

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA

**RELAÇÃO ENTRE PADRÕES E PROCESSOS EM PEQUENAS BACIAS  
HIDROGRÁFICAS:**

**A Interface entre Ecologia de Paisagem e Hidrologia através do Geoprocessamento e da  
Geometria Fractal.**

Ocean. Rafael Cabral Cruz

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ecologia, do Instituto de Biociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ecologia.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Luiza Porto.  
Dep. de Ecologia, UFRGS.

Porto Alegre

1995

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos professores:

---

---

---

Dedico este trabalho ao meu filho, gestado juntamente com este trabalho, na esperança de que ele possa olhar para o horizonte e emocionar-se com a beleza desta Terra Mãe, banhando seus olhos de catarse por um mundo mais belo e justo.

## AGRADECIMENTOS:

- Aos meus pais, que com seu apoio viabilizaram este trabalho.
- Ao Prof. Geraldo Lopes da Silveira, do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal de Santa Maria, pelo fornecimento dos dados originais de vazões, assim como pela discussão sempre rica do tema.
- Aos colegas do Setor de Manejo de Fauna do Museu de Ciências Naturais, Fundação Zoobotânica do Rio Grande do Sul, pelo espírito de equipe, demonstrando sempre que se pode fazer ciência com solidariedade; pelo apoio dado para minha formação em Sistemas de Informações Geográficas e pela oportunidade de participar de projetos que mantiveram meu contato com diversos habitats de áreas úmidas do Rio Grande do Sul, que garantiram o grau de amadurecimento de campo, necessário para o aperfeiçoamento de minha capacidade perceptiva, assim como pela constante troca de idéias: Prof. João Oldair Menegheti, hoje no Dep. de Zoologia da UFRGS, Biól. Maria Inês Burger, Biól. João Carlos Pradella Dotto, Biól. Ricardo Aranha Ramos, Biól. Maria Tereza Queiroz Melo, Biól. Eduardo Martin Véles, Biól. Demétrio Luiz Guadagnin, hoje professor do Departamento de Biologia da UNISINOS.
- Aos colegas, funcionários e professores do Curso de Pós-Graduação em Ecologia, em especial aos professores Dr. Paulo Oliveira e Dr. Albano Schwarzbald, pelo diálogo importante e companheiro.
- Ao Eng. Agron. André Lima, pela amizade e constante troca de idéias.
- Aos meus primeiros orientador e co-orientador, Dr. Tuiskon Dick e Dr. Ozório Fonseca, pela compreensão e apoio nas horas difíceis da falta de financiamento para meu primeiro projeto de dissertação.
- Aos meus companheiros de militância política, pela riqueza da vivência dos mais belos ideais de humanitarismo, e pela oportunidade de vivenciar a dura e nada romântica realidade das nossas instituições. Não basta sonhar, é preciso conhecer. Não basta conhecer, é preciso transformar.
- À Profa. Maria Luiza Porto, pelo interesse, energia positiva e entusiasmo ao me receber como orientado, bem como pelas excelentes discussões sobre o trabalho em si, que muito contribuíram para que este trabalho se concretizasse em um prazo de onze meses.
- Finalmente, à Claudette, minha esposa, companheira, amiga. Seu amor e dedicação são o principal sentido que me faz acreditar, ter esperança e força para superar as dificuldades deste mundo em crise.

*“La teoría ecológica es sugerida a veces por la técnica, o por una contemplación profunda de la Naturaleza. Hay que mantener una actitud favorable a volver a examinar una y otra vez los mismos datos desde puntos de vista diferentes, pues indudablemente existen construcciones teóricas posibles y no sospechadas que resultarán más coherentes, más satisfactorias intelectualmente, que las que poseemos”.*

*“El científico ha de sentirse más atraído por lo nuevo e insólito, que por lo que se puede archivar en los huequecitos que tenemos preparado”.*

*“Es vana la pretensión de encerrar toda la Naturaleza en los sistemas de ecuaciones diferenciales tan caras a los ecólogos y, a fin de cuentas, puede ser más efectivo sentarse a ver discurrir las aguas de un río y a escuchar el susurro de las hojas de los árboles”*

*(Ramón Margalef, 1977, p.882)*

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AZESCMDI	- azimute de escoamento médio
BCMMDIO	- Número de pares diferentes de classes, média em janelas de 3 x 3 células
Bti	- <i>Bacillus thuringiensis var. israelensis</i>
CORSAN	- Companhia Riograndense de Saneamento
CVNMDIO	- Número de classes diferentes da célula central , média de janelas de 3 x 3 células
D <sub>2</sub>	- Dimensão de correlação
DECL25	- porcentagem da área com declividade maior que 25%
DECLMDIA	- Declividade média
DIMDIO	- índice de diversidade médio sobre janelas de 3 x 3 células
DOMDIA	- dominância média sobre janelas de 3 x 3 células
E.U.A.	- Estados Unidos da América
FAO	- Food and Alimentation Organization
FAPERGS	- Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul
FDIMARPE	- Dimensão fractal da relação área-perímetro
FDIFORM	- Dimensão fractal da forma da bacia
FDIMHID	- Dimensão fractal da rede hidrográfica
FDIMTOP	- Dimensão fractal da topografia
FRMDIA	- fragmentação média sobre janelas de 3 x 3 células
H'	- índice de diversidade de Shannon-Weaver
IBGE	- Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IUCN	- International Union for Conservation of Nature
j	- intervalo de reconstrução = “time delay”
J	- índice de homogeneidade
m	- Dimensão de encaixamento = “embedding dimension”
MDT	- Modelo digital de terreno
NDCMDIO	- Número de classes diferentes médio de janelas de 3 x 3 células
N.N.E.	- Nor-nordeste
PERMEDIO	- período médio do espectro de potência
PI	- plano de informação = “layer”
PNUMA	- Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
Q <sub>7,10</sub>	- vazão mínima estatística que dura 7 dias para um tempo de recorrência de 10 anos
RRMDIO	- índice de riqueza relativa médio sobre janelas de 3 x 3 células
SOCEPE	- Sociedade Concórdia Caça e Pesca
S.S.E.	- Sul-sudeste
S.S.W.	- Sul-sudoeste
UNESCO	- United Nations for Education, Science and Culture Organization
UFSM	- Universidade Federal de Santa Maria
V90AZ270	- porcentagem de área com azimute entre 90 e 270 graus, quadrantes sul
WRI	- World Resources Institute

# SUMÁRIO

<i>Dedicatória</i> .....	<i>III</i>
<i>Agradecimentos</i> .....	<i>IV</i>
<i>Epígrafe</i> .....	<i>V</i>
<i>Lista de Abreviaturas e Siglas</i> .....	<i>VI</i>
<i>Sumário</i> .....	<i>VII</i>
<i>Resumo</i> .....	<i>VIII</i>
<i>Abstract</i> .....	<i>IX</i>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 DESCRIÇÃO DA REGIÃO</b> .....	<b>8</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>16</b>
3.1 Escolha da Área de Estudo.....	16
3.2 Hidrologia.....	22
3.3 Ecologia de Paisagem.....	27
3.4 Cruzamento Hidrologia x Ecologia de Paisagem.....	34
<b>4 DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS E COMENTÁRIOS</b> .....	<b>35</b>
4.1 Hidrologia.....	35
4.2 Ecologia de Paisagem.....	45
4.2.1 Análise Morfológica.....	45
4.2.2 Análise da Heterogeneidade.....	55
4.2.3 Análise da Complexidade.....	63
4.3 Ecologia de Paisagem: síntese e relação com hidrologia.....	84
4.3.1 Síntese da Ecologia de Paisagem.....	84
4.3.2 Índices topográficos x hidrológicos.....	87
4.3.3 Índices da heterogeneidade x hidrológicos.....	89
4.3.4 Índices da complexidade x hidrológicos.....	90
4.3.5 Índices da Ecologia de Paisagens x hidrológicos.....	92
<b>5 DISCUSSÃO</b> .....	<b>95</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>102</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>104</b>

## RESUMO

Este trabalho investiga a relação entre padrões e processos em 4 pequenas bacias hidrográficas de encostas situadas nos municípios de Sapiranga e Santa Maria, RS, Brasil.

Foram medidas as vazões de estiagem das bacias hidrográficas durante aproximadamente 850 dias, entre agosto de 1992 e janeiro de 1995. As séries temporais foram interpoladas e analisadas através do software MTRCHAOS, que permite o cálculo da dimensão de correlação e do maior expoente de Lyapunov, quando este existir.

Foram obtidos modelos digitais de terreno a partir de cartas topográficas. Cenas do satélite Landsat TM5 foram classificadas por máxima verossimilhança para caracterizar a estrutura da paisagem. Foi empregado o sistema de informações geográficas IDRISI v. 4.1 para obterem-se índices da heterogeneidade da paisagem, adaptando-se procedimentos para medir a geometria fractal.

A inter-relação entre índices da estrutura morfológica e da heterogeneidade das bacias e a complexidade das vazões de estiagem foi avaliada com análise de agrupamentos e de componentes principais, sendo discutidas as possíveis relações funcionais entre os índices com a complexidade das vazões. Os índices que melhor guardaram relação com a complexidade das vazões foram a declividade média das bacias, o índice de diversidade calculado sobre a bacia, a média dos valores do índice de diversidade calculado para janelas móveis de 3 x 3 células e a dimensão fractal da relação área-perímetro.

São discutidas as implicações destas relações para definição da vazão mínima de proteção ambiental, sendo proposta uma abordagem alternativa aos métodos arbitrários atualmente utilizados para defini-la, o que envolve um compromisso entre exploração e preservação da complexidade.

## ABSTRACT

This work searching the relationship between patterns and process at four little hill watersheds located at Sapiranga and Santa Maria townships, RS, Brasil.

It was measured the drought discharges of watersheds during , approximately, 850 days, between august of 1992 and january of 1995. The temporal series was interpolated and analysed through MTRCHAOS software, which it calculate the correlation dimension and the largest Lyapunov exponent, when it to exist.

It was obtained digital elevation models from topographic maps. Scenes from satellite Landsat TM5 was classified by maximum likelihood to characterize the landscape structure. It was utilized the geographic information system IDRISI v. 4.1 to obtain indices of landscape heterogeneity, it was adapted proceedings to measure the fractal geometry.

The interrelationship between indices of morphological structure and heterogeneity of watersheds and drought discharges complexity was evaluated by cluster and principal components analysis, it was discussed the possible functional relationships between the indices and discharge complexity. The indices that was better correlated with discharge complexity was average slope, diversity, average diversity of 3 x 3 pixels moving windows and fractal dimension of area-perimeter relation.

It was discussed the implications of this relationships towards a definition of minimum discharge for environment protection, it was proposed a alternative approach to arbitrary methods really used, it involving a compromise between multiple uses and complexity preservation.

## 1. INTRODUÇÃO

A Constituição Brasileira, nos seu artigo 21, coloca que cabe à União "...XIX - instituir sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos e definir critérios de outorga de direitos de seu uso;..." (BRASIL, 1988). No decorrer dos últimos anos, o conceito de uso múltiplo de recursos hídricos têm trazido a noção de que o consumo de água, referente à proteção e conservação da natureza, é *mais* um uso em uma matriz que incorpora a infra-estrutura social, agricultura, indústria, entre outros (LANNA, 1993). Neste caso, como o bem é difuso, ou seja, é de tutela do estado, cabe, portanto, às instituições setoriais estatais, a representação, enquanto usuário, nos Conselhos de Gestão.

Por outro lado, no artigo 23, coloca que "é competência comum da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios:...VI - proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer das suas formas; VII - preservar as florestas, a fauna e a flora...". Assim, existe uma interface legal entre gestão dos recursos hídricos e proteção ambiental.

Desta forma, criou-se um problema institucional prático para ser resolvido: como definir a quantidade de água que satisfaz as necessidades de consumo dos componentes não humanos dos ecossistemas? No Rio Grande do Sul, a Companhia Riograndense de Saneamento, em manuais internos (CORSAN, 1992), propõe a  $Q_{7,10}$ , ou a vazão mínima que dura sete dias para um tempo de recorrência de dez anos, uma medida estatística, para cumprir o papel de vazão mínima de proteção ambiental.

Na falta de uma proposta melhor, esta medida foi empregada no Sistema de Avaliação de Disponibilidades Hídricas Fluviais para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria (SILVEIRA et al., 1993), produto do projeto piloto encomendado pelo Conselho de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Sul. Neste

projeto, a vazão mínima de proteção ambiental, definida como a vazão necessária para manutenção dos ecossistemas aquáticos e a sua interação com os demais ecossistemas terrestres. A vazão de preservação ambiental seria a  $Q_{7,10}$  determinada para as condições de escoamento natural do rio. No entanto, naquela ocasião, já se questionava a validade de tal índice para cumprir função de garantir uma quantidade de água capaz de manter as funções no sistema bacia hidrográfica, do ponto de vista ecológico. Esta situação era resultado da ausência de estudos que relacionassem, quantitativamente, vazões com estrutura e função dos ecossistemas.

Textos clássicos de ecologia (MARGALEF, 1977; ODUM, 1988) demonstram como a vazão depende dos padrões de uso e cobertura de solo. Os experimentos do Laboratório Hidrológico de Coweeta, Carolina do Norte (E.U.A.), descritos por Hoover (apud SELLERS, 1965), demonstraram que o escoamento superficial em bacias que foram totalmente desmatadas aumentou em mais de 50%, a profundidade efetiva do solo diminuiu em 15 cm e a evapotranspiração potencial foi reduzida em mais de 60% quando comparadas com bacias vizinhas florestadas.

A geomorfologia apresenta modelos teóricos de evolução de vertentes que integram aspectos da geologia, pedologia, vegetação, clima e culturas através da análise sistêmica conceitual (CASSETI, 1991; CHRISTOFOLLETTI, 1991; COELHO NETTO, 1994). CASSETI (1991) apresenta os conceitos de biostasia e resistasia, desenvolvidos por Erhart em 1956. Na fase biostática, há um predomínio do componente perpendicular, com forte participação da interceptação, da evapotranspiração e da infiltração, enquanto que na fase resistática, do componente paralelo, ou seja, o predomínio do escoamento superficial (Figuras 1 e 2). Nesta proposição, para fins didáticos, as vertentes são entendidas como compostas por um padrão de cobertura e uso de solos homogêneo, algo como dois extremos de um espectro de degradação, como nas bacias experimentais de Coweeta. No entanto, na maior parte das vezes, não encontramos os extremos, mas, sim, situações intermediárias, onde manchas de diversos graus de biostasia podem ocorrer na mesma vertente, ou seja, vertentes heterogêneas.

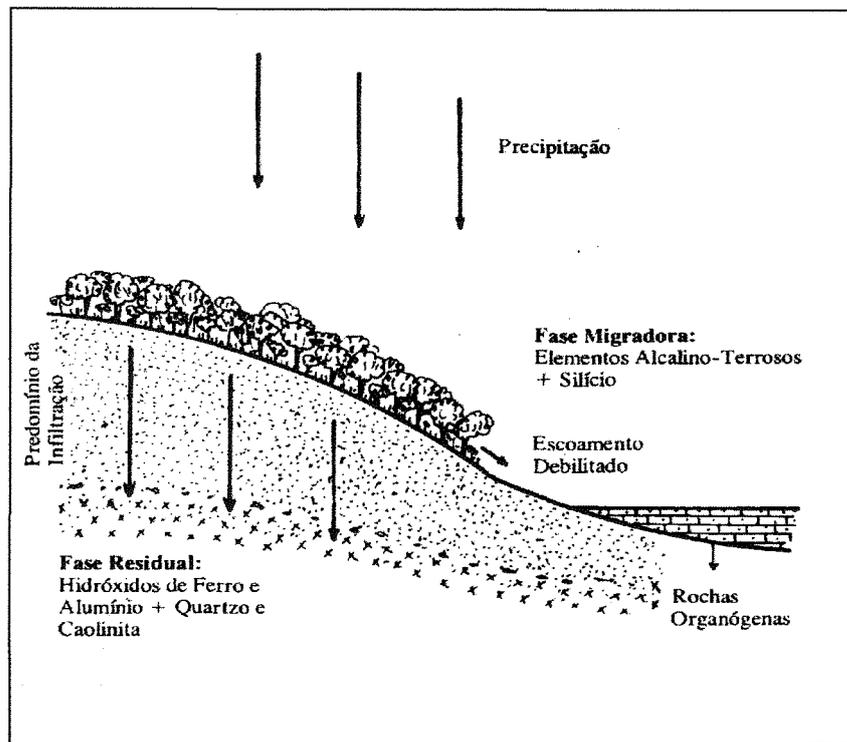


FIGURA 1 - Modelo de vertente biostática (de acordo com CASSETI, 1991).

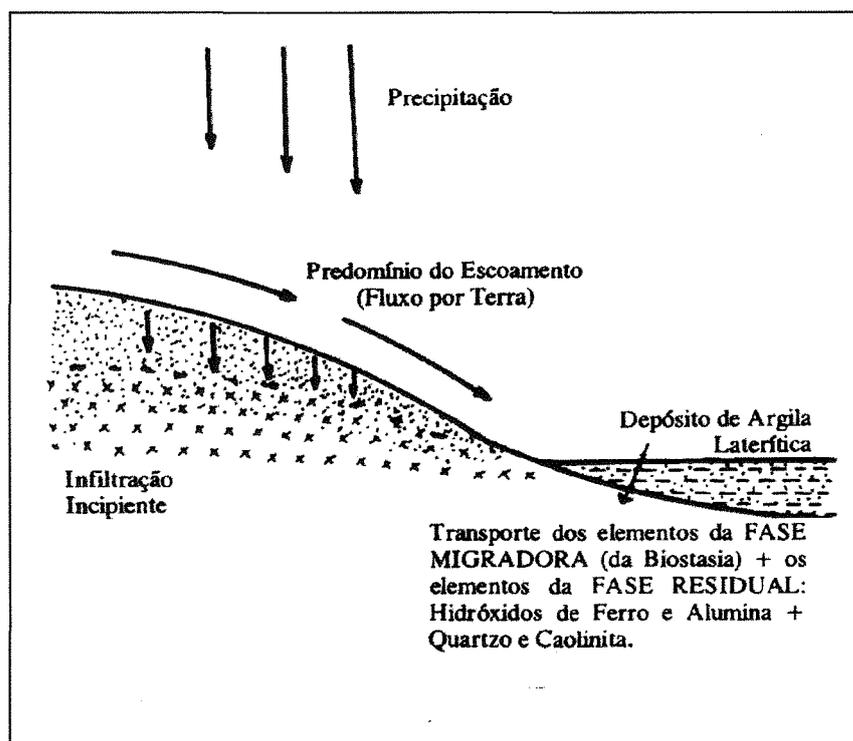


FIGURA 2 - Modelo de vertente resistática (de acordo com CASSETI, 1991).

A ecologia de paisagens tem emergido como uma metaciência que estuda as paisagens, que são agrupamentos de ecossistemas que interagem entre si, ocorrendo em determinados climas e geomorfologias, e que possuem três características: estrutura, função e mudança (FORMAN & GODRON, 1986). Estrutura corresponde ao estudo das relações existentes entre distribuição de energia, materiais e espécies com as características das manchas de ecossistemas. Função corresponde aos fluxos existentes entre as manchas. Mudança, refere-se às alterações sobre o tempo da estrutura e função.

De acordo com FORMAN & GODRON (op.cit.), as bacias hidrográficas podem ou não corresponder à paisagens, sendo que, em geral, uma paisagem contém muitas bacias hidrográficas.

Uma revisão histórica dos conceitos da ecologia de paisagens encontra-se em NAVEH & LIEBERMAN (1984).

TURNER (1989) faz uma revisão do estado da arte, e cita que poucos estudos tem sido dedicados a estudar a influência dos padrões espaciais sobre os fluxos de redistribuição de matérias e nutrientes entre os elementos de uma paisagem, embora seja crescente o reconhecimento de que esta influência é importante.

Um enfoque recente, no estudo da heterogeneidade, refere-se a descrição das relações entre escalas, permitindo avaliar a complexidade da paisagem. MILNE (1988, 1991) revisou o emprego da geometria fractal, desenvolvida por MANDELBROT (1983, 1989, 1991) para descrever relações de escala nas características da paisagem. A geometria fractal descreve formas que não podem ser descritas por uma figura euclidiana (ponto, reta, quadrado, cubo), como, por exemplo, uma linha de costa. O comprimento da linha de costa é dependente da unidade de medida que usamos. Quanto maior a unidade, menor o comprimento total da linha costeira, pois ela não captará uma quantidade de reentrâncias. Assim, o comprimento da linha costeira é escala-dependente. Quando o comprimento responde como uma função de potência do tamanho da unidade de medida (resolução), temos um fractal, sendo a dimensão fractal proporcional à declividade da regressão bilogaritma. MANDELBROT (1983) encontrou uma

dimensão de 1.25 para a costa oeste da Grã-Bretanha, o que significa que é uma linha complexa com dimensão fracionária entre 1, dimensão euclidiana da reta e 2, do quadrado, ou seja, uma linha que dobra-se, contorse-se de tal forma, que tende a ocupar o espaço do plano que a contém.

Por outro lado, a geometria fractal foi aplicada para medir a complexidade das trajetórias no espaço de fase de sistemas dinâmicos. Quando dois pontos muito próximos nas suas condições iniciais afastam-se exponencialmente, então este sistema é caótico (TURCOTTE, 1982; KAPITANIAK, 1988). GRASSBERGER & PROCACCIA (1983a, 1983b) propuseram a dimensão de correlação como uma medida da complexidade da trajetória no espaço de fase, sendo o algoritmo, posteriormente adaptado por ABRAHAM et al. (1986) e por ROSENSTEIN et al. (1993, 1994), permitindo a obtenção destas medidas de séries temporais, relativamente curtas, de dados experimentais sujeitos à ruído. Rosenstein produziu então o software MTRCHAOS, versão 1.0, que utiliza estes algoritmos.

É crescente a utilização de Sistemas de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto na descrição da heterogeneidade, tanto a nível de função como de estrutura, sendo que uma relação entre padrões de processos e de manchas pode ou não ser percebida (TURNER & GARDNER, 1991). MILNE (1991) analisa criticamente as limitações da aplicação de dados em forma de grades (“rasterizados”) para cálculo da dimensão fractal da relação área-perímetro.

No Rio Grande do Sul, a ecologia de paisagens foi introduzida pelo trabalho pioneiro da Professora Maria Luiza Porto (PORTO, 1988; DANILEVICZ & PORTO, 1990), que instalou o Laboratório de Ecologia de Paisagens no Centro de Ecologia da UFRGS, e introduziu a disciplina no Curso de Pós-Graduação em Ecologia, onde orientou inúmeras dissertações que abrangeram aspectos diversos desta nova ciência, como: DANILEVICZ (1992), que estudou a relação entre estrutura da comunidade (sob uma base fitossociológica) de uma mancha florestal em relação aos fatores ambientais e LANDAU (1994), que descreveu a estrutura da paisagem utilizando geoprocessamento e caracterização fitossociológica das manchas, utilizando fotografias aéreas e cenas de satélite. Este trabalho, que se insere nesta trajetória, introduz a

utilização de técnicas de quantificação da complexidade (dimensões de correlação e fractal) no estudo das paisagens no Rio Grande do Sul.

Neste contexto, do paradigma da complexidade (MORIN, 1982), de sistemas que se auto-organizam (KAUFFMAN, 1991; TURCOTTE, 1992), onde se compreende que a auto-organização pode ser relacionada a um aprendizado, ou seja, como uma forma de internalização das flutuações do ambiente enquanto estrutura (MARGALEF, 1977; NAVEH & LIEBERMAN, 1984), insere-se o seguinte criticismo: a redução do conceito de vazão mínima ambiental a uma constante estatística, pode reduzir a heterogeneidade intrínseca do sistema bacia hidrográfica, e, com isto, provocar uma regressão no processo de auto-organização do sistema, tornando-o mais frágil perante as flutuações mais bruscas. Assim, espera-se que exista uma relação entre a complexidade das entradas, complexidade estrutural e complexidade das saídas de um sistema auto-organizativo. Desta forma, a complexidade das saídas é uma boa indicação da interação entre as complexidades das entradas e da estrutura. Se tomarmos entrada por precipitação, estrutura por estrutura da paisagem e saída por vazões, teremos um modelo compreensível da relação entre a complexidade de estrutura e função em bacias hidrográficas. A complexidade das vazões de uma bacia, são entradas para os sistemas à jusante, os quais dependem da sua complexidade para auto-organizarem-se, de modo que a complexidade acaba propagando-se hierarquicamente.

Se pretendemos construir o desenvolvimento sustentável, devemos construir um compromisso entre satisfação das necessidades de melhoria da condição humana e exploração prudente dos recursos naturais, de modo que estes tenham duração indefinida (WRI, IUCN, PNUMA, FAO & UNESCO, 1992). Para isto, deve-se mudar o paradigma tecnológico, buscando-se tecnologias adaptadas ou adequadas (SACHS, 1986), que produzam o mínimo impacto possível. Para que isto seja possível, é preciso desenvolver tecnologias que não partam do princípio da simplificação, como estabilização de vazões, mas de um compromisso entre vazão utilizável e complexidade dos fluxos.

Neste trabalho, propõe-se estudar a relação entre estrutura e função em pequenas bacias hidrográficas, utilizando-se de métodos quantitativos da ecologia de paisagens, empregando-se,

como instrumentos, Sistemas de Informações Geográficas, Sensoriamento Remoto e o software MTRCHAOS, que analisa dinâmica e complexidade de séries temporais.

A não existência de rotinas especiais para cálculo da dimensão fractal de padrões da estrutura de manchas, implicou no desenvolvimento de procedimentos adaptados ao software IDRISI.

Vazões de estiagem são, teoricamente, mais sensíveis às modificações entre bio e resistasia nas vertentes de uma bacia hidrográfica. Isto porque o fluxo basal é muito dependente na infiltração. Por outro lado, elas ocorrem, em pequenas bacias, a maior parte do tempo. Estas características, associadas a pré-existência de uma rede de medidores de vazão instalados, garantiram a possibilidade de testar os métodos para avaliar a complexidade de vazões, e compará-la com as complexidades da estrutura da paisagem e da pluviosidade.

O resultado da análise de dependência entre complexidade da estrutura e da função, poderá gerar subsídios para a proposição de métodos alternativos de definição da vazão mínima de preservação ambiental, que incorporem a noção de complexidade..

## 2. DESCRIÇÃO DA REGIÃO

As pequenas bacias hidrográficas, escolhidas na área de Santa Maria, pertencem às nascentes do Arroio Grande, afluente do Rio Vacacaí Mirim, que, por sua vez encontra sua foz no Rio Jacuí, próximo ao ponto em que este muda seu curso, dirigindo-se à leste. Já as de Saporanga, são nascentes do Arroio Feitoria, afluente do Rio Cadeia, pertencente ao sistema de drenagem do Rio Caí.

A geologia da região de estudo, situada sobre a Formação Serra Geral, origina-se no processo de “rifteamento” que resultou na separação das placas sul-americana e africana no período que iniciou no Triássico Superior e se estendeu durante o Juracretáceo, sendo caracterizada por uma sucessão de derramamentos de lavas, predominantemente básicas, ocorrendo, nas suas porções superiores, efusivas ácidas (IBGE, 1986). De acordo com o Mapa Geológico da Folha Santa Maria (GASPARETO et al., 1988) a geologia de Itaara, município de Santa Maria, é caracterizada por uma litologia de “rochas vulcânicas ácidas, riólitos granofíricos de cor cinza clara a média e vitrófiros de cor preta ou castanha subordinados, com disjunção tabular dominante”, não sendo identificada sobre a área das microbacias nenhuma falha ou fratura verificada ou inferida. Nas localidades de Picadas Schneider e São Jacó, município de Saporanga, a litologia é caracterizada por “efusivas básicas continentais toleíticas, comumente basaltos e fenobasaltos” (IBGE, 1986).

De acordo com IBGE (1986) as áreas escolhidas para este trabalho situam-se na região geomorfológica do Planalto das Araucárias, sendo que, as microbacias situadas no município de Santa Maria, encontram-se sobre a unidade geomorfológica Planalto dos Campos Gerais, setor Vacaria, enquanto que, aquelas pertencentes ao município de Saporanga, encontram-se sobre a unidade Serra Geral, setor da Área Serrana. Na área de Itaara, o relevo é dissecado homogêneo, “constituído por colinas seccionadas por vales fluviais com aprofundamentos que

variam de 32 a 50 m”. Em Picadas Schneider e São Jacó, o relevo “é controlado por linhas tectônicas com aprofundamentos dos vales fluviais entre 192 e 260 m”. De modo mais geral, pode-se considerar que as áreas estão situadas no planalto propriamente dito, embora muito próxima do limite com os taludes, no caso de Santa Maria, e no talude da Serra Geral, no caso de Sapiranga.

De acordo com o mapa de solos da folha Santa Maria, elaborado pelo prof. Miguel Ângelo Décimo Azolin, ainda não publicado, os solos de Itaara podem ser classificados como pertencentes a associação Guassupi-Júlio de Castilhos, correspondendo a uma toposeqüência Litólico distrófico álico e Podzólico Vermelho-Escuro álico (IBGE, 1986). Os solos de Picadas São Jacó e Schneider, de acordo com o levantamento do projeto RADAMBRASIL enquadram-se em uma associação de Terra Roxa Estruturada eutrófica e Brunizém Avermelhado eutrófico, podendo apresentar fase pedregosa. Estes solos são bem drenados, diferenciando-se quanto as potencialidades agrícolas em função do tipo de relevo.

O projeto RADAMBRASIL classificou a vegetação original da área situada em Santa Maria como pertencente à Floresta Estacional Decidual, formação Submontana, considerando-se o mapeamento na escala 1:1.000.000. A utilização atual predominante é a agricultura e culturas cíclicas. Esta vegetação é descrita como fisionomicamente caracterizada pela presença de um estrato emergente, tendo como espécies predominantes *Apuleia leiocarpa* (grápia), *Parapiptadenia rigida* (angico), *Myrocarpus frondosus* (cabriúva), *Cordia trichotoma* (louro) e *Phytolacca dioica* (umbu), um dossel caracterizado pela ocorrência de *Patagonula americana* (guajuvira), *Luehea divaricata* (açoita-cavalo), *Nectandra megapotamica* (canela-preta), *Eugenia rostrifolia* (batinga), *Ocotea puberula* (canela-guaicá) e *Pachystroma longifolium* (mata-olho) e de um estrato de arvoretas caracterizado por *Actinostemon concolor* (laranjeira-do-mato), *Sorocea bonplandii* (cincho) e *Trichilia claussenii* (catiguá), além da regeneração das espécies dos estratos superiores. Além destas espécies, REITZ et al. (1988) acrescentam no estrato emergente *Enterolobium contortisiliquum* (timbaúva) e no dossel *Ruprechtia laxiflora* (marmeleiro-do-mato). SAINT-HILAIRE (1974) descreve o uso que se fazia das terras da encosta na região de Santa Maria no ano de 1821:

*"Disse-me meu hospedeiro que nesta região cultivam de preferência as terras de mata, onde a produção é melhor e onde se pode plantar durante 3 anos seguidos, com dois de repouso depois; queimando-se a capoeira que se forma novamente se cultiva durante outros 3 anos e assim sucessivamente. Então é preciso trabalhar à enxada, mas pouco a pouco as capoeiras tornam-se menos vigorosas e terminam por serem substituídas pela erva. Nesse ínterim as raízes das árvores apodrecem, sendo possível o uso do arado."*

Saint-Hilaire também faz referência à exploração de madeira na fralda da Serra, próximo ao Rincão da Boca do Monte, por colonos espanhóis da Biscaia, que instalaram serrarias, as quais exportavam tábuas por terra para Montevideu. Quanto à ocupação da terra no Distrito de Santa Maria, informou que era muito dividida, o que não impedia a existência de estâncias com 6.000 cabeças de gado, sendo que seu hospedeiro possuía 1.000 cabeças e não era um homem rico. Todos os proprietários cultivavam a terra e os mais despossuídos possuíam vacas de leite e cultivavam o solo com as próprias mãos.



FIGURA 3. Vista da microbacia SOCEPE (Santa Maria, RS), vendo-se em primeiro plano resteva sobre solo litólico, seguido da mata galeria e, ao fundo, plantação de eucalipto (foto do autor).



FIGURA 4. Vista da microbacia Primavera (Santa Maria, RS), vendo-se em primeiro plano campo, seguido de mato nativo, e, ao fundo, à direita, coxilha cultivada, e, à esquerda, eucalipto (foto do autor).

Em saída a campo verificou-se, próximo a calha SOCEPE, que a vegetação arbórea nativa restringe-se às matas galeria, onde predominam o guamirim, branquilha, camboim e pitangueira, sendo presente reflorestamento predominante com eucalipto, ocorrência de pastagens, vassourai e campo sujo com capim-cortador, bem como campo cultivado anualmente sobre solo litólico muito pouco espesso e erodido.

A área de Saporanga incluída neste trabalho é classificada, em termos de vegetação original, como Floresta Estacional Semi-Decidual, formação Submontana, sendo o uso atual predominante a agricultura de culturas cíclicas. De acordo com o RADAMBRASIL, a composição desta formação foi estudada a partir de fragmentos reduzidos, desfalcados das espécies de interesse maior dos agricultores, sendo prováveis espécies predominantes no estrato emergente *Pachystroma longifolium* (mata-olho), *Alchornea triplinervea* (tanheiro), *Guapira opposita* (maria-mole), *Cupania vernalis* (camboatá) e outras, e no estrato médio,

*Actinostemon concolor* (laranjeira-do-mato), *Trichilia claussoni* (catiguá) e *Sorocea bonplandii* (cincho) entre outras. RAMBO (1994) não diferenciou entre as Florestas Decidual e Semidecidual, utilizando a classificação de Mata da Fralda da Serra de LINDMAN & FERRI (1974), que, como critério para identificar a mata virgem, empregaram a presença de árvores de troncos altos e possantes, a vegetação heliófaga que habita as partes mais escuras e uma certa uniformidade no desenvolvimento dos cipós. Rambo descreve o que acontece após o desmatamento desta mata, visto a importância areal da vegetação nesta vegetação que sofreu o impacto da colonização de origem alemã, no caso de Sapiranga, a partir da terceira década do século passado. De acordo com HÖRMEYER (1986) o colono ao chegar na gleba, logo devia proceder ao plantio do milho:

*“...o mato é derrubado na estação seca (de março até julho); é deixado, durante 3 a 4 semanas, para secar, e depois incendiado; os cipós, a madeira miúda e os galhos queimam; os grossos troncos ficam sobre o chão. Depois fazem-se no solo solto e fértil, aleatoriamente, caseiras com a enxada ou, mais rapidamente, com um pau; de forma mais simples, porém com os dedos; coloca-se em cada caseira um ou dois grãos de milho, apertando-se a terra. Depois de plantar, o colono não se preocupa o ano inteiro com a plantação, até a época da colheita, quando as espigas são quebradas e levadas para casa....O que, no primeiro plantio, foi causado pela necessidade, tornou-se, mais tarde um costume devido a comodidade”.*

Hörmeier também descreve como o colono que recebia as terras do governo devia desbravar, no prazo de dois anos, a oitava parte da gleba, como obrigação, o que resultou em um rápido desmatamento, principalmente se levarmos em conta que as colônias foram propositadamente de pequena área (BONI, 1983), resultando em um processo intenso de fragmentação da paisagem. Este trecho do relatório de Umberto Ancarini, escrito em 1905, sobre a colônia de Caxias, embora em outra região e de caráter italiano, dá uma noção do grau de destruição da natureza nas áreas de colonização (BONI, 1983):

*“A parte desmatada do terreno é utilizada durante 5 anos só por estes dois cereais (trigo e milho). Depois, é abandonada por algum tempo. Surgem então capoeiras - pequenas manchas de arbustos e moitas - e após 5 ou 6 anos de repouso, o colono queima novamente toda a vegetação que havia crescido durante aquele tempo. Com isto o terreno, principalmente quando acidentado, é despojado de elementos produtivos, as chuvas levam muita terra, e as pedras e o pedregulho começam a ficar a descoberto.*

*Não se pratica adubação do solo. Apenas corta-se, queima-se e semeia-se sobre as cinzas. Todos derrubam e ninguém pensa em reflorestar, e já foram devastados três quintos dos terrenos de mato”.*

Rambo diferencia a regeneração em função do tempo que passa desde a derrubada até o abandono do mato. Quando passa pouco tempo, *Solanum verbascifolium* (fumo bravo) e *Trema micrantha* (crindiúva), tomam conta do terreno, brotam os tocos vivos e as sementes da maior parte das espécies primitivas, e, passando-se algum tempo, pouco se diferencia a mata secundária da primitiva, exceto pelo aumento da frequência de espécies de fácil disseminação como os ingás, os angicos e as canelas. Quando a roça é abandonada após o esgotamento das reservas, segue um vassoural dominado por *Baccharis dracunculifolia* (vassoura comum), acompanhada por *Gynereum argenteum* (capim-cortador). Em seguida o ingá-feijão, o ingá-ferradura e o angico formam densas sociedades. Passados dez anos a vassoura e o capim-cortador desaparecem, o vassoural dá lugar a uma mata secundária um pouco mais baixa que a primitiva. Rambo também levanta a possibilidade desta mata, com o correr do tempo, e com a recomposição das condições edáficas, resultar em uma mata muito similar à primitiva, embora nunca igual. O que ele sustenta com a observação de que em fragmentos de mata secundária mais antigos vão desaparecendo os ingás, a pata-de-vaca e as canelas de baixa estatura e surgirem exemplares esparsos de louro, cedro e canjerana. De acordo com REITZ et al. (1988) a canjerana (*Cabralea canjerana*) é rara em matas primárias em terrenos acidentados e pedregosos, porém muito agressiva em matas secundárias.

De acordo com informações obtidas com o morador idoso Arthur Harff da Picada Schneider, a mata do topo seria primária, onde haveria muito angico e canjerana, e que não encontrava-se muita madeira de lei na mata. Assim, pode-se concluir que estes fragmentos de mata na parte mais alta das encostas não são de mata primária, mas de mata secundária muito velha (pois o informante, com idade superior a 60 anos nunca a conheceu com outra fisionomia), explorada com corte seletivo (de acordo com seu Arthur a canjerana não era cortada porque era “ôca por dentro”). Na saída a campo verificou-se, também, que a espécie mais utilizada para reflorestamento é a acácia, pois de acordo com o informante, ela dá corte em seis anos. Assim, as manchas reflorestadas possuem um ciclo médio de seis anos, pois a

acácia não possui rebrote, resultando em um período de solo descoberto dentro deste intervalo.



FIGURA 5. Vista tomada do Alto Ferrabraz (direção oeste, Sapiranga, RS) do primeiro degrau da Serra Geral, observando-se, no vale à direita, a localidade de São Jacó, e a esquerda, o vale do Rio dos Sinos (foto do autor).

O clima do Rio Grande do Sul, de acordo com RAMBO (1994), pertence à classe subtropical sempre úmida de Köppen. De acordo com IBGE (1986), o clima regional das áreas de estudo é úmido, sendo, em Sapiranga, da variedade com grau de umidade médio, com 400/800 mm de excesso hídrico anual que ocorre de 5 a 10 meses, e temperatura média anual entre 16-18°C; e, em Santa Maria, da variedade com grau de umidade fraco, com 100/800 mm de excesso hídrico anual que ocorre de 5 a 12 meses, sendo a temperatura média anual superior a 18°C. Em ambas as variedades a precipitação encontra-se dentro do intervalo de 1.200 a 1.750 mm/ano.



FIGURA 6. Impacto resultante do corte da acácia-negra (microbacia São Jacó, Sapiranga, RS), observe-se as valetas deixadas pelo trânsito de máquinas pesadas e pelo destocamento (foto do autor).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Escolha da Área de Estudo

A área de estudo compreende quatro microbacias situadas duas a duas, nos municípios de Sapiranga e Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, cujas serão chamadas pelos nomes de São Jacó, Schneider I, Primavera e SOCEPE, em referência, respectivamente, às localidades de Picada São Jacó e Picada Schneider, ao Arroio Primavera e ao clube social SOCEPE, o qual é acesso para a calha que delimita o escoadouro da microbacia.

Estas microbacias foram escolhidas entre aquelas que são monitoradas pelo Projeto Borrachudo, o qual é resultado de um esforço interinstitucional, que envolve a Universidade Federal de Santa Maria/Departamento de Hidráulica e Saneamento, Secretaria da Saúde e Meio-Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul bem como várias Prefeituras Municipais, entre as quais as de Santa Maria e Sapiranga, sendo financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) (GARCIA, 1993; SILVEIRA et al., 1995).

O Projeto Borrachudo iniciou em 1983 sob a responsabilidade da Secretaria da Saúde e Meio-Ambiente, com a incumbência de controlar o “borrachudo” através do controle biológico, inoculando-se o *Bacillus thuringiensis var. isrraelensis* (Bti) nos pequenos cursos d’água das encostas da Serra Gaúcha, onde o inseto provocava danos às atividades turísticas e rurais da região. A necessidade de dosar o Bti de acordo com a vazão dos córregos demandou a quantificação das mesmas, sendo contratado o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da

Universidade Federal do Rio Grande do Sul para dar suporte ao projeto. Os estudos indicaram a utilização de uma calha Parshall de fundo raso, a qual permite obter a vazão através da leitura do nível em uma seção estabilizada (Fig. 7 e 8).



FIGURA 7 - Calha Parshall instalada na Microbacia Primavera (foto do autor).

Em 1992, a Universidade Federal de Santa Maria, em Convênio com a Secretaria da Saúde e Meio-Ambiente, apoiada pela FAPERGS, desenvolveu projeto com o intuito de aproveitar a estrutura acumulada no Projeto Borrachudo para estudos hidrológicos de Pequenas Bacias Hidrográficas. Desta forma foi estabelecido o monitoramento de 20 pequenas bacias.

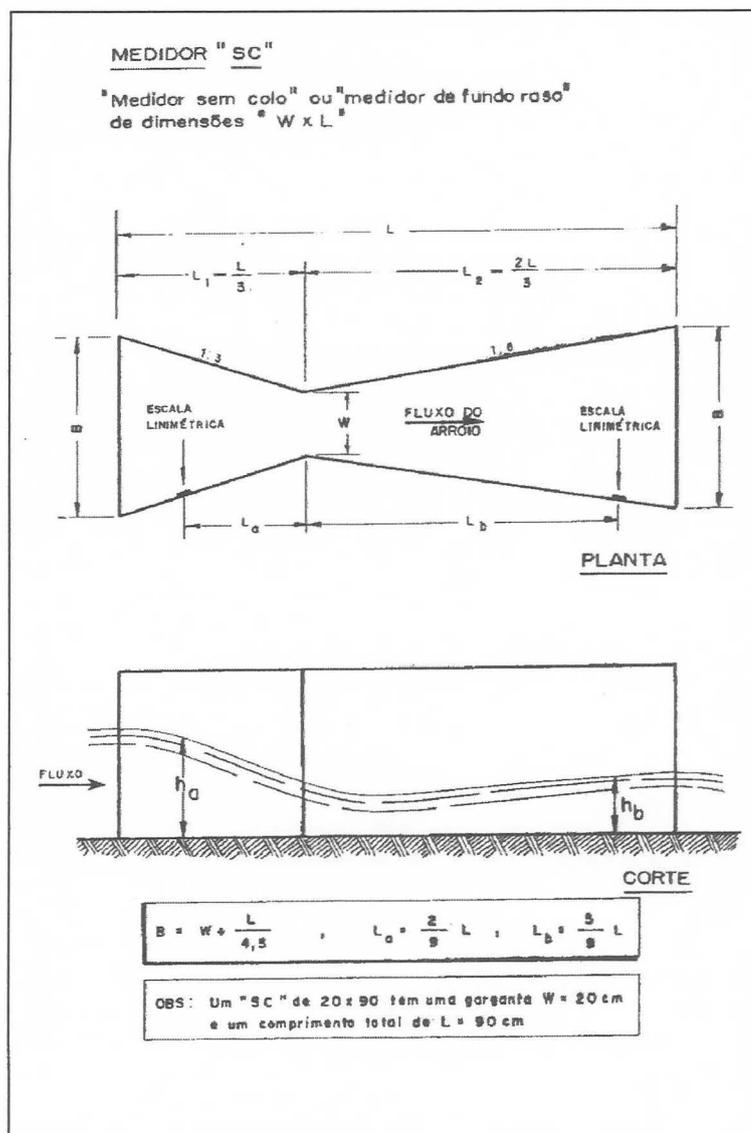


FIGURA 8 - Esquema do medidor de vazão de fundo raso - calha Parshall (SILVEIRA et al., 1995).

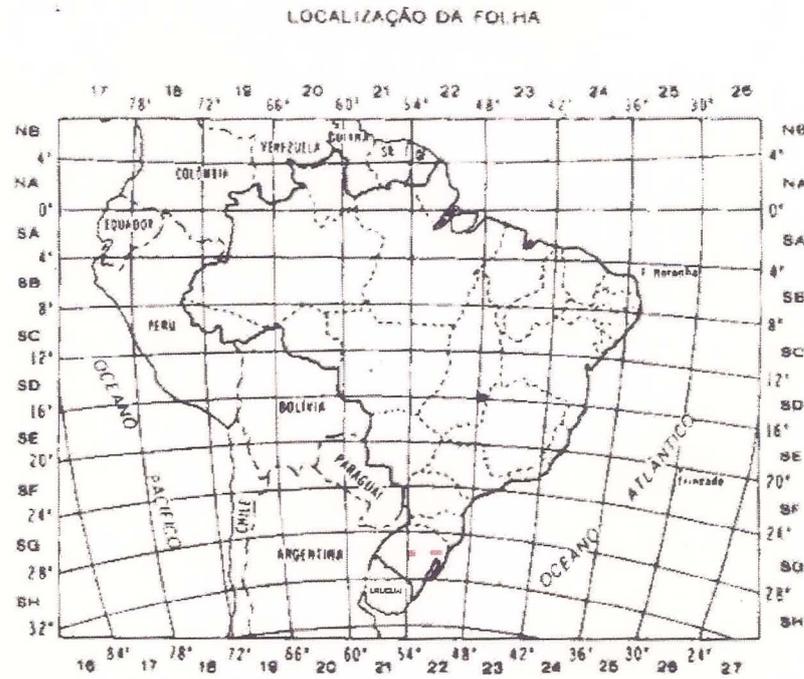
Entre as microbacias deste projeto foram escolhidas 4 para este estudo, de acordo com os seguintes critérios:

1. Disponibilidade de séries temporais de vazões devidamente convertidas (nível na calha para vazão), corrigidas para horário padrão, interpeladas para período de 24 horas e submetidas a análise de consistência dos dados.

2. Disponibilidade de fotografias dos levantamentos aéreos da Diretoria do Serviço Geográfico do Exército Brasileiro.

### 3. Disponibilidade de imagens do satélite Landsat no Centro de Sensoriamento Remoto e Meteorologia do Rio Grande do Sul.

As microbacias localizam-se geograficamente de acordo com as Figuras 9 a 13 e os pontos extremos conforme a Tabela 1.



Situação das Folhas que incluem as áreas de estudo

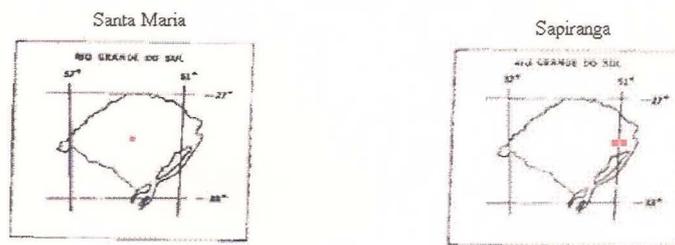


FIGURA 9 - Localização das folhas SANTA MARIA-NE (Santa Maria) e NOVO HAMBURGO/TAQUARA (Sapiranga).

MICROBACIA SÃO JACÓ  
SAPIRANGA, RS, BRASIL

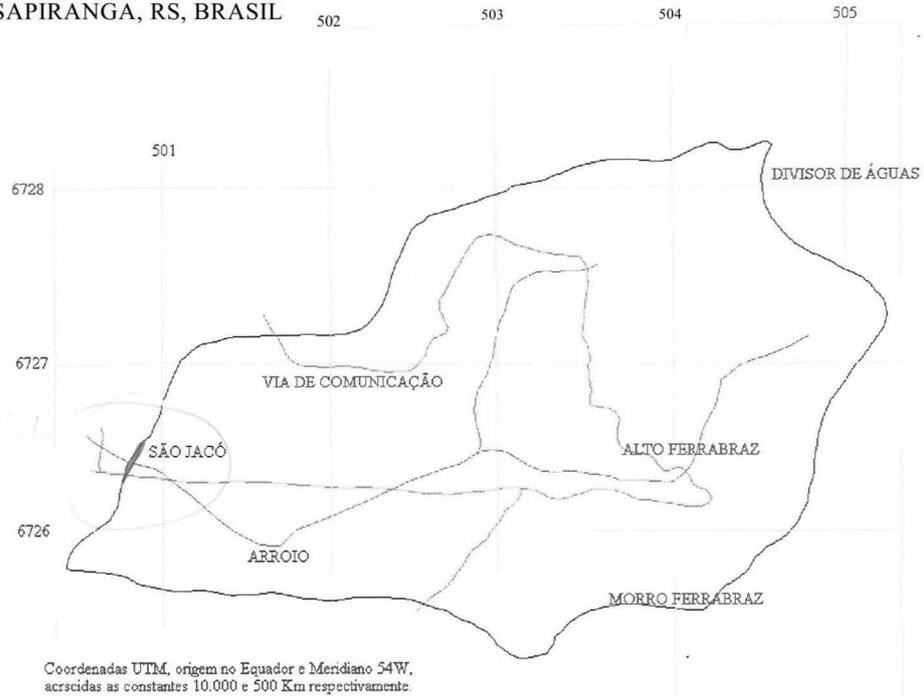


FIGURA 10 - Forma da bacia, hidrologia e vias de comunicação da microbacia São Jacó.

MICROBACIA SCHNEIDERI  
SAPIRANGA, RS, BRASIL

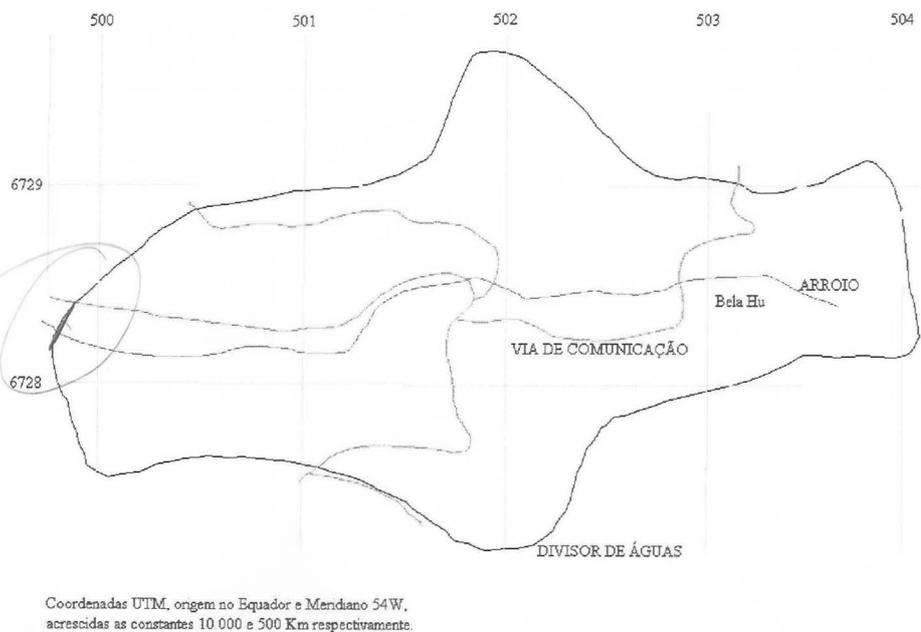
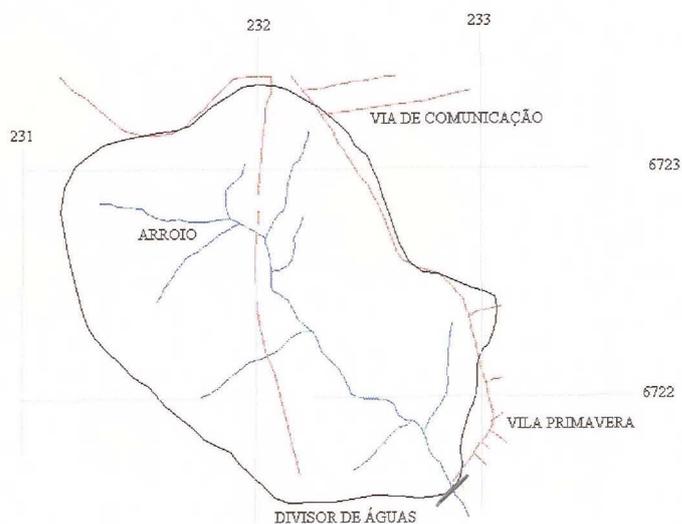


FIGURA 11 - Forma da bacia, hidrologia e vias de comunicação da microbacia Schneider I.

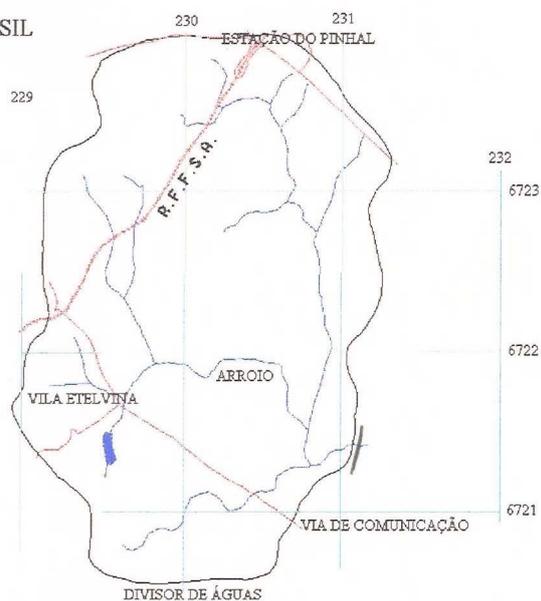
MICROBACIA PRIMAVERA  
SANTA MARIA, RS, BRASIL



Coordenadas UTM, origem no Equador e Meridiano 54W,  
acrescidas as constantes 10.000 e 500 Km respectivamente.

FIGURA 12 - Forma da bacia, hidrologia e vias de comunicação da microbacia Primavera.

MICROBACIA SOCEPE  
SANTA MARIA, RS, BRASIL



Coordenadas UTM, origem no Equador e Meridiano 54W,  
acrescidas as constantes 10.000 e 500 Km respectivamente.

FIGURA 13 - Forma da bacia, hidrologia e vias de comunicação da microbacia SOCEPE.

BACIA	Latitude extrema		Longitude extrema	
	Norte	Sul	Leste	Oeste
São Jacó (Sapir.)	6728,25	6725,28	505,22	500,46
Schneider I (Sapir.)	6729,68	6727,19	504,10	499,81
Primavera (Sta. M.)	6723,37	6721,54	233,07	231,18
SOCEPE (Sta. M.)	6723,98	6720,54	231,30	228,94

TABELA 1. Pontos extremos das microbacias de acordo com coordenadas UTM (Km), tendo por base o Equador e os meridianos 51° e 54°W, respectivamente para os municípios de Sapiranga e Santa Maria, acrescidos das constantes 10.000 Km para latitude e 500 Km para longitude.

### 3.2. Hidrologia

Os dados foram coletados por um observador residente na vizinhança da calha, geralmente o funcionário da prefeitura encarregado de dosar o Bti, ou outro morador próximo. A leitura foi realizada com periodicidade não amarrada a um período definido, uma vez que o observador raramente pôde efetuar as leituras no mesmo horário.

Três informações foram coletadas pelos observadores : data, horário e nível da água na calha.

As séries originais de vazões, bem como de precipitação em Santa Maria, foram gentilmente cedidas pelo Prof. Geraldo Lopes da Silveira, do Departamento de Hidráulica e Saneamento da UFSM, gerente do Projeto, que também procedeu a preparação dos dados (conversão, interpolação e consistência). A interpolação foi linear, seguida de validação segundo

o seguinte critério: se não ocorreu precipitação no intervalo, foi validada a vazão; se houve precipitação e esta foi maior que 30mm, atribui-se valor de extravasamento. Este valor de 30mm foi verificado empiricamente. Quando a calha extravasou, atribuiu-se o valor da vazão de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , superior ao limite de extravasamento das calhas. O valor foi escolhido arbitrariamente, mas usado para todas as séries observadas.

A Tabela 2 resume as informações sobre os períodos das séries temporais de vazões utilizadas neste estudo.

	data inicial	data final	tamanho da série corrigida (dias)
São Jacó (Sapir.)	11/08/1992	21/12/1994	863
Schneider I (Sapir.)	11/08/1992	21/12/1994	863
Primavera (Sta. M.)	02/10/1992	26/01/1995	849
SOCEPE (Sta. M.)	02/10/1992	29/01/1995	851

TABELA 2. Resumo das informações sobre as séries temporais de vazões utilizadas neste trabalho.

A análise das séries temporais de vazões, e da série de precipitação em Santa Maria, foi realizada através do software MTRCHAOS, de autoria de Michael T. Rosenstein, obtido via INTERNET. O software permite a obtenção de estimativas da dimensão de correlação e do maior expoente de Lyapunov (ROSENSTEIN et al., 1993; ROSENSTEIN et al., 1994), que são medidas, respectivamente, da complexidade do sistema e do nível de caos no sistema dinâmico.

Os sistemas caóticos são sistemas não-lineares que tem a propriedade de possuir uma sensibilidade exponencial para as condições iniciais. Se representamos o estado do sistema no tempo  $t$ , contra o estado no tempo  $t+1$ , obtemos o espaço de fase do sistema dinâmico. Em um sistema caótico, tomando-se duas condições iniciais muito próximas, as trajetórias desenhadas no espaço de fase no decorrer do tempo resultam em um afastamento exponencial das duas

trajetórias. O maior expoente de Lyapunov é uma medida da taxa média deste afastamento. Assim, para que um sistema seja caótico, o maior expoente de Lyapunov deve ser positivo e diferente de zero (GRASSBERGER & PROCACCIA, 1983b; KAPITANIAK, 1988; TURCOTTE; 1992). Se não houver expoente de Lyapunov positivo, outros comportamentos dinâmicos são esperados. Para sistemas bidimensionais, KAPITANIAK (1983) apresenta que a existência de dois expoentes negativos (um para cada dimensão do espaço de fase) resulta em um atrator pontual, onde por atrator se entende a região do espaço de fase para onde as trajetórias convergem. Para a combinação de um expoente negativo e um expoente nulo, obtemos um ciclo-limite, que resulta em solução periódica.

GRASSBERGER & PROCACCIA (1983a, 1983b) propuseram um algoritmo para o cálculo dos expoentes de Lyapunov, porém o algoritmo é viável para séries temporais muito longas, o que não é o caso das séries de vazões obtidas em períodos curtos utilizadas neste estudo. A obtenção do espectro de expoentes de Lyapunov é assim, de acordo com ROSENSTEIN et al. (1993) impraticável para pequenas séries temporais, tendo estes proposto que se utilizasse apenas o maior expoente de Lyapunov, o que seria útil para muitas aplicações.

A obtenção do espectro de Lyapunov é relativamente fácil se dispomos das equações matemáticas que descrevem o estado do sistema. Porém, quando não conhecemos estas equações, possuindo dados que apresentam um comportamento que não nos permite diferenciar o que é ruído, álea, do que é caos determinístico, nem de quantos parâmetros podem descrever o estado do sistema, o problema da reconstrução do espaço de fase é o ponto de partida para tentarmos compreender a dinâmica. O algoritmo proposto por ROSENSTEIN et al. (1993) propõe a utilização do método dos intervalos de tempo (“time delay”). Considere que existe uma trajetória  $X$ , que pode ser expressa por uma matriz onde cada linha é um vetor do espaço de fase. Dada uma série temporal com  $N$  pontos,  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , o vetor  $X_i = (x_i \ x_{i+j} \ \dots \ x_{i+(m-1)j})$  representa o ponto da trajetória do espaço de fase ao tempo “ $i$ ”, onde “ $j$ ” é o intervalo de tempo (“lag” ou “time delay”) e “ $m$ ” é a dimensão de encaixamento (“embedding dimension”). Assim, por exemplo, se queremos reconstruir a dinâmica de uma série temporal, supondo que um espaço tridimensional é suficiente para explicá-la (opção “a priori”), construiremos uma matriz  $X$ , com  $M$  linhas e  $m$  colunas, onde  $M$  é o número de intervalos da série e  $m$  é a dimensão

do espaço no qual queremos encaixar a série observada. Se queremos um intervalo “ $\tau$ ” igual a unidade, obteremos uma matriz com vetores  $X_i = (x_i \ x_{i+1} \ x_{i+2})$ .

Uma vez reconstruída a dinâmica, MTRCHAOS localiza os pares de vizinhos mais próximos. Estes são localizados minimizando a distância euclidiana para o ponto de referência. O algoritmo tem uma restrição, de modo que os pares de vizinhos mais próximos devem ter uma separação maior que o período médio da série (obtido como a recíproca da frequência média do espectro de potência).

Se consideramos um par de vizinhos mais próximos como pontos de trajetórias com condições iniciais diferentes, o maior expoente de Lyapunov será estimado pela taxa média de separação dos vizinhos mais próximos. Desta forma:

$$d_j(i) \approx C_j e^{\lambda_1(i\Delta t)},$$

onde  $C_j$  é a separação inicial. Aplicando logaritmos, obtêm-se:

$$\ln d_j(i) \approx \ln C_j + \lambda_1(i\Delta t).$$

O maior expoente de Lyapunov é então obtido ajustando-se uma reta pelo método dos mínimos quadrados à região linear do gráfico bilogarítmico da distância euclidiana média entre os vizinhos mais próximos após “ $t$ ” intervalos de tempo como uma função de “ $t$ ”. Mesmo quando não existe uma região linear no gráfico, o que informa que não existe expoente de Lyapunov positivo e, portanto, não apresentam caos determinístico, o procedimento permite obter mais informações sobre a dinâmica da série. Espera-se que para sistemas estocásticos e quase-periódicos os gráficos apresentem uma forma arredondada, plana no topo. Para sistemas estocásticos, espera-se um salto inicial muito forte para uma pequena separação de  $t = 0$  (ROSENSTEIN et al.,1993).

A dimensão de correlação “ $D_2$ ” é obtida em MTRCHAOS examinando-se as propriedades de escalonamento da soma de correlação. Para um “ $m$ ” dado, a soma de correlação  $C_m(r)$  é definida como:

$$C_m(r) = (2/(M(M-1))) \sum \theta (r - \| X_i - X_k \| ),$$

onde  $M$  é o número de pontos reconstruídos e  $\theta ( )$  é a função Heavyside. De acordo com ROSENSTEIN et al. (1993) a soma de correlação é interpretada como a proporção de pares de pontos que são separados por uma distância menor ou igual a “ $r$ ”, onde “ $r$ ” é uma distância euclidiana fixada. ABRAHAM et al. (1986) demonstraram que a declividade de um gráfico bilogarítimo de  $C_m(r)$  como uma função de “ $r$ ”, na região onde há escalonamento, é igual a  $D_2$ .

MTRCHAOS exige quatro parâmetros escolhidos “a priori” para efetuar os cálculos, o período médio, o intervalo de reconstrução “ $j$ ”, a dimensão de encaixamento “ $m$ ” e o tempo de divergência (“ $diverge T$ ”), que expressa o intervalo a ser considerado para análise. O período médio deve ser estimado analisando-se o espectro de potência da série, o qual é obtido através de uma transformação de Fourier. Para obter-se “ $j$ ”, o software dispõe de quatro recursos. No primeiro, utiliza-se o módulo “View Delay Portrait”, que apresenta lado a lado dois tipos de gráficos bidimensionais do tipo  $t_i \times t_{i+j}$ , um gráfico de linhas e o diagrama de dispersão. Os outros três modos estão concentrados no módulo “Estimate Reconstruction Delay”, que oferece três métodos: a) deslocamento médio; b) autocorrelação e c) solução da pequena janela. Neste trabalho foi utilizado o método do deslocamento médio, o qual fornece uma medida da expansão da reconstrução. O autor, de acordo com resultados empíricos, propõe que a melhor estimativa de “ $j$ ” é representada quando a declividade primeiro cai para 40% do valor inicial, valor este que é “default” para o programa. A dimensão de encaixamento “ $m$ ” foi o parâmetro encontrado por tentativa. Rodou-se o programa para vários valores de “ $m$ ” para cada série temporal, escolhendo-se os valores de “ $D_2$ ” para a combinação de parâmetros que resultaram no melhor coeficiente de determinação “ $r^2$ ” para a região de escalonamento verificada visualmente no módulo “Estimate Correlation Dimension”. O critério para verificar se o tempo de divergência foi suficiente é através da visualização do gráfico bilogarítimo da distância euclidiana média

versus tempo e verificar se saturou, ou seja, se o gráfico alcançou o platô. Neste trabalho o tempo de divergência utilizado incluiu os primeiros 300 pontos da série temporal, o que garantiu a saturação.

Para testar a relação entre complexidade das vazões e das precipitações, foi comparado o comportamento dinâmico das séries de Santa Maria com MTRCHAOS.

Os resultados de “ $D_2$ ”, “ $m$ ” e período médio para as quatro bacias foram analisados em gráficos de probabilidade normal para verificar se desviavam da linearidade, convertidos para valores “ $z$ ” (padronização), e submetidos à análise de Cluster e de Componentes Principais no software SYSTAT, com opção de distância estimada pelo índice de correlação de Pearson.

### 3.3. Ecologia de Paisagem

A análise da ecologia da paisagem foi feita segundo os passos:

1. Saída a campo para reconhecimento, onde foi realizado registro fotográfico dos diversos tipos de usos de solo na região das microbacias, bem como foram obtidos depoimentos de moradores sobre aspectos da região.

2. Estabelecimento de um banco de dados geográficos.

3. Obtenção de índices quantitativos da Ecologia de Paisagem.

4. Análise estatística dos índices da Ecologia de Paisagem.

As saídas de campo ocorreram em 1994 nos dias 18 e 19 de julho em Santa Maria e nos dias 27 de julho e 03 de agosto em Sapiranga. Nestas saídas foram obtidas 130 fotografias, as quais foram planejadas para auxiliar na classificação das imagens remotas.

Os mapas base utilizados foram as cartas da Diretoria do Serviço Geográfico do Exército (DSG):

a) Para as microbacias de Santa Maria foi utilizada a folha SH.22-V-C-IV-1-NE, SANTA MARIA-NE, escala 1:25:000, de acordo com cobertura aérea de 1975.

b) Para as microbacias de Saporanga foram utilizadas as folhas SH.22-V-D-VI-2, NOVO HAMBURGO e SH.22-X-C-IV-1, TAQUARA, escala 1:50.000, cobertura aérea de 1975.

A hipsometria, hidrografia, estradas, pontos de referência e limites das microbacias foram digitalizados com uma mesa digitalizadora Digigraf Da Vinci, 18'x 12', com o software ROOTS (© President and Fellows of Harvard College; CORSON-RIKERT, 1990), instalado em um microcomputador AT 486 DX, 40 Mhz, com 8 Mbytes de RAM, vídeo SVGA colorido com placa de 1 Mbytes, e disco rígido de 420 Mbytes., sendo posteriormente exportados para o Sistema de Informações Geográficas IDRISI v. 4.1 (© Clark University and J. Ronald Eastman; EASTMAN, 1992a, 1992b, 1993) onde foram armazenadas em formatos vetorial e raster. Foi utilizada uma impressora "inkjet" HP Deskjet 550C.

As informações obtidas da hipsometria foram rasterizadas, interpoladas e filtradas para gerar o modelo digital de terreno (MDT) das bacias. As rotinas LINERAS, INTERCON e FILTER foram utilizadas. De acordo com EASTMAN (1992a), os melhores resultados são obtidos com o filtro de média. A resolução base utilizada foi de 30 metros, de forma a se adequar às informações obtidas do satélite Landsat TM 5. Os procedimentos foram repetidos para as resoluções de 60, 120 e 240 metros para posterior estimativa de índices derivados da geometria fractal. Os MDTs resultantes, resolução de 30 metros, foram processados no módulo SURFACE para a obtenção de mapas de declividade ("slope") e de direção de escoamento ("aspect"). A declividade foi expressa em porcentagem e classificada de acordo com o projeto RADAMBRASIL (IBGE, 1986). A direção de escoamento foi expressa em azimute em relação ao norte. Projeções tridimensionais dos MDTs foram obtidas através do módulo ORTHO.

As imagens de declividade e direção de escoamento foram preparadas para cálculos através de dois procedimentos. No primeiro, utilizou-se uma imagem borracha obtida reclassificando-se a imagem da forma da bacia para atribuir valor -9999 às células que possuem

valor 0 (fundo, as células da bacia possuíam valor 1) (módulo RECLASS), seguido de uma operação de multiplicação no módulo OVERLAY. A imagem obtida foi então convertida para formato ascii e lida em uma planilha EXCEL, resultando em um arquivo com uma única coluna e tantas linhas quanto o número de células da imagem. Na planilha apagaram-se todos os registros com valor igual a -9999, resultando em uma coluna com número de células igual a área da microbacia expressa em número de células. Esta série de valores foi analisada estatisticamente a fim de serem obtidos valores médios (DECLMDIA e AZESCMDI). Outro procedimento foi realizado com os planos de informação de classes de declividade, sendo reclassificados para atribuir valor zero para as classes de valores inferiores a 25%, sendo então processadas as imagens no módulo HISTO para obterem-se os valores percentuais de área com declividade maior que 25% (DECL25). Procedimento similar foi efetuado para a imagem de direção de escoamento, sendo reclassificada a imagem para atribuir valor zero a todas as células com azimutes que não pertencem ao intervalo [90,270], que indicam as direções de escoamento voltadas para os quadrantes sul (V90AZ270).

Para os dados da hidrografia e forma da bacia, respectivamente, rasterizaram-se as imagens vetoriais através dos módulos LINERAS e POLYRAS para as resoluções 30, 60, 120 e 240 metros. Os planos de informações (PIs) de forma da bacia foram utilizados como borracha para apagar as informações desnecessárias situadas fora dos limites das bacias hidrográficas.

A informação base para obtenção dos PIs de cobertura e uso de solo foram as imagens do satélite Landsat TM 5, com auxílio de fotografias aéreas obtidas junto a 1ª Divisão de Levantamento da DSG e das fotos obtidas nas saídas a campo. Foram utilizadas as cenas 221 81 N, de 08/09/1993, bandas 3, 4 e 7 para as bacias de Sapiranga e 223 81 B, de 26/02/1987, bandas 1 a 6, para Santa Maria. As fotografias aéreas foram VM AST-10 1370 PMW R-163, 15/12/1964, 1:60.000, no. 2091, para Sapiranga; e 01-75 05 SACS, 06/05/1975, 1:110.000, no. 1064, para Santa Maria.

Janelas com resolução de 30 metros, incluindo as áreas de estudo, foram obtidas utilizando-se o sistema SITIM no Centro de Sensoriamento Remoto e Meteorologia do Rio Grande do Sul, sendo gravadas em disquetes e lidas no IDRISI, após adequação da

documentação através do módulo DOCUMENT. Após, foram escolhidos pontos de controle nas cartas base e referenciadas as imagens através do módulo RESAMPLE.

As janelas contendo as microbacias das fotografias aéreas foram rasterizadas em um Scanner Mustek MFS-6000CS, empregando o software Micrografx Picture Publisher LE, utilizando-se resolução de 1200 dpi (pontos por polegada) para a foto de Santa Maria e de 696 dpi para Sapiranga, resultando, consideradas as escalas das fotos, em resolução no terreno, respectivamente, de 2,33 e 2,19 metros. As imagens, no formato TIFF, foram convertidas para formato IMG do IDRISI com o módulo TIFIDRIS, sendo, após, referenciadas através do módulo RESAMPLE. As fotos, assim rasterizadas, puderam ser examinadas no módulo COLOR, sendo facilitada a referência através da superposição de arquivos vetoriais na tela através da opção “v”. Deste modo pôde-se, com ampliações sucessivas em tela, interpretar-se, com precisão, a maior parte dos usos e cobertura de solos. As imagens foram classificadas supervisionadamente obtendo-se amostras que foram digitalizadas em tela através da opção “d” do módulo COLOR, os quais foram processados no módulo MAKESIG para obter-se a assinatura das amostras, as quais foram instrumento para o módulo MAXLIKE, que resultou em PIs com a classificação por máxima verossimilhança.

A imagem de satélite de Santa Maria, região de Itaara, foi classificada considerando-se os 5 principais usos identificáveis, sendo utilizada a classificação da fotografia aérea como auxiliar, bem como as informações obtidas a campo. Foram obtidas assinaturas espectrais de amostras e feita a classificação através do módulo MAXLIKE sobre as bandas 1 a 5. Para a imagem de Sapiranga o procedimento foi similar, porém só foram disponíveis as bandas 3, 4 e 7. As classes de uso e cobertura foram área úmida, mato denso, mato aberto, ambiente aberto (pastagens e culturas anuais, as quais não se conseguiu diferenciar na imagem) e campo sujo para a cena de Santa Maria. Para Sapiranga foram mato nativo, reflorestamento, capoeira, campo e solo descoberto. Em Sapiranga os açudes foram raros e muito pequenos para serem incluídos, e não foi identificada a presença de culturas anuais, visto que em setembro ainda se está preparando o solo, o que resulta em grande quantidade de solo exposto. Em Santa Maria, solo descoberto não aparece em função da época do ano, fevereiro, em plena fase de desenvolvimento das culturas de verão.

Outro procedimento realizado foi isolar as manchas de cada classe apagando-se as manchas de outras classes através do módulo RECLASS e rodando-se o módulo DISTANCE para obter-se a distância de cada célula à célula mais próxima da classe em questão. As imagens foram convertidas para formato ascii e lidas em uma planilha EXCEL, onde foram analisadas estatisticamente, obtendo-se média, desvio padrão, variância, significância e intervalo de confiança para 95%. As imagens aparecem como uma seqüência de valores em uma única coluna. Para reduzir o tamanho do arquivo, as imagens que ultrapassaram o número máximo de linhas de uma planilha (no caso 16.384) foram importadas para o software SYSTAT como formato ascii e exportadas para formato dBase III. No banco de dados apagaram-se todos os registros iguais a zero (fundo da imagem) e importou-se novamente para o SYSTAT e daí, em formato ascii, para o EXCEL.

O índice de Diversidade de Shanon-Weaver (H) e o índice de Homogeneidade (J) para as microbacias inteiras foi calculado a partir do processamento das imagens classificadas com o módulo HISTO, obtendo-se tabela de valores de freqüência de cada classe, excluindo-se a classe zero, por ser o fundo da imagem. Os resultados seguiram as fórmulas (SCHÄFER, 1985):

$$H = - \sum p_i \ln p_i, \text{ onde } p_i \text{ é a freqüência da classe } i$$

$$J = H' / \ln(n), \text{ onde } n = \text{número de classes}$$

Também processaram-se as imagens classificadas através do módulo PATTERN, que atribui à célula central de janelas de 3 x 3 células valores obtidos através dos seguintes índices (EASTMAN, 1992b):

1. Riqueza Relativa  $R = n/n_{\max} * 100$ , com  $n$  = número de classes diferentes
2. Diversidade  $H = -\sum(p * \ln(p))$ , com  $\sum$  = soma sobre todas as classes  
 $p$  = proporção da janela em cada classe  
 $\ln$  = logaritmo natural
3. Dominância  $D = H_{\max} - H$ , com  $H$  = Diversidade  
 $H_{\max} = \ln(n)$
4. Fragmentação  $F = (n-1)/(c-1)$ , com  $c = 9$ , número de células na janela
5. NDC = número de classes diferentes em cada janela

6. CVN = número de células diferentes da célula central nas janelas de 3 x 3 células

7. BCM = número de pares diferentes na janela de 3 x 3 células.

As imagens resultantes foram exportadas para planilha EXCEL de forma similar à utilizada com as resultantes do módulo DISTANCE, como visto acima, e analisadas estatisticamente a fim de obterem-se os valores médios.

Os índices baseados na Geometria Fractal foram calculados de acordo com MILNE(1988, 1991). Calcularam-se as dimensões fractais da forma da bacia, da hidrografia, da topografia e da relação área sobre perímetro.

A dimensão fractal da forma da bacia (FDIMFORM) foi calculada regredindo-se o logaritmo da área da bacia expressa em células sobre o logaritmo da resolução expressa em metros. A dimensão fractal é igual a declividade da reta. Os dados foram obtidos aplicando-se o módulo HISTO sobre as imagens de forma das bacias nas resoluções de 30, 60, 120 e 240 metros. Procedimento similar foi feito para a obtenção da dimensão fractal da hidrografia (FDIMHID).

Para obter-se a dimensão fractal da topografia (FDIMTOP), o procedimento foi regredir o logaritmo do número de cubos com lados igual a resolução que cabem sob a superfície do terreno, considerando-se o plano de altitude zero como referência, sobre o logaritmo da resolução em metros. A dimensão fractal é a declividade da reta de regressão. Os dados foram obtidos dividindo-se a imagem do MDT (que expressa a altitude em metros de cada célula) por uma imagem com todas as células possuindo o valor em metros da resolução através do módulo OVERLAY. A imagem resultante é expressa em números reais. Convertendo-se a imagem para inteiro através do módulo CONVERT e utilizando-se a opção "truncation", que elimina a parte fracionária do valor, obteve-se uma imagem que foi processada no módulo AREA, sendo os valores exportados para um arquivo documento. Este arquivo foi exportado para formato dbf através do módulo DBIDRIS e importado para a planilha eletrônica EXCEL. Os dados foram expressos em duas colunas: a primeira expressa o número de cubos acima da célula "z", o segundo, a frequência de células com "z" cubos acima. O valor de "z" igual a zero (ou qualquer outro valor determinado que não ocorra na bacia) indicou que a célula se encontrava fora da

bacia, sendo estes valores desconsiderados. O valor do somatório do produto de “z” pela frequência de “z” expressa o número de cubos que cabem sob a superfície do terreno.

A dimensão fractal da relação área sobre perímetro (FDIMARPE) foi calculada regredindo-se o logaritmo da área sobre o logaritmo do perímetro para o conjunto de todas as manchas. A dimensão fractal é a declividade da reta de regressão. As imagens classificadas foram processadas no módulo GROUP para individualizar as manchas, sendo as imagens resultantes processadas nos módulos AREA e PERIM para a obtenção da área e do perímetro de cada mancha, dados que foram gravados em arquivos documento e exportados para formato dbf através do módulo DBIDRIS. O arquivo dbf foi importado para planilha EXCEL. A área foi expressa em células e o perímetro em lados. A planilha continha 5 colunas: número da mancha, área da mancha, perímetro da mancha, logaritmo da área e logaritmo do perímetro.

Os índices foram classificados em três grupos: topográficos, de heterogeneidade e fractais:

1. Topográficos: declividade média (DECLMDIA), direção de escoamento média (AZESCMDI), percentagem da área com declividade maior que 25% (DECL25) e percentagem da área com direção de escoamento voltada para os quadrantes sul (V90AZ270).

2. Heterogeneidade: H, J, R média, H média, D média, F média, NDC médio, CVN médio e BCM médio.

3. Fractais: FDIMFORM, FDIMHID, FDIMTOP e FDIMARPE.

Os índices obtidos para as quatro bacias foram analisados quanto a normalidade em gráficos de probabilidade normal, sendo transformados pela raiz quadrada quando muito desviados da linearidade (os índices desviantes eram proporções, sendo a raiz quadrada eficiente para linearizar), convertidos para seus valores “z” (padronização), apresentando média = 0 e desvio padrão = 1 e processados no SYSTAT para análise de Cluster e Componentes Principais,

considerando-se o conjunto total e grupo a grupo. As variáveis que foram transformadas através da raiz quadrada foram DECL25, FDIMARPE, RRMDIO e V90AZ270.

#### 3.4. Cruzamento Hidrologia x Ecologia de Paisagem

Para fins de se compreender a relação entre os índices hidrológicos e os de ecologia de paisagens, procedeu-se análise de Cluster e de Componentes Principais para o conjunto de todos os índices para as quatro bacias e combinando-se os índices hidrológicos com os grupos de índices topográficos, de heterogeneidade e fractais em separado.

## 4. DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS E COMENTÁRIOS

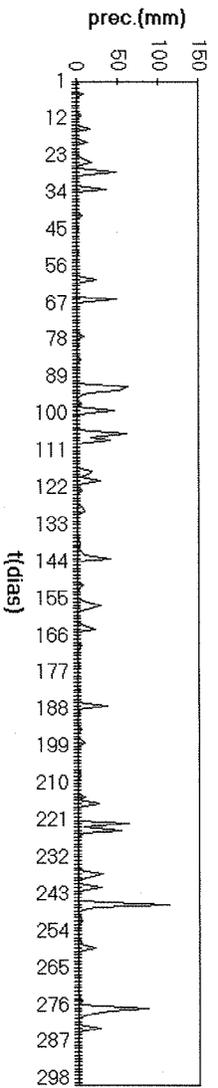
### 4.1. Hidrologia

As séries temporais de vazões e os dados de precipitação em Santa Maria, considerados os primeiros 300 valores, podem ser vistas na Figura 14. Pode-se observar, em primeiro momento, que os hidrogramas das microbacias situadas em municípios diferentes possuem uma variabilidade diferenciada, sendo mais quebradas as linhas definidas para as microbacias de Sapiranga (São Jacó e Schneider I). Este fenômeno deve ser atribuído ao processo de interpolação linear, que foi empregado em função das coletas de dados terem sido efetuadas três vezes por semana nas microbacias de Santa Maria (Primavera e SOCEPE).

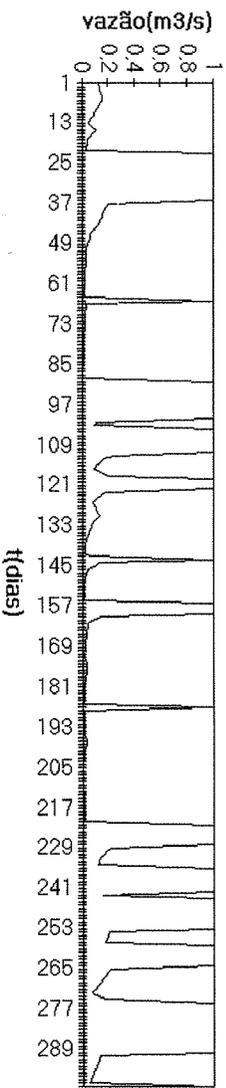
Outra observação refere-se a um dado que não foi afetado por este processo, que é o número de períodos contínuos em que as calhas extravasaram no intervalo de 300 dias. As microbacias de Sapiranga apresentaram número igual de períodos de extravasamento (9), embora a duração de cada período tenha sido maior para Schneider I. Já as microbacias de Santa Maria apresentaram valores diferentes: a microbacia SOCEPE apresentou um número menor (13) de períodos de extravasamento do que a microbacia Primavera (16), o que pode ser explicado pelo fato de que a queda de vazão, ocorrida entre os picos (vide gráfico de precipitação) situados entre os dias 21 e 40, 91 e 101, e entre os dias 271 e 290, não foi suficiente para alcançar a vazão máxima da calha. Este comportamento deve refletir o efeito da área das microbacias. As áreas das microbacias estão apresentadas na Tabela 3 :

Microbacia	Área (Km <sup>2</sup> )
São Jacó	8.98
Schneider I	6.13
Primavera	2.29
SOCEPE	6.08

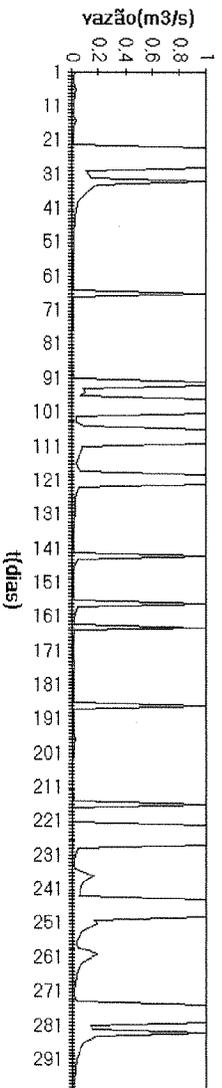
TABELA 3 - Área das microbacias, segundo SILVEIRA et al. (1995).



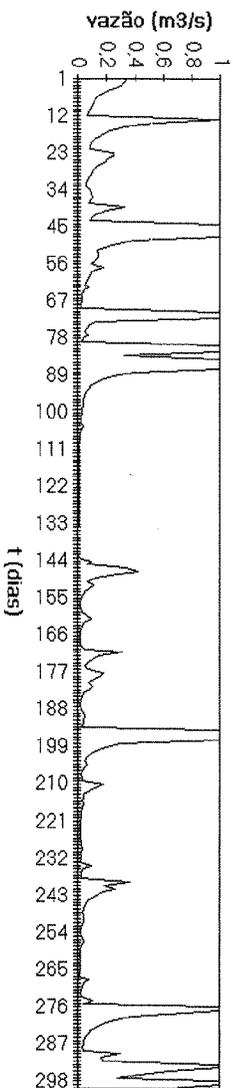
Precipitação em Santa Maria



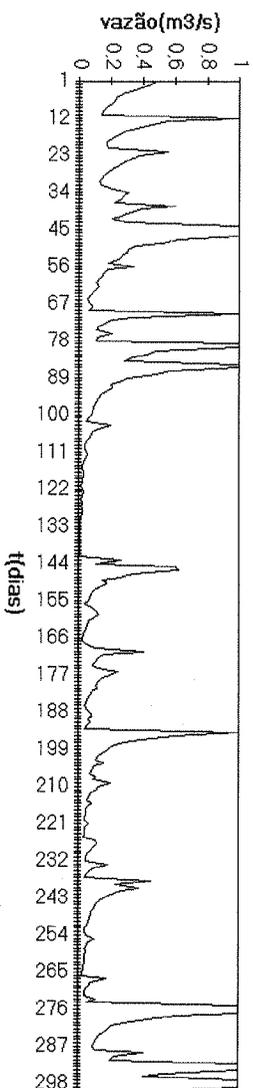
Hidrograma da série interpolada, SOCEPE



Hidrograma da série interpolada, Primavera



Hidrograma da série interpolada, Schneider I



Hidrograma da série interpolada, São Jacó

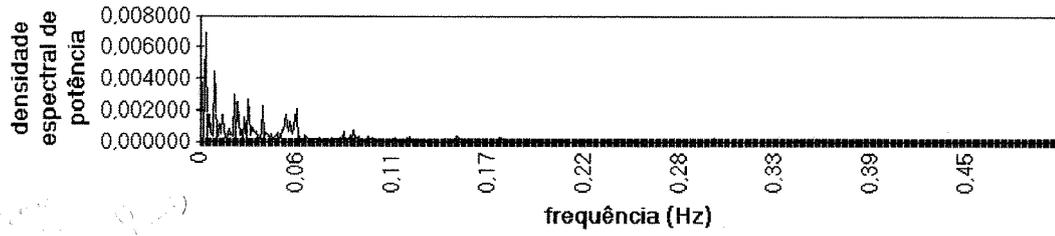
FIGURA 14 - Hidrogramas das séries interpoladas de vazões e precipitação em Santa Maria, considerados os primeiros 300 valores para cada microbacia. A vazão de 1 m<sup>3</sup>/s foi empregada para significar extravasamento da calha, sendo os valores máximos observados de 0.6197, 0.6477, 0.2382 e 0.2378 m<sup>3</sup>/s, respectivamente para as calhas São Jacó, Schneider I, Primavera e SOCEPE.

De acordo com TUCCI (1993), quanto maior a bacia, maior o efeito de “buffer” dos compartimentos, de modo que áreas maiores tendem a apresentar vazões mais regulares que áreas menores. A relação de áreas (maior/menor) entre as microbacias de Saporanga é de 0.68, enquanto, entre as de Santa Maria, é de 0.38. Deste modo, a diferença nos períodos de extravasamento em Santa Maria podem ser devidas ao efeito de amortecimento. Em Saporanga os efeitos da diferença de área não foram perceptíveis.

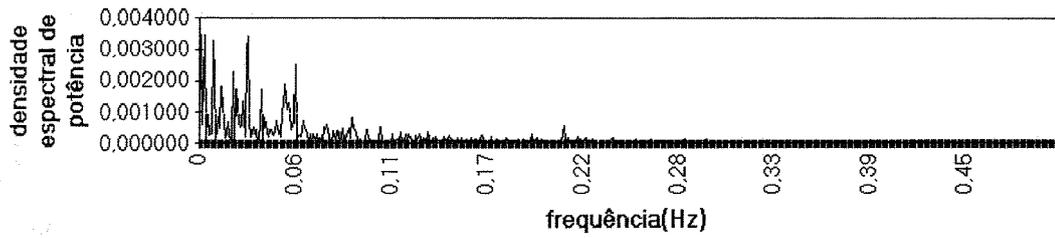
A análise dos espectros de potência das séries, apresentadas na Figura 15, demonstram que, tomando as microbacias duas a duas, as de Santa Maria e as de Saporanga, as maiores apresentam uma proporção maior da energia total nas frequências menores. Este fenômeno também é consistente com a observação de que as áreas maiores tendem a apresentar vazões mais regulares.

Observa-se que na série de precipitações de Santa Maria, esta energia é distribuída sobre todo o espectro. Assim, uma propriedade das microbacias, em relação a principal função de força - a precipitação, é a eliminação dos componentes de frequências mais altas, o que significa um tamponamento do sistema, que passa a internalizar as flutuações mais comuns. MARGALEF (1977) comenta que qualquer sistema auto-organizativo têm a propriedade de regularizar uma série de entradas ao azar e convertê-las em uma saída constante, aproximadamente constante ou com flutuações aproximadamente regulares. Este processo seria resultado da capacidade dos sistemas auto-organizativos de internalizarem informação externa, resultando em uma forma de aprendizagem, representada, por exemplo, pelos ritmos internos, que permitem ao ecossistema “antecipar” as mudanças no ambiente. No caso de microbacias de encosta, este aprendizado deve refletir-se nos processos de sucessão da vegetação, pedogênese e morfogênese das vertentes (CASSETI, 1991).

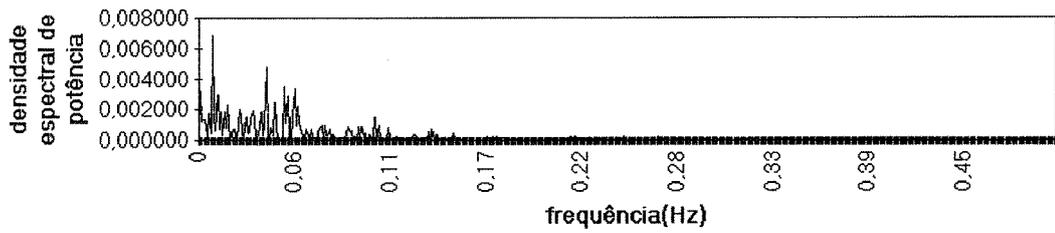
**Espectro de potência da série de vazões, São Jacó**



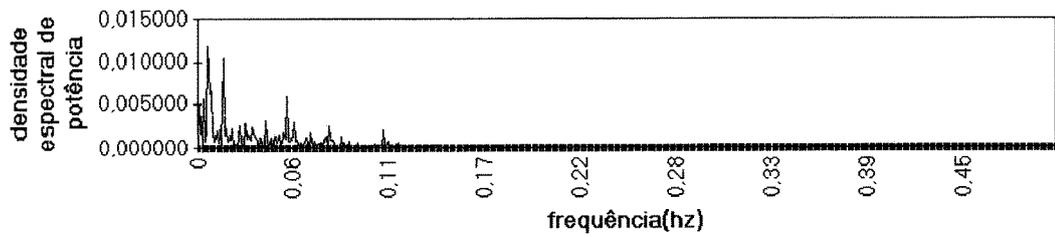
**Espectro de potência da série de vazões, Schneider I**



**Espectro de potência da série de vazões, Primavera**



**Espectro de potência da série de vazão, SOCEPE**



**Espectro de potência da série de precipitação , Santa Maria**

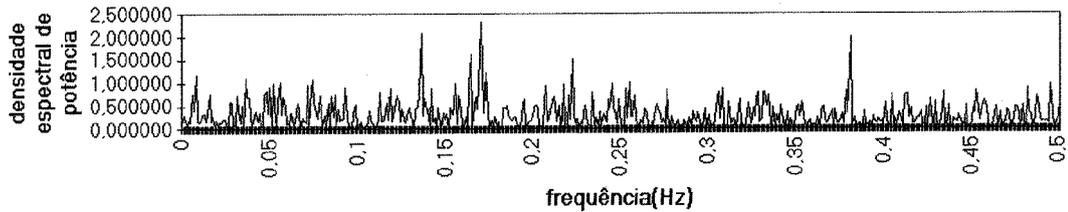


FIGURA 15 - Espectro de potência das séries de vazões das microbacias e de precipitação em Santa Maria. A densidade espectral de potência expressa a contribuição para a energia total da série temporal daqueles componentes com frequências entre  $f$  e  $f+df$  (TURCOTTE,1992).

A Figura apresenta os resultados da análise dinâmica das séries temporais, cujas são analisadas em termos do padrão de afastamento ou não dos pares de vizinhos mais próximos, interpretados como pontos de trajetórias do espaço de fase iniciadas sob condições diferentes. Em todos os casos os resultados expressam uma dinâmica do tipo estocástica, cuja é diagnosticada pela forma “curvada” na região de crescimento dos valores, ou seja, por uma abordagem do teto assintótico tendendo a curva, e pelo muito rápido distanciamento dos pares próximo ao tempo inicial, alcançando a assíntota em valores muito próximos de zero (ROSENSTEIN et al.,1993). A ausência de uma região linear de crescimento das distâncias euclidianas nos gráficos descarta a existência de caos na dinâmica das microbacias e na precipitação de Santa Maria. Observa-se na série da precipitação, na região entre 1 e 20 dias, um padrão aproximadamente cíclico de distâncias, com amplitudes decrescentes convergindo rapidamente para o teto, o que significa que existe, em períodos curtos, a possibilidade de internalização de flutuações rítmicas ou quase rítmicas pelos sistemas.

Os gráficos que expressam a relação entre a distância euclidiana de vetores no espaço reconstruído, e o número de pares de vetores com distância menor ou igual a mesma, permitem analisar a complexidade das séries temporais. Na Figura 16 pode-se observar que as microbacias maiores em cada município, São Jacó e SOCEPE, possuem uma região inicial (dominada pelo ruído) mais extensa que as suas microbacias vizinhas, respectivamente, Schneider I e Primavera. Quanto a este parâmetro, observa-se, também, que o intervalo de  $\ln(\text{“radius”})$ , da série de precipitação de Santa Maria, que está na região de ruído, engloba os intervalos de valores de  $\ln(\text{“radius”})$  para as microbacias. O grau de curvatura, na região de escalonamento, demonstra também uma influência da área das microbacias, quando consideradas duas a duas. As menores apresentam um grau de desvio da linearidade mais acentuado, apresentando uma concavidade mais evidente.

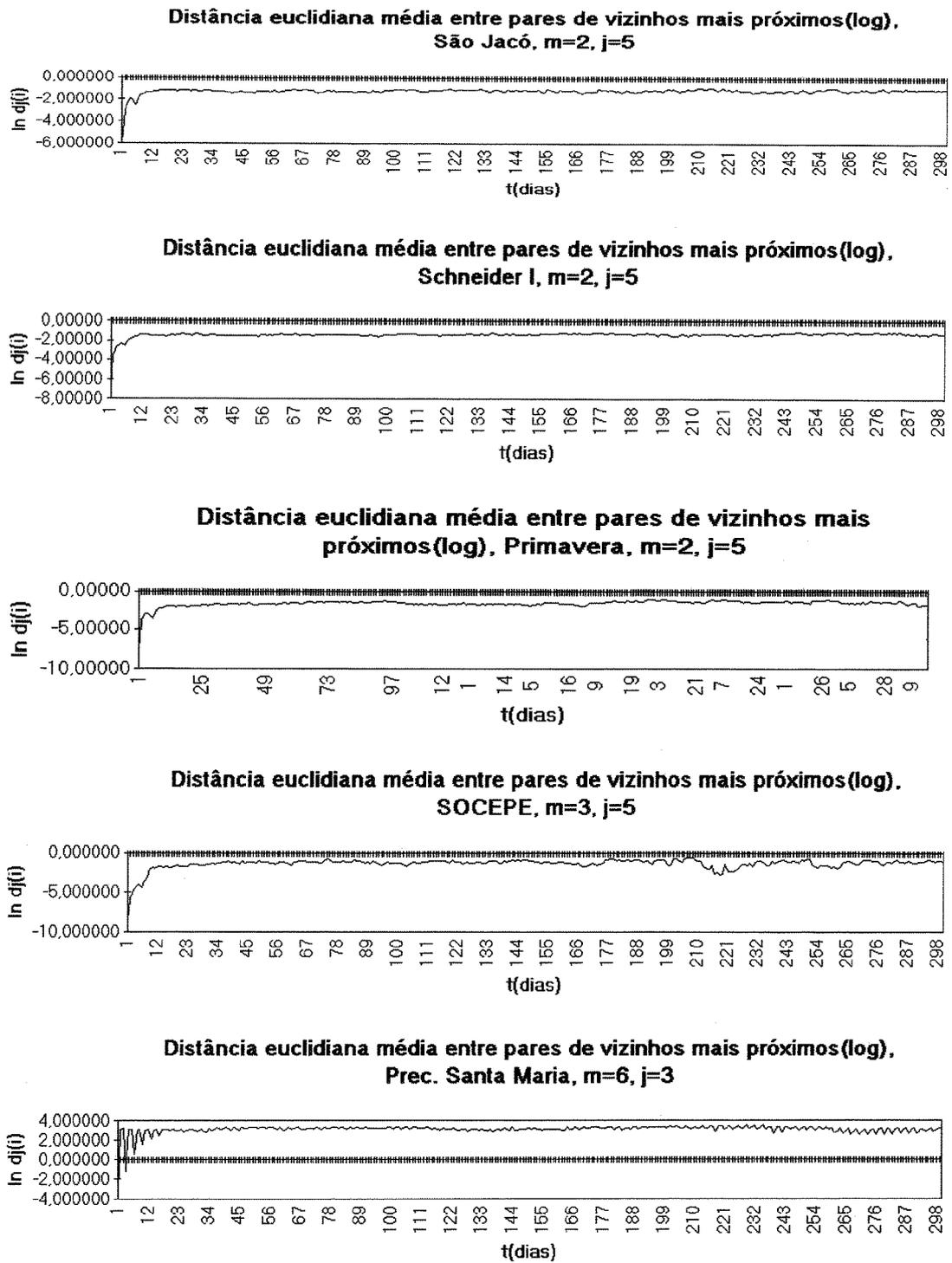


FIGURA 16 -Gráficos da relação entre a distância euclidiana dos vizinhos mais próximos em relação ao tempo, para as séries de vazões das Microbacias e de precipitação de Santa Maria. Estes gráficos permitem interpretar a dinâmica das séries

temporais. Em todos os casos o padrão apresenta-se estocástico (ROSENSTEIN et al.,1993).

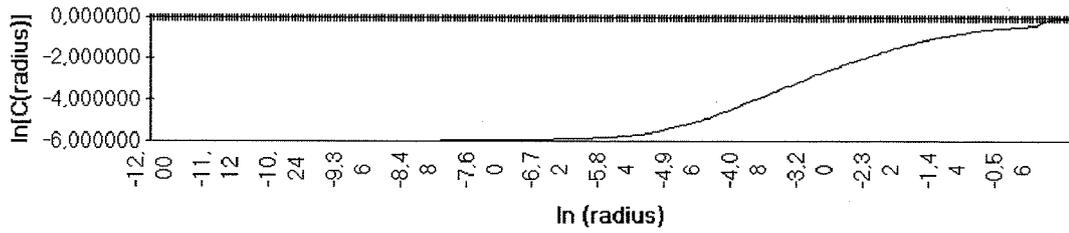
Esta distribuição de pontos mais enviesada à esquerda, nas áreas menores, sugere que o espaço do sistema é nelas mais complexo. Considerando-se que as flutuações da precipitação são mais tamponadas em áreas maiores, resulta esperar séries de vazões menos complexas, o que é consistente com os resultados. Percebe-se, nos gráficos das microbacias de Santa Maria, mais acentuado na microbacia SOCEPE, um degrau na região de escalonamento, situada por volta de  $\ln(\text{“radius”}) = -0.04$ . Anteriormente aos degraus, existem regiões com declividade próxima de zero. Este fato pode ser devido a uma transição de escala, no sentido de MILNE (1988), ou, mais provavelmente, resultar do ruído introduzido no processo de interpolação, a qual não foi necessária em Sapiranga.

Os resultados da dimensão de correlação (“ $D_2$ ”) e seus parâmetros associados, dimensão de encaixamento (“ $m$ ”), intervalo de reconstrução (“ $j$ ”) e período médio (“PERMEDIO”), para as microbacias e para a precipitação em Santa Maria, encontram-se na Tabela 4:

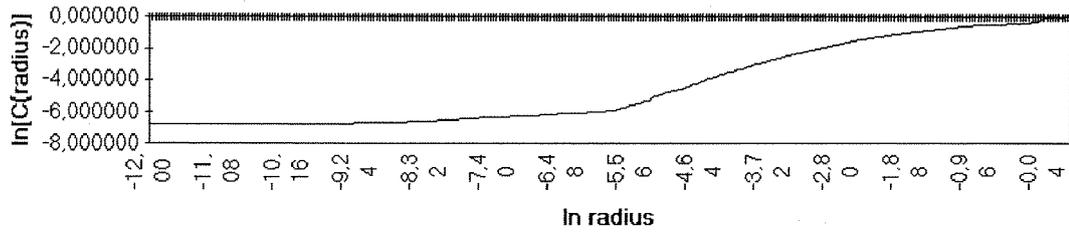
	$D_2$	$m$	$j$	PERMEDIO	$r^2$
São Jacó	1.368	2	5	15	0.998
Schneider I	1.557	2	5	12	0.999
Primavera	1.057	2	5	11	0.994
SOCEPE	0.870	3	5	16	0.999
Prec. S. Maria	0.828	6	3	4	0.998

TABELA 4 - Valores da dimensão de correlação ( $D_2$ ), dimensão de encaixamento ( $m$ ), intervalo de reconstrução ( $j$ ), período médio (PERMEDIO) e coeficiente de determinação de  $D_2$  ( $r^2$ ) para as microbacias e precipitação de Santa Maria.

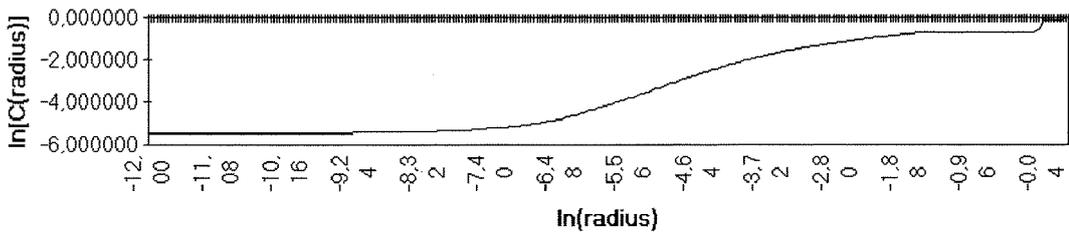
**Gráfico bilog de radius x C(radius), São Jacó**



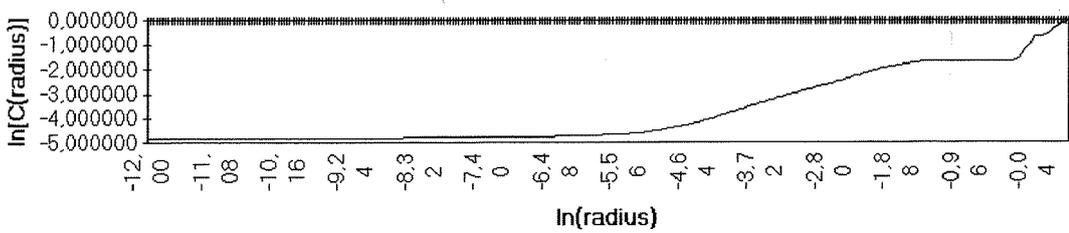
**Gráfico bilog de radius x ln[C(radius)], Schneider I**



**Gráfico bilog de radius x C(radius), Primavera**



**Gráfico bilog de radius x C(radius), SOCEPE**



**Gráfico bilog de radius x C(radius), Precipitação em Santa Maria**

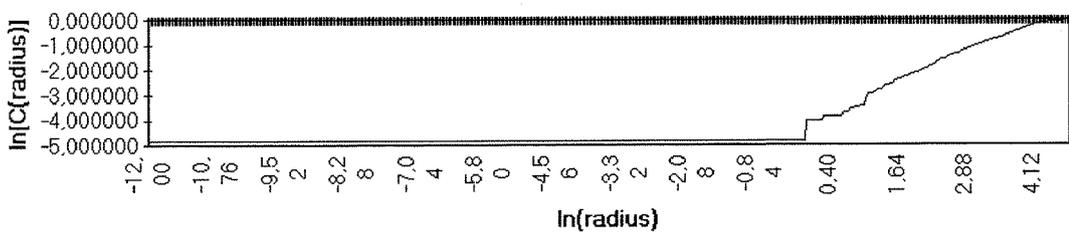
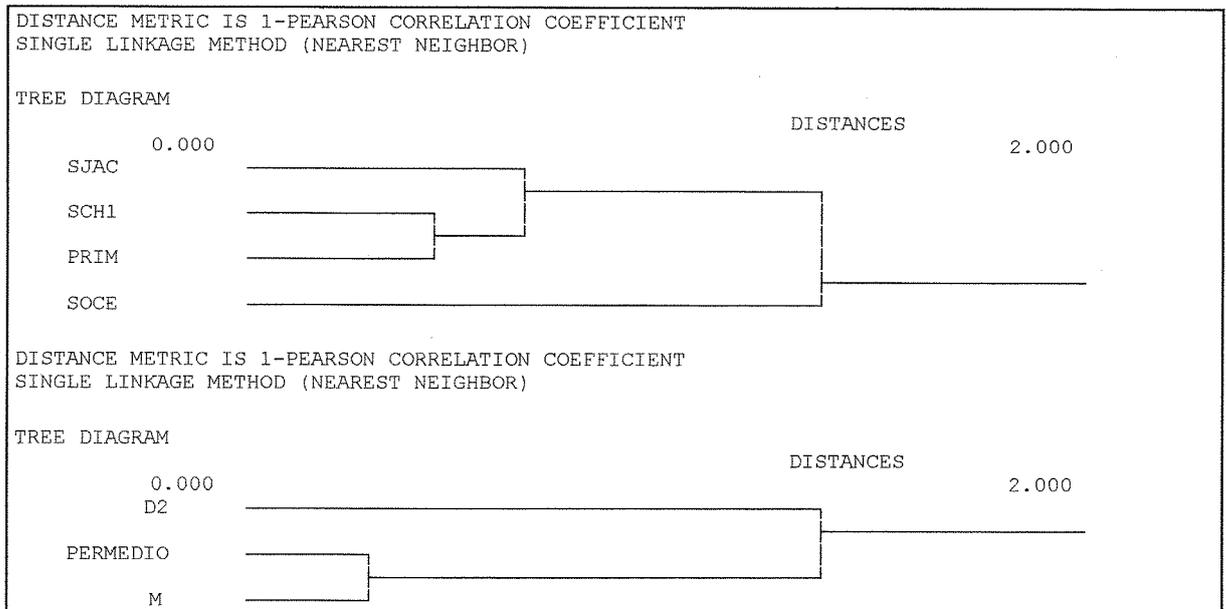


FIGURA 17 - Gráficos da relação entre a distância euclidiana entre dois vetores da dinâmica reconstruída (“radius”) e o número normalizado de pares de vetores separados por uma distância euclidiana igual ou menor a “radius”. O gráfico é composto de três partes principais: 1) Parte inicial, com declividade pequena, o que significa que existem poucos pares de vetores nestas distâncias, as quais são dominadas pelo ruído (quanto maior o ruído, maior esta região); 2) região de escalonamento, onde o número de pares cresce exponencialmente com o “radius” e 3) região de saturação, resultante do fato de que alcançou-se a distância máxima observada entre os pontos no espaço de fase.  $D_2$  é a declividade na região de escalonamento (ABRAHAM et al., 1986).

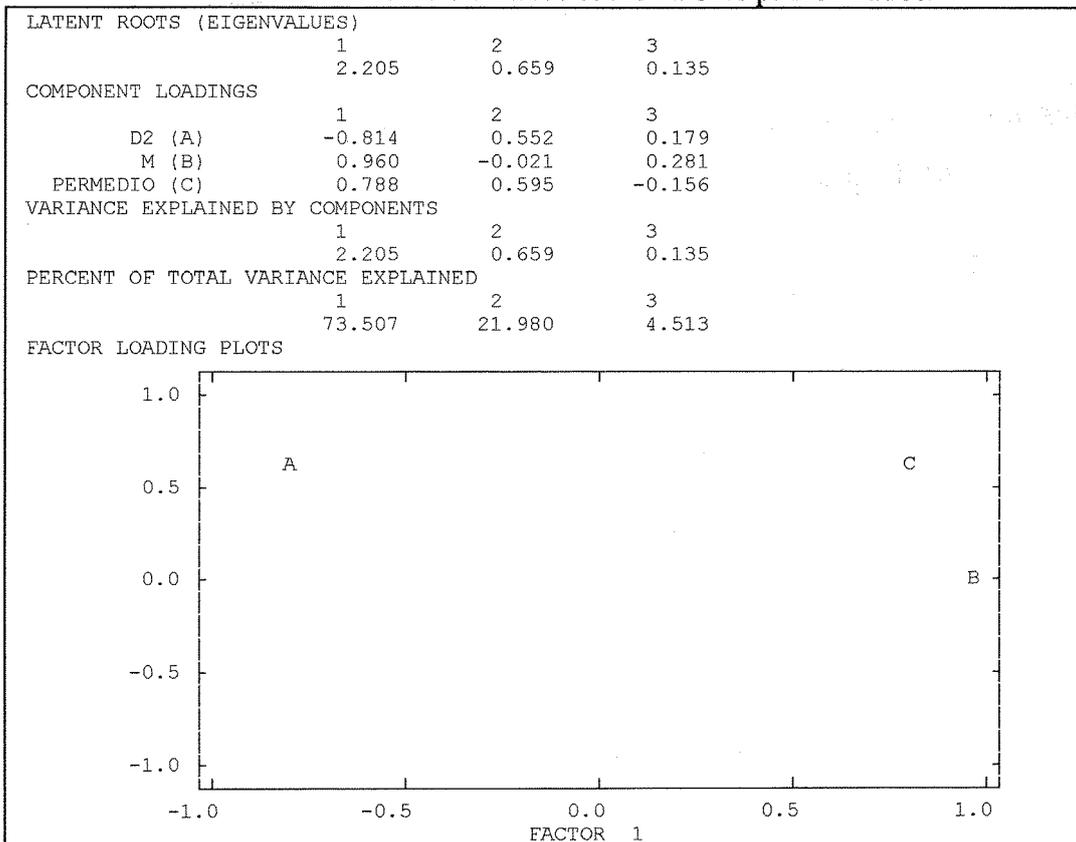
Os valores da dimensão de correlação estão consistentes com a discussão acima, apresentando valores menores para áreas maiores. O valor de “ $D_2$ ” para a precipitação de Santa Maria, mais baixo, com “ $m$ ” muito maior e “PERMEDIO” e “ $j$ ” baixos, pode ser comparado com os valores das microbacias SOCEPE e Primavera, partindo-se do pressuposto de que a variabilidade na precipitação entre as duas microbacias vizinhas é desprezível. Percebe-se que a complexidade das vazões não responde de forma igual a complexidade das precipitações, tanto maior sendo a complexidade, tal como medida pela dimensão de correlação, quanto menor a área entre microbacias vizinhas. Pode-se perceber que a variação do valor de “ $D_2$ ” da microbacia SOCEPE aproxima-se, em termos absolutos, mais do valor de “ $D_2$ ” da precipitação do que da microbacia Primavera. No entanto, os valores dos outros parâmetros não se modificaram da mesma forma. Isto se deve a que a dimensão de correlação expressa uma relação de potência. Assim, a explicação para a diferença na complexidade das vazões, como visto com as microbacias de Santa Maria, deve ser encontrada na estrutura das microbacias.

A análise de agrupamentos (“clusters”) dos parâmetros padronizados está apresentada na Figura 18. Observa-se que, considerando-se todos os parâmetros, a microbacia SOCEPE destaca-se das outras, em seguida destacando-se São Jacó, sendo que as menores são muito semelhantes. Para a obtenção destes agrupamentos pesou muito “PERMEDIO” e “ $m$ ”. Se desconsideramos estes parâmetros, as microbacias tendem a agrupar-se de acordo com o município.

A análise de componentes principais encontra-se na Figura 19. O forte peso no primeiro componente de “ $m$ ”, explica os agrupamentos obtidos.



**FIGURA 18** - Resultado da análise de agrupamento para as microbacias, considerados os parâmetros dimensão de correlação, dimensão de encaixamento e período médio. Cálculos efetuados sobre valores padronizados.



**FIGURA 19** - Análise de componentes principais, considerados os parâmetros dimensão de correlação, dimensão de encaixamento e período médio. Cálculos efetuados sobre valores padronizados. As letras no gráfico bifatorial correspondem às letras entre parênteses nos “component loadings”.

## 4.2. Ecologia de Paisagem

Os resultados da análise quantitativa da Ecologia de Paisagens estão apresentados em três partes: análise morfológica (baseada nos índices topográficos), análise da heterogeneidade e análise da complexidade (baseada nos índices fractais).

### 4.2.1. Análise Morfológica

As Figuras de 20 a 23 apresentam modelos ortogonais das microbacias, obtidos a partir dos modelos digitais de terreno (M.D.T.) processados com exagero vertical nulo. Observa-se, nas microbacias de Santa Maria, que os modelos ortogonais não apresentam uma boa resolução para observar o padrão do relevo, isto deve-se às pequenas diferenças de cotas altimétricas, que apresentam uma superfície com pouca declividade. As diferenças de cotas, nas microbacias de Saporanga, permitem um bom contraste, evidenciando as formas mais abruptas.

A Tabela 4 apresenta o resumo dos valores obtidos dos modelos digitais de terreno, bem como o valor da densidade de drenagem, de acordo com SILVEIRA et al. (1995). A Figura 24 apresenta o gráfico de probabilidade acumulada da altitude. O caráter mais suave do relevo nas áreas de Santa Maria evidencia-se no ajuste próximo a uma reta dos gráficos de probabilidade acumulada de altitude. Em oposição, as áreas de Saporanga apresentam gráficos em degraus, mais próximos a uma sigmóide, o que é devido ao relevo escarpado, com mudanças abruptas de altitude. Se consideramos que a evolução das vertentes tende a aumentar a densidade de drenagem, bem como suavizar as formas, na ausência de um balanço positivo entre soerguimento e denudação (CASSETI, 1991; COELHO NETO, 1994), podemos afirmar que as microbacias de Saporanga são mais jovens do ponto de vista geomorfológico.

### MICROBACIA SÃO JACÓ

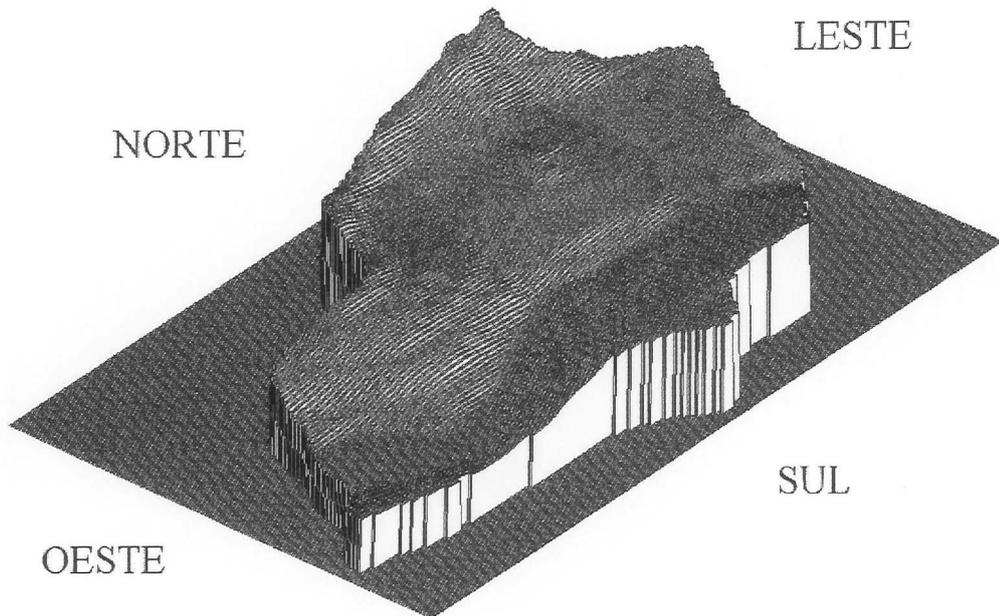


FIGURA 20 - Visão ortogonal do M.D.T. da microbacia São Jacó. Exagero vertical nulo.

### MICROBACIA SCHNEIDER I

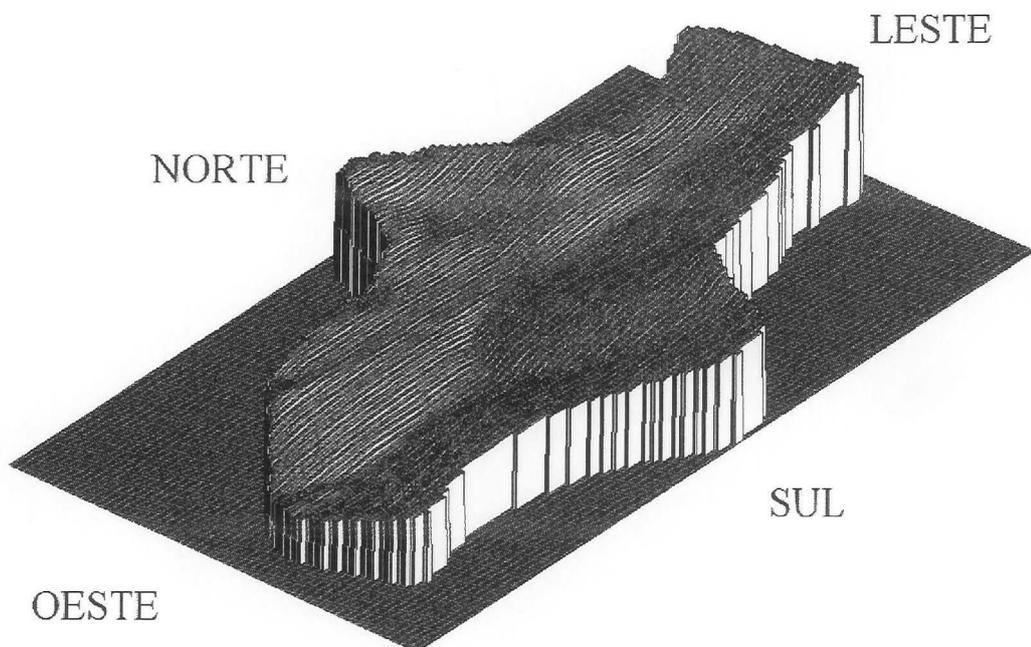


FIGURA 21 - Visão ortogonal do M.D.T. da microbacia Schneider I. Exagero vertical nulo.

## MICROBACIA PRIMAVERA

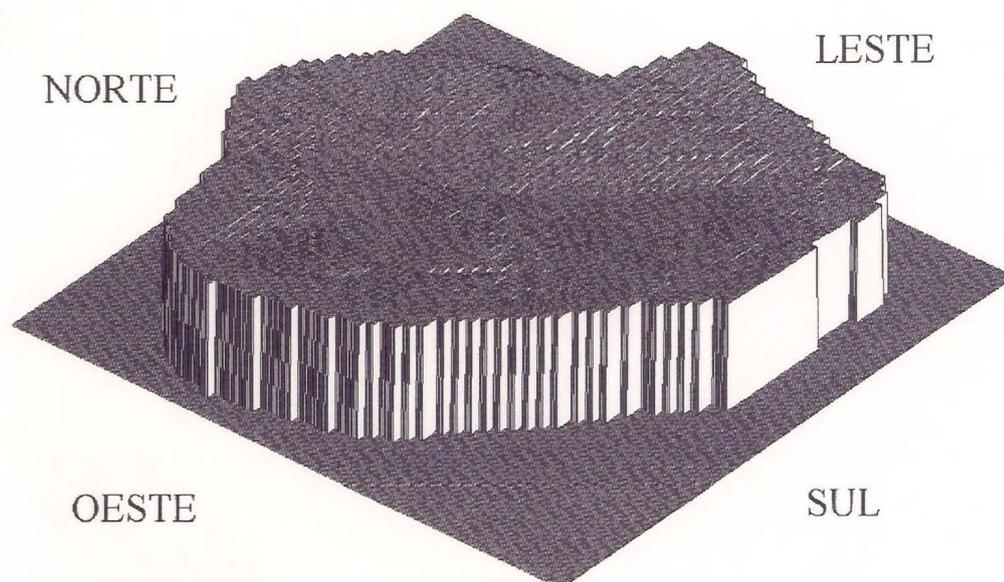


FIGURA 22 - Visão ortogonal do M.D.T. da microbacia Primavera. Exagero vertical nulo.

## MICROBACIA SOCEPE

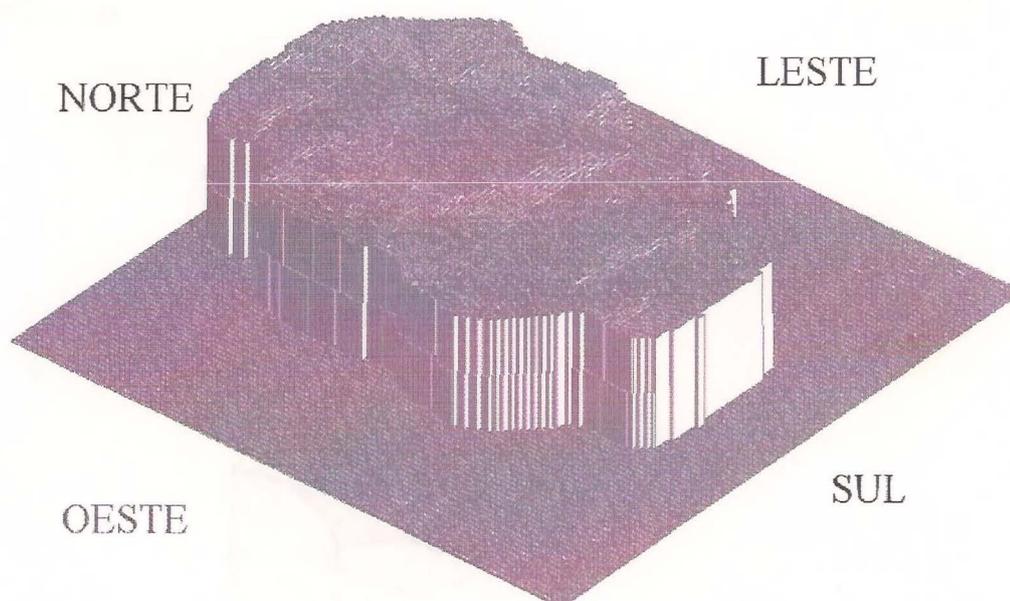


FIGURA 23 - Visão ortogonal da microbacia SOCEPE. Exagero vertical nulo.

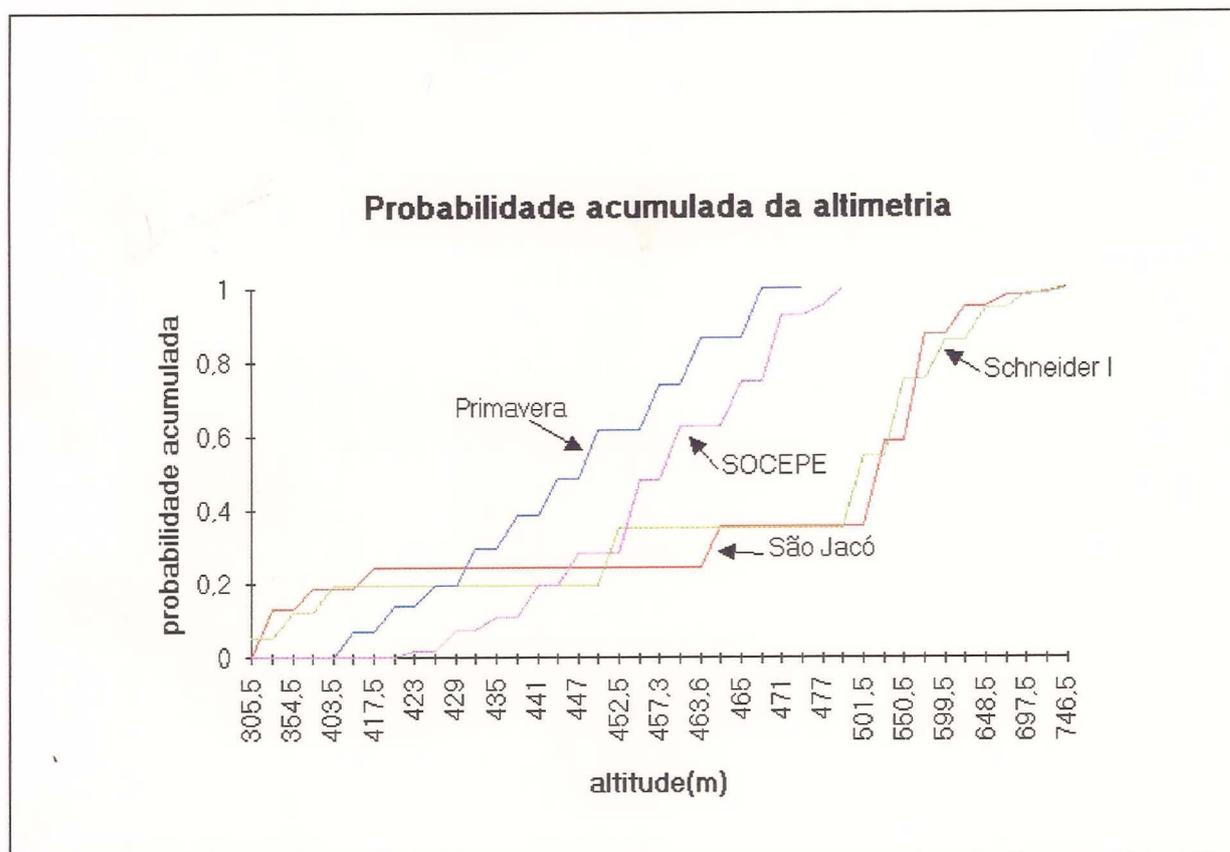


FIGURA 24- Gráfico de probabilidade acumulada das microbacias, extraído dos modelos digitais de terreno através do módulo HISTO do IDRISI.

	São Jacó	Schneider I	Primavera	SOCEPE
alt. média (m)	495	510	446	456
alt. mínima (m)	300	281	410	420
alt. máxima (m)	766	769	473	480
desv. padrão (m)	106.16	113.25	17.71	13.91
graus de liberd.	9518	6383	2550	6807
diferença alt. (m)	466	488	63	60
densid. drenag.	0.70	0.65	1.96	2.04

TABELA 4 - Resumo das informações dos modelos digitais de terreno e da densidade de drenagem (comprimento dos drenos/área da bacia; Km/Km<sup>2</sup>). Graus de liberdade estão expressos em número de células menos um.

Os resultados da Tabela 4 discriminam bem entre as microbacias de Santa Maria e Sapiranga, sendo que as diferenças observadas nas altitudes médias, aproximadamente de 50 metros maior nas de Sapiranga, é de magnitude muito menor do que as diferenças entre altitudes máxima e mínima e da variabilidade observada em torno das médias. Por outro lado, a densidade de drenagem é maior nas microbacias de Santa Maria, o que é consistente com as observações sobre a evolução das vertentes.

Quando consideradas duas a duas, os resultados discriminam da mesma forma entre as microbacias vizinhas. A microbacia Schneider I é 6.7% mais declivosa, apresenta um intervalo de altitudes 4.7% maior e uma densidade de drenagem 7.1% menor do que a microbacia São Jacó. Comportamento semelhante observa-se entre as microbacias de Santa Maria. A microbacia Primavera apresenta valores de variabilidade da altitude 27.3% maior, diferença entre altitudes extremas 5% maior e densidade de drenagem 3.9% menor do que a microbacia SOCEPE, o que é teoricamente esperado.

As Figuras de 25 a 28 apresentam os mapas temáticos de declividade. Observa-se que a microbacia mais declivosa é Schneider I, seguida, na ordem, pela microbacias São Jacó, Primavera e SOCEPE.

A Tabela 5 apresenta o resumo dos índices topográficos.

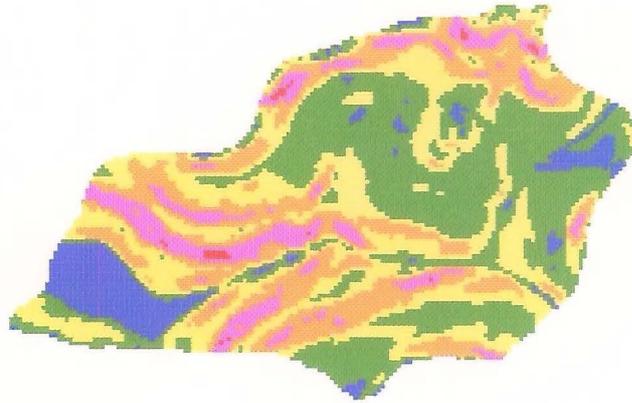
	AZESCMDI	V90AZ270	DECLMDIA	DECL25
São Jacó	203,89	59,87	19,71	29,54
Schneider I	231,91	55,03	27,44	53,16
Primavera	145,68	66,99	6,87	0
SOCEPE	10,27	56,67	5,07	0

TABELA 5 - Resumo dos índices topográficos: direção azimutal média de escoamento (AZESCMDI), percentagem de área com vertentes voltadas para o sul (V90AZ270), declividade média (DECLMDIA) e percentagem de área com declividade maior que 25% (DECL25).

MICROBACIA SÃO JACÓ  
SAPIRANGA, RS, BRASIL

CLASSES DE DECLIVIDADE

- 0 - 5% ■
- 5 - 15% ■
- 15 - 25% ■
- 25 - 40% ■
- 40 - 55% ■
- > 55% ■



NORTE



Quilômetros

1:1225

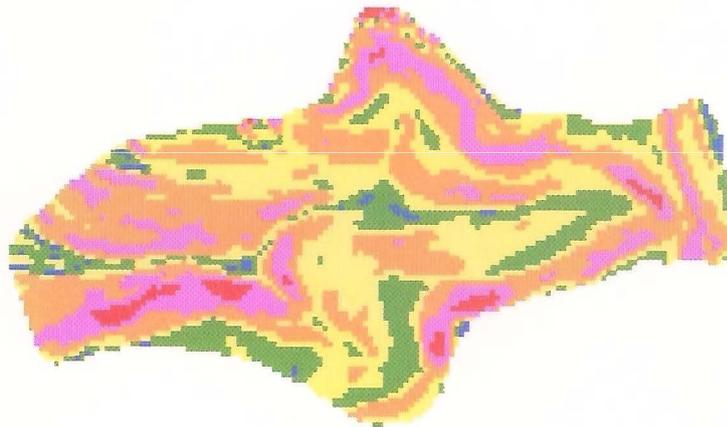
Idrisi

FIGURA 25 - Mapa de declividades da microbasia São Jacó.

MICROBACIA SCHNEIDERI  
SAPIRANGA, RS, BRASIL

CLASSES DE DECLIVIDADE

- 0 - 5% ■
- 5 - 15% ■
- 15 - 25% ■
- 25 - 40% ■
- 40 - 55% ■
- > 55% ■



NORTE



Quilômetros

0.8980

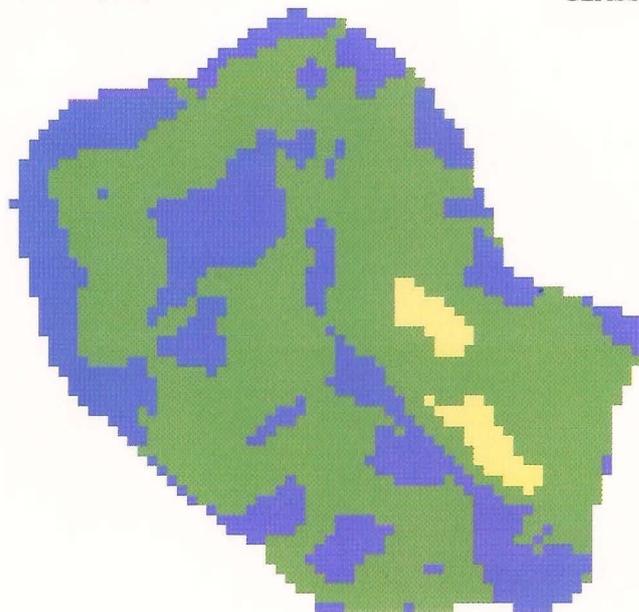
Idrisi

FIGURA 26 - Mapa de declividades da microbasia Schneider I.

MICROBACIA PRIMAVERA  
SANTA MARIA, RS, BRASIL

CLASSES DE DECLIVIDADE

- 0 - 5% ■
- 5 - 15% ■
- 15 - 25% ■



Quilômetros

0.4487

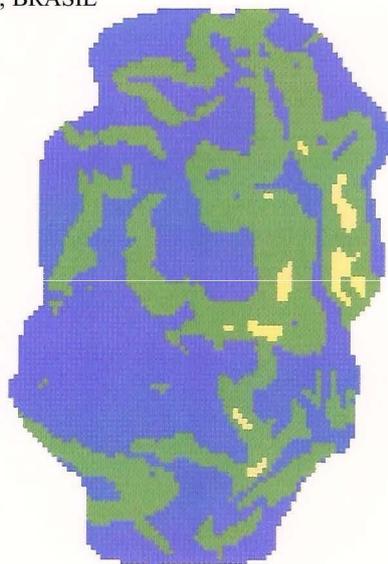
Idrisi

FIGURA 27 - Mapa de declividades da microbacia Primavera.

MICROBACIA SOCEPE  
SANTA MARIA, RS, BRASIL

CLASSES DE DECLIVIDADE

- 0 - 5% ■
- 5 - 15% ■
- 15 - 25% ■



Quilômetros

0.8946

Idrisi

FIGURA 28 - Mapa de declividades da microbacia SOCEPE.

Como esperado, as maiores declividades ocorrem nas meia encostas, enquanto as menores ocorrem nos divisores de águas e no fundo dos vales.

Os resultados da área com declividade maior que 25% discriminaram bem entre as microbacias de municípios diferentes, porém, quando consideradas duas a duas, o índice somente discriminou entre as microbacias de Sapiranga, onde demonstrou que Schneider I possui um maior percentual de áreas declivosas, pois as de Santa Maria não possuem declividades maiores que 25%. Os valores de declividade média confirmam o que se observou na avaliação dos mapas de declividade.

Os valores da direção azimutal de escoamento média apresentam valores que aproximam-se da direção S.S.W. para as microbacias de Sapiranga, S.S.E. para a microbacia Primavera e N.N.E. para a SOCEPE. Já os valores do percentual de área voltada para o sul, apresentam que a microbacia Primavera apresenta maior índice, seguido, na ordem, por São Jacó, SOCEPE e Schneider I. Espera-se que as vertentes voltadas para o sul recebam uma menor quantidade de radiação do que as vertentes voltadas para o norte (SELLERS, 1965), diferença que se potencializa com a declividade. Quanto mais suave o relevo, menor a importância da orientação das vertentes. Assim, espera-se que o efeito deste índice seja maior nas microbacias de Sapiranga do que nas de Santa Maria. Desta forma, a microbacia Schneider I deve possuir vertentes mais úmidas do que a São Jacó, resultado de uma menor evapotranspiração.

Observa-se que todas as microbacias possuem valor de “V90AZ270” maior que 50%. Estes valores são consistentes com a direção geral da encosta da Serra Geral, porém esta característica pode estar relacionada, também, com o efeito da maior umidade encontrada nas vertentes voltadas para o sul. Uma maior umidade, resultante de uma incidência de radiação solar menor, favorece o desenvolvimento de uma vegetação mais viçosa, a qual favorece a pedogênese, e com o maior grau de biostasia nas vertentes, resultar em taxas mais baixas de erosão areolar (ODUM, 1988; CASSETI, 1991). Assim, se as vertentes voltadas para o sul regridem mais lentamente, elas acabam progressivamente a ocupar uma expressão areal maior.

As Figuras 29 e 30 apresentam os resultados da análise de agrupamento e de componentes principais para os índices topográficos.

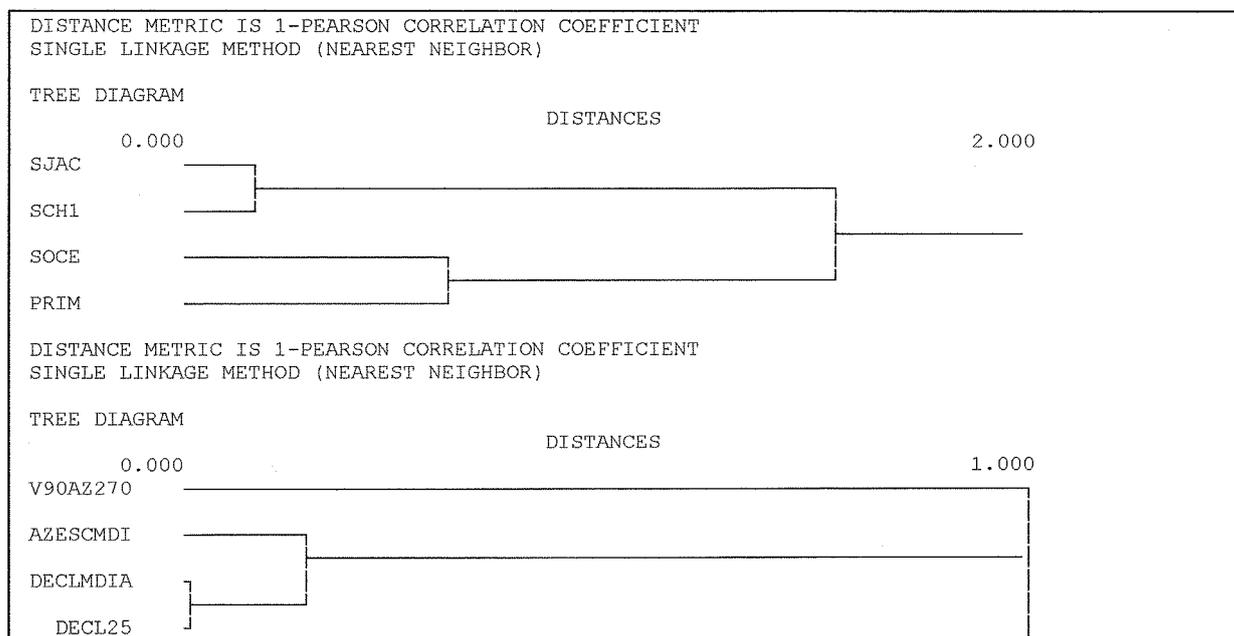


FIGURA 29 - Análise de agrupamento para os índices topográficos: direção azimutal média de escoamento (AZESCMDI), percentagem de área voltada para o sul (V90AZ270), declividade média (DECLMDIA) e percentagem de área com declividade maior que 25% (DECL25).

A análise de agrupamentos dos índices topográficos, considerados no seu conjunto, separa as microbacias de acordo com os municípios, sendo que as microbacias de Sapiranga são mais semelhantes entre si do que as microbacias de Santa Maria.

A análise dos índices topográficos separa o percentual de área voltada para o sul dos outros índices, sendo que os índices de declividade são muito redundantes, o que se verifica tanto na análise de agrupamentos como na análise de componentes principais, onde estão fortemente relacionados positivamente ao primeiro componente. O segundo componente discrimina entre os índices de direção de escoamento e os de declividade.

Os resultados mostram que os índices “V90AZ270” e “DECLMIA”, combinados, discriminariam bem as microbacias incluídas neste trabalho. O índice de direção azimutal média de escoamento sofre do problema de ser uma média sobre um valor angular, sendo necessário

buscar outra forma de representar um índice que seja uma medida representativa da distribuição das direções de escoamento.

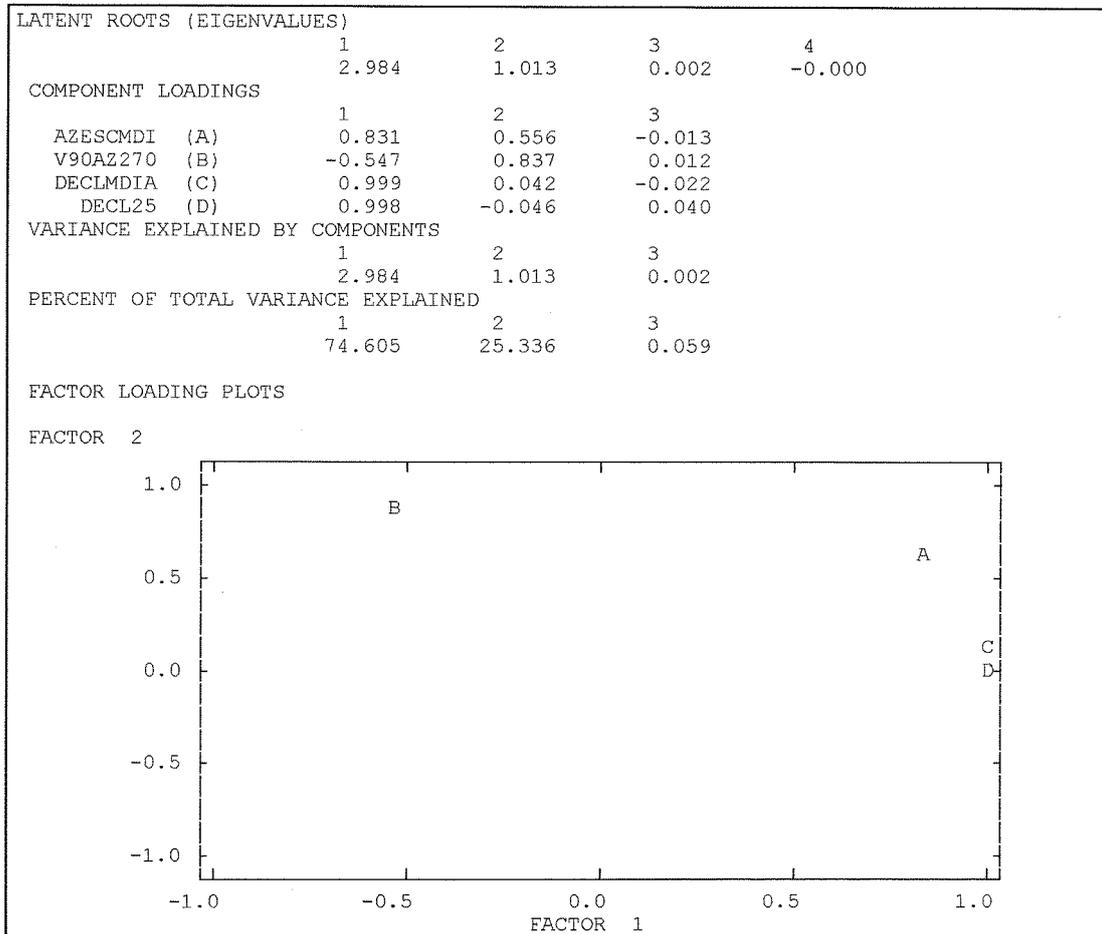


FIGURA 30 - Análise de componentes principais incluindo os índices topográficos.

#### 4.2.2. Análise da Heterogeneidade

As Figuras 31 a 34 apresentam os mapas temáticos de usos e cobertura de solos, incluídas as 5 classes mais freqüentes em cada imagem de satélite. Como as cenas de Sapiranga e Santa Maria terem sido obtidas em anos e épocas do ano diferentes, bem como estarem situadas em paisagens historicamente diferentes, impede de se fazer uma análise destas classes a não ser comparando as microbacias vizinhas. A classificação obtida para Sapiranga não permitiu uma boa separação da classe reflorestamento, visto que em muitos lugares confundiu com mato nativo, principalmente em regiões de sombra, ou seja, de forte declividade ou junto aos talvegues.

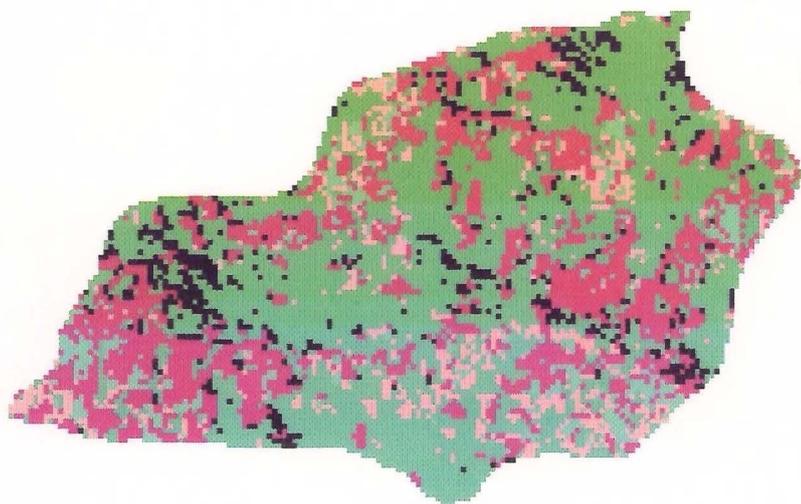
Pode-se caracterizar a estrutura da paisagem, nas microbacias de Sapiranga, como uma matriz de mato nativo, uma mata secundária densa, ou de ecótopos semi-naturais, usando a classificação proposta por Naveh (apud NAVEH & LIEBERMAN, 1984), fragmentada em manchas pequenas e corredores de diversos tipos de ecótopos semi-agrícolas e agrícolas, que se distribuem acompanhando as vias de comunicação e as áreas mais planas dos degraus da encosta ou do fundo dos vales.

A estrutura da paisagem, nas microbacias de Santa Maria, é caracterizada por uma matriz de mato aberto, que são ecótopos de fases sucessionais de mata secundária em diversos graus de desenvolvimento, associadas a manchas de campo sujo, exploradas como pastagens, manchas de mata secundária aberta muito exploradas, fragmentada em manchas de mato denso, que são matas galerias e capões de mata secundária menos exploradas, associadas a plantações de eucalipto, e manchas de ambientes abertos, que incluem restevas de culturas anuais e pastagens plantadas em sucessão. Não verificou-se uma relação tão fechada com as vias de comunicação como a observada nas microbacias de Sapiranga, que é relacionada com a maior facilidade de deslocamento e com uma estrutura fundiária mais concentrada. Assim, as microbacias de Santa Maria apresentam predomínio de ecótopos semi-agrícolas.

MICROBACIA SÃO JACÓ  
SAPIRANGA, RS, BRASIL  
08/09/1993

CLASSES DE COBERTURA E USO DE SOLO

- Mato Nativo ■
- Reflorestamento ■
- Capoeira ■
- Campo ■
- Solo Descoberto ■



Quilômetros

0.8980

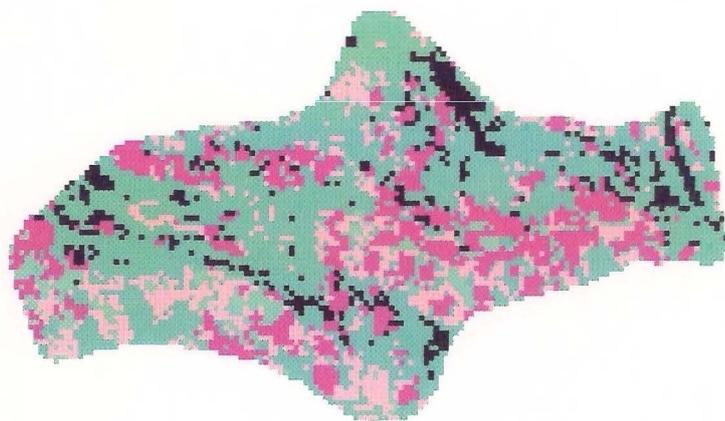
Idrisi

FIGURA 31 - Mapa de usos e cobertura de solos da microbasia São Jacó.

MICROBACIA SCHNEIDERI  
SAPIRANGA, RS, BRASIL  
08/09/1993

CLASSES DE COBERTURA E USO DE SOLO

- Mato Nativo ■
- Reflorestamento ■
- Capoeira ■
- Campo ■
- Solo Descoberto ■



Quilômetros

0.8980

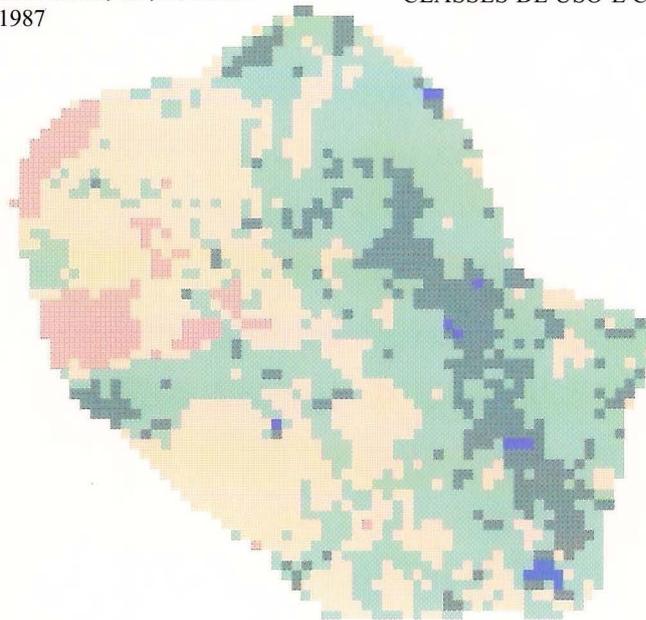
Idrisi

FIGURA 32 - Mapa de usos e cobertura de solos da microbasia Schneider I.

MICROBACIA PRIMAVERA  
SANTA MARIA, RS, BRASIL  
26/02/1987

CLASSES DE USO E COBERTURA, DE SOLO

- Área Úmida
- Mato Denso
- Mato Aberto
- Ambiente Aberto
- Campo Sujo



NORTE



Quilômetros

0,4487

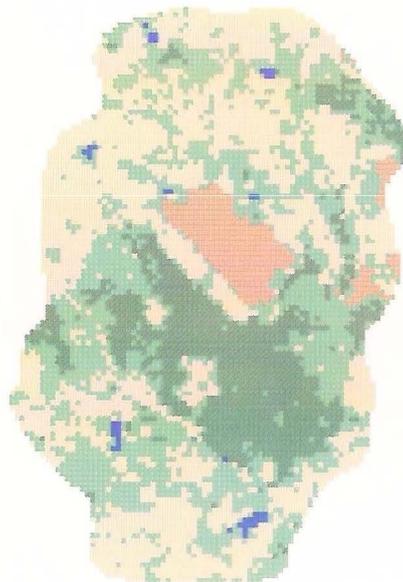
Idrisi

FIGURA 33 - Mapa de usos e cobertura de solos da microbasia Primavera.

MICROBACIA SOCEPE  
SANTA MARIA, RS, BRASIL  
26/02/1987

CLASSES DE COBERTURA E USO, DE SOLO

- Área úmida
- Mato denso
- Mato aberto
- Ambiente aberto
- Campo sujo



NORTE



Quilômetros

0,8973

Idrisi

FIGURA 34 - Mapa de usos e cobertura de solos da microbasia SOCEPE.

A Tabela 6 apresenta os valores da distância média de uma célula à célula mais próxima de cada classe de uso e cobertura de solos para as microbacias de Sapiranga.

	mato nativo	reflorestamento	capoeira	campo	solo descoberto
São Jacó	45	126	93	151	69
Schneider I	46	132	75	144	93

TABELA 6 - Distância média de uma célula à célula mais próxima da classe de uso e cobertura de solo para as microbacias de Sapiranga (metros).

Este índice de distância deve ser interpretado como uma medida de esperança de que, encontrando-se em um ponto qualquer da microbacia, esteja-se a uma distância de determinada classe de cobertura e uso de solo (isto significa que o ponto não se encontra em uma mancha de classe igual). Por exemplo, se estivermos em qualquer ponto da microbacia São Jacó, dentro de uma mancha de mato nativo, o tipo de mancha com maior probabilidade de encontrar-se mais próxima deste ponto é solo descoberto.

Espera-se que a classe que apresente a menor média corresponda a matriz da paisagem. Assim, este índice confirma a interpretação visual dos mapas de uso e cobertura de solo, apresentando mato nativo como matriz. Em seguida vem solo descoberto, capoeira, campo e reflorestamento. Observa-se que existe uma relação de solo descoberto com capoeira, o que está de acordo com o ciclo cultural de rotação cultural típica da colônia.

A Tabela 7 apresenta este mesmo índice para as microbacias de Santa Maria.

	área úmida	mato denso	mato aberto	ambiente aber.	campo sujo
Primavera	287	69	25	291	39
SOCEPE	328	135	26	506	44

TABELA 7 - Distância média de uma célula à célula mais próxima da classe de uso e cobertura de solo para as microbacias de Santa Maria (metros).

Observa-se que, para optar entre uma matriz de mato aberto, ou de campo sujo, nas microbacias de Santa Maria, este índice oferece um bom critério. Em comparação com as

microbacias de Saporanga, as de Santa Maria apresentam valores de distâncias menores para as classes de campo. Este fenômeno pode estar associado ao fato de que Itaara encontra-se em uma zona de transição entre a mata da fralda da Serra Geral e os campos de Júlio de Castilhos. Assim, o grau de interferência humana é que deve determinar se capoeiras e matas secundárias ou campos sujos comporão a matriz da paisagem. Quanto às outras classes, diferentemente de Saporanga, onde os valores são muito similares entre as microbacias, observam-se diferenças acentuadas para as classes mato denso e ambiente aberto, e diferenças um pouco menores, proporcionalmente, para a classe de áreas úmidas.

A Tabela 8 apresenta o resumo dos índices de heterogeneidade aplicados às microbacias.

	H'	J	RRMDIO	DIMDIO	DOMDIA	FRMDIA	NDCMDIO	CVNMDIO	BCMMDIO
São Jacó	1,2578	0,1373	39,7316	0,6365	0,1478	0,1730	2,3839	3,1106	15,5206
Schneider I	1,3384	0,1528	48,9662	0,6716	0,1492	0,1810	2,4483	3,2954	16,4180
Primavera	1,1967	0,1526	42,1795	0,5429	0,1338	0,1386	2,1090	2,7558	13,8126
SOCEPE	1,2297	0,1394	38,8940	0,4805	0,1164	0,1181	1,9447	2,4462	12,4827

TABELA 8 - Índices de heterogeneidade para as microbacias: índices de diversidade ( $H'$ ), homogeneidade ( $J$ ), riqueza relativa média (RRMDIO), diversidade média (DIMDIO), dominância média (DOMDIA), fragmentação média (FRMDIA), número médio de classes diferentes (NDCMDIO), número médio de classes diferentes da classe central (CVNMDIO) e número médio de pares diferentes (BCMMDIO). Excluindo-se os dois primeiros índices, que foram calculados para toda a área, os demais valores são médias dos valores de janelas de 3 x 3 células.

Excluindo-se o índice de homogeneidade, os demais índices apresentam comportamento similar. A microbacia Schneider I, em todos os índices, apresenta os maiores valores. A microbacia SOCEPE apresenta os menores escores em todos os valores calculados sobre janelas de 3 x 3 células, com exceção do índice de diversidade, em que a Primavera apresenta a menor quantidade de informação, e do índice de homogeneidade, em que o menor valor é da São Jacó.

A diferença de ordenação das microbacias, quando comparamos os resultados do índice de diversidade calculado sobre toda a bacia, com aquele calculado sobre janelas de 3 x 3 células, sendo posteriormente obtida a média sobre toda a área, demonstra que a quantificação da heterogeneidade é sensível à escala.

O índice  $H'$  ordena da seguinte maneira: Schneider I, São Jacó, SOCEPE e Primavera. Já o índice DIMDIO, ordena: Schneider I, São Jacó, Primavera e SOCEPE. A inversão de ordem foi restrita às microbacias de Santa Maria. Isto, provavelmente, devido a que, em paisagens pouco fragmentadas, mesmo que possuindo uma quantidade igual de classes de uso e cobertura de solo, a probabilidade, destas classes ocorrerem dentro de uma mesma janela, será dependente na relação entre o tamanho médio das manchas e das dimensões da janela.

O índice de homogeneidade apresenta uma ordenação diferenciada de todos os outros. Em ordem decrescente: Schneider I, Primavera, SOCEPE e São Jacó. Este fato deve-se a que o denominador é sensível à área da microbacia. Assim, quanto maior a microbacia, maior o número de células, sendo maior o valor de  $H'$  máximo. No caso do índice de dominância média, no qual também entra o valor de  $H'$  máximo, o tamanho da bacia não importa, pois este valor é calculado sobre o número de células da janela, que sempre é 9.

O índice de riqueza relativa média ordena: Schneider I, Primavera, São Jacó, SOCEPE. Os demais índices ordenam de forma igual à DIMDIO. Provavelmente, isto deve-se ao fato de que RRMDIO expressa uma proporção relativa ao número de classes máximo no mapa, enquanto que os demais índices médios, calculados sobre janelas (DIMDIO, DOMDIA, FRMDIA, NDCMDIO, CVNMDIO, BCMMDIO), expressam valores calculados unicamente sobre a própria janela.

Verifica-se, que com exceção da microbacia Schneider I, que sempre apresentou os maiores valores, as outras microbacias alternaram de posição de acordo com o índice que foi utilizado. Estas diferenças são devidas a que estes índices expressam ênfases diferentes, como veremos a seguir, que podem resultar em sensibilidade diferente a pequenas diferenças.

As Figuras 35 e 36 apresentam os resultados das análises de agrupamentos e componentes principais para os índices de heterogeneidade, considerando valores transformados.

A análise de agrupamento sobre as microbacias diferenciou São Jacó em relação às outras, seguida pela Primavera, sendo as mais similares Schneider I e SOCEPE. A diferenciação da microbacia São Jacó explica-se pelo forte peso dos índices J e RRMDIO no segundo

componente, os quais em que a ordenação destoou dos outros índices. A microbacia Primavera também variou sua ordenação nos índices J e RRMDIO, mais no H'. Assim, as microbacias foram classificadas de acordo com a variação nos postos assumidos no ordenamento de cada índice. Schneider I, assumiu 1 posto; SOCEPE, 2; Primavera e São Jacó, 3, sobre um total de quatro arranjos obtidos. Portanto, todos estes índices seriam bem representados por quatro índices: H', J, RRMDIO e DIMDIO. Do agrupamento dos índices de janela, menos RRMDIO, DIMDIO foi escolhido em virtude da análise que pode ser feita com H' sobre os efeitos da escala.

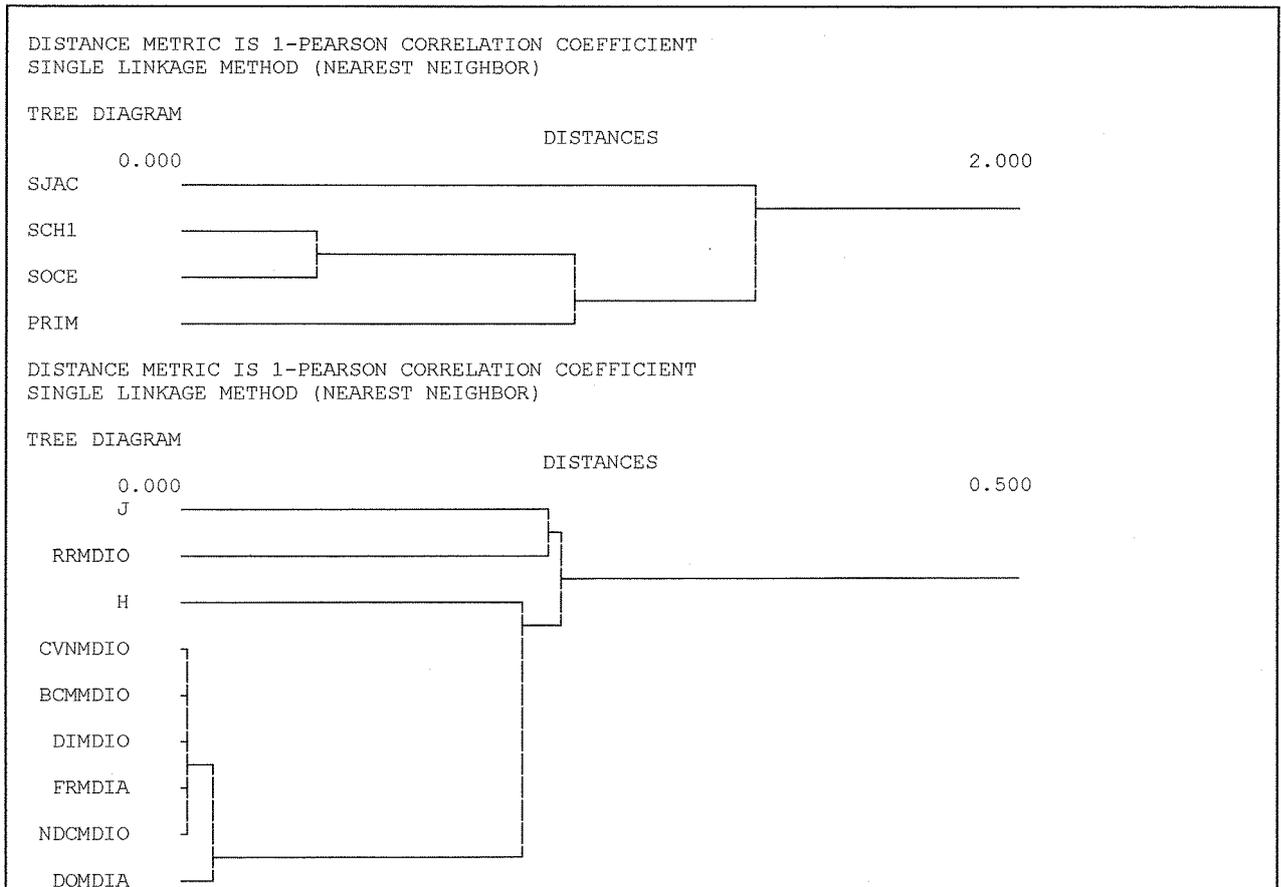


FIGURA 35 - Análise de agrupamentos dos índices de heterogeneidade, valores transformados.

Estes resultados são consistentes com a análise de agrupamentos dos índices de heterogeneidade, quando analisados em conjunto.

A análise de componentes principais respalda esta interpretação, como pode ser observado no gráfico do componente 1 versus o componente 2.

Cada um dos quatro índices escolhidos espelha um aspecto diferente: H', mede e quantidade de informação sintática, a estrutura objetiva do arranjo das manchas (NAVEH & LIEBERMAN, 1984), J mostra qual o efeito da área da microbacia sobre H', DIMDIO reflete a influência da escala sobre H', e, finalmente, RRMDIO, o efeito da janela mais rica, independente da sua frequência, de modo que se a janela mais rica possui 5 classes, e RRMDIO é 30% em um caso e 80% noutro, espera-se uma distribuição enviezada à direita na primeira e à esquerda na segunda.

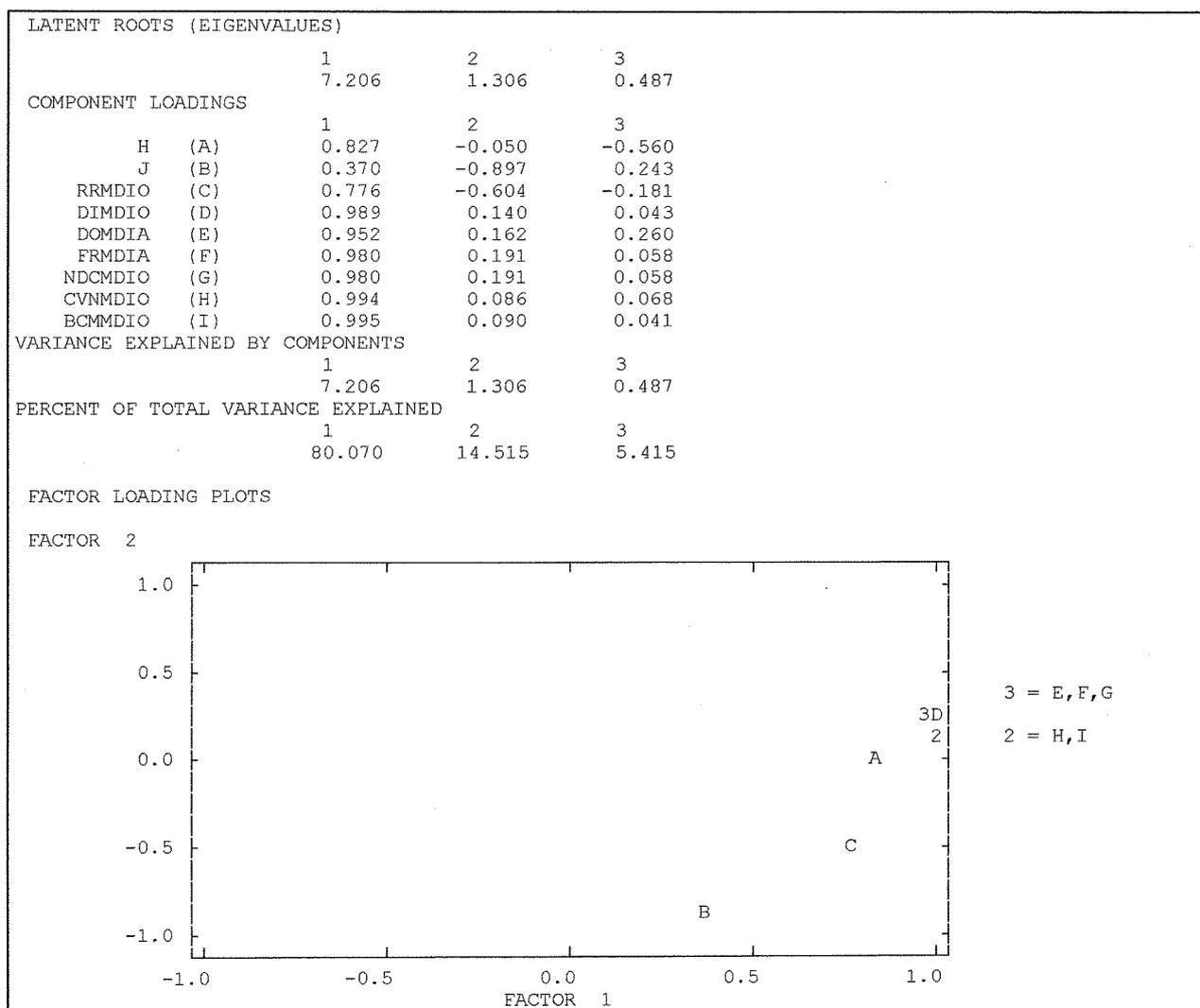


FIGURA 36 - Análise de componentes principais, incluindo os índices de heterogeneidade, valores transformados.

#### 4.2.3. Análise da Complexidade

As Figuras de 37 a 40 apresentam os gráficos que mostram a relação entre o logaritmo da resolução, expressa em lado da célula, e logaritmo da área das bacias, expressa em contagem de células.

Observa-se que os pontos ajustam-se, em todos os casos, linearmente com valores do coeficiente de determinação sempre superiores a 0.99. Isto significa que, no intervalo de resoluções [30,240] metros, os resultados demonstram que existe auto-similaridade (MILNE, 1988), o que indica que os índices de forma, quando obtidos dentro deste intervalo de resoluções, são invariantes quanto à escala. Assim, se estipularmos uma resolução, no papel, de 0.5 mm como adequada para representar a resolução no terreno (SILVA, 1994), obteríamos um intervalo de escalas de 1:60.000 a 1:480.000. Índices da fisiografia de bacias hidrográficas, como o coeficiente de compacidade, ou índice de Gravelius ( $K_c$ ), que mede a relação entre o perímetro e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia, bem como o fator de forma ( $K_f$ ), que expressa a relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia (VILLELA & MATTOS, 1975), utilizados, entre outros usos, para avaliar a forma do hidrograma, e, portanto, a tendência para enchentes, calculados dentro destes intervalos de escala, permitem comparação, mesmo quando calculados sobre mapas de escalas diferentes.

Espera-se que formas bidimensionais apresentem dimensão fractal pertencente ao intervalo [1,2]. Assim, quanto mais irregular a forma, mais cheia de rugosidades, penínsulas, o perímetro tende a interpenetrar-se, aproximando-se a um novelo, ou seja, uma linha, resultando em uma dimensão fractal entre a dimensão da reta e do quadrado (MANDELBROT, 1983). Quanto mais próximo de 2, dimensão euclidiana do quadrado, menos complexa é a forma. Os resultados, portanto, apresentam que as microbacias deste estudo possuem formas muito simples. Somente a microbacia Primavera não incluiu o valor 2 no intervalo de confiança de 95%, embora tenha apresentado um valor muito próximo.

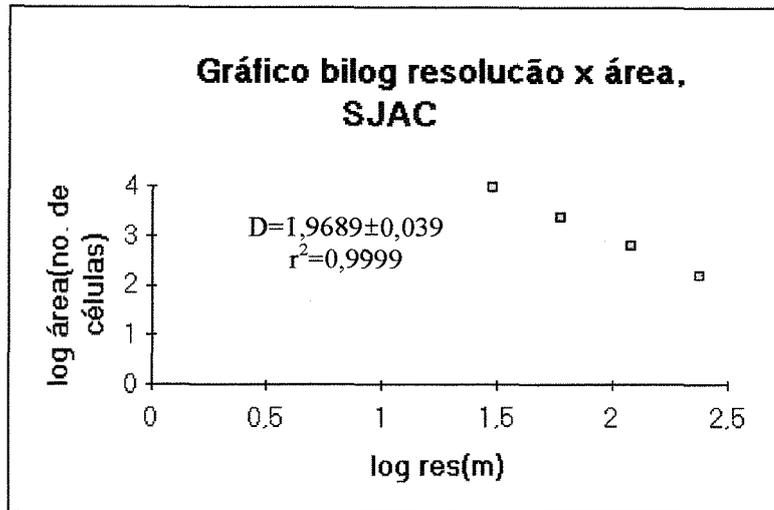


FIGURA 37 - Dimensão fractal (D) da forma (FDIMFORM) da microbacia São Jacó.  
Intervalo de confiança de 95%.

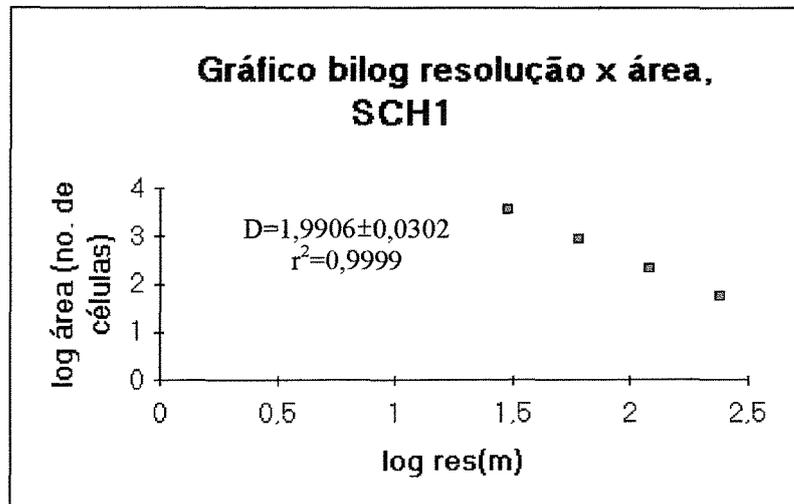


FIGURA 38 - Dimensão fractal (D) da forma (FDIMFORM) da microbacia Schneider I.  
Intervalo de confiança de 95%.

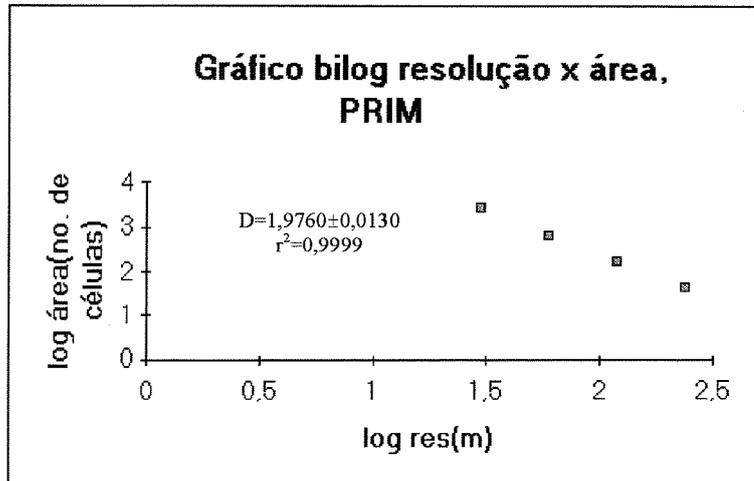


FIGURA 39 - Dimensão fractal (D) da forma (FDIMFORM) da microbacia Primavera. Intervalo de confiança de 95%.

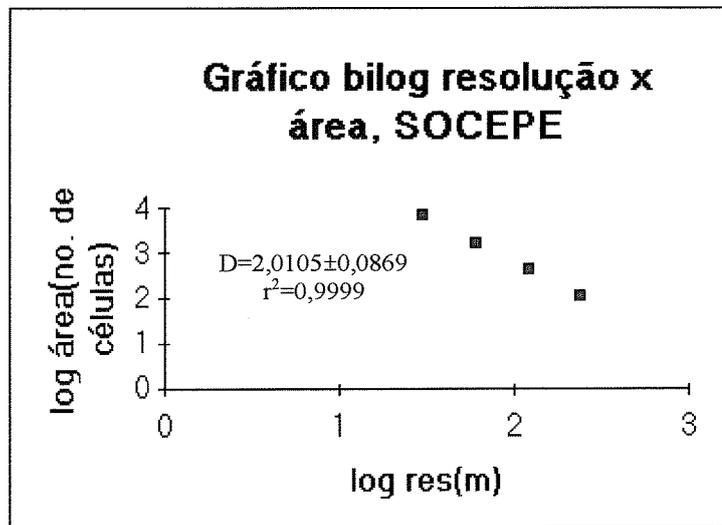


FIGURA 40 - Dimensão fractal (D) da forma (FDIMFORM) da microbacia SOCEPE. Intervalo de confiança de 95%.

O resultado encontrado para a microbacia Primavera, em termos do seu menor intervalo de confiança, pode ser devido ao efeito do tamanho das resoluções, já que esta é a microbacia de menor área. MILNE (1991) demonstrou que estimativas significativas, com no mínimo dois decimais, são possíveis com manchas com mais de 482 células, enquanto que para três decimais, 36.101 células. Assim, quanto menor a mancha, mantida a mesma resolução base, menos preciso é o resultado da dimensão fractal.

Assim, levando-se em consideração que as diferenças são muito pequenas, este índice ordenou as microbacias, da menor para a maior complexidade da forma, do seguinte modo: SOCEPE, Schneider I, Primavera e São Jacó. A Tabela 9 apresenta os escores do teste de diferença de declividades das regressões bilogaritmas entre resolução e contagem de células. Dos 12 valores de “t” obtidos, pois a recíproca da diferença entre duas microbacias somente apresentaria o mesmo escore se os coeficientes de determinação fossem os mesmos, somente um não foi significativo a 10%, a diferença de São Jacó em relação à Primavera. Já a recíproca foi significativa a 2,5%.

A dimensão fractal da forma da bacia mostrou ser sensível para diferenças entre bacias vizinhas, e, embora com menor sensibilidade, para diferenças entre microbacias de municípios diferentes. Por exemplo, a mais significativa diferença entre microbacias vizinhas deu-se entre Primavera e SOCEPE ( $t=22.53$ ), e a diferença mais significativa, entre microbacias de municípios diferentes, foi entre Primavera e Schneider I ( $t=9.56$ ).

teste t para declividade	socepe	primavera	schneider 1	são jacó
socepe	xxxxxxxxxxx	22,52966	5,629314	9,028197
primavera	-5,66245	xxxxxxxxxxx	-4,14736	1,550963
schneider 1	-3,26038	9,557303	xxxxxxxxxxx	4,722879
são jacó	-6,83698	-4,67321	-6,17529	xxxxxxxxxxx

para 2 graus de liberdade,  $t(0,95) = 2,92$ ,  $t(0,90) = 1,89$  e  $t(0,975) = 4,30$  para teste unilateral

$$t = \frac{(\text{slope1} - \text{slope2}) / \sqrt{1 - r^2}}{\sqrt{n - 2}} \quad (\text{SPIEGEL, 1977})$$

valor em vermelho é significativo a 0,025, em verde a 0,05 e em azul a 0,10.

TABELA 9 - Testes de “t” de diferenças das dimensões fractais da forma das bacias.

As Figuras de 41 a 44 apresentam os gráficos bilogartimos da relação entre contagem de células por onde passa um arroio e a resolução, ou seja, da dimensão fractal da rede hidrográfica.

Os resultados apresentam que existe auto-similaridade para o intervalo de resoluções estudado (os coeficientes de determinação da regressão foram todos maiores que 0.99). Somente a microbacia São Jacó apresentou dimensão fractal com intervalo de confiança que não incluiu a unidade, ou seja, a dimensão euclidiana da reta, embora o limite superior do intervalo encontre-se muito próximo da unidade.

Assim, pode-se concluir que as redes apresentam baixa complexidade.

Esta pouca complexidade pode estar relacionada com o fato de que todas as microbacias são de pequena ordem. A microbacia Schneider I, utilizando-se o sistema de ordenação de Strahler (SUGUIO & BIGARELLA, 1990), é de primeira ordem, Primavera e São Jacó, de segunda ordem, e, SOCEPE, de terceira ordem, valores que guardam relação com a densidade de drenagem, que ordenou como: Schneider I, São Jacó, Primavera e SOCEPE. Desta forma, não verifica-se relação coerente com a ordenação resultante da dimensão fractal da rede hidrográfica: São Jacó, Primavera, Schneider I e SOCEPE. O valor que não é consistente com uma avaliação topológica é o da microbacia Schneider I. Ela apresenta um único arroio, que tem sinuosidade quase nula, ou seja, um sistema com quase nula complexidade.

É possível que a dimensão fractal da rede hidrológica seja um índice pouco sensível à pequenas variações na complexidade, principalmente se considerarmos que foram obtidas as regressões sobre 4 contagens, o que é um valor pequeno.

Espera-se que em bacias de ordem muito superior, comparando-se regiões muito diferentes, o índice apresente um melhor resultado. Neste caso, as microbacias ocorrem em regiões muito semelhantes.

A Tabela 10 apresenta os testes de diferença de declividades para as regressões das dimensões fractais das redes de arroios. Observa-se que somente a diferença da declividade da microbacia São Jacó em relação à Schneider I foi significativa para teste de 97,5%, sendo que a diferença da declividade da Schneider I em relação à São Jacó, foi significativa para teste de 90%, o que deve-se ao fato dos respectivos coeficientes de determinação ( $r^2$ ) serem diferentes, o que implica na direcionalidade do teste. Da mesma forma, São Jacó mostrou-se diferente da SOCEPE para 95% e a recíproca para 90%. O resultado da diferença entre Schneider I e Primavera mostrou-se significativo a 90%, porém não foi significativo na recíproca.

Observa-se, portanto, que a dimensão fractal da rede de arroios foi sensível à diferença de complexidade entre as microbacias de Sapiranga, mostrando que a microbacia Schneider I é menos complexa do que a São Jacó. Mostrou-se, porém, insensível às diferenças entre as microbacias de Santa Maria. Quanto a sensibilidade entre bacias de municípios diferentes, o índice foi sensível para as microbacias São Jacó e SOCEPE, em ambos os sentidos, e para a diferença da Schneider I para Primavera, não sendo suficientemente sensível em cinco de oito valores de diferenças entre os municípios.

teste t para declividades	socepe	primavera	schneider 1	são jacó
socepe	xxxxxxxxxxx	1,101234	0,717613	3,011975
primavera	-1,38725	xxxxxxxxxxx	-2,48077	1,324698
schneider 1	-0,31125	0,854153	xxxxxxxxxxx	2,633405
são jacó	-2,4764	-0,86459	-4,99186	xxxxxxxxxxx

para 2 graus de liberdade,  $t(0,95) = 2,92$ ,  $t(0,90) = 1,89$  e  $t(0,975) = 4,30$  para teste unilateral

$$t = [(slope1 - slope2) / \sqrt{1 - r^2}] \times \sqrt{n - 2} \quad (\text{SPIEGEL, 1977})$$

valor em vermelho é significativo a 0,025, em verde a 0,05 e em azul a 0,10.

TABELA 10 - Testes de “t” de diferenças das dimensões fractais das redes de arroios.

As Figuras de 45 a 48 apresentam os gráficos bilogartimos da relação entre resolução e a contagem de cubos que cabem sob a superfície do modelo digital de terreno (dimensão fractal da topografia).

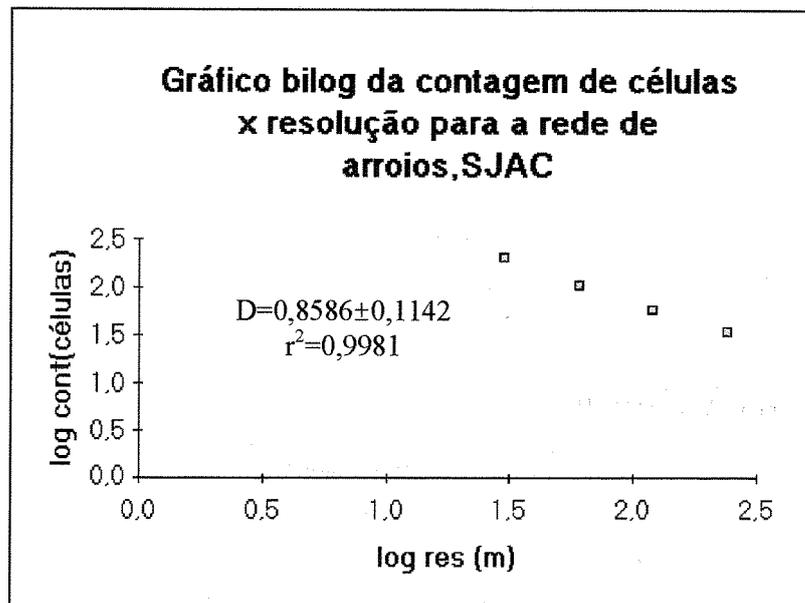


FIGURA 41 - Dimensão fractal (D) da rede hidrográfica (FDIMHID) para a microbacia São Jacó. Intervalo de confiança de 95%.

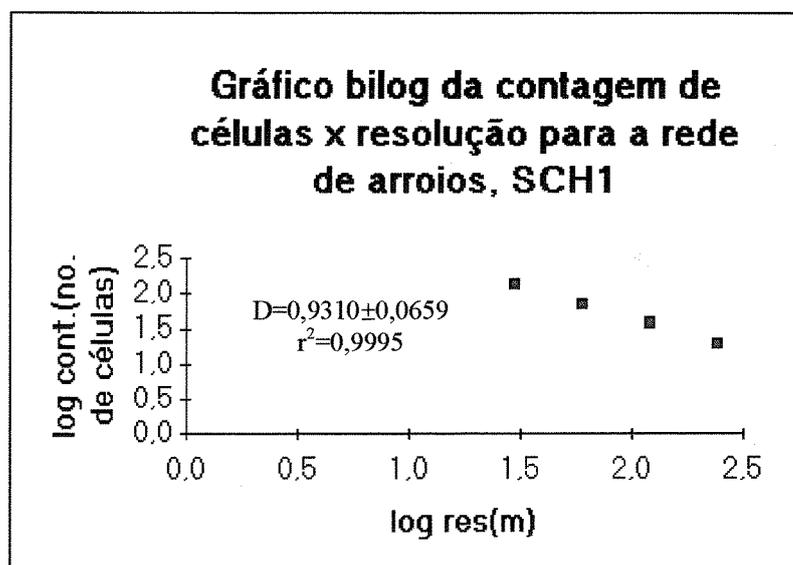


FIGURA 42 - Dimensão fractal (D) da rede hidrográfica (FDIMHID) para a microbacia Schneider I. Intervalo de confiança de 95%.

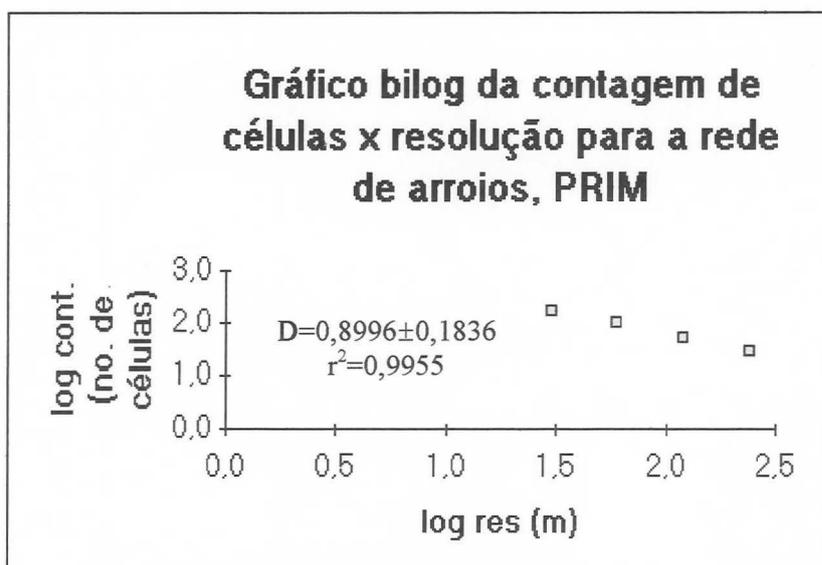


FIGURA 43 - Dimensão fractal (D) da rede hidrográfica (FDIMHID) da microbacia Primavera. Intervalo de confiança de 95%.

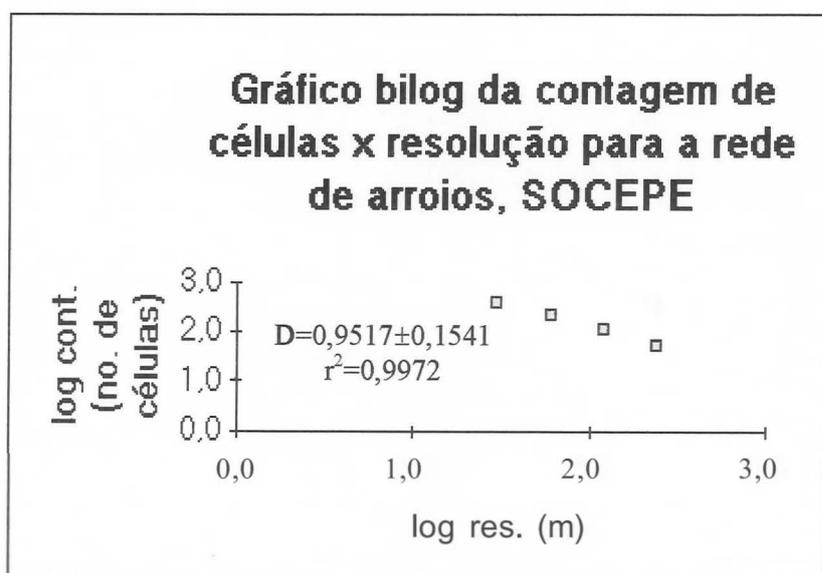


FIGURA 44 - Dimensão fractal (D) da rede hidrográfica (FDIMFORM) da microbacia SOCEPE. Intervalo de confiança de 95%.

O muito significativo ajuste linear (todos os  $r^2$  são maiores que 0.99) indica que o volume da topografia é auto-similar sobre o intervalo de resoluções deste trabalho. Este resultado não é concordante com a literatura, que considera os modelos de topografia como exemplos de fractais auto-afins (MANDELBROT, 1983, 1989; MILNE, 1991; TURCOTTE, 1992), ou seja, fractais que não são isotópicos. A auto-afinidade implica que as contagens não são proporcionais a quadrados ou cubos que são aumentados da mesma forma em todas as dimensões. Em fractais auto-similares, quando duplicamos a resolução, mantemos a proporção entre os lados dos quadrados ou cubos de contagem. Os fractais auto-afins não guardam esta proporção. Desta forma, se temos uma contagem  $N_1$  efetuada com quadrados de dimensões  $x_1$  e  $y_1$ , e temos uma contagem  $N_2$  efetuada com quadrados de dimensões  $x_2=rx_1$  e  $y_2=r^H y_1$ , o fractal apresentará auto-afinidade se  $N_2/N_1=r^{-D}$ , o que implica na linearidade do gráfico bilogarítimo. No entanto, os autores modelaram a superfície ou de modo unidimensional através da análise de um perfil topográfico, ou de modo bidimensional através do desenvolvimento de deslocamento de perfis. Estes perfis podem ser tratados como séries temporais, obtendo-se a dimensão fractal como similar a dimensão de correlação “ $D_2$ ”. Em geral, os autores citados demonstram que os valores de  $H$  e  $D$ , para perfis unidimensionais, aproximam-se dos valores do ruído Browniano,  $H=0.5$  e  $D=1.5$ . TURCOTTE (1992) apresenta mapa do estado do Oregon da dimensão fractal do relevo (bidimensional), obtido por meio de análise espectral, em que os valores situaram-se no intervalo de 2.3 a 3.5, sugerindo uma relação aproximada entre o valor da dimensão fractal para perfis bidimensionais como a dimensão do perfil unidimensional mais um.

É possível que esta discordância esteja relacionada com a diferente abordagem encontrada na literatura em relação à deste trabalho. Ao invés de trabalhar com perfis, o método utilizado foi o proposto por MILNE (1988) para estudar a dimensão fractal de superfícies traçadas no espaço euclidiano por índices sintéticos obtidos a partir de métodos de ordenação baseados em “eigenvalues”. Como os cubos guardaram sua proporcionalidade em todas as resoluções empregadas para a contagem de cubos, a linearidade implica em auto-similaridade. Esperar-se-ia que, se os volumes fossem auto-afins, que o ajuste não fosse significativo. Estes resultados sugerem que o relevo não

necessariamente precisa ser modelado a partir de movimentos brownianos, como perfis auto-afins, mas como volumes auto-similares.

Certamente, o teste destas hipóteses não encontra-se no escopo deste trabalho, limitado a quatro microbacias de regiões muito semelhantes, quando tomadas em comparação com o espectro de possibilidades de padrões de relevos realmente existentes.

Observa-se que todos os valores encontram-se próximos do valor três, dimensão euclidiana do cubo. Somente a microbacia São Jacó não inclui este valor no intervalo de confiança de 95%. No entanto, estes valores estão situados dentro do intervalo encontrado no estado do Oregon (E.U.A.) por TURCOTTE (1992).

A Tabela 11 apresenta o teste de “t” para diferença de declividades. Observa-se que dos doze escores calculados, somente dois não foram significativos a 10%, os quais expressam a diferença entre as microbacias de Santa Maria. O índice mostrou-se sensível, para teste de 2.5% de significância, tanto para a diferença entre municípios diferentes, quanto para as microbacias de Saporanga.

A ordenação produzida, apresentou o menor valor para São Jacó, seguida por Schneider I, Primavera e SOCEPE. Percebe-se que existe uma relação inversa com os padrões da declividade e direta com a densidade de drenagem, quando comparamos municípios diferentes. Considerando que a diferença entre as microbacias SOCEPE e Primavera não foi significativa, resta compreender a diferença entre São Jacó e Schneider I. Observa-se que o índice guarda relação direta com a declividade média, com a diferença entre altitudes mínima e máxima, e inversa com a densidade de drenagem, comportando-se de forma inversa com o padrão observado entre os municípios.

Observa-se, pois, que a complexidade do relevo é uma propriedade do todo que não pode ser reduzida às suas partes.

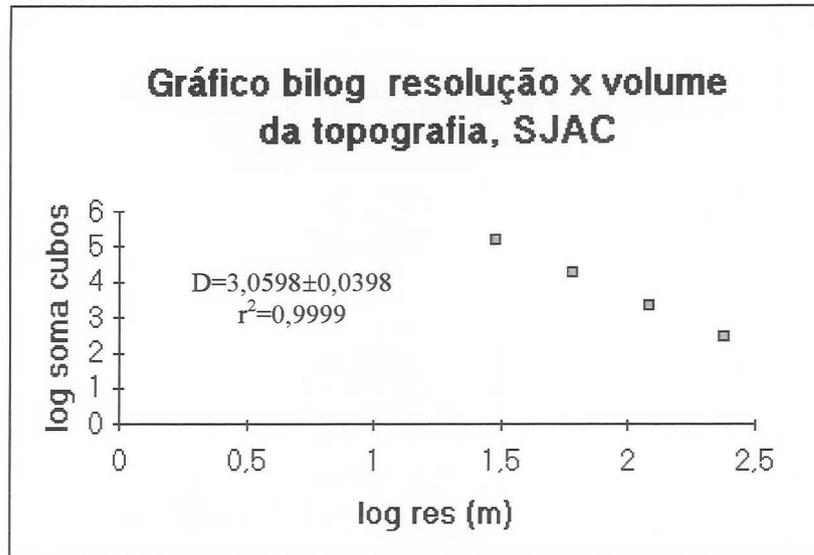


FIGURA 45 - Dimensão fractal (D) da topografia (FDIMTOP) da microbacia São Jacó. Intervalo de confiança de 95%.

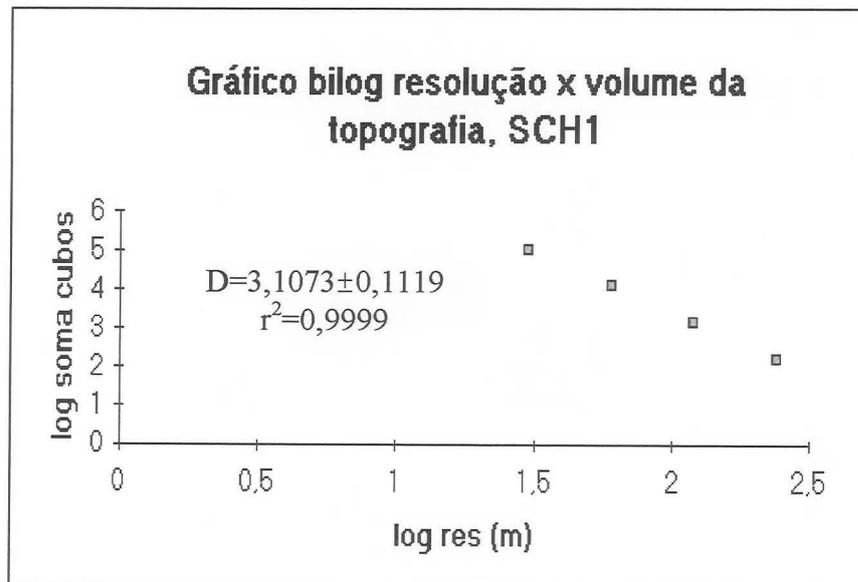


FIGURA 46 - Dimensão fractal (D) da topografia (FDIMTOP) da microbacia Schneider I. Intervalo de confiança de 95%.

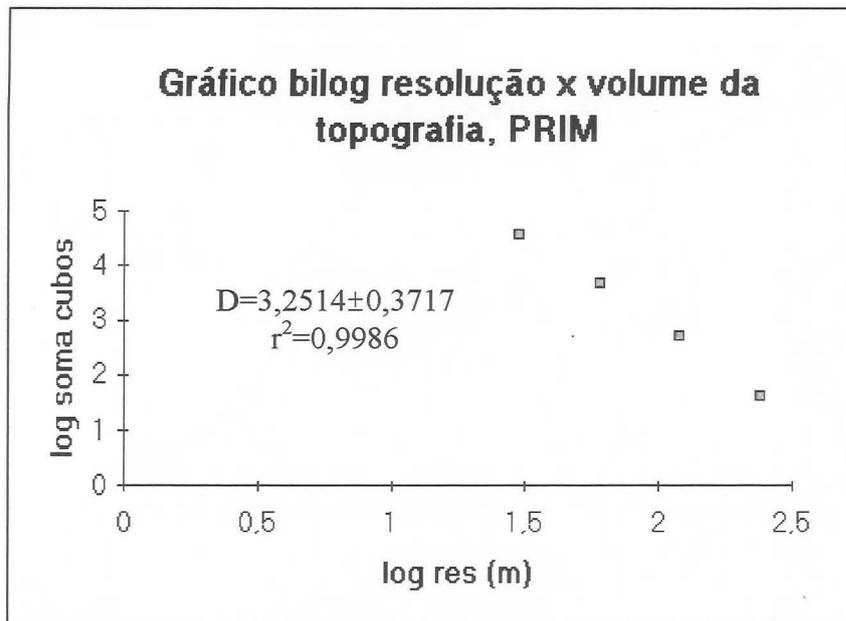


FIGURA 47 - Dimensão fractal (D) da topografia (FDIMTOP) da microbacia Primavera.  
Intervalo de confiança de 95%.

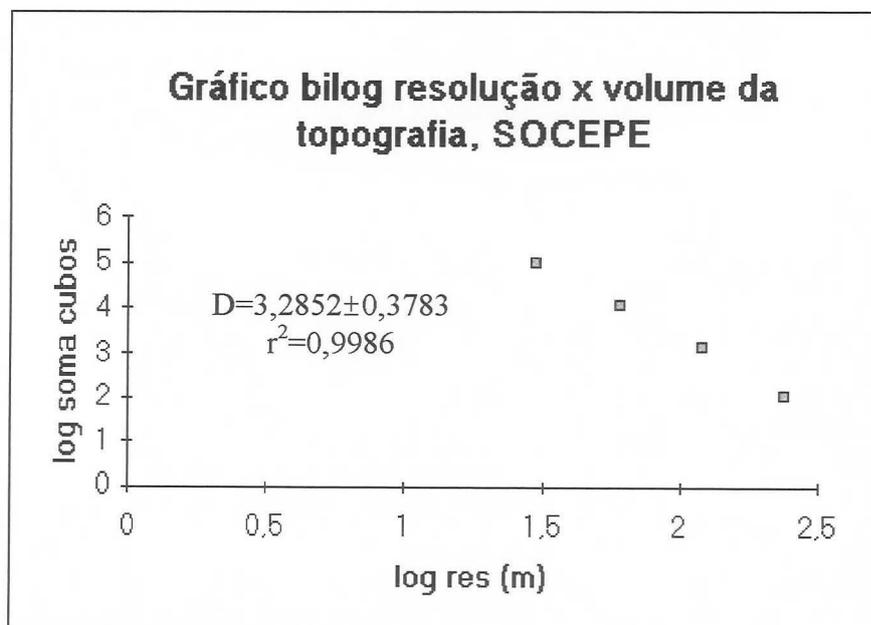


FIGURA 48 - Dimensão fractal (D) da topografia (FDIMTOP) da microbacia SOCEPE.  
Intervalo de confiança de 95%.

teste t para declividade	socepe	primavera	schneider	são jacó
socepe	xxxxxxxxxxxx	1,274166	21,25667	74,65061
primavera	-1,26508	xxxxxxxxxxxx	17,2151	63,44773
schneider	-6,65367	-5,42732	xxxxxxxxxxxx	15,72899
são jacó	-8,42985	-7,21626	-5,67442	xxxxxxxxxxxx

para 2 graus de liberdade,  $t(0,95) = 2,92$ ,  $t(0,90) = 1,89$  e  $t(0,975) = 4,30$  para teste unilateral

$$t = \frac{(\text{slope1} - \text{slope2}) / \sqrt{1 - r^2}}{s \sqrt{n-2}} \quad (\text{SPIEGEL}, 1977)$$

valor em vermelho é significativo a 0,025, em verde a 0,05 e em azul a 0,10.

TABELA 11 - Testes de “t” de diferenças das dimensões fractais da topografia das bacias.

Para que se possa comparar a relação perímetro-área entre as microbacias, foi necessário trabalhar com o conjunto das manchas, independente da classe a qual pertenciam, de modo a permitir a comparação das microbacias de Sapiranga com as de Santa Maria. Assim, obteve-se mapas da estrutura de manchas das microbacias, apresentados nas Figuras de 41 a 52.

Uma observação superficial dos mapas dificilmente permitiria que identificássemos a ordenação das microbacias de acordo com a complexidade da estrutura de manchas. Alguém poderia dizer que a microbacia Primavera possui manchas menos complexas que as outras, mas um certo grau de subjetividade seria incluído para ordenar as outras, não sem uma boa parcela de dúvida.

As Figuras de 53 a 56 apresentam o resultado da dimensão fractal da relação área-perímetro. Os resultados mostram valores muito próximos, que são próximos ao valor de 1.2, encontrado por MILNE (1988) para manchas menores do que 55.7 ha em Natchez, Mississippi (E.U.A.). Perímetros muito ricos em lobos peninsulares, projeções alongadas de formas diversas, resultam em perímetros que tendem a preencher o plano, rendendo uma dimensão fractal da relação perímetro para área próxima a 2. Se regredíssemos área sobre perímetro, obteríamos uma relação inversa, com valores da dimensão fractal próximos a 1.2 para áreas muito pequenas, proporcionalmente a uma borda muito complexa (MILNE, 1991). Assim, os valores da ordem de 1.3 encontrados nas microbacias deste estudo, mostram que as manchas daqui são mais complexas que as manchas de Natchez.

A ordenação das microbacias de acordo com este índice resultou , em ordem crescente de complexidade: Primavera, São Jacó, SOCEPE e Schneider I. Porém, as diferenças foram de ordem muito pequena.

A Tabela 12 apresenta os escores dos testes de diferenças de declividades para as dimensões fractais da estrutura de manchas entre as microbacias e destas com o valor encontrado para Natchez. Os resultados mostram que o índice foi sensível para a diferença da dimensão fractal da estrutura de manchas das quatro microbacias quando comparadas com a de Natchez, assim como entre as microbacias Schneider I e São Jacó. A microbacia Schneider I é significativamente mais complexa quanto à estrutura de manchas que as microbacias Primavera (2.5%) e SOCEPE (10%), embora a recíproca não seja verdadeira, com valores dos escores que somente permitiriam a aceitação da hipótese alternativa para  $t(0,80)$ . A diferença, entre as microbacias São Jacó e as de Santa Maria, também não foi significativa.

O índice pode ser sensível à distribuição relativa dos tamanhos das manchas. Como a menor mancha possível, para dados mapeados em uma grade de resolução igual a 30 metros, tem uma relação área-perímetro que possui dimensão igual a 1 (dimensão da reta), ou 2, se regredirmos perímetro sobre área, a complexidade responde melhor para manchas com área muito maior que a unidade (expressa em células). Assim, quanto maior a percentagem de manchas com área superior a unidade, maior a probabilidade do método captar a complexidade das bordas. Isto pode explicar porque uma microbacia com densidade de manchas (número de manchas/área da bacia) de 81.85 manchas/km<sup>2</sup>, São Jacó, não mostrou diferença significativa em relação a microbacias com 32.24, SOCEPE, e 55.02 manchas/km<sup>2</sup>, Primavera. Sendo uma paisagem mais fragmentada, a probabilidade de que as manchas unitárias ocorram, é muito maior do que em paisagens menos fragmentadas. Por outro lado, não só o número de manchas unitárias influencia, mas a sua disposição também. Uma grande quantidade de manchas unitárias situadas lado a lado, podem penetrar como uma cunha em uma mancha de maiores dimensões, contribuindo para aumentar a complexidade do perímetro das manchas maiores, e, portanto, afetando a declividade da reta de regressão. Isto pode explicar porque as microbacias São Jacó e Schneider I, que possuem densidade de manchas muito similares (respectivamente 81.85 e 85.03 manchas/km<sup>2</sup>), apresentaram dimensões fractais significativamente diferentes.

Esta provável dependência da densidade fractal da estrutura de manchas com a resolução do mapa de classificação de usos pode resultar em uma dimensão fractal de segunda ordem da relação entre resolução e dimensão fractal da estrutura de manchas. Isto pode ser obtido através da regressão bilogarítma entre dimensão fractal da estrutura de manchas contra resolução.

O resultado da análise de regressão do gráfico log resolução x log D, mostrará se existe auto-similaridade ou não. Se o ajuste à reta for significativo, pode-se esperar que o efeito do tamanho da mancha unitária (com área igual à resolução) não influí. Pode-se também, verificar se existe alguma mudança de declividade, demarcando uma transição de escalas (MILNE, 1988). Estes e outros testes serão necessários para verificar porque somente a microbacia Schneider I resultou significativamente mais complexa que as demais.

teste t para declividade	socepe	primavera	schneider 1	são jacó
socepe	xxxxxxxxxx	-0,29476	1,641495	-0,44769
primavera	0,405117	xxxxxxxxxx	2,223111	0,282262
schneider 1	-1,14336	-1,12667	xxxxxxxxxx	-2,50783
são jacó	0,248464	-0,11398	1,998209	xxxxxxxxxx
natchez	12,04003	8,465568	18,92708	21,24639

para todas as colunas, os graus de liberdade são > 120, assim,  $t(0,95) = 1,645$ ,  $t(0,90) = 1,28$  e  $t(0,975) = 1,96$ , para teste unilateral

$$t = \frac{(\text{slope1} - \text{slope2}) / \sqrt{1 - r^2}}{s \sqrt{n - 2}} \quad (\text{SPIEGEL}, 1977)$$

valor em vermelho é significativo a 0,025, em verde a 0,05 e em azul a 0,10.

TABELA 12 - Testes de diferenças das dimensões fractais da estrutura de manchas das microbacias e dos valores encontrados para Natchez (MILNE, 1988).

A Tabela 13 apresenta o resumo das dimensões fractais obtidas para as microbacias.

	FDIMFORM	FDIMARPER	FDIMTOP	FDIMHID
São Jacó	1,9689	1,3195	3,0598	0,8586
Schneider I	1,9906	1,3336	3,1073	0,9310
Primavera	1,9760	1,3179	3,2514	0,8996
SOCEPE	2,0105	1,3220	3,2852	0,9517

TABELA 13 - Dimensões fractais obtidas para as microbacias: da forma da bacia (FDIMFORM), da relação área perímetro (FDIMARPER), da topografia (FDIMTOP) e da rede hidrológica (FDIMHID).

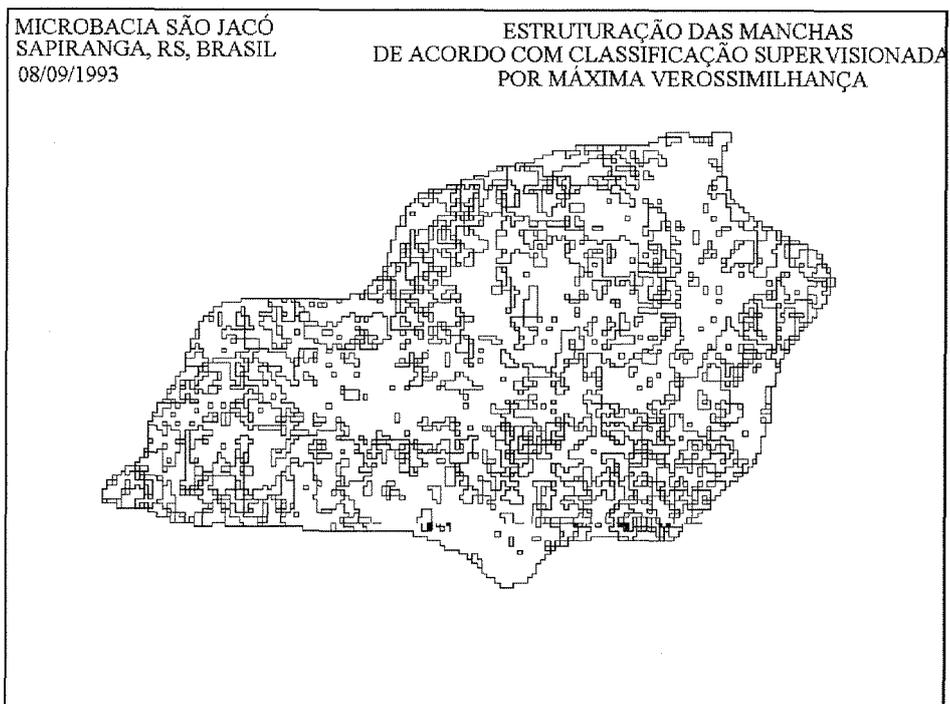


FIGURA 49 - Estrutura de manchas da microbacia São Jacó.

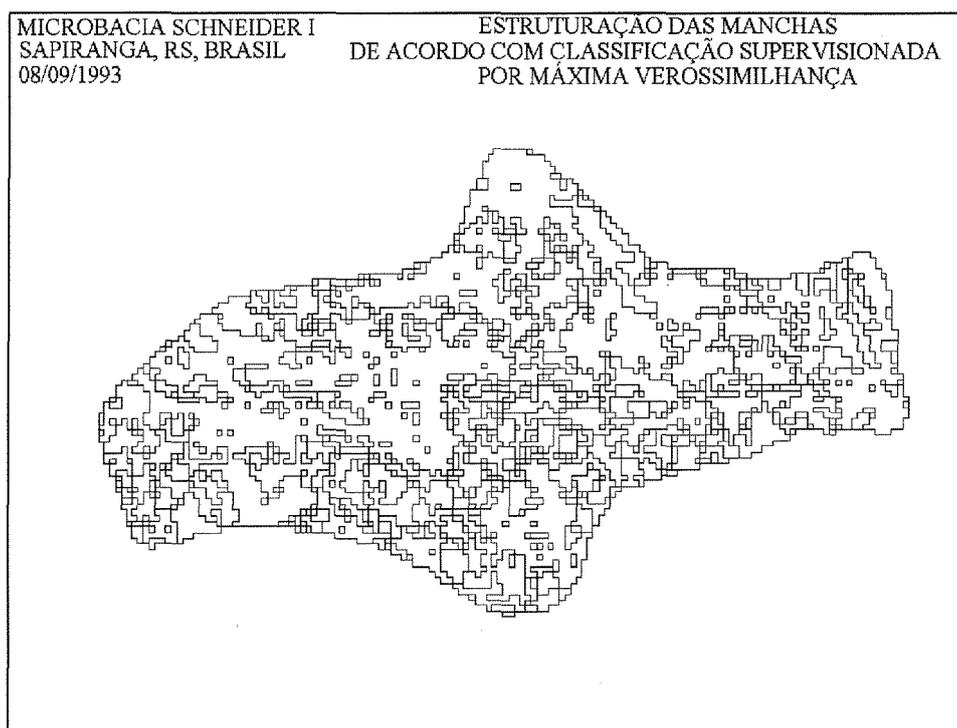


FIGURA 50 - Estrutura de manchas da microbacia Schneider I.

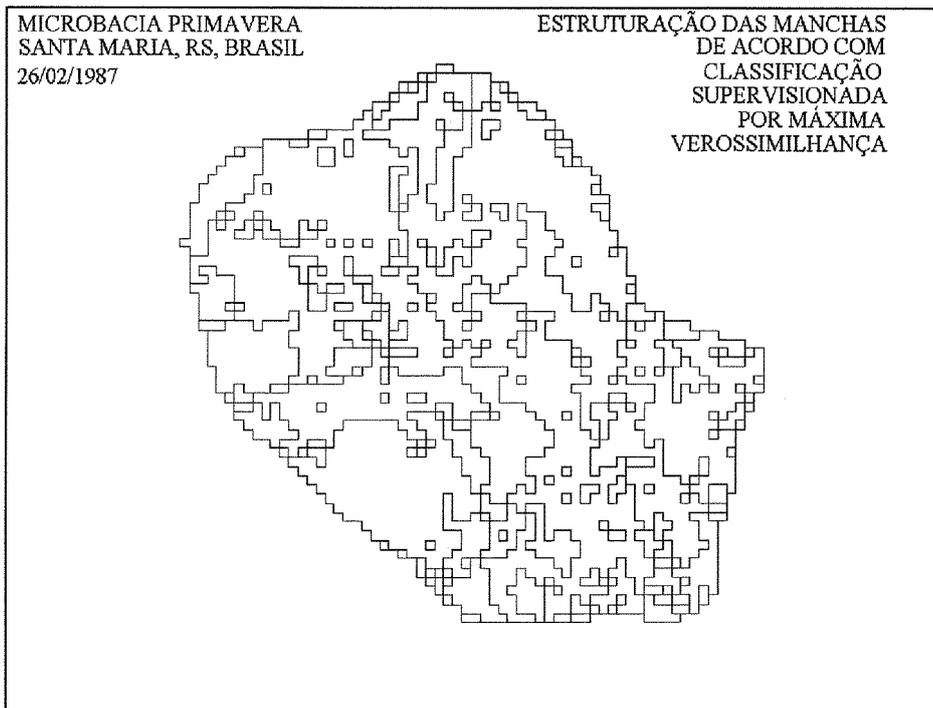


FIGURA 51 - Estrutura de manchas da microbacia Primavera.

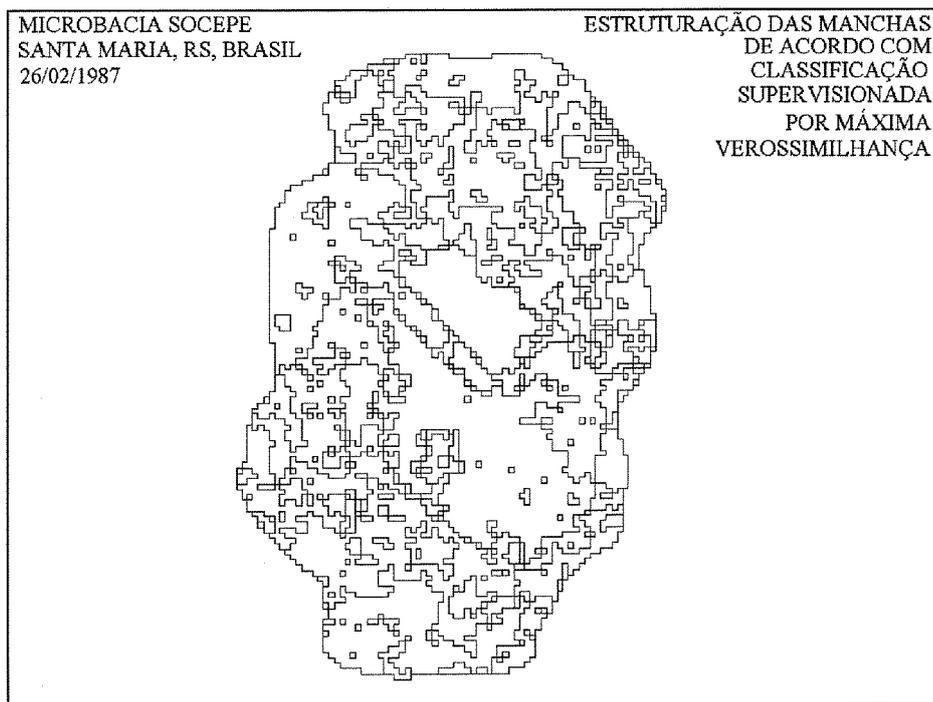


FIGURA 52 - Estrutura de manchas da microbacia SOCEPE.

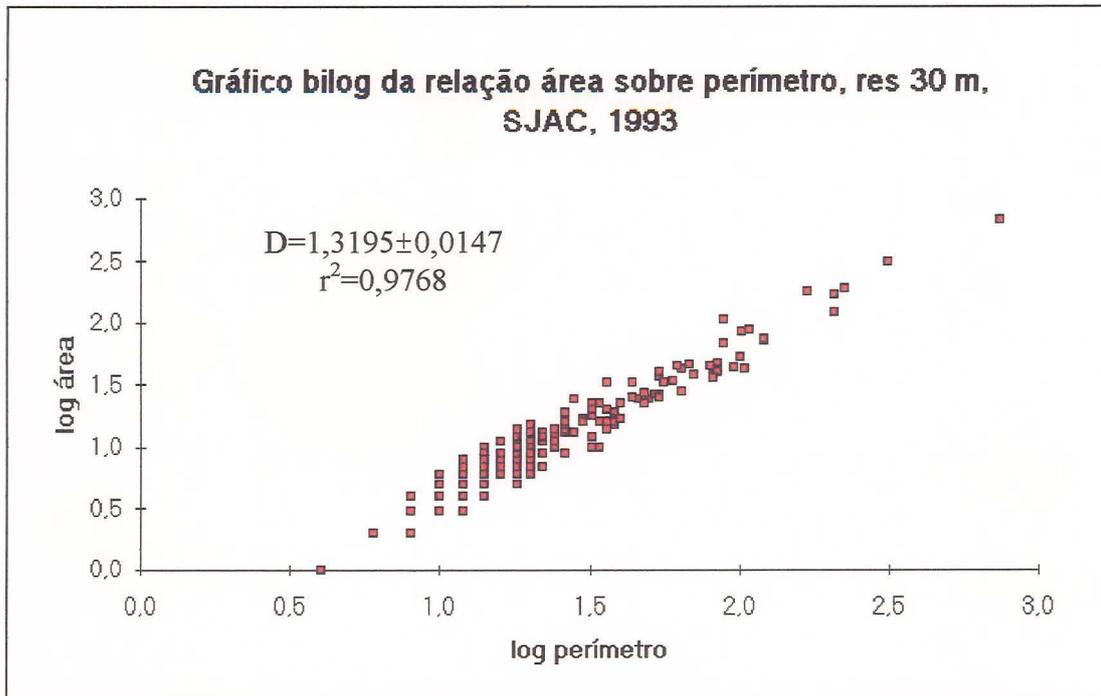


FIGURA 53 - Dimensão fractal (D) da estrutura de manchas (FDIMARPER) da microbacia São Jacó. Intervalo de confiança de 95%.

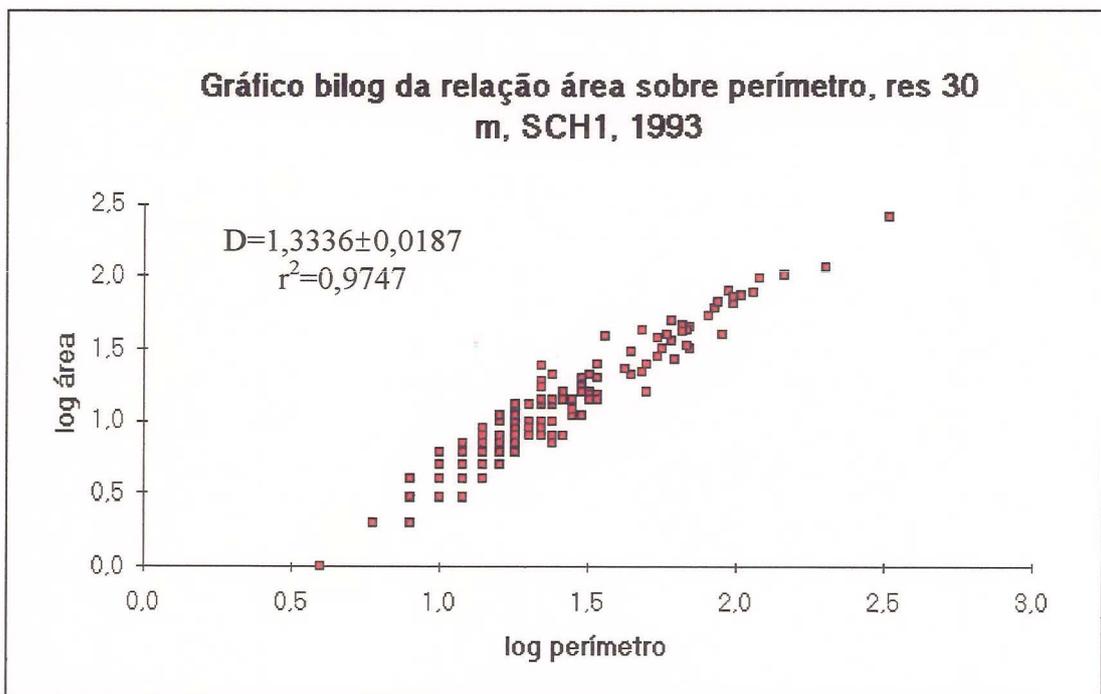


FIGURA 54 - Dimensão fractal (D) da estrutura de manchas (FDIMARPER) da microbacia Schneider I. Intervalo de confiança de 95%.

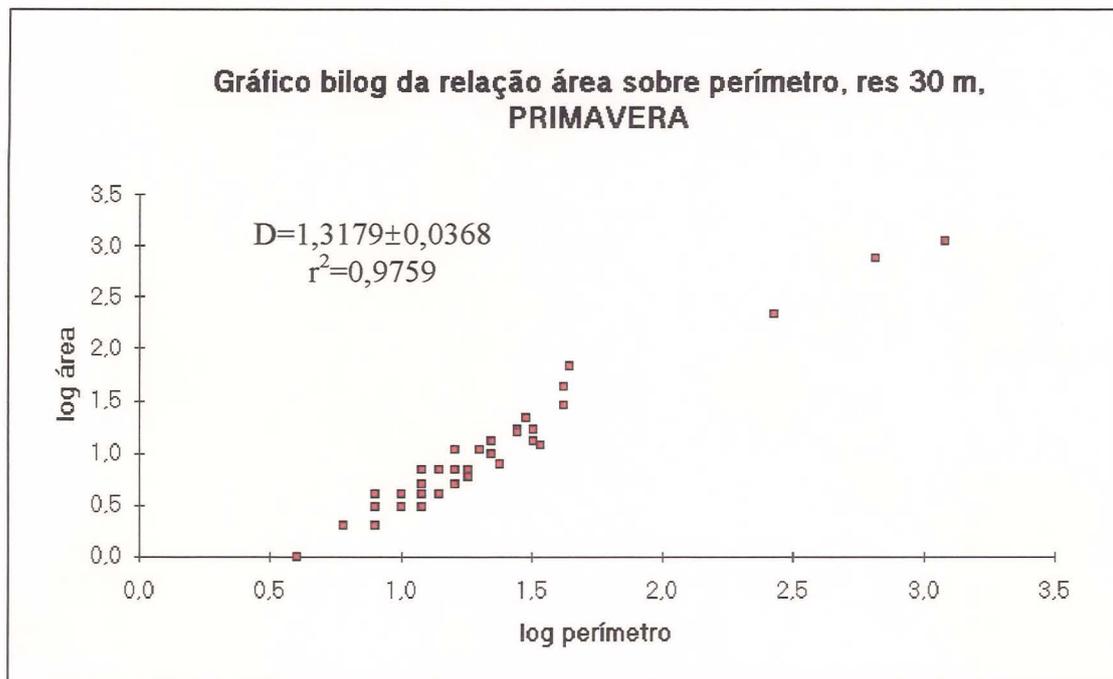


FIGURA 55 - Dimensão fractal (D) da estrutura de manchas (FDIMARPER) da microbacia Primavera. Intervalo de confiança de 95%.

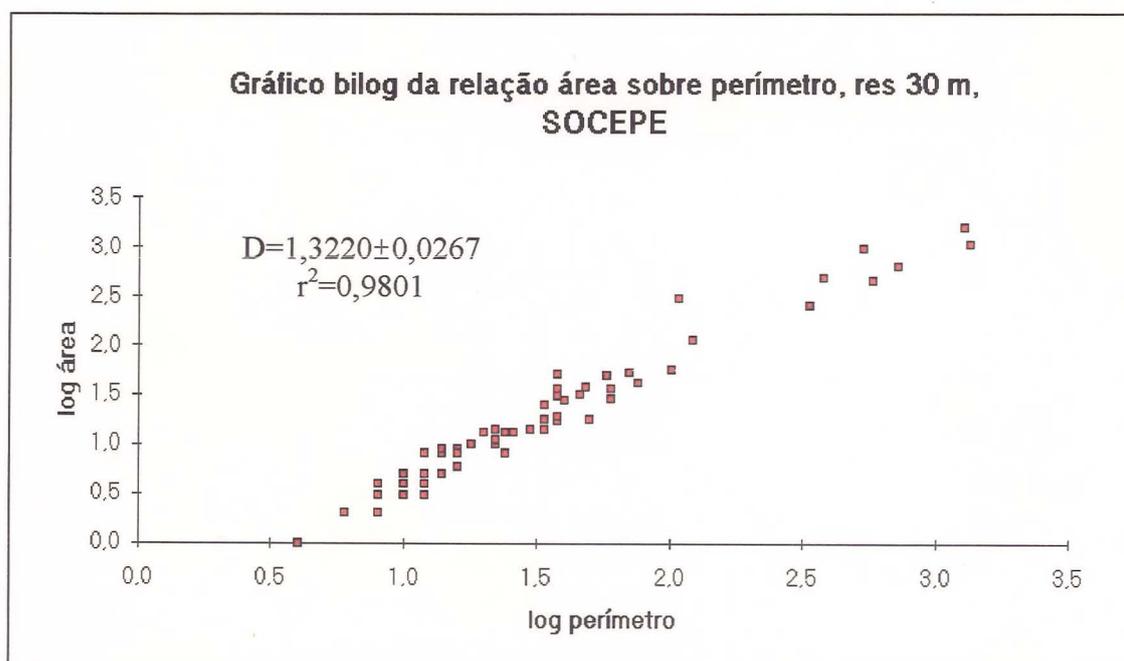


FIGURA 56 - Dimensão fractal (D) da estrutura de manchas (FDIMARPER) da microbacia SOCEPE. Intervalo de confiança de 95%.

A análise multivariada foi obtida descartando-se os valores da dimensão fractal da rede de arroios, em função da inconsistência verificada para Schneider I. Os resultados das análises de agrupamento e de componentes principais encontram-se nas Figuras 57 e 58.

Tomados no seu conjunto, os índices de complexidade da paisagem separam as microbacias de acordo com o município, mostrando que as microbacias Schneider I e São Jacó são mais similares quanto a complexidade do que SOCEPE e Primavera.

Observa-se que as dimensões fractais da forma e da topografia estão fortemente relacionadas no primeiro componente, o qual explica 53.34% da variação. Já a dimensão fractal da estrutura de manchas da paisagem está fortemente relacionada ao segundo componente, o qual explica 42.57% da variação. Desta forma, se incluirmos nos cálculos sintéticos apenas as dimensões fractais da topografia e da estrutura de manchas, obteremos um resultado representativo.

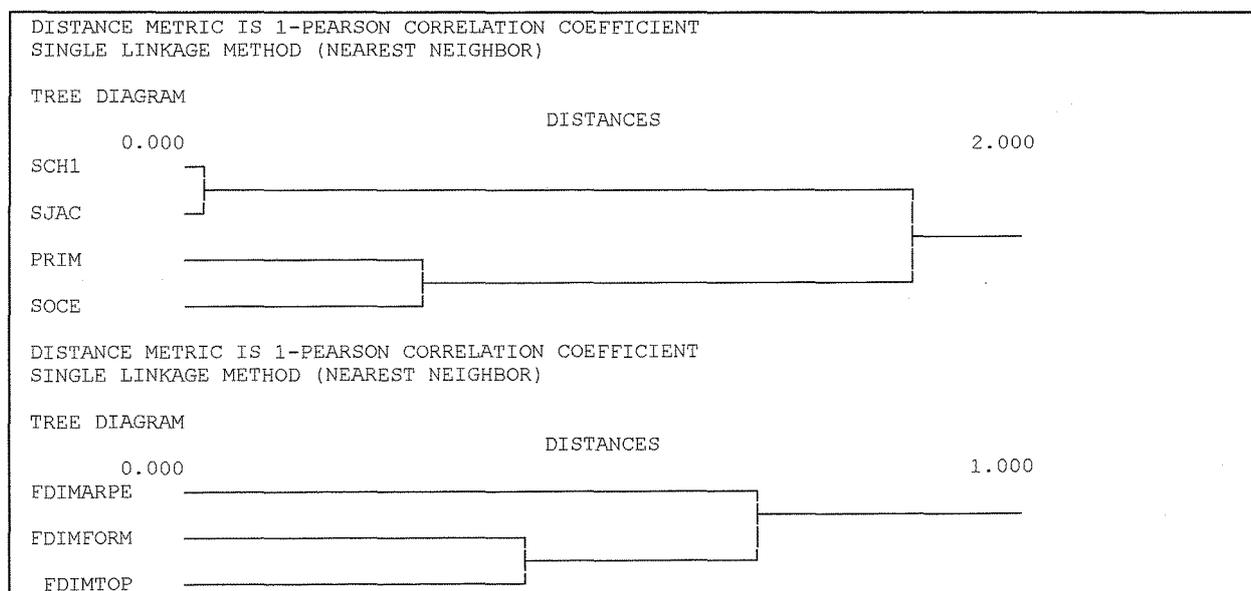


FIGURA 57 - Análise de agrupamento para os índices de complexidade da paisagem. Valores transformados.

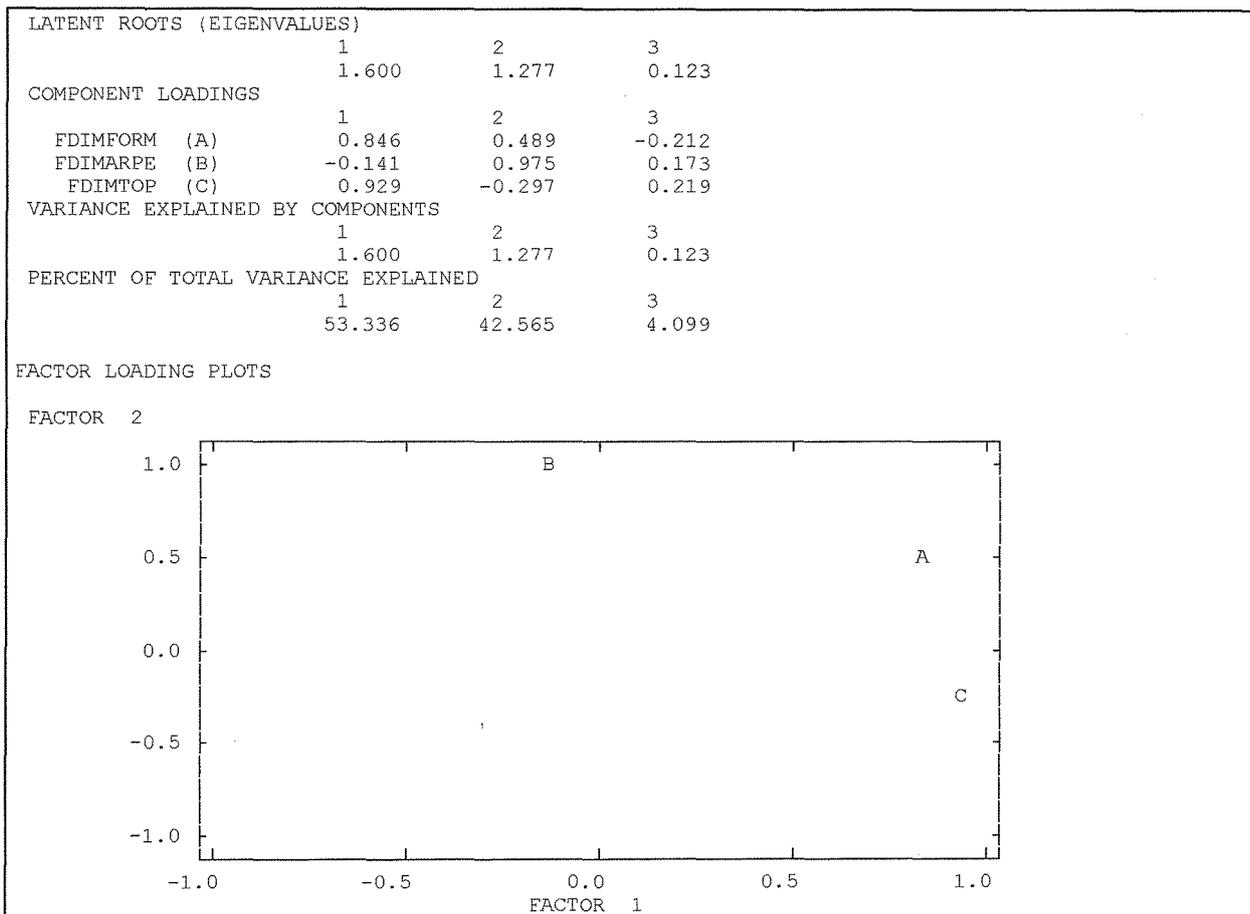


FIGURA 58 - Análise de componentes principais dos índices de complexidade da paisagem. Valores transformados.

#### 4.3. Ecologia de Paisagem : síntese e relação com hidrologia

Neste sub-capítulo, será apresentada a relação entre os índices topográficos, de heterogeneidade, fractais e os índices obtidos para decrever a complexidade das vazões. Os índices foram filtrados de acordo com a análise do capítulo anterior e, deste modo, a análise somente levará em conta os seguintes descritores:

1. Índices topográficos: V90AZ270 e DECLMDIA.
2. Índices de heterogeneidade:  $H'$ , J, DIMDIO e RRMDIO.
3. Índices de complexidade da paisagem: FDIMARPE e FDIMTOP.
4. Índices de complexidade das vazões:  $D_2$  e PERMEDIO.

##### 4.3.1. Síntese da Ecologia de Paisagem

A Figura 59 mostra a análise de agrupamento para as variáveis transformadas da Ecologia de Paisagem. Observa-se que formaram-se dois agrupamentos de microbacias correspondentes aos municípios de Sapiranga e Santa Maria, sendo que as diferenças entre as microbacias Schneider I e São Jacó são pouco maiores que as diferenças entre SOCEPE e Primavera. Os índices, por outro lado, formaram um agrupamento, e isolaram a dimensão fractal da topografia e o percentual de vertentes voltadas para o sul. Este agrupamento mais geral pode ser dividido em dois pares de variáveis que relacionam-se mais fechadamente, DECLMDIA e DIMDIO,  $H'$  e FDIMARPE, e, de forma mais independente dentro do grupo, J e RRMDIO.

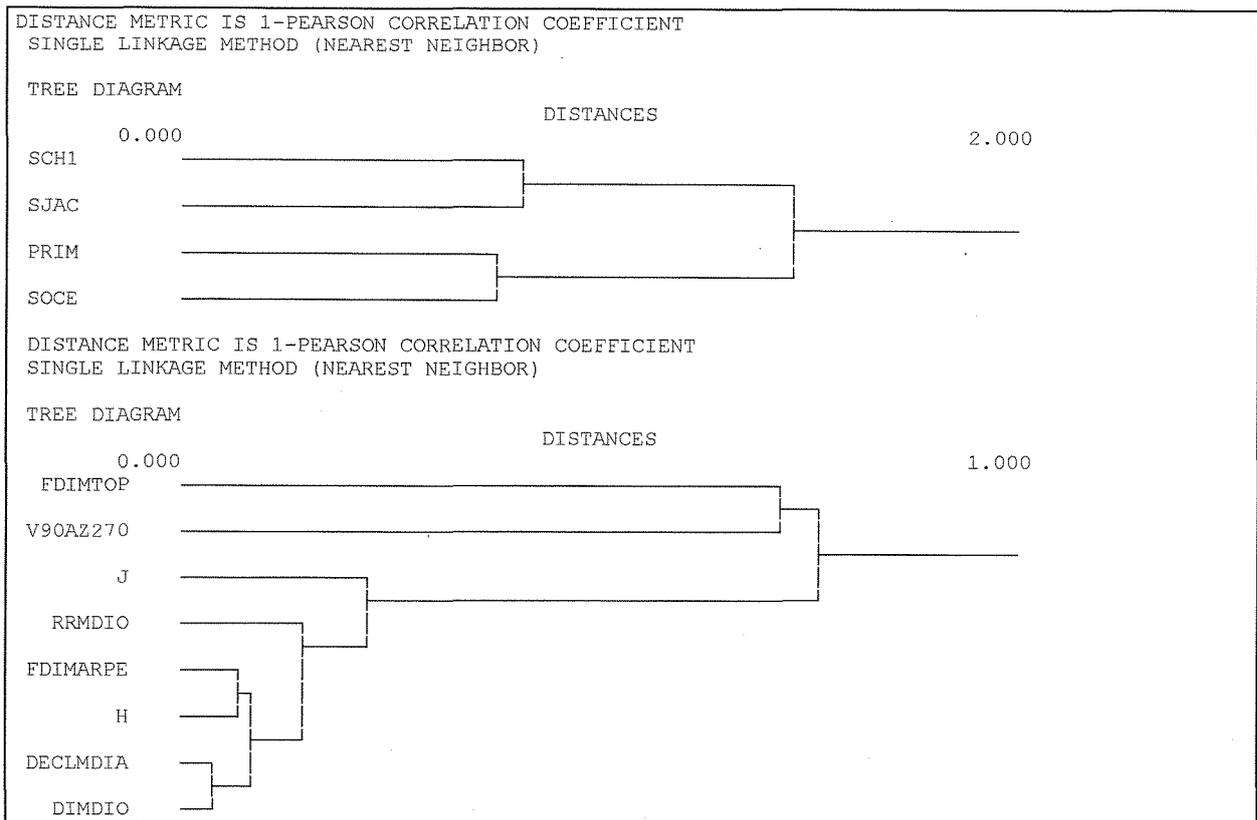


FIGURA 59 - Análise de agrupamentos para os índices da Ecologia de Paisagem. Valores transformados.

A análise de componentes principais (Figura 60) mostra que o agrupamento formado está positivamente relacionado ao primeiro componente, enquanto que FDIMTOP e V90AZ270 estão relacionados negativamente com o primeiro componente. O índice de homogeneidade está fortemente relacionado ao segundo componente. Enquanto que o terceiro componente mostra a variação que diferencia FDIMTOP de V90AZ270 e dá um status independente dentro do agrupamento para RRMDIO.

A relação mais fechada entre a declividade média e a quantidade média de informações em janelas de 3 x 3 células é consistente com o fato de que as microbacias com maior declividade média são as mais fragmentadas, portanto, apresentando a maior probabilidade de que uma janela apresente uma maior e mais equilibrada distribuição de classes de uso e cobertura de solo.

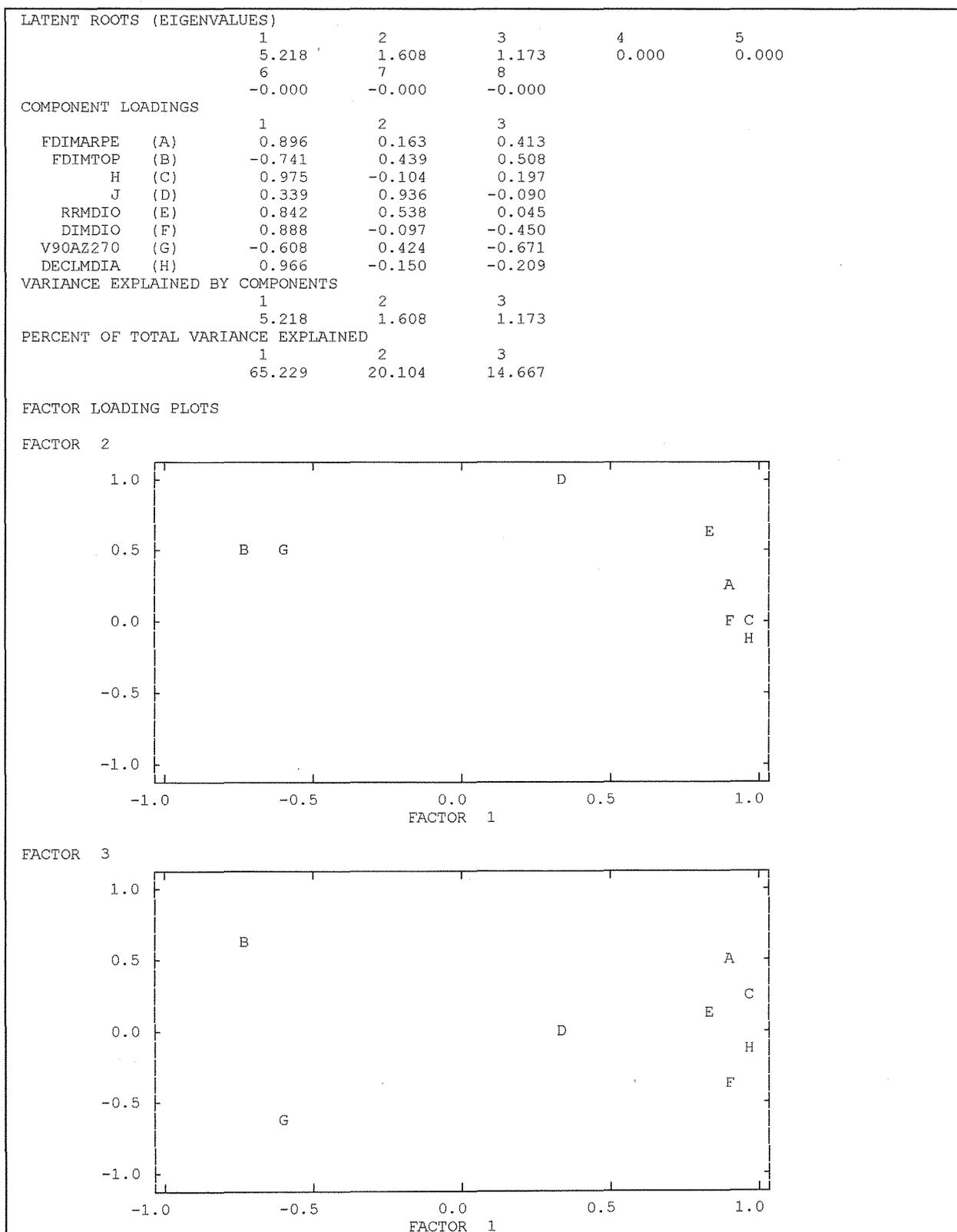


FIGURA 60 - Análise de componentes principais dos índices da Ecologia de Paisagens. Valores transformados.

A relação, entre  $H'$  e a dimensão fractal da estrutura de manchas da paisagem, também é consistente. Quanto mais complexa a interpenetração, como ilhas ou como lobos peninsulares, das diversas classes de uso e cobertura de solo, menos enviesada será a distribuição de probabilidades de que uma amostra pertença a uma determinada classe, o que significa uma incerteza maior, e, portanto, maior conteúdo informativo (MARGALEF, 1957).

Observa-se que o primeiro componente tende a agrupar os índices FDIMTOP e V90AZ270, embora o terceiro componente os separe. Assim, embora não formem um agrupamento, estas variáveis guardam, entre si, alguma relação. Se a hipótese de que uma exposição voltada aos pólos favorece taxas de regressão areolar menores, aumentando a biostasia, então, a relação entre a complexidade do relevo e o percentual de vertentes voltadas para o sul é consistente, pois guardam relação com processos morfológicos diferenciais dentro das bacias.

#### 4.3.2. Índices topográficos x hidrológicos

A relação entre a hidrologia e topografia é sintetizada nas Figuras 61 e 62.

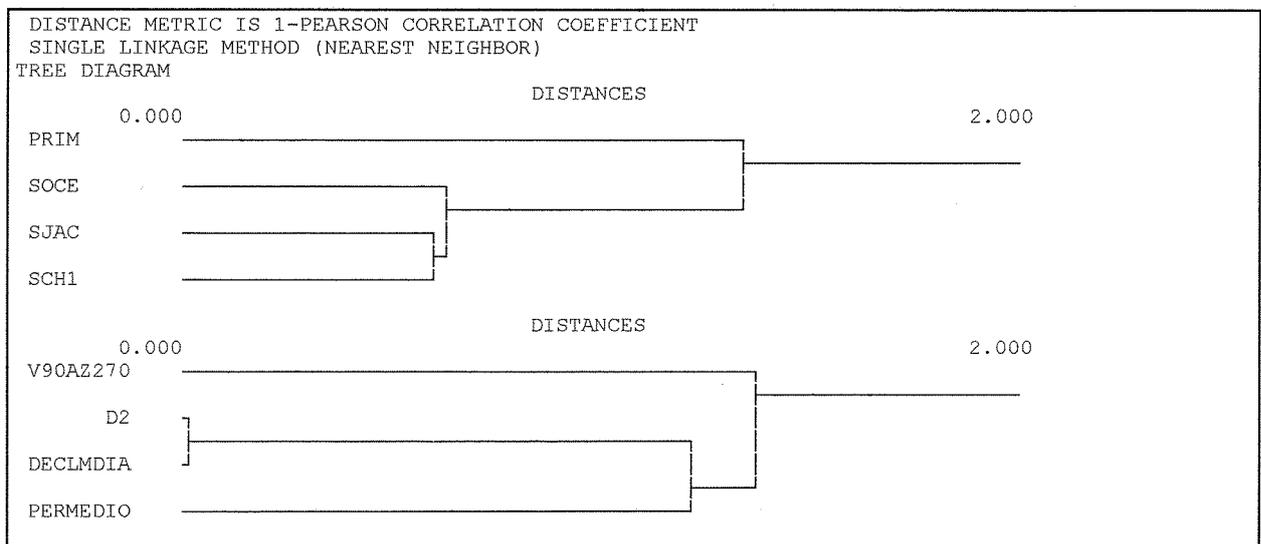


FIGURA 61 - Análise de agrupamentos da relação entre índices topográficos e hidrológicos. Valores transformados.

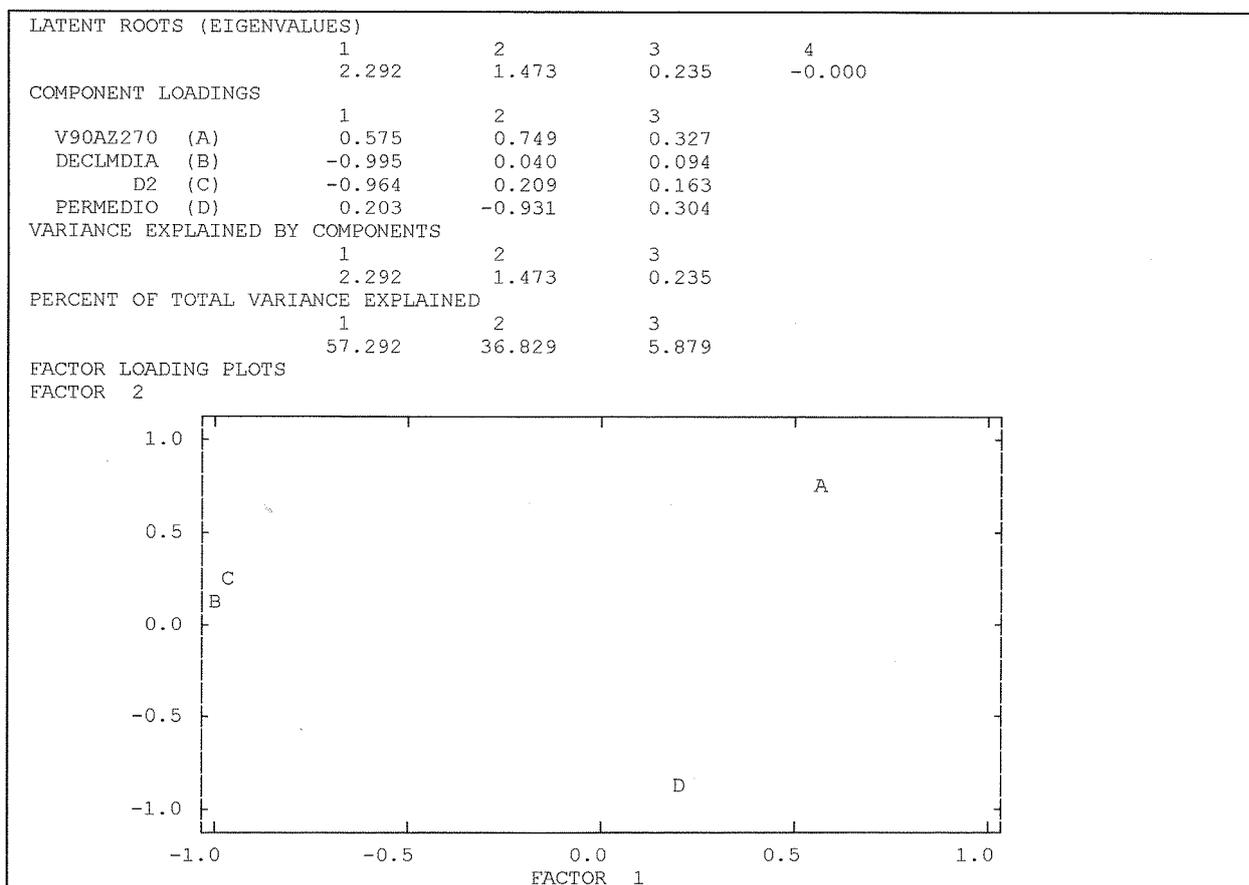


FIGURA 62 - Análise de componentes principais da relação entre índices topográficos e hidrológicos. Valores transformados.

Observa-se que a dimensão de correlação “D<sub>2</sub>” relaciona-se fortemente com a declividade média, apresentando relação inversa muito forte com o primeiro componente. A ordenação apresentada por “D<sub>2</sub>” mostrou-se concordante com a da declividade média. O forte peso da diferença apresentada pela microbacia Primavera quanto ao percentual de vertentes voltadas para o sul, justifica a separação da microbacia Primavera em relação às outras, da mesma forma como inversamente comportou-se perante o período médio da análise espectral. Observa-se que, tanto PERMEDIO quanto V90AZ270, encontram-se relacionados ao segundo componente. Um período médio mais curto implica na vazão baixar mais rapidamente após um evento de chuva, o que guarda relação com a área da bacia, pois espera-se que bacias menores, como a Primavera, possuam um tempo de concentração menor, quando as declividades e formas são iguais, pois o tempo de concentração mede o tempo necessário para que a água precipitada no ponto mais distante da bacia, encontre a seção principal do curso d’água. (TUCCI, 1993).

### 4.3.3. Índices de heterogeneidade x hidrológicos

As Figuras 63 e 64 apresentam as análises de agrupamentos e componentes principais para os valores dos índices de heterogeneidade e hidrológicos.

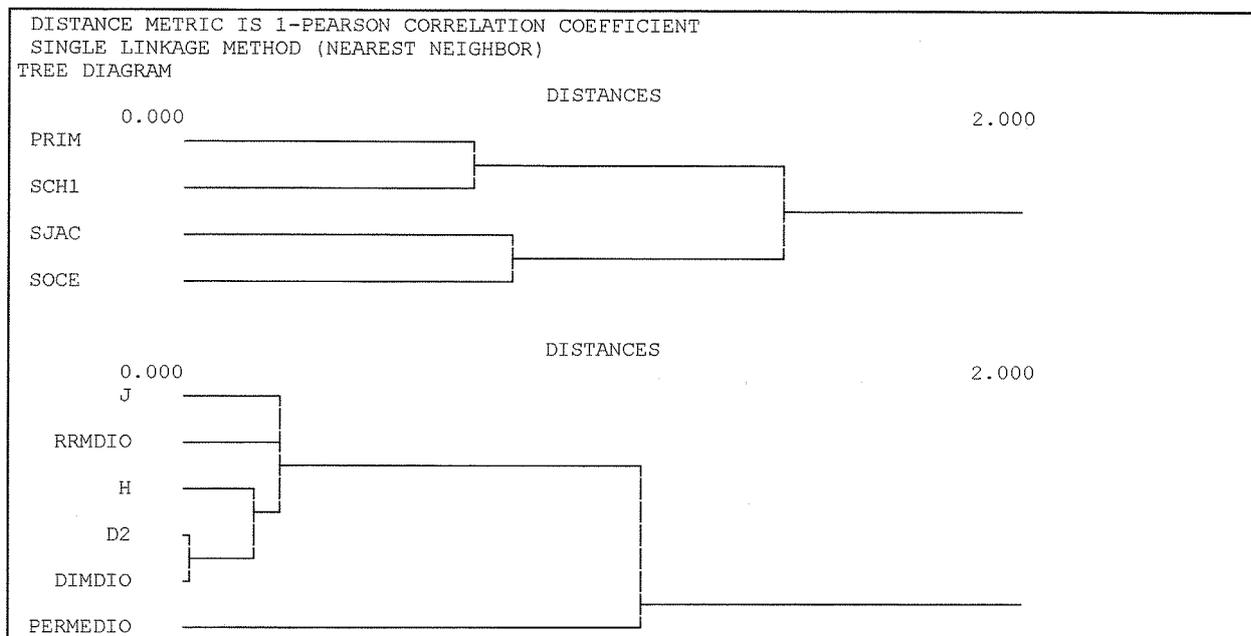


FIGURA 63 - Análise de agrupamentos da relação entre os índices de heterogeneidade e hidrológicos.

Observa-se que as microbacias não se agruparam de acordo com as similaridades com as vizinhas de município. Percebe-se que os agrupamentos refletem as similaridades de acordo com PERMEDIO (ver Tabela 4). As variáveis encontram-se agrupadas de modo muito similar, com exceção do período médio, que não guardou relação significativa com os outros índices. A dimensão de correlação mostrou-se bem relacionada com os índices de quantidade de informação sintática, seja na escala de janelas de 3 x 3 células, como na da microbacia como um todo.

A diferença entre PERMEDIO e o agrupamento das demais está relacionada ao primeiro componente, com o qual tem relação inversa. Já a sub-divisão do agrupamento é relacionada ao

segundo componente, sendo que J e RRMDIO são inversamente relacionados e DIMDIO, H' e D<sub>2</sub> relacionam-se positivamente.

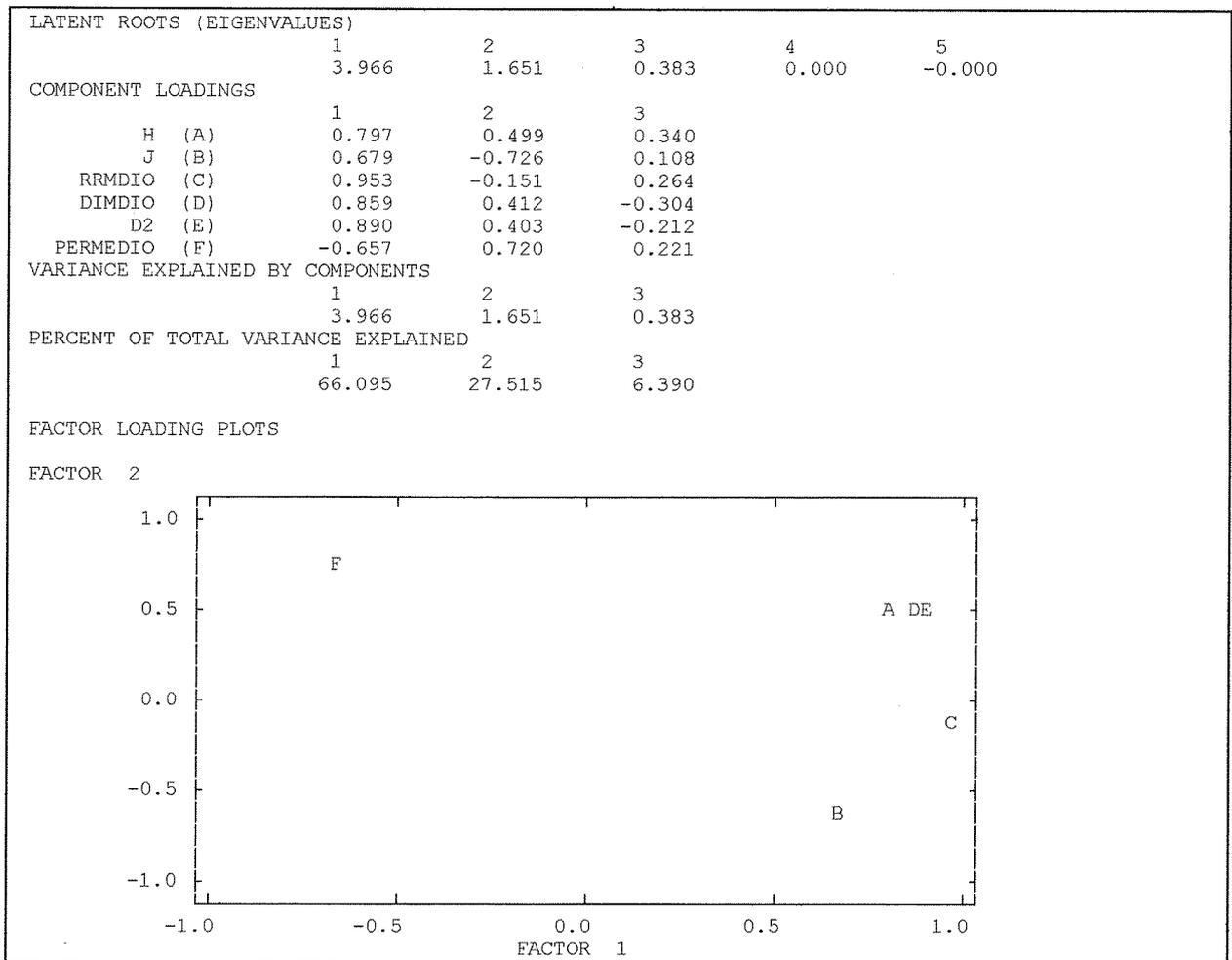


FIGURA 64 - Análise de componentes principais da relação entre os índices de heterogeneidade e hidrológicos. Valores transformados.

#### 4.3.4. Índices de complexidade x hidrológicos

As Figuras 65 e 66 apresentam as análises de agrupamentos e de componentes principais para a relação entre os índices de complexidade e hidrológicos.

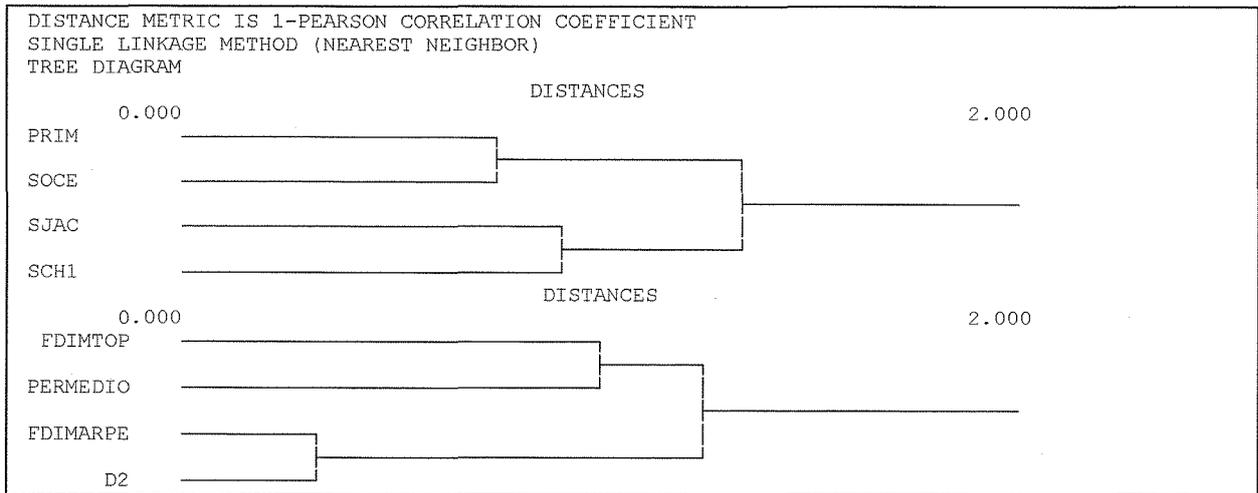


FIGURA 65 - Análise de agrupamentos da relação entre os índices de complexidade da paisagem e hidrológicos. Valores transformados.

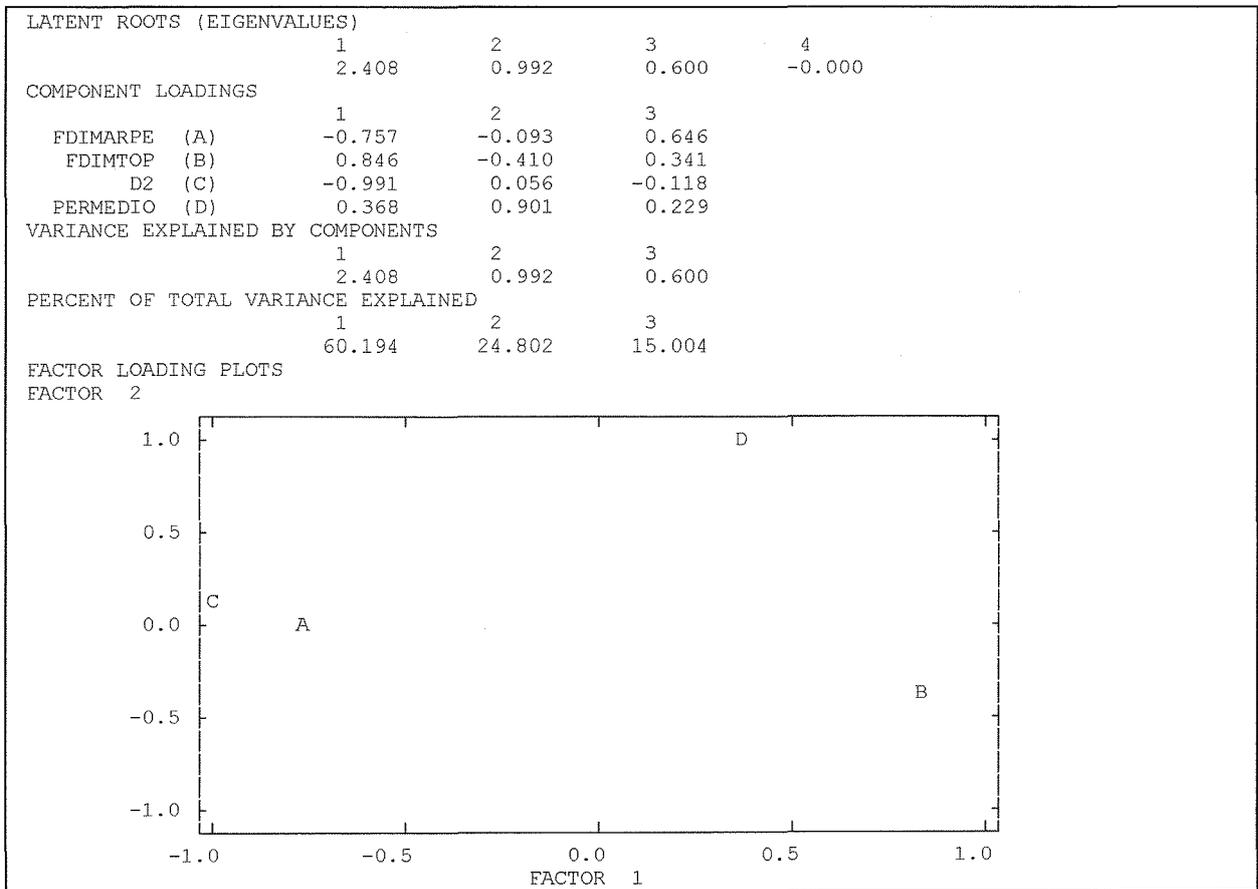


FIGURA 66 - Análise de componentes principais da relação entre os índices de complexidade da paisagem e hidrológicos. Valores transformados.

No seu conjunto, os índices discriminaram entre os municípios e entre as bacias, como mostra o diagrama de árvore. Maior similaridade é manifestada pelo grupo formado pelos índices de complexidade da estrutura de manchas (FDIMARPE) e a dimensão de correlação das vazões ( $D_2$ ), que resulta muito significativa para os objetivos deste trabalho. Observa-se que estes índices estão inversamente relacionados com o primeiro componente, enquanto que FDIMTOP está relacionado positivamente. Já PERMEDIO encontra-se mais relacionado, positivamente, ao segundo componente.

#### 4.3.5. Índices da Ecologia de Paisagem x hidrológicos

As Figuras 67 e 68 apresentam a análise de agrupamentos e de componentes principais para o conjunto dos índices estudados nos três itens acima.

Os resultados mostram a formação de um agrupamento significativo que inclui os índices relacionados positivamente com o primeiro componente: DECLMDIA, FDIMARPE,  $H'$ ,  $D_2$ , DIMDIO e RRMDIO. Já FDIMTOP relaciona-se negativamente. J, PERMEDIO e V90AZ270 apresentam relação mais pronunciada com o segundo componente, respectivamente de modo inverso, direto e inverso.

Estes resultados, no seu conjunto, demonstram sensibilidade para diferenças tanto na escala entre quanto intra municípios de Santa Maria e Sapiranga, como demonstra o diagrama de árvore das microbacias. Observa-se que a complexidade das vazões guarda relação muito estreita com os índices de diversidade, tanto na escala de janelas de 3 x 3 células, como na das bacias inteiras, bem como com a declividade média e o índice de complexidade da estrutura de manchas da paisagem.

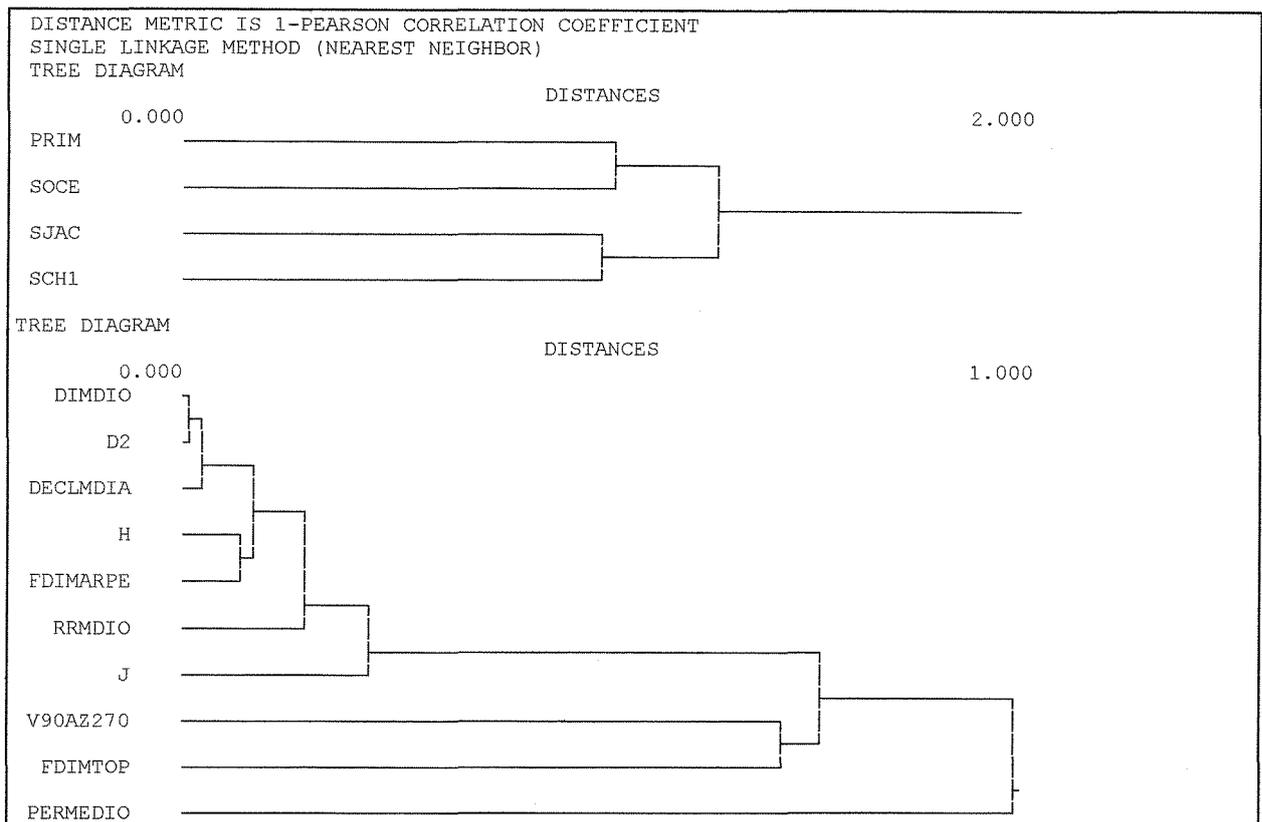


FIGURA 67 - Análise de agrupamentos para os índices da Ecologia de Paisagens e hidrológicos.  
 Valores transformados.

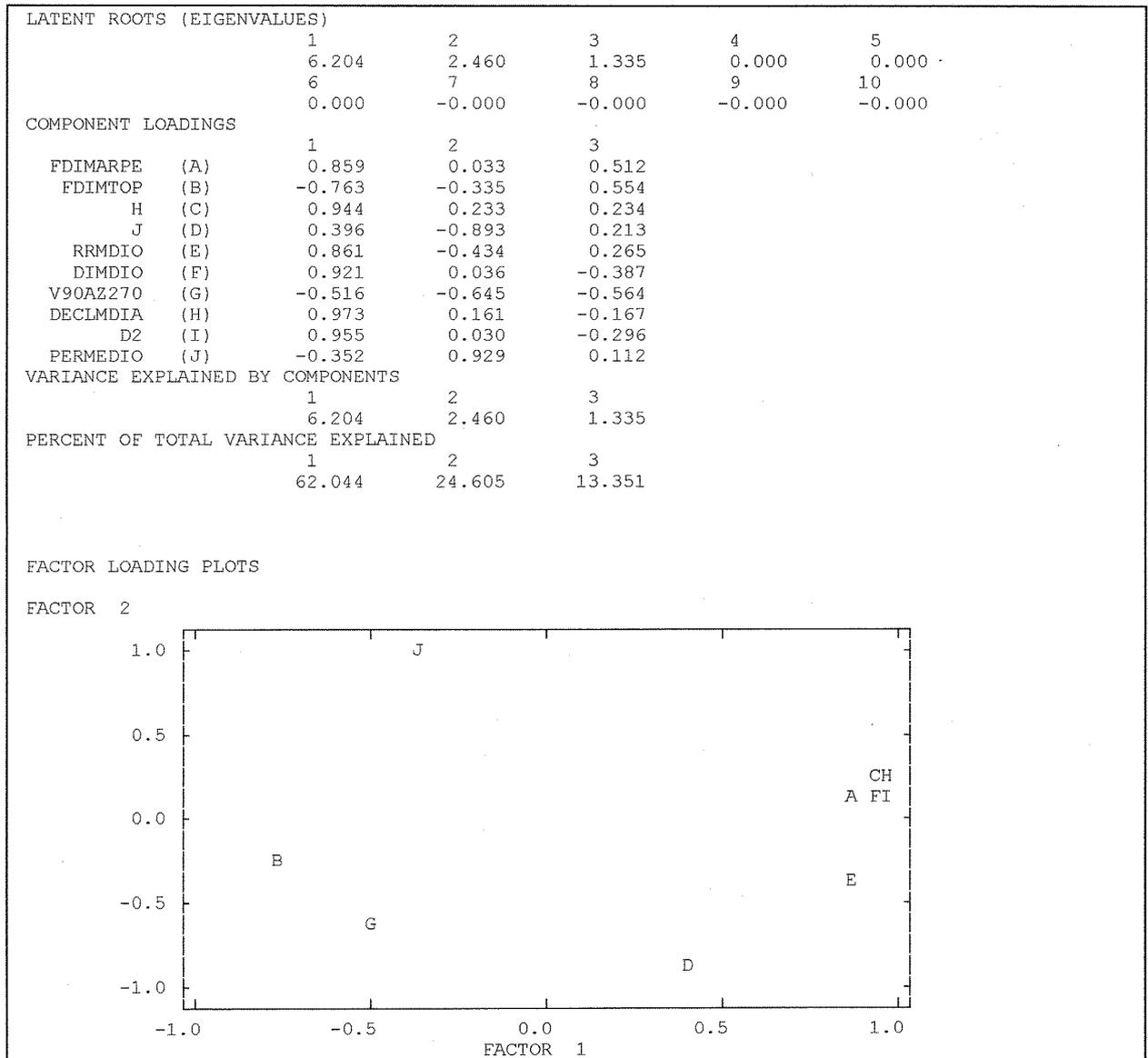


FIGURA 68 - Análise de componentes principais da relação entre os índices da Ecologia de Paisagens e hidrológicos. Valores transformados.

## 5. DISCUSSÃO

Um aspecto importante a ser ressaltado neste trabalho, refere-se ao pequeno tamanho amostral abrangido, apenas quatro microbacias. Desta forma, os resultados não podem ser considerados conclusivos, mas expressam tendências que devem ser posteriormente investigadas sobre um conjunto amostral mais significativo, o que é possível, já que a abrangência das microbacias monitoradas pelo Projeto “Borrachudo”, envolve cerca de 140 calhas instaladas em municípios situados nas encostas do Planalto basáltico e da Serra do Sudeste (SILVEIRA et al., 1995), configurando, assim, um universo amostral bem mais diversificado em termos paisagísticos.

A análise da dinâmica das séries temporais de vazões, através da análise espectral e do cálculo da complexidade do espaço de fase, permitiu perceber que as vazões de estiagem comportam-se de modo estocástico, não possuindo comportamento caótico, mas apresentando complexidade e período médio diferentes. Este fato tem importância para o processo de modelagem das vazões de estiagem, pois os processos estocásticos possuem propriedades estatísticas bem estudadas (SVESHNIKOV, 1968; DHRYMES, 1974, SALAS et al., 1980) mesmo quando se tratam de sistemas não-lineares (TONG, 1990). No entanto, GUTIERREZ & ALMIRALL (1989), atribuem as propriedades caóticas ao decaimento assintótico da estrutura temporal do espectro de potência, tendo utilizado o mesmo algoritmo para cálculo da dimensão de correlação deste trabalho. Utilizando-se este critério, a dinâmica verificada na análise espectral das séries de vazões de estiagem seria caótica, embora o algoritmo para cálculo do maior coeficiente de Lyapunov tenha resultado na não existência de expoente positivo. Desta forma, os resultados não permitem afirmar o caráter caótico ou não destas séries temporais. É possível que o desempenho do algoritmo para cálculo do maior coeficiente de Lyapunov do software MTRCHAOS tenha tido sua sensibilidade afetada pelo processo de interpolação utilizado.

Uma limitação importante refere-se à qualidade das séries temporais obtidas neste trabalho. Como as calhas possuem um limite superior, a partir do qual elas extravasam, a atribuição de um valor arbitrário para significar extravasamento, neste caso, de 1,0 m<sup>3</sup>/s, igual para todas as microbacias, implica em que os resultados obtidos da dimensão de correlação somente podem ser comparados no âmbito deste trabalho. Valores de “D<sub>2</sub>” obtidos para outras séries não são comparáveis. No entanto, o efeito da diferença deste valor arbitrário para a média das vazões de estiagem para microbacias com médias muito diferentes, como SOCEPE e Primavera, é desconhecido, sendo necessários estudos mais aprofundados do ponto de vista teórico.

Consideradas estas limitações, os resultados demonstram que existem diferenças na complexidade das séries temporais, e que estas encontram relação com diversos índices da estrutura das paisagens. Assim foi com a declividade média, com o índice de Shannon-Weaver, calculado para as microbacias inteiras e para a média dos valores centrais de cada janela de 3 x 3 células, bem como para a dimensão fractal da relação área-perímetro, que é uma medida da complexidade da paisagem.

Estas relações exigem cuidado na sua interpretação, tanto em função do tamanho da amostra, como em função dos métodos de análise multivariada empregados. Vários trabalhos tem demonstrado como estes métodos podem apresentar resultados inconsistentes, como apresentar relação entre fenômenos completamente desconectados funcionalmente (REXSTAD et al., 1988), ou não distinguir entre agrupamentos de dados gerados ao acaso, respeitadas as médias e variâncias dos dados de campo (GROSSMAN et al., 1991). GROSSMAN et al. (op cit.), trabalhando com dados de associações, verificaram que a análise de componentes principais, quando utilizada a matriz de correlação, foi capaz de perceber padrões nas associações de espécies. Como a análise de componentes principais é sensível às unidades de medida empregadas, a utilização da matriz de correlação implica na utilização de valores padronizados, que resolve este problema, mas que exige o cuidado de interpretar os resultados em termos de seus valores transformados (DHRYMES, 1974).

Assim, as relações apresentadas na análise multivariada não podem ser aceitas sem o necessário criticismo. Elas devem apresentar consistência com a análise conceitual do sistema bacia hidrográfica.

As relações supra citadas, enquanto tendências, são consistentes com uma visão sistêmica das bacias hidrográficas.

Assim, a complexidade das vazões mostrou-se diretamente relacionada com a declividade média. Espera-se que quanto maior a declividade média de uma bacia, menor o tempo médio de permanência de uma molécula de água dentro da bacia (GUERRA, 1994), resultando em um hidrograma com formas menos tamponadas (TUCCI, 1993), portanto, com menor regularização, o que resulta em maior heterogeneidade, a qual está relacionada à dimensão de correlação.

A quantidade de informação sintática da paisagem, expressa nos índices de diversidade, tanto quando consideramos a bacia inteira, quanto a média dos valores calculados para janelas móveis, expressa a incerteza de que uma determinada célula pertença a uma das classes empregadas na descrição da estrutura de manchas da paisagem (MARGALEF, 1957). Espera-se que uma gota de água da chuva, caindo sobre a bacia, terá um destino que será relacionado ao tipo de cobertura e uso de solo. Se a estrutura de manchas é homogênea, composta por manchas de ecossistemas naturais, com vegetação bem desenvolvida, primária, esperamos que os componentes verticais se sobreponham aos horizontais (biostasia) resultando em um hidrograma mais amortecido em comparação com uma bacia homogênea resistática de mesma área e declividade média. Como a estrutura é, geralmente, heterogênea, com cada tipo de mancha inserindo-se em posição intermediária em um espectro bio-resistasia, cada gota de água de chuva terá um destino com incerteza proporcional ao índice de diversidade da paisagem. Como o destino da gota em cada tipo de mancha, quando ocorre escoamento superficial, apresenta probabilidades diferentes entre infiltração, evapotranspiração e escoamento, quanto mais heterogênea a bacia, mais heterogêneo será o hidrograma, resultando em uma maior dimensão de correlação.

Neste estudo, observou-se que esta relação foi mais consistente para a diversidade estimada a partir das janelas móveis do que para o índice calculado para a bacia inteira. Provavelmente, isto deve-se à que o método das janelas móveis é mais sensível à variações no componente de equidade do índice em pequenos espaços. Assim, quanto mais fragmentada, mais variadas serão as probabilidades de uma determinada molécula entrar para um dos compartimentos do ciclo hidrológico.

A dimensão fractal, da relação área-perímetro, guarda relação com o grau como se complexifica as formas das manchas a medida que elas crescem, considerada toda a bacia (MILNE, 1991). Assim, a medida que as manchas crescem, elas crescem de forma diferencial em várias direções, emitindo penínsulas, lobos de todos os tipos. Quanto mais diferencial, mais complicado o perímetro, aumentando a relação perímetro/área. Por outro lado, a irregularidade das formas pode ser devida a probabilidades diferenciais de propagação de distúrbios, os quais podem ser naturais ou de origem humana, controlados ou não (FORMAN & GODRON, 1986). Assim, quanto mais irregular as formas, mais interpenetradas as manchas, aumentando a heterogeneidade de uma janela escolhida ao acaso. O comportamento assim, guarda relação com a discussão supra sobre heterogeneidade.

Tanto a heterogeneidade, quanto a complexidade, guardam relação com a forma como a paisagem muda com o tempo. Se uma paisagem, no passado, era homogênea, como por exemplo, a mata da fralda da serra, a heterogeneidade deveria ser encontrada na dinâmica interna da floresta (estrutura de eco-unidades; TORQUEBIAU, 1986). Assim, todo o processo de construção da heterogeneidade, ou seja, da fragmentação da matriz florestal, deve ser remetido à história da ocupação humana.

Os processos que determinam a heterogeneidade da paisagem, são o produto espacial do trabalho, categoria que significa a interação entre sociedade e natureza (CASSETI, 1991; MORAES & COSTA, 1993), sendo um sistema complexo que se autorganiza, mudando de estado de acordo com a flecha do tempo, irreversivelmente. Assim, a heterogeneidade é a contraparte espacial da história.

A fragmentação da paisagem é relacionada à estrutura fundiária (LOCH, 1990) e, portanto, com a história da apropriação da terra, que está relacionada à história da colonização, bem como à cultura das populações que desbravaram a mata. Como vimos, a matriz na região de encostas de Sapiranga, é uma matriz de mata secundária, já na região de Itaara, Santa Maria, é mato aberto, em equilíbrio ecotonal com campo sujo. De acordo com FORMAN & GODRON (1986), a matriz controla a maior parte dos fluxos na paisagem. Quanto maior a intensidade dos distúrbios, maior a taxa de redistribuição de materiais entre matriz e manchas, e quanto maior a biomassa, maior a resistência ao distúrbio (estabilidade). FORMAN & GODRON (op cit.) também citam que a heterogeneidade aumenta com distúrbios médios, mas que há uma bifurcação na presença de distúrbio severo: ou continua crescendo ou cai bruscamente.

A paisagem das encostas de Sapiranga, provavelmente, encontra-se em um estado meta-estável, onde o “turnover” das práticas coloniais do passado foi gradativamente cedendo para uma prática menos intensiva em área, fruto do esgotamento dos solos nas áreas mais declivosas e da redistribuição dos colonos com o avanço sobre o Alto-Uruguai, que resultou na mudança da matriz de mata primária para secundária. As poucas áreas, que formavam uma franja nas abas dos degraus da encosta, que teriam escapado da lavoura (RAMBO, 1994), provavelmente tornaram-se secundárias pelo desmatamento seletivo para obtenção de madeiras nobres e de lenha. Hoje, com a introdução do reflorestamento, o “turnover” é reduzido, dado o ciclo mais longo da cultura.

Já a paisagem, das microbacias de Santa Maria, reflete uma história fundiária diferente. Situada no ecótono entre a mata da fralda da serra e os campos do planalto, a propriedade da terra, ali, é herança das concessões de sesmarias, anterior a colonização teuta. Lindman cita, em 1883, que subindo a encosta, próximo a Santa Maria, logo que se chegava ao topo, havia uma transição brusca da mata da fralda para campo subarbustivo, entremeado com matas galerias (LINDMAN & FERRI, 1974). Já RAMBO (1994), sustenta que a mata, sem influência humana, tende a ocupar a região dos campos. Assim, embora a natureza tenda a uma matriz de mata, a paisagem, enquanto expressão cultural, tende a uma matriz de equilíbrio entre campo sujo e ambiente florestal aberto de todos os tipos. A menor

heterogeneidade é, pois, coerente com a estrutura fundiária menos fragmentada, e com a presença da pecuária extensiva. É provável que a paisagem encontre-se em um estado meta-estável, porém mais sensível do que as de Sapiranga, já que a estabilidade é mais baixa (menor biomassa), podendo, este estado, modificar-se com um reacomodamento da atividade econômica, tendendo mais para campo, reflorestamento ou culturas anuais.

Os resultados obtidos tendem à sustentação da tese de que a informação, presente nas estruturas da paisagem, possa ser usada para reconstruir o passado e refletir a energia usada e degradada. *“No intercâmbio de matéria e energia, os sistemas biológicos adquirem informação, isto é, estruturas, diferenças ou complexidades locais, que influenciam respostas posteriores (memória)”* (GUTIERREZ & ALMIRALL, 1989).

Deste ponto de vista, pode-se, portanto, questionar a validade do tratamento do conceito de vazão mínima de proteção ambiental a partir de abordagens tipo  $Q_{7,10}$ . Existe uma relação entre a complexidade das vazões e a memória informativa dos ecossistemas à jusante, que condiciona o devir da sucessão, afetando, assim, a capacidade de auto-organização dos sistemas ribeirinhos e de áreas úmidas, para os quais estas vazões são uma das principais funções de força do sistema.

Pode-se conceber uma metodologia para definição de vazão de proteção ambiental da seguinte forma:

a) Construir um modelo que estabeleça uma relação quantitativa entre complexidade da estrutura da paisagem e das vazões. Isto é possível se trabalhos como este forem repetidos para um número significativo e representativo de pequenas bacias hidrográficas.

b) Construir um modelo ideal da estrutura da paisagem, ou seja, onde o padrão existente seja corrigido, em um sistema de informações geográficas, de acordo com a legislação ambiental, por exemplo, perímetro de proteção de nascentes, largura mínima da mata ciliar, adequação das culturas à capacidade de uso dos solos. Isto é necessário, pois desejamos um compromisso entre exploração e conservação. Se o parâmetro fosse a

natureza intocada, dever-se-ia trabalhar com uma matriz homogênea, onde seria expressa a cobertura vegetal original.

c) Obter índices quantitativos da complexidade da paisagem ideal.

d) Voltar ao modelo obtido em “a” e obter o valor da complexidade desejada para as vazões de estiagem.

e) Obter modelo matemático que simule as vazões de estiagem de acordo com a complexidade desejada.

De posse do modelo desejado, poderão ser avaliadas as vazões em termos do que está disponível ou não para cotização entre usuários.

Como a vazão mínima de proteção ambiental será variável, os modelos atuais de obras hidráulicas, que tendem a regularizar as vazões, deverão ser revistos, de modo que possam reproduzir uma complexidade desejada. Ou seja, esta nova abordagem implica no desenvolvimento de novas tecnologias, orientadas de acordo com o princípio das tecnologias adaptadas ou adequadas (SACHS, 1986).

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando as limitações impostas pelo pequeno número de bacias estudadas, pode-se afirmar que os resultados demonstram as seguintes tendências, as quais deverão ser tomadas como hipóteses para trabalhos mais representativos:

a) Existe uma forte relação entre a dimensão de correlação das séries de vazões de estiagem, que expressa a complexidade das vazões, e os índices de morfologia (declividade média), heterogeneidade (índices de diversidade de Shannon-Weaver calculados para a bacia inteira e média de janelas móveis de 3 x 3 células) e complexidade (dimensão fractal da relação área-perímetro) das bacias hidrográficas.

b) Os padrões da estrutura da paisagem podem ser bem representados por poucos parâmetros, facilmente obtidos com uso de imagens de satélite e sistema de informações geográficas: declividade média, porcentagem de vertentes voltadas para o sul e dimensão fractal da topografia (morfologia); índices de diversidade de Shannon-Weaver para bacia inteira e média de janelas móveis, índice de homogeneidade, riqueza relativa média de janelas móveis e dimensão fractal da relação área-perímetro (heterogeneidade), sendo que considera-se como medidas da complexidade as duas dimensões fractais.

Algumas considerações devem ser feitas a respeito dos métodos utilizados:

c) A interferência, dos processos de interpolação das séries de vazões de estiagem para extravasamento, no software MTRCHAOS, para estimação do maior expoente de Lyapunov, deve ser investigada de forma aprofundada.

d) Deve-se desenvolver um índice que caracterize a distribuição de direções de escoamento dentro de uma bacia hidrográfica.

e) Deve-se estudar a interferência do tamanho das resoluções extremas em relação à dimensão fractal de bacias com áreas muito diferentes.

f) A abordagem utilizada, que relaciona complexidade da estrutura da paisagem com complexidade das vazões de estiagem, através da geometria fractal, pode ser útil para o desenvolvimento de um modelo que defina vazão mínima de preservação ambiental.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRAHAM, N.B. et al. Calculating the Dimension of Attractors from Small Data Sets. *Physics Letters*, v.114A., n.5., p. 217-221, feb., 1986.
2. BONI, L.A. de. *A Itália e o Rio Grande do Sul IV: Relatório de Autoridades Italianas sobre a Colonização em Terras Gaúchas*. Caxias do Sul: Ed. da Universidade de Caxias do Sul, 1983. 60 p.
3. BRASIL. *Constituição: República Federativa do Brasil*. Brasília: Senado Federal, Centro Gráfico, 1988. 292 p.
4. CASSETI, V. *Ambiente e Apropriação do Relevo*. São Paulo: Contexto, 1991. 147 p.
5. CHRISTOFOLLETTI, A. Condicionantes Geomorfológicos e Hidrológicos aos Programas de Desenvolvimento. In: TAUKE, S.M.; GOBBI, N. & FOWLER, H.G. (org.) *Análise Ambiental: Uma Visão Multidisciplinar*. São Paulo: Ed. UNESP, 1991. p. 82-84.
6. COELHO NETTO, A.L. Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia. In: GUERRA, A.J.T. & CUNHA, S.B. da (org.) *Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994. Cap. 3, p. 93-148.
7. CORSAN. Companhia Riograndense de Saneamento. *Estudo de Concepção de Ampliação dos Sistemas de Abastecimento de Água para as Cidades de Júlio de Castilhos e Tupanciretã/RS. Estudos Hidrológicos - Volume II: Avaliação Hídrica das Alternativas de Captação*. Porto Alegre: CORSAN, INCORP, 1992. 64 p. (Relatório).
8. CORSON-RIKERT, J. *Roots: User's Manual. Draft 03/02/90*. Washington: Conservation International, 1990. 152 p.
9. DANILEVICZ, E. *Estrutura da Comunidade Vegetal e Correlações com Fatores Ambientais em uma Mancha Remanescente de Mata no Morro do Pinhal - Parobé - RS*. Porto Alegre: Curso de Pós-Graduação em Ecologia/ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992. 76 p. (Dissert., Mestrado em Ecologia).

10. DANILEVICZ, E. & PORTO, M.L. *Ecologia de Paisagens: Meio de Preservação e Utilização Racional*. Porto Alegre: Centro de Ecologia/ Instituto de Biociências/ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1990. s.p. (folheto).
11. DHRYMES, P.J. *Econometrics: Statistical Foundations and Applications*. 2.impr. rev. New York: Springer-Verlag, 1974. 592 p.
12. EASTMAN, J.R. *IDRISI Version 4.0: User's Guide*. Worcester: Clark University, 1992a. 178 p.
13. EASTMAN, J.R. *IDRISI Version 4.0: Technical Reference*. Worcester: Clark University, 1992b. 213 p.
14. EASTMAN, J.R. *IDRISI Version 4.1: Update Manual*. Worcester: Clark University, 1993. 213 p.
15. FORMAN, R.T.T. & GODRON, M. *Landscape Ecology*. New York: John Wiley & Sons, 1986. 619 p.
16. GARCIA, M. *Estudos Hidrológicos para a Dosificação do Bacillus thuringiensis no combate ao Simulídeo (Borrachudo): Relatório de Bolsa de Pesquisa FAPERGS*. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1993. 27 p. (Relatório).
17. GASPARETO, N.V.L. et al. *Mapa Geológico da Folha Santa Maria*. Santa Maria: UFSM/FINEP, 1988. s.p.
18. GRASSBERGER, P. & PROCACCIA, I. Characterization of Strange Attractors. *Physical Review Letters*, v.50., n.5., p. 346-349, jan., 1983a.
19. GRASSBERGER, P. & PROCACCIA, I. Measuring the Strangeness os Strange Attractors. *Physica D*, v.9., p.189-208, 1983b.
20. GROSSMAN, G.D.; NICKERSON, D.M. & FREEMAN, M.C. Principal Component Analyses of Assemblage Structure Data: Utility of Tests based on Eigenvalues. *Ecology*, v.72., n.1., p. 341-347, 1991.
21. GUERRA, A.J.T. Processos Erosivos nas Encostas. In: GUERRA, A.J.T. & CUNHA, S.B. da (org.) *Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994. Cap. 4, p. 149-209.
22. GUTIERREZ, E. & ALMIRALL, H. Temporal Properties of some Biological Systems and their Fractal Attractors. *Bulletin of mathematical Biology*, v.51., n.6., p. 785-800, 1989.

23. HÖRMEYER, J. *O Rio Grande do Sul de 1850: Descrição da Província do Rio Grande do Sul no Brasil Meridional*. Porto Alegre: D.C. Luzzatto Ed./ EDUNI-SUL, 1986. 126 p. (Original alemão, Coblenza, 1854).
24. IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim: Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação, Uso Potencial da Terra*. Rio de Janeiro: IBGE, 1986. 796 p., 6 mapas. (Levantamento de Recursos Naturais, v.33).
25. KAPITANIAK, T. *Chaos in Systems with Noise*. Singapore: World Scientific, 1988. 130 p.
26. KAUFFMAN, S.A. Antichaos and Adaptation. *Scientific American*, New York, v.265., n.2., p. 64-70, aug., 1991.
27. LANDAU, E.C. *Ecologia de Paisagem da Região do Vale do Rio dos Sinos - Santa Cristina do Pinhal, Parobé/RS em Bases Fitossociológicas e de Geoprocessamento*. Porto Alegre: Curso de Pós-Graduação em Ecologia/ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994. 116 p. (Dissert., Mestrado em Ecologia).
28. LANNA, A. E. Gestão dos Recursos Hídricos. In: TUCCI, C.E.M. (org.) *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Ed. da Universidade, ABRH, EDUSP, 1993. Cap. 19, p. 727-768.
29. LINDMAN, C.A.M. & FERRI, M.G. *A Vegetação no Rio Grande do Sul*. São Paulo: Ed. Itatiaia/ Ed. da Universidade de São Paulo, 1974. 378 p.
30. LOCH, C. *Monitoramento Global Integrado de Propriedades Rurais (a nível municipal, utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto)*. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1990. 136 p.
31. MANDELBROT, B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. ed. rev. aum. New York: W. H. Freeman and Co., 1983. 468 p.
32. MANDELBROT, B.B. *Les Objets Fractals: Forme, Hasard et Dimension*. 30.ed. rev. aum. Paris: Flammarion, 1989. 268 p.
33. MANDELBROT, B.B. Fractals - A Geometry of Nature. In: HALL, N. (ed.) *The New Scientist Guide to Chaos*. London: Penguin Books, 1991. Cap. 10, p. 122-135.
34. MARGALEF, R. La Teoría de la Información en Ecología. *Mem. Real Acad. Ciencias y Artes de Barcelona*, Barcelona, v.32, n.13, 373-449, nov., 1957.
35. MARGALEF, R. *Ecología*. 2.ed. Barcelona: Ed. Omega, 1977. 951 p.

36. MILNE, B.T. Measuring the Fractal Geometry of Landscapes. *Applied Math. and Comp.*, New York, v.27, p. 67-79, 1988.
37. MILNE, B.T. Lessons from Applying Fractal Models to Landscape Patterns. In: TURNER, M.G. & GARDNER, R.H. (ed.) *Quantitative Methods in Landscape Ecology: The Analysis and Interpretation of Landscape Heterogeneity*. New York: Springer-Verlag, 1991. Cap. 9. p. 199-235.
38. MORAES, A.C.R. & COSTA, W.M.da. *Geografia Crítica: A Valorização do Espaço*. 3.ed. São Paulo: HUCITEC, 1993. 196 p.
39. MORIN, E. *Ciência com Consciência*. Mem Martins: Publ. Europa-América, 1982. 255 p. (Original francês).
40. NAVEH, Z. & LIEBERMAN, A.S. *Landscape Ecology: Theory and Application*. New York: Springer-Verlag, 1984. 356 p.
41. ODUM, E.P. *Fundamentos de Ecologia*. 4.ed. Lisboa: Fund. Calouste Gulbekian, 1988. 927 p. (Original inglês).
42. PORTO, M.L. *Sistemas de Informações Geográficas - Ecologia em uma Área em Santa cristina do Pinhal, Vale do Rio dos Sinos, RS, Brasil*. Freising: Lehrgebiet Geobotanik der Technischen Universität, 1988. 23 p.
43. RAMBO, B. *A Fisionomia do Rio Grande do Sul*. 3.ed. São Leopoldo: Ed. UNISINOS, 1994. 473 p.
44. REITZ, R.; KLEIN, R.M. & REIS, A. *Projeto Madeira do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento, 1988. 525 p.
45. REXSTAD, E.A. et al. Questionable Multivariate Statistical Inference in Wildlife Habitat and Community Studies. *J. Wildl. Manage.*, v.52., n.4., p. 794-798, 1988.
46. ROSENSTEIN, M.T.; COLLINS, J.J. & De LUCA, C.J. A practical Method for Calculating Largest Lyapunov Exponents from Small Data Sets. *Physica D*, v.65., p.117-134, 1993.
47. ROSENSTEIN, M.T.; COLLINS, J.J. & De LUCA, C.J. Reconstruction Expansion as a Geometry-based Framework for Choosing Proper Delay Times. *Physica D*, v.73., p. 82-98, 1994.
48. SACHS, I. *Ecodesenvolvimento: Crescer sem Destruir*. São Paulo: Vértice, 1986. 207 p.

49. SAINT-HILAIRE, A. de. *Viagem ao Rio Grande do Sul*. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1974. 215 p. (Original francês, Orléans, 1887).
50. SALAS, J.D. et al. *Applied modeling of Hidrologic Time Series*. Littleton: Water Resources Publ., 1980. 484 p.
51. SCHÄFER, A. *Fundamentos de Ecologia e Biogeografia das águas Continentais*. Porto Alegre: Ed. da Universidade/GTZ, 1985. 532 p.
52. SELLERS, W. D. *Physical Climatology*. Chicago: The University of Chicago Press, 1965. 272 p.
53. SILVA, J.X. da. Geomorfologia e Geoprocessamento. In: GUERRA, A.J.T. & CUNHA, S.B. da (org.) *Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994. Cap. 10, p. 393-414.
54. SILVEIRA, G.L. da (coord.) et al. *Projeto Rio Santa Maria - Sistema de Avaliação de Disponibilidades Hídricas Fluviais para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria: Relatório do Projeto*. Porto Alegre: SPO/CRH, UFSM/FATEC, 1993. 112 p. (Relatório).
55. SILVEIRA, G.L. da et al. Informações Hidrológicas em Pequenas Bacias Hidrográficas Rurais. *A Água em Revista*, Belo Horizonte, 1995. (No prelo).
56. SPIEGEL, M.R. *Estatística*. São Paulo: McGraw-Hill, 1977. 580 p. (Original inglês).
57. SUGUIO, K. & BIGARELLA, J.J. *Ambientes Fluviais*. 2.ed. rev. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1990. 183 p.
58. SVESHNIKOV, A.A. *Problems in Probability Theory, Mathematical Statistics and Theory of Random Functions*. New York: Dover Publ., 1968. 481 p. (Original russo).
59. TONG, H. *Non-Linear Time Series: A Dynamical System Approach*. Oxford: Oxford University Press, 1990. 564 p.
60. TORQUEBIAU, E.F. Mosaic Patterns in Dipterocarp Rain Forest in Indonesia, and their Implications for Practical Forestry. *Journal of Tropical Ecology*, v.2., p. 301-325, 1986.
61. TUCCI, C.E.M. (org.) *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Ed. da Universidade/ EDUSP/ ABRH, 1993. 943 p. Cap. 11, p. 391-441.
62. TURCOTTE, D.L. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 221 p.

63. TURNER, M. G. Landscape Ecology: The Effect of Pattern on Process. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, v.20, p. 171-197, 1989.
64. TURNER, M.G. & GARDNER, R.H. (ed.) *Quantitative Methods in Landscape Ecology: The Analysis and Interpretation of Landscape Heterogeneity*. New York: Springer-Verlag, 1991. 536 p. Cap. 1: Quantitative Methods in Landscape Ecology: An Introduction, p.3-14.
65. VILLELA, S.M. & MATTOS, A. *Hidrologia Aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill, 1975. 245 p.
66. WRI, IUCN, PNUMA, FAO & UNESCO. *Estrategia Global para la Biodiversidad: Pautas de Acción para Salvar, Estudiar y Usar en Forma Sostenible y Equitativa la Riqueza Biótica de la Tierra*. Washington: WRI, IUCN, PNUMA, 1992. 243 p. (Original inglês).