

REFLEXÕES METODOLÓGICAS SOBRE A UTILIZAÇÃO DOS ÍNDICES GEOMÉTRICOS E TOPOLÓGICOS NA ANÁLISE ESPACIAL DE CLASSIFICAÇÕES DE IMAGENS LANDSAT, ESTUDO DE CASO APLICADO AO MUNICÍPIO DE UBATUBA, SP, BRASIL

Jérôme FOURNIER¹
Andrea C. PANIZZA²
Ailton LUCHIARI³

Resumo

A nova geografia, que surgiu nos anos 1960, orientou pesquisas sobre fenômenos quantificáveis e, portanto, quantificados. Surgida desse movimento, a análise espacial permite descrever e quantificar as propriedades espaciais de uma área. Ela se baseia em dois tipos de medidas, a das formas que revelam a geometria, e a das relações espaciais entre os objetos que revelam a topologia. O município de Ubatuba, SP, é o sítio experimental. A análise das cartas temáticas originadas de classificações de imagens de satélite não é suficiente para o estudo da dinâmica espacial. Por isso, diferentes índices geométricos e topológicos foram aplicados sobre a mancha urbana. Esses índices revelam a complexidade das formas, a agregação, a conexão e a diversidade das manchas urbanas. Apesar de indicarem a estrutura e a geometria das manchas, somente a interpretação contextual revela as características funcionais da paisagem. Essa interpretação revelou para Ubatuba a existência de uma frente pioneira de ocupação.

Palavras-chave: análise espacial; índices espaciais; objeto geográfico; sensoriamento remoto; áreas urbanas.

Abstract

Methodologic reflexions on the use of the geometricals and topologicals index for space analysis of classified images from Landsat, case study applied to Ubatuba, SP, Brazil

The new geography, appeared in the years 1960, directed research towards the quantified and quantifiable phenomena. The space analysis allow describing and quantifying the space properties of an area. Its objective is to show that the analysis of these properties is relevant to understand the characteristics of an area. It is based on two types of measurements, forms which concern geometry and the space relations between objects, which concern topology. The município of Ubatuba is the experimental site. The visual interpretation of the thematical charts from classifications of satellite image is not sufficient to analyse the space dynamics. Several geometrical and topological indices were used on the urban spot. These indices reveal the complexity of the forms, aggregation, connection and diversities of the urban spots. Although they indicate the structure and the geometry of the spots, only a contextual interpretation reveal the functional characteristics of the landscape. This interpretation shows the existence of a pioneer front of occupation in Ubatuba.

Key-words: spatial analysis; space index; geographical object; remote sensing; urban areas.

¹ Pesquisador titular CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) e Institut de Géographie da Université de Paris-Sorbonne; Professor na Ecole Pratique des Hautes Etudes de Paris e Université de Rennes – Doutor e Pós-Doutor em Geografia. E-mail: Jerome.Fournier@ephe.sorbonne.fr

² Doutoranda em Geografia, Laboratório de Aerofotogeografia e Sensoriamento Remoto (LASERE), DGEÓ/USP, São Paulo. Bolsista CAPES. E-mail: apanizza@usp.br

³ Professor Doutor em Geografia e Coordenador do Laboratório de Aerofotogeografia e Sensoriamento Remoto (LASERE), DGEÓ/USP, São Paulo. E-mail: aluchiar@usp.br

INTRODUÇÃO

A geografia tem como um de seus objetivos, o estudo da superfície terrestre e de suas utilizações pelas sociedades humanas. A maneira com que essas sociedades criam seu espaço geográfico pode ser observada através das disparidades nas relações "horizontais" entre os lugares. A análise espacial é o método que permite descrever e quantificar a localização, a disposição, a estrutura e a organização espacial dos objetos geográficos. Essa metodologia foi objeto de estudo de muitos geógrafos anglo-saxões, franceses e brasileiros (BEGUIN, 1979 ; HAGGETT, 1973 ; SANDERS, 1989; PEREIRA JUNIOR; CHRISTOFOLETTI, 2003). O objetivo é demonstrar que o estudo das propriedades espaciais de uma área é válido para a compreensão de suas características. A análise estatística clássica considera que os objetos que compõem o espaço geográfico são elementos independentes; já a análise espacial se interessa, sobretudo às propriedades dos objetos "na qualidade de localizados" (PUMAIN; SAINT-JULIEN, p. 6, 1997). As imagens de sensoriamento remoto são complementares a realização desse objetivo oferecendo uma fonte de informação pertinente sobre os objetos geográficos (VOIRON, 1995). O sensoriamento remoto fornece informações sobre as paisagens na forma de imagens e utilizam a radiação eletromagnética como veículo de informação (NOVO, 1992). O tipo de sensor utilizado e a complexidade da paisagem estudada (por exemplo, paisagem urbana, florestal, agrícola, etc.) determinam a qualidade dos dados obtidos. Para a análise espacial a paisagem é definida como um mosaico heterogêneo composto de manchas em inter-relação e formando mosaicos espaciais (FORMAN; GODRON, 1986). O objeto geográfico é definido, por sua vez, como um componente de um elemento da paisagem situado na superfície terrestre. Ele é dotado de uma superfície caracterizada por um conjunto de valores radiométricos e é delimitado por outros elementos caracterizados por outros valores radiométricos. A forma e a organização dos valores radiométricos dos elementos da paisagem revelam sua identidade, assim como, sua assinatura espectral.

PRESSUPOSTOS TEÓRICOS

Apreensão espacial dos objetos geográficos

A apreensão espacial em uma escala determinada é, na realidade, a combinação do conjunto de escalas maiores. Para apreender os elementos da paisagem, uma escala apropriada deve ser fixada. A escala escolhida deve também ser compatível com o tamanho do menor elemento da imagem (pixel) que fornece a informação sobre o elemento da paisagem. O pixel é a "menor superfície homogênea constitutiva de uma imagem" (ROBIN, 2002, p. 78). Uma imagem pode ser considerada como uma matriz de pixels que representa uma dada realidade. Um objeto geográfico não está, necessariamente, perceptível, mas está representado por pixels organizados de uma certa maneira. Essa organização é estudada pela topologia que descreve o objeto real pela disposição dos pixels utilizando a noção de conectividade (vizinhança). Por exemplo, com uma conectividade de ordem 8, um pixel estabelece uma relação física com seus oito vizinhos, por seus quatro lados e quatro vértices. A análise espacial é possível graças a essa conexão. Podemos definir três principais tipos de organização dos pixels: um pixel isolado, uma região e uma zona. A região é um grupo de pixels conexos em diferentes ordens e com propriedades espectrais similares. Em uma região, sempre existe um "caminho" entre dois pixels. A zona reagrupa várias regiões de um mesmo atributo. As regiões de uma zona são desconectadas umas das

outras. Não existe, assim, "caminho" possível entre dois pixels de duas regiões distintas. Existem várias famílias de indicadores para descrever um objeto, eles se apoiam nas propriedades geométricas e topológicas de uma imagem; são as medidas fundadas na distância, euclidiana ou não, e as medidas fundadas na forma.

Em uma imagem, a representação de um objeto está diretamente ligada a seu tamanho real e ao tamanho do pixel. Robin (2002, p. 93) precisa que a identificação de um objeto necessita de um pixel de tamanho adequado. A detecção de um objeto é possível através de um pixel maior que o objeto, se o contraste desse com seu entorno é suficiente, porém esse objeto não será identificado com precisão e detalhamento. Para a análise de um objeto, isto é, o estudo de suas características, é necessário reduzir consideravelmente o tamanho do pixel e dispor de vários pixels por objeto. Assim, três situações se apresentam: o pixel ultrapassa o tamanho do objeto geográfico; o pixel tem um tamanho muito menor que o objeto geográfico; e, finalmente, o pixel é do mesmo tamanho, ou muito próximo, do objeto geográfico (ROBIN, *op. cit.*). Assim, quando dispomos somente de um tipo de imagem, e, portanto, de uma única resolução espacial, todos os objetos da imagem não são analisáveis. Alguns são somente detectáveis e outros identificáveis. Esse tipo de situação é comum no meio urbano, pois os objetos urbanos possuem tamanhos diferentes (WILMET, 1996). Além disso, a organização espacial e a proporção superfície mineral/superfície vegetal divergem segundo os bairros (BONN, 1996). A temática do estudo deve, então, determinar a escolha da resolução espacial. Com uma imagem de 30 m de resolução (Landsat), não podemos distinguir os detalhes; em contrapartida, o conjunto da mancha urbana poderá ser analisada (FORSTER, 1983).

Dimensão temporal dos objetos geográficos

A dimensão temporal dos objetos geográficos está relacionada com a escala de observação. Modificações pontuais ou em pequenas extensões só são reveladas com a ajuda de uma imagem com pixels de menor resolução espacial, que confere a essa imagem maior poder de resolução, isto é, maior poder em distinguir dois objetos próximos (NOVO, 1995, p.55). Uma imagem de maior resolução espacial pode captar transformações somente em extensões superiores à resolução da imagem. Além disso, a apreensão da transformação depende também da frequência da observação. Certos fenômenos geográficos necessitam de uma frequência elevada de observação, outros não. Em geral, os registros pluri-anuais são suficientes para estabelecer as grandes tendências. Para efetuar uma análise multi-temporal é necessário adequar as resoluções espacial e temporal ao tipo de transformação sofrida pelo objeto geográfico. As transformações podem ser reversíveis ou não: uma extensão urbana é raramente reversível. Graças às imagens de satélite, a cinemática de uma cidade pode ser estudada (LAM, 1990), pois uma imagem registra um instante de uma situação em evolução. A análise multi-temporal da mancha urbana permite conhecer a evolução de seu crescimento, como por exemplo, o acompanhamento do surgimento de novos bairros ou a modificação de objetos urbanos pré-existent.

Princípios da análise espacial

A geografia procura explicar porque os objetos ou unidades localizados espacialmente podem apresentar características diferentes. Entre todos os fatores explicativos que se pode considerar, a geografia se interessa, mais intensamente, aos que revelam a localização e a proximidade. Esse tipo de abordagem pertence à análise espacial. Pinchemel e Pinchemel (1997, p. 63) precisam que "as duas noções, de centro e

de distância, fornecem as bases do espaço humano. A criação do espaço influencia em sua organização [...]. Os homens organizam o espaço, isto é, eles o ordenam". A distância é assim uma noção geográfica fundamental. Ela representa uma medida do distanciamento espacial, da separação entre dois lugares. A distância interfere no conjunto de localizações das atividades humanas. Ela possui um poder explicativo em todas as grandes teorias e modelos fundamentais da geografia: teoria dos lugares centrais, modelos gravitacionais, teoria da difusão espacial das inovações, economia espacial, etc. (SANTOS, 1986; CLAVAL, 2001). A distância é à base dos índices geométricos e topológicos que permitem evidenciar as propriedades espaciais dos objetos geográficos. A análise espacial foi definida por Champoux; Bedard (1992, in ROBIN, 2002, p. 239) como "um processo cognitivo e interativo que utiliza diferentes operadores, sendo ao menos um espacial, para deduzir as características descritivas ou espaciais de um fenômeno isolado ou reagrupado, real ou simulado, no espaço".

APLICAÇÃO DOS ÍNDICES ESPACIAIS: O CASO DE UBATUBA

Principais famílias de índices geométricos e topológicos

Duas grandes famílias de prospecção são utilizadas na análise espacial:

- a análise das formas dos objetos que revela a geometria (posição, extensão, largura, superfície, perímetro, etc.);
- a análise das relações espaciais entre objetos que revela a topologia (vizinhança, inclusão, arranjo, etc.).

Para a análise espacial, o vocabulário utilizado muda, por isso é necessário precisá-lo. O pixel, a menor unidade da imagem em sensoriamento remoto, é aqui chamada de célula. É a partir das células que os cálculos são efetuados. Um conjunto de células representando um mesmo objeto ou uma mesma unidade espacial definida na classificação, constitui uma mancha (*patch*) cujo tamanho e forma podem variar consideravelmente. O conjunto de manchas, representando um mesmo objeto ou uma mesma unidade espacial constitui uma classe (*class*). O conjunto de classes compõe um mosaico espacial que é chamado de paisagem (*landscape*). Portanto, na análise espacial a paisagem é entendida somente sob o ponto de vista geométrico.

Os programas de SIG (Sistema de Informação Geográfica) oferecem numerosas possibilidades de análise espacial. Utilizamos o programa *Fragstats 3.3 (Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure)* desenvolvido inicialmente para problemáticas de ecologia da paisagem. Porém neste estudo, foi adaptado a uma problemática geográfica, mais precisamente, a uma problemática urbana. Um certo número de medidas pode ser efetuado sobre elementos considerados individualmente (manchas), sobre o conjunto de elementos pertencentes a uma classe ou ainda sobre o conjunto do mosaico (paisagem). Segundo a temática estabelecida, é necessário interpretar cada medida em relação a seu adequado nível espacial, isto é, manchas, classes, ou paisagem. Existem indicadores simples como os que informam o número de manchas ou de classes presentes no mosaico. Por outro lado, os indicadores que permitem compreender a configuração espacial (organização) são muito mais difíceis de medir. A configuração espacial relaciona-se ao arranjo, a posição ou orientação das manchas em uma classe ou na paisagem. Quando desejamos efetuar medidas sobre a configuração de uma paisagem, não se pode perder de vista que essa medida é dependente dos elementos nela contidos: manchas e classes. A

configuração pode também ser medida em termos de relação espacial entre as manchas (contágio, distância do vizinho mais próximo) ou, ainda, em relação à forma. A dimensão fractal, por exemplo, é uma medida da complexidade da forma. Ela pode ser calculada para cada mancha e em seguida levada aos níveis superiores, isto é, a classe ou a paisagem. Mesmo nos níveis superiores, a medida estará sempre ligada às manchas individuais. A organização espacial de uma paisagem pode ser mediada com a ajuda de vários índices que fornecem diferentes tipos de informação. Novos índices são criados constantemente, mas a maioria é derivada dos já existentes (O'NEILL *et al.*, 1988 ; RITTER *et al.*, 1995). Uma completa bibliografia é fornecida pelos autores de *Fragstat*.

O conjunto dessas medidas permite analisar a organização de uma paisagem, mas sua objetividade deve ser relativizada. O pesquisador compõe, de certa forma, a paisagem que vai estudar. Ele determina as classes no momento da classificação da imagem de satélite, e também escolhe as classes que serão o objeto de tais medidas. Sendo assim, os valores calculados dependem diretamente do discernimento do pesquisador e da temática de estudo por ele escolhida. As medidas efetuadas permitem somente melhor apreender a estrutura e a geometria da paisagem. Elas não permitem, em si, conhecer sua dimensão funcional. Se o modelo da paisagem (mosaico criado na classificação) inserido não corresponder a nenhuma significação funcional para a compreensão dos mecanismos de organização da paisagem, que representa o essencial do estudo, então, os resultados não trarão nenhuma contribuição. Além do mais, o formato dos dados (formato raster e o tamanho dos pixels/células) possui uma profunda influência no valor de muitas medidas, principalmente daquelas ligadas ao perímetro das manchas, ou daquelas originadas nos índices de contágio baseados na informação relativa à contigüidade das células.

Métodos de Classificação de imagens

O objetivo de uma classificação é de reagrupar em classes conjuntos de pixels similares radiometricamente para facilitar a interpretação da imagem. A principal dificuldade consiste em diminuir as diferenças entre a classificação e a realidade em campo. Estatisticamente muito coerente, o princípio da classificação nem sempre o é geograficamente, sobretudo quando há forte heterogeneidade entre os objetos que compõem a paisagem. A classificação supervisionada foi escolhida para este estudo, pois permite ao pesquisador interferir na escolha de amostras para cada classe temática estabelecida. Essa fase, chamada de seleção de amostras de treinamento, tem a finalidade de definir amostras, as mais "puras" possíveis, para a haja maior homogeneidade dos valores espectrais intra-classe e aumentar a distância entre as classes. O processamento foi realizado no programa *Spring 4.0* desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Esse programa oferece vários classificadores que representam dois tipos de análise: a classificação por pixel e a classificação por região. A primeira utiliza a informação espectral de cada pixel isolado para formar uma região homogênea e usa, para tanto, os métodos probabilísticos através do classificador máxima verossimilhança que descreve a probabilidade de se encontrar um pixel de uma determinada classe em uma determinada posição; e métodos determinísticos como o classificador que utiliza a distância euclidiana para associar um pixel a uma classe. O tipo de análise decorrente da classificação por pixel é pouco apropriado para uma paisagem heterogênea, com alta alternância de superfícies minerais, vegetais, metálicas e, às vezes, hídricas como é o caso das cidades litorâneas. A classificação por região utiliza, além da informação espectral de cada pixel, a informação espacial, ou seja, a relação entre o pixel e seus vizinhos. Essa informação contextual é definida pela segmentação da imagem, que define regiões

homogêneas, isto é, "um conjunto de pixels contíguos, que se espalham bidirecionalmente e que apresentam uniformidade espectral" (INPE, 1999, p. 41). A classificação supervisionada por região foi utilizada neste estudo, através do classificador Battacharya. Esse classificador prioriza a separabilidade estatística entre um par de classes espectrais através da distância média entre as distribuições de probabilidades de classes.

Duas cenas do satélite Landsat TM 5 (1988 e 1994) e uma cena do satélite Landsat ETM + 7 (1999) foram utilizadas nas classificações supervisionadas da área de estudo, que abrange somente a parte continental do município de Ubatuba, pois foram excluídos o mar e as ilhas (PANIZZA *et al.*, 2002 ; PANIZZA *et al.*, 2004). Tal extração explica-se pelo fato que a dinâmica espacial dá-se essencialmente na área continental do município; essa extração também abreviou o tempo de processamento, reduzindo o tamanho da imagem. As classificações supervisionadas por região realizadas contêm seis classes: cobertura vegetal florestal, zona úmida, campo antrópico, zona construída, areia/solo exposto e água. Graças ao SIG é possível estabelecer cartas de transformação entre essas três datas. As informações que são extraídas dessas cartas permitem conhecer a evolução das superfícies, classe por classe, e conhecer a mutação de um pixel de uma classe para outra. Essas cartas de transformação são realizadas a partir das classificações supervisionadas ou a partir de imagens calculadas por índices, como o NDVI (*Normalized Differential Vegetation Index*) (PANIZZA *et al.*, 2003). Apesar de fundamentais, essas informações podem não ser suficientes. Seria interessante, então, utilizar outros indicadores para conhecer detalhadamente a geometria da paisagem, qualificar sua estrutura interna e medir sua evolução (TURNER, 1990 ; TURNER *et al.*, 1989).

Resultados

O município de Ubatuba é o sítio experimental utilizado para a avaliação dos índices geométricos e topológicos, representando uma fase de análise complementar a realizada com as classificações supervisionadas e com as cartas de transformação temporal (PANIZZA *et al.*, 2003). A partir das classificações foram extraídas, nas três datas, as três classes espacialmente mais dinâmicas (fig. 1, 2 e 3). Somente a classe zona construída foi alvo de medidas para este artigo, apesar da interpretação dos resultados obtidos ser decorrente do conjunto das medidas efetuadas para todas as classes do mosaico⁴.

Um tipo de medida foi utilizada para quantificar a superfície da mancha urbana. O número de manchas por classe (NP, *number of patches*) é uma medida simples da subdivisão e da fragmentação da classe. Apesar do número de manchas ser um dado interessante, seu valor interpretativo é limitado já que não oferece nenhuma informação sobre a distribuição ou sobre a densidade (fig. 4). NP serve, principalmente, como base para os demais índices. NP mostra que a classe urbana apresenta um número crescente de manchas: 249 em 1988; 350 em 1994; e 354 em 1999.

⁴ A descrição dos índices consta no documento fornecido com o programa *Fragstats* 3.3.

Figura 1 - Mancha urbana do município de Ubatuba, SP, em 1988

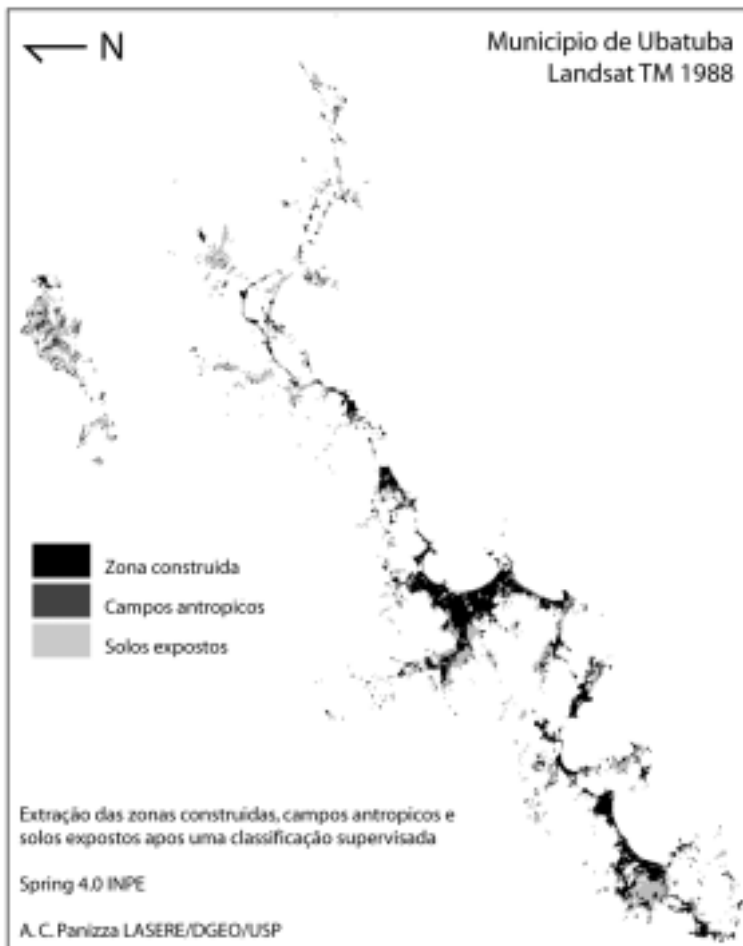


Figura 2 - Mancha urbana do município de Ubatuba, SP, em 1994

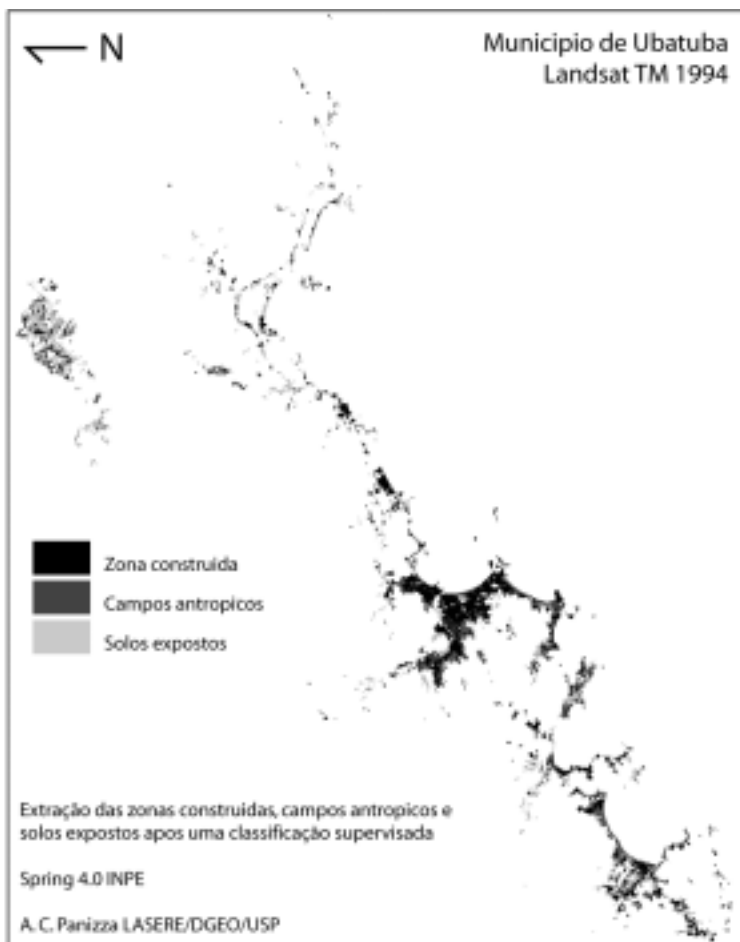


Figura 3 - Mancha urbana do município de Ubatuba, SP, em 1999

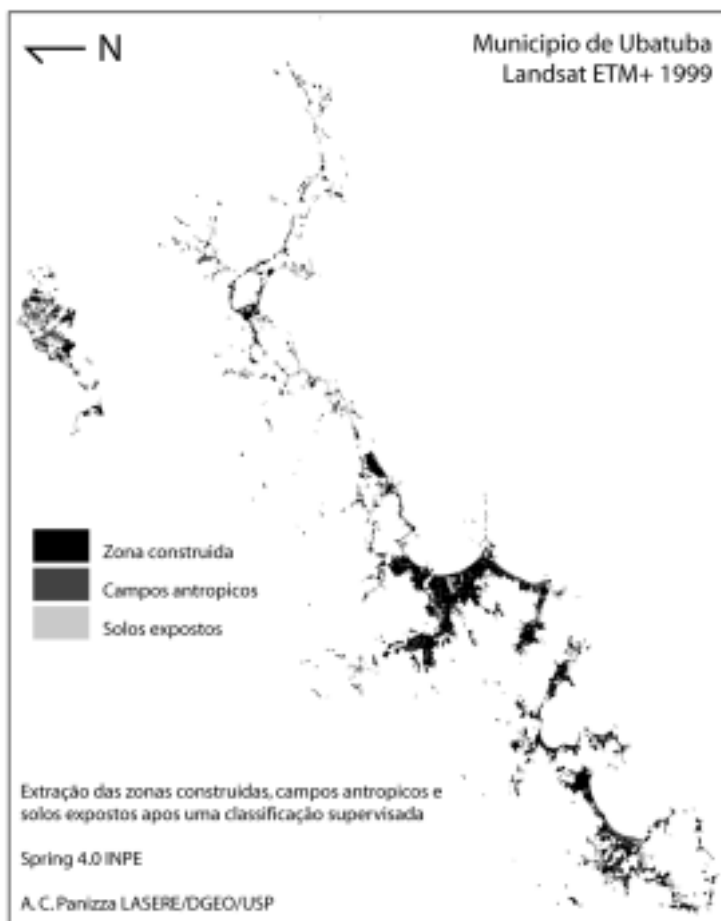
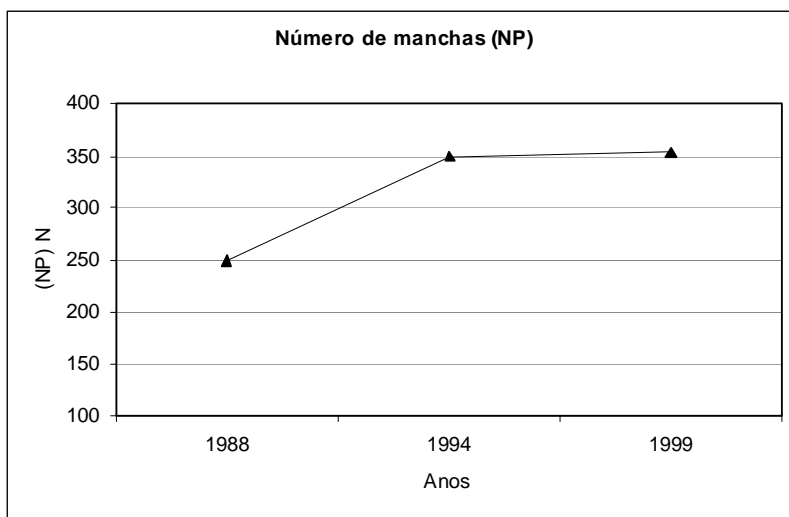


Figura 4 - Medida da superfície



A forma é um atributo espacial extremamente difícil de medir em razão do número infinito de formas possíveis. As medidas da complexidade das formas são todas baseadas na relação entre perímetro e área. A dimensão fractal (PAFRAC, *perimeter-area fractal dimension*) foi utilizada por qualificar a forma da mancha urbana. Alguns autores destacam a utilização da geometria fractal no estudo das formas e estruturas urbanas e da natureza fractal do crescimento urbano (CHRISTOFOLETTI; CHRISTOFOLETTI, 1994; DAUPHINE, 1994; FRANKHAUSER, 1990-91). O cálculo da dimensão fractal de uma cidade a partir de uma imagem Landsat foi descrito por De Keersmaecker (1989, in ROBIN, 2002, p. 212). O valor de PAFRAC varia entre 1 e 2. Uma forma simples se aproxima de 1; uma forma muito complexa se aproxima de 2. O resultado indica uma crescente complexidade da forma das manchas da classe urbana, sobretudo em 1994 (1,51) e 1999 (1,49).

O índice de proximidade (PROX, *proximity index*) foi utilizado para qualificar o isolamento relativo das manchas umas das outras. PROX utiliza um círculo de pesquisa (uma vizinhança local) que o pesquisador define no início do cálculo. Esse índice tem o valor 0 quando nenhum vizinho (mancha da mesma classe) se encontra no interior do círculo de pesquisa. Seu valor pode crescer se, aumentando o raio do círculo de pesquisa, houver vizinhos (manchas da mesma classe). Esse índice fornece, portanto, uma indicação sobre a distribuição das manchas e, indiretamente, sobre a fragmentação da classe. Os resultados mostram que em 1988 e 1999, as manchas urbanas apresentam-se numerosas e muito próximas umas das outras (fig. 6). A situação em 1994 é similar, mas o número de manchas encontradas é claramente inferior.

O contágio se refere à tendência que as manchas têm de se agregar entre elas, formando uma massa mais ou menos compacta. A *interspersión* dá uma informação sobre o arranjo espacial das manchas pertencentes a diferentes classes. Dois índices foram aplicados para qualificar a relação da mancha urbana e manchas contíguas. O índice de *interspersión*/justaposição IJI (*interspersión juxtaposition index*) determina

Figura5 - Medida da forma

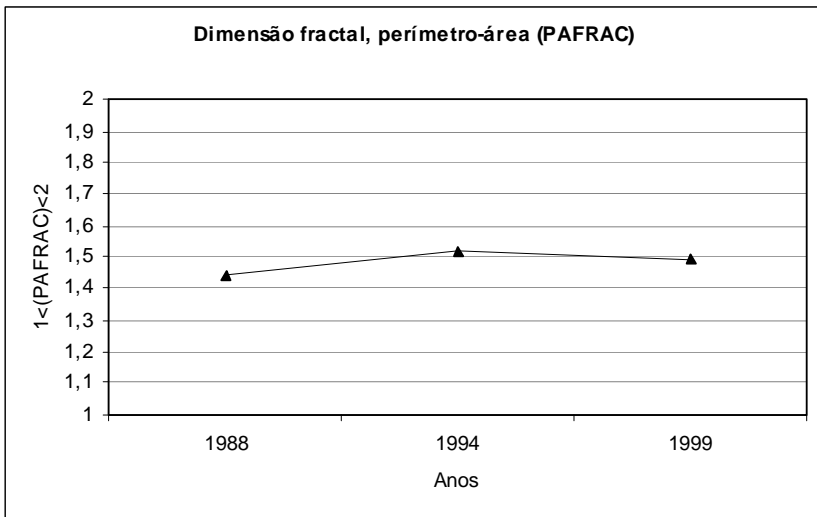
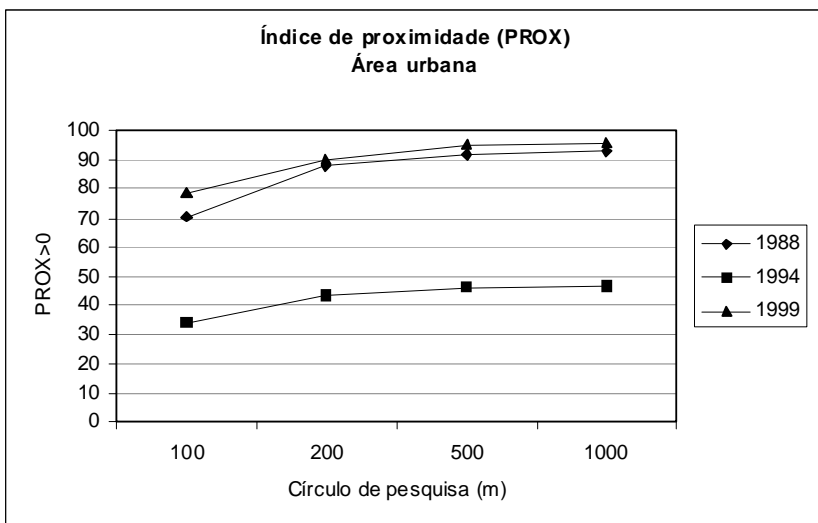


Figura 6 - Medida da proximidade



uma classe e, em suas manchas, contíguas mede a porcentagem de mistura em relação às demais classes. Esse índice mede o número de manchas vizinhas que pertencem à classes diferentes. O valor se aproxima de 0 quando uma única classe apresenta-se adjacente à manchas da mesma classe. Aproxima-se de 100 quando todas as manchas da classe estudada apresentam-se justapostas a outras manchas, que representam o número total das classes presentes no mosaico. Os resultados indicam forte *interspersion* em 1988 (78,0%) e fraca em 1994 (71,5%). O decréscimo de IJI continua em 1999 (65,4%), quando a mancha urbana possui menos manchas vizinhas pertencentes a classes diferentes (fig. 7).

O segundo índice utilizado é o índice de agregação (AI, *aggregation index*). Trata-se simplesmente de uma medida da compacidade da forma ou da agregação das manchas de uma classe. AI se aproxima de 0 quando as manchas estão desagregadas ao máximo. AI aumenta e se aproxima de 100, quando a classe é composta somente de uma única mancha, muito compacta. Em 1988, a mancha urbana apresenta máxima agregação (87,9%); em 1994 apresenta máxima desagregação (83,0%). O valor de AI se eleva em 1999 (85,7%), mas sem atingir o de 1988 (fig. 7).

A conectividade permite medir a conexão física entre as manchas, isto é, se existe um "caminho" possível entre elas. Utilizamos o índice de coesão (COHESION, *patch cohesion index*) para medir a conectividade das manchas urbanas. O valor do índice aproxima-se de 0 quando a classe estudada está muito subdividida e, portanto, menos conectada fisicamente. O contrário ocorre quando as manchas de uma classe estão muito agregadas e, portanto, fisicamente muito conectadas, aí o valor do índice de coesão se aproxima de 100. Os resultados mostram que as manchas urbanas estavam fortemente conectadas em 1988 (97,0) e em 1999 (96,5). Em 1994, ocorre baixa da conectividade (95,8) (fig. 8).

A figura 9 propõe um quadro sintético das diferentes situações observadas para a mancha urbana de Ubatuba nos anos de 1988, 1994 e 1999. A zona urbanizada, em relação aos demais anos, apresenta em 1988 poucas manchas (NP) com formas pouco complexas (PAFRAC). Apresenta máxima agregação (AI) e encontra-se bem conectada fisicamente (COHESION). Grande número dessas manchas estão próximas umas das outras (PROX), e são vizinhas de manchas pertencentes a classes diferentes (IJI). Em 1994, as manchas da classe urbana são mais numerosas (NP) e com formas mais complexas (PAFRAC). Mostram-se em máxima desagregação (AI), e, conseqüentemente, com menor conexão física entre as manchas (COHESION). Um reduzido número de manchas encontra-se à proximidade (PROX), sendo vizinhas de classes pouco diversas (IJI). Em 1999, as manchas da classe urbana permanecem numerosas (NP), com formas complexas (PAFRAC). As manchas apresentam certa agregação (AI) e possuem forte conexão física (COHESION). Grande número de manchas encontram-se próximas umas das outras (PROX), entretanto, a vizinhança ocorre com classes pouco diversas (IJI).

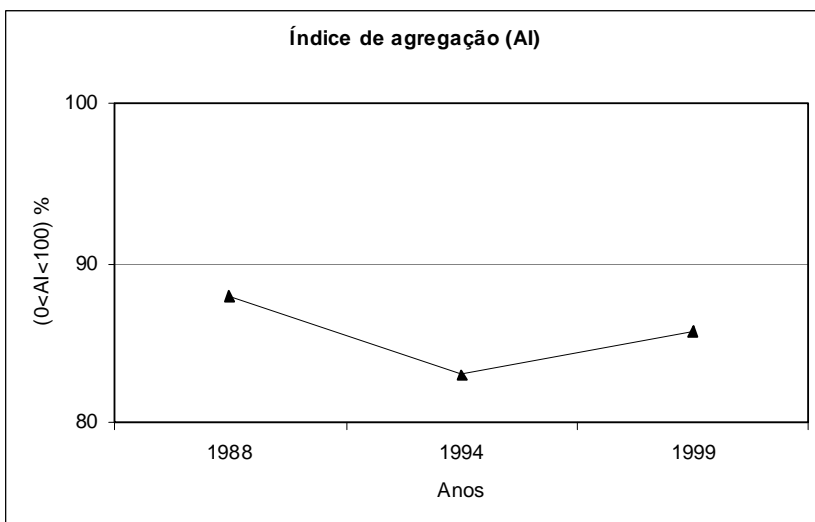
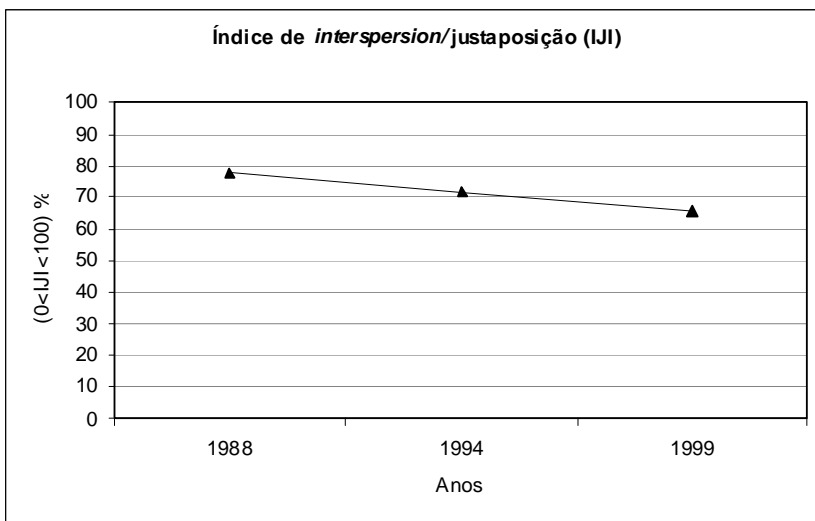
Figura 7- Medida do contágio e *interspersión*

Figura 8 - Medida da conectividade

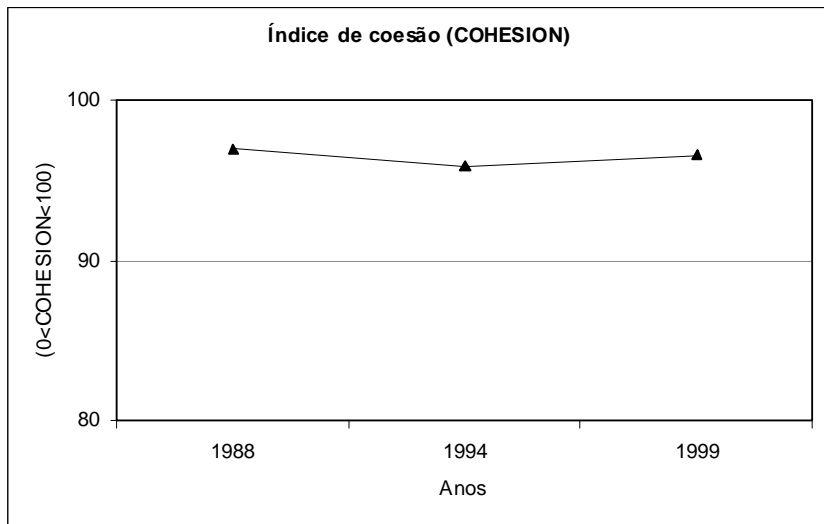
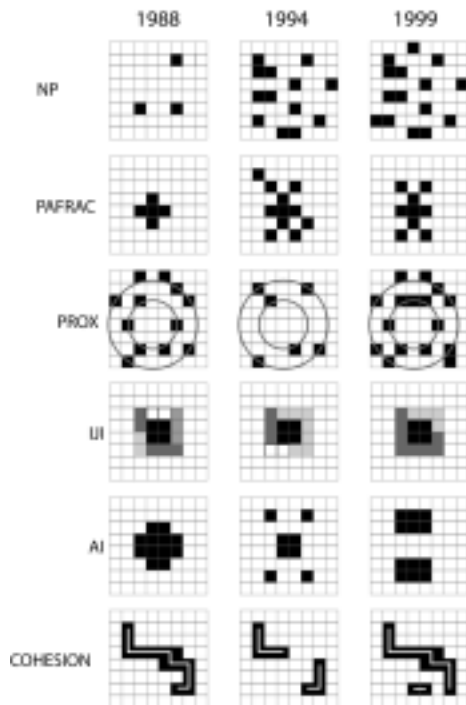


Figura 9 - Quadro sintético dos índices geométricos e topológicos aplicados a mancha urbana do município de Ubatuba, SP



Interpretação dos resultados

A mancha urbana do município de Ubatuba mudou entre 1988, 1994 e 1999. Porém, a interpretação visual das cartas temáticas resultantes das classificações das imagens de satélite não é suficiente para distinguir as sutis transformações. A comparação das superfícies totais de cada classe e a análise das cartas de transformação permitem uma primeira interpretação da dinâmica espacial do município. Contudo, os resultados obtidos pela análise espacial possibilitam afinar essa interpretação. A comparação da área das classes obtida nas classificações mostra uma paisagem com poucas transformações e, portanto pouco dinâmica. A presença maciça da classe cobertura vegetal florestal na paisagem mascara, aparentemente, as transformações nas superfícies menores que revelam a dinâmica espacial local. Em 1988 a cobertura vegetal florestal representava 87,5% do território e a zona urbana, 4,5%. Essa última apresenta-se muito agregada e com número reduzido de manchas. Essas possuíam muitas manchas vizinhas, próximas e diversas, isto é, representavam as demais classes presentes na paisagem. A forma das manchas apresentava-se pouco complexa. A zona urbana concentrava-se, em 91,3% do total da classe, nas áreas inferiores a 100 metros de altitude respeitando em quase sua totalidade os limites das áreas protegidas (Parque Estadual da Serra do Mar e núcleo Picinguaba). Portanto, em 1988, a zona urbana apresentava-se coesa, pouco fragmentada, com formas pouco complexas e envolvida pelas demais classes que compõem a paisagem, à saber: cobertura vegetal florestal, zona úmida, campo antrópico e areia/solo exposto. Além disso, a zona urbana concentra-se nas áreas de terrenos mais baixos e propícios para construções (planícies costeiras e fundos de vale). As cartas de transformação espaço-temporal mostraram que, entre 1988-1994, a floresta transformou-se em área urbana em 4 km², ou 0,58% do território (PANIZZA *et al.*, 2003). Em 1994, observamos o maior índice da cobertura vegetal florestal na paisagem (90,4%), e somente 3,9% para a zona urbana que se apresenta mais dispersa e com maior número de manchas. Em 1994, a zona urbana apresenta classes vizinhas em pequeno número e pouco diversas; isso pode ser explicado pelo crescimento da classe cobertura vegetal florestal que acabou por envolver a área urbanizada. No entanto, e devido a maior fragmentação, a forma das manchas urbanas apresenta-se mais complexa, o que confirma a maior dispersão dessa classe. Corroborando com essa interpretação, vemos que apenas 86,1 % da classe urbana concentra-se nas áreas inferiores a 100 metros de altitude, o que demonstra que, apesar do aumento da classe floresta, a classe urbana também se amplia e atinge áreas superiores a cota de 100 metros. Através das cartas de transformação espaço-temporal vemos que, entre 1994 e 1999, a zona urbana se expandiu em 11,5km² (1,6% do território municipal) em áreas que anteriormente eram cobertas pela floresta (PANIZZA *et al.*, 2003). Finalmente, para 1999, a paisagem apresenta a menor superfície de cobertura vegetal florestal (88,8%) e a maior extensão de zona urbana (5,7%) no período estudado. Essa última classe apresenta-se agregada, pouco fragmentada e com o maior número de manchas no período. A forma das manchas apresenta-se também mais complexa. Nesta data, a zona urbana apresenta grande número de manchas vizinhas, porém de classes pouco diversas. Somente 81,7% da área urbanizada encontra-se abaixo do limite de 100 metros de altitude, o que demonstra o avanço dessa classe sobre áreas cobertas pela floresta e comprova a reduzida diversidade das classes vizinhas à zona urbana em 1999. A crescimento da zona urbana em Ubatuba, durante o período estudado, dá-se progressivamente, ultrapassa o limite de 100 metros de altitude e avança sobre áreas cobertas pela floresta, que passa a ser uma das poucas classes contíguas da zona urbana. Esse avanço denuncia também a existência de uma "frente pioneira" de ocupação. A análise espacial precisa que frente "pioneira" possui formas complexas, que apresentam certa agregação e, portanto, mantêm conexões físicas ("caminhos") no interior da classe, isto é, apresenta-se como uma classe coesa e pouco fragmentada.

CONCLUSÃO

A nova geografia, que surgiu nos anos 1960, reforçou a orientação de pesquisas sobre fenômenos quantificáveis e quantificados por procedimentos matemáticos (CLAVAL, 2001). Entretanto, é necessário esclarecer a limitação desses estudos centrados na localização dos fenômenos e no estudo das propriedades espaciais dos objetos. O objetivo dos estudos geográficos permanece na compreensão e explicação da organização de territórios, e não somente na descrição das configurações espaciais formalizada pelo estudo das distribuições, arranjos, concentrações ou dispersão de fatos observados e mensuráveis. Santos (1986) faz uma crítica severa sobre a quantificação: "a contribuição quantitativa ou simplesmente estatística será pouco útil e, mesmo, nociva, sem o conhecimento sistemático dos mecanismos". A análise espacial não fornece a totalidade das explicações, ela somente nos mostra características espaciais. Porém, esse mesmo autor constata que seria um "equivoco pensar que o método quantitativo constitui um sinônimo de análise espacial", pois "os métodos quantitativos podem ser usados na maior parte das abordagens em geografia, mas eles mesmos não constituem a geografia; eles seriam uma condição desejável, mas não suficiente" (ULLMAN, 1973 *apud* SANTOS, 1986, p. 51). Pinchemel e Pinchemel (1997, p. 24) também raciocinam nessa mesma linha afirmando que a análise espacial é uma metodologia que serve para comparar localizações e distribuições e estabelecer uma correlação espacial, porém afirmam "é uma geografia necessária, mas não suficiente". A análise espacial pode, assim, integrar-se à análise geográfica como um procedimento metodológico que usa a estatística para afinar a apreensão da configuração espacial. Porém, se quisermos compreender a gênese do espaço, a análise geográfica não pode parar no estudo da configuração espacial, ela deverá atingir os mecanismos e processos da formação do espaço.

Especificamente neste estudo de caso, a análise espacial permitiu apreender a dinâmica interna e o comportamento temporal das classes que compõem a paisagem. A zona construída vem crescendo ao longo dos anos e ocupando áreas anteriormente cobertas pela floresta. As formas, cada vez mais complexas, derivam desse crescimento que se processa de maneira "espontânea", isto é, sem um planejamento prévio e sem a instalação de infra-estrutura, como o saneamento básico, e equipamentos urbanos, como o arruamento por exemplo. A queda na diversidade das manchas vizinhas mostra o avanço da classe urbana sobre áreas de cobertas pela floresta. Esse avanço acaba por ultrapassar o limite à ocupação estabelecido pela legislação ambiental, precisamente os limites do Parque Estadual da Serra do Mar e do Núcleo Picinguaba, e caracteriza a "frente pioneira" de ocupação no município de Ubatuba.

REFERÊNCIAS

- BÉGUIN, H. **Méthodes d'analyse géographique quantitative**. Paris: Litec, 1979.
- BONN, F. (dir.). **Précis de télédétection**, Volume 2 Applications thématiques. Sainte-Foy: Presses de l'Université du Québec/AUPELF, 1996.
- CHRISTOFOLETTI, A.L.H.; CHRISTOFOLETTI, A. O uso das fractais na análise geográfica. **Geografia**, Rio Claro, v. 19, n. 2, p. 79-112, 1994.
- CLAVAL, P. **Epistémologie de la géographie**. Paris: Nathan, 2001.
- DAUPHINÉ, A. **Chaos, fractales et dynamiques en géographie**. Montpellier: Reclus, 1994.

- FORMAN, R.T.T.; GODRON, M. **Landscape Ecology**. New York: Wiley & Sons, 1986.
- FORSTER, B.C. Some urban measurements from Landsat data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, n. 49, p. 1693-1707, 1983.
- FRANKHAUSER, P. Aspects fractals des structures urbaines. **L'Espace Géographique**, Paris, v.19-20, n.1, p. 45-69, 1990-91.
- HAGGETT, P. **L'analyse spatiale en géographie humaine**. Paris: Armand Colin, 1973.
- INPE (1999). **Tutorial – Spring básico**. São José dos Campos: DPI/INPE, p. 161.
- LAM, N. S. N. Description and measurement of Landsat TM images using fractals. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 56, n.2, p. 187-195, 1990.
- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto, princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 1995.
- O'NEILL, R.V.; KRUMMEL, J.R.; GARDNER, R.H.; SUGIHARA, G.; JACKSON, B.; DEANGELIS, D.L.; MILNE, B.T.; TURNER, M.G.; ZYGMUNT, B.; CHRISTENSEN, S.W.; DALE, V.H.; GRAHAM R.L. Indices of landscape pattern. **Landscape Ecology**, n. 1, p. 153-162, 1988.
- PANIZZA, A.C.; BARIOU, R.; GOUERY, P.; PADOVESI FONSECA, F. Amélioration des compositions colorées en région montagneuse: exemple de la Serra do Mar, Brésil. In DUBREUIL, V.; BARIOU, R.; MAITELLI, G.T.; PASSOS, M.M. (org.) **Environnement et télédétection au Brésil**. Rennes: Presses Universitaires de Rennes, 2002. Cap. 11, p. 147-156.
- PANIZZA, A.C.; FOURNIER, J.; LUCHIARI, A. L'urbanisation littorale au Brésil, Ubatuba (São Paulo). **Mappemonde**, Montpellier, v. 73, n. 1, p. 1-9, 2004.
- PANIZZA, A.C.; LUCHIARI, A.; FOURNIER, J. Cartografia da transformação espaço-temporal da cobertura vegetal a partir do sensoriamento remoto – aplicação ao município de Ubatuba, litoral norte do Estado de São Paulo. **Geo UERJ** (Revista do Departamento de Geografia), Rio de Janeiro, número especial X SBGFA, p. 2353-2355, 2003.
- PEREIRA JUNIOR, A.P.; CHISTOFOLETTI, A.L.H. Análise fractal da distribuição espacial das chuvas no Estado de São Paulo. **Geografia**, Rio Claro, v. 28, n. 1, p. 97-133, 2003.
- PINCHEMEL, P.; PINCHEMEL, G. **La face de la Terre**. Paris: Armand Colin, 1997.
- PUMAIN, D.; SAINT-JULIEN, T. **L'analyse spatiale, localisations dans l'espace**. Paris: Armand Colin, 1997.
- RITTERS, K. H. ; O'NEILL, R. V. ; HUNSAKER, C. T. ; WICKHAM, J. D. ; YANKEE, D. H. ; TIMMINS, S. P., JONES, K. B. ; JACKSON, B. L. A factor analysis of landscape pattern and structure metrics. **Landscape Ecology**, n. 10, p. 23-40, 1995.
- ROBIN, M. **Télédétection, des satellites aux SIG**. Paris: Nathan, 2002.
- SANDERS, L. **L'analyse des données appliquée à la géographie**. Montpellier: Reclus, 1989.
- SANTOS, M. **Por uma geografia nova**. 3 ed. São Paulo: Hucitec, 1986.
- TURNER, M. G. Spatial and temporal analysis of landscape patterns. **Landscape Ecology**, n. 4, p. 21-30, 1990.
- TURNER, M.G.; O'NEILL, R.V.; GARDNER, R.H.; MILNE, B.T. Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. **Landscape Ecology**, n. 3, p. 153-162, 1989.

VOIRON, C. **Analyse spatiale et analyse d'images**. Montpellier: Reclus, 1995.

WILMET, J. **Téledétection aérospatiale, méthodes et applications**. Fontenay
sous Bois: Sides, 1996.

Recebido em maio de 2004
Revisado em maio de 2004
Aceito em setembro de 2004