SF-23-Y-A-1-2	IBGE
PEDOLÓGICA	1:1.000.000	1969	Rio de Janeiro-RJ	SF-23	IBGE
	1:100.000	1984	São Carlos-SP	SF-23-Y-A-1	IAC/EMBRAPA Oliveira e Prado (1984)

4.1.2 - MATERIAL FOTOGRÁFICO

Este material é composto de fotografias aéreas pancromáticas na escala 1:35.000, resultante do aerolevantamento efetuado pela TERRAFOTO S/A em 1978. As suas especificações encontram-se na Tabela 4.2.

TABELA 4.2 - MATERIAL FOTOGRÁFICO UTILIZADO NO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

FAIXA Nº	Nº DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS
02	2088 a 2094
03	2142 a 2149
04	2197 a 2203
05	2255 a 2260
06	2314 a 2317

Apesar da relativa defasagem temporal deste material, não houve inconvenientes quanto à confiabilidade dos dados interpretados das fotografias aéreas, isto porque, utilizou-se como dado apenas a rede de drenagem das sub-bacias hidrográficas. Devido aos objetivos do trabalho e da escala das fotografias aéreas, não foram estudadas as modificações morfológicas e a expansão dos canais de drenagem no período 1978-1990.

4.1.3 - MATERIAL DE FOTOINTERPRETAÇÃO

Para a coleta e a interpretação dos dados contidos nas fotografias aéreas, foi utilizado um estereoscópio de espelhos da marca ZEISS, pertencente ao Laboratório de Aerofotogrametria e Fotointerpretação do Departamento de Cartografia e Análise da Informação Geográfica, da UNESP - Rio Claro - SP.

4.1.4 - IMAGENS ORBITAIS

As imagens orbitais utilizadas neste trabalho foram obtidas pelo sistema sensor Thematic Mapper (TM) do satélite LANDSAT-5, correspondendo à órbita 220, ponto

75. O imageamento foi realizado em 01 de julho de 1988. As imagens foram adquiridas nas sete bandas disponíveis, no formato CCT.

Por outro lado, também foram utilizadas imagens em papel, nas bandas 3 e 4, bem como em composição colorida 234, relativas às mesmas datas de obtenção das imagens no formato CCT.

4.1.5 - MATERIAL DE APOIO COMPUTACIONAL

Para a análise, processamento e classificação dos dados orbitais das imagens TM, como também para a coleta de alguns dados morfométricos e para o cálculo final dos parâmetros das sub-bacias hidrográficas, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- 1) 1 microcomputador compatível com IBM-PC/XT, com memória principal de 640 kb, marca ITAUTEC,
- 2) periféricos: um disco rígido de 40 Mb, um disco flexível de 5 1/4 pol., 1 terminal de vídeo alfanumérico, marca ITAUTEC,
- 3) 1 terminal gráfico UVI-150, unidade visualizadora de imagens, com 4 planos de 1030 x 1024, com 256 níveis (8 bits por pixel), fabricada pela ENGESPACÇO, com monitor colorido DATANAV.
- 4) 1 mesa digitalizadora marca VAH GOGH.

4.1.6 - EQUIPAMENTO PARA AMPLIAÇÃO E TRANSFERÊNCIA DE DADOS TEMÁTICOS PARA A BASE CARTOGRÁFICA

Utilizou-se o PROCOM-2, pertencente ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, para a projeção dos dados classificados de imagens orbitais na base cartográfica na escala 1:50.000. Os dados orbitais temáticos foram fotografados na tela do monitor de SITIM-150, na forma de dispositivos 35 mm, posteriormente introduzidos no PROCOM-2 e finalmente lançados e delimitados sobre a base cartográfica. Os dados obtidos de fotografias aéreas foram interpretados em papel ultraphan com o auxílio de lápis dermatográficos. A restituição aerofotogramétrica foi efetuada pelo aerosketchmaster no sentido de se minimizar os efeitos de variação na altitude e atitude da aeronave.

4.2 - METODOLOGIA E TÉCNICAS UTILIZADAS

4.2.1 - METODOLOGIA

O procedimento metodológico usado no desenvolvimento deste trabalho, está fundamentado no pressuposto apresentado por Meijerink (1974), o qual afirma ser possível a avaliação hidrológica indireta de bacias hidrográficas, a partir da análise integrada de elementos que caracterizam as unidades de paisagem, tais como: cobertura vegetal, morfometria das sub-bacias hidrográficas e cobertura pedológica, entre outros.

Com base neste pressuposto, o qual serviu como ponto de partida metodológico, teve início uma análise sobre a viabilidade do desenvolvimento de um modelo de regionalização hidrológica, baseado nos fatores que interferem no escoamento das bacias hidrográficas. Admitiu-se que a dinâmica do escoamento da bacia depende principalmente da interação entre os elementos definidores das unidades de paisagem, propostos por Meijerink (1974).

Cabe ressaltar que neste trabalho considerou-se em uma primeira etapa, para a regionalização hidrológica das bacias, as seguintes informações do meio físico: morfometria, propriedades hídricas dos solos e cobertura vegetal. Há uma segunda e última etapa de trabalho, a ser iniciada após a conclusão desta dissertação, serão incluídos os dados de precipitação e de evapotranspiração e utilizadas bacias hidrográficas maiores no processo de regionalização.

A opção pela subdivisão da metodologia em duas etapas sequenciais é devido à complexidade dos estudos de regionalização hidrológica de bacias hidrográficas, uma vez que são considerados neste tipo de trabalho dois grupos distintos de parâmetros: os parâmetros do meio físico e os parâmetros hidrometeorológicos.

Portanto na etapa seguinte serão estudadas as séries de precipitação e de vazão das bacias hidrográficas, no sentido de estabelecer as relações entre os parâmetros do meio físico e os parâmetros hidrométricos das bacias hidrográficas.

Considerou-se também para a estrutura metodo

lógica deste trabalho, a qualidade dos resultados obtidos por Acreman e Sinclair (1986), Wiltshire (1986) e Cook et al. (1988), os quais apresentam metodologias de regionalização hidrológica baseadas nos fatores físicos das bacias hidrográficas. Estes trabalhos foram fundamentais para a orientação metodológica geral e estatística (Figura 4.1), utilizada para a classificação proposta neste estudo (Cap. 4, seq. 4.3 e Cap. 5, seq. 5.6).

Os métodos de regionalização hidrológica de bacias hidrográficas baseiam-se de maneira geral no agrupamento das bacias segundo o grau de similaridade entre os fatores físicos ou fisiográficos das mesmas. Vários trabalhos têm mostrado (ver Capítulo 3), que os fatores físicos como cobertura vegetal, morfometria e cobertura pedológica, exercem um controle decisivo nas características da curva de escoamento da bacia, e por esta razão podem ser utilizados para a classificação hidrológica de bacias hidrográficas que não possuem dados hidrométricos na forma convencional.

O passo seguinte para a elaboração da metodologia geral utilizada neste trabalho, foi a definição dos fatores físicos a serem considerados na caracterização das bacias hidrográficas. Nesta etapa considerou-se, obviamente em função dos objetivos deste trabalho, as condições limitantes da disponibilidade de dados na maior parte do espaço brasileiro.

De acordo com estas premissas consideradas, optou-se pela definição de uma base de dados físicos para a formação dos grupos de sub-bacias hidrológicamente similares, baseada em três parâmetros fisiográficos: Coeficiente de Cobertura Vegetal (CCV), Coeficiente Médio de Impermeabilidade (CMI) e Fator Topográfico (FTP).

O coeficiente de cobertura vegetal (CCV) é mencionado em vários trabalhos de hidrologia aplicada (ver Zavoianu, 1985) como um parâmetro indispensável para estudos voltados à identificação da retenção do escoamento da precipitação em bacias hidrográficas. No entanto, normalmente este parâmetro tem sido obtido a partir de fotografias aéreas recentes ou coletas de dados em campo, o que se constitui em métodos de elevado custo e impraticáveis na maior parte do país. Considerando estas condições seletivas no que se refere a coleta de dados, optou-se pela

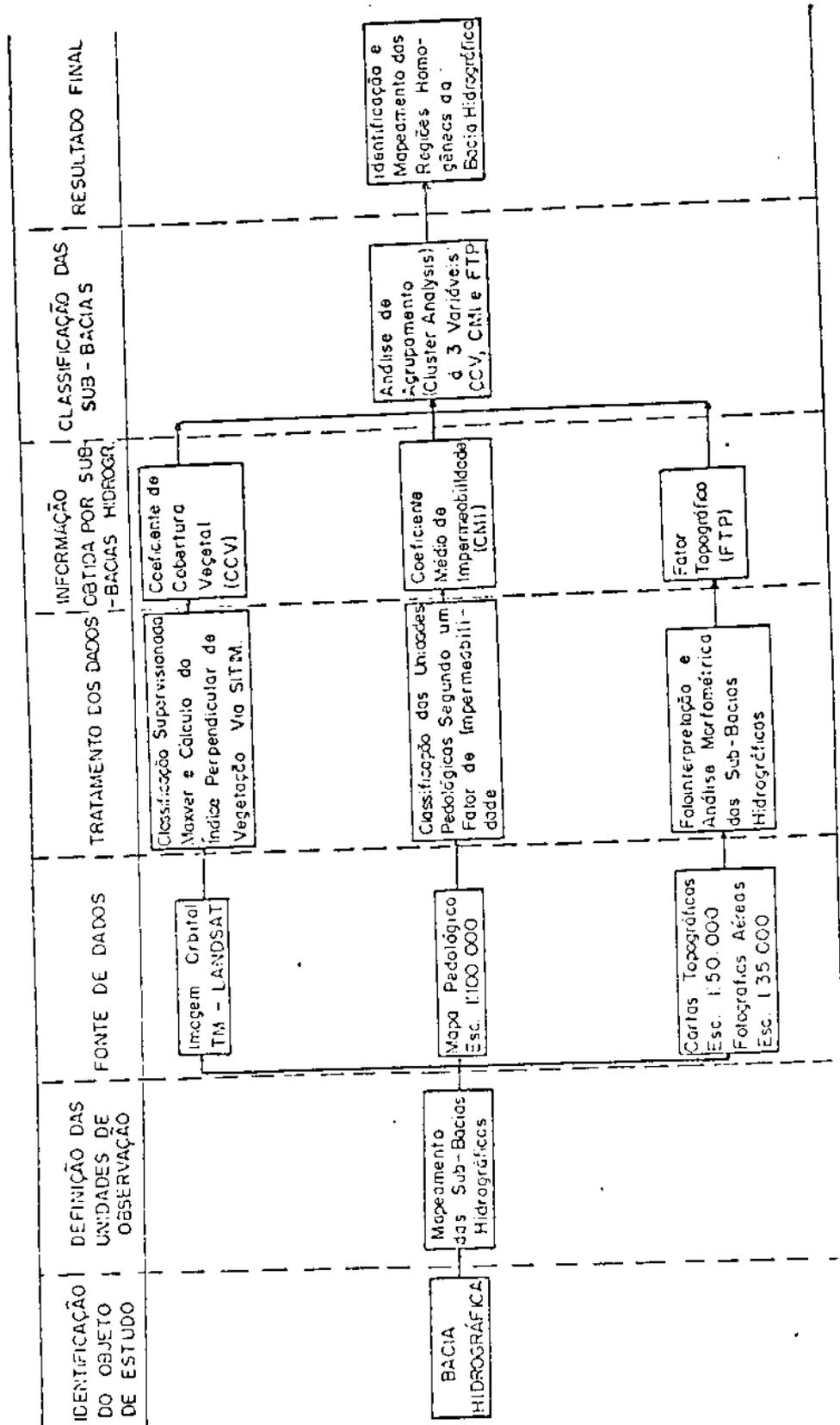


Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho.

utilização de dados de sistemas sensores orbitais. No caso deste estudo, utilizou-se como fonte de dados de cobertura vegetal, o TM-LANDSAT.

O cálculo do coeficiente de cobertura vegetal (CCV) baseou-se no mapa dos grupos hidrológicos de uso da terra, obtido através de técnicas de classificação supervisionada baseadas no algoritmo MAXVER (Máxima Verossimilhança), implementado no SITIM-150 e no agrupamento hidrológico de uso da terra proposto por Chow (1964). Nesta etapa de trabalho, foram coletadas amostras em campo dos tipos de uso existentes na área. Estas amostras foram plotadas na base cartográfica e elaborado assim o mapa de localização das amostras dos tipos de uso da terra. Em seguida as amostras foram utilizadas na fase de treinamento do MAXVER, para a classificação da área de estudo.

Em seguida procedeu-se à reclassificação do uso da terra segundo os seus valores de IPV (Índice Perpendicular de Vegetação), considerando-se o estado fenológico da vegetação no mês utilizado como referência (julho).

As técnicas digitais utilizadas para este fim basearam-se na leitura dos valores de reflectância nas bandas TM-3 e TM-4, das classes de uso da terra da área de estudo. Estes valores foram utilizados para a obtenção do índice perpendicular de vegetação (IPV) de cada classe, segundo a técnica empregada por Epiphanyo e Formaggio (1990).

Em seguida, os valores de IPV das classes de uso da terra foram agrupados em 4 classes. Os limites destas classes foram utilizados para a classificação da imagem índice de vegetação, obtida pelo cálculo da Diferença Normalizada (transformação linear entre as bandas TM-3 e TM-4).

Após a classificação da imagem, foi elaborado o mapa dos grupos hidrológicos do uso da terra, a partir das classes da imagem IV e da classificação proposta por Chow (1964). Em seguida foram calculados os valores médios de IPV para cada grupo hidrológico com base nos valores de IPV de cada classe que compõe o respectivo grupo. Finalmente foi calculado o CCV das sub-bacias, utilizando-se a soma ponderada dos valores médios de IPV dos grupos hidrológicos, tomando-se como peso a proporção em área ocupada por grupo na sub-bacia.

O fator topográfico (FTP), um índice morfométrico que relaciona a forma, a composição da rede de drenagem e a declividade da bacia às características hidrológicas do escoamento fluvial, foi obtido a partir de cartas topográficas e fotografias aéreas, através do cálculo dos seguintes parâmetros da bacia: área, número de canais de primeira ordem, amplitude altimétrica, comprimento e perímetro.

A partir dos valores encontrados para estes parâmetros, foram calculados os valores da frequência de canais de primeira ordem, índice de circularidade e relação de relevo, os quais serviram então para o cálculo final de FTP.

O coeficiente médio de impermeabilidade (CMI) foi obtido segundo uma classificação qualitativa ponderada das unidades pedológicas de cada sub-bacia hidrográfica, segundo o Fator de Impermeabilidade de cada unidade. Esta classificação foi efetuada com base nos seguintes parâmetros do solo: profundidade do solo, granulometria do horizonte mais impermeável, percentual de argila no horizonte A e anisotropia do perfil. Após a obtenção dos valores de cada um destes parâmetros, as séries de dados resultantes foram ordenadas e classificadas e atribuindo um escore para cada classe da série. Desta maneira, as unidades pedológicas receberam um escore em função da classe em que foram incluídas, segundo cada parâmetro do solo.

Finalmente, foi calculado o valor do fator de impermeabilidade (FI) de cada unidade pedológica através da soma dos escores atribuídos. O coeficiente CMI foi obtido a partir da soma ponderada entre os valores de FI, considerando-se como peso o percentual em área ocupado por cada uma das classes de FI, em relação à área da sub-bacia.

O passo seguinte foi a classificação das sub-bacias hidrográficas segundo os parâmetros CCV, FTP e CMI. O objetivo desta etapa foi a identificação espacial das regiões homogêneas. O procedimento utilizado para a classificação foi a identificação dos grupos de bacias com características físicas similares. Estas características foram comparadas segundo os valores de CCV, FTP e CMI. Neste sentido, foi utilizada uma técnica de análise de agrupamento baseada na distância euclidiana entre os indivi

duos. Em seguida foi aplicado o teste F, no sentido de avaliar a significância das diferenças entre os grupos em relação a homogeneidade dos indivíduos de cada grupo.

4.2.2 - TÉCNICAS UTILIZADAS

4.2.2.1 - CÁLCULO DO COEFICIENTE DE COBERTURA VEGETAL

Para o levantamento deste tipo de dado espacial da bacia, colocou-se como pressuposto de que é possível a estimativa da porcentagem de cobertura vegetal no terreno a partir do processamento digital de imagens orbitais (Epiphânio e Formaggio, 1990). Neste sentido, utilizou-se parcialmente o procedimento para a obtenção do índice perpendicular de vegetação, proposto por estes autores. Por outro lado foram utilizadas diversas técnicas digitais, comumente empregadas no tratamento de imagens. O tratamento digital utilizado é apresentado na figura 4.2.

1) Geocodificação da Imagem TM-Landsat na Projeção UTM

A geração de mapas temáticos a partir de imagens orbitais não corrigidas geometricamente, requer a geocodificação em um sistema de projeção cartográfica.

Este procedimento tem por objetivo uma adequação geométrica do posicionamento de cada pixel em relação a projeção considerada. Após a execução da etapa da geocodificação, pode-se utilizar com segurança os resultados da classificação digital, no que diz respeito à precisão geométrica, para a geração de mapas temáticos.

Segundo Li et al. (1990), no caso das imagens LANDSAT e SPOT sem correção geométrica, utiliza-se para a geocodificação o mapeamento polinomial entre coordenadas da imagem e coordenadas de projeção de pontos de controle previamente selecionados. As coordenadas de projeção destes pontos, continuam os autores, podem ser adquiridas via teclado ou obtidas a partir de mapas via mesa digitalizadora.

A geocodificação da imagem TM-LANDSAT foi efetuada no SITIM-150, utilizando-se como base cartográfica para a obtenção de pontos de controle na projeção UTM, as cartas topográficas na escala 1:50.000, folhas São Car

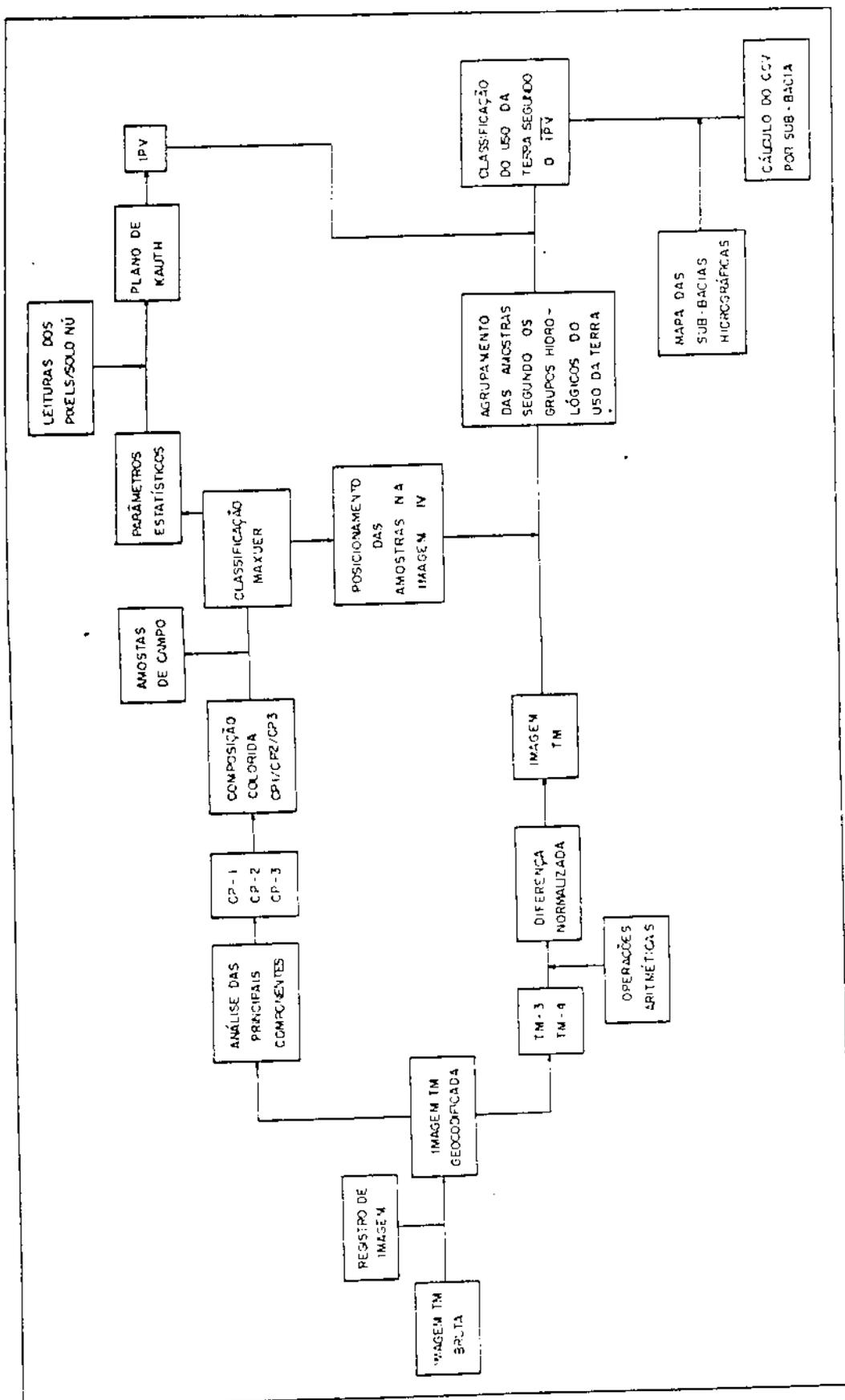


Figura 4.2 - Fluxograma do procedimento metodológico utilizado no tratamento digital da imagem TM-LANDSAT.

los e Corumbataí. Foram considerados como pontos de controle nas cartas, os cruzamentos de estradas, as bifurcações de canais de drenagem e os alvos urbanos. Estes pontos foram coletados nas cartas, via mesa digitalizadora, de maneira uniforme, isto é, distribuídos igualmente por toda a área imageada.

2) Análise das Principais Componentes

Após a geocodificação da imagem multiespectral composta das bandas 2, 3, 4, 5 e 7 (referidas neste estudo como TM2, TM3, TM4, TM5 e TM7, respectivamente), foi realizada a primeira operação de compressão dos dados através da Análise das Principais Componentes (APC).

É sabido que, a depender dos alvos contidos em uma cena e das bandas espectrais consideradas, as imagens multiespectrais contêm uma certa redundância de dados, isto é, a mesma informação pode estar contida em mais de uma banda espectral (Dutra et al., 1981). Por exemplo, segundo Townshend (1981), existe uma alta correlação entre as bandas na região do visível (bandas TM-1, TM-2 e TM-3), e também entre as bandas na região do infravermelho do espectro eletromagnético (bandas TM-4, TM-5 e TM-7).

A redundância entre as bandas pode ser eliminada a partir da escolha daquelas que apresentem baixa correlação entre si, ou através do processo de decorrelação entre bandas. Este procedimento, além de minimizar o tempo computacional e o espaço de memória, proporciona uma separabilidade espectral mais adequada entre os alvos da cena e um ótimo aproveitamento na elaboração de composições coloridas.

A análise das principais componentes (APC) da imagem multiespectral correspondente à área de estudo foi realizada no SITIM-150, através da aplicação da função ROTAÇÃO ESPECTRAL.

Aplicada a APC, foi possível a redução do espaço hexadimensional dos dados espectrais, para um espaço tridimensional, ou seja, aquele definido pelas três componentes principais PC1, PC2 e PC3. Em seguida, estas três componentes foram utilizadas para a geração de uma imagem por composição colorida, atribuindo-se o vermelho à PC1, o verde à PC2 e o azul à PC3. Este procedimento foi efetua

do no SITIM-150 através do uso da função cor-canal. A identificação da melhor composição colorida foi conseguida após a realização de inúmeros experimentos, variando a associação entre cada componente e o canal colorido a ela atribuído.

Obtida a melhor composição colorida, efetuou-se a manipulação de contraste sobre esta imagem, no sentido de se determinar os valores mais adequados de ganho e offset para o espaço RGB. Este procedimento visou a obtenção de uma imagem colorida que possuísse a melhor diferenciação cromática e que favorecesse uma melhor separação visual entre os alvos da cena imageada. Esta imagem obtida por composição colorida foi posteriormente utilizada para a identificação das amostras de classes de uso da terra.

3) Obtenção da Imagem Índice de Vegetação (IV)

Para a obtenção da imagem IV, foi utilizada a função OPERAÇÕES ARITMÉTICAS entre bandas de uma imagem multiespectral. Esta função encontra-se inserida no aplicativo TRATAMENTO DE IMAGENS, do SITIM-150.

Nesta fase foram consideradas as bandas TM-3 e TM-4, as quais têm sido relatadas na literatura específica como sendo aquelas de melhor desempenho para a estimativa de parâmetros da cobertura vegetal a partir de transformações lineares entre bandas. A transformação linear utilizada como índice de vegetação foi a Diferença Normalizada (ND), definida por Rouse et al. (1973) como:

$$ND = (TM4 - TM3)/(TM4 + TM3) \quad (4.1)$$

Para a implementação desta transformação linear entre bandas procedeu-se da seguinte maneira:

- Inicialmente efetuou-se a subtração entre as bandas 4 e 3, gerando-se desta forma a imagem $SUB_{4,3}$.
- Em seguida obteve-se a soma entre as bandas 3 e 4, gerando-se assim a imagem denominada $SOM_{4,3}$.
- Logo após foi obtida a razão entre as bandas $SUB_{4,3}$ e a banda $SOM_{4,3}$, denominada $RAZ_{4,3}$ e expressa como:

$$RAZ_{4,3} = SUB_{4,3}/SOM_{4,3} \quad (4.2)$$

- d) Finalmente foi possível determinar a imagem IV, multiplicando-se o valor de cada pixel da imagem $RAZ_{4,3}$ pelo valor inteiro 256.

$$IV = RAZ_{4,3} \cdot 256 \quad (4.3)$$

Este procedimento visa aumentar o valor de nível de cinza dos pixels da imagem, possibilitando desta forma além de uma melhor visualização, transformar os valores de nível de cinza dos pixels da razão entre bandas para o intervalo (0-255). A mesma técnica foi utilizada por Foresti e Pereira (1985).

4) Determinação dos Valores do Índice Perpendicular de Vegetação das Classes de Uso da Terra

a) Identificação, Posicionamento e Coleta de Amostras das Classes de Uso da Terra em Campo

Através de visitas a campo, coincidentes ao período, fenológico e agrícola correspondente ao imageamento da área de estudo, ou seja, (julho de 1989 e julho de 1990), foi possível a identificação e o posicionamento dos tipos de uso da terra existentes na bacia.

Para a pré-classificação das amostras dos tipos de uso da terra em campo, utilizou-se como base cartográfica de referência, as cartas topográficas na escala 1:50.000 e as fotografias aéreas na escala 1:35.000. Com base neste material, foram localizados e plotados os pontos correspondentes às amostras pré-classificadas.

Para o planejamento das visitas a campo, utilizou-se o mapa dos ecossistemas e mosaicos da área de proteção ambiental das cuestas de São Pedro e Analândia, realizado por Moraes (1985). Com base neste mapa, foram escolhidas as unidades a serem visitadas, dentro das quais foi feita a amostragem.

O procedimento amostral para a coleta dos dados de campo, foi aleatório e não estratificado. Foram, no entanto, considerados como determinantes para a escolha da amostra, a sua representatividade em superfície e a sua proximidade em relação a pontos de controle cartográfico. Os pontos de controle cartográfico foram escolhidos segundo a sua melhor definição visual na imagem e a sua preci

são em relação a elementos topológicos da carta topográfica, tais como cruzamento de estradas, bifurcação de canais fluviais, cruzamento de estradas com canais fluviais e referências morfológicas do terreno. O resultado desta fase de trabalho foi um mapa de localização das amostras pré-classificadas dos tipos de uso da terra.

b) Cálculo do Índice Perpendicular de Vegetação

Tendo em mãos o mapa das amostras dos tipos de uso da terra pré-classificadas em campo, procedeu-se a identificação das mesmas na composição colorida, no SITIM-150. Dada a alta resolução da imagem TM-LANDSAT, a riqueza da diferenciação cromática da composição colorida obtida por análise das componentes principais e da qualidade das amostras de campo em relação aos pontos de controle cartográfico, o posicionamento das amostras no monitor do SITIM-150 não apresentou inconvenientes significativos.

Para a verificação da homogeneidade espectral das amostras em relação aos seus respectivos padrões na composição colorida, foi realizado um teste classificatório supervisionado através da utilização do classificador bayesiano MAXVER (Máxima Verossimilhança), ou seja, um método estatístico de reconhecimento de padrões do tipo paramétrico (Swain e Davis, 1978). A consistência e a representatividade das amostras foi conhecida pela análise da matriz de classificação.

O passo seguinte foi a identificação dos valores médios de índice perpendicular de vegetação (IPV) de cada classe de uso da terra. Para tanto foram obtidos os valores de reflectância das amostras pré-classificadas e posicionadas na imagem, para as bandas TM-3 e TM-4. O acesso a estes valores foi possível através da análise da listagem do arquivo MAXVER utilizado na geração da matriz de classificação.

Em seguida, foram obtidos os valores de nível de cinza nas bandas TM-3 e TM-4, relativo ao solo nu, para a definição do plano de Kauth determinado pelas bandas TM-3 e TM-4 e o posicionamento, da reta correspondente aos valores de reflectância do solo nu.

Foi coletado um total de 20 amostras possíveis, relativas à classe solo nu, em diversos pontos da

composição colorida. Os valores de nível de cinza destas amostras foram obtidos pelo uso da função LEITURA DE PIXEL do SITIM-150, a qual forneceu tais valores para as bandas TM-3 e TM-4. Estes valores foram corrigidos dos efeitos da influência atmosférica, pelo método do histograma mínimo.

Em seguida foi realizada a análise de regressão linear entre as bandas TM-3 e TM-4 e determinados o coeficiente de correlação e a reta de regressão para os dados relativos aos valores digitais do solo nú. Para isso foi utilizado o pacote estatístico existente no Sistema GEO-INF/MAP (Teixeira, 1986).

De posse destes resultados, foi construído o plano de Kauth e nele foram plotados os pontos correspondentes aos valores de nível de cinza das amostras de cobertura do terreno. Finalmente, foram calculados os valores de IPV para cada uma das classes, com base na distância ortogonal entre cada um dos pontos correspondentes às classes de cobertura do terreno e a linha de reflectância do solo, conforme técnica proposta por Richardson e Wiegand (1977).

c) Classificação Digital da Imagem IV

Neste caso, optou-se pela divisão em 3 classes de IPV, conforme uma das sugestões de Tucker (1977), no que se refere ao potencial de resolução do número de classes de biomassa, através de dados de sensoriamento remoto. A quarta classe, o solo nú, foi classificada como o nível de biomassa zero (IV igual a zero), que corresponde no campo à áreas de culturas de ciclo longo (citros e cana-de-açúcar). Na época do imageamento, esta área estava em fase de preparação para o plantio.

A classificação foi efetuada uma conversão entre os valores dos intervalos de IPV e os valores de nível de cinza no intervalo (0-255) da imagem IV. A conversão foi feita de maneira linear e direta, ou seja, ao valor mínimo de IPV foi atribuído o nível de cinza 0 (zero) e ao valor máximo de IPV foi atribuído o valor máximo de nível de cinza na imagem.

O dispositivo correspondente a imagem temática IV foi inserido no PROCOM, no sentido de se obter uma

ampliação da imagem para a escala 1:50.000 e a posterior sobreposição à base topográfica de mesma escala. Com base neste procedimento, foi possível a interpretação e delimitação das classes de Índice de Vegetação sobre a base cartográfica.

Após a delimitação das classes de IPV na base cartográfica, procedeu-se ao agrupamento das classes segundo os grupos hidrológicos de Chow (1964), e desta forma foi definida uma legenda com 3 classes ou grupos hidrológicos de uso da terra:

- Grupo II - Pastagens e Vegetação Arbustiva
- Grupo III - Culturas de Ciclo Longo
- Grupo IV - Florestas Naturais e Artificiais

Através da superposição do mapa dos grupos hidrológicos de uso da terra ao mapa das sub-bacias hidrográficas, foram obtidos os valores de CCV das sub-bacias localizadas na área coberta pelo imageamento 220-750.

O coeficiente de cobertura vegetal da bacia (CCV) foi encontrado a partir da seguinte relação:

$$CCV_j = \sum_{i=1}^n IPV_i \cdot S_i \quad (4.4)$$

onde:

- IPV_i é o valor médio do índice perpendicular de vegetação do grupo hidrológico de uso da terra i ,
- S_i é o percentual em área ocupada pelo grupo hidrológico i na sub-bacia j .

Os valores de S_i foram encontrados a partir do uso da mesa digitalizadora acoplada ao SGI, através da função CÁLCULO DE ÁREAS existente no sistema. Em seguida, o mapa das sub-bacias hidrográficas foi sobreposto ao mapa dos grupos hidrológicos de uso da terra, sendo possível assim a digitalização dos limites de cada grupo hidrológico dentro de cada sub-bacia. Os valores de S_i foram obtidos pela equação 4.5:

$$S_i = A_i / A_j \quad (4.5)$$

onde:

A_i é a área do grupo hidrológico i

A_j é a área da sub-bacia j

4.2.2.2 - CÁLCULO DO FATOR TOPOGRÁFICO DAS SUB-BACIAS

1) Delimitação das Sub-Bacias e Levantamento da Rede de Drenagem

Após a seleção da área-teste para a elaboração da metodologia de classificação hidrológica de bacias hidrográficas, procedeu-se à compartimentação e ao levantamento da rede de drenagem. A primeira ação de trabalho foi a divisão da Bacia do Ribeirão do Feijão em sub-bacias hidrográficas, obedecendo para tanto a hierarquia fluvial e a representatividade areal das mesmas.

A divisão da área de estudo em sub-bacias foi efetuada com base nas seguintes etapas:

a) Levantamento da Rede de Drenagem

A rede de drenagem da área-teste foi mapeada com base na utilização de fotografias aéreas pancromáticas na escala 1:35.000 e cartas topográficas na escala 1:50.000. Inicialmente foi obtida a rede de drenagem através de fotointerpretação, com o auxílio de um estereoscópio de espelhos ZEISS. Os resultados foram demarcados em folhas de papel ultraphan e posteriormente transferidos para a base cartográfica na escala 1:50.000 com o auxílio do Aero-Sketchmaster ZEISS. Em seguida à restituição da fotointerpretação sobre a base cartográfica, foi confeccionado o mapa da rede de drenagem da bacia.

b) Delimitação das Sub-Bacias Hidrográficas

Em seguida à elaboração do Mapa da Rede de Drenagem, foram delimitadas as sub-bacias hidrográficas, as quais foram consideradas como unidades de regionalização hidrológica.

Através da superposição do mapa da rede de drenagem à base cartográfica, procedeu-se à identificação dos interflúvios com base na morfologia das curvas de nível e nos pontos com altitudes cotadas na carta topográfica.

Para o traçado dos divisores d'água das sub-bacias foram utilizadas as folhas de papel ultraphan, as quais já continham a rede de drenagem interpretada. Estas folhas foram superpostas às fotografias aéreas e através do auxílio do estereoscópio de espelhos foram interpretados e traçados os divisores d'água das sub-bacias.

Com base neste procedimento foram traçados os divisores d'água que circundavam canais fluviais de 3ª ordem ou superiores. As sub-bacias hidrográficas não delimitadas devido ao não-enquadramento nesta especificação hierárquica, foram consideradas como inter-bacias. O presente trabalho não considerou para a regionalização as inter-bacias, uma vez que na escala adotada para a regionalização as inter-bacias, uma vez que na escala adotada para o mapeamento (1:50.000), os interflúvios delimitando as sub-bacias não podem ser interpretados com precisão, devido a sua baixa amplitude.

Elaborada a fotointerpretação dos divisores d'água e a delimitação das sub-bacias hidrográficas, as mesmas foram transferidas para o Mapa da Rede de Drenagem com o auxílio do Aero-Sketchmaster. Desta forma foi possível a construção de um mapa contendo as sub-bacias e a rede de drenagem da Bacia do Ribeirão do Feijão.

c) Cálculo dos Parâmetros Morfométricos

O Fator topográfico (FTP) de uma bacia hidrográfica foi proposto por Morisawa (1962), no sentido de relacionar as características morfológicas da bacia ao comportamento da sua curva de escoamento fluvial.

A relação algébrica que define o fator FTP é a seguinte:

$$FTP = FI \cdot Rh \cdot C \quad (4.6)$$

onde:

- FI é a frequência de canais de primeira ordem
- Rh é a relação de relevo
- C é o índice de circularidade da bacia.

Desta forma, para o cálculo do fator FTP são necessários anteriormente os cálculos dos valores de FI, Rh e C.

.Frequência de Canais de Primeira Ordem

A frequência de canais de primeira ordem é obtida através da razão simples entre o número de canais de primeira ordem (NI) e a área da bacia Ab.

$$FI = NI / Ab \quad (4.7)$$

O número de canais foi obtido através da contagem direta no mapa da rede de drenagem, enquanto a área de cada sub-bacia correspondente foi obtida a partir da digitalização dos divisores d'água no SGI, utilizando-se a função CÁLCULO DE ÁREAS.

.Relação de Relevo

A relação de relevo considera a amplitude altimétrica e o comprimento máximo da bacia, medido paralelamente à direção geral do canal principal. Este parâmetro morfométrico expressa a declividade da bacia hidrográfica e pode ser obtido pela equação 3.9, que repetimos abaixo:

$$Rh = H/Lb \quad (3.9)$$

A amplitude altimétrica das sub-bacias (H) foi calculada com base na diferença altitudinal medida entre a montante e a jusante de cada sub-bacia, com base nas cartas topográficas na escala 1:50.000. Esta diferença foi obtida considerando-se como valor altimétrico máximo um ponto cotado ou a isohipsa máxima situada a montante, e como valor altimétrico mínimo a intersecção entre o canal principal da bacia e a isohipsa de menor valor situada a jusante da sub-bacia.

O comprimento da sub-bacia (Lb) foi obtido com o uso do curvímetro sobre o mapa das sub-bacias hidrográficas. A medida foi efetuada sobre uma reta paralela à direção geral do canal principal, ligando os pontos altimétricos máximo e mínimo da sub-bacia.

.Índice de Circularidade

O índice de circularidade relaciona a morfologia da bacia ao perfil da curva de escoamento fluvial, principalmente no que tange à amplitude e a duração da vazão de cheia. Para o cálculo do índice de circularidade

são necessários primeiramente o conhecimento dos valores do perímetro (P) e da área da sub-bacia (Ab).

Os valores da área foram obtidos através da função CÁLCULO DE ÁREAS, disponível no SGI. O perímetro de cada sub-bacia foi obtido através da digitalização dos divisores d'água contidos nos mapas das sub-bacias e da rede de drenagem, utilizando-se em seguida a função CÁLCULO DE DISTÂNCIAS do SGI. Neste sentido foi obtido o comprimento dos divisores d'água de todas as sub-bacias da área.

A partir do valor do perímetro P, calculou-se a área de um círculo (Ac), cujo diâmetro fosse igual ao perímetro da sub-bacia. Para tanto foi utilizada a seguinte relação.

$$Ac = P^2 / 2 \quad (4.8)$$

Finalmente, com o uso da equação 3.12, obteve-se o valor do l_c de cada sub-bacia.

Tendo em mãos os valores de Fl, Rh e C, o fator FIP de cada sub-bacia foi facilmente obtido através da equação 4.6.

4.2.2.3 - CÁLCULO DO COEFICIENTE MÉDIO DE IMPERMEABILIDADE

A capacidade de infiltração de uma bacia hidrográfica é um dos parâmetros mais importantes para a caracterização da dinâmica do escoamento fluvial. Alguns autores, como Salomonson et al. (1975) ressaltam que a porcentagem de área impermeável de uma bacia pode ser considerada como o principal fator que reflete a rapidez do escoamento superficial, notadamente quando se trata de bacias hidrográficas urbanizadas.

De maneira geral, os estudos mais importantes sobre a capacidade de infiltração de bacias hidrográficas têm sido elaboradas a partir de experimentos utilizando um instrumental sofisticado, realizados no sentido de se conhecer a taxa de infiltração de unidades pedológicas. Tais estudos podem ser constatados pela análise de trabalhos efetuados por Libardi e Reichardt (1973), Jorge et al. (1988) e Jorge e Prado (1988), os quais avaliaram o comportamento hidrológico de diversos tipos de solos do Estado de São Paulo.

Embora estes estudos apresentem uma alta confiabilidade quanto a precisão dos dados coletados, deve-se ponderar que a aplicação deste tipo de metodologia, atualmente esta restrita a algumas áreas do Brasil. Isto se deve ao custo elevado do instrumental utilizado e à necessidade de pessoal especializado. Por outro lado, para se caracterizar a capacidade de infiltração de uma bacia hidrográfica, são necessários muitos experimentos de campo, realizados sobre cada uma das unidades pedológicas.

Neste sentido, optou-se por uma técnica relativamente simples de classificação ponderada das sub-bacias hidrográficas baseada no ranking ou ordenação hierárquica das unidades pedológicas de cada sub-bacia hidrográfica, segundo o fator de impermeabilidade (FI). Este fator foi obtido a partir da soma de escores atribuídos a cada unidade. Tais escores foram obtidos através da ordenação e a classificação das unidades pedológicas, segundo os valores dos descritores de impermeabilidade.

Os descritores de impermeabilidade selecionados foram os seguintes:

- a) Percentual de Argila no Horizonte A (A),
- b) Percentual de Argila no Horizonte mais Impermeável (I),
- c) Profundidade Média do Solo (P),
- d) Índice de Anisotropia (An)

A escolha destes descritores foi efetuada com base em consulta bibliográfica adequada, a qual é brevemente comentada abaixo, e encontra-se melhor discutida na seção 3.5.

Dugan (1982) sugere para o agrupamento dos solos segundo as suas características hídricas, o uso dos seguintes parâmetros: granulometria do horizonte mais impermeável, capacidade de água disponível, declividade, profundidade sazonal do lençol freático e declividade.

Zaslavsky e Rogowsky (1969) consideram anisotropia como um fator decisivo no comportamento do movimento da água ao longo do perfil, uma vez que pode provocar escoamento sub-superficial de grande intensidade, bem como retardar a infiltração no horizonte A, contribuindo também para a geração do escoamento hortoniano (overland flow).

Por outro lado, o teor de argila no horizonte A, é citado por Aylor e Parlange (1973) como um fator decisivo na dinâmica da infiltração vertical em solos com horizontes texturais bem diferenciados, principalmente no caso de um solo com horizonte A com textura mais fina que o horizonte B. Por outro lado a profundidade do solo reflete o equilíbrio da relação pedogênese-infiltração.

Os valores dos descritores profundidade média do solo (P), percentual de argila no horizonte mais impermeável (I) e percentual de argila no horizonte A (A), foram obtidos de Oliveira e Prado (1984). A Tabela 4.3 apresenta os valores de profundidade média do solo para as unidades pedológicas da área de estudo.

TABELA 4.3 - VALORES DE PROFUNDIDADE MÉDIA DO SOLO (CM) DAS UNIDADES PEDOLÓGICAS DA ÁREA DE ESTUDO

UNIDADE PEDOLÓGICA	PROF. (M)	ESCORE
LV-2	300	1
LV-3	300	1
LV-5	300	1
LV-6	300	1
LE-2	300	1
AQ	250	2
LRd	250	2
TE-2	250	2
PV-5	100	5
Li-3	40	5

Baseada em Oliveira e Prado (1984).

Os valores de profundidade do solo da Tabela 4.3 foram agrupados em 7 classes, atribuindo-se a cada classe um escore variando de 1 a 7. A atribuição dos valores obedeceu a seguinte regra: quanto maior a profundidade do solo, menor o escore atribuído.

A Tabela 4.4 apresenta os valores de percentual de argila no horizonte A de cada unidade pedológica. Estes valores foram agrupados em 4 classes, atribuindo-se

à cada classe um escore variando de 1 a 4. A atribuição dos valores obedeceu à seguinte regra: quanto menor o percentual de argila, menor o escore atribuído.

TABELA 4.4 - VALORES DE PERCENTUAL DE ARGILA NO HORIZONTE A DAS UNIDADES PEDOLÓGICAS DA ÁREA DE ESTUDO

UNIDADE PEDOLÓGICA	% ARGILA HOR. A	ESCORE
AQ	9.0	1
LV-2	15.0	2
LV-3	19.0	2
LE-2	23.0	2
Li-3	26.0	3
LV-5	35.0	3
PV-5	37.0	4
LV-6	52.0	4
LRd	56.0	4
TE-2	58.0	4

Baseada em Oliveira e Prado (1984).

A Tabela 4.5 apresenta o percentual de argila no horizonte mais impermeável. Os dados da tabela foram agrupados em 4 classes, atribuindo-se a cada classe um escore variando de 1 a 4.

Os valores do índice de anisotropia de cada unidade pedológica foram obtidos a partir da relação entre a granulometria máxima do horizonte B (grB) e a granulometria máxima do horizonte A (grA), em percentuais. Para tanto foi utilizada a seguinte relação:

$$An = grB / grA \quad (4.9)$$

Os valores obtidos pela Equação 4.9 são apresentados na Tabela 4.6. Estes valores foram agrupados em 7 classes, atribuindo-se a cada classe um escore variando de 1 a 7, de tal forma que os solos com maior An receberam maiores valores de escores.

O fator de impermeabilidade (FI) foi obtido através da soma algébrica do ou escore médio atribuído à

cada classe de An, P, A, e I. Este fator serviu de base para a definição dos grupos hidrológicos de solos da bacia estudada. O fator FI foi obtido pela equação 4.10.

TABELA 4.5 - VALORES DE PERCENTUAL DE ARGILA NO HORIZONTE MAIS IMPERMEÁVEL DAS UNIDADES PEDOLÓGICAS NA ÁREA DE ESTUDO

UNIDADE PEDOLÓGICA	% ARGILA HOR. MAIS IMPERM.	SCORE
AQ	12.0	1
LV-2	20.0	2
LV-3	25.0	2
Li-3	26.0	2
LE-3	27.0	2
LV-5	41.0	3
LRd	56.0	3
TE-2	64.0	4
PV-5	64.0	4
LV-6	66.0	4

Baseada em Oliveira e Prado (1984).

TABELA 4.6 - VALORES DO ÍNDICE DE ANISOTROPIA PARA AS UNIDADES PEDOLÓGICAS DA ÁREA DE ESTUDO

UNIDADE PEDOLÓGICA	ANISOTROPIA AN	SCORE
LRd	1.00	1
TE-2	1.10	1
LE-2	1.17	1
LV-5	1.17	1
LV-6	1.26	2
LV-3	1.31	2
AQ	1.33	2
LV-2	1.33	2
PV-5	1.72	3
Li-3	> 1.72	7

Adaptada de Oliveira e Prado (1984).

$$FI = E_{AN} + E_p + E_A + E_I \quad (4.10)$$

onde:

- E_{AN} é o escore médio atribuído às classes de anisotropia do solo,
 E_p é o escore médio atribuído à classe de profundidade do solo,
 E_A é o escore atribuído à classe de percentual de argila no horizonte A,
 E_I é o escore médio atribuído à classe de percentual de argila no horizonte mais impermeável,
 FI é o fator de impermeabilidade.

Desta maneira, o cálculo do CMI foi efetuado pelo uso da seguinte relação:

$$CMI_j = \sum_{i=1}^n FI_i \cdot S_i \quad (4.11)$$

onde:

- FI_i é o fator médio de impermeabilidade do grupo hidrológico de solo i
 S_i é a proporção em área ocupada pelo grupo hidrológico i na bacia j .

4.2.2.4 - CLASSIFICAÇÃO DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS: ANÁLISE DE AGRUPAMENTO E TESTE DE SIGNIFICÂNCIA

A estimativa da curva de frequência de cheias em bacias hidrográficas não-instrumentalizadas, geralmente é feita com base na aplicação de técnicas de regionalização. A definição de regiões hidrológicamente homogêneas, baseia-se nas características físicas que controlam a frequência das cheias na bacia (Wiltshire, 1986).

Estas regiões são definidas em um espaço multidimensional de dados relativos às características físicas das bacias. Para se identificar os grupos de bacias com propriedades físicas similares, é necessário o uso de uma técnica de classificação multivariada. Segundo Acreman e Sinclair (1986), a análise de agrupamento se constitui em uma técnica apropriada a situações envolvendo múltiplas variáveis.

Muitos algoritmos de análise de agrupamento

encontram-se disponíveis, e a sua escolha dependerá do tipo e da estrutura dos dados a serem classificados. O algoritmo utilizado para a classificação das sub-bacias da área-teste foi aquele proposto por Acreman e Sinclair (1986). Estes autores sugerem para o caso de regionalização de bacias hidrográficas segundo as suas propriedades físicas, a medida de similaridade conhecida como distância euclidiana. A distância euclidiana ($d_{i,j}$) é definida pela seguinte relação:

$$d_{i,j} = \sqrt[p]{\sum_{k=1}^p (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (4.12)$$

onde i e j são bacias hidrográficas descritas por p variáveis físicas. O uso deste algoritmo assume que cada par de bacias hidrográficas pode ser definido por um valor numérico que explica a dimensão segundo a qual as bacias se agrupam hidrológicamente uma à outra, com base em um conjunto de p características físicas (Acreman e Sinclair, 1986).

Para a análise da significância da distinção entre os grupos formados, foi utilizado o teste estatístico F (Cap. 5, seq. 5.6.2). O teste F é definido pela seguinte relação:

$$F = (B/(p-1))/(A/(m_k-p)) \quad (4.13)$$

onde:

- B é o coeficiente de variação entre os k grupos
- A é o coeficiente de variação no grupo k
- m_k é o número de elementos no grupo k
- p é o número de grupos formados.

Após a realização da análise do agrupamento e a definição dos grupos de bacias hidrológicamente homogêneas, procedeu-se a representação cartográfica destes resultados. Para tanto, foi utilizada como base cartográfica o mapa das sub-bacias hidrográficas.

Nesta base, as bacias foram classificadas de acordo com os grupos a que pertencem, e representadas segundo uma simbolização cartográfica qualitativa, definindo as regiões homogêneas.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - MAPEAMENTO DA REDE DE DRENAGEM

O mapeamento hidrográfico da Bacia do Ribeirão do Feijão, possibilitou o reconhecimento de uma rede de drenagem de grande densidade e diversidade espacial. Pela análise da Figura 5.1 pode-se notar em uma primeira abordagem, a existência de duas áreas diferenciadas segundo a densidade e o padrão de drenagem.

A porção sul-sudeste da bacia se caracteriza por uma baixa densidade e frequência de canais de drenagem. Nota-se um padrão sub-dendrítico predominante, com moderado controle estrutural. Situada na sua maior parte no Planalto de Santana, esta área corresponde à Formação Botucatu, apresentando um biótopo do tipo Colinas Amplas e Vales Abertos.

Já na porção norte-nordeste da bacia, junto ao Planalto de São Carlos, observa-se uma alta densidade e frequência de canais de drenagem, onde os padrões sub-paralelo, sub-dendrítico e pinulado são predominantes, onde se pode notar o controle lito-estrutural na hidrografia. Nesta área são encontrados os biótopos do tipo Vales Encaixados e Canyons, Colinas Médias e Vales Intermediários, Morros Isolados, Inselbergs e Formas Ruiniformes. Predominam as formações Pirambóia, Serra Geral e Itaqueri. Estes atributos associados às características quantitativas da rede de drenagem, sugerem a existência de uma região de escoamento fluvial rápido e concentrado, caracterizando os nichos de nascentes da Bacia do Ribeirão do Feijão.

5.2 - DELIMITAÇÃO DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

Foi possível a identificação de 19 sub-bacias hidrográficas na Bacia do Ribeirão do Feijão (Figura 5.2).

Foi observado um predomínio de bacias maiores no Planalto de Santana, onde os processos morfopedogenéticos e os arenitos da Formação Botucatu, foram responsáveis por um relevo de formas amplas suaves, associado a baixa densidade de drenagem. Já no Planalto de São Carlos e nas Cuestas Basálticas (contato entre os Planaltos de

São Carlos e de Santana), são encontradas bacias menores (porém hierarquicamente superiores àquelas do Planalto de Santana). Esta área é constituída por arenitos intercalados aos basaltos da Formação Serra Geral, arenitos conglomeráticos e carapaças ferruginosas da Formação Itaqueri onde o relevo é bem dissecado e com alta densidade de drenagem.

Christofoletti (1970) mostrou em estudo realizado no Planalto de Poços de Caldas, que o tamanho das bacias hidrográficas está relacionado à litologia do substrato. Zavoianu (1985) também deixa claro esta relação em estudos realizados em países europeus.

5.3 - FATOR TOPOGRÁFICO

A Tabela 5.1 apresenta os valores dos parâmetros morfométricos calculados para as sub-bacias da área de estudo. Foram obtidos os valores relativos à área de captação superficial, ao número de canais de primeira ordem, as altitudes máxima e mínima e ao comprimento e ao perímetro das sub-bacias.

Com base nos resultados da Tabela 5.1 foram determinados os valores dos índices FI (frequência de canais de primeira ordem), Rh (relação de relevo) e C (índice de circularidade). Estes índices foram utilizados para o cálculo do fator topográfico (FTP).

Os valores de FI são apresentados na Tabela 5.2. Uma análise destes resultados mostra que as sub-bacias apresentem uma acentuada diferenciação quanto à frequência de canais de primeira ordem com valores que variam de 0.31 à 4.28.

A variabilidade dos valores apresentados na Tabela 5.2 pode ser explicada pela diferenciação litológica e geomorfológica presente na bacia (Form. Botucatu, Formação Bauru, Form. Serra Geral e Form. Itaqueri). As formações citadas diferem quanto a permeabilidade do material, que pode ser notada pelos valores de FI. Morisawa (1962) comenta a relação existente entre FI e a permeabilidade litológica da região dos Apalaches (EUA). A mesma conclusão foi obtida por Christofoletti e Machado (1977) e por Zavoianu (1985).

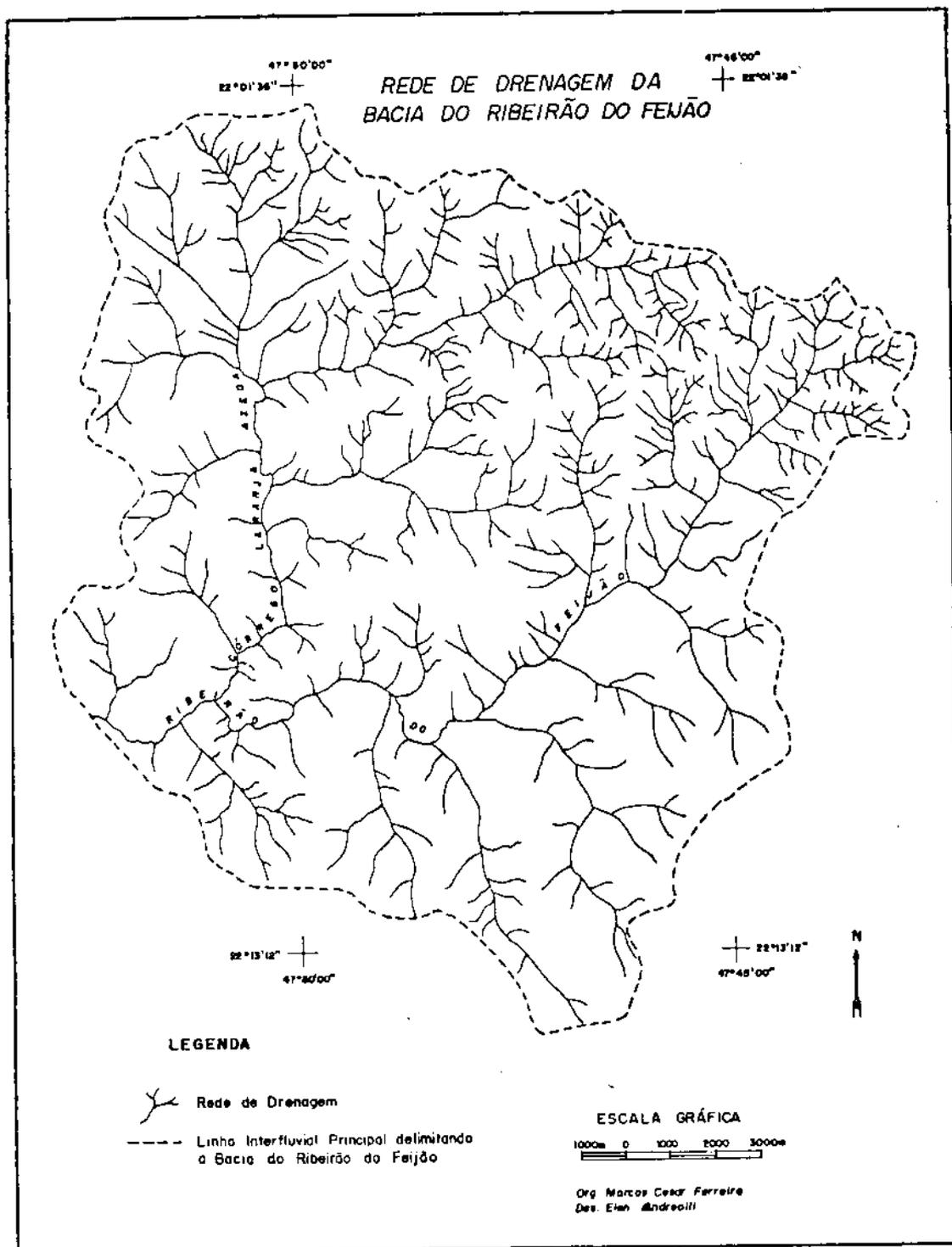


Fig. 5.1 - Mapa da rede de drenagem da Bacia do Ribeirão do Feijão.

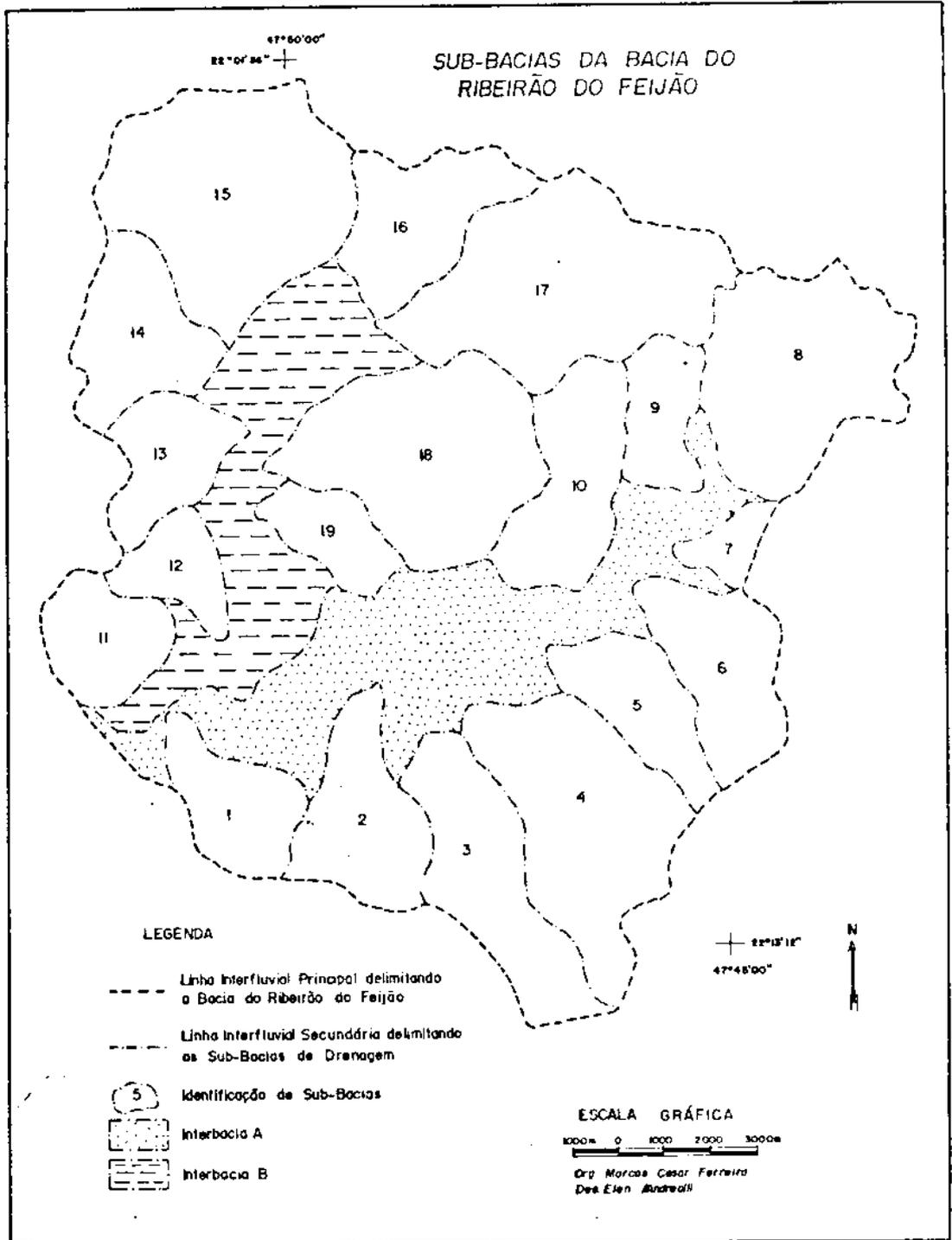


Fig. 5.2 - Mapa das sub-bacias hidrográficas da bacia do Ribeirão do Feijão.

TABELA 5.1 - VALORES DOS PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

SUB-BACIA	PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS					
	ÁREA (KM ²)	NI	H(M)	h(m)	Lb(KM)	P(KM)
1	6.46	13	805	720	4.0	10.5
2	8.78	9	822	720	4.5	13.0
3	11.70	13	852	720	7.0	17.5
4	16.26	14	855	732	7.1	19.0
5	6.55	6	839	740	4.6	11.5
6	8.66	9	870	740	4.5	12.5
7	2.58	2	800	760	2.5	6.1
8	16.11	69	1030	780	5.5	17.5
9	4.82	20	1005	780	3.0	9.0
10	9.07	25	1000	760	5.0	14.0
11	6.11	5	864	700	3.0	9.5
12	4.13	6	870	720	3.0	8.5
13	6.24	8	852	760	3.5	11.0
14	8.80	11	848	760	3.5	12.5
15	20.04	42	939	760	5.5	18.0
16	8.68	22	970	780	4.5	13.5
17	19.70	84	955	740	7.5	15.5
18	17.60	32	965	740	6.5	17.0
19	4.30	4	795	720	3.5	8.0

NI - Número de canais de 1ª ordem (1/km²)

H - Altitude do ponto mais alto da bacia (montante) (m)

h - Altitude do ponto mais baixo da bacia (jusante) (m)

Lb - Comprimento máximo da bacia, medido da montante à jusante, paralelamente ao canal de drenagem principal (km)

P - Perímetro da bacia (km)

Quanto ao índice Rh (relação de relevo), pode-se constatar pela Tabela 5.3 que seus valores variaram de 0.006 à 0.075.

As sub-bacias de número 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 13, 14, 16, 17 e 19, situam-se em sua maioria no arenito Botucatu, onde o relevo é de Colinas Amplas e Vales Abertos, com a presença dos solos AQ, LV-2 e LV-3 (textura are

nosa).

TABELA 5.2 - VALORES DE FREQUÊNCIA DE CANAIS DE PRIMEIRA ORDEM DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

SUB-BACIA	ÁREA (KM ²)	N ₁	F ₁
1	6.46	13	2.01
2	8.78	9	1.02
3	11.70	13	1.11
4	16.26	14	0.86
5	6.55	6	0.91
6	8.66	9	1.03
7	2.58	2	0.77
8	16.11	69	4.28
9	4.82	20	4.14
10	9.07	25	2.75
11	6.11	5	0.31
12	4.13	6	1.45
13	6.24	8	1.28
14	8.80	11	1.25
15	20.04	42	2.09
16	8.68	22	2.53
17	19.70	84	4.26
18	17.60	32	1.81
19	4.30	4	0.93

As sub-bacias de número 8, 9, 10, 11, 12, 15 e 18, estão associadas ao contato entre os Planaltos de São Carlos e de Santana, junto aos basaltos e arenitos da Formação Serra Geral, e aos arenitos conglomeráticos e captações lateríticas da Formação Itaqueri. Nesta área, as unidades pedológicas predominantes são PV-5, Li-3, LRd, LV-5 e LV-6. O relevo desta área se caracteriza por apresentar Morros Isolados, Inselbergs e Formas Ruiniformes.

Estudos realizados por Schumm (1956), Morisawa (1962), Christofolletti e Machado (1977), mostram que a relação de relevo reflete as características litológicas e geomorfológicas das áreas drenadas pelas bacias hidrográficas.

Os valores do Índice de Circularidade (C) são apresentados na Tabela 5.4. Os dados mostram um valor

mínimo de 0.47 e um valor máximo de 0.96.

TABELA 5.3 - VALORES DE RELAÇÃO DE RELEVO (RH) NAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

SUB-BACIA	PARÂMETRO MORFOMÉTRICO				Rh
	H (m)	h (m)	H - h (m)	Lb (m)	
1	805	720	85	4000	0.021
2	822	720	102	4500	0.022
3	842	720	122	7000	0.017
4	855	732	123	7100	0.017
5	839	740	99	4600	0.021
6	870	740	130	4500	0.028
7	800	760	40	2500	0.016
8	1030	780	250	5500	0.045
9	1005	780	225	3000	0.075
10	1000	760	240	5000	0.048
11	864	700	164	3000	0.054
12	870	720	150	3000	0.050
13	852	760	92	3500	0.026
14	848	760	88	3500	0.025
15	939	760	179	5500	0.032
16	970	780	90	4500	0.020
17	955	740	215	7500	0.028
18	965	740	255	6500	0.034
19	795	720	75	3500	0.021

As sub-bacias mais alongadas, ou seja, as de números 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 13, 14 e 16, estão na sua maioria situadas no Planalto de Santana, onde o arenito Botucatu e as unidades pedológicas AQ, LV-2 e LV-3 são predominantes. Já as sub-bacias de números 1, 7, 8, 11, 12, 15, 17, 18 e 19, com menor grau de alongamento, estão na sua maioria situadas no contato entre os Planaltos de São Carlos e de Santana (Cuestas Basálticas), onde a Formação Serra Geral e a Formação Itaqueri, e os solos Li-3, LV-5, LV-6 e PV-5 são predominantes. Nesta área, o relevo é do tipo Morros Isolados, Inselbergs e Formas Runiformes.

Um estudo realizado por Christofoletti (1970) mostrou que as bacias que apresentam baixos índices de circularidade estão relacionadas à controle morfoestrutural. O

autor afirma que as bacias nestas condições, no Planalto de Poços de Caldas, acomodam-se em zonas de falhamentos acentuados. O mesmo autor encontrou evidências da influência litológica na forma da bacia, como no caso da relação entre altos valores de C e afloramentos vulcânicos.

TABELA 5.4 - VALORES DO ÍNDICE DE CIRCULARIDADE (C) DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

SUB-BACIA	PARÂMETRO MORFOMÉTRICO			C
	ÁREA (KM ²)	P (KM)	A _{cp} (KM ²)	
1	6.46	10.5	8.8	0.73
2	8.78	13.0	13.5	0.67
3	11.70	17.5	24.5	0.47
4	16.26	19.0	28.8	0.56
5	6.55	11.5	10.5	0.62
6	8.66	12.5	12.5	0.69
7	2.58	6.1	2.9	0.88
8	16.11	17.5	24.5	0.65
9	4.82	9.0	6.4	0.75
10	9.07	14.0	15.6	0.58
11	6.11	9.5	7.2	0.84
12	4.13	8.5	5.7	0.75
13	6.24	11.0	9.6	0.65
14	8.80	12.5	12.5	0.70
15	20.04	18.0	25.9	0.77
16	8.68	13.5	14.5	0.59
17	19.00	15.5	19.7	0.96
18	17.60	17.0	23.1	0.76
19	4.30	8.0	5.1	0.84

Morisawa (1962) também mostrou em trabalho realizado nos Apalaches americanos, que o controle litotectônico influencia o índice de circularidade da bacia. Iguais resultados foram obtidos por Zavoianu (1985), na Romênia.

Conhecidos os valores de F_l, R_h e C de todas as sub-bacias, foi calculado então o fator topográfico (FTP). A Tabela 5.5 contém os dados relativos a FTP, para as 19 sub-bacias analisadas.

TABELA 5.5 - VALORES DO FATOR TOPOGRÁFICO DAS SUB-BACIAS
HI DROGRÁFICAS

SUB-BACIA	PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS			FTP
	C	Rh	FI	
1	0.73	0.021	2.01	0.030
2	0.67	0.022	1.02	0.015
3	0.47	0.017	1.11	0.008
4	0.56	0.017	0.86	0.008
5	0.62	0.021	0.91	0.011
6	0.69	0.028	1.03	0.019
7	0.88	0.016	0.77	0.010
8	0.65	0.045	4.28	0.125
9	0.75	0.075	4.14	0.232
10	0.58	0.048	2.75	0.076
11	0.84	0.054	0.31	0.014
12	0.75	0.050	1.45	0.054
13	0.65	0.026	1.28	0.021
14	0.70	0.025	1.25	0.021
15	0.77	0.032	2.09	0.051
16	0.59	0.020	2.53	0.030
17	1.02	0.028	4.26	0.121
18	0.76	0.034	1.81	0.046
19	0.84	0.021	0.93	0.016

Pela Tabela 5.5 pode-se verificar uma grande dispersão entre os dados, diferenciando de maneira clara as sub-bacias da área de estudo. Os valores máximo e mínimo são respectivamente 0.008 e 0.232, com um coeficiente de variação (CV) igual a 1.25.

Analisando-se a tabela, notamos uma considerável discriminação entre as sub-bacias hidrográficas a partir do uso do FTP. Os resultados por nós obtidos são coerentes com aqueles obtidos por Morisawa (1962), que utilizou o mesmo fator para a melhor diferenciação topográfica de bacias hidrográficas para fins hidrológicos.

5.4 - COEFICIENTE MÉDIO DE IMPERMEABILIDADE

O coeficiente médio de impermeabilidade (CMI) de cada sub-bacia, foi calculado a partir do fator

médio de impermeabilidade (X_{FI}) dos grupos hidrológicos de solos que ocupam cada sub-bacia.

A Tabela 5.6 apresenta os valores do fator médio de impermeabilidade utilizados para a classificação das unidades pedológicas da área de estudo.

TABELA 5.6 - VALORES DO FATOR MÉDIO DE IMPERMEABILIDADE (X_{FI}) DOS GRUPOS HIDROLÓGICOS DE SOLOS DA BACIA DO RIBEIRÃO DO FEIJÃO

UNIDADE PEDOLÓGICA	E_p	E_{AN}	E_A	E_I	FI	X_{FI}
AQ	2	2	1	1	6	6.8
LE-2	1	1	2	2	6	
LV-2	1	2	2	2	7	
LV-3	1	2	2	2	7	
LV-5	1	1	3	3	8	
LRd	2	1	4	3	10	10.6
TE-2	2	1	4	4	11	
LV-6	1	2	4	4	11	
PV-5	5	3	4	4	16	17.5
Li-3	7	7	3	2	19	

Com base nos valores de X_{FI} , foram identificados três grupos hidrológicos de solos (A, B e C), como pode ser notado na Tabela 5.6. O Grupo A é composto por solos com baixo potencial de escoamento hídrico, apresentando valores baixos de X_{FI} . Neste caso inserem-se as unidades AQ, LE-2, LV-2, LV-3 e LV-5 ou seja, os Latossolos arenosos e as Areias Quartzosas. Este grupo apresenta valor de $X_{FI} = 6.8$.

O Grupo B é composto por solos com médio potencial de escoamento hídrico, apresentando valores médios de X_{FI} , é composto pelas unidades LRd, TE-2 e LV-6, ou seja, Latossolos Roxos de textura argilosa, Terra Roxa Estruturada e Latossolos de Textura média. Este grupo apresenta valor de $X_{FI} = 10.6$.

O Grupo C é composto pelas unidades pedológi

cas com maior potencial de gerar escoamento do tipo hortoniano e conseqüentemente com menor potencial de retenção hídrica. Os solos pertencentes a este grupo são os seguintes: PV-5 (Podzólico Vermelho-Amarelo) e Li-3 (Solos Litólicos). O escoamento hortoniano, segundo Hillel (1980), é o escoamento superficial originando quando a taxa de precipitação supera a capacidade de absorção horizontal superficial do solo. Neste grupo, o valor de $X_{F1} = 17.5$. Com base nos grupos formados, elaborou-se o mapa dos grupos hidrológicos de solos da área de estudo (Figura 5.3).

Resultados obtidos por Zaslowsky e Rugowski (1969), mostram que os solos com horizonte superficial arenoso e horizonte subsuperficial argiloso (solos podzolizados) apresentam alto potencial de escoamento, tanto o hortoniano como o escoamento lateral interno (subsuperficial). Também é o caso dos solos litólicos.

Os resultados publicados por Jorge e Prado (1988) mostraram que a taxa de infiltração da Terra Roxa Estruturada, ao final de 120 minutos de precipitação, foi de 21 mm/min, enquanto neste mesmo tempo, os solos podzólicos apresentaram valores abaixo dos 7 mm/min.

No nosso estudo, a unidade Terra Roxa situa-se no Grupo B e os solos podzólicos no Grupo C.

Os resultados de Jorge et al. (1988), efetuando o mesmo tipo de experimento, mostraram que os Latossolos Vermelho-Escuro de textura argilosa (semelhante ao LV-6) apresentaram taxa de infiltração de 2.7 mm/min, enquanto a unidade AQ apresentou um valor de 8.1 mm/min. Já a unidade LV-5, apresentou uma taxa de infiltração de 13.0 mm/min. No nosso trabalho, as unidades AQ e LV-5 pertencem ao Grupo A, enquanto a unidade LV-6 pertence ao Grupo B.

Quanto à classificação hidrológica dos solos, os resultados apresentados nesta dissertação, estão coerentes com aqueles apresentados no Handbook of Hydrology (Chow, 1964), os quais mostram que as unidades pedológicas podem ser agregados em grupos hidrológicos, segundo diferentes parâmetros do solo. Chow (1964) apresenta uma classificação estruturada em 4 grupos (A, B, C e D), utilizada em estudos de bacias hidrográficas pelo Soil Conservation Service (SCS) dos E.U.A. No nosso trabalho de mestrado, os resultados mostraram a possibilidade de classificar os so

los em 3 grupos (A, B e C). Tais grupos não correspondem estritamente aos grupos de Chow (1964), uma vez que não consideramos neste estudo os solos hidromórficos, pois no trabalho de Oliveira e Prado (1964) estes solos não foram estudados com o mesmo detalhe das outras unidades pedológicas. Ressaltamos que, no caso de estudos a serem realizados em outras áreas do Brasil, poder-se-ia incluir o Grupo D, que englobaria os diversos solos hidromórficos, os vertissolos e outros.

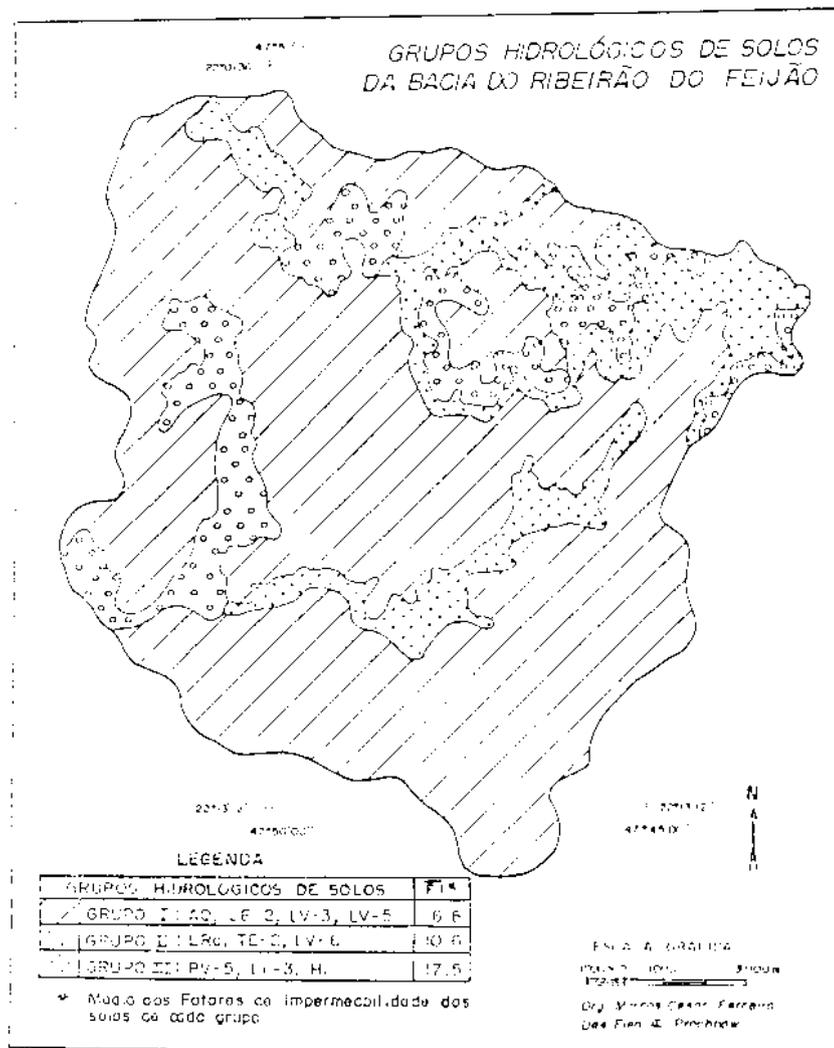


Fig. 5.3 - Mapa dos grupos hidrológicos de solos da área de estudo.

Em seguida à obtenção dos valores de X_{FI} para as unidades pedológicas da área de estudo, foram calculados

lados os valores de CMI para as sub-bacias hidrográficas da Bacia do Ribeirão do Feijão. Os valores de CMI são apresentados na Tabela 5.7.

TABELA 5.7 - VALORES DO COEFICIENTE MÉDIO DE IMPERMEABILIDADE (CMI) DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

SUB-BACIA	% EM ÁREA OCUPADA POR GRUPO HIDROLÓGICO DE SOLO			CMI
	I	II	III	
1	100.0	-	-	6.8
2	100.0	-	-	6.8
3	100.0	-	-	6.8
4	100.0	-	-	6.8
5	100.0	-	-	6.8
6	100.0	-	-	6.8
7	100.0	-	-	6.8
8	41.1	8.5	50.4	12.5
9	37.0	31.6	31.4	11.2
10	71.3	15.4	13.3	8.8
11	65.1	34.9	-	8.1
12	70.5	29.5	-	7.9
13	75.4	24.6	-	7.7
14	82.1	17.9	-	7.4
15	79.6	-	28.4	8.9
16	57.9	40.1	-	8.1
17	56.1	11.0	32.9	10.7
18	81.6	9.7	8.7	8.0
19	100.0	-	-	6.8

5.5 - COEFICIENTE DE COBERTURA VEGETAL

5.5.1 - GEOCODIFICAÇÃO DA IMAGEM TM-LANDSAT

A Figura 5.4 mostra o mapa dos pontos de controle, utilizado para a geocodificação da imagem da área de estudo. Os valores do resíduo dos pontos de controle estão na Tabela 5.8. A Figura 5.5 (a e b) mostra como exemplo, a banda TM-3 geocodificada (a) e a banda TM-3 não geocodificada (b). Analisando-se as duas bandas e a Tabela 5.8, pode-se observar que o registro de imagens proporcionou uma melhora na qualidade geométrica da imagem, aproximando-a ao máximo das coordenadas UTM da base cartográfica.

ca do trabalho.

TABELA 5.8 - VALORES DE RESÍDUO (EM MÓDULO) PARA OS PONTOS DE CONTROLE UTILIZADOS NA GEOCODIFICAÇÃO DA IMAGEM TM-LANDSAT

PONTO	RESÍDUO EM MÓDULO PARA CADA PONTO DE CONTROLE	
	RES X	RES Y
1	0.5	0.9
2	0.7	0.8
3	0.5	2.2
4	1.9	0.2
5	3.1	2.4
6	2.4	2.5
7	5.9	3.8
8	1.1	2.2
9	0.1	0.6

Erro Interno para os pontos utilizados no mapeamento:

Horizontal: 3.234

Vertical: 2.051

Total: 3.829

Estudos efetuados por Mitsou li et al. (1990), já mostraram que utilizando-se ao menos 9 pontos de controle, polinômio de 2º grau e o Registro de Imagens do SITIM, obtêm-se bons resultados na geocodificação das imagens TM-Landsat.

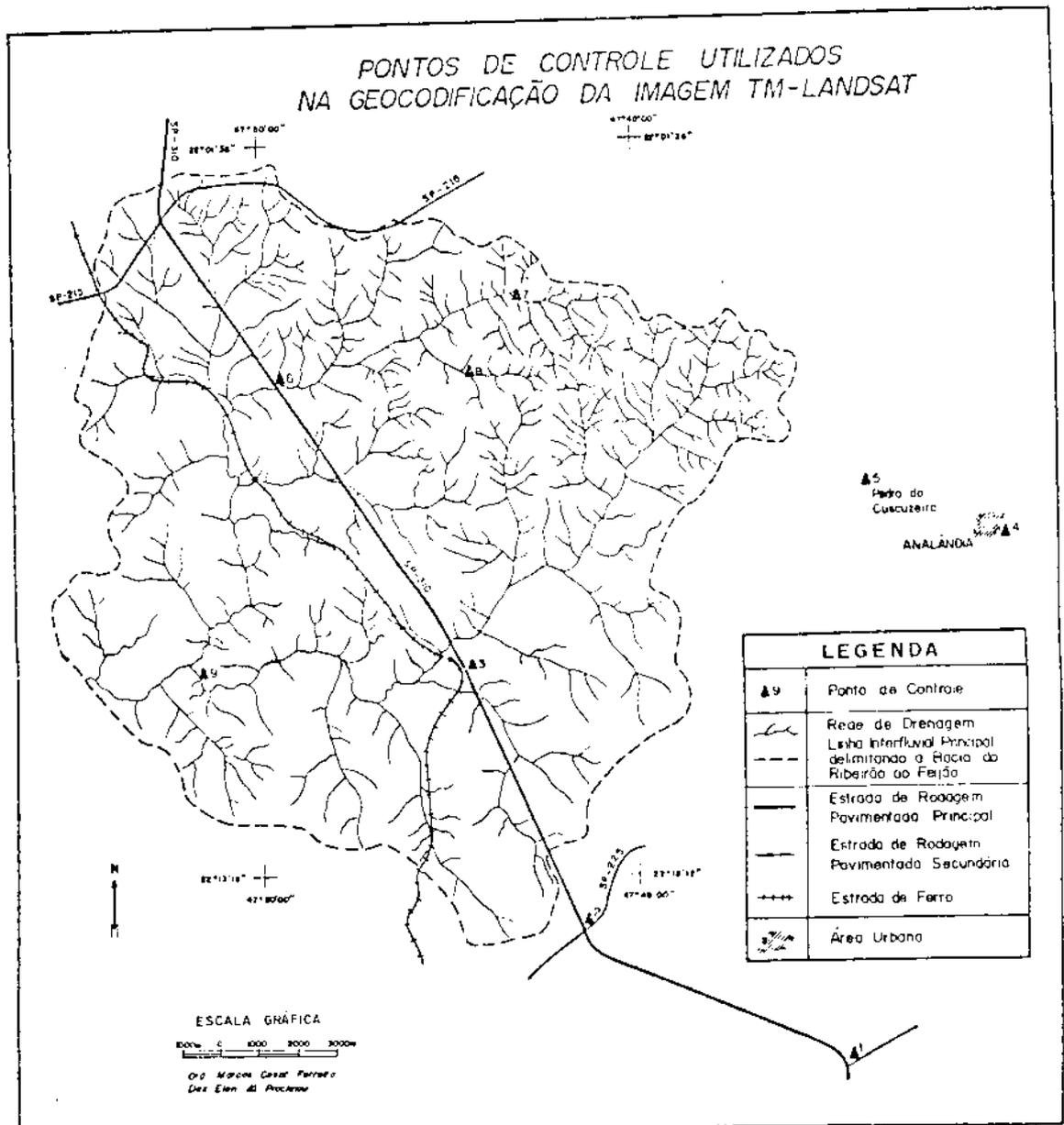
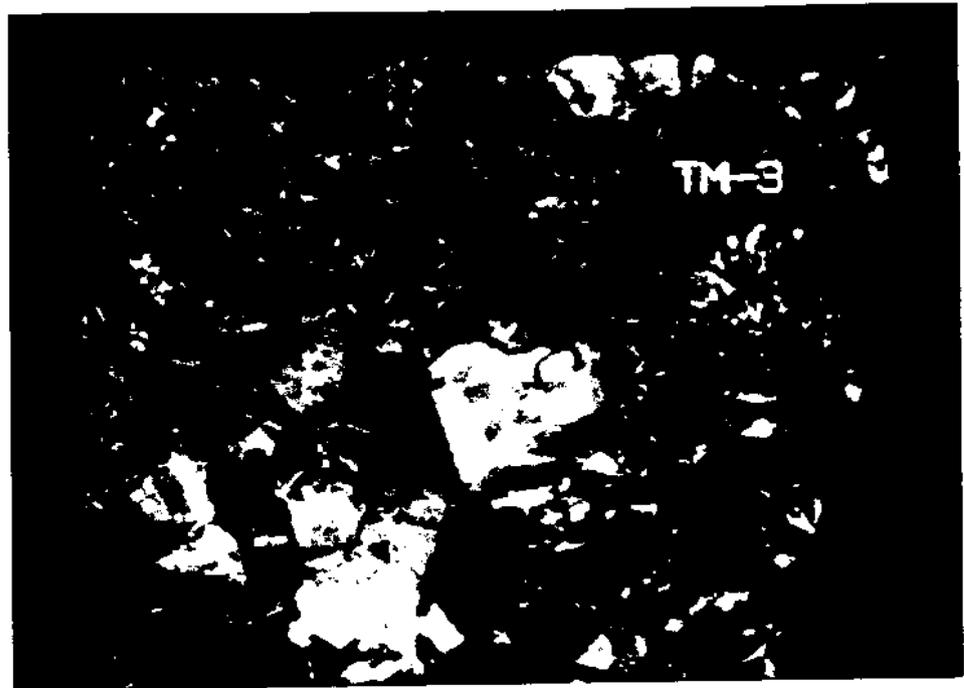


Fig. 5.4 - Mapa dos pontos de controle utilizados para a geocodificação.



(A)



(B)

Fig. 5.5 - A banda TM-3 geocodificada (A) e a mesma banda não geocodificada (B).

5.5.2 - ANÁLISE DAS PRINCIPAIS COMPONENTES

As principais componentes PC1, PC2 e PC3, são apresentadas respectivamente nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8.

Após selecionadas as 3 principais componentes, foi gerada a composição colorida, utilizando-se para isso a função COR-CANAL, existente no módulo PAINEL, do SITIM-150 (Figura 5.9).

Nesta fase de trabalho foram testadas várias combinações entre as 3 principais componentes PC1, PC2 e PC3, e os 3 canais coloridos na Unidade de Visualização de Imagens do sistema, ou seja, R, G e B. Em função da melhor diferenciação cromática entre os alvos e da melhor definição visual da imagem colorida, concluiu-se pela seguinte associação entre componente e canal colorido: PC1 (R), PC2 (G) e PC3 (B).

Após a definição da melhor combinação componente-canal colorido, foi realizada a otimização do contraste através do balanceamento entre as cores R, G e B, utilizando-se a função MANIPULAÇÃO DE CONTRASTE, existente no módulo OPERAÇÕES NO VISUALIZADOR, do SITIM-150.

A composição colorida foi escolhida segundo a seguinte relação entre canal colorido, ganho e off-set:

	<u>GANHO</u>	<u>OFF-SET</u>
R	1.80	10.0
G	2.00	20.0
B	1.60	10.0

5.5.3 - ÍNDICE PERPENDICULAR DE VEGETAÇÃO DAS CLASSES DE USO DA TERRA

A Figura 5.10 apresenta o mapa das amostras de campo, correspondentes às 9 classes de uso da terra presentes na bacia. Foram identificadas 22 amostras, pré-classificadas e distribuídas quantitativamente da seguinte maneira: citrus (1), cana-de-açúcar (4), pasto limpo (2), pasto sujo (2), eucaliptus sp. (3), cerrado (2), campo cerrado (2), pinus sp. (1) e floresta tropical (5).

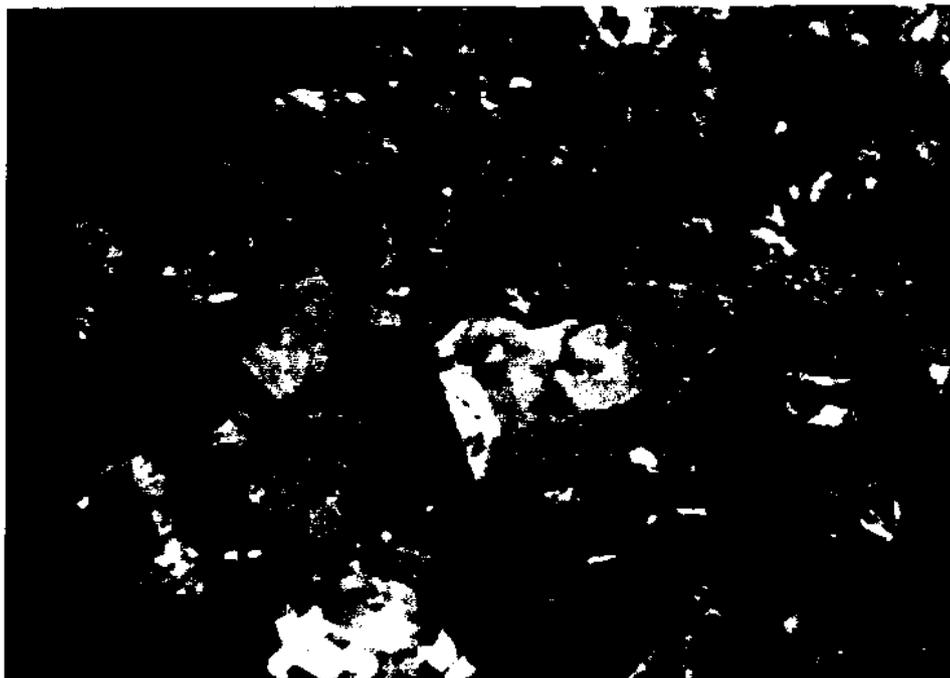


Fig. 5.6 - Principal componente 1 (PC1)

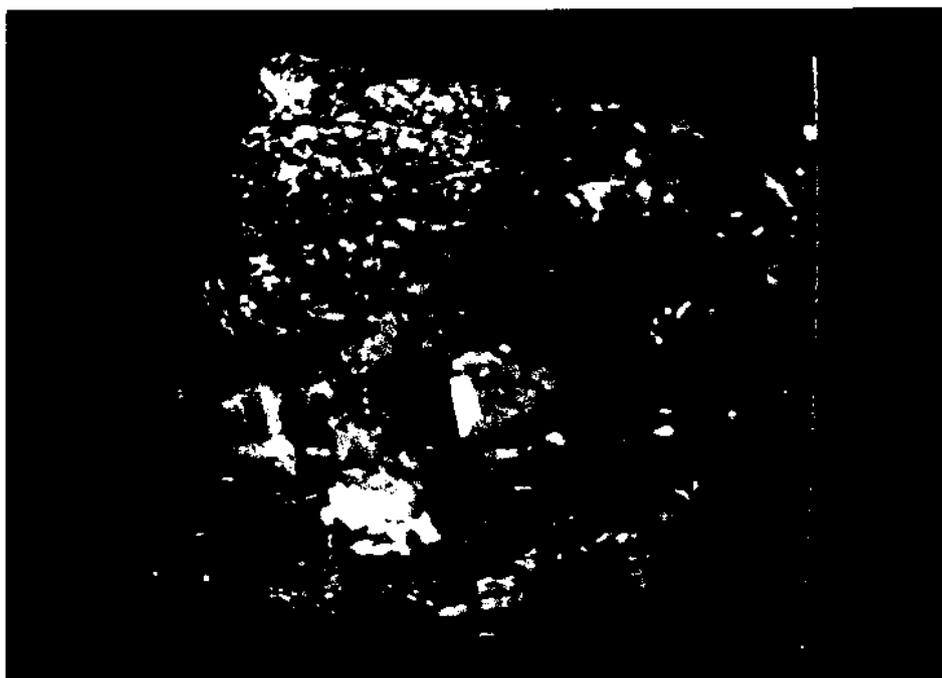


Fig. 5.7 - Principal componente 2 (PC2)



Fig. 5.8 - Principal componente 3 (PC3)

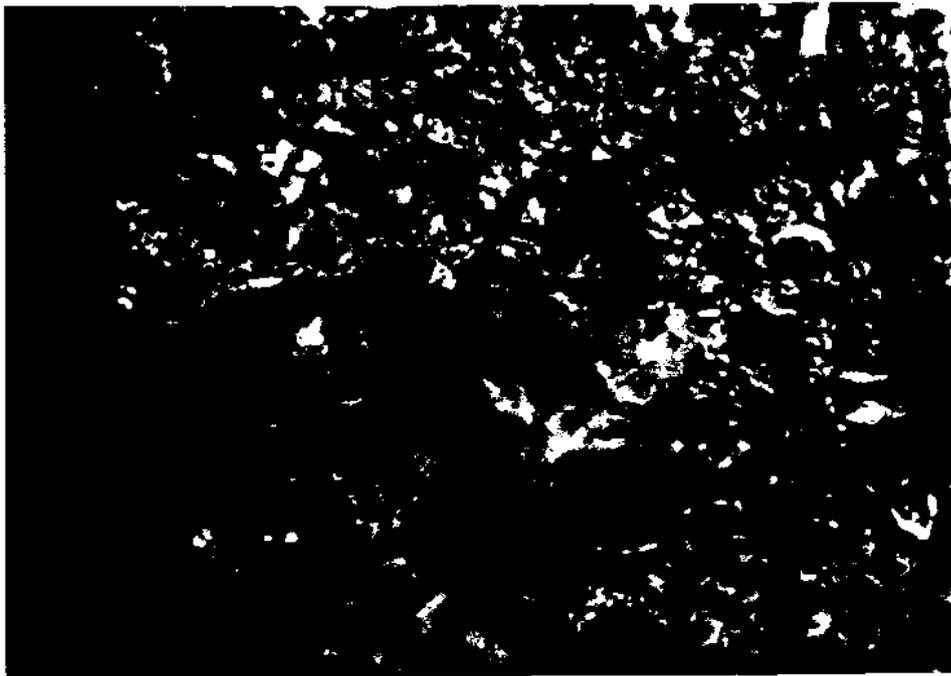


Fig. 5.9 - Composição colorida (PCI/R, PC2/G, PC3/B)

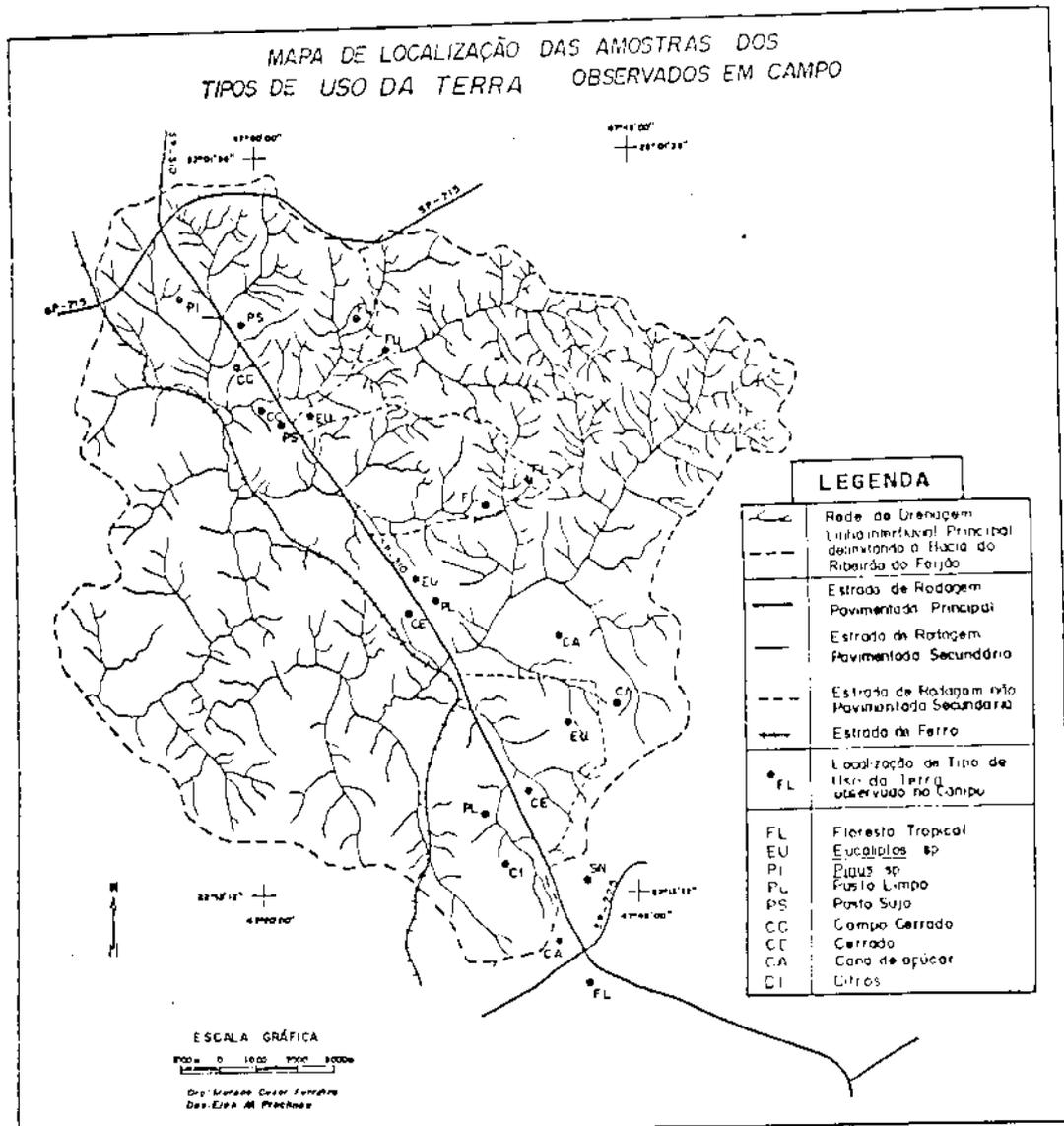


Fig. 5.10 - Mapa de localização das amostras pré-classificadas em campo.

No sentido de verificar a pureza espectral das amostras de campo, utilizou-se o classificador paramétrico bayesiano MAXVER (máxima verossimilhança), através do qual foi gerada a matriz de classificação (Tabela 5.9).

Pela Tabela 5.9, pode-se constatar que a matriz de classificação mostrou um desempenho médio de 86.67 %, sendo que a abstenção média situou-se na faixa dos 5.26 % a confusão média permaneceu em torno de 8.07 %.

Observou-se que as classes Floresta Tropical Latifoliada, Pasto Sujo, Pinus sp. e Eucaliptus sp., apresentaram uma taxa de coincidência inferior a 85 %, respectivamente 76.8 % e 84.5 %, 71.9 % e 81.8 %. Para a classe Floresta Tropical Latifoliada, verificou-se que a maior confusão ocorreu com a classe Eucaliptus sp., ou seja, 11.1 % dos pixels. Quanto à classe Pasto Sujo, constatou-se uma confusão mais significativa com a classe Cerrado, ou seja, 11.7 % dos pixels. A classe Pinus sp. apresentou maior confusão com a classe Eucaliptus sp., da ordem de 14.9 %. A classe Eucaliptus sp., por sua vez, apresentou maior confusão com a classe Pinus sp., da ordem de 10.3 %.

As demais classes de uso da terra apresentaram uma consistência acima dos 85 %, denotando portanto uma homogeneidade espectral das amostras situada em um nível acima do aceitável. A classe Pasto Limpo apresentou uma consistência de 94.1 %, Cerrado 89.1 %, Campo Cerrado 94.9 %, Citrus 94.5 e Cana de Açúcar 92.5 %. Cabe ressaltar que a classe Citrus foi interpretada utilizando-se informações posteriores obtidas em campo, pois na tomada da imagem, o plantio estava em fase de implantação. Desta forma, o padrão espacial e espectral da imagem correspondia ao solo nu arenoso (azul muito claro, Fig. 5.9), que se diferenciava do padrão espectral do solo nu relativo a cana em repouso (azul claro e azul escuro, Fig. 5.9).

No sentido de se obter os valores do Índice Perpendicular de Vegetação (IPV) das classes de uso da terra, inicialmente foram coletados 20 amostras de valores de nível de cinza do solo nu, corrigidos em relação à atmosfera, nas bandas TM-3 e TM-4. Esta operação foi efetuada com o auxílio da função LEITURA DE PIXEL, existente no SITIM-150. Os dados são apresentados na Tabela 5.10.

TABELA 5.9 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO MAXVER DAS AMOSTRAS DAS CLASSES DE USO DA TERRA DA
ÁREA DE ESTUDO

CLASSES	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 CITRUS (CI)	5.5	94.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2 PASTO LIMPO (PL)	5.6	0.0	94.1	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3 PASTO SUJO (PS)	3.8	0.0	0.0	84.5	0.0	0.0	0.0	0.5	0.9	11.7
4 CAMPO CERRADO (CC)	4.2	0.7	0.0	0.2	94.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5 CANA-DE-AÇÚCAR (CA)	5.9	0.0	0.0	0.4	0.0	92.5	0.0	1.2	0.0	0.0
6 EUCALIPTO (EU)	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	81.8	10.3	3.3	0.0
7 PINUS (PI)	3.9	0.0	0.0	0.2	0.0	1.8	14.9	71.9	7.3	0.0
8 FLORESTA TROPICAL (FL)	8.2	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	11.1	2.1	76.8	0.0
9 CERRADO (CE)	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	89.1

abstenção média - 5.26
 confusão média - 8.07
 desempenho médio - 86.67

TABELA 5.10 - VALORES DE NÍVEL DE CINZA DAS AMOSTRAS DO SOLO NÚ NAS BANDAS TM-3 E TM-4

AMOSTRA Nº	VALORES DIGITAIS NA IMAGEM TM-LANDSAT	
	TM-3	TM-4
1	52	45
2	47	41
3	52	43
4	49	44
5	49	43
6	43	35
7	31	27
8	35	31
9	35	29
10	35	32
11	37	35
12	39	35
13	45	40
14	35	28
15	49	42
16	51	49
17	51	45
18	43	36
19	65	53
20	45	40

Com base nestes dados, efetuou-se uma análise de regressão linear entre os valores de nível de cinza do solo nú na banda TM-3 e na banda TM-4. O coeficiente de correlação obtido foi $R^2 = 0.96$ e a equação da reta foi definida pela seguinte expressão: $Y = 1.92 + 0.82x$.

Com base na análise de regressão linear e na reta obtida, foi construído o plano de Kauth, definido pelas bandas TM-3 e TM-4 e pela linha de reflectância do solo nú (Figura 5.11).

A Tabela 5.11 traz os valores médios de nível de cinza das classes de uso da terra, nas bandas TM-3 e TM-4.

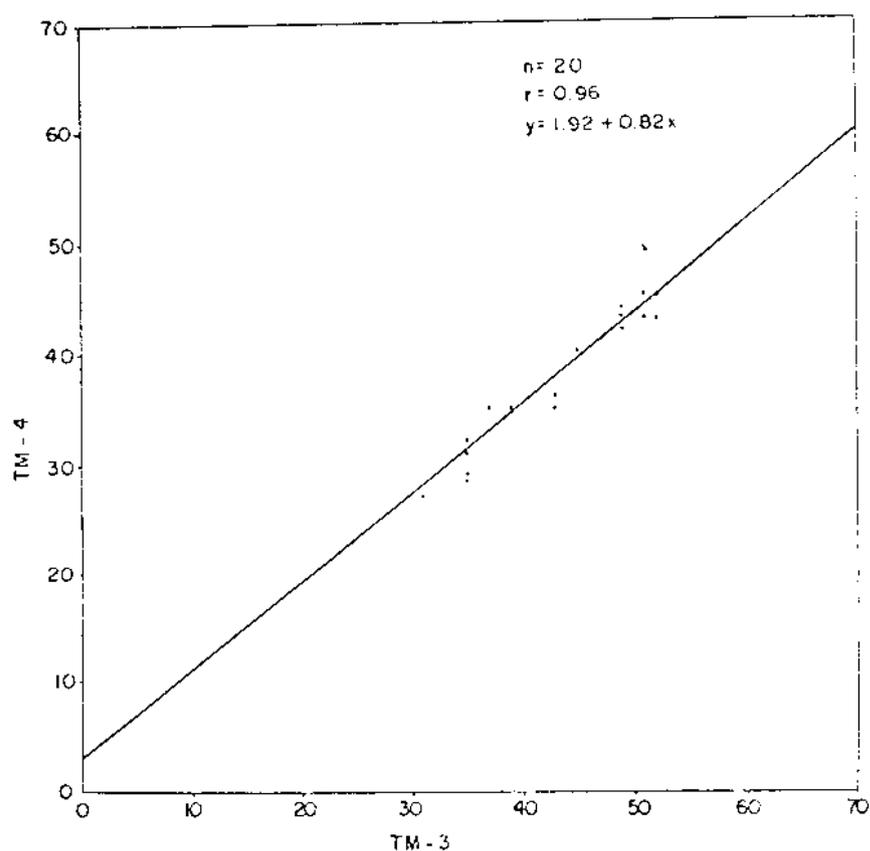


Fig. 5.11 - Plano de Kauth definido pelas bandas TM-3 e TM-4 e pela linha de reflectância do solo n \hat{u} .

TABELA 5.11 - VALORES MÉDIOS DE NÍVEL DE CINZA DAS CLASSES DE USO DA TERRA

CLASSES	N $^{\circ}$ DE PIXELS	TM-3	TM-4	IPV
Pasto Limpo	1188	31.5	37.6	8.06
Campo Cerrado	756	25.1	32.5	8.54
Pasto Sujo	266	23.6	36.2	10.00
Cerrado	918	14.5	33.0	13.89
Cana de Açúcar	957	22.7	38.1	14.07
Pinus sp	1295	12.9	34.2	17.31
Floresta Tropical	325	13.4	34.3	17.32
Eucaliptus sp	475	15.0	38.9	17.70

Na Tabela 5.11 não constam os valores da classe Citrus, visto que na época do imageamento o solo estava sendo preparado para o plantio das mudas e desta maneira optamos por não incluir esta classe no cálculo do IPV.

A Tabela 5.12 apresenta os resultados do cálculo do IPV para as classes de uso da terra. Pela tabela podemos notar a existência de três níveis de biomassa distinguidos pelos dados TM-LANDSAT na área de estudo.

O nível I, caracteriza-se pelas classes Pasto Limpo (PL), Campo Cerrado (CC) e Pasto Sujo (PS) (com valores respectivamente de 8.06, 8.54 e 10.80), apresentando uma baixa densidade de biomassa no terreno. O nível II engloba as classes Cerrado (CE) e Cana de Açúcar (CA), cujos valores de IPV são respectivamente 13.89 e 14.07, o que denota uma densidade média de biomassa. Finalmente o nível III, que inclui as classes Pinus sp., Floresta Tropical e Eucaliptus sp., com valores de IPV respectivamente de 17.31, 17.32 e 17.70, apresentando alta densidade de biomassa no terreno.

TABELA 5.12 - VALORES DE IPV DAS CLASSES DE USO DA TERRA

CLASSE	INTERVALOS DE IPV	CLASSES DE IPV
PASTO LIMPO, CAMPO CERRADO, PASTO SUJO	8.06 - 13.89	I
CANA DE AÇÚCAR E CERRADO	13.89 - 17.31	II
PINUS sp., FLORESTA TROPICAL e EUCALIPTUS sp.	17.31 - 17.70	III

Tucker (1977), estudando os níveis de biomassa total que podem ser discriminados espectralmente, afirmou que apesar da região do infra-vermelho fotográfico ser a melhor faixa espectral para distinguir três níveis de classes de biomassa, não possibilita a distinção de quatro ou mais níveis, principalmente em altos teores de biomassa total.

Os resultados obtidos por Epiphânio e For

maggio (1990), mostraram que a curva IPV x IAF, apresenta um comportamento logarítmico onde, a partir de determinado nível elevado de biomassa, o crescimento do IAF não é detectado na mesma proporção pelo IPV, ocorrendo neste caso uma saturação nos valores de IPV. As conclusões apresentadas por estes autores explicam os resultados obtidos nesta dissertação, onde observa-se que as classes Pinus sp., Floresta Tropical e Eucaliptus sp. (Tabela 5.12), apresentam valores muito próximos de IPV (17.31, 17.32 e 17.70, respectivamente).

Devemos considerar nesta discussão a interferência que os fatores ambientais podem exercer nos valores de IPV obtidos para as classes de uso da terra da área de estudo. Colwell (1984) mostrou que a reflectância do substrato pode interferir nos índices de vegetação. Embora Elvidge e Lyon (1985) afirmam que os índices de vegetação ortogonais (como é o caso do IPV) sofram menor influência do substrato, devemos ressaltar que este fator pode ter influenciado os resultados da Tabela 5.12.

Por exemplo, a Floresta Tropical ocorre na área junto a solos pouco profundos situados em relevo inclinado, ocasionalmente em afloramentos rochosos ou blocos rolados da Cuesta Basáltica, enquanto o Eucaliptus sp. e o Pinus sp. ocorrem em solos arenosos profundos e relevo plano. Esta situação pode ter influenciado os valores de IPV da Floresta, uma vez que na época do imageamento (julho) as florestas naturais podem apresentar um IAF menor que as florestas artificiais, expondo desta maneira o substrato a radiação solar, o que segundo Colwell (1974) pode aumentar a componente do albedo do solo, produzindo valores menores de IPV para a Floresta Tropical.

Também devemos considerar os resultados de Suits (1972) e Kimes (1984) os quais afirmam que a morfologia foliar pode interferir na resposta espectral da vegetação, influenciando diferentemente nos IPVs das classes Pinus sp., Eucaliptus sp., Florestas, Cana-de-Açúcar e Pasto. Neste caso, há a necessidade de estudos detalhados procurando explicar esta relação, nas áreas tropicais.

Os resultados de IPV para a classe Floresta Tropical, podem ter sofrido influência dos fatores ligados a geometria da iluminação da cena, os quais segundo resultados de Wardley (1984), podem interferir nos valores dos

índices de vegetação. Isto se deve ao fato das Florestas ocorrerem principalmente junto às Cuestas Basálticas, que são unidades caracterizadas por forte inclinação do relevo e sujeitas a influência do ângulo solar. No entanto, estas influências são maiores nas bandas individuais que nos índices de vegetação.

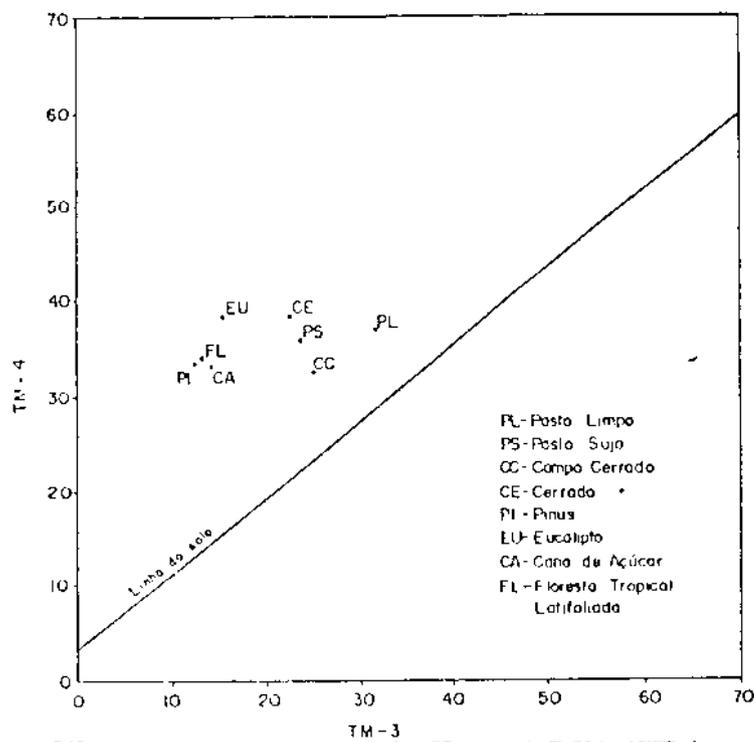


Fig. 5.12 - Posicionamento das amostras das classes de uso da terra no plano de Kauth.

A utilização do IPV neste trabalho visou atingir uma classificação hidrológica do uso da terra baseada na densidade de biomassa verde. Chow (1964) apresentou uma classificação do uso da terra para fins hidrológicos, muito utilizada nos EUA, baseada nas características de cobertura do solo das culturas durante o ano. Este autor sugeriu uma classificação hidrológica do uso da terra que pode ser adaptada da seguinte maneira:

- CLASSE I - Culturas de Ciclo Curto
- CLASSE II - Pastagens e Vegetação Arbustiva
- CLASSE III - Culturas de Ciclo Longo
- CLASSE IV - Florestas Naturais e Artificiais

Comparando-se os dados da Tabela 5.12 com a classificação proposta por Chow (1964), pudemos agrupar em termos hidrológicos, o uso da terra e associar tais grupos aos valores médios de IPV, conforme a Tabela 5.13.

TABELA 5.13 - GRUPOS HIDROLÓGICOS DE USO DA TERRA SEGUNDO O IPV E A CLASSIFICAÇÃO DE CHOW (1964)

GRUPO HIDROLÓGICO DO USO DA TERRA	CLASSES DE USO DA TERRA	IPV
I. Culturas de Ciclo Curto	Arroz, Milho, Feijão, Algodão, Amendoim e outros.	*
II. Pastagem, Vegetação Arbustiva	Pasto Limpo, Pasto Sujo, Campos.	10.53
III. Culturas de Ciclo Longo	Cana-de-Açúcar, Citrus, Café.	14.89
IV. Florestas Naturais e Artificiais	Florestas Tropicais, Pinus, Eucaliptus, Cerrados.	16.30

* Grupo Hidrológico não constatado na área de estudo.

A classificação proposta na Tabela 5.13 procurou incluir os diversos grupos de culturas e florestas que normalmente ocorrem em áreas tropicais. O Grupo I, culturas anuais, não foi detectado na área de estudo e portanto não foram analisados o seu valor médio de IPV. Desta maneira, foram utilizados para o cálculo do coeficiente médio de cobertura vegetal (CCV), os Grupos II, III e IV, os quais apresentaram respectivamente os seguintes valores médios de IPV: 10.53, 14.89 e 16.30.

Devemos ressaltar que é oportuna a continuidade de pesquisas que tenham como objetivo o estudo do comportamento médio anual do IPV de diversas culturas existentes no país, no sentido de identificar com maior precisão um índice quantitativo para referência hidrológica do uso da terra. Por outro lado, é cabível também um estudo que avalie o desempenho dos diversos índices de vegetação em

relação ao comportamento hidroológico das culturas.

5.5.4 - MAPEAMENTO DOS GRUPOS HIDROLÓGICOS DO USO DA TERRA

A Figura 5.13 apresenta a imagem IV obtida pelo algoritmo da diferença normalizada (ND). Os pixels com valores baixos (alvos mais escuros), correspondem a uma baixa densidade de cobertura vegetal no solo e os pixels com valores altos de nível de cinza, ou seja, alvos mais claros, correspondem a uma alta densidade de cobertura vegetal no solo.

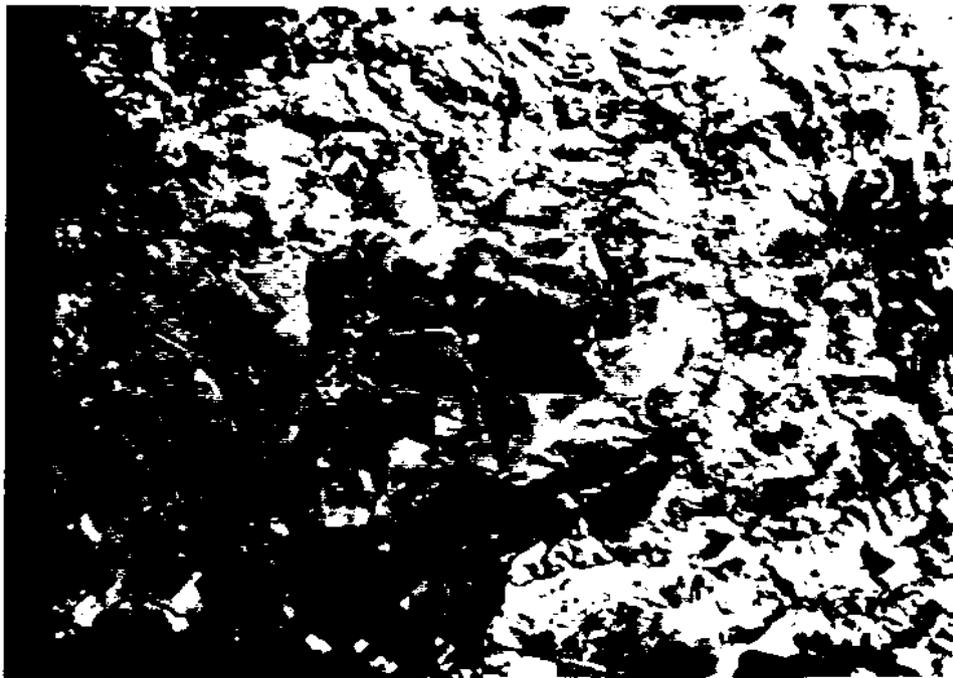


Fig. 5.13 - Imagem IV (Índice de Vegetação) obtida pela combinação linear entre as bandas TM-3 e TM-4.

Para a classificação temática, foram utilizadas as amostras das classes de uso da terra da Figura 5.10, as quais foram posicionadas no monitor sobre a imagem IV. Em uma etapa preliminar, esta imagem foi classificada em 4 classes de IPV, ou seja, três classes de biomassa verde e uma relativa ao solo nu (IPV igual a zero). Posteriormente, o solo nu foi classificado como cultura de ciclo longo (cana de açúcar e citros). Estas culturas, na data do imageamento estavam em fase de repouso ou plantio, corresponderam na imagem a um padrão relativo a ausência de cobertura vegetal. A imagem temática gerada através da classificação MAXVER é apresentada na Figura 5.14.



Fig. 5.14 - Imagem temática IV.

A Tabela 5.14 apresenta as classes cromáticas da Figura 5.14, e o correspondente agrupamento das classes.

TABELA 5.14 - LEGENDA DA IMAGEM TEMÁTICA 1U

CLASSE	COR	CLASSES DE USO DA TERRA
1	vermelho	Cana de açúcar e citros
2	azul claro	Pasto sujo, pasto limpo, c. cerrado
3	verde claro	Cana adulta e cerrado
4	verde escuro	Floresta Tropical, eucaliptus e pi nus sp.

Para elaboração do mapa dos grupos hidrológicos de uso da terra (Figura 5.15), as classes da Tabela 5.14 foram associadas aos grupos hidrológicos propostos por Chow (1964) e em seguida calculados os valores de \bar{X}_{IPV} de cada grupo.

5.5.5 - COEFICIENTE DE COBERTURA VEGETAL

A Tabela 5.15 apresenta para cada sub-bacia, as áreas e o percentual ocupado por grupo hidrológico de uso da terra. A Tabela 5.16 traz os coeficientes correspondentes a cada grupo, os quais denotam a magnitude em área relativa, ocupada por grupo em cada sub-bacia.

Os coeficientes da Tabela 5.16 foram lançados na Equação 4.4, mencionada abaixo:

$$CCV_j = \sum_{i=1}^n \bar{X}_{IPVi} \cdot S_i \quad (4.4)$$

onde:

\bar{X}_{IPVi} é o valor médio de IPV do grupo i .

S_i é o percentual em área ocupada pelo grupo i na sub-bacia j .



Fig. 5.15 - Mapa dos grupos hidrológicos do uso da terra.

TABELA 5.15 - ÁREA OCUPADA POR GRUPO HIDROLÓGICO DE USO DA TERRA EM CADA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA

SUB-BACIA Nº	ÁREA (KM ²) E PERCENTUAL EM ÁREA OCUPADA POR GRUPO HIDROLÓGICO DE USO DA TERRA					
	II		III		IV	
	ÁREA	%	ÁREA	%	ÁREA	%
1	2.45	37.9	1.24	19.2	2.97	42.9
2	4.80	54.6	2.85	32.4	1.05	13.0
3	3.47	29.6	8.14	69.5	0.09	0.9
4	7.42	52.3	6.31	41.8	1.36	5.9
5	1.73	26.4	4.82	73.6	-	-
6	3.23	37.2	4.21	44.0	0.12	14.3
7	2.09	81.1	0.49	18.9	-	-
8	10.99	68.2	1.73	10.7	3.39	21.1
9	4.05	84.0	0.34	7.0	0.43	9.0
10	5.12	56.4	2.93	32.2	1.02	11.4
16	6.18	71.1	2.29	26.3	0.21	2.6
17	15.16	76.9	2.13	11.1	2.41	14.0
18	12.94	73.5	2.56	14.5	2.10	12.0
19	2.96	68.8	0.24	5.5	1.18	25.7

TABELA 5.16 - VALORES DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO 4.4 UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DO CCV

VALORES DE COEFICIENTES DA Eq 4.4				
SUB-BACIA Nº	x_{IPV}^b 10.53	x_{IPV}^c 14.89	x_{IPV}^d 16.30	CCV
1	0.379	0.192	0.429	13.83
2	0.546	0.324	0.130	12.67
3	0.296	0.695	0.009	13.59
4	0.523	0.418	0.059	12.68
5	0.264	0.736	-	13.72
6	0.372	0.440	0.143	12.79
7	0.811	0.189	-	11.34
8	0.682	0.107	0.211	12.20
9	0.840	0.07	0.09	11.34
10	0.564	0.322	0.114	12.57
16	0.711	0.263	0.026	11.81
17	0.769	0.111	0.140	11.99
18	0.735	0.145	0.120	11.83
19	0.688	0.055	0.257	12.23

5.6 - REGIONALIZAÇÃO DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

5.6.1 - FORMAÇÃO DOS GRUPOS DE SUB-BACIAS

O processo de regionalização foi efetuado com base no agrupamento de sub-bacias similares segundo os parâmetros FTP, CMI e CCV utilizando-se a medida da distância euclidiana.

A partir dos dados da Tabela 5.17 foi efetuada a análise de agrupamento das sub-bacias, partindo-se das duas hipóteses estatísticas assumidas para a formação dos grupos, ou seja H_0 e H_1 . Estas hipóteses são mencionadas abaixo:

H_0 = as amostras das populações totais têm variâncias iguais, não existindo portanto diferenças significativas entre as mesmas, a não ser pelo acaso.

H_1 = afirma justamente o contrário, ou seja, as amostras têm variâncias diferentes, não devido ao acaso, mas sim por pertencerem a populações diferentes.

TABELA 5.17 - VALORES DOS PARÂMETROS FTP, CMI E CCV DAS 14 SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS UTILIZADAS NA REGIONALIZAÇÃO

SUB-BACIA	FTP ($\times 10^{-3}$)	CMI	CCV
1	30.0	6.8	13.83
2	15.0	6.8	12.67
3	8.0	6.8	13.59
4	8.0	6.8	12.68
5	11.0	6.8	13.72
6	19.0	6.8	12.79
7	10.0	6.8	11.34
8	125.0	12.5	12.20
9	232.0	11.2	11.34
10	76.0	8.8	12.57
16	30.0	8.1	11.81
17	121.0	10.7	11.99
18	46.0	8.0	11.83
19	16.0	6.8	12.23

Foram considerados como valores iniciais dos centróides dos proto-grupos, os valores assumidos pelos parâmetros FTP, CMI e CCV em cada uma das sub-bacias hidrográficas. O resultado desta etapa foi a obtenção dos coeficientes de similaridade entre os grupos formados, o grau de generalização assumido a cada formação de um novo grupo e a construção do dendograma (Figura 5.16).

Em seguida foi escolhido um valor limite para a formação dos grupos da regionalização, ou seja, o valor limite do coeficiente de similaridade no dendograma. Este valor foi escolhido em função da taxa de crescimento do coeficiente. Determinou-se então o valor a partir do qual os coeficientes crescem muito rapidamente (Faissol et al., 1978).

Desta maneira selecionou-se o valor 1.0 como coeficiente de similaridade limite entre as sub-bacias, correspondendo a um mapeamento com grau de generalização de 20%. Isto nos permitiu a identificação de 6 regiões hidro

lógicas na bacia:

- REGIÃO I : sub-bacias 1, 3, 4, 6 e 8
- REGIÃO II : sub-bacias 7 e 9
- REGIÃO III: sub-bacias 10 e 16
- REGIÃO IV : sub-bacia 2
- REGIÃO V : sub-bacias 17 e 18
- REGIÃO VI : sub-bacia 19

Fig. 5.16 - Dendograma obtido pela distância euclidiana.

A Tabela 5.18 apresenta uma matriz de dupla entrada, que sintetiza as características geológicas, geomorfológicas, pedológicas e os tipos predominantes de uso da terra, que definem cada região homogênea da bacia.

TABELA 5.18 - CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS, GEOMORFOLÓGICAS E DE USO DA TERRA DAS REGIÕES DEFINIDAS POR SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

REGIÃO HOMOGÊNEA	SUB-BACIAS	GEOLOGIA	GEOMORFOLOGIA	SOLOS	TIPOS PREDOMINANTES DE USO DA TERRA
I	1,4,5,6,3 e 8	Formação Botucatu	Colinas Amplas e Vales Abertos	AQ LV-2	Culturas de Ciclo Longo e Pastagem
II	7 e 9	Formação Serra Geral	Morros Isolados, Inselbergs e Formas Ruiniformes	Li-3 PV-5 LV-6 LRd	Pastagens Floresta Tropical
III	10 e 16	Formação Serra Geral	Morros Isolados, Inselbergs e Formas Ruiniformes	Li-3 PV-5 LRd	Pinus sp Floresta Tropical Pastagens
		Formação Bauru	Colinas Médias e Vales Intermediárias	LV-5 LV-6	Cerrado
IV	2	Formação Botucatu	Colinas Amplas e Vales Abertos	AQ LV-2	Eucaliptus, Pastagens e Culturas de Ciclo Longo
V	17 e 18	Formação Botucatu	Colinas Amplas e Vales Abertos	AQ LV-2 LE-2	Pastagens Floresta Tropical
		Formação Serra Geral	Morros Isolados, Formas Ruiniformes e Inselbergs	LRd Li-3 LV-5 PV-5	Eucaliptus sp

O mapa das regiões homogêneas da bacia é apresentado na Figura 5.17. Se analisarmos a Tabela 5.18 podemos constatar as seguintes características nas regiões mapeadas:

a) Região I

Apresenta como substrato rochoso os arenitos da Formação Botucatu, onde o relevo predominante é composto por colinas amplas com vales abertos, correspondendo a baixos valores de FTP. Os solos desta região são de textura arenosa, unidades A0 e LV-2, correspondendo a baixos valores de CMI. Nesta unidade, os tipos predominantes de uso da terra são culturas de ciclo longo e pastagens.

b) Região II

A Região II está situada sobre os arenitos intercalados aos basaltos da Formação Serra Geral, que em termos geomorfológicos está relacionado aos terrenos de alta declividade presentes nos morros isolados, inselbergs e formas ruiformes. Esta região está situada na transição dos planaltos de São Carlos e de Santana, apresentando unidades pedológicas com médios e altos valores de CMI, como LRd, LV-6, PV-5 e Li-3. O uso da terra predominante é composto por pastagens e floresta tropical.

c) Região III

Semelhante à Região II em termos geológicos, geomorfológicos e pedológicos, a Região III no entanto apresenta uso da terra caracterizado por pinus sp, floresta tropical, pastagens e cerrado.

d) Região IV

Em termos geológicos a Região IV apresenta arenitos da Formação Botucatu associados a relevo do tipo colinas e vales abertos (baixo valor de FTP). Os solos são caracterizados pelas unidades A0 e LV-2 (baixo valor de CMI) e as uso da terra presentes na região são: eucaliptus sp, pastagens e localmente culturas de ciclo longo.

e) Região V

Semelhante à Região IV em termos geológicos,

geomorfológicos e pedológicos, a Região V apresenta em con-
trapartida um maior predomínio de pastagens e em pontos
isolados, floresta tropical.

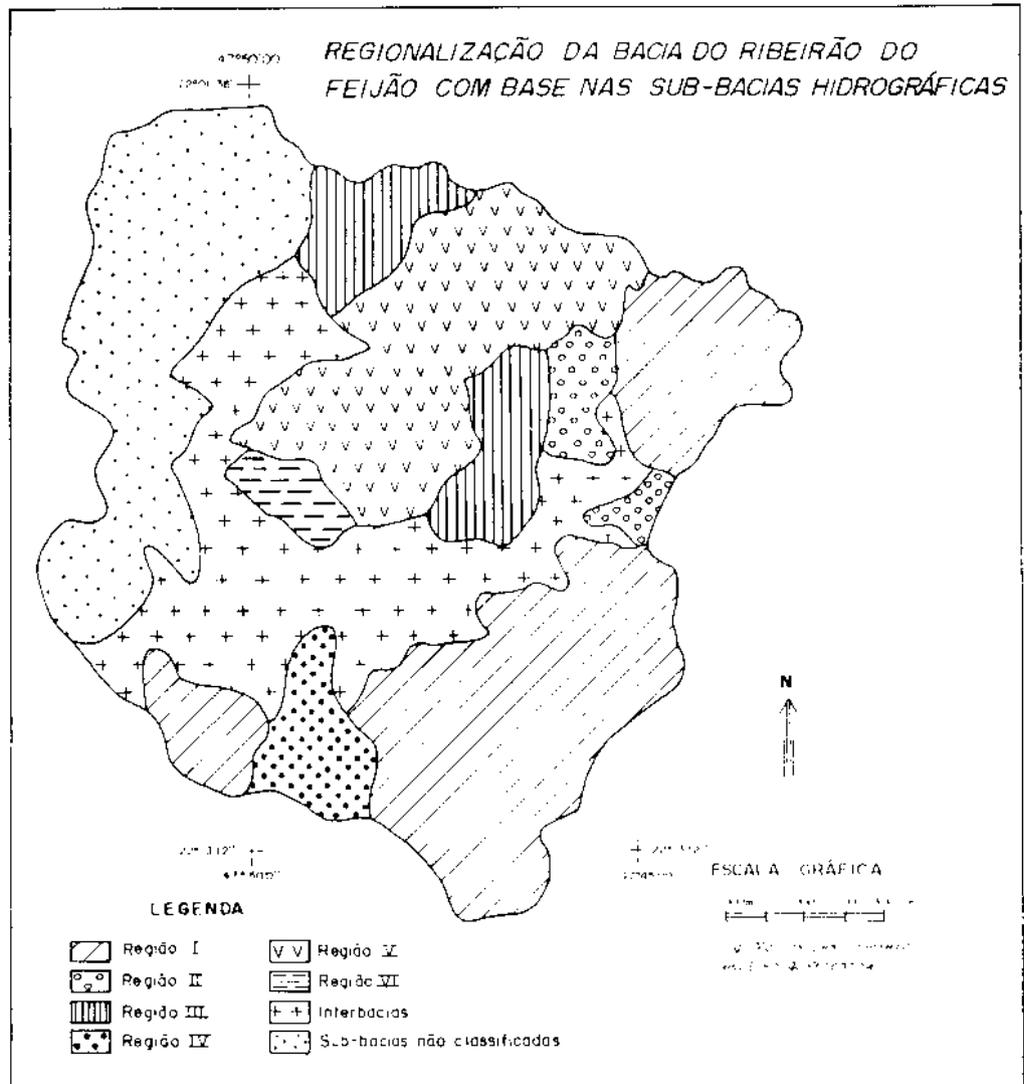


Fig. 5.17 - Mapa das regiões homogêneas definidas por sub-
bacias hidrográficas, segundo a distância eu-
clidiana entre os valores de FTP, CMI e CCV.

f) Região VI

Semelhante a Região II e III em termos geo-
morfológicos e pedológicos, apresenta porém predomínio de
Eucaliptus sp.

5.6.2 - ANÁLISE DO DISCRIMINANTE

Dentro do processo de classificação e regionalização das sub-bacias hidrográficas, a análise de discriminante tem por objetivo principal a avaliação da significância estatística das hipóteses H_0 e H_1 , adotadas para a análise de agrupamento.

A análise do discriminante é efetuada com base no estudo da relação entre a variabilidade dos dados inter-grupos e a variabilidade interna entre os elementos de cada grupo.

Seguindo a sugestão de Wiltshire (1984), adotou-se o Teste F para a análise de discriminante. Para a aplicação deste teste foi escolhido um nível de significância de 0.01, ou seja $\alpha = 0.01$. Isto quer dizer que existe 99 % de probabilidade que a diferença entre os grupos não ocorre ao acaso, mas sim devido ao fato de que os k grupos provêm de k populações diferentes. Por outro lado existe também uma probabilidade de 1 % que as variâncias sejam provenientes da mesma população.

Os valores γ entre-grupos e γ intra-grupos foram obtidos a partir dos dados da Tabela 5.17. Tais valores foram respectivamente 297.00 e 65.06, o que conduz a um valor de $F = 4.56$.

Em seguida o valor F foi comparado com o valor $F_{crítico}$ tabulado (Tabela 5.19), considerando-se n-1 graus de liberdade e um nível de significância de $\alpha = 0.01$.

Considerando-se 13 graus de liberdade e nível de significância 0.01, encontraremos na Tabela 5.19 um valor de $F_{crítico} = 3.96$. Logo, comparando o valor de F com $F_{crítico}$, concluiremos que $F > F_{crítico}$. Segundo Wiltshire (1984), de acordo com esta constatação podemos rejeitar a hipótese H_0 e aceitar a hipótese H_1 .

TABELA 5.19 - VALORES DE F-crítico CONSIDERANDO-SE UM Nível DE SIGNIFICÂNCIA 0.01, DE ACORDO COM O GRAU DE LIBERDADE

		GRAUS DE LIBERDADE DO NUMERADOR															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	∞	
GRAUS DE LIBERDADE DO DENOMINADOR	1	40522	49995	54034	55246	57636	58590	59284	59811	60225	60558	61063	61573	62087	62346	62606	
	2	9850	9900	9917	9925	9930	9933	9936	9937	9939	9940	9942	9943	9945	9946	9947	
	3	3412	3082	2940	2871	2824	2791	2767	2749	2735	2723	2705	2687	2669	2660	2650	
	4	2129	1800	1669	1598	1552	1521	1498	1480	1466	1455	1437	1420	1402	1393	1384	
	5	1626	1327	1206	1139	1097	1067	1046	1029	1016	1005	989	972	955	947	938	
	6	1375	1092	978	915	875	847	826	810	798	787	772	756	740	731	723	
	7	1225	955	845	785	746	719	699	684	672	662	647	631	616	607	599	
	8	1126	865	759	701	663	637	618	603	591	581	567	552	536	528	520	
	9	1056	802	699	642	606	580	561	547	535	526	511	496	481	473	465	
	10	1004	758	655	599	564	539	520	506	494	485	471	456	441	433	425	
	11	965	721	622	567	532	507	489	474	463	454	440	425	410	402	394	
	12	933	693	595	541	506	482	464	450	439	430	416	401	386	378	370	
	13	907	670	574	521	486	462	444	430	419	410	396	382	366	359	351	
	14	886	651	556	504	469	446	428	414	403	394	380	366	351	343	335	
	15	868	636	542	489	456	432	414	400	389	380	367	352	337	329	321	
	16	853	623	529	477	444	420	403	389	378	369	355	341	326	318	310	
	17	840	611	518	467	434	410	393	379	368	359	346	331	316	308	300	
	18	829	601	509	458	425	401	384	371	360	351	337	323	308	300	292	
	19	818	593	501	450	417	394	377	363	352	343	330	315	300	292	284	
	20	810	585	494	443	410	387	370	356	346	337	323	309	294	286	278	
	21	802	578	487	437	404	381	364	351	340	331	317	303	288	280	272	
	22	795	572	482	431	399	376	359	345	335	326	312	298	283	275	267	
	23	788	566	476	426	394	371	354	341	330	321	307	293	278	270	262	
	24	782	561	472	422	390	367	350	336	326	317	303	289	274	266	258	
	25	777	557	468	418	385	363	346	332	322	313	299	285	270	262	254	
	26	772	553	464	414	382	359	342	329	318	309	296	281	266	258	250	
	27	768	549	460	411	378	356	339	326	315	306	293	278	263	255	247	
	28	764	545	457	407	375	353	336	323	312	303	290	275	260	252	244	
	29	760	542	454	404	373	350	333	320	309	300	287	273	257	249	241	
	30	756	539	451	402	370	347	330	317	307	298	284	270	255	247	239	
40	731	518	431	383	351	329	312	299	289	280	266	252	237	229	220		
60	708	498	413	365	334	312	295	282	272	263	250	235	220	212	203		
120	685	479	395	348	317	296	279	266	256	247	234	219	203	195	186		
∞	663	461	378	332	302	280	264	251	241	232	218	204	188	179	170		

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

O uso de dados de índice de vegetação do TM-Landsat integrados a dados pedológicos e morfométricos é adequado para os estudos de regionalização de microbacias hidrográficas onde inexistam dados de vazão fluvial, pois possibilitou o mapeamento de 6 regiões hidrológicas homogêneas na Bacia do Ribeirão do Feijão.

Notou-se também que as técnicas de processamento e classificação digital utilizadas para a obtenção do IPV foram satisfatórias, proporcionando uma classificação quantitativa do uso da terra segundo a biomassa foliar.

Concluiu-se também que as regiões definidas pelo método proposto, apresentaram uma homogeneidade em relação às características geológicas, geomorfológicas e pedológicas. No entanto, devido a dependência antropica, não se observou a mesma homogeneidade em relação à cobertura vegetal, uma vez que esta se comporta de forma aleatória nas sub-bacias hidrográficas. Isto se deveu também ao fato de utilizarmos valores de IPV agregados segundo os grupos hidrológicos de uso da terra, que se por um lado facilitam a aplicação e a generalização do uso do método, por outro diminuem o poder discriminatório do CCV. Porém, o uso associado do CCV juntamente ao FTP e o CMI, possibilitou a aceitação estatística da regionalização.

É importante salientar que futuras ações de pesquisa deverão ser desenvolvidas no sentido de se verificar a correlação existente entre as regiões definidas segundo a média e o coeficiente de variação da vazão fluvial das bacias e, as regiões definidas pela metodologia proposta neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ab'Saber, A.N. Regiões de circundesnudação pós cretácea no planalto brasileiro. Boletim Paulista de Geografia, (1): 3-21, 1949.
- Almeida, F.F.M.; Barbosa, O. Geologia das quadrículas de Piracicaba e Rio Claro. Boletim da Divisão de Geologia e Mineração, (3): 1-96, 1953.
- Almeida, F.F.M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. São Paulo, Instituto Geológico e Geográfico, 1964. 262 p.
- Acreman, M.C.; Sinclair, C.D. Classification of drainage basins according to their physical characteristics: an application for flood frequency analysis in Scotland. Journal of Hydrology, 84: 365-380, 1986.
- Algazi, V.R.; Minsoo, S. Satellite land use acquisition and applications to hydrological planning models. In: International Symposium on Remote Sensing, II, Manila, Philippines, Abr. 20-26, 1978. Proceedings, Ann Arbor, MI, ERIM Press, 1978, p. 1171-1181.
- Anderson, H. Suspended sediment discharge as related to streamflow, topography, soil and land use. American Geophysical Transactions, (35): 268-281, 1954.
- Anderson, J.R. Land use classification schemes. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 43 (8): 1059-1067, 1971.
- Aylor, D.E.; Parlange, J.Y. Vertical infiltration into a layered soil. Soil Science American Proceedings, 37: 676-676, 1973.
- Batista, G.T.; Rudorff, B.F.T. e Oviedo, A.F.P. Resposta espectral da soja e sua relação com parâmetros agrônomicos. São José dos Campos, INPE, ago., 1988. 9 p. (PI-INPE-4832-PRE/146).
- Benson, M.A. Factors influencing the occurrence of floods in humid region of diverse terrain. U.S. Geological Survey Water Supply Paper, (15), 1962, 65 p.

- Beven, K.; Wood, E.F. Catchment geomorphology and dynamics of runoff contributing areas. Journal of Hydrology, (65): 139-158, 1983.
- Blad, B.L.; Norman, J.M. e Gardner, B.R. Field measurements and simulation modelling of corn and soybean moisture stress. Lincoln, NE, Center of Agricultural Meteorology and Climatology. University of Nebraska, 1982 (Progress Report 82-2).
- Canas, A.D.D.; Barnett, M.E. The generation of false colour composite principal component image. International Journal of Remote Sensing, 6 (6): 867-881, 1985.
- Chorley, R., ed. Introduction to physical hydrology. London, Methuen & Co., 1973. 195 p.
- Chow, V.T., ed. Handbook of hydrology: a compendium of water resources technology. New York, Mc Graw-Hill Co., 1964, 450 p.
- Christofoletti, A. Análise morfométrica das bacias hidrográficas do Planalto de Poços de Caldas. (Tese de Livre Docência) - Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Rio Claro, 1970. 215 p.
- _____. A correlação de variáveis para o estudo de bacias hidrográficas. Boletim Geográfico, 30 (224): 101 - 107, 1971.
- Christofoletti, A.; Arana, J. Estruturação de redes hidrográficas na região norte-ocidental do Estado de São Paulo. Boletim Paulista de Geografia, 52: 5-27, 1976.
- Christofoletti, A.; Machado, L.M.C.P. A lei da constância na amplitude altimétrica aplicada em bacias hidrográficas brasileiras. Notícia Geomorfológica, 17 (34): 33-46, 1977.
- Colwell, V.T. Bidirectional spectral reflectance of grass canopies for determination of above ground standing biomass. (Ph. D. Dissertation) - University of Michigan, MI, 1973.
- _____. Vegetation canopy reflectance. Remote Sensing of Environment, 3: 175-183, 1974.

- Cook, B.G. et al. Landscape and rainfall indices for prediction of streamflow similarities in the Hunter Valley, Australia. Water Resources Research, 24 (8): 1283-1298, 1988.
- Cosby, B.J. et al. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to physical properties of soils. Water Resources Research, 20 (6): 682-690, 1984.
- Crippen, R.E.; Blom, R.G.; Heyada, J.R. Directed band ratioing for the retention of perceptually independent topographic expression in chromaticity enhanced imagery. International Journal of Remote Sensing, 9 (4): 749-765, 1988.
- Curran, P. Multispectral remote sensing for estimating vegetation biomass and productivity. In: Smith, H. ed. Plants and the daylight spectrum. Academic, 1981, p. 65-99.
- Cushnie, J.L. The interactive effect of spatial resolution and degree of internal variability within land cover types on classification accuracies. International Journal of Remote Sensing, 8 (1): 15-29, 1987.
- Deering, D.W.; Rouse, J.W.; Waas, R.H.; Schell, J.A. Measuring forage production of grazing units from Landsat MSS data. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 10, Washington, DC, Oct. 6-10, 1975. Proceedings, Ann Arbor, MI, ERIM Press, 1975, p. 1169-1178.
- Drayton, R.S. & Chidley, T.R.E. Hydrologic modeling using satellite imagery. In: International Conference on Advanced Technology for monitoring Process Global Environment Data, 1. London, England, Oct. 10-12, 1985. Proceedings, London, Academic Press, 1985, p. 219-236.
- Dugan, J.T. Hydrologic characteristics of Nebraskan Soils. U.S. Geological Survey Water Supply, (35), 1982, 18 p.

- Duggin, M.J. Factors limiting the discrimination and quantification of terrestrial features using remotely sensed radiance. International Journal of Remote Sensing, 6 (1): 3-27, 1985.
- Dutra, L.V.; Souza, R.; Li, F.A.; Moreira, J.C. Análise automática de imagens multiespectrais. São José dos Campos, INPE, 1981. 40 p. (INPE-2212-MD/009).
- Elvidge, C.D.; Lyon, R.J. Influence of rock-soil spectral variation on the assesment of green biomass. Remote Sensing of Environment, (17): 265-279, 1985.
- Epiphânio, J.C.N.; Formaggio, A.R. Relações entre PVI e diferença normalizada e índice de área foliar, cobertura do solo e densidade de clorofila de trigo e feijão. In Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Manaus, Am., jun. 24-29, 1990. Anais, São José dos Campos, INPE, 1990, p. 797-805.
- Faissol, S. Tendências atuais na geografia urbano-regional: teorização e quantificação. Rio de Janeiro, IBGE, 1978. 301 p.
- France, M.J.; Collins, W.G.; Citidley, T.R. Extraction of hydrological parameters from Landsat TM imagery. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 20. Nairobi, Kenya, dez. 4-10, 1986. Proceedings, Ann Arbor, MI, ERIM Press, 1986, p. 1165-1175.
- Foresti, C.; Pereira, M.D.B. Utilização de índices de vegetação obtidos com dados do sistema Landsat no estudo da qualidade ambiental urbana: cidade de São Paulo. In: Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 4. Gramado, RS, ago. 10-15, 1986. Anais. São José dos Campos, INPE, 1986, p. 120-130.
- França, G.V. da Interpretação fotográfica de bacias e redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracicaba. (Tese de Doutorado) - ESALQ/USP, Piracicaba, 1968. 151 p.
- Freitas, R.O. Textura de drenagem e sua aplicação geomorfológica. Boletim Paulista de Geografia, 11: 53 - 57, 1952.

- Gallo, K.P.; Daughtry, C.S.T. Differences in vegetation indices for simulated Landsat MSS, TM, NOAA-9 AVHRR and APOT sensor systems. Remote Sensing of Environment, (23): 439-452, 1987.
- Gaussman, H.W.; Rodriguez, R.R.; Richardson, A.J. Infinite reflectance of dead compared with live vegetation. Agronomical Journal, (68): 439-452, 1986.
- Gardner, B.R.; Blad, B.L.; Thompson, D.R.; Henderson, K.E. Evaluation and interpretation of Thematic Mapper ratios in equations for estimating corn growth parameters. Remote Sensing of Environment, (18): 225-234, 1985.
- Gregory, K.J.; Walling, D.E. Drainage basin: form and process. London, Edward Arnold, 1973. 456 p.
- Gupta, S.C.; Larson, W.E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent and bulk density. Water Resources Research, 15: 1633-1635, 1979.
- Haan, C.T. A water yield model for small watersheds. Water Resources Research, 8 (1): 58-69, 1972.
- Li, F.A.M. et al. Integração de imagens orbitais a uma base de dados cartográficos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 6. Manaus, AM, jun. 24-29, 1990. Proceedings, São José dos Campos, INPE, 1990, vol. 1, p. 250-255.
- Hillel, D.; Talpaz, H. Simulation of soil water dynamics in layered soils. Soil Science, 23 (1): 54-61, 1977.
- Hillel, D. Fundamentals of soil physics. New York, Academic Press, 1980. 290 p.
- Hoffer, R.M. Biological and physical considerations in applying computer aided techniques to remote sensor data. In: P.H. Swain and S.M. Davis eds. Remote Sensing: a quantitative approach. New York, Mac Graw-Hill, 1978. p. 228-289.

- Horton, R.E. Drainage basin characteristics. American Geophysical Union Transactions, (13): 350-361, 1932.
- _____. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological Society of America Bulletin, (56): 275-370, 1945.
- Huete, A.R.; Jackson, R.D.; Post, D.F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. Remote Sensing of Environment, 15: 37-53, 1985.
- Jarboe, J.E.; Haan, C.T. Calibrating a water yield model for small ungaged watersheds. Water Resources Research, 10: 256-262, 1974.
- Jones, A.R.; Settle, J.J.; Wyatt, B.K. Use of digital terrain data in the interpretation of Spot-1 HRV multi spectral imagery. International Journal of Remote Sensing, 9 (4): 669-682, 1988.
- Jorge, J.A.; Igue, T.; Almeida, C.L.F. Propriedades hídricas e resistência à penetração de quatro unidades de solo do Estado de São Paulo. Revista de Agricultura, 63 (1): 1988.
- Jorge, J.A.; Prado, H. do Porosidade, consistência e propriedades hídricas de três podzólicos vermelho-amarelos e uma terra roxa estruturada. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 12 (1): 1-7, 1988.
- Kauth, R.J.; Tomas, G.S. The tasseled cap: a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: Machine Processing of Remote Sensing Data Symposium, 6. West Lafayette, IN, 29 jul - 7 ago., 1976. Proceedings, New York, NY, Academic Press, 1976, p. 41-51.
- Kenk, E.; Sondhein, M.; Yee, B. Methods for improving accuracy of Thematic Mapper ground cover classifications. Canadian Journal of Remote Sensing, 14 (1): 17-31, 1988.

- Kimes, D.S. Modelling the directional reflectance from complete homogeneous vegetation canopies with leaf orientation distributions. Journal of the Optical Society of America, 11: 725-737, 1984.
- Knipling, E.B. Physical and physiological basis for reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation. Remote Sensing of Environment, (1):67-76, 1969.
- Langbein, W.B. Topographic characteristics of drainage basins. U.S. Geological Survey Water Supply, 1:127-157, 1947.
- Laut, P. et al. A hydrologic classification of drainage basins in the Macleay Valley, New South Wales. Sidney, Australia, CSIRO, 1985. 45 p.
- Libardi, P.L.; Reichardt, K. Características hídricas de cinco solos do Estado de São Paulo. II - Curvas de retenção e condutividade hidráulica. O Solo, (2): 7 - 12, 1973.
- Magette, W.L.; Shanholtz, V.O. e Carr, C.R. Estimating selected parameters for the Kentucky Watershed Model from watershed characteristics. Water Resources Research, 12 (3): 472-476, 1976.
- Meijerink, A.M.J. Photohydrological reconnaissance surveys. Enschede, The Netherlands, ITC, 1974. 274 p.
- Miller, V.C. A quantitative geomorphology study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. New York, Depto. of Geology, Columbia University, 1953. 30 p. (Report nº 3).
- Myers, V.I.; Wiegand, C.L.; Heilman, M.D.; Thomas, J.R. Remote sensing in soil and water conservation research. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 4. Ann Arbor, MI, Abr. 12-18. Proceedings, Ann Arbor, MI, ERIM Press, 1966, p. 801-813.

- Moraes, A.T.C. Biótopos na área de proteção ambiental das cuestas de São Pedro e Corumbataí. (Dissertação de Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 1985. 179 p.
- Morisawa, M.E. Quantitative geomorphology of some watersheds in the Appalachian Plateau. Geological Society of America Bulletin, 73 (9): 1025-1046, 1962.
- Novo, E.M.L. de; Santos, A.P. Monitoramento de enchentes através de sensoriamento remoto orbital: exemplo do vale do Rio Doce. São José dos Campos, INPE, jun. 1981. 22 p. (INPE-2108-RPE/335).
- Novo, E.M.L. de Aplicações de sensoriamento remoto em hidrologia e recursos hídricos. São José dos Campos, INPE, set. 1986. 13 p. (INPE-3986-RPE/991).
- Oliveira, J.B.; Prado, H. do Levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo: Quadricula de São Carlos-SP. Campinas, Instituto Agronomico, 1984. 184 p. (Boletim Técnico 98).
- Parnot, J. Determination of hidrological parameters from remote sensing: application to small dams in Burnika. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 20. Nairobi, Kenya, dec. 4-10, 1986. Proceedings, Ann Arbor, MI, ERIM Press, 1986, p. 1165-1175.
- Patton, P.C.; Baker, V.R. Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. Water Resources Research, 12 (5):941-952 1976.
- Pereira, M.D.B. Correlação de fitomassa foliar de campo cerrado com dados espectrais obtidos pelo sistema MSS-LANDSAT e por radiometria de campo. São José dos Campos, INPE, 1986. 90 p. (INPE-3758-TDL/205).
- Perry, C.R.; Lautenschlager, L.F. Functional equivalence os spectral vegetation indices. Remote Sensing of Environment, (14): 169-182, 1984.

- Pilgrim, D.H. Some problems in transferring hydrological relationships between small and large drainage basins and between regions. Journal of Hydrology, (65): 49-72, 1983.
- Pinto, S.A.F.; Novo, E.M.L.; Niero, M.; Rosa, R. Utilização de dados multitemporais do Landsat para a identificação de setores da planície fluvial sujeitos a inundação. São José dos Campos, INPE, mar. 1985. 25p. (INPE 3445-PRE/699).
- Ragan, R.M.; Salomonson, V. The definition of hidrologic model parameters using remote sensing technique. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, II. Manila, Philipines, Abr. 20-26, 1978. Proceedings, Ann Arbor, MI, ERIM Press, 1978, p. 481-495.
- Ranzani, G.; Penteado, M.M.; Silveira, J. da Concreções - ferruginosas, paleossolo e a superfície de cimeira do Planalto Ocidental Paulista. Geomorfologia, nº 31, 1972. 28 p.
- Ray, P.M. The living plant. New York, Holt & Winston, 1972. 102 p.
- Richardson, A.J.; Wiegand, C.L. Distinguishing vegetation from soil background information. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 49 (6): 1541-1552, 1977.
- Rouse, J.R.; Hass, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: ERTS Symposium, 3. Washington, D.C., Mai 9-13, 1973. Proceedings, s.ed., 1973. p. 122-132.
- Rodda, I. The flood hydrograph. In R. Chorley ed. Introduction to Physical Hydrology. London, Methuen, 1973. 165 p.
- Salomonson, V.V.; Ambaruch, R.; Rango, A.; Ormsby, J.P. Remote sensing requeriments as suggested by watersheds model analysis. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 10. Washington D.C., out. 6-10, 1975. Proceedings. Ann Arbor, MI, ERIM Press, 1975, p. 1169-1178.

- Santos, A.P. et al. Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações no uso da terra. São José dos Campos, INPE, nov. 1981, 33 p. (INPE-2261-MD/016).
- Santos, J.R. Biomassa aérea da vegetação de cerrado: estimativa e correlação com dados do sensor Thematic Mapper do satélite LANDSAT. (Tese de Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1988. 291 p.
- _____. TVI: um modelo numérico para estimativa global da Fitomassa dos cerrados brasileiros. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5. Natal, RN, out. 11-15, 1988. Anais. São José dos Campos, INPE, 1988, v. 3, p. 684-690.
- Sasso, R.; Estes, J.E.; Kraus, S.P. Comparative results of conventional and digital land cover collection methodologies for input to hydrologic modelling. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, II. Manila, Philippines, apr. 20-26, 1978. Proceedings. Ann Arbor, MI, ERIM Press, 1978, p. 1319-1329.
- Schumm, S.A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. Geological Society of America Bulletin, 65: 597-646, 1956.
- _____. River adjustment to altered hydrologic regimen: Murrumbidgee River and paleochannels, Australia. U.S. Geological Survey Profess. Paper, 598, pp. 1-65, 1968.
- _____. Applied fluvial geomorphology. In: J.R. Hails ed. Applied Geomorphology. Amsterdam, Elsevier, 1977. cap. 4, p. 119-155.
- Sherman, L.K. The relations of hydrographs of runoff to size and character of drainage basins. American Geophysical Union Transactions, (13): 332-229, 1932.
- Singh, A. Spectral separability of tropical cover classes. International Journal of Remote Sensing, 8 (7): 971-979, 1987.

- Strahler, A.N. Dimensional analysis applied to fluvially eroded land forms. Geological Society of America Bull. (69): 279-300, 1958.
- Suits, G.H. The calculation of the reflectance directional of a canopy. Remote Sensing of Environment, 2: 117-125, 1972.
- Swain, P.H.; Davis, S.M. eds. Remote sensing: the quantitative approach. New York, Mac Graw Hill, 1978.
- Teixeira, A.L.A. GEO-INF/MAP: um sistema de informação geográfica. (Tese de Livre Docência) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 1990. 102 p.
- Tolentino, M.; Gandolfi, N.; Paraguassu, A. Estudo morfo métrico das bacias hidrográficas do Planalto de São Carlos. Revista Brasileira de Geografia, 30 (4): 42 - 50, 1968.
- Townshend, J.R.G. Terrain analysis and remote sensing. London, George Allen and Unwin, 1981. 338 p.
- Trolier, L.J.; Philipson, W.R. Visual analysis of Thematic Mapper images for hydrologic land use and cover. Photogram. Engineer. and Remote Sensing, 52 (9): 1531-1538, 1986.
- Tucker, C.J. Resolution of grass canopy biomass classes. Photogram. Engineer. and Remote Sensing, 43 (8): 1059-1067.
- _____. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8: 127-150, 1979.
- Valério F^o, M. Análise quantitativa de parâmetros da drenagem e do relevo na caracterização dos solos e suas relações fotointerpretativas em imagens de pequena escala. (Tese de Doutorado) - ESALQ/USP, Piracicaba, 1984. 145 p.

- Vinogradov, B. Remote sensing of arid zone vegetation in the visible spectrum for studying productivity. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 6. Ann Arbor, MI, Oct 13-16, 1969. Proceedings. Ann Arbor, MI, ERIM Press, 1969, p. 1250-1273.
- Wandle Jr, W.S. Estimating peak discharges of small rural streams in Massachusetts. U.S. Geological Survey Water Supply Paper, 2214, 1983, p. 1-24.
- Wardley, N.W. Vegetation index variability as a function of viewing geometry. International Journal of Remote Sensing, 5 (5): 861-870, 1984.
- Wiltshire, S.E. Identification of homogeneous regions for flood frequency analysis. Journal of Hydrology, 84: 287-302, 1986.
- Zaslowsky, D.; Rugowsky, A.S. Hydrologic and morphologic implications of anisotropy and infiltration in soil profiles development. Soil Science Society American Journal, 33: 594-599, 1969.