

MÉTRICAS DA PAISAGEM NA CARACTERIZAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA OCUPAÇÃO DA AMAZÔNIA*

JORGE LUIS GAVINA PEREIRA¹

GETULIO TEIXEIRA BATISTA²

MARCELO CORDEIRO THALÊS¹

DARA. ROBERTS³

ADRIANO VENTURIERI⁴

Resumo

As mudanças de uso e cobertura da terra nos trópicos resultam em vários impactos sobre o meio-ambiente. Uma forma de caracterizar mudanças de uso e cobertura da terra é utilizando-se métricas da paisagem. Este trabalho teve como objetivo caracterizar a evolução da paisagem de uma área do centro-leste do Estado do Pará, no período de 1973 a 1997, utilizando-se métricas da paisagem calculadas através de *software* específico. Observou-se uma diminuição drástica da área de floresta, acompanhada por um aumento significativo das áreas de pastagem. O número de manchas da área de estudo aumentou, enquanto que o tamanho médio das manchas da paisagem diminuiu. A densidade de bordas também apresentou um grande aumento. A distância média entre vizinhos mais próximos, ao longo dos anos, não apresentou uma grande variação para a classe floresta, tendo sido, contudo, observada uma diminuição da distância média entre as manchas de pasto no período estudado. Apenas 5% da área de floresta encontrava-se a mais de 500 m de uma borda, no ano de 1997, o que implica numa intensa degradação da floresta na área estudada.

Palavras chave: Ecologia da Paisagem, Mudança de Uso e Cobertura da Terra, Amazônia, Sensoriamento Remoto.

* Este trabalho teve suporte do Programa PPG-7, FINEP 0816/95

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Divisão de Sensoriamento Remoto - gavina@ltd.inpe.br

² Universidade de Taubaté – Departamento de Ciências Agrárias

³ University of California at Santa Barbara - Department of Geography

⁴ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro de Pesquisas Agropecuária do Trópico Úmido

Abstract

Landscape Metrics for Characterization of Occupation Dynamics in Amazonia

Land use and land cover change in the tropics has severe impact on the environment. Landscape metrics had been used for land use and land cover change characterization. This work had the objective of characterizing the evolution of the landscape of an area of the center-eastern of the State of Pará, from 1973 to 1997, based on landscape metrics calculated by using a specific software. A drastic decrease of the forest area was observed, accompanied by a significant increase of the pasture areas. The number of patches of the study area increased, while the medium size of the patches of the landscape decreased. The edge density also presented a great increase. The average distance between nearest neighbors did not vary much for the forest class along the years, however, it was observed a decrease in the average distance between pasture patches. Only 5% of the forest area were located over 500 m far from a border, in 1997, what indicates an intense degradation of the forest in the studied area.

Key words: Landscape Ecology, Land Use and Land Cover Change, Amazonia, Remote Sensing.

INTRODUÇÃO

A conversão de áreas de floresta em áreas de uso agropecuário tem grande impacto sobre o meio ambiente. Efeitos ecológicos globais de mudanças de uso e cobertura da terra nos trópicos incluem: diminuição da biodiversidade; ruptura do regime hidrológico; e mudanças no balanço de CO₂ e outros gases de efeito estufa, que podem afetar o clima. Efeitos ecológicos em níveis locais e regionais incluem: degradação do solo e perda de recursos extrativistas (FROHN *et al.*, 1996). A fragmentação de áreas de floresta implica não apenas numa perda de florestas, mas também numa redução do tamanho dos fragmentos de floresta, num aumento da distância entre os fragmentos, e ainda num aumento de novos habitats, que surgem nas bordas dos fragmentos (ANDREN, 1994). Esta zona de borda estende-se a uma certa distância dentro da floresta remanescente. Nesta área ocorre uma grande exposição a ventos, diferenças micrometeorológicas acentuadas em distâncias curtas, acesso mais fácil para o gado, outros animais domésticos, e caçadores; além de outros efeitos biológicos e físicos. O resultado é uma perda líquida de espécies vegetais e animais nas áreas de borda (SKOLE E TUKER, 1993).

Segundo SKOLE E TUKER (1993), a análise espacial da geometria do desflorestamento é crítica para a estimativa da fragmentação da floresta e dos efeitos de borda. Supondo-se que 100 km² de desflorestamento tropical ocorre como um quadrado de 10 x 10 km, e assumindo-se que o efeito de borda é de 1 km, a área total afetada é de ~143 km². Por outro lado, se os 100 km² de desflorestamento estiverem distribuídos em 10 áreas de 1 x 10 km, a área afetada seria de ~350 km². SKOLE E TUKER (1993) observaram que a maior alteração do habitat resulta da proximidade de áreas desflorestadas. Para a Amazônia, eles observaram uma área afetada de ~341.000 km² para um efeito de borda de 1 km enquanto que considerando apenas o desflorestamento em si, seria de apenas ~230.000 km² para o ano de 1988.

Este trabalho teve como objetivo caracterizar a evolução da paisagem de uma área do centro-leste do Estado do Pará, onde prevalece a conversão de áreas de floresta primária para pastagem. Para este objetivo foram utilizadas as seguintes métricas da paisagem calculadas pelo programa *FRAGSTATS 2.0* (MCGARIGAL E MARKS, 1994):

- Percentagem da paisagem correspondente a cada classe (%LAND);
- Índice de maior mancha (LPI);
- Número de manchas (NP);
- Tamanho médio da mancha (MPS);
- Densidade de bordas (ED);
- Índice de forma da paisagem (LSI)
- Percentagem da paisagem correspondente a áreas centrais (C%LAND);
- Distância média do vizinho mais próximo (MNN);
- Índice de diversidade de Simpson (SIDI);
- Índice de contágio (CONTAG).

As métricas foram escolhidas de forma que abrangessem todos os oito grupos de categorias de métricas calculadas pelo *FRAGSTATS*: métricas de área (%LAND e LPI), de manchas (NP e MPS), de bordas (ED), de forma (LSI), de área central (C%LAND), de vizinho mais próximo (MNN), de diversidade (SIDI), de contágio e entrelaçamento (CONTAG).

ECOLOGIA DA PAISAGEM

De acordo com MCGARIGAL E MARKS (1994), a Ecologia da Paisagem aborda o estudo de padrões da paisagem, as interações entre as unidades da paisagem (“*patches*” ou manchas) dentro de um mosaico de paisagens, e como estes

padrões e interações mudam durante o tempo. Ou seja, considera o desenvolvimento e a dinâmica da heterogeneidade espacial e os seus efeitos sobre os processos ecológicos, e a administração da heterogeneidade espacial. A ascensão da Ecologia da Paisagem para o primeiro plano da ecologia é o testemunho do reconhecimento crescente que os processos ecológicos afetam e são afetados pela interação dinâmica entre os ecossistemas.

Como todos os sistemas vivos, a paisagem exibe estrutura, função e mudança, logo a Ecologia da Paisagem enfoca estas três características da paisagem:

1. Estrutura – distribuição de energia, materiais e espécies em relação aos tamanhos, formas, números, tipos e configurações de ecossistemas;
2. Função – fluxos de energia, materiais e espécies entre os ecossistemas componentes;
3. Mudança – alteração na estrutura e função do mosaico ecológico durante o tempo.

A Ecologia da Paisagem é baseada na premissa de que os padrões dos elementos da paisagem (manchas) influenciam significativamente os processos ecológicos. Desta forma, a capacidade de quantificar a estrutura da paisagem é um pré-requisito para o estudo da função e mudança da paisagem. MCGARIGAL E MARKS (1994) definem alguns termos e conceitos chaves para a mensuração da heterogeneidade espacial: paisagem; mancha; matriz; escala da paisagem; contexto da paisagem; e estrutura da paisagem. Tais conceitos são apresentados a seguir:

Talvez a definição mais comum de paisagem seja uma área de terra heterogênea composta de um agrupamento de ecossistemas interativos que se repete de forma similar pela área. Um ponto importante é que a paisagem não é necessariamente definida pelo seu tamanho; ela é definida por um mosaico integrado de manchas relevantes ao fenômeno em consideração (em alguma escala).

As paisagens são compostas por um conjunto de manchas e por ligações entre estas manchas denominadas de corredores, que são os elementos ou unidades básicas de uma paisagem, distribuída sobre a matriz da superfície. De uma perspectiva ecológica, as manchas representam áreas (domínio espacial) ou períodos (domínio temporal) relativamente discretos de condições ambientais praticamente homogêneas, cujas fronteiras são identificáveis por descontinuidades no estado ambiental dos seus arredores, em magnitudes que são relevantes para o organismo ou fenômeno ecológico em consideração.

A menor escala na qual um organismo percebe e responde a estrutura da mancha é o seu “grão”. O menor limite para o grão é ajustado pelas habilidades fisiológica e perceptiva do organismo e, portanto, varia entre as espécies. Similarmente, “extensão” é a escala mais grosseira de heterogeneidade, ou limiar superior de heterogeneidade, ao qual um organismo responde.

A matriz da superfície é o mais extenso e o mais conectado tipo de elemento e, portanto, desempenha um papel dominante no funcionamento da paisagem. No entanto, o que constitui a matriz é dependente da escala de investigação. Por exemplo, numa escala particular, a floresta madura pode ser a matriz com manchas de distúrbios encravados nela; enquanto, numa escala mais grosseira, áreas agrícolas podem ser a matriz com manchas de floresta madura encravadas nela.

O padrão detectado em qualquer mosaico ecológico é uma função da escala, e o conceito ecológico de escala espacial abrange a extensão e o grão. A extensão e o grão definem o limite superior e inferior da resolução de um estudo e qualquer interferência sobre a dependência de escala num sistema é limitada pela extensão e grão do fenómeno investigado. Na prática, extensão e grão são frequentemente determinados pela escala da imagem (e.g., escala da foto aérea) ou pela capacidade do ambiente de computação.

As paisagens estão contidas dentro de paisagens maiores, que por sua vez estão contidas em paisagens maiores ainda, e assim por diante. Em outras palavras, cada paisagem tem um contexto ou ajuste regional em função de sua forma e definição. A interpretação das relações entre os elementos da paisagem e de seus significados ecológicos requer uma compreensão do contexto da paisagem.

Uma paisagem pode ser caracterizada por sua composição e configuração (às vezes referidas como fisionomia ou padrão da paisagem), e estes dois aspectos de uma paisagem podem independentemente ou combinados afetar os processos ecológicos e organismos. A composição da paisagem abrange a variedade e abundância de tipos de manchas dentro da paisagem, mas não o arranjo ou localização das manchas dentro do mosaico da paisagem. Existem muitas medidas quantitativas de composição da paisagem: proporção da paisagem em cada tipo de mancha, riqueza de manchas, regularidade das manchas e diversidade das manchas. A configuração da paisagem refere-se à distribuição física ou característica espacial das manchas dentro da paisagem. Alguns aspectos da configuração, tais como isolamento da mancha ou contágio da mancha, são medidas de posicionamento dos tipos de manchas com relação a outros tipos de manchas, aos limites da paisagem ou outra feição de interesse.

A ecologia da paisagem é em parte o estudo da influência do padrão espacial sobre os processos ecológicos. Desta forma, várias métricas têm sido desenvolvidas para descrever padrões espaciais, e muitas têm sido testadas utilizando informações sobre cobertura da terra, geradas por imagens de sensoriamento remoto. O sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica (SIGs) são as principais ferramentas dos ecólogos da paisagem interessados em padrões espaciais (WICKHAM E RIITTERS, 1995).

MCGARIGAL E MARKS (1994) citam que as métricas da paisagem podem ser quantificadas tanto para manchas individuais quanto para classes de manchas,

ou ainda para a paisagem como um todo. As métricas quantificadas em termos das manchas individuais apenas quantificam, a característica média da mancha ou alguma medida de variabilidade nas características da mancha. As métricas quantificadas em termos do relacionamento espacial das manchas e matriz constituindo a paisagem (e.g., vizinho mais próximo, contágio) são espacialmente explícitas no nível da paisagem porque a localização relativa das manchas individuais dentro da paisagem é representada de alguma forma. Tais métricas representam um reconhecimento que os processos ecológicos e organismos são afetados pelo entrelaçamento (distribuição) e justaposição (contato) dos tipos de manchas dentro da paisagem. A justaposição é especialmente importante para os organismos que requerem dois ou mais tipos de habitats, pois a grande proximidade de recursos fornecidos por diferentes tipos de manchas é crítica para sobrevivência e reprodução destes. Contudo, nem todas métricas da paisagem podem facilmente ser classificadas como representando a composição ou configuração da paisagem.

Na abordagem da estrutura da paisagem, índices das manchas servem em princípio como a base computacional para várias das métricas da paisagem, mas de uma forma geral, podem ter pouco valor interpretativo. Contudo, às vezes índices de manchas podem ser importantes e informativos em investigações no nível da paisagem. Por exemplo, muitos vertebrados requerem grandes manchas como habitat, assim seria útil conhecer o tamanho de cada fragmento na paisagem.

Em muitas aplicações ecológicas da paisagem, o interesse principal é na quantidade e distribuição de um tipo de mancha (classe) particular, como por exemplo, no estudo de fragmentação de floresta. Índices de classes separadamente quantificam a quantidade e distribuição de cada tipo de fragmento na paisagem.

Em outros estudos, o interesse maior é na estrutura (i.e., composição e padrão) da paisagem inteira. Um bom exemplo é no estudo de diversidade da paisagem. Notou-se que a diversidade da vida selvagem (mamíferos e aves) era maior em paisagens mais diversas. Assim, a quantificação da diversidade da paisagem tem assumido um papel proeminente na ecologia da paisagem.

Um grupo de métricas de grande importância para estudos de fragmentação de áreas de floresta é baseado no conceito de área central, pois segundo LAURANCE (1991), o modelo de área central estima com precisão a área total do habitat preservada dentro dos fragmentos. LAURANCE (1991), observou através da aplicação de um modelo matemático de área central para avaliar o efeito de borda nos seus dados, que reservas naturais isoladas no nordeste de Queensland (Austrália) devem exceder 2000-4000 ha, dependendo da forma da reserva, para assegurar que mais de 50% da reserva permaneça intacta.

Dentre as várias métricas da paisagem propostas para caracterizar a complexidade de paisagens, as utilizadas por FROHN *et al.* (1996) em seu estudo foram:

Porcentagem Desflorestada e Contágio. Porcentagem Desflorestada é simplesmente o número de pixels classificado como desflorestamento dividido pelo número total de pixels da área de estudo. Contágio é uma medida de textura ou agregação das manchas, e indica a dispersão espacial do padrão de desflorestamento. Em valores baixos de Contágio (próximos a zero), existem muitas manchas pequenas, desta forma, as probabilidades de pixels adjacentes a um dado tipo de cobertura da terra são aproximadamente iguais. Quando o Contágio atinge valores próximos a 1, existem grandes manchas contínuas na paisagem.

FROHN *et al.* (1996), observaram para todos os cenários estudados, que o Contágio é elevado inicialmente, pois a paisagem é dominada por grandes fragmentos de floresta. O Contágio diminui quando os proprietários derrubam áreas menores, até o Contágio atingir um baixo valor de aproximadamente 0,4. Neste ponto, os fragmentos da paisagem no cenário típico tornam-se mais contíguos novamente, quando as pequenas derrubadas coalescem em áreas desflorestadas maiores, aumentando o Contágio.

As métricas de padrões da paisagem utilizadas por WICKHAM E RIITTERS (1995), quantificam as freqüências relativas das diferentes categorias de cobertura da terra e as suas adjacências espaciais, são elas: métricas de diversidade e semelhança de Shannon, e as métricas de diversidade e semelhança de Simpson. A diversidade de tipos de cobertura é máxima quando todos os tipos de cobertura são igualmente abundantes. As métricas de Shannon são consideradas mais sensíveis a mudanças na proporção de tipos de coberturas raras, enquanto as métricas de Simpson são mais sensíveis a mudanças nas proporções dos tipos comuns de cobertura.

WICKHAM E RIITTERS (1995) citam que para um mapa com cinco tipos diferentes de cobertura da terra, cada um correspondendo a 20%, as métricas de diversidade e igualdade de Simpson dos tipos de cobertura seriam: 0,80 e 1,00. Para o mesmo mapa com proporções de tipos de cobertura distribuídas em 60, 10, 10, 10, 10%, os valores para as mesmas quatro métricas seriam: 0,40 e 0,50.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

A região de estudo está inserida numa zona de fronteira agrícola, apresentando desta forma uma rápida mudança da sua paisagem natural. A conversão da floresta para pastagens tem sido a causa principal de tal mudança, principalmente a partir do final da década de 1960. A área de estudo situa-se ao sul da cidade de Marabá e possui 2.019 km² (figura 1).

Classes de Uso e Cobertura da Terra

Para a avaliação da dinâmica de mudanças das classes de uso e cobertura da terra, foi utilizada neste trabalho parte da imagem Landsat TM órbita-ponto 223/64, bandas 1 a 5, e 7, em formato digital, para os anos de 1984, 1989, 1992, 1993, 1996 e 1997; e também parte da imagem Landsat MSS órbita-ponto 240/64, bandas 4, 5 e 7, em papel, para os anos de 1973, 1975 e 1979.

A partir das 6 bandas Landsat TM originais foram geradas imagens proporções dos seguintes componentes: vegetação, material vegetal não fotossintético, solo e sombra (ROBERTS *et al.*, 1999). As imagens fotográficas Landsat MSS foram convertidas para o formato digital “*TIFF*” por meio de um dispositivo de digitalização ótica (“*scanner*”). As imagens foram posteriormente inseridas em um banco de dados do Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas - SPRING (DPI/INPE, sd).

As imagens foram segmentadas, utilizando-se limiares de similaridade e de área 10 e 6, propostos por PEREIRA (1996) e classificadas usando o método de classificação supervisionada por regiões que utiliza a distância de Bhattacharyya como critério de decisão estatística com base na mesma publicação. Foram determinadas inicialmente as seguintes classes: floresta primária; babaçu (áreas com dominância de babaçu observada desde 1973); pasto; diferentes classes de idade de capoeira; e classes de idade de áreas secundárias recentes (após 1973) com dominância de babaçu; rio; e borda. Posteriormente, estas classes foram agrupadas em: floresta, pasto, capoeira e rio. As imagens com as classes agrupadas foram posteriormente convertidas para imagens em nível de cinza e exportadas do SPRING para um formato assimilável pelo pacote *FRAGSTATS*. Resultados dessa classificação podem se vistos nas figuras 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

**Fig. 1 - Localização e caracterização da área de estudo
(imagem Landsat TM de 1997).**

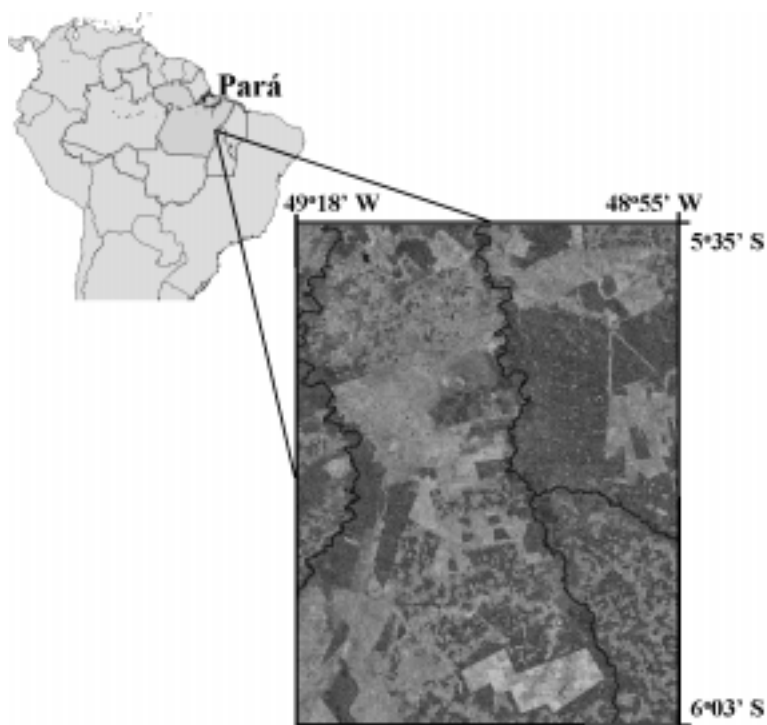


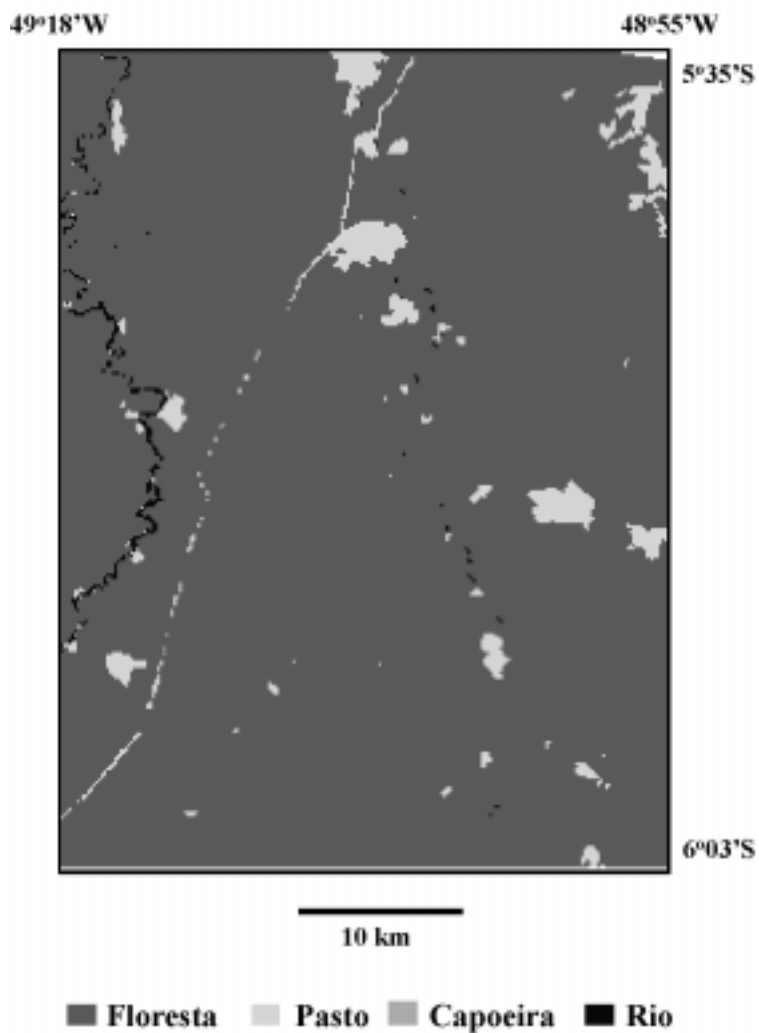
Fig. 2 – Uso e cobertura da terra em 1973.

Fig. 3 – Uso e cobertura da terra em 1979.

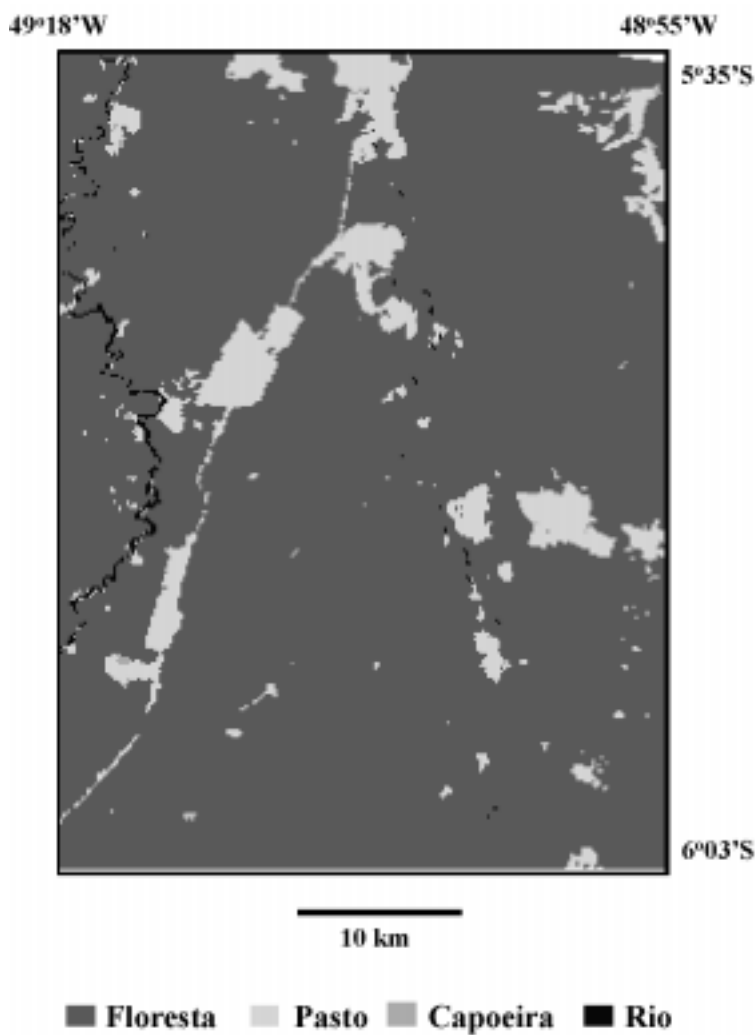


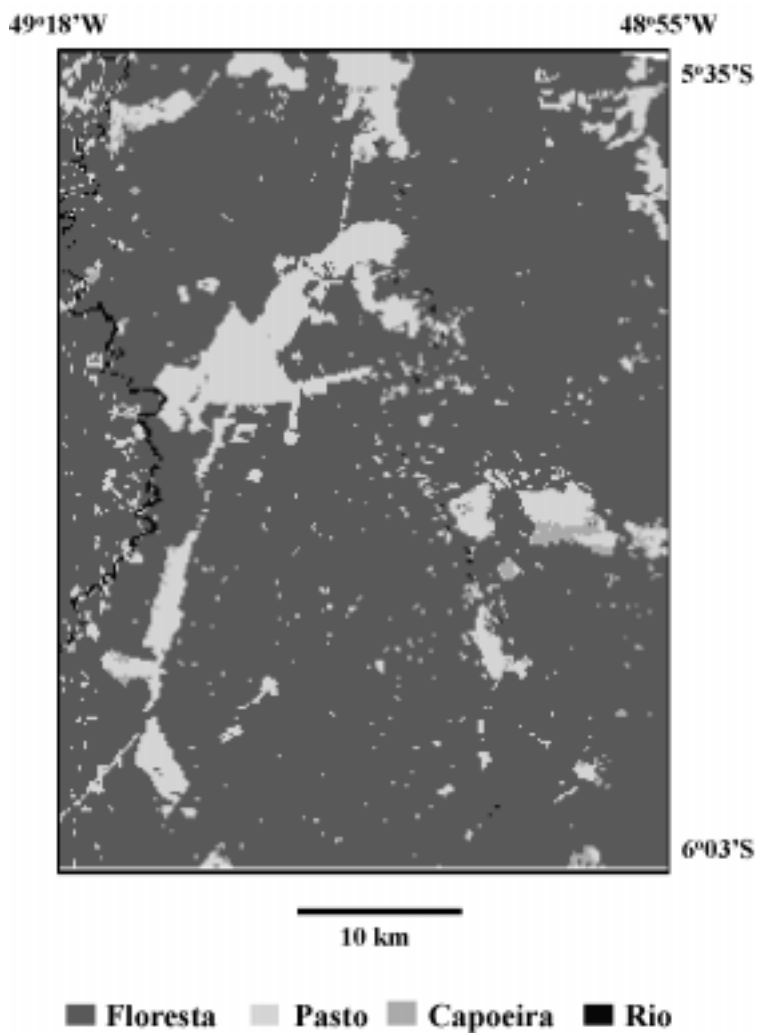
Fig. 4 – Uso e cobertura da terra em 1984.

Fig. 5 – Uso e cobertura da terra em 1989.

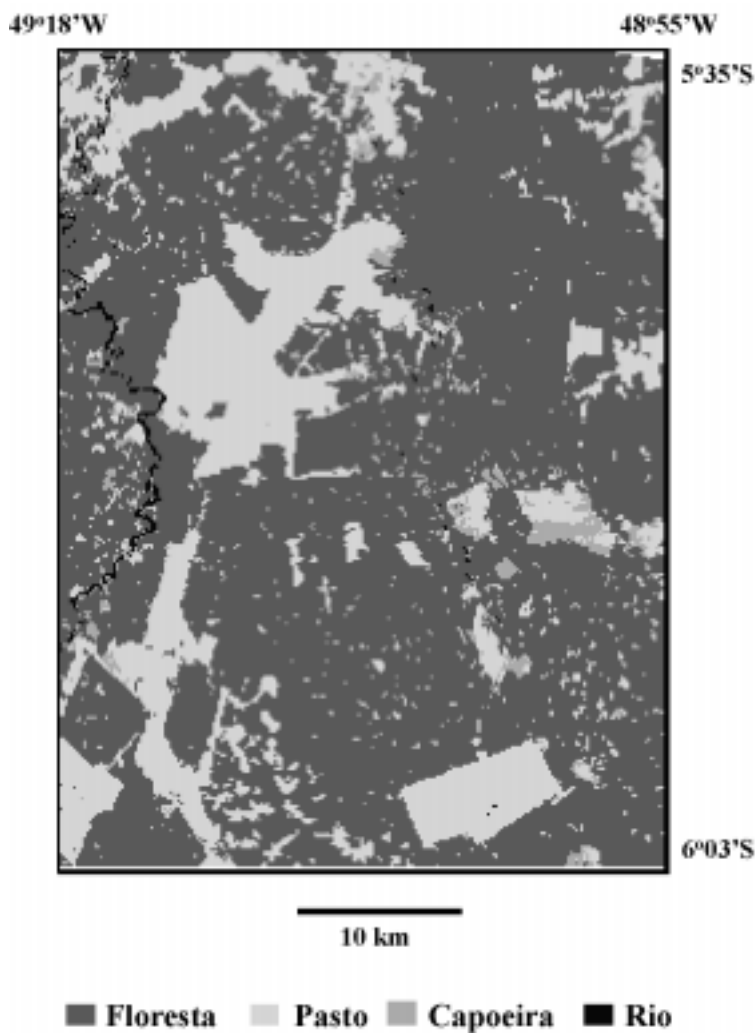


Fig. 6 – Uso e cobertura da terra em 1993.

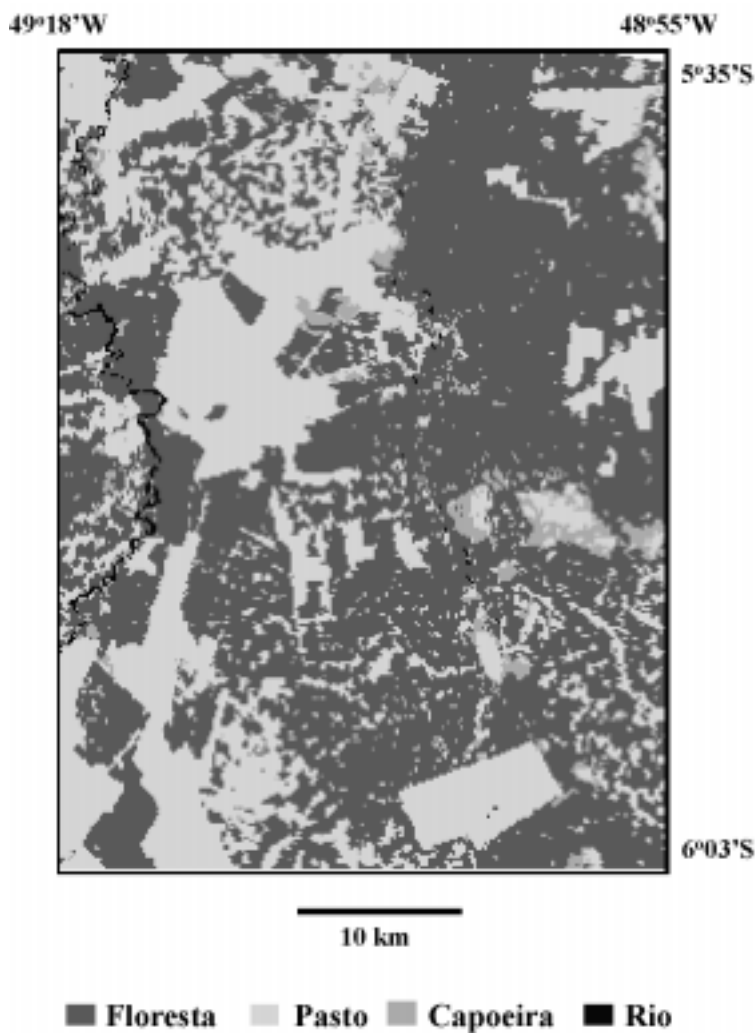
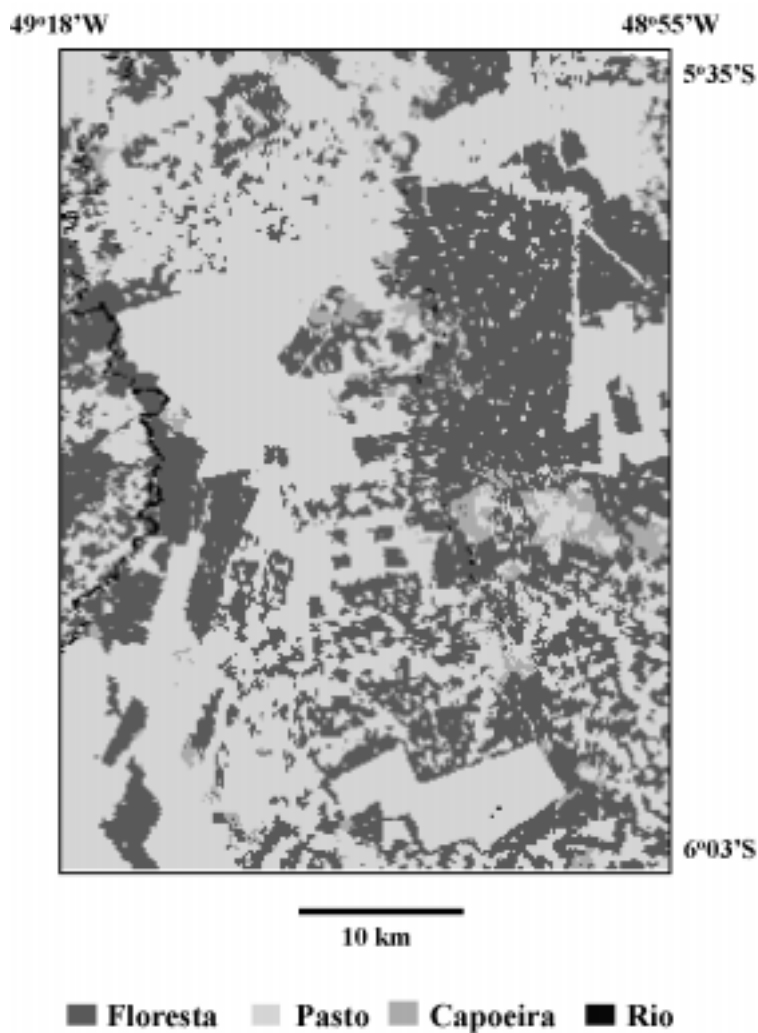


Fig. 7 – Uso e cobertura da terra em 1997.



Cálculo de Métricas da Paisagem Utilizando o FRAGSTATS

Para o cálculo das métricas da paisagem foi utilizado o programa *FRAGSTATS* para PC, versão 2.0. O *FRAGSTATS* é um programa de análise de padrões espaciais para quantificar a estrutura da paisagem. Este programa quantifica a extensão areal e a distribuição espacial das manchas (i.e., polígonos) dentro de uma paisagem. Para um dado mosaico de paisagem, o *FRAGSTATS* computa várias estatísticas para: (1) cada mancha no mosaico; (2) cada tipo de mancha (classe) no mosaico; (3) o mosaico da paisagem como um todo. As várias métricas calculadas pelo *FRAGSTATS* podem ser agrupadas em oito grupos de categorias: métricas de área, de manchas, de bordas, de forma, de área central (“*core area*”), de vizinho mais próximo, de diversidade, de contágio e entrelaçamento (do inglês *interspersion*). Abaixo são apresentadas algumas métricas calculadas pelo *FRAGSTATS*, extraídas de MCGARIGAL E MARKS (1994).

De uma forma geral, as métricas de área são a base do conhecimento da paisagem, uma vez que elas são utilizadas por outras métricas. As métricas de área quantificam a composição da paisagem, mas não a sua configuração. Exemplos de métricas de área computadas pelo *FRAGSTATS* são: percentagem da paisagem correspondente a cada classe (%*LAND*), computada apenas ao nível das classes; e índice de maior mancha (*LPI*), computado tanto ao nível da classe quanto ao nível da paisagem como um todo.

A percentagem da paisagem correspondente a cada classe (%*LAND*) é dada através da relação entre a área da classe em questão e a área total da paisagem, como pode ser observado abaixo. Se um determinado organismo tem como habitat uma determinada classe, variações na área desta classe, possivelmente afetarão a população deste organismo.

$$\%LAND = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} (100)$$

$j = 1, \dots, n$ ® manchas;

a_{ij} = área (m²) da mancha ij

A = área total da paisagem (m²)

O índice de maior mancha (*LPI*) corresponde à percentagem da paisagem ocupada pela área da maior mancha da classe.

$$LPI = \frac{\max_{j=1}^n (a_{ij})}{A} (100)$$

$j = 1, \dots, n$ ® manchas;

a_{ij} = área (m²) da mancha ij ;

A = área total da paisagem (m²).

Considera-se freqüentemente que as métricas de densidade, tamanho e variabilidade das manchas representam a configuração da paisagem, ainda que elas não sejam medidas espacialmente explícitas. Neste grupo enquadram-se as métricas número de fragmentos (NP) e tamanho médio das manchas, ambas calculadas ao nível de classe e da paisagem.

O número de manchas (NP) é simplesmente a contagem das manchas de cada classe, ou de todas as manchas da paisagem.

$$NP = n_i$$

n_i = número de manchas da classe i , ou o número de todas as manchas da paisagem.

O tamanho médio da mancha (MPS) em hectares (ha) é dado pela média dos tamanhos das manchas (ha) de uma classe ou de todas as manchas da paisagem.

$$MPS = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n_i} \left(\frac{1}{10000} \right)$$

$j = 1, \dots, n$ ® manchas;
 a_{ij} = área (m²) da mancha ij ;
 n_i = número de manchas da classe i ,
ou o número de todas as manchas da paisagem.

As métricas de borda, assim como as métricas de mancha, representam a configuração da paisagem, ainda que elas não sejam medidas espacialmente explícitas. A quantidade de bordas de uma paisagem é importante para muitos fenômenos ecológicos, como citado anteriormente (perda líquida de espécies vegetais e animais nas áreas de borda). A densidade de borda (ED) enquadra-se neste grupo de métricas, sendo calculada tanto para classes quanto para a paisagem.

A densidade de bordas em metros por hectare (m/ha) representa a razão entre o comprimento das bordas (m) e a área (ha) das classes/paisagem.

$$ED = \frac{\sum_{k=1}^{m'} e_{ik}}{A} (10000)$$

$k = 1, \dots, m$ ® tipos de manchas (classes);
 e_{ik} = comprimento total (m) de borda na paisagem entre os tipos de manchas (classes) i e k ;
 A = área total da paisagem (m²).

As métricas de forma são importantes, pois a interação entre a forma e o tamanho da mancha pode influenciar alguns processos ecológicos, sobre tudo o efeito de borda, acentuado em manchas com formas mais irregulares. O índice de forma da paisagem (LSI) enquadra-se neste grupo de métricas, e representa uma medida da razão entre o perímetro e área das manchas de uma determinada classe, ou para todas as manchas da paisagem.

$$LSI = \frac{0.25 \sum_{k=1}^m e_{ik}}{\sqrt{A}}$$

$k = 1, \dots, m$ tipos de manchas (classes);
 e_{ik} = comprimento total (m) de borda na paisagem entre os tipos de manchas (classes) i e k ;
 A = área total da paisagem (m^2).

Uma área central é definida como a área dentro de uma mancha além de uma distância especificada da borda. Logo, as métricas de área central refletem tanto a composição da paisagem quanto a sua configuração. Assim, como o índice de forma da paisagem (LSI), o significado principal da área central na determinação da natureza das manchas em uma paisagem está relacionado ao efeito de borda. A área central tem sido freqüentemente citada pelos especialistas em áreas de florestas como sendo uma estimativa melhor da qualidade do habitat do que a área da mancha em si, pois ao contrário da área da mancha, ela é afetada pela forma da mancha. Desta forma, ainda que uma mancha possa ser grande o suficiente para ser habitada por uma espécie, ela pode não conter área central adequada suficiente para comportar tal espécie. Enquadra-se neste grupo de métricas a percentagem de cobertura das áreas centrais (C%LAND), computada apenas ao nível da classe.

A percentagem de cobertura das áreas centrais (C%LAND) é calculada para cada classe através da razão entre a área central total da classe e a área total da paisagem. Esta é a métrica mais importante na estimativa da área preservada de floresta, e conseqüentemente sobre os organismos que habitam esta área.

$$C\%LAND = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}^c}{A} (100)$$

a_{ij}^c = área central (m^2) da mancha ij com base numa largura de faixa específica em metros;
 $j = 1, \dots, n$ manchas;
 A = área total da paisagem (m^2).

A distância do vizinho mais próximo é definida como a distância da borda de uma mancha à borda da mancha vizinha mais próxima da mesma classe. As métricas de vizinho mais próximo quantificam a configuração da paisagem. A distância do vizinho mais próximo podem influenciar alguns processos ecológicos importantes,

como dinâmicas de população e interação de espécies em populações separadas espacialmente. Desta forma, ela pode representar uma característica importante da paisagem dependendo do fenômeno em consideração. A distância média do vizinho mais próximo (MNN) enquadra-se neste grupo de métricas, sendo computada tanto ao nível da classe quanto da paisagem como um todo.

A forma de se calcular a métrica distância média do vizinho mais próximo (MNN) é apresentada abaixo. Esta métrica tem uma importância sobre a circulação de organismos em ambientes fragmentados, quanto menor for a distância entre duas manchas da mesma classe, maior é a chance de trocas de materiais genéticos entre populações separadas de uma mesma espécie.

$$MNN = \frac{\sum_{j=1}^{n'} h_{ij}}{n'_i}$$

h_{ij} = distância (m) da mancha ij a mancha mais próxima do mesmo tipo (classe), com base na distância borda a borda;
 $j = 1, \dots, n$ @ manchas;
 n_i = número de manchas na paisagem do tipo (classe) i .

As métricas de diversidade são computadas apenas para o nível da paisagem. Estas métricas são influenciadas por dois componentes – riqueza (*richness*) e regularidade (*evenness*). A riqueza refere-se ao número de classes presentes, e a regularidade refere-se à distribuição da área entre as diferentes classes. Riqueza e regularidade são geralmente referidas respectivamente como componentes da composição e da estrutura. O índice de diversidade de Simpson (SIDI), enquadra-se neste grupo de métricas.

O Índice de diversidade de Simpson, comparado a outros índices de diversidade, é menos sensível a presença de tipos raros de classes, mas é mais sensível aos tipos mais comuns. O valor do índice de Simpson representa a probabilidade de uma célula (*pixel*) selecionada aleatoriamente pertencer a uma classe diferente. Desta forma, para valores elevados deste índice, maior é a probabilidade de duas manchas selecionadas aleatoriamente serem de classes diferentes (*i.e.*, maior diversidade). Este índice terá o valor zero quando a paisagem for composta de uma única mancha, aumentando conforme aumenta o número de classes (e de manchas destas classes) e a distribuição da área da paisagem entre estas classes (e entre as manchas destas classes) tornar-se mais equilibrada (valor máximo possível é 1). A diversidade de uma paisagem é importante apenas para as espécies que utilizam como habitat mais de um tipo de ecossistema. O índice de diversidade é um bom indicador da fragmentação da paisagem. Ou seja, paisagens com elevado índice de diversidade são paisagens muito fragmentadas.

O índice de diversidade de Simpson (SIDI) é obtido através da relação abaixo.

$$SIDI = 1 - \sum_{i=1}^m P_i^2 \quad \begin{array}{l} i = 1, \dots, m^{\text{®}} \text{ classes;} \\ P_i = \text{proporção da paisagem ocupada pela classe } i. \end{array}$$

As métricas de contágio e entrelaçamento quantificam a configuração da paisagem. Neste grupo de métricas enquadra-se o índice de contágio (CONTAG).

O índice de contágio é aplicado apenas ao nível da paisagem, e é baseado na adjacência de células (*pixels*) e não de manchas. Este índice de contágio consiste da soma, para todas as manchas, do produto de duas probabilidades: (1) a probabilidade de que uma célula aleatoriamente escolhida pertença a classe *i* (estimada pela abundância proporcional da classe *i*), e (2) a probabilidade condicional que dada uma célula pertencente a classe *i*, uma das suas células vizinhas pertença a classe *j* (estimada pela abundância proporcional das adjacências da classe *i* envolvendo a classe *j*).

O contágio mede tanto o entrelaçamento da classe (*i.e.*, a vizinhança de manchas de uma classe), quanto à dispersão das manchas (*i.e.*, a distribuição espacial de uma classe), que são medidas de configuração da paisagem. Ou seja, mede o nível de agregação das classes; valores elevados de contágio (próximos a 100%) resultam geralmente de paisagens com poucas manchas grandes e contínuas, enquanto que valores baixos (próximos a 0%) em geral caracterizam paisagens com muitas manchas pequenas e dispersas. Da mesma forma que o índice de diversidade de Simpson (SIDI), o índice de contágio (CONTAG) também é um excelente indicador da fragmentação da paisagem, mas tem que ser interpretado de forma inversa com relação ao índice de diversidade; ou seja, quanto menor o contágio, maior é a fragmentação da paisagem.

Abaixo é apresentada a forma de se calcular a métrica Índice de Contágio.

$$CONTAG = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[(P_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right] \circ \left[\ln(P_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right] \right]}{2 \ln(m)} \right] (100)$$

$i = 1, \dots, m^{\text{®}}$ número de classes;
 $k = 1, \dots, m^{\text{®}}$ número de classes;
 P_i = proporção da paisagem ocupada pela classe *i*;
 g_{ik} = número de adjacências (junções) entre as células (*pixels*) das classes *i* e *k*.

Parâmetros Utilizados no Cálculo das Métricas

Abaixo são apresentados os parâmetros requeridos pelo FRAGSTATS, utilizados no cálculo das métricas da paisagem para a área de estudos. O programa requer ainda a entrada de outros parâmetros para os quais foram utilizados valores “default” do programa.

- **Nome do arquivo de entrada (com extensão):** *[imagens com as classes de cobertura da terra para os anos de 1973, 1975, 1979, 1984, 1989, 1992, 1993, 1996, e 1997];*
- **Nome base para os arquivos de saída:** *[a este nome base são acrescentadas as extensões .patch, .class, .land, .full, referentes aos arquivos com o cálculo das métricas ao nível de mancha, classe, paisagem, e para os três níveis, respectivamente];*
- **Tamanho da célula da grade em metros (deve ser quadrada):** 60;
- **Distância da borda em metros para ser usada na determinação das áreas centrais:** 500;
- **Tipo de arquivo de imagem de entrada:** 3 *[8 bit binary file, neste caso, imagens em níveis de cinza em formato RAW exportadas pelo SPRING];*
- **Numero de linhas, colunas da imagem:** 859, 653;
- **Usar a diagonal para encontrar a mancha:** *y [sim];*
- **Raio de busca para índices de proximidade (metros):** 2000;
- **Calcular a distância do vizinho mais próximo:** *y [sim];*
- **Calcular estatística ao nível da mancha:** *y [sim];*
- **Calcular estatística ao nível da classe:** *y [sim].*

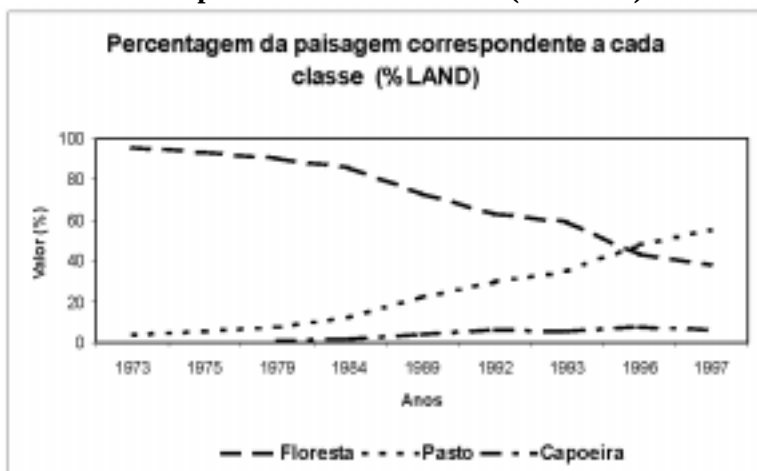
A definição de uma distância de borda de 500 metros teve como base o trabalho de LAURANCE (1991), pois este autor observou distúrbios em áreas de floresta tropical até essa distância da borda do fragmento de floresta.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A área de estudo apresenta uma diminuição drástica de 57% da área de floresta no período entre 1973 – 1997 (de 95 para 58% da paisagem), acompanhada por um aumento significativo das áreas de pastagem (de 4 para 55%), e pelo aparecimento de algumas poucas áreas de capoeira (6%), como pode ser observado na figura 8. A diminuição de mais da metade da área de floresta, por si só não é um bom

indicador da fragmentação da paisagem, pois se este desflorestamento estiver concentrado, poderia ter-se ainda quase metade da área de floresta preservada.

Fig. 8 – Comportamento da métrica percentagem da paisagem correspondente a cada classe (%LAND).



Um fato interessante que pode ser observado na figura 9, é que em 1973, uma única mancha de floresta correspondia a 95% da área de estudo, e em 1997, a maior mancha de floresta representava apenas 13% da paisagem. Por outro lado, enquanto que em 1973 a maior mancha de pasto representava menos de 1% da paisagem, em 1997 ela respondia por 43% da área de estudo. Observa-se ainda que a partir de 1996, a maior mancha da área de estudo pertence à classe pasto, e não mais a classe floresta.

O número de manchas na área de estudo aumentou de 178 manchas em 1973 (3 de floresta, 109 de pasto, nenhuma de capoeira e 66 de outra classe constante: rios) para 2906 manchas, distribuídas da seguinte forma: 526 de floresta (18%), 571 de pasto (20%) e 1743 de capoeira (60%) , como pode ser observado na figura 10. Grande parte desse aumento é devido ao aumento das manchas de capoeira, que em geral são pequenas, o que pode ser observado pela pequena área (6%) ocupada por esta classe na área de estudo em 1997 (fig. 8).

Fig. 9 – Comportamento da métrica Índice de maior mancha (LPI)

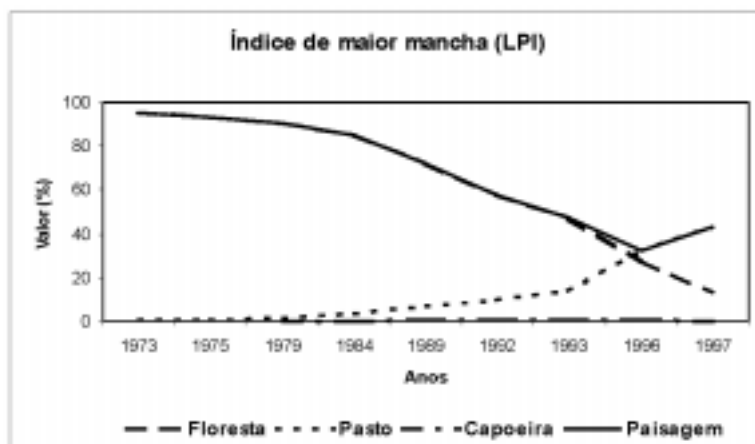
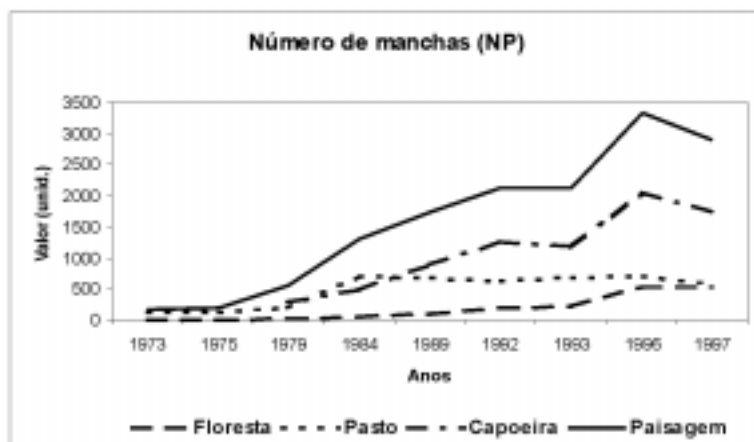


Fig. 10 – Comportamento da métrica Número de manchas (NP).



É interessante notar que a partir de 1984 não se observa mais aumento no número de manchas de pasto, verificando-se até uma diminuição de 1996 para 1997, o que demonstra que o aumento da área de pasto deveu-se ao aumento do tamanho de manchas antigas de forma mais marcante do que o surgimento de novas manchas. A diminuição do número de manchas de pasto de 1996 para 1997 pode estar indicando uma tendência de manchas de pastos vizinhos unirem-se formando manchas maiores, porém diminuindo o número das mesmas. Observou-se ainda, a diminuição do número de manchas da paisagem de 1996 para 1997, associada basicamente à diminuição do número de manchas de capoeira.

Da mesma forma que a diminuição da percentagem da área coberta por floresta, o aumento do número de manchas se analisado sozinho, pode não ser um bom indicador de fragmentação da paisagem, pois esse aumento poderia estar sendo representado pelo aparecimento de muitas manchas pequenas que se estivessem concentradas numa determinada área não teriam um grande impacto sobre a paisagem como um todo.

Como pode ser observado na figura 11, o tamanho médio das manchas da paisagem diminuiu de 1973 para 1997, associado basicamente à diminuição do tamanho médio das manchas de floresta (64.000 ha para 145 ha), o que é demonstrado pela diminuição do índice de maior fragmento da classe floresta (fig. 9). Observa-se ainda, um aumento gradual do tamanho das manchas de pasto (68 ha para 195 ha), sendo que em 1997, o tamanho médio das manchas de pasto é ligeiramente superior ao das manchas de floresta. O tamanho médio das manchas também deve ser olhado com cautela, com relação à fragmentação da paisagem, deve-se examinar também o desvio padrão, pois se esse for muito grande, ainda se poderia ter grandes manchas de floresta preservada mesmo com um tamanho médio relativamente baixo.

Outra métrica que apresenta um crescimento significativo de 1973 para 1997, é a densidade de borda (figura 12), passando de 3 para 25 m/ha, para a paisagem como um todo (todas as classes). Esse aumento da densidade de bordas está associado ao aumento do número de manchas. O aumento da densidade de bordas da classe floresta implica numa maior degradação deste ambiente, associada aos maléficos efeitos de borda, citados anteriormente. Observa-se ainda, uma diminuição da densidade de borda para todas as classes de 1996 para 1997, o que para as classes floresta e capoeira estariam possivelmente associada ao desaparecimento de manchas, enquanto que para o pasto à agregação de manchas.

Fig. 11 – Comportamento da métrica Tamanho médio das manchas (MPS).

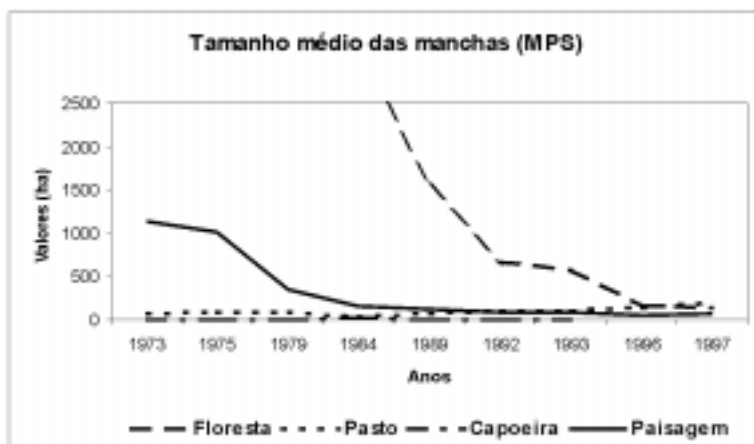
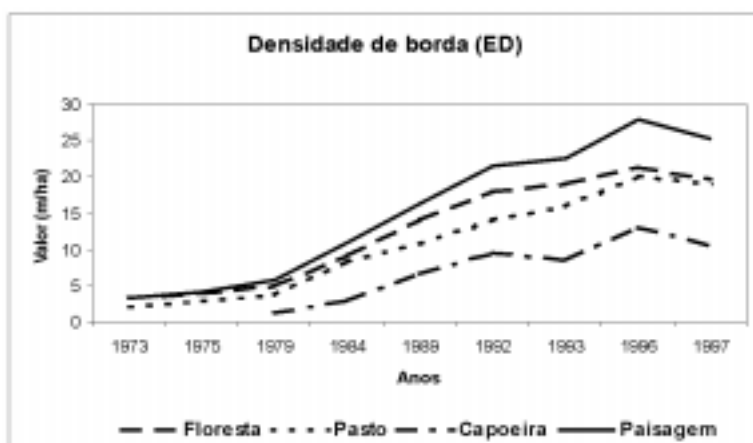
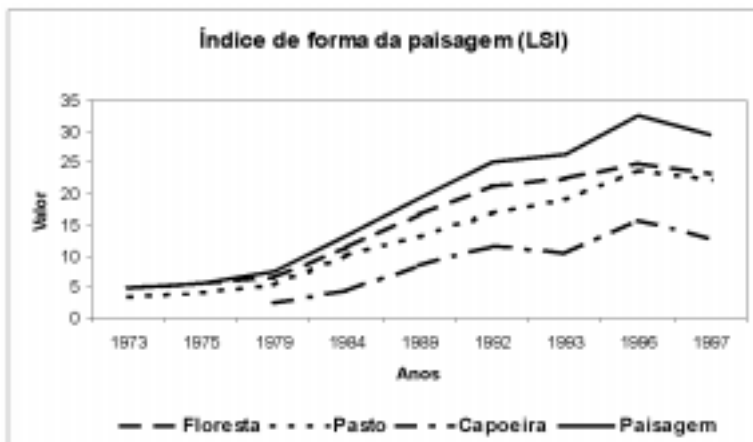


Fig. 12 – Comportamento da métrica Densidade de borda (ED).



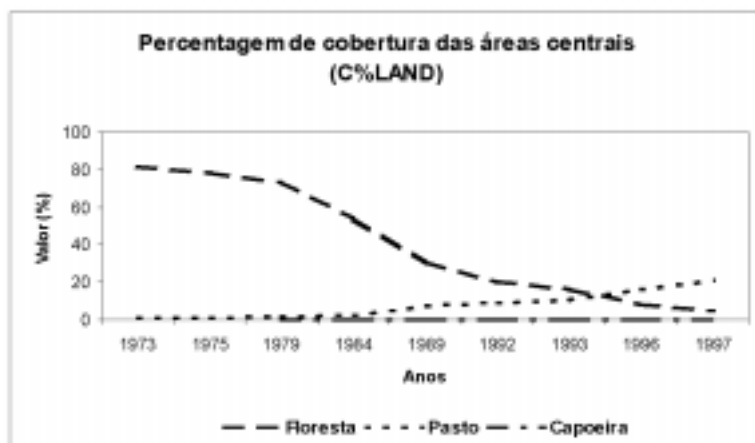
O aumento do índice de forma para todas as classes de 1973 para 1997 (de 5 para 30 para a paisagem como um todo) demonstra o aumento da complexidade das formas das manchas neste período (figura 13). Esta métrica da paisagem apresenta um comportamento idêntico ao da densidade de borda, uma vez que representa uma relação entre o perímetro de borda e a área da mancha. A diminuição observada de 1996 para 1997 está associada possivelmente aos mesmos motivos da diminuição da densidade de borda.

Fig. 13 – Comportamento da métrica Índice de forma da paisagem (LSI).



Como uma causa direta da diminuição do tamanho da mancha e consequentemente do aumento da densidade de borda da classe floresta, verifica-se uma enorme diminuição da percentagem da área central desta classe, ou seja, das áreas com distância superior a 500 m das bordas das manchas, que era de 81% em 1973 e passou para 5% em 1997 (figura 14). Uma vez que este índice representa o grau de degradação das áreas de floresta, observa-se desta forma uma degradação de 95% das florestas da área de estudo, no ano de 1997. Por outro lado, as áreas centrais correspondentes à classe pasto aumentaram de 1% para 21% neste período, devido ao aumento do tamanho das manchas de pasto.

Fig. 14 – Comportamento da métrica Percentagem de cobertura das áreas centrais (C%LAND).

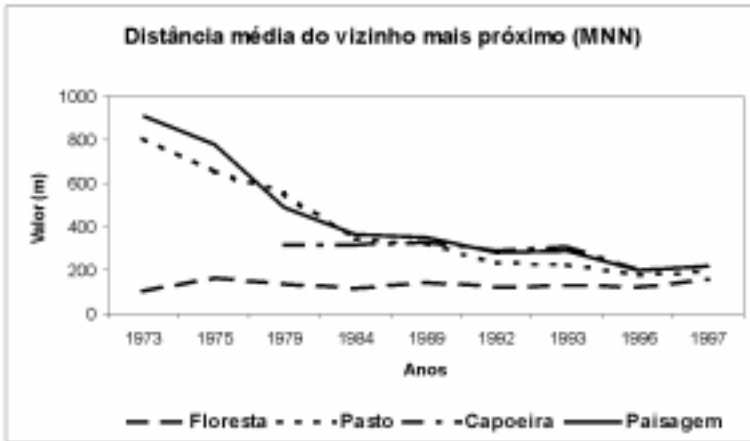


Como observado por SKOLE E TUKER (1993), a degradação associada ao efeito de borda na área de estudo, refletida na diminuição da percentagem de coberturas das áreas centrais de 76%, supera a perda da área de floresta que foi de 57%, no período de 1973 a 1997.

Embora as métricas densidade de borda e percentagem de cobertura das áreas centrais sejam melhores indicadoras da fragmentação da paisagem que as anteriores, elas possuem a limitação de terem uma distribuição espacial explícita.

A classe floresta não apresenta uma grande variação na métrica Distância média do vizinho mais próximo, sendo de 103 m em 1973 e de 157 m em 1997 (figura 15). As áreas de pasto, por outro lado, apresentaram diminuição de 804 m para 190 m, na distância do seu vizinho mais próximo, neste período. A distância média do vizinho mais próximo das áreas de capoeira permaneceu praticamente constante próxima aos 300 m de 1973 a 1993, diminuindo para cerca de 200 m em 1996, e mantendo-se neste nível no ano seguinte. Olhando apenas o comportamento da distância média do vizinho mais próximo para a classe floresta, dificilmente ter-se-ia uma idéia da fragmentação das áreas de floresta.

Fig. 15 – Comportamento da métrica Distância média do vizinho mais próximo (MNN)



O Índice de diversidade de Simpson também é uma medida da estrutura (configuração) da paisagem. Ou seja, a distribuição espacial das células das manchas é considerada, ainda que indiretamente. A figura 16 apresenta a variação deste índice para os anos estudados. O valor do Índice de diversidade de Simpson apresenta um valor muito baixo para o ano de 1973 (0,09), associado ao domínio da paisagem pela classe floresta (95%), atinge o valor máximo em 1996 (0,58), ano em que as classes pasto e floresta apresentam os valores de área mais próximos (48 e 43 % da paisagem respectivamente), diminuindo ligeiramente no ano seguinte (0,55), associado ao aumento da área de pasto e diminuição da área de floresta (55 e 38% respectivamente).

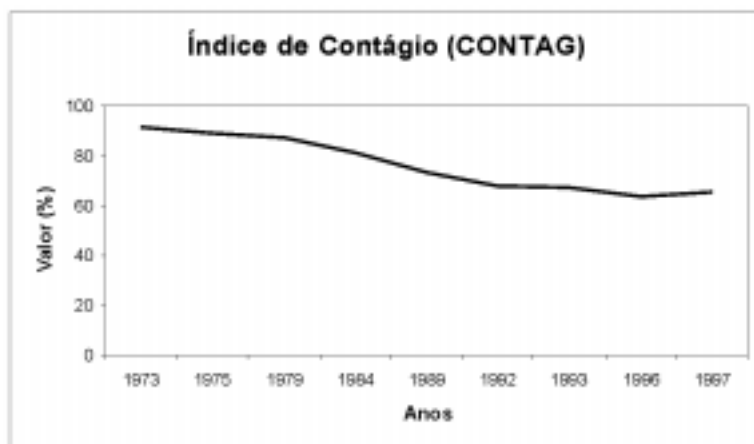
É interessante lembrar, como citado anteriormente (WICKHAM E RIITTERS, 1995), que se área da paisagem para o ano de 1996 estivesse igualmente distribuída entre as cinco classes da área de estudo (floresta, pasto, capoeira, rio e borda), e não apenas dividida entre pasto e floresta, o Índice de diversidade de Simpson alcançaria o valor 0,8.

O Índice de Contágio é a métrica que melhor mede a estrutura da paisagem, pois leva em consideração o arranjo espacial dos *pixels* das classes. Ao contrário do índice de diversidade, valores elevados de contágio significam que uma única classe compacta, ou seja, com poucas manchas de grande extensão, domina a paisagem, como é o caso da classe floresta na área de estudo para o ano de 1973 (3 manchas ocupando 95% da área), o que resulta no valor de contágio de 91% (figura 17). O valor de contágio diminui progressivamente de 1973 a 1996, quando

Fig. 16 – Comportamento da métrica Índice de diversidade de Simpson (SIDI).



Fig. 17 – Comportamento da métrica Índice de contágio (CONTAG)



atinge o seu valor mais baixo, 63%; aumentando um pouco ano seguinte para 66%. Da mesma forma que para o índice de diversidade, o valor mais baixo de contágio para o ano de 1996 está associada ao aumento do número de manchas das classes pasto e floresta, e também a menor diferença de área ocupada por estas duas classes (diferença de 5%). O aumento do índice de contágio no ano de 1997 está refletindo o aumento na diferença entre as áreas das classes pasto e floresta (de 5% para 17%).

Pelo fato do Índice de Contágio ser sensível à distribuição dos pixels entre as manchas das classes da paisagem, ou seja, quanto maior o número de manchas e diversidade das classes maior o seu valor, ele é um bom indicador da fragmentação da paisagem. Logo, se não houver um aumento das áreas de capoeira em detrimento das áreas de pasto nos anos posteriores a 1997, acredita-se que a paisagem tenha atingido a sua fragmentação máxima no ano de 1996, quando o contágio atinge o seu nível mais baixo (63%). Propõe-se um valor de fragmentação da paisagem para o ano de 1996 de 37%, que representa 100% - o valor do Índice de Contágio.

O valor mínimo de contágio de 63% obtido para a área para o ano de 1996, é bem superior ao valor obtido por FROHN *et al.* (1996), para uma área de estudo em Rondônia no ano de 1986, que foi de 40%. Esta diferença pode estar associada a tamanhos menores das manchas, tanto de pasto quanto de florestas, da área de estudo de FROHN *et al.* (1996), resultante de projetos de colonização de pequenos assentamentos. Ou seja, a área de estudo de FROHN *et al.* (1996) apresentou uma maior fragmentação do que a área deste estudo.

CONCLUSÕES

Apenas 5% da área de floresta encontrava-se preservada, ou seja, a mais de 500 m de uma borda, no ano de 1997. Esta degradação intensa está associada ao fato da área de estudo estar localizada na região de taxas de desflorestamento mais elevadas da Amazônia, denominada de arco do desflorestamento.

Embora as métricas Percentagem da paisagem correspondente a cada classe, Índice de maior mancha, Número de manchas, Tamanho médio da mancha, Densidade de bordas, Índice de forma da paisagem, Percentagem da paisagem correspondente a áreas centrais, Distância média do vizinho mais próximo, e Índice de diversidade de Simpson sejam bons indicadores da evolução da paisagem, como elas não são espacialmente explícitas, recomenda-se cautela na utilização dessas métricas como medidas de fragmentação da paisagem.

Por outro lado, a métrica Índice de contágio, pode ser utilizada como um índice de fragmentação da paisagem (100% - Índice de contágio), pois leva em con-

sideração a distribuição dos pixels entre as manchas das classes da paisagem, tanto com relação ao número de manchas quanto a diversidade delas (número de classes).

Com base no valor do Índice de contágio, estima-se que a fragmentação da paisagem da área de estudo tem atingido o seu valor máximo de 37% no ano de 1996, assumindo-se que não haverá um aumento da área de capoeiras em detrimento das áreas de pasto. A tendência é que esta fragmentação diminua associada ao aumento do tamanho das manchas de pasto, o que provocará a coalescência das mesmas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREN, H. Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat – a review. **Oikos**, 71(3): 355-366, Dec., 1994.
- DPI/INPE. Tutorial do SPRING. <http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario/tutorial.htm>, sd.
- FROHN, R.C.; MCGWIRE, K.C.; DALE, V.H.; ESTES, J.E. Using satellite remote sensing analysis to evaluate a socio-economic and ecological model of deforestation in Rondônia, Brazil. **International Journal of Remote sensing**, 17(16):3233-3255, Nov., 1996.
- LAURANCE, W.F. Edge effects in tropical forest fragments – application of a model for the design of nature-reserves. **Biological Conservation**, 57(2): 205-219, 1991.
- MCGARIGAL, K.; MARKS, B.J. **FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure**. Corvallis, Oregon State University, 1994, 67p.
- PEREIRA, J.L.G. **Estudos de áreas de florestas em regeneração através de imagens Landsat TM**. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1996. 137p. (INPE-5987-TDI/578).
- ROBERTS, D.A; BATISTA, G.T.; PEREIRA, J.L.G.; WALLER, E.; e NELSON B.W. Change identification and multitemporal spectral mixture analysis applications in Eastern Amazônia. In: Elvidge, C.D. e Lunetta, R. Eds. **Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Applications and Methods**. New York, Ann Arbor Press, 1999, Chapter 9, pp. 137-161.

SKOLE, D.; TUCKER, C. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. **Science**, 260(5116):1905-1910, Jun., 1993.

WICKHAM, J.D.; RIITTERS, K.H. Sensitivity of landscape metrics to pixel size. **International Journal of Remote sensing**, 16(18):3585-3594, Dec., 1995.

RECEBIDO EM SETEMBRO DE 2000.