ANÁLISE FRACTAL DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CHUVAS NO ESTADO DE SÃO PAULO

Alberto PEREIRA JUNIOR[1]
Anderson Luís Hebling CHRISTOFOLETTI[2]

Resumo

A Geometria dos Fractais, desenvolvida inicialmente pelo matemático Benoit Mandelbrot a partir dos anos 60, trouxe contribuições para a análise de estruturas complexas existentes na natureza, não explicáveis pela tradicional Geometria Euclidiana por não possuírem dimensões bem definidas e quantificáveis. Assim, foi criado um número para representar dimensões intermediárias entre as bem conhecidas da Geometria Euclidiana: ele é a dimensão fractal, que mede o grau de aspereza, fragmentação ou de irregularidade de um objeto. A medição da precipitação pode ser feita em diversos segmentos temporais, os quais compõem estruturas e representam objetos que podem ser analisados pela abordagem fractal. Seguindo esta premissa, foi realizada neste trabalho, para o Estado de São Paulo, uma análise espacial das chuvas por meio da construção de mapas da dimensão fractal pluviométrica e o estabelecimento de relações com a tentativa de classificação climática para esta mesma área elaborada por Monteiro (1973). A dimensão fractal pluviométrica mostrou-se compatível com o índice de participação das massas de ar, podendo ser um indicador numérico coerente com o ritmo pluviométrico de um lugar.

Palavras-chave: Geometria dos Fractais, dimensão fractal pluviométrica, ritmo pluviométrico.

Abstract

Fractal analysis of spacial rain distribution in the Sao Paulo State

The Fractal Geometry, initially developed by the mathematician Benoit Mandelbrot from the sixties onwards, made contributions for the analysis of several complex structures that exist in nature, not explainable by the traditional Euclidean Geometry because those structures don't have well defined and amountable dimensions. The new geometry created a number to represent intermediate dimensions amongst those well-known Euclidean's: it's the fractal dimension, which measures the roughness or fragmentation or even irregularity degree of an object. Precipitation can be measured considering several kinds of time lapses or segments, which form structures that can be analyzed by the use of fractal approach. According to this, it was accomplished by this research a space analysis of rain in the Sao Paulo State, using by means the construction of maps of the pluviometric fractal dimension. Also, some relationships were made to the attempt of climatic classification accomplished by Monteiro (1973) for this same area. As result, the pluviometric fractal dimension looked compatible with Monteiro's index of participation of air masses, and it can be a numeric indicator coherent with the pluviometric rhythm of a place.

Key words: Fractal Geometry; pluviometric fractal dimension, pluviometric rhythm.

---

[1] Mestrando em Geografia, área de concentração em Organização do Espaço, UNESP/Rio Claro - SP.

[2] Professor Doutor, Departamento de Geografia, UNESP/Rio Claro - SP. e-mail: alhc@rc.unesp.br

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, um novo tipo de abordagem analítica tem sido utilizado nas ciências naturais, sociais e aplicadas: a Geometria dos Fractais, desenvolvida inicialmente pelo matemático franco-polonês Benoit Mandelbrot a partir dos anos 60 nos Estados Unidos, cujos principais conceitos e idéias sobre o assunto foram publicados somente em 1975 com a obra *Les objets fractals*: forme, hasard et dimension, posteriormente traduzida para o inglês em 1977, e revisada e ampliada na edição de 1982, agora sob novo título — *The fractal geometry of nature*.

O substantivo *fractal*, de acordo com Lam e De Cola (1993), refere-se a um conjunto espacial que manifesta um relacionamento escalar regular entre o número de seus elementos constituintes e suas medidas (tamanho, densidade, intensidade, etc.). Já o adjetivo *fractal* é relacionado à qualidade de se manifestar regularidade escalar. Ainda conforme os mesmos autores, "a Geografia lida com objetos reais que freqüentemente parecem similares a pedaços deles mesmos quando examinados em diferentes escalas cartográficas e que têm formas que manifestam significativa aleatoriedade". (LAM E DE COLA, 1993. p. 9)

Os fenômenos climáticos compõem uma categoria dos sistemas geográficos. A precipitação é um dos fenômenos climáticos e a sua medição pode ser feita em diversos segmentos temporais: minuto, hora, dia, mês e ano. Cada conjunto de dados forma uma série temporal de informações. As séries temporais possuem uma estrutura e representam objetos que podem ser analisados pelo uso da abordagem fractal. Levando em conta a possível regularidade escalar, as séries temporais podem apresentar semelhanças em suas estruturas e dimensões fractais, conforme mostra Christofoletti (1997) em seu estudo sobre a estrutura da estação chuvosa no Estado de São Paulo, no qual utilizou a análise fractal.

No entanto, ainda não se fez no Brasil uma análise a respeito da distribuição espacial dos valores obtidos por meio das técnicas de fractais e não houve um relacionamento entre tal abordagem e os mapeamentos pluviométricos já realizados. Essa abordagem da estruturação espacial poderia confirmar a importância dos fractais para a Climatologia, a Meteorologia e, obviamente, para a Geografia.

Por conseguinte, o presente trabalho consistiu na realização de uma análise da distribuição espacial — para o Estado de São Paulo — dos valores obtidos por meio da técnica de fractais (construção de mapas da dimensão fractal pluviométrica) e no estabelecimento de relações para com a tentativa de classificação climática elaborada por Monteiro (1973) em relação à mesma área, a fim de verificar, desta forma, a aplicabilidade da dimensão fractal como parâmetro quantitativo na questão do ritmo.

EMBASAMENTO TEÓRICO

A análise rítmica na abordagem climatológica

Os estudos realizados por Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro ao longo dos anos 60 e 70 permitiram avanços significativos no conhecimento dos climas brasileiros, sobretudo com relação aos mecanismos atmosféricos operantes sobre as atuais regiões Sul e Sudeste do país, com destaque para o Estado de São Paulo, importante área de conflito entre diferentes massas de ar. No decorrer de sua obra, o autor realiza uma contribuição metodológica à analise rítmica dos tipos de tempo no Brasil (MONTEIRO, 1962; 1963; 1964; 1969; 1973).

Em sua tese de doutorado (MONTEIRO, 1969), ao abordar mais especificamente o Estado de São Paulo, ressalta a importância da Frente Polar Atlântica (FPA), e afirma que as chuvas neste Estado são de origem frontal em sua maioria, sob a liderança da FPA; no inverno, quase todas as chuvas são frontais. O autor concluiu que, quanto maior a atividade polar, maior a quantidade de chuvas (desde que haja choque com massas tropicais); porém, só isso não explicaria o ritmo: ele dependeria também do grau de propagação latitudinal das massas polares e de sua penetração segundo as rotas do interior e do litoral, fatores esses que geram ondulações no eixo da FPA e ciclogêneses, contribuindo para determinar a intensidade dos contrastes térmicos e, conseqüentemente, a intensidade das chuvas frontais.

Tomando como base o inverno de dois anos-padrão — 1957, chuvoso, e 1963, seco —, o autor observou que as chuvas verificadas para o Estado de São Paulo nesses dois invernos foram quase todas frontais, originadas do choque entre dois sistemas que, isolados, produziriam tempo bom. Também ocorreram, porém em número bem menor, chuvas orográficas no domínio da massa tropical atlântica (Ta) e chuvas convectivas associadas ao aquecimento basal da massa polar atlântica (Pa). Deste modo, concluiu que as invasões polares extremamente fortes ou fracas geram chuvas fraquíssimas e que os máximos de pluviosidade estão associados aos tipos médios de invasão polar (fluxos alternados, interrompidos, oscilantes), pois apresentam fortes contrastes térmicos. Portanto, apesar do forte relacionamento entre a quantidade de passagens da Frente Polar e a produção de chuvas na região, não há correspondência entre os máximos de resfriamentos e os de pluviosidade; estes são ligados às passagens frontais precedidas por ondas de aquecimento pré-frontal ligadas à massa tropical continental.

Para que conseguisse realizar seu intento, ou seja, aprofundar os conhecimentos a respeito dos climas das regiões Sul e Sudeste e, mais especificamente, do Estado de São Paulo (referente ao qual expusemos acima algumas de suas contribuições), Monteiro (1969) desenvolveu uma nova metodologia: a análise rítmica. De acordo com os princípios da Climatologia Dinâmica, iniciada pelo geógrafo francês Max Sorre — pelos quais o clima é a sucessão habitual dos tipos de tempo, incluindo eventos extremos e não podendo, portanto, ter o seu estudo baseado exclusivamente em dados médios —, e, inspirado por Pédelaborde (1957) — um dos pioneiros na realização de estudos climatológicos com o enfoque dos tipos de tempo e a preocupação com os sistemas atmosféricos que os produzem —, Monteiro estabeleceu uma metodologia para a pesquisa em Climatologia baseada no seu conceito de ritmo — "retorno mais ou menos regular aos mesmos estados atmosféricos" (MONTEIRO, 1969, p. 15), fundamentado pela atuação das massas de ar e mecanismos frontológicos em escala diária. São esses elementos que promovem a gênese do clima de determinado local, cada qual caracterizado pela interação particular entre aqueles e os fatores geográficos naturais e humanos ali presentes, e pelo conseqüente encadeamento dos tipos de tempo, ou seja, o ritmo.

As conclusões de Monteiro sobre a importância da FPA descritas anteriormente foram obtidas por meio da análise rítmica. O autor elaborou um índice de participação dos sistemas atmosféricos na formação do tempo no Estado de São Paulo, dividindo o mesmo em quadriláteros de 4° de longitude x 4° de latitude. O autor confrontou o total de chuvas obtido em 24 horas com o sistema atmosférico de atuação mais intensa no decorrer do mesmo dia em cada quadrícula, fazendo isso para todo o inverno dos anos-padrão estudados e conseguindo as porcentagens de cada sistema em relação ao total de chuvas.

A técnica do índice de participação das massas de ar foi desenvolvida pelo próprio Monteiro e publicada no artigo *Sobre um índice de participação das massas de ar e suas possibilidades de aplicação à classificação climática* (MONTEIRO, 1964).

Nesse artigo, Monteiro ressalta que as massas de ar encerram em seu conceito toda uma estrutura de fatos combinados de maneira complexa e, portanto, a sua participação através do tempo seria a mais apropriada para expressar a idéia de ritmo, em comparação com os dados médios, para fins de classificação climática. O autor sempre criticou a utilização dos dados médios para a definição dos tipos climáticos, e cita (MONTEIRO, 1962) o clássico exemplo de que, pelo sistema de classificação de Köppen (um dos mais utilizados no mundo inteiro), Santos (SP) estaria no mesmo grupo a que pertenceria Belém (PA), sabidamente com climas de diferentes gêneses, apesar de determinados aspectos serem semelhantes.

Assim, utilizando a técnica do índice de participação das massas de ar, Monteiro (1973, p. 121) realizou uma tentativa de classificação dos climas regionais do Estado de São Paulo. Essa classificação utilizou o ponto de vista de Strahler na distinção de climas regionais, procurando "diversificar dentro deles, as feições climáticas individualizadas graças à variação do ritmo, das quantidades, da associação a fatores geográficos de importância manifesta — como o relevo". O autor também associou elementos climáticos com elementos humanos, pois considera "que o complexo geográfico tem que ser abordado como um todo e não dividido em partes superpostas e estanques". (MONTEIRO, 1973, p. 121)

Foram empregados dados de 1941 a 1957, dos quais foram analisados os anos-padrão de 1944 (seco), 1952 ("habitual") e 1956 (chuvoso). Elaborou-se a contagem da participação das massas de ar na formação do tempo atmosférico em unidades diárias sobre cada quadrícula pré-delimitada do Estado, com a utilização de cartas sinóticas de 12 h C. T. G., estabelecendo as porcentagens anuais e sazonais (para os respectivos anos-padrão) dessa participação e os limites regionais cartográficos decorrentes da interpolação de tais porcentagens.

Servindo-se desta técnica e daquela dos gráficos de análise rítmica (representação concomitante dos vários elementos climáticos em escala diária, que revela a seqüência e as interações daqueles), Monteiro (1973, p. 121) delimita o Estado de São Paulo climaticamente:

> [...] Partindo do quadro continental, procuramos ressaltar a posição do território paulista nos limites de três regiões climáticas bem caracterizadas pela circulação celular e sobretudo pelos caracteres pluviais. O sul, na zona subtropical, integra-se no grupo dos climas controlados pelas massas tropicais e polares, individualizando-se sob tipo dos climas permanentemente úmidos das margens orientais e subtropicais dos continentes, atacados pela Frente Polar mas dominados por massa tropical marítima. Aquém, ao norte, apresenta-se sob controle das massas tropicais e equatoriais, num clima tropical alternadamente seco e úmido no interior e permanentemente úmido no litoral.

A faixa que limita essas porções (norte e sul) considera 40% de participação anual da massa polar na composição do tempo atmosférico no território do Estado, dispondo-se em latitude próxima ao trópico.

Ao sul, a participação é superior aos 40%; ao norte, é inferior. Conforme cita o autor, "termicamente as duas porções paulistas da periferia dos dois climas regionais não diferem substancialmente, e as distinções, atrapalhadas pelas variações de altitude segundo o relevo, devem ser procuradas no grau dos abaixamentos de temperatura produzido nas 'ondas de frio'". (MONTEIRO, 1973, p. 122)

Continuando a esclarecer os critérios utilizados na tentativa de classificação, Monteiro (1973, p. 121) afirma que:

> [...] a atuação porcentual das massas de ar, base mesma da análise rítmica, serviu de fundamento ao traçado do limite das duas unidades climáticas regionais. Partindo daí e baseados nas variações do ritmo e distribuição quantitativa espacial dos elementos disponíveis dentro do quadro morfológico, chegamos a nove subunidades. Estas subdividindo-se ainda segundo fácies mais nitidamente observáveis chegam ainda a exibir dezessete feições climáticas (*figura 1*).

As nove subunidades climáticas podem ser relacionadas às unidades geomorfológicas, embora não haja coincidência plena. Não há limites rígidos entre tais subunidades, havendo faixas indiferenciáveis ou áreas transicionais.

Fractais

O termo *fractal* deriva do adjetivo latino *fractus*, vindo do verbo *frangere*, cujo significado é "quebrar, fraturar" (GUERRINI, 1996). Ele foi usado pelo precursor dessa nova teoria, Benoit Mandelbrot, a fim de explicar estruturas físicas ou geométricas de formas irregulares, rugosas ou fragmentadas. Pela tradicional Geometria Euclidiana, muitas estruturas existentes na própria natureza não são explicáveis, pois não possuem dimensões bem definidas e quantificáveis. Tome-se como exemplo um litoral bastante recortado, que fica longe de ser considerado como uma linha reta, ou então uma topografia irregular, que não chega a ser perfeitamente uma forma plana (bidimensional) nem volumétrica (tridimensional). Tais formas são geralmente originadas de uma dinâmica caótica, imprevisível, aleatória (CHRISTOFOLETTI, 1997).

No entanto, grande parte dessas formas irregulares ou fragmentadas apresenta uma regularidade paradoxal em relação à dinâmica caótica citada, surgindo daí o termo *caos determinístico*, o qual mostra a idéia da aleatoriedade aparente contida num sistema cujos últimos estados se desenvolvem a partir dos estados anteriores consoante uma lei fixa (LORENZ, 1996).

Conforme Gleick (1990), existia um paradigma Newtoniano utilizado para o estudo de praticamente todos os fenômenos físicos até os anos 60, no qual estava contida a idéia de previsibilidade determinista — em linhas gerais, tudo seria previsível, bastando o conhecimento das leis matemáticas. Havia erros, mas os cientistas acreditavam que, quando do estudo de determinado sistema, deviam inserir os aspectos aleatórios de maneira artificial nas teorias existentes, através de ruídos ou erros. Porém, essa idéia caiu por terra quando se descobriu que equações matemáticas simples podiam gerar distorções de resultado imprevistas e caóticas, apenas com pequenas diferenças em seus valores iniciais. Desta maneira, nos anos 60, começou o estudo moderno do caos, a partir das pesquisas do meteorologista e matemático norte-americano Edward Lorenz.

Tal estudo somente pôde ser realizado graças ao advento do computador, ao qual foi atribuída uma utilidade prática: a formulação de modelos atmosféricos para a previsão do tempo, que consumiam uma enorme massa de dados a serem processados. Em função do paradigma Newtoniano existente àquela época, não se levava em conta que as mensurações não podiam ser perfeitas: os cientistas achavam que, com dados *aproximados*, chegariam ao comportamento *aproximado* da realidade, sem distorções graves.

Esse foi o erro identificado por Lorenz (1996). Em seu modelo de previsão, com sistemas de equações puramente simples e repetitivas, ele inseriu os mesmos dados de uma experiência realizada anteriormente, porém acidentalmente arredondados (a

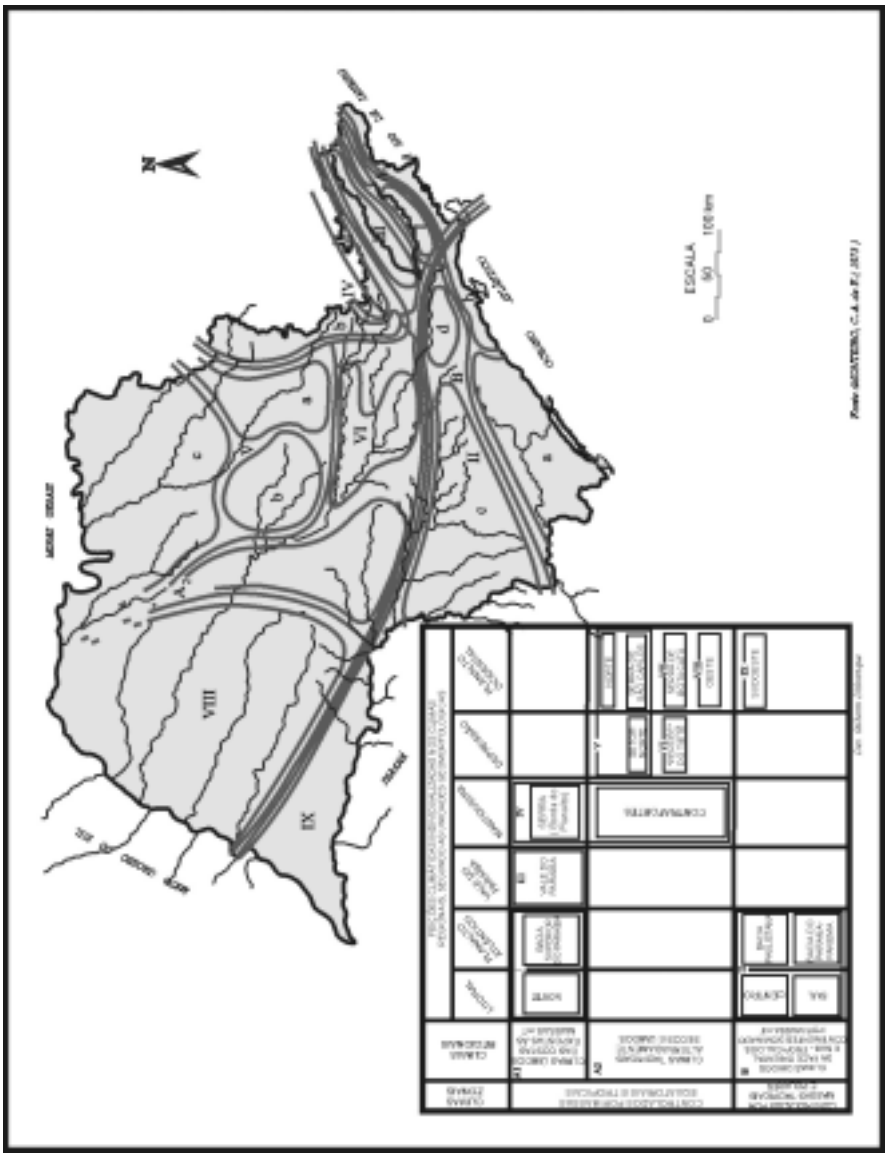


Figura 1 - Esquema representativo das feições climáticas individualizadas no território paulista dentro das células climáticas regionais e das articulações destas nas faixas zonais, segundo Monteiro (1973)

anterior possuía seis casas após a vírgula; esta, somente três). O novo gráfico gerado revelou uma curva semelhante à anterior no início, mas extremamente divergente ao longo de seu desenvolvimento posterior. Isso foi chamado por Lorenz (1996, p. 20) de "dependência sensível das condições iniciais" ou "Efeito Borboleta" — a idéia aparentemente absurda de uma borboleta na China, com seu bater de asas agitando o ar, poder modificar sistemas de tempestades nos Estados Unidos. Assim, a previsão do tempo a longo prazo seria inviável, "pois os erros e as incertezas se multiplicam, formando um efeito de cascata ascendente através de uma cadeia de aspectos turbulentos, que vão dos demônios da poeira e tormentas até redemoinhos continentais que só os satélites conseguem ver" (GLEICK, 1990, p. 18).

Apesar disto não ser animador, entretanto Lorenz percebeu que essa aleatoriedade continha ordem, pois era produzida a partir de um sistema determinístico simples. Resta compreender como essa ordem se expressa matematicamente em cada caso, pois nem tudo na natureza ocorre de maneira caótica, irregular: conforme Guerrini (1996), haveria um Princípio de Aumento da Ordem (P. A. O., ligado à noção de atrator imaginada por Lorenz, o qual amenizaria o "Efeito Borboleta" — os sistemas seriam atraídos para um limite do qual eles não passam), em contraposição ao Princípio de Aumento da Desordem (P. A. D.). Ou então, de acordo com Peitgen, Jurgens e Saupe (1992, p. viii), "o determinismo restrito e o desenvolvimento aparentemente acidental não são mutuamente exclusivos, mas a sua coexistência constitui a regra na natureza".

Desse modo, criou-se uma nova ciência — ainda de acordo com Guerrini (1996): a da Dinâmica Não-Linear, que engloba o estudo do caos determinístico. Isso porque este é relacionado aos fenômenos não-lineares — regidos por equações com potências de números não-inteiros na variável independente. São tomados como exemplos desses fenômenos os circuitos elétricos, crescimentos populacionais, movimentos de fluidos em meios porosos, movimento de massas de ar, crescimento de plantas, taxas de fluxo de automóveis numa estrada, crescimento de colônias de microorganismos, etc., o que mostra a diversidade de aplicações das teorias do caos e como elas têm se espalhado por todas as ciências.

Já os fractais são a expressão geométrica para o caos determinístico, ou seja, são formas estruturais resultantes de processos caóticos. Tais formas começaram a ser identificadas pelo matemático polonês radicado na França Benoit Mandelbrot, ao longo dos anos 60, quando este já trabalhava nos Estados Unidos e com grande acesso a recursos computacionais — era funcionário da IBM — e o fez inicialmente sem ter conhecimento das idéias de Lorenz e outros sobre o caos, que datam da mesma década. Segundo Gleick (1990), Mandelbrot iniciou seu entendimento com estudos econômicos, como a distribuição de grandes e pequenas rendas e a evolução dos preços do algodão. No entanto, o estudo que foi determinante para a construção da Geometria Fractal ocorreu a partir de um problema prático na própria empresa onde Mandelbrot trabalhava: o ruído nas linhas telefônicas usadas para a transmissão de informações de um computador para outro.

Havia períodos de transmissão de dados sem erros e períodos com erros em série. Porém, num exame mais apurado, tais séries com erros continham em si também períodos sem erros. E a cada exame mais apurado que se fazia, em escalas temporais ainda menores, mais isso era constatado — os períodos com erros não eram contínuos. Esse processo fez Mandelbrot (1983 apud GUERRINI, 1996) — um matemático que trabalhava mentalmente com imagens geométricas — lembrar-se de uma construção geométrica esquecida dentro da Matemática de então, criada por Georg Cantor no século XIX e chamada de "barra triádica Cantoriana" ou "poeira de Cantor". Ela consiste de uma linha reta da qual se retira o terço médio; em seguida, corta-se o terço médio dos segmentos restantes, e assim sucessivamente, até se

gerar uma poeira de pontos infinitamente dispersos. Os erros de transmissão seriam, para Mandelbrot, "um conjunto de Cantor disposto no tempo" (GLEICK, 1990, p. 88).

A partir daí, figuras geradas pela repetição de processos simples passaram a representar melhor a complexidade da natureza, em relação à tradicional Geometria Euclidiana de linhas, planos, círculos, esferas, triângulos, cones e outras figuras "perfeitas". Conforme ressalta o mesmo autor: "As nuvens não são esferas [...] As montanhas não são cones. O relâmpago não percorre uma linha reta. A nova geometria espelha um universo que é irregular, e não redondo; áspero, e não liso. É uma geometria das reentrâncias, depressões, do que é fragmentado, torcido, emaranhado e entrelaçado. O entendimento da complexidade da natureza esperava a suspeita de que a complexidade não era apenas algo aleatório, não era apenas um acaso. Exigia a convicção de que o interessante na trajetória do raio, por exemplo, não é sua direção, mas sim a distribuição dos seus ziguezagues. O trabalho de Mandelbrot (1996) fez uma afirmação sobre o mundo, a afirmação de que tais formas ímpares encerram um significado. As reentrâncias e os emaranhados são mais do que imperfeições deformantes das formas clássicas da Geometria Euclidiana. São, muitas vezes, as chaves para a essência das coisas". (GLEICK, 1990, p. 90)

A Geometria dos Fractais veio solucionar problemas que envolvem medição em vários ramos do conhecimento científico. Como exemplo, é bastante citado pela literatura o problema da medição de um litoral bastante recortado. Quanto menor o instrumento de medida, maior será o tamanho encontrado, pois cada vez mais serão incluídas reentrâncias menores na mensuração; assim, a medida do litoral aumentaria sem limite.

Este problema só pode ser resolvido com a noção de dimensão: para a geometria clássica, existem apenas três dimensões — isto é, três números especificam um ponto e as figuras possuem dimensões "inteiras": a dimensão de um ponto é zero, de uma reta é 1, de um plano é 2, e de uma figura volumétrica (como um cubo, por exemplo) é 3. No entanto, existem objetos que, dependendo da distância em relação ao observador, assumem diferentes dimensões: Gleick (1990) cita o exemplo do barbante, que, visto de muito longe (o rolo), parece um ponto e tem dimensão zero; numa proximidade maior, quando o rolo é percebido, passa a ter três dimensões; o barbante, por si só, é uma linha de dimensão 1; microscopicamente, ele passa a ser uma rede densa de fibras com dimensão 3; cada fibra, por si própria, tem dimensão 1, e assim por diante.

Percebendo que havia faixas de transição entre cada uma dessas dimensões, Mandelbrot (1983) criou um novo conceito: o da **dimensão fractal**, para medir o grau de aspereza ou fragmentação, ou ainda de irregularidade de um objeto. Um litoral recortado seria imensurável em sua extensão, mas possui um grau de rugosidade que o caracteriza e que permanece em diferentes escalas. Burrough (apud LAM e DE COLA, 1993, p. 5) mostra que "muitas variáveis ambientais são fractais e que o exame da dimensão fractal é útil para separar escalas de variação que possam ser o resultado de processos naturais". Existem várias maneiras de se calcular a dimensão fractal de um objeto: a utilizada na elaboração deste trabalho será explicitada posteriormente.

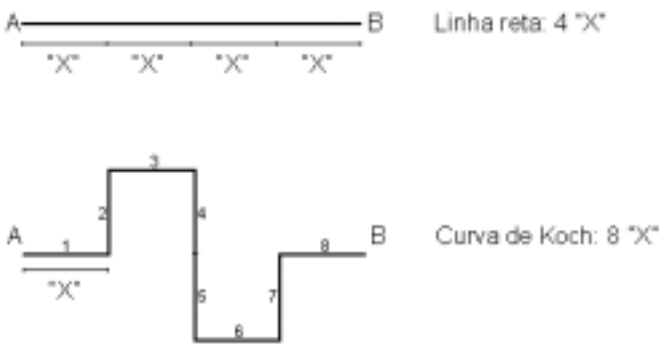
Christofoletti (1997, p. 7) define dimensão fractal como "o valor do expoente do escalante relacionando o número de ocorrências desses elementos com a categoria dos seus diversos tamanhos". De acordo com o mesmo autor:

- "os valores fractais entre 0 e 0,99 correspondem às estruturas com base em pontos como, por exemplo, o fractal de uma série temporal de dados sobre a precipitação em determinado lugar" — o que é o caso deste trabalho, conforme será visto mais tarde. Se a dimensão D é igual a zero, temos *um* ponto; se $0<D<1$, temos uma *poeira* de pontos.

- "os valores fractais entre 1,0 e 1,99 correspondem às estruturas espaciais de lineamentos, considerando por exemplo as tortuosidades e as sinuosidades das linhas costeiras, assim como os meandramentos dos cursos fluviais". Se D=1, temos uma linha reta, não fragmentada, ideal; se D=2, temos um plano ideal. Portanto, os valores intermediários se referem a estruturas que são mais do que uma reta, porque cercam uma área finita, mas não preenchem completamente um plano. Um bom exemplo será mostrado adiante com a "Curva de Koch".
- "os valores fractais entre 2,0 e 2,99 correspondem às estruturas de representação bidimensional, como o mapeamento de fenômenos espacialmente distribuídos na superfície terrestre, mas incluindo informações de ordem volumétrica ou de intensidade. Aplicam-se na análise do formato de bacias hidrográficas, na modelagem digital do terreno, no delineamento areal de jazimentos e de unidades administrativas". Um exemplo a se encaixar neste quadro (citado por GLEICK, 1990) é o da encosta escarpada de uma montanha: à primeira vista, é um plano, mas ao andarmos sobre ela vemos as superfícies das rochas se projetando e nos envolvendo, quase ocupando o espaço tridimensional (volume ideal: D=3).
- "os valores fractais entre 3,0 e 3,99 correspondem às estruturas espaciais de representação volumétrica de uma categoria de ocorrência no interior de outro conjunto volumétrico. Por exemplo, servindo como aplicação para o cálculo de reservas em jazidas minerais em determinada unidade espacial. Outro exemplo refere-se ao cálculo do volume total das nuvens em uma unidade volumétrica (local ou regional) da atmosfera". (CHRISTOFOLETTI, 1997, p. 5-6)

A dimensão também depende da maneira como o fenômeno é estudado e de como são feitas as medidas dos objetos. Lam e De Cola (1993) mostram um exemplo de fractal bastante ilustrativo: a Curva Quadrática de Koch. Observando o esquema a seguir (*figura 2*), tem-se que quatro passos de um tamanho fixo "X" são suficientes para preencher a distância entre os pontos A e B, no caso da linha reta. Já no caso da Curva de Koch, são necessários oito passos do mesmo tamanho "X" para irmos de A até B, cuja distância é a mesma.

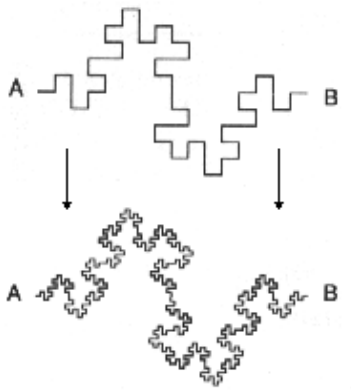
Figura 2 - Comparação entre a linha reta e a Curva de Koch



Fonte: LAM & DE COLA, 1993.

A construção da Curva de Koch consiste da repetição, entre cada segmento, desse sobe-e-desce em ângulos retos sucessivamente até serem geradas formas como as que se seguem (*figura 3*). O importante a ser notado é que, na linha reta, à medida que se diminui o tamanho dos passos, é aumentada a quantidade dos mesmos necessária para o preenchimento do segmento na mesma proporção, diferentemente do que ocorre na Curva de Koch: aqui, enquanto se diminui o tamanho dos passos, a quantidade necessária para o preenchimento aumenta de maneira muito mais rápida. Os autores levaram esses dois fatores em consideração (tamanho e quantidade de passos) e calcularam a dimensão fractal para a Curva de Koch, chegando ao valor 1,5.

Figura 3 - Desenvolvimento da Curva de Koch



Fonte: LAM & DE COLA, 1993.

Com base em todas essas informações, podemos concluir que os fractais possuem dois componentes intrínsecos:

- a irregularidade ou aleatoriedade, atributo que, segundo Christofoletti (1997, p. 5), "encontra-se relacionado com a dinâmica caótica dos sistemas, assinalando a imprevisibilidade da forma específica a ser gerada".
- a regularidade, representada por duas características fundamentais e correlatas dos fractais ideais: a *auto-similaridade* e a *invariância escalar*. Segundo Lam e De Cola (1993, p. 21), a auto-similaridade é "a extensão para a qual o relacionamento entre o número de elementos constitutivos e suas medidas é verdadeiramente linear". Por esta característica, as estruturas fractais contêm cópias de si mesmas, ou seja, o padrão geométrico se repete nas diversas escalas de grandeza espacial ou de observação. Em decorrência disso, se existe auto-similaridade é porque concomitantemente ocorre também invariância escalar - "linearidade entre os valores obtidos nas diversas escalas de mensuração" (CHRISTOFOLETTI, 1997, p. 7). Deve-se ressaltar que a noção de auto-similaridade baseia-se na manutenção da forma, com mesmos ângulos e segmentos lineares proporcionais (com mesmo "fator do escalante").

Assim, os fractais são definidos em função de suas características essenciais, relatadas por Guerrini (1996, p. 4), que são: "auto-similaridade, complexidade infinita

e formação através de um processo de realimentação". Este autor baseia-se na definição do matemático Dupont: "fractais são objetos que apresentam auto-semelhança e complexidade infinita, ou seja, sempre contêm cópias, aproximadas ou não, de si mesmos, e são gerados pela iteração de processos simples". (GUERRINI, 1996, p. 4)

Já a definição de Lam e De Cola (1993) fora apresentada na introdução deste trabalho, a qual também apresenta basicamente as mesmas noções das definições anteriores com relação à regularidade — relacionamento escalar regular entre o número de elementos e suas medidas. Porém, para tais autores, essa definição é válida somente para "fractais ideais", chamando outras estruturas de "fractais com dependência de escala": por exemplo, a representação de um lago não seria um fractal ideal, pois à medida que se aumenta a resolução escalar (até níveis milimétricos), a área representada aumentaria tanto que o mundo todo estaria debaixo d'água. Estes autores são mais rígidos com relação às proporções, que devem ser regulares em cada escala.

Em suma, todas essas características se relacionam ao paradoxo constitutivo dos fractais: a existência da irregularidade, manifestada pela aleatoriedade e complexidade infinita, em contraposição à existência da regularidade, manifestada pela auto-similaridade e pela repetição de processos simples.

METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia utilizada baseou-se no uso da dimensão fractal como parâmetro para a análise da distribuição espacial das chuvas no Estado de São Paulo, tendo seus valores mapeados. Esta categoria de medição representa neste caso, em linhas gerais, a freqüência com que ocorrem as chuvas de determinada quantidade em função de dados diários, num período maior que é a estação chuvosa.

Tal freqüência é um fenômeno fractal: os dias que apresentam eventos chuvosos de determinada magnitude preenchem, de maneira mais ou menos completa (dependendo das condições climáticas existentes naquele período e naquele local), o espaço de um segmento de reta — que representa o período total a ser estudado — sob a forma de pontos. Como normalmente este segmento não é preenchido em sua totalidade por esses pontos — se o fosse, teria dimensão 1 (linha reta) —, a estrutura é irregular.

Conforme Olsson et al. (1992, p. 21), "uma interpretação possível da dimensão fractal calculada é que ela reflete o grau de irregularidade pela qual as ocorrências chuvosas se encontram distribuídas dentro das séries temporais da precipitação". Essa estrutura não é um ponto com dimensão zero, nem chega a ser uma reta, mas é um conjunto de pontos dispostos aparentemente sem uma lógica com dimensão fractal entre zero e 1. Quanto maior o valor da dimensão fractal (aproximando-se de 1), maior é o preenchimento de pontos e a freqüência dos eventos chuvosos para a magnitude, período e local considerados. A lógica do preenchimento irá depender do local de coleta dos dados e das condições climáticas reinantes ali no período estudado.

Antes de mais nada, foram necessárias a escolha dos períodos a serem estudados e a delimitação da estação chuvosa. Além da disponibilidade prévia de alguns dados, foi escolhido o conjunto de 1982 a 1986 por este conter anos-padrão: chuvoso (1983), normal (1984) e seco (1985), conforme Christofoletti (1997).

A estação chuvosa foi delimitada de acordo com a definição absoluta baseada na proposta de Köppen e Geiger (1936 apud CHRISTOFOLETTI, 1997, p. 88), "que

considera como mês chuvoso aquele que recebe precipitação superior a 60 mm". Christofoletti (1991), analisando a freqüência de valores inferiores ao citado no decorrer de vários anos, percebeu que há uma ruptura nítida na passagem de setembro para outubro, e de março para abril, delimitando, para a bacia do Piracicaba (SP), a estação chuvosa entre os meses de outubro a março, que contrasta com a estação seca de abril a setembro. Christofoletti (1997) deixa claro que a definição absoluta não esclarece sobre a duração da estação chuvosa: ela pode começar antes de outubro e se estender para meses posteriores a março, ou começar tardiamente e terminar mais cedo.

A delimitação é estendida para o restante do Estado: segundo Christofoletti (1997, p. 83), "a caracterização quantificativa da duração da estação chuvosa, com base em limiar da precipitação mensal, realizada para a bacia do Piracicaba, ajusta-se às características dominantes no Estado de São Paulo e serve como referência aplicativa para as localidades analisadas. Simplesmente ratifica o conhecimento que de há muito é destacado na literatura sobre os climas tropicais". Isto posto, a estação chuvosa de 1982/83 é considerada como muito úmida, as de 1983/84 e 1984/85 são ditas "normais" ou "habituais", e a de 1985/86 é considerada como pouco úmida.

Por conveniência técnica, a estação chuvosa teve seu comprimento ampliado para 192 dias, incluindo 4 dias de setembro (a partir do dia 27) e 5 ou 6 dias de abril — na dependência do ano ser bissexto, caso de 1984, quando a série termina no dia 5 de abril. Portanto, são 96 dias no ano precedente, e 96 no posterior.

Os dados diários de chuva referentes a esses anos foram obtidos junto ao Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE). Procurou-se escolher 4 postos por cada divisão geográfica estabelecida por este órgão, a fim de cobrir de maneira relativamente uniforme e razoavelmente densa o Estado inteiro. Apesar do descarte de alguns por deficiências nos dados, a quantidade de postos utilizados é alta, no total de 114 (*figura 4*).

A técnica utilizada para o cálculo da dimensão fractal foi a da contagem da freqüência dos dias chuvosos por tamanhos de segmentos, conforme diferentes magnitudes ou limiares, descrita nos trabalhos de Olsson (1992; 1996). Este autor afirma que esta técnica é vantajosa em relação às demais utilizadas por ele em função de sua capacidade de verificar nuanças internas na estrutura da estação chuvosa, com ampliada potencialidade analítica para níveis de limiares mais elevados.

Ela consiste da segmentação do comprimento da estação chuvosa através da divisão sucessiva por 2 — daí a ampliação da estação de 182 para 192 dias, pois este número se divide de maneira exata até o 3 (os outros números pares próximos geram fracionários logo nas primeiras divisões). Desse modo, são originados períodos com tamanhos de 96, 48, 24, 12, 6, 3 e 1 dias. Foram utilizados os limiares de 0,1; 5; 10; 20 e 40 mm de chuva. Assim, segundo Christofoletti (1997, p. 165-166), "considerando cada tamanho de segmento, devem ser contadas as ocorrências chuvosas que se encaixam nos valores iguais ou superiores a esses limiares". Ou seja, se caem 22 mm de chuva num dia, este será levado em consideração no preenchimento dos pontos para os limiares de *0,1*, 5, 10 e 20 mm, mas não para o de 40 mm.

O próximo passo para o cálculo da dimensão fractal por esta técnica é a determinação do logaritmo (na base 10) do resultado da contagem das ocorrências chuvosas: cada tamanho de segmento apresentará, para cada período analisado, um resultado — a freqüência dos eventos —, cada qual devendo ser transformado em logaritmo. Feito isso — e convertidos também os tamanhos de segmentos (192, 96...) em logaritmos — o valor da dimensão fractal é obtido através do cálculo da inclinação da reta de regressão (pois se um evento possuir padrão fractal, o gráfico logaritmo da freqüência pela escala de medida será uma reta), que utiliza esses valores convertidos anteriormente. O valor obtido deve ser ainda multiplicado por -1. Todo esse pro-

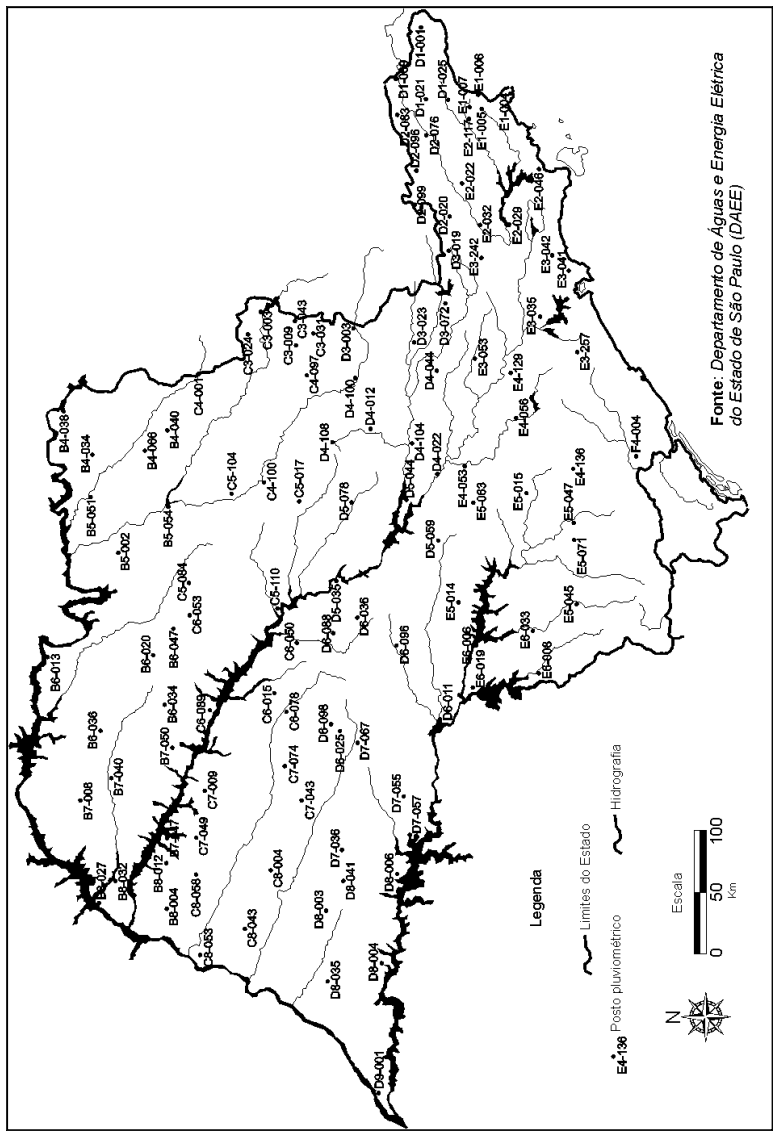


Figura 4 - Estado de São Paulo: localização dos postos pluviométricos utilizados na pesquisa

cedimento realizado para um limiar é repetido para todos os demais. A relação estatística entre freqüência das chuvas (em escala logarítmica) e tamanho de segmento gera gráficos bastante úteis na análise temporal dos dados pluviométricos.

Por estabelecer valores de dimensão fractal para diversas magnitudes da mesma série temporal, "esse procedimento constitui técnica de análise multifractal" (CHRISTOFOLETTI, 1997, p. 108).

As planilhas para o cálculo dos valores de dimensão fractal foram desenvolvidas com a utilização do *software* Microsoft Excel 7.0. Já o mapeamento (com relação ao Estado de São Paulo) dos mesmos para cada estação chuvosa e limiar, e também dos totais pluviométricos, utilizou dois *softwares*: Surfer 6.0 (Golden Software), para a interpolação dos valores e geração dos mapas de isolinhas; e Corel Draw 6.0, para o desenho da base cartográfica. O método utilizado na interpolação dos dados por meio do Surfer foi o da Krigagem.

Não foi possível a padronização dos intervalos de classe da dimensão fractal (e mesmo da pluviosidade total) para as diversas estações chuvosas — o que seria ideal para uma comparação dos mapas em conjunto — em virtude da necessidade de homogeneização da grade de cores, prejudicando a visualização individual dos mapas, ainda que sob os mesmos limiares, pois os períodos estudados apresentam diferenças significativas.

ANÁLISE FRACTAL DA DISTRIBUIÇÃO DAS CHUVAS NO ESTADO DE SÃO PAULO

O trabalho tem como objetivos a exemplificação da análise temporal da freqüência pluviométrica de algumas localidades e o estabelecimento de uma comparação entre os mapas gerados a partir dos valores da dimensão fractal — indicativos da freqüência das chuvas (preenchimento dos pontos dentro do segmento total da estação chuvosa) —, e a tentativa de classificação climática elaborada por Monteiro (1973), verificando, desta forma, a aplicabilidade da dimensão fractal como parâmetro quantitativo para o ritmo climático.

Os gráficos de freqüência das chuvas *versus* tamanho dos segmentos foram construídos a fim de salientarem diferenças na escala temporal entre as localidades escolhidas, auxiliando na interpretação dos mapas. Foram elas: Santos (posto pluviométrico E3-041), representando o Litoral; Igaratá (posto E3-242), representando o Planalto Atlântico; Piracicaba (posto D4-104) e Taquarituba (posto E6-033), na Depressão Periférica; Adamantina (posto C8-004) e Barretos (posto B5-002), no Planalto Ocidental Paulista.

Nestes gráficos, quando surge uma reta entre o segmento maior e os menores, é porque os segmentos estão preenchidos com ocorrências chuvosas do limiar estipulado. Conseqüentemente, onde há uma "ruptura" na linha reta (uma mudança na inclinação), começam a aparecer segmentos sem o acontecimento relacionado ao limiar.

De acordo com Christofoletti (1997, p. 222-223), quem primeiro realizou este tipo de análise para o Estado de São Paulo, "essa variação assinala que a distribuição da precipitação diária não possui a propriedade da invariância escalar temporal para toda a série de grandezas dos segmentos. Cada setor abrangendo diferentes escalas no tamanho de segmentos deve possuir propriedades diferentes quanto aos mecanismos controlantes. Todavia, dentro de cada setor, reunindo dois ou mais tamanhos de períodos, pode-se assinalar a presença da invariância escalar". Os citados mecanismos controlantes se referem à dinâmica atmosférica em cada escala temporal.

Christofoletti (1997, p. 223) ressalta que:

> [...] também é possível pensar que tais mecanismos de controle na escala temporal possuam ligações com as ocorrências e variabilidade na escala espacial, considerando o Estado de São Paulo. Esta consideração leva a pensar que, hipoteticamente, as massas de ar que controlam a dinâmica climática não são homogêneas em suas ocorrências, mas possuem variabilidade em sua organização espacial interna [...]. Mas ainda não se pode precisar, claramente, se essas diferenças espaciais decorrem da própria variabilidade interna das massas de ar ou surgem em decorrência da atuação exercida por fatores advindos de condições locais.

Os gráficos mostraram que, em linhas gerais, a freqüência das chuvas em relação ao tamanho dos segmentos apresenta diferenças de local para local, porém não existindo correlação exata entre as chuvas e o compartimento geomorfológico, visto que apareceram diferenças entre localidades situadas no mesmo compartimento (casos de Piracicaba e Taquarituba, na Depressão Periférica, e Adamantina e Barretos, no Planalto Ocidental). Santos e Igaratá apareceram normalmente com freqüências mais uniformes; Barretos ficaria em terceiro lugar, à frente de Piracicaba, Adamantina e Taquarituba. Essa disposição entre as localidades surpreenderia se considerássemos apenas o compartimento geomorfológico sobre o qual se situam, mas sabemos que o clima e o ritmo pluviométrico dependem de muitos outros fatores. As diferenças apresentadas nos gráficos demonstram a distribuição espacial da dimensão fractal sob os diversos limiares e a tentativa de classificação climática elaborada por Monteiro (1973).

À medida que se aumenta o valor do limiar, a "ruptura" na reta do gráfico se desloca para segmentos de tamanho maior. Num segmento de tamanho 3 é mais difícil de ocorrer chuva do que num segmento de tamanho de 192 dias; com o aumento do limiar, torna-se mais difícil ainda a ocorrência para o segmento menor. Exemplificando a maior uniformidade de Santos e Igaratá com relação à freqüência, os gráficos mostram que, para o limiar de 0,1 mm, a "ruptura" acontece no segmento de 6 dias, em Santos, Igaratá e Barretos (*figura 5*); no de 12 dias, em Piracicaba e Adamantina; e no de 24 dias em Taquarituba (*figura 6*). Embora existam variações com relação aos limiares (como, por exemplo, no limiar de 40 mm, no qual Piracicaba apresenta ruptura no segmento de 96 dias e Igaratá, no de 192, inversamente ao esperado — *figura 7*), essa seqüência, em geral, é mantida, deslocando-se a "ruptura" para os segmentos maiores com o aumento do limiar, conforme já dito.

Figura 5 - Representação da freqüência de dias chuvosos por tamanho de segmentos, considerando o limiar de 0,1 mm para as estações chuvosas de 1982-83, 1983-84, 1984-85 e 1985-86, para as localidades de Santos, Igaratá e Barretos

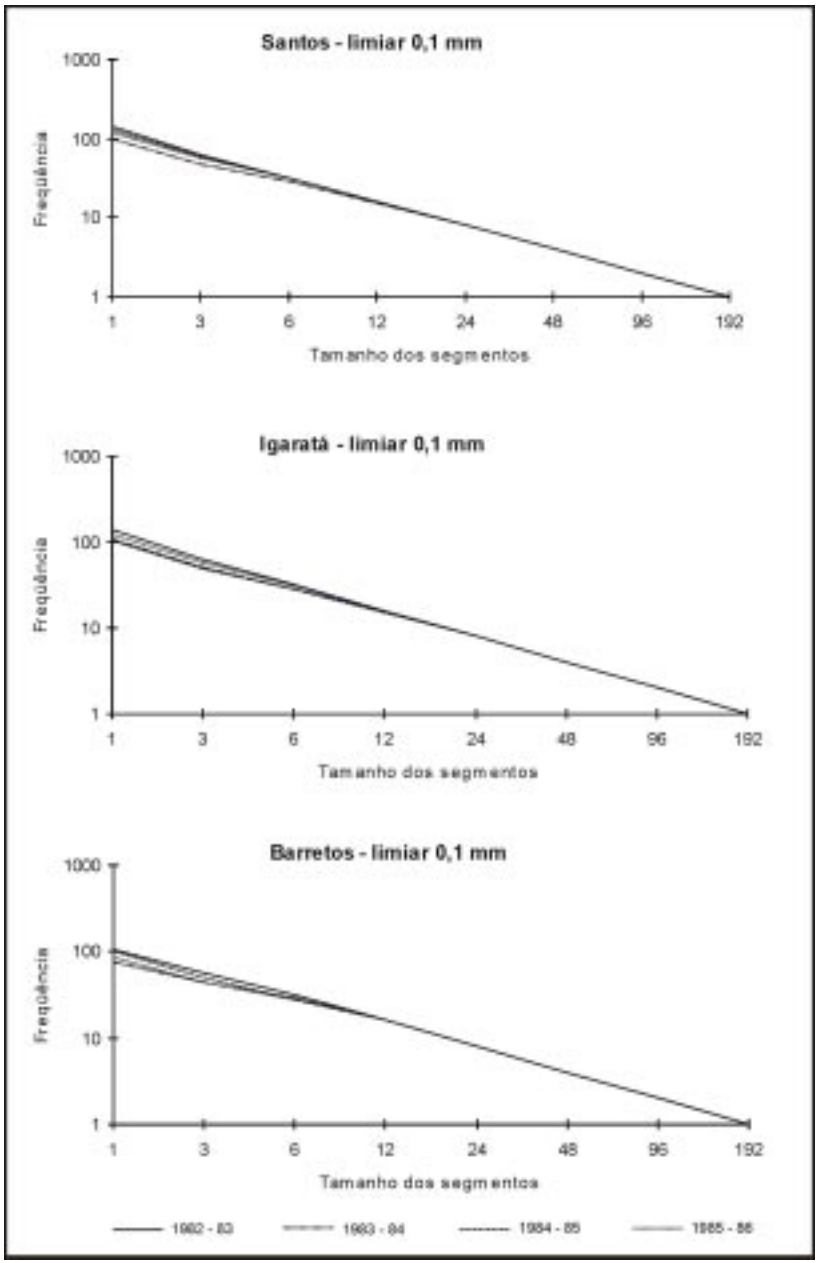


Figura 6 - Representação da freqüência de dias chuvosos por tamanho de segmentos, considerando o limiar de 0,1 mm para as estações chuvosas de 1982-83, 1983-84, 1984-85 e 1985-86, para as localidades de Piracicaba, Adamantina e Taquarituba.

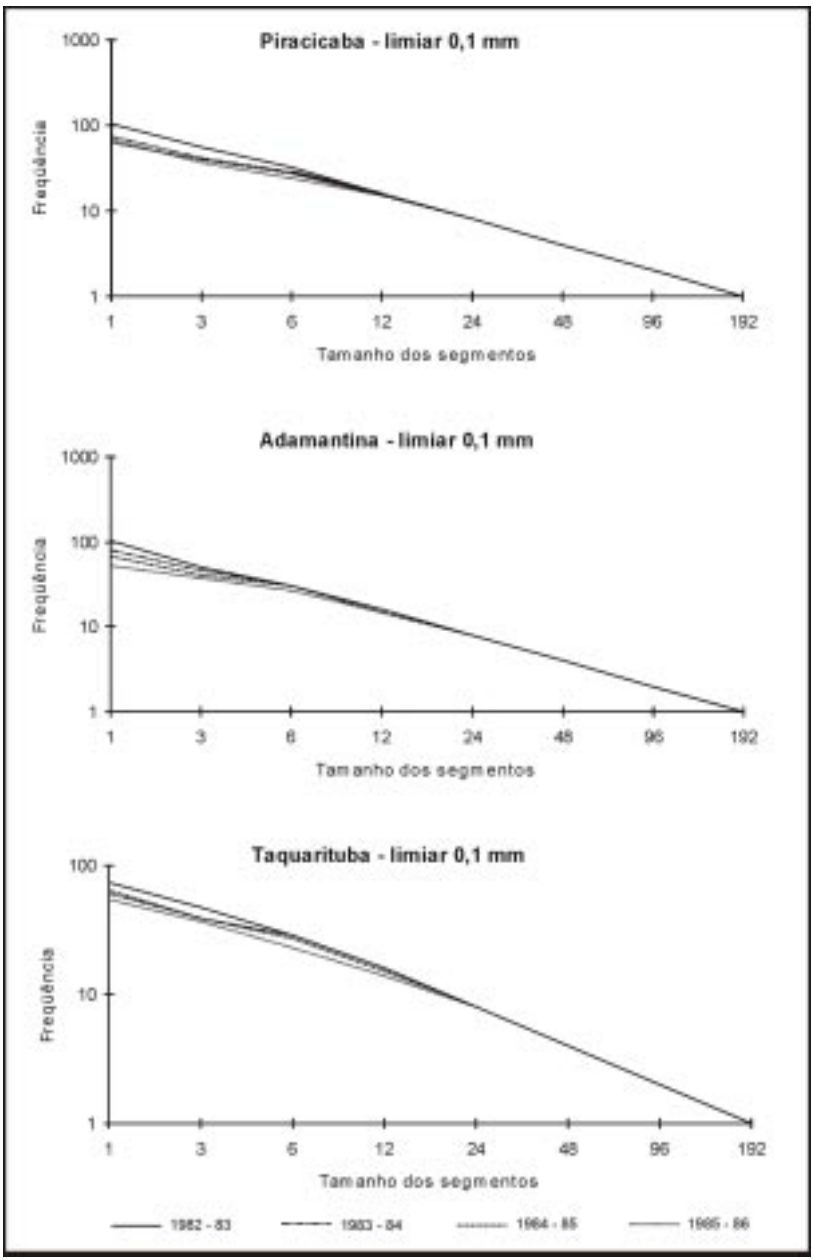
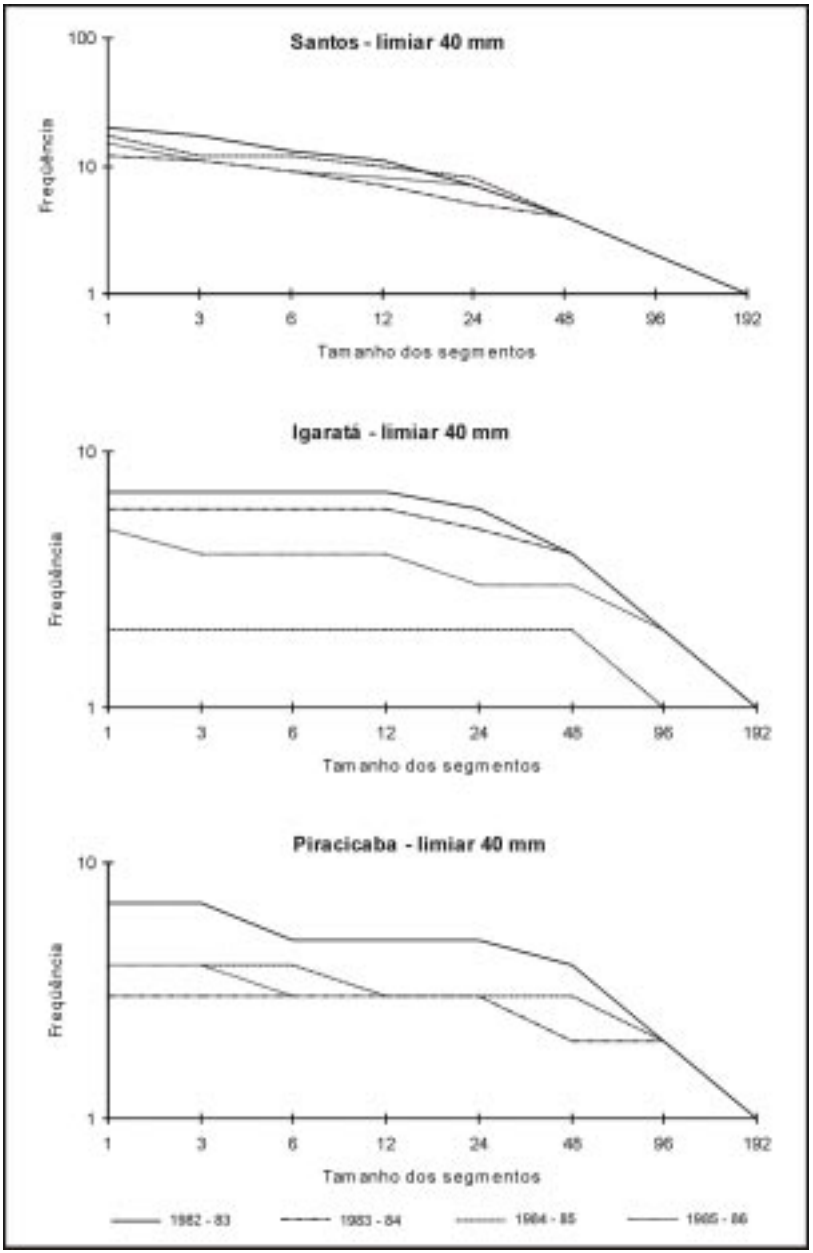


Figura 7 - Representação da freqüência de dias chuvosos por tamanho de segmentos, considerando o limiar de 40 mm para as estações chuvosas de 1982-83, 1983-84, 1984-85 e 1985-86, para as localidades de Santos, Igaratá e Piracicaba



Ao analisarmos os mapas confeccionados, a primeira constatação feita é a de que os valores da dimensão fractal decaem de acordo com o aumento do limiar utilizado. Isso é óbvio, pois o limiar de 0,1 mm engloba todas as ocorrências chuvosas; já o de 40 mm engloba apenas os acontecimentos iguais ou superiores a este valor, já um tanto elevado, cujas freqüências são certamente menores (é mais rara a chuva de alta magnitude em relação às quantidades com valores menores). Também os valores decaem quanto mais seca é a estação; aliás, ela é mais seca em função justamente da menor freqüência de chuvas, que irá se refletir no total pluviométrico.

Para o limiar de 0,1 mm foram obtidos os seguintes valores: na estação chuvosa considerada muito úmida (82/83), a dimensão fractal ficou entre 0,84 e 1 (ou seja, em certos pontos todos os dias foram registradas precipitações, atingindo o valor 1 - *figura 8*); nas estações chuvosas consideradas normais (83/84 e 84/85, a primeira representada na *figura 9*), a dimensão fractal permaneceu na faixa entre 0,75 e 0,975; já na estação chuvosa considerada como pouco úmida (85/86, *figura 10*), os valores giraram em torno de 0,725 a 0,975.

Para o limiar de 5 mm, os valores se reduzem: em 82/83 (*figura 11*), a dimensão fractal encontra-se na faixa de 0,75 a 0,9; em 83/84 (*figura 12*) e 84/85, de 0,675 a 0,85; e em 85/86 (*figura 13*), de 0,65 a 0,825. A redução continua para o limiar de 10 mm: em 82/83, de 0,65 a 0,85; em 83/84 e 84/85, de 0,55 a 0,80; e em 85/86, de 0,525 a 0,775. Os valores caem ainda mais no limiar de 20 mm: em 82/83 (*figura 14*), giram em torno de 0,45 a 0,725; em 83/84 (*figura 15*) e 84/85, de 0,35 a 0,725; e em 85/86 (*figura 16*), de 0,3 a 0,65.

Percebe-se que a largura da faixa que compreende os valores vai aumentando também, existindo extremos mais díspares à medida que se aumenta o limiar. Basta observar os valores obtidos para o limiar de 40 mm: em 82/83 (*figura 17*), a dimensão fractal fica entre 0,05 e 0,55; em 83/84 (*figura 18*) e 84/85, entre 0 e 0,55 (o valor zero significa que não houve ou tenha ocorrido apenas um evento igual ou superior a este limiar, em determinados locais); e em 85/86 (*figura 19*), entre 0 e 0,5.

Fazendo-se a comparação com a tentativa de classificação climática de Monteiro (1973), a qual teve como base o estudo do ritmo pluviométrico através de cartas sinóticas demonstrativas da evolução das massas de ar e frentes (que originaram os gráficos de análise rítmica e os índices de participação das massas de ar), nota-se que os mapas, olhados em conjunto, exibem semelhanças entre a distribuição da dimensão fractal e a caracterização das unidades e subunidades climáticas do Estado de São Paulo descritas por aquele autor. Tais semelhanças e as comparações foram possibilitadas pelo fato da utilização de anos-padrão, tanto no trabalho de Monteiro como neste, apesar de os períodos examinados não terem sido os mesmos.

Em linhas gerais (não levando em consideração especificamente um limiar), os mapas mostram que a dimensão fractal é normalmente mais alta no Litoral Centro-Sul, região descrita por Monteiro (1973) como sendo a mais chuvosa do Estado e talvez do país, devido à freqüência elevada das penetrações polares que originam chuvas frontais associadas à orografia. Outras regiões com dimensão fractal alta e que também são descritas por esse autor como bastante chuvosas (pelo menos em relação ao seu entorno) são: o centro-norte do Vale do Paraíba e adjacências, como a Serra da Bocaina (região de Cunha) e a Mantiqueira (região de Campos do Jordão); a Serra da Mantiqueira próxima a São Paulo (região de Igaratá). A orografia influencia nestes resultados, ao que tudo indica. As áreas mais secas verificadas foram, em geral, o extremo oeste, o Pontal do Paranapanema, as regiões de Bauru e Marília, o sul da Depressão Periférica e o vale do Tietê, na região de Porto Feliz (“percée”).

No oeste, normalmente a dimensão fractal esteve entre as menores verificadas, e pode-se fazer a relação “quanto mais a oeste, mais seco é o clima”; basta verificar os mapas dos totais pluviométricos das estações chuvosas (*figuras 20, 21 e 22*),

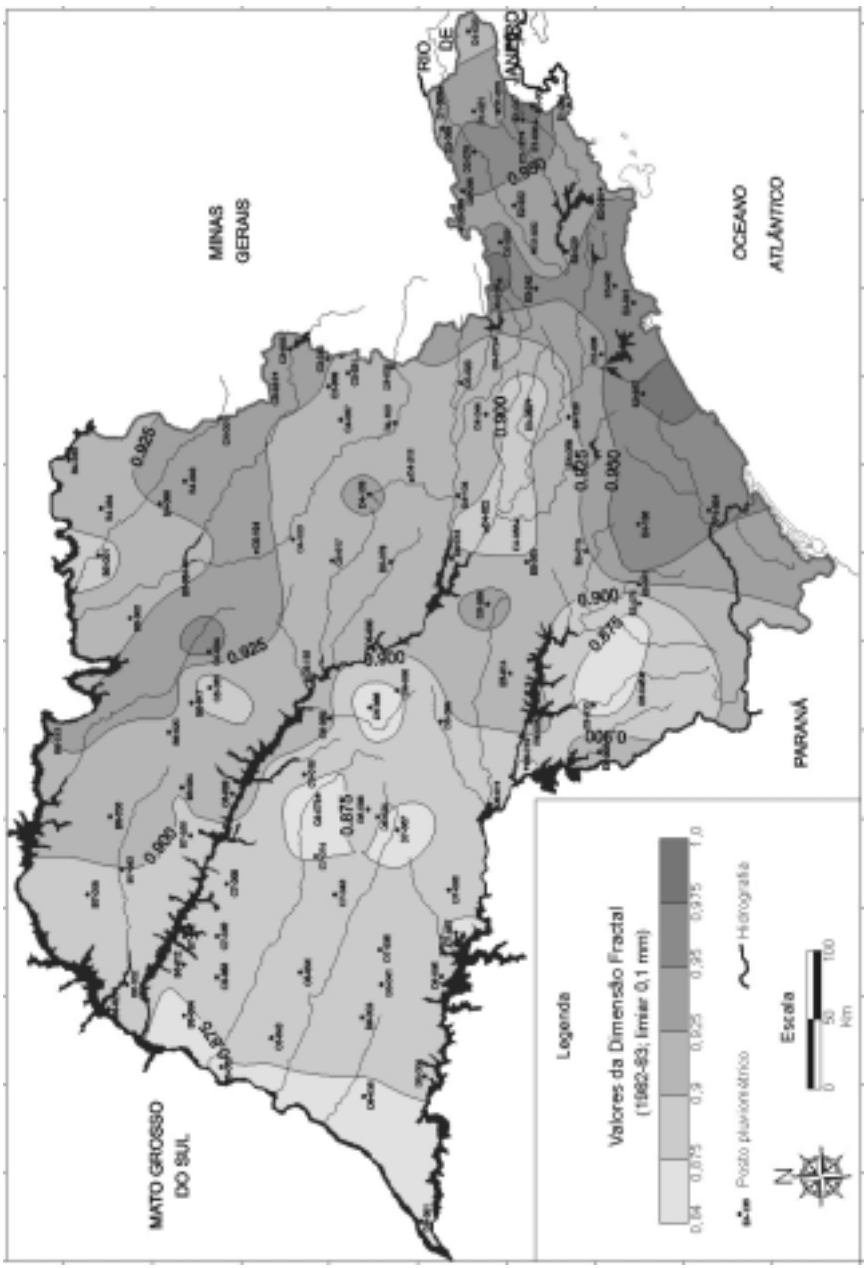


Figura 8 - Dimensão fractal para o limiar de 0,1 mm de chuva, no período de 1982-83, no Estado de São Paulo

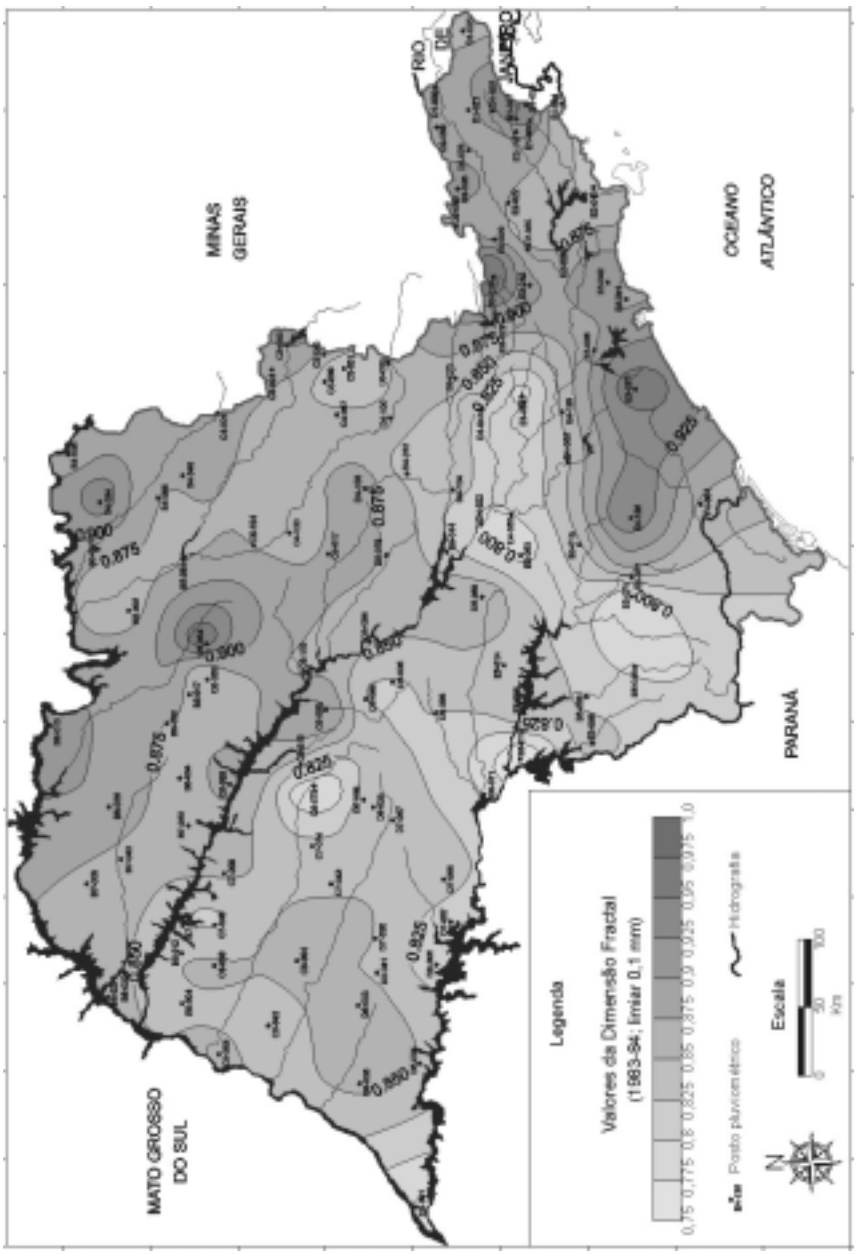


Figura 9 - Dimensão fractal para o limiar de 0,1 mm de chuva, no período de 1983-84, no Estado de São Paulo.

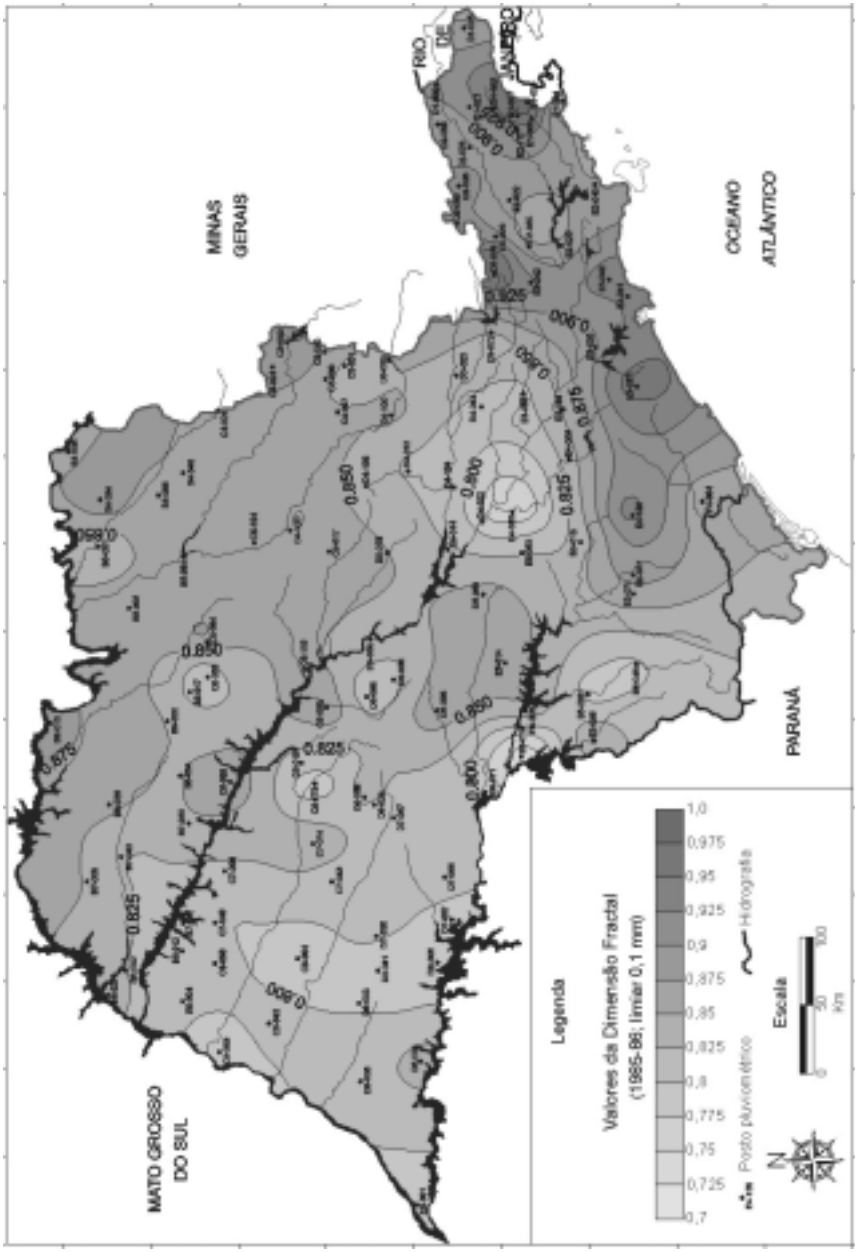


Figura 10 - Dimensão fractal para o limiar de 0,1 mm de chuva, no período de 1985-86, no Estado de São Paulo.

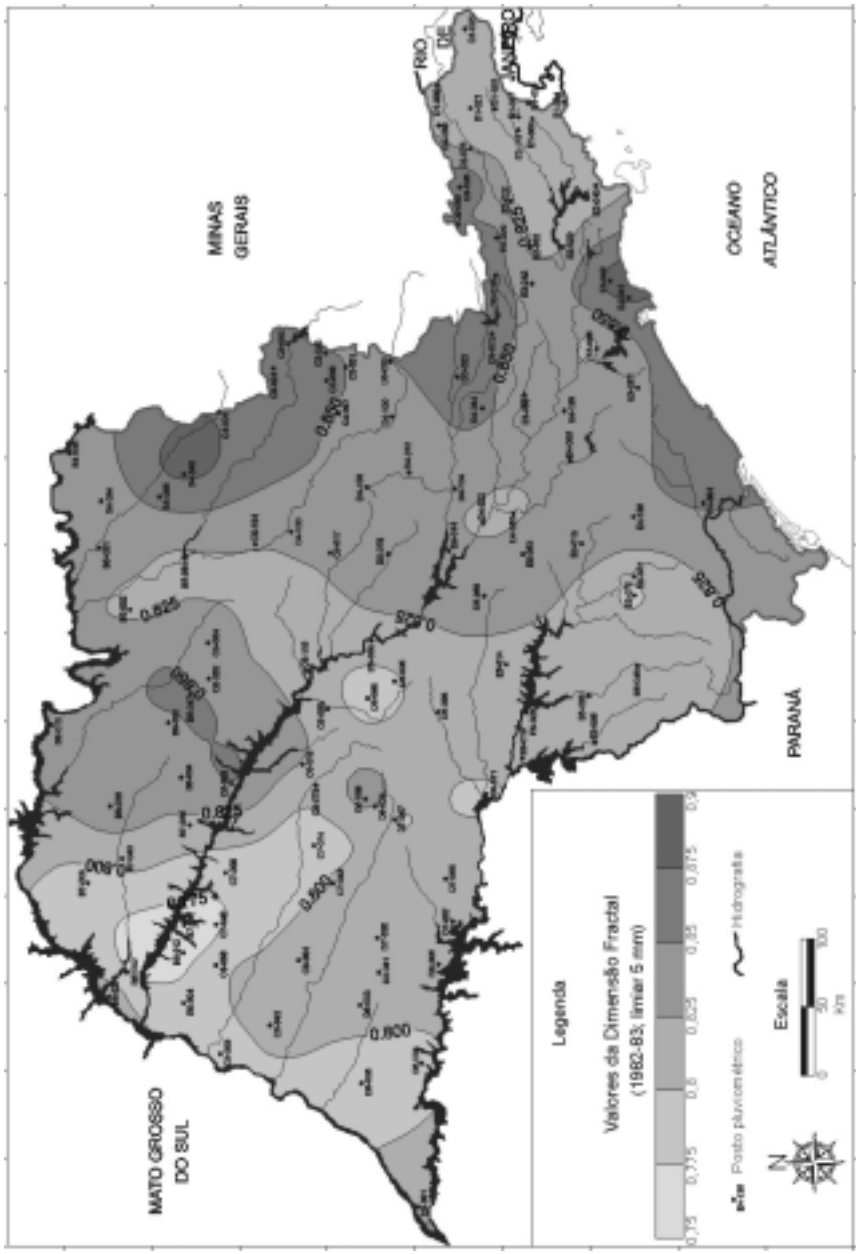


Figura 11 - Dimensão fractal para o limiar de 5 mm de chuva, no período de 1982-83, no Estado de São Paulo

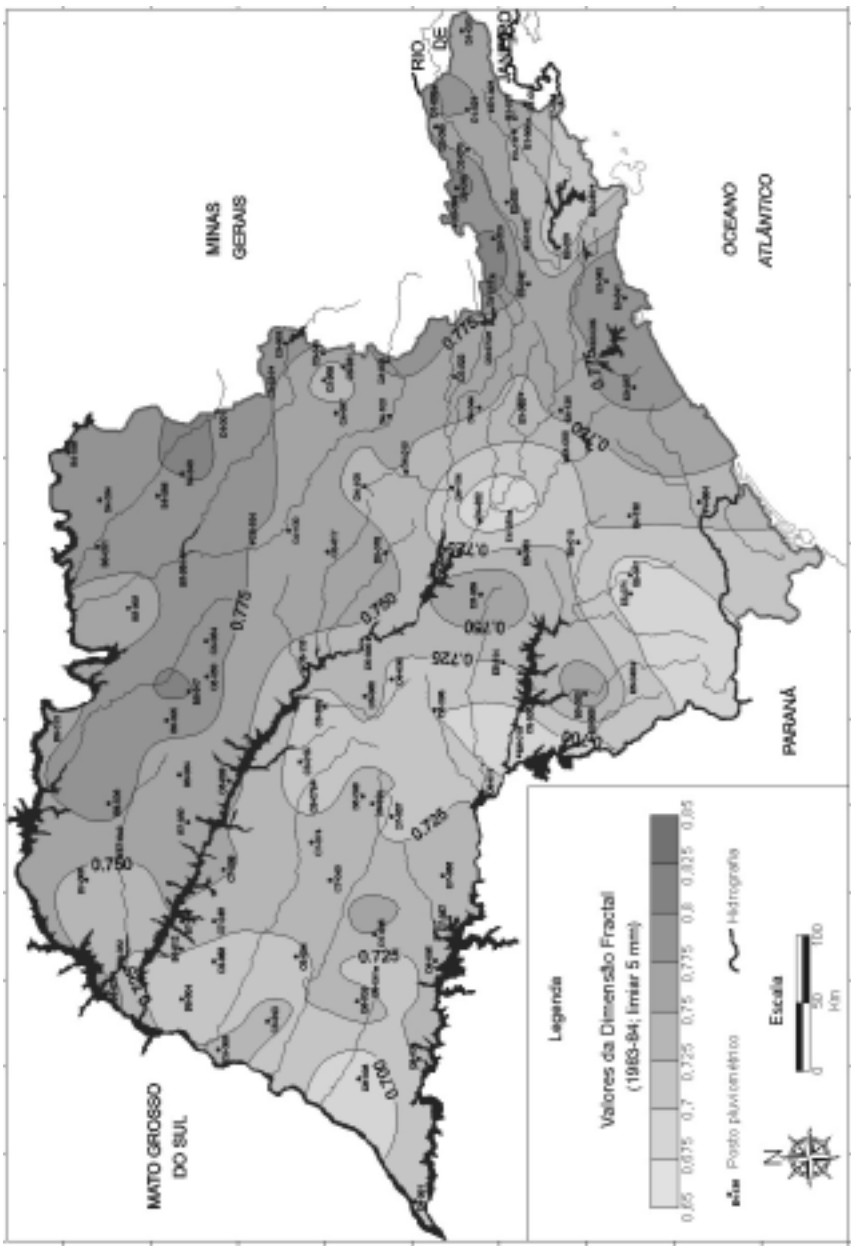


Figura 12 - Dimensão fractal para o limiar de 5 mm de chuva, no período de 1983-84, no Estado de São Paulo

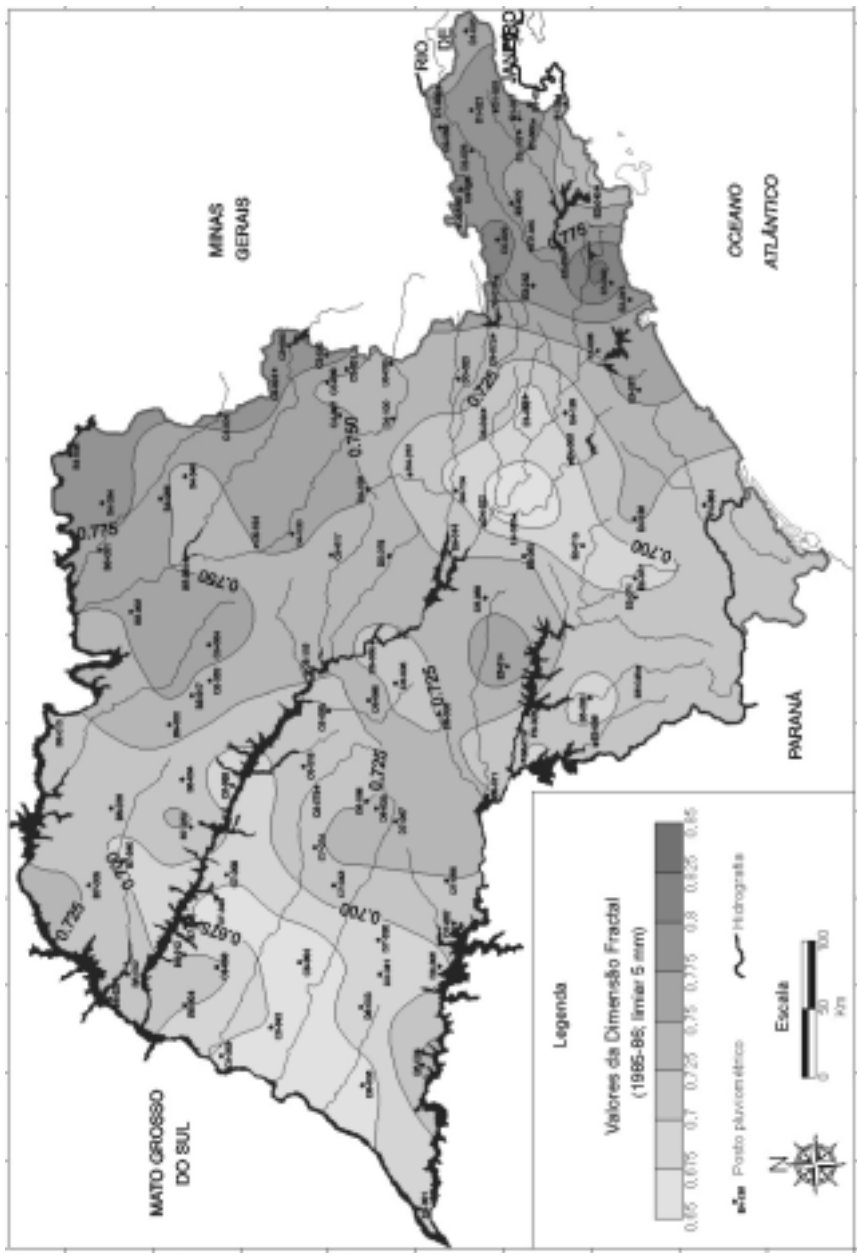


Figura 13 - Dimensão fractal para o limiar de 5 mm de chuva, no período de 1985-86, no Estado de São Paulo

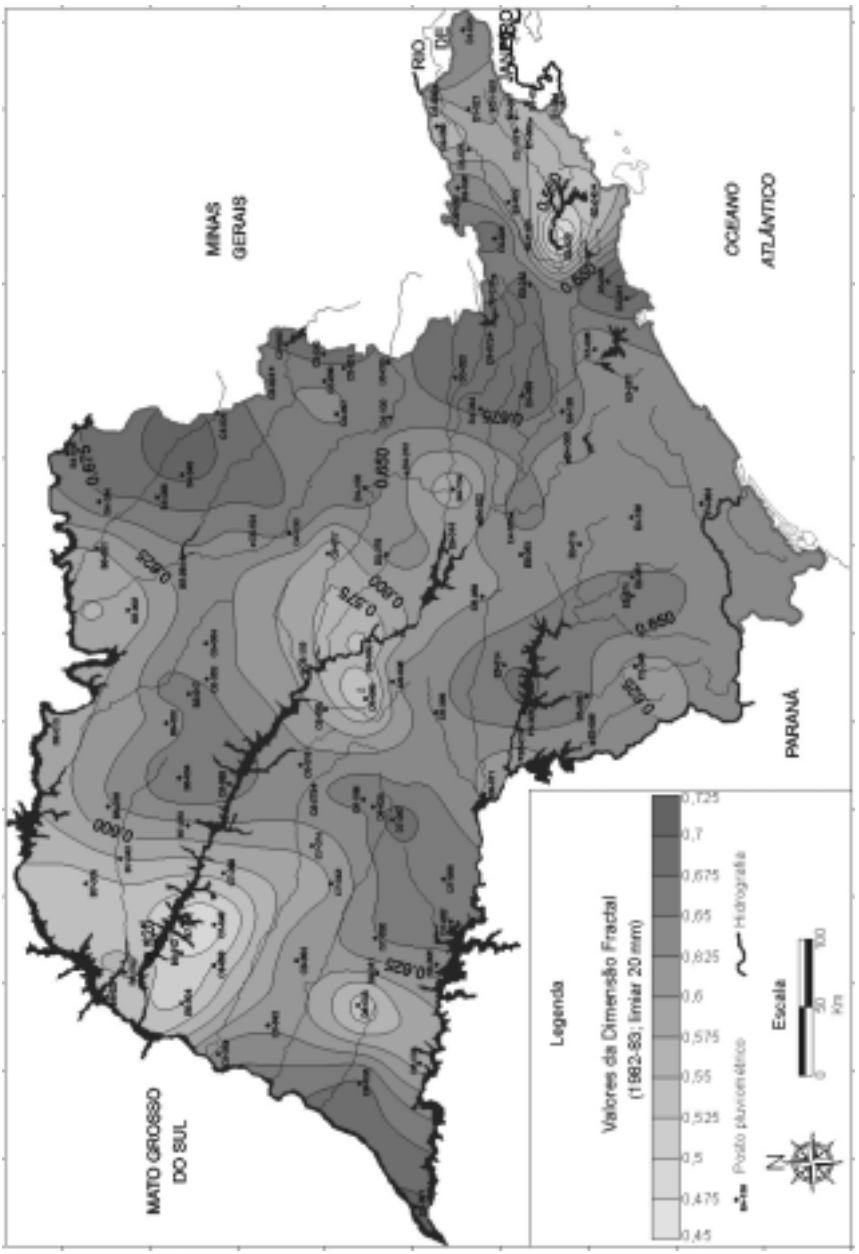


Figura 14 - Dimensão fractal para o limiar de 20 mm de chuva, no período de 1982-83, no Estado de São Paulo.

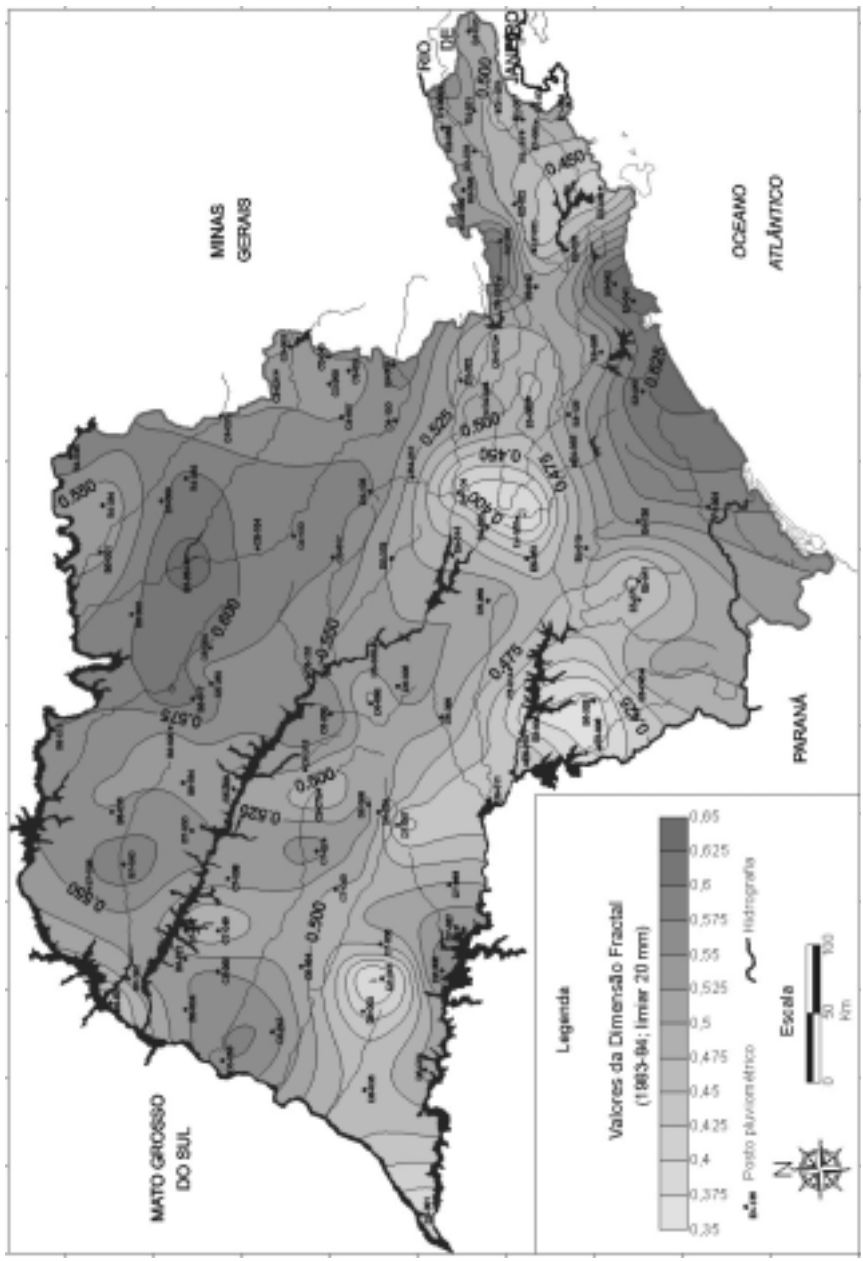


Figura 15 - Dimensão fractal para o limiar de 20 mm de chuva, no período de 1983-84, no Estado de São Paulo

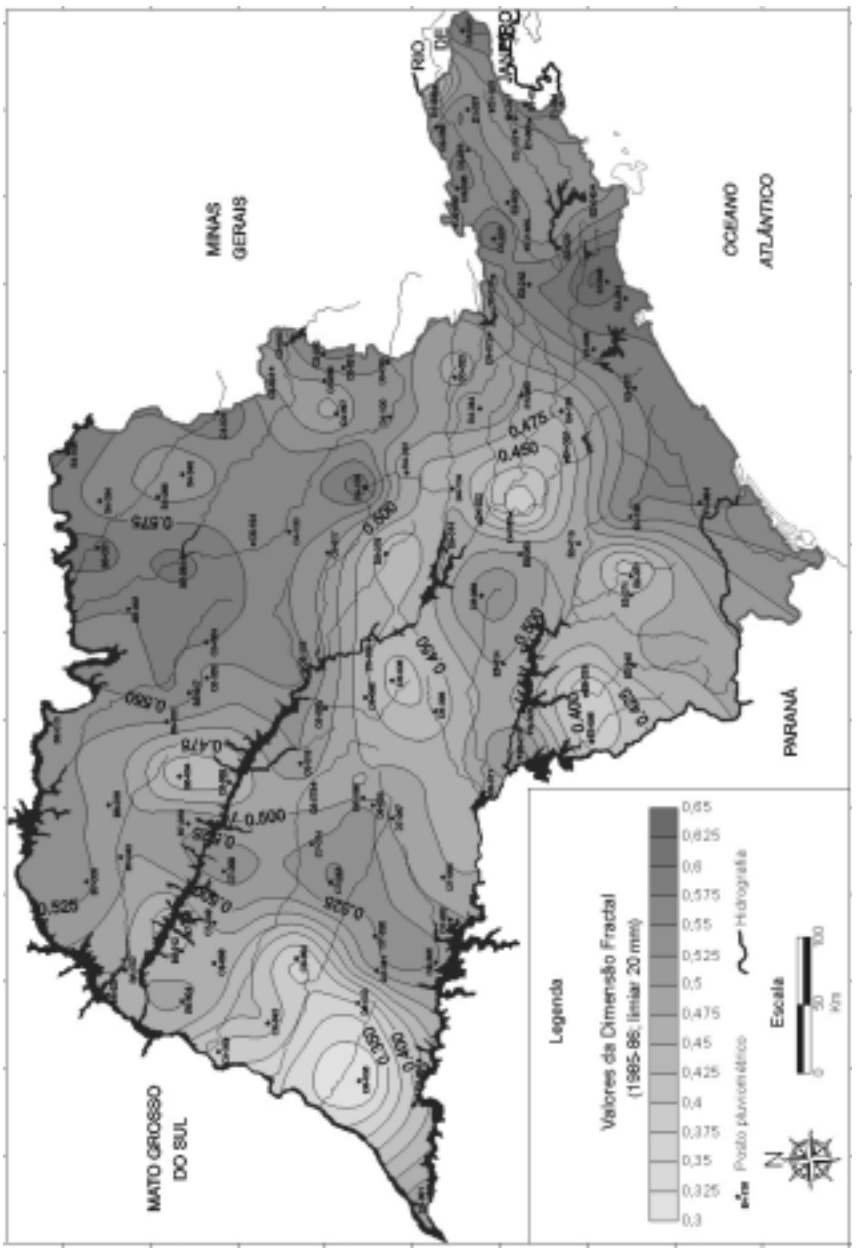


Figura 16 - Dimensão fractal para o limiar de 20 mm de chuva, no período de 1985-86, no Estado de São Paulo

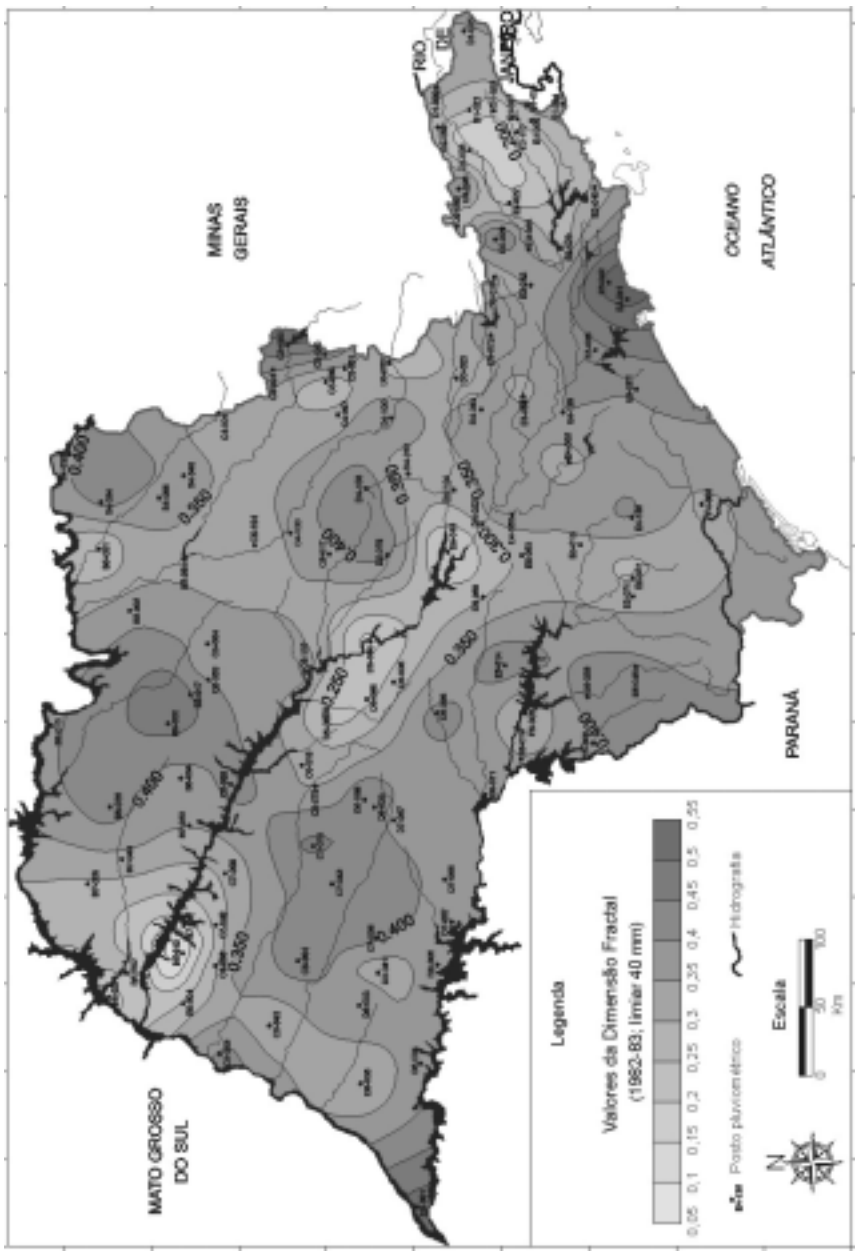


Figura 17 - Dimensão fractal para o limiar de 40 mm de chuva, no período de 1982-83, no Estado de São Paulo

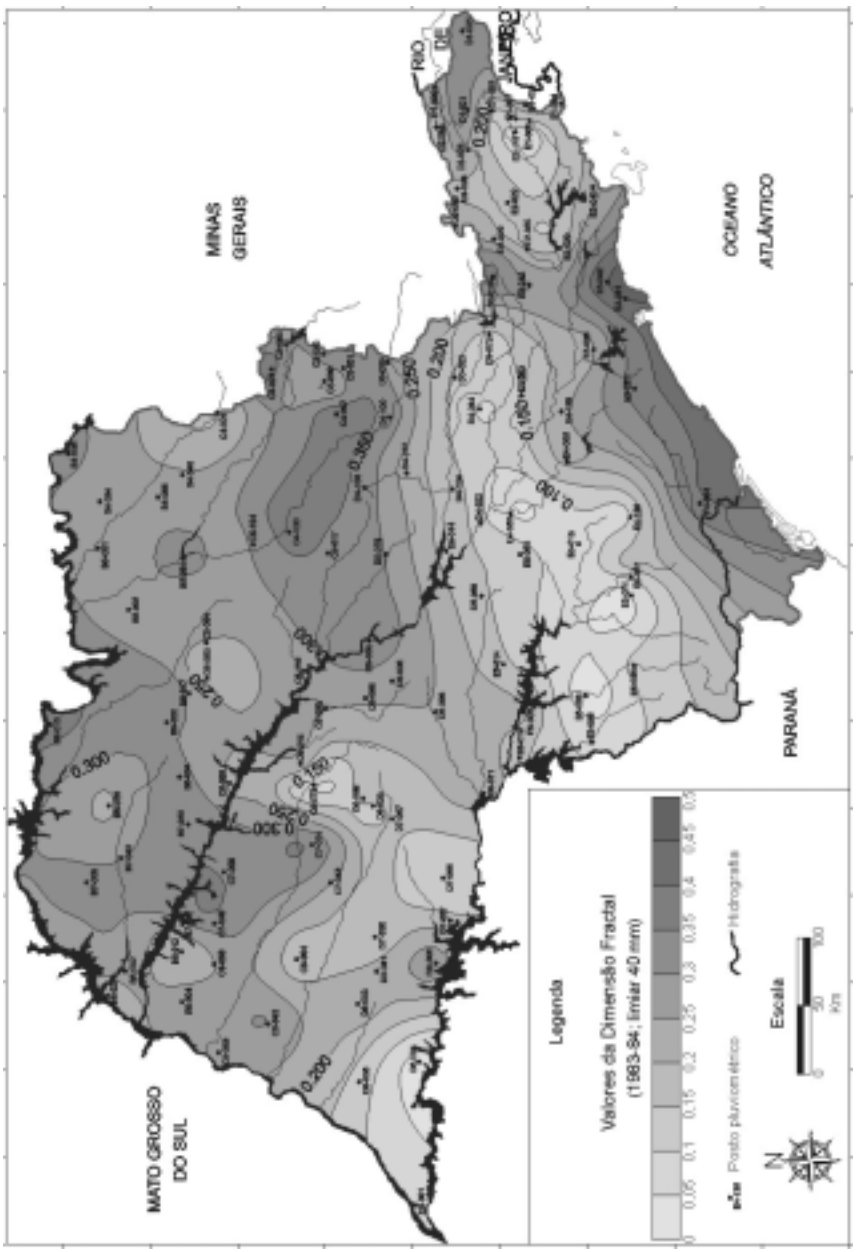


Figura 18 - Dimensão fractal para o limiar de 40 mm de chuva, no período de 1983-84, no Estado de São Paulo

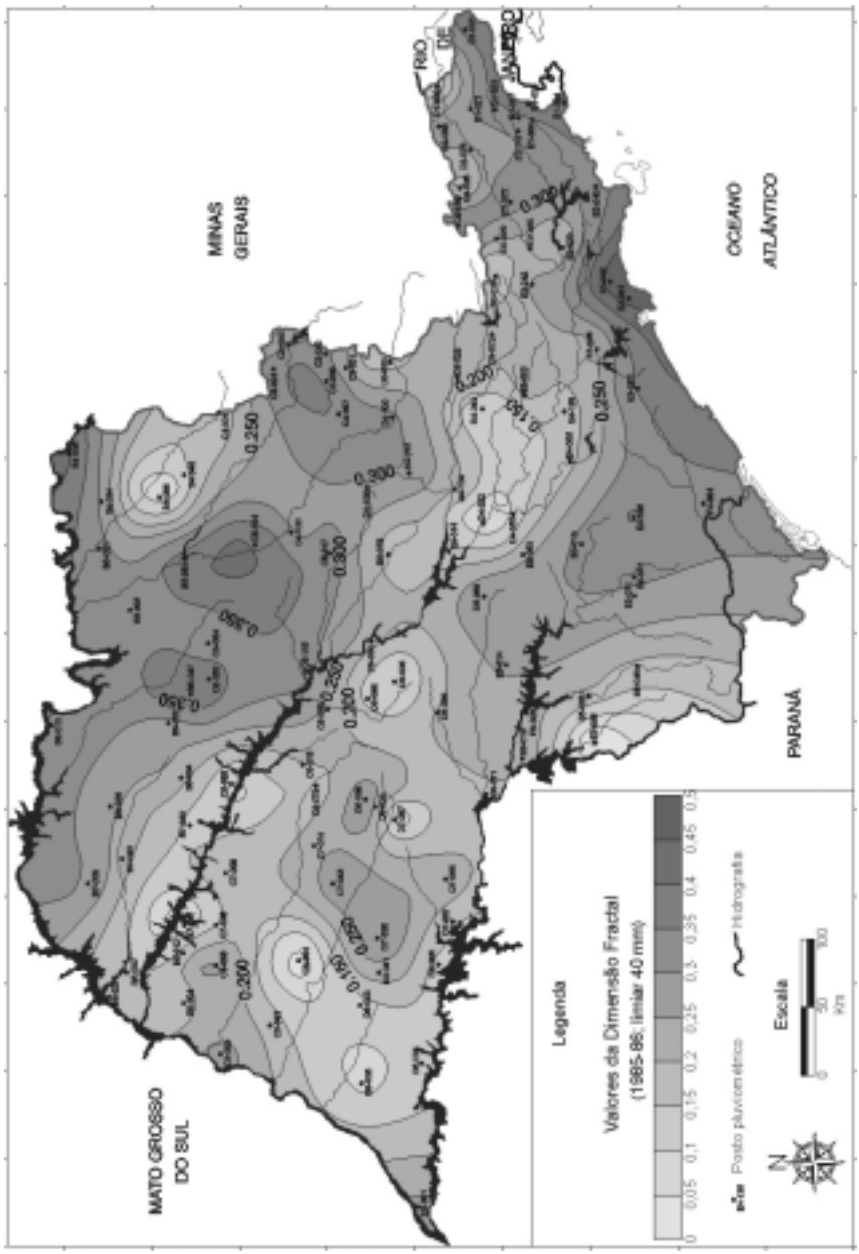


Figura 19 - Dimensão fractal para o limiar de 40 mm de chuva, no período de 1985-86, no Estado de São Paulo

embora haja variações entre os limiares. Uma variação bastante perceptível é a diminuição do valor da dimensão fractal das regiões do Vale do Paraíba e da Serra da Bocaina sob os limiares de 20 e 40 mm, regiões essas que sempre tiveram valores altos sob os outros limiares; ou seja, nesses locais, as chuvas são menos torrenciais.

A partir do limiar de 5 mm, os índices da dimensão fractal do norte do Estado e da Mantiqueira se aproximam dos índices do Litoral Centro-Sul, os maiores, revelando chuvas mais concentradas ou torrenciais naquelas regiões. No limiar de 40 mm, as áreas com maior dimensão fractal oscilam muito: somente o litoral central consta sempre com valores altos em todos os períodos; o norte (em geral) e o centro-leste (regiões de Casa Branca, Vargem Grande do Sul) aparecem em seguida. A região da unidade climática denominada Sudoeste tem maior freqüência do que a circunvizinhança somente para os maiores limiares (sobretudo 40 mm); no entanto, isso é variável. Esta unidade apresentou dados que contradizem as observações de Monteiro (1973), sendo chuvosa apenas no período de 1982-83 e poucas vezes fora mais úmida do que a unidade do Oeste, não chegando a se estender até o Rio do Peixe.

Ficou comprovado, através dos valores da dimensão fractal, que as chuvas são menos freqüentes no Litoral Norte do que na região de Santos, e que a área dos formadores do Rio Paraíba é mais seca do que a da Serra da Bocaina, dentro da região do Planalto Atlântico Norte. Igualmente ficou claro que a Serra da Mantiqueira possui clima mais úmido em relação à área localizada a oeste de sua posição. Para a diferenciação entre o Planalto Atlântico Norte e o Litoral Norte seriam necessários mais postos nas duas áreas, além de uma escala cartográfica maior.

A Depressão Periférica normalmente apresentou duas áreas com dimensão fractal inferior ao seu entorno: uma delas coincide com a unidade da Percée do Tietê, referida por Monteiro como seca em relação às áreas circunvizinhas; a outra, coincidiu com o Vale do Paranapanema, limítrofe ao Planalto Atlântico Sul, também referida por aquele autor como mais seca em relação ao entorno.

Um aspecto ressaltado por Monteiro (1973) e que igualmente foi verificado nos mapas é o da maior freqüência de chuvas na porção norte do Estado em comparação com o oeste, ambas as porções situadas sobre o Planalto Ocidental. Da mesma forma, a dimensão fractal na porção norte é maior do que nas outras fácies da unidade denominada de Centro-Norte. Estas, por sua vez, já não puderam ser bem identificadas, pois o índice de chuvas foi aparentemente semelhante entre as duas conforme os mapas de dimensão fractal e de pluviosidade total; para que pudessem ser individualizadas, seria também necessária uma rede de postos maior, pois, junto às Cuestas, só foi utilizado o posto de Analândia (D4-108). É importante lembrar que estes mapas referem-se somente à estação chuvosa; para haver uma caracterização climática completa deveria ser realizada a análise dos mapas pluviométricos referentes à estação seca, além de estudos sobre a temperatura e outros elementos.

O Planalto Atlântico Sul e o Litoral Sul apresentaram índices de dimensão fractal superiores aos verificados a norte, porém inferiores aos do Litoral Central, o que também ratifica a classificação de Monteiro (1973). A Grande São Paulo ora está sob índices de dimensão fractal iguais aos do litoral, ora sob índices iguais aos do Planalto Atlântico Sul e Vale do Paraíba. As diferenças entre estas três unidades também não puderam ser percebidas, sendo para isso necessárias uma quantidade de postos maior e uma escala de mapeamento também maior.

A unidade denominada por Monteiro (1973) como “Serra de Botucatu e faixa meridiana de transição” aparentemente existe, pois em vários mapas da dimensão fractal determinadas porções do centro-oeste paulista assumiram valores diferentes sempre, ora superiores ao seu entorno, ora inferiores (caso mais comum), dando a impressão de realmente constituírem uma faixa de transição.

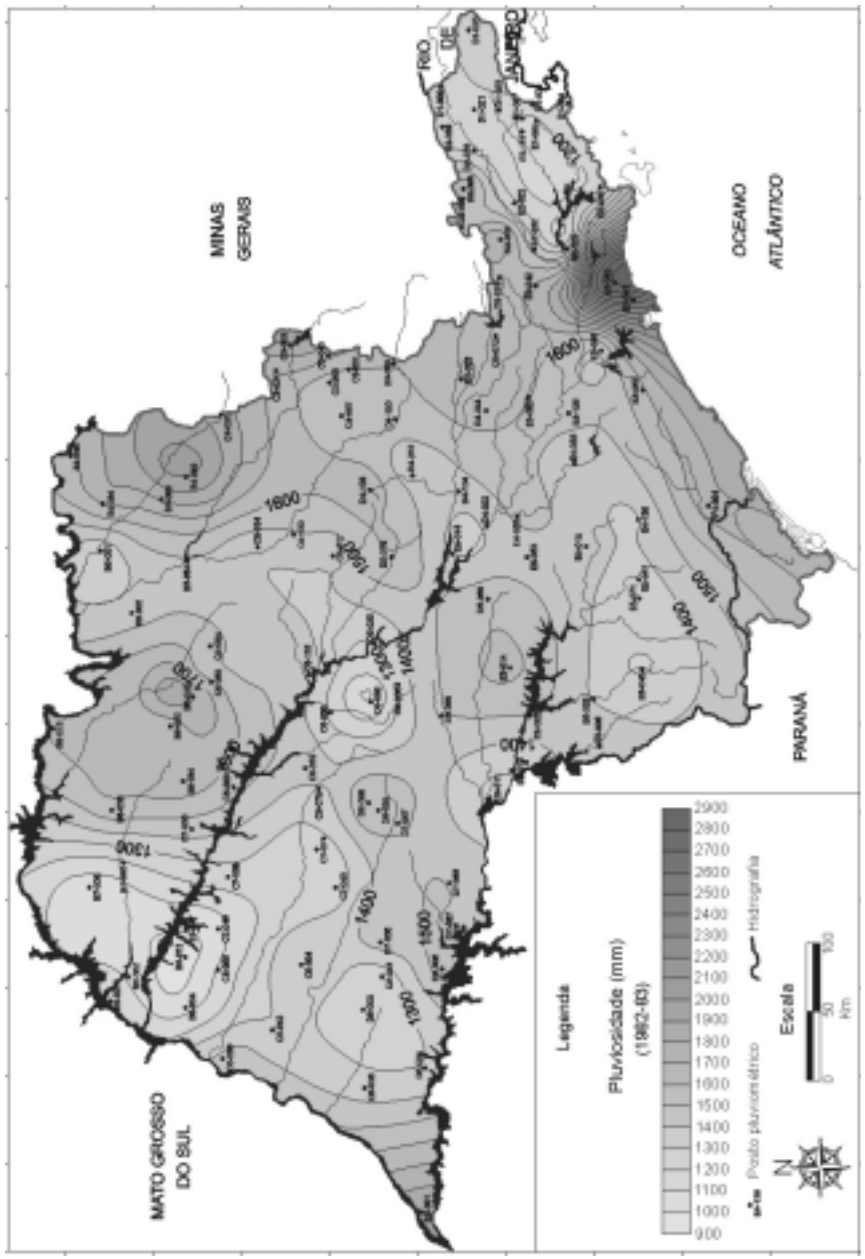


Figura 20 - Pluviosidade total, em mm de chuva, da estação chuvosa do período de 1982-83, no Estado de São Paulo

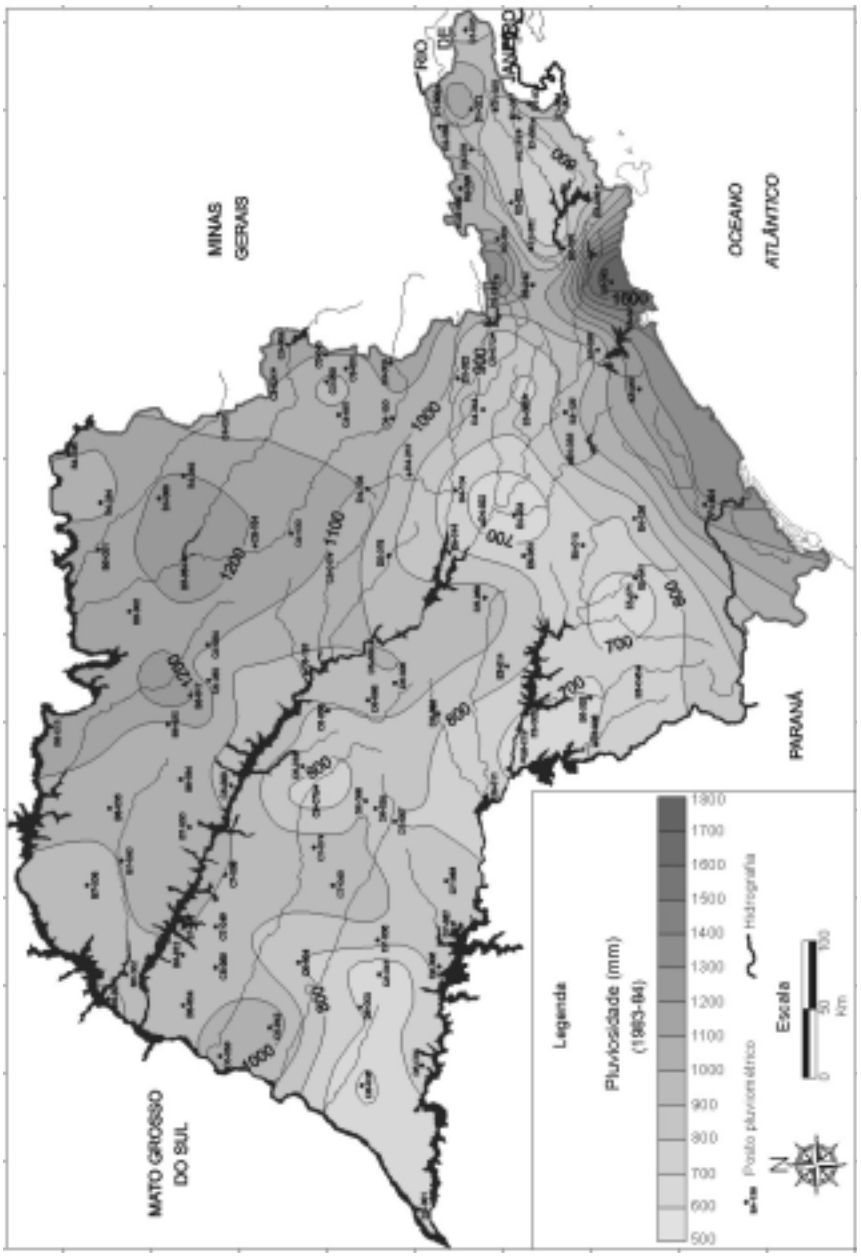


Figura 21 - Pluviosidade total, em mm de chuva, da estação chuvosa do período de 1983-84, no Estado de São Paulo

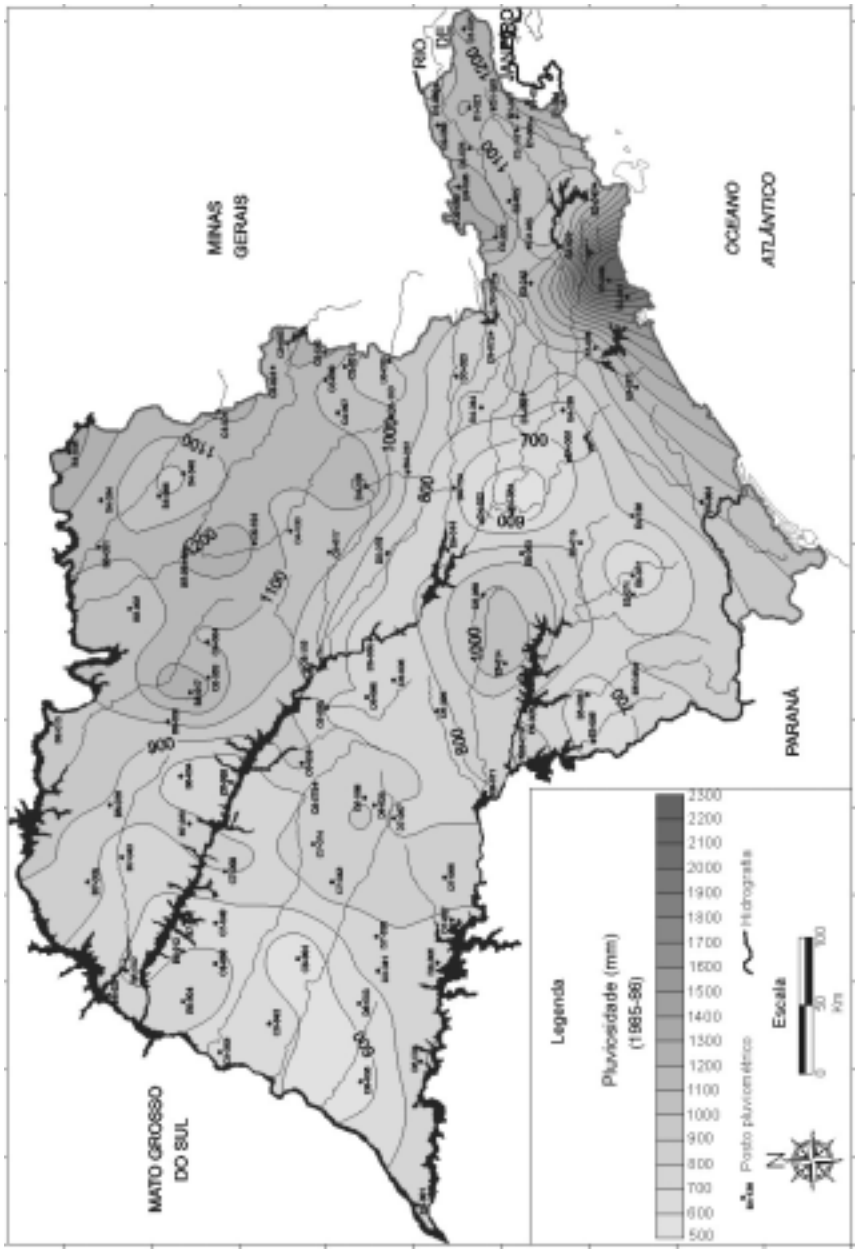


Figura 22 - Pluviosidade total, em mm de chuva, da estação chuvosa do período de 1985-86, no Estado de São Paulo

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do mapeamento da dimensão fractal — categoria de medição ligada à pluviosidade, nesta pesquisa — produziram semelhanças bastante evidentes em relação à descrição dos climas do Estado de São Paulo realizada por Monteiro (1973), que foi pautada sobretudo pela análise do ritmo pluviométrico. Desta forma, a dimensão fractal comprovou-se aplicável como sendo um parâmetro quantitativo para a análise rítmica, não apenas no aspecto temporal, mas também na espacialização dos dados.

A dimensão fractal pluviométrica, por si mesma, não explica a gênese das chuvas, mas exprime numericamente o ritmo. Ela mostra indiretamente a relação entre os tipos de tempo de um lugar e as massas de ar, através do ritmo representado por seu valor numérico — quanto maior, também o retorno aos mesmos estados atmosféricos (chuvosos e com determinada magnitude) é mais rápido.

Conforme verificado na revisão bibliográfica, não há grandes diferenças térmicas entre os climas regionais (controlados por massas tropicais, e por massas tropicais e polares); elas são mais evidentes no grau dos abaixamentos de temperatura produzido nas “ondas de frio”. Daí a chuva ser o principal diferenciador das unidades climáticas definidas por Monteiro (1973), o que se refletiu nas semelhanças verificadas para com os mapas da dimensão fractal pluviométrica. Através de uma técnica aplicada à precipitação, pôde-se fazer inferências a respeito do clima: ficou clara a utilidade da abordagem fractal para a Climatologia e, por conseguinte, para a Geografia. Um subsídio com dados numéricos diretos para futuros mapeamentos de classificação climática.

Os mapas também mostraram o efeito orográfico exercido pelo relevo mais elevado em relação às adjacências, junto à freqüência das chuvas, pela coincidência entre altos valores de dimensão fractal e áreas sabidamente mais elevadas (serras, escarpas de planaltos, etc.). Entretanto, somente esse efeito não explica toda a situação pluviométrica de determinada região, pois às vezes ele provavelmente é neutralizado: a zona fronteiriça entre o Planalto Ocidental e a Depressão Periférica não apresenta aumentos na freqüência das chuvas, acontecendo talvez em apenas áreas bastante restritas, podendo a orografia refletir-se apenas na intensidade e/ou no total das chuvas e não na freqüência das mesmas.

Por todos os resultados verificados, acreditamos que os objetivos deste trabalho foram atingidos satisfatoriamente, tendo sido aberto um novo campo para pesquisas mais exatas a respeito da freqüência das chuvas e sua inserção no contexto climático espacializado.

REFERÊNCIAS

CHRISTOFOLETTI, A. L. H. **Análise fractal e multifractal da estrutura de estações chuvosas em localidades do Estado de São Paulo.** 1997. Tese (doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1997.

CHRISTOFOLETTI, A. L H.. **Estudo sobre a sazonalidade da precipitação na Bacia do Piracicaba (SP)**. 1991. Dissertação (mestrado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas – Universidade de São Paulo, 1991.

GLEICK, J. **Caos**: a criação de uma nova ciência. Rio de Janeiro: Campus, 1990.

GUERRINI, I. A. **Caos e fractais em Física Aplicada**. Botucatu: IB/Unesp, 1996. Apostila.

LAM, N. S. N.; DE COLA, L. **Fractals in Geography**. New Jersey: PTR Prentice-Hall, 1993..

LORENZ, E. N. **A essência do caos**. Tradução de Cláudia Bentes David. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1996.

MANDELBROT, B. B. **The fractal geometry of nature**. New York: W. H. Freeman and Company, 1983.

MONTEIRO, C. A. F. **A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo**: estudo geográfico sob a forma de atlas. São Paulo: IG/USP, 1973.

_____. **A Frente Polar Atlântica e as chuvas de inverno na fachada Sul-Oriental do Brasil** (contribuição metodológica à análise rítmica dos tipos de tempo no Brasil). São Paulo: IG/USP, 1969. (Série Teses e Monografias, n. 1).

_____. Da necessidade de um caráter genético à classificação climática (algumas considerações metodológicas a propósito do estudo do Brasil Meridional). **Revista Geográfica**, Rio de Janeiro, v. 31, n. 57, p. 29-44, 1962.

_____. O clima da Região Sul. In: FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Geografia do Brasil**: Grande Região Sul. Rio de Janeiro, 1963, V.4, Tomo 2, p. 117-149.

_____. Sobre um índice de participação das massas de ar e suas possibilidades de aplicação à classificação climática. **Revista Geográfica**, Rio de Janeiro, v. 33, n. 61, p. 59-69, 1964.

OLSSON, J. **Scaling and fractal properties of rainfall**. Lund, Universituy of Lund/ Departament of Water Resources Engineering, 1996, (Report 1014).

OLSSON, J.; NIEMCZYNOWICZ, J.; BERNDTSOON, R.; LARSON, M. An analysis of the rainfall time structure by box counting: some practical implications. **Journal of Hydrology**, Nova Iorque, v. 137, n. 1-4, p. 261-277, 1992.

PÉDELABORDE, P. **Le climat du Bassin Parisien**: essai d'une méthode rationelle de climatologie physique. Paris: Editions M. T. Leinin/Librairie Medicis, 1957.

PEITGEN, H. O.; JURGENS, H.; SAUPE, D. **Chaos and fractals**: new frontiers of science. New York: Springer Verlag, 1992.

Recebido em março 2002
Aceito em junho 2002