

TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E DE ANÁLISE ESPACIAL PARA ESTUDO DE ÁREAS FLORESTAIS SOB A EXPLORAÇÃO MADEIREIRA¹

Fernando Del Bon Espírito-Santo², João Roberto dos Santos² e Patrícia Guedes da Silva²

RESUMO – As atividades de exploração madeireira vêm sendo intensificadas na região amazônica, apesar dos esforços de controle e fiscalização por parte dos órgãos ambientalistas, que têm procurado estabelecer diretrizes para um uso sustentável da floresta. As imagens de satélite e as técnicas de tratamento de dados têm sido importantes ferramentas para subsidiar os processos de caracterização, inventário e monitoramento da cobertura florestal do país. Nesse contexto, o presente trabalho objetivou analisar a influência da rede viária na distribuição espacial das áreas de exploração madeireira e, inclusive, quantificar esse tipo de prática em áreas de preservação permanente. Uma área situada no Mato Grosso (MT), com intensa atividade madeireira, foi utilizada como estudo, em que os vários planos de informações, derivados de imagens Landsat/TM, foram tratados por técnicas de análise espacial, através do uso de operadores algébricos de decisão. A análise resultante demonstra uma significativa relação entre as dimensões das áreas de exploração madeireira e a proximidade da malha viária e que a espacialização das áreas de corte seletivo permite verificar que essa prática também ocorre em áreas definidas como de preservação permanente, ao lado da rede de drenagem.

Palavras-chave: Floresta tropical, sensoriamento remoto, sistema de informação geográfica, monitoramento e Amazônia.

IMAGE PROCESSING AND SPATIAL ANALYSIS TECHNIQUES TO STUDY AREAS COVERED BY RAINFOREST UNDER TIMBER EXPLOTATION

ABSTRACT – Timber exploitation activities have grown significantly in the Amazon region, in spite of efforts to control and monitor made by environmental agencies, which are seeking to establish regulations for forest sustainable use. Satellite images and data processing techniques are important tools to subsidize the processes of characterization, inventory and monitoring of forest cover in Brazil. In this context, the objective of this study is to analyze the influence of the road net on the spatial distribution of timber exploitation areas, as well as to quantify this type of practice in areas of permanent protection. A test-site located in Mato Grosso State (MT), with intense logging activity, was used, where several Information Plans (IP's), derived from Landsat-TM, were processed by spatial analysis techniques, using algebraic operators for decision-making. The resulting analysis shows a significant relation between the dimensions of timber exploitation areas and the closeness to the road network, moreover, that the selective cutting areas occurred also in those sections defined as permanent preservation areas adjacent to road network.

Key words: Tropical rain forest, remote sensing, geographic information systems, monitoring e Amazon.

¹ Recebido para publicação em 06.11.2003 e aceito para publicação em 10.8.2004.

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE): Av. dos Astronautas, 1.758, 12227-010 São José dos Campos, SP, Tel: +55 (12) 3945-6465, Fax:+55 (12) 3945-6449. E-mail: {fernando, jroberto, patricia}@ltd.inpe.br

1. INTRODUÇÃO

Dentre as formas de extração florestal, o corte seletivo de madeira de valor comercial vem ocorrendo com grande frequência e de forma impactante na Amazônia (PPG7, 2002). Estima-se que 15.000 km²/ano das florestas da Amazônia são afetados por essas práticas (NEPSTAD et al., 1999). Araújo et al. (2001), analisando imagens TM/Landsat (26 cenas) ao longo de uma série histórica (11 anos) na região do chamado “Arco do Desflorestamento”, constataram uma forte influência dessa atividade de exploração dos recursos florestais.

A demanda de madeira e produtos derivados e a necessidade de recursos financeiros para manutenção dos lotes por parte dos colonos são algumas das causas dessa atividade predatória. A abertura de estradas para expansão agrícola e pecuária é um indicador do fator de avanço dessa atividade madeireira (VERÍSSIMO et al., 1998; NEPSTAD et al., 2002). Nesse contexto, imagens de satélites integradas em um sistema de informação geográfica (SIG) são úteis para monitorar e fiscalizar o uso da cobertura florestal. Este trabalho objetivou analisar a influência da rede viária sobre a distribuição espacial das áreas de exploração florestal (corte seletivo), bem como quantificar essas áreas situadas em locais de preservação permanente. Para tanto, técnicas de processamento de imagens e de análise espacial foram empregadas como procedimento básico de tratamento dos dados.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área de estudo está localizada no Estado do Mato Grosso, contida na folha SC.21-Z-D da DSG (1983), abrangendo uma superfície de 18.104 km², entre as coordenadas geográficas de 11° 00' e 12° 00' S e 54° 00' e 55° 30' W. A vegetação da região é formada predominantemente por Floresta Ombrófila Densa e Floresta Semidecidual, com grande potencialidade para produção madeireira (RADAMBRASIL, 1976). Nessa região há intensa atividade madeireira, localizada basicamente ao redor de quatro centros urbanos (Sinop, Marcellândia, Juína e Cláudia), concentrando 38 a 52% das serrarias existentes no Mato Grosso, com consumo de aproximadamente 30% da madeira cortada do Estado (SEPLAN, 1999).

2.2. Dados de sensoriamento remoto

Neste trabalho, foi utilizada uma imagem do sensor TM (“Thematic Mapper”) do satélite Landsat-5 referente à órbita 226/ponto 68, adquirida em 26 de junho de 2000, nas formas analógica e digital. A imagem em formato analógico, composição 5, 4 e 3 (RGB), serviu para a interpretação visual das áreas de corte seletivo de madeira (ACSM), baseado em parâmetros de fotointerpretação como cor, textura, forma e relação de contexto, conforme o procedimento adotado historicamente na análise empregada por Santos et al. (2002). Essa base histórica também estava incluída no banco de dados, tornando-se relevante para a análise objetivo do presente estudo, sobretudo naquilo que se refere à indicação das áreas que, em tempos passados, foram afetadas por exploração madeireira. Os polígonos caracterizados como áreas de exploração madeireira foram delimitados em “overlay”, georreferenciados e incorporados a um sistema de informação geográfica (SIG). A delimitação dos polígonos foi realizada com base na ocorrência de pátios de estocagem de madeira.

A imagem em formato digital serviu para a extração da rede viária, principal e secundária, existente na região. Inicialmente, as seis bandas ópticas do TM/Landsat foram corrigidas para valores de reflectância superficial aparente, através da metodologia de Markham e Barker (1986). Posteriormente, através do modelo linear de mistura espectral (MLME), geraram as imagens-fração (solo, sombra e vegetação), conforme Shimabukuro e Smith (1991). Com o uso da imagem da fração solo, foi possível traçar, em tela, as estradas que cortam a região e notar com mais facilidade as áreas de corte seletivo (Figura 1). Todos os procedimentos de tratamento da imagem e construção dos planos de informações (PI's) foram realizadas no ambiente computacional SPRING 3.6 (CÂMARA et al., 1996).

Como informação complementar, mas também importante para análise, foi extraída a rede hidrográfica da região, utilizando-se as cartas topográficas em escalas de 1:250.000 da Diretoria de Serviço Geográfico (DSG, 1983). Através da integração desse plano de informação, da rede viária e das ACSM, pôde ser obtida uma análise sinóptica da região (Figura 2).

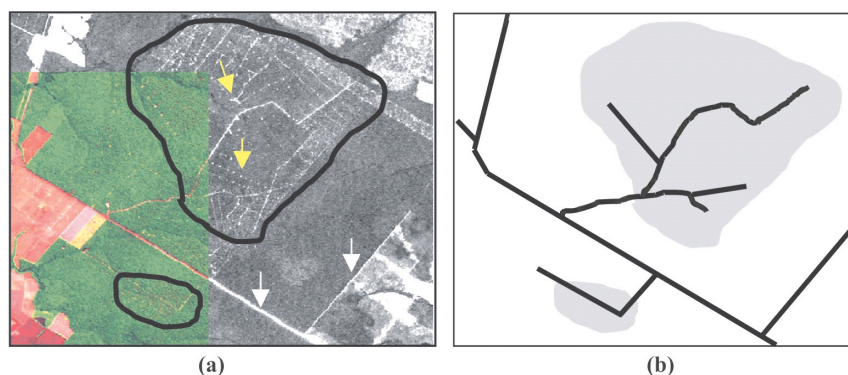


Figura 1 – Imagem de satélite em composição colorida (TM 3B, 4G e 5R) e da componente fração solo derivada do MLME, ilustrando (a) áreas sob a atividade madeireira (pátios de estocagens) e rede viária para retirada e transporte das toras e a (b) representação da zona afetada por exploração madeireira e das linhas principais de transporte em um SIG.

Figure 1 – Satellite image in color composite (TM 3B, 4G and 5R) and of the soil fraction, derived from MLME, illustrating at (a) areas under timber exploitation (yards for storage) and the roads to collect and transport trunks; (b) zone affected by selective logging and the main transport lines in a GIS.

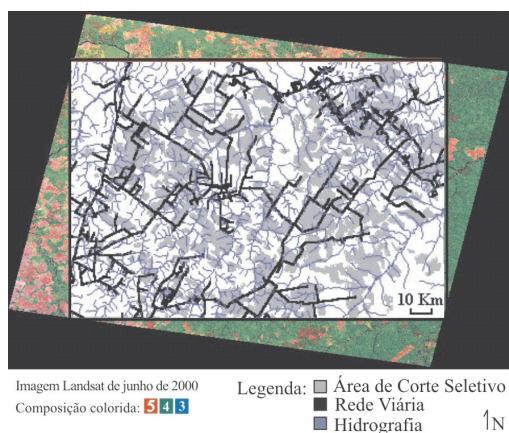


Figura 2 – Mapa temático das áreas de corte seletivo, rede viária e hidrografia, sobreposto em imagem TM/Landsat (composição colorida 5R4G3B).

Figure 2 – Thematic map of areas with selective logging, roads and drainage, overlain in TM/Landsat image (color composite 5B4G3B).

2.3. Análise espacial dos dados geográficos

Com a construção do banco de dados geográfico, foi possível realizar diversas operações de análise espacial, representadas em um único fluxograma (Figura 3). A representação adotada nesse fluxograma levou em consideração os conceitos de “visão de objeto”

e “visão de campo” para objetos geográficos com e sem uma fronteira definida, respectivamente, conforme descrito por Burrough e McDonnell (1998).

2.3.1. Construção de mapas de distância *buffers* e imagens numéricas

Para compreender a dinâmica do uso das ACSM em regiões com intensa rede viária, bem como quantificar se essa prática de exploração está ocorrendo em áreas de preservação permanente (ao longo dos rios), foram construídos mapas de distância (*buffer*) em torno da rede viária e da rede hidrográfica.

O critério para a criação dos mapas de distância da rede viária (estradas florestais) nas áreas de corte seletivo foi baseado em algumas estimativas de alcance exploratório dessas atividades, como no zoneamento madeireiro da região do Pará (VERÍSSIMO et al., 1998). Nesse trabalho citado foram encontradas áreas de corte seletivo distanciadas em até 25 km da rede viária principal. Como a maior ocorrência dessas áreas foi observada em situações de curta distância das estradas, foram adotadas, no presente estudo, diferentes faixas de *buffer*, buscando-se minimizar o efeito da proximidade espacial. Foram construídas oito faixas com 0,5 km de largura para as áreas de cortes seletivos que se encontravam distanciadas em até 4 km da rede viária e seis faixas de 3 km para o restante

das áreas de corte seletivo. Essas faixas, posteriormente, foram ponderadas entre valores de 0 e 1, mínima e máxima influências da rede viária sobre as áreas de corte seletivo, respectivamente, e transformada em uma imagem numérica ou em níveis de cinza (Figura 4).

Para a hidrografia, o critério de construção dos *buffers* foi baseado no Código Florestal Brasileiro, Lei N° 4.771, de setembro de 1965, o qual estabelece que áreas próximas aos cursos d' água são áreas de preservação permanente (APP), sendo a faixa de preservação dependente da largura do rio. Em cursos d' água entre 10 e 50 m de largura de margem, deve existir uma APP mínima de 50 m. Como os cursos d' água na área de estudo situam-se nesse intervalo, foram construídos *buffers* com 50 m de faixa, em cada lado das margens.

Esses *buffers* correspondem às faixas mínimas de vegetação que não deveriam ser utilizadas através do uso direto, como geralmente vem ocorrendo nas práticas de exploração madeireira sem o devido plano de manejo. Após a construção dos *buffers*, esses foram transformados em uma imagem numérica (Figura 5a), em que 0 representa as APPs e 1, as áreas fora do limite destas. Da mesma forma que para a rede viária e hidrográfica, as ACSMs também foram ponderadas entre valores de 1 e 0, representando áreas com e sem presença de corte seletivo, respectivamente, originando outra imagem numérica (Figura 5b).

Essas imagens numéricas foram necessárias para construção de um banco de dados em forma matricial, permitindo a realização de cruzamentos entre os diversos PIs.

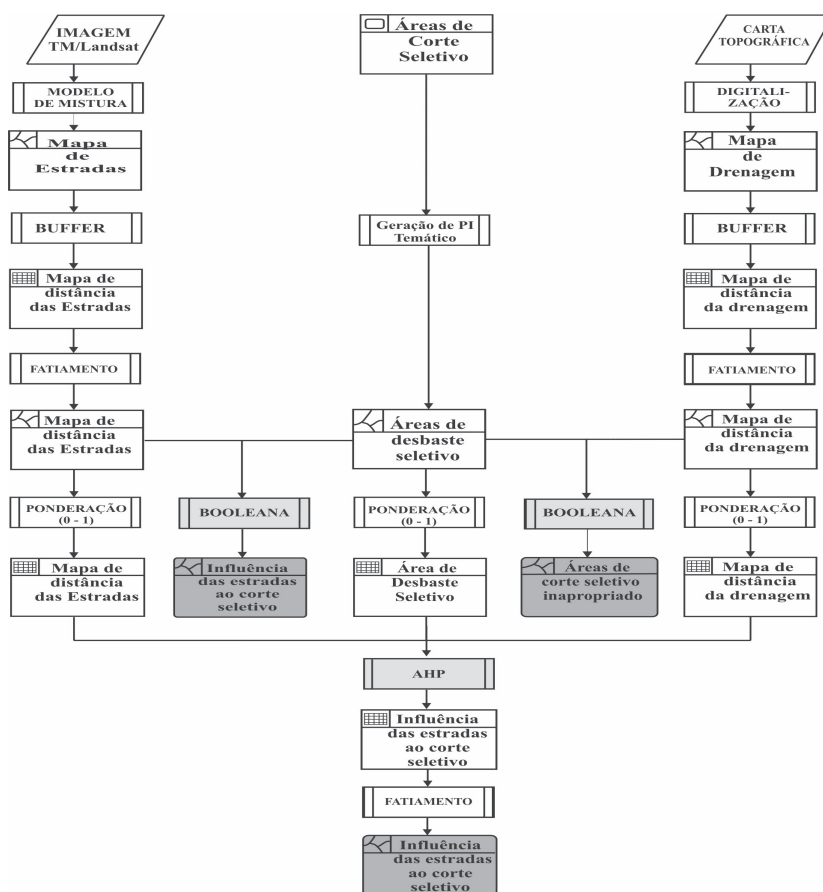


Figura 3 – Fluxograma da análise geográfica dos dados em área sob exploração madeireira.

Figure 3 – Flowchart of geographical data analysis in timber exploitation areas.

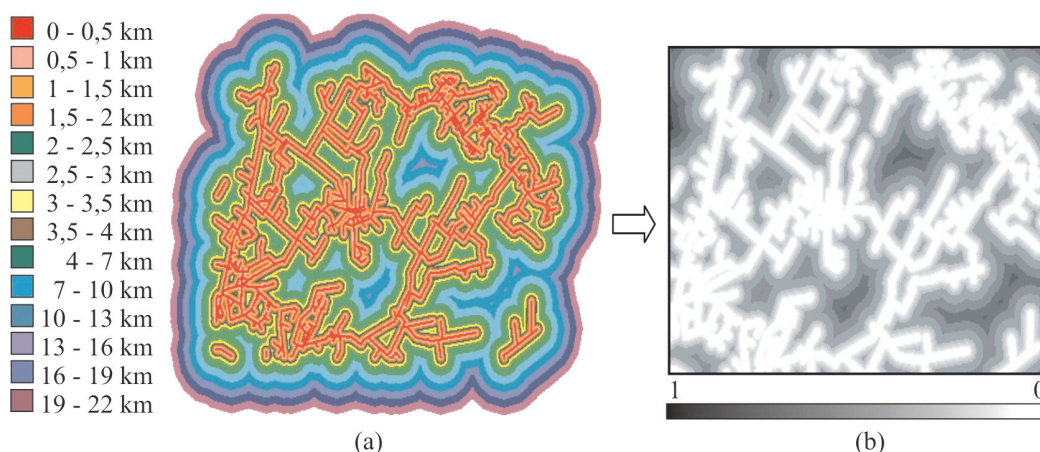


Figura 4 – Representação gráfica de distância das estradas florestais (a) e da imagem numérica ponderada entre valores de 1 e 0 (b).

Figure 4 – Graphic representation of distance of secondary roads in forest areas (a) and numerical weighted image with values from 1 and 0 (b).

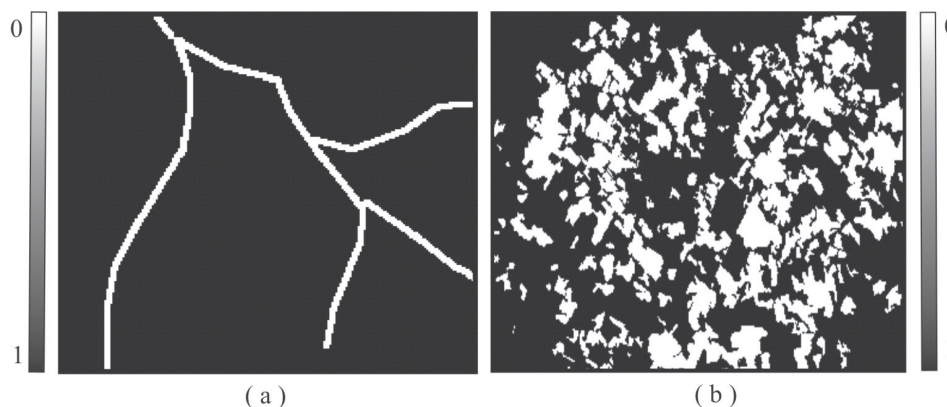


Figura 5 – Imagem numérica da hidrografia (a) e das áreas afetadas pela exploração madeireira (b).

Figure 5 – Numerical image of hydrography (a) and of areas affected by timber exploitation (b).

2.3.2. Uso de operadores algébricos de suporte à decisão

Com o objetivo de analisar as interações entre os dados espaciais, foram utilizados operadores algébricos de mapas, que reduzem a ambigüidade das interpretações e fornecem um melhor suporte à tomada de decisões. Para isso foram utilizados dois operadores, o *booleano* e o ponderador AHP (“Analytical Hierarchy Process”), disponíveis no Spring 3.6. O

operador *booleano* permite realizar cruzamentos entre dois ou mais planos de informação, através de uma lógica *booleana* entre dois conjuntos de dados, conforme Bonham-Carter (1994). O operador AHP pondera os diferentes fatores de influência a dado fenômeno, através de lógica hierárquica de importância, permitindo compreender as causas das variações espaciais dos dados geográficos (SAATY, 1986).

A análise *booleana* foi realizada entre os PIs da

rede viária e das ACSM. No decorrer da utilização da técnica AHP, o plano de hidrologia foi também considerado no modelo de investigação, juntamente com a malha viária. Na hierarquização da importância dos planos de informações para a construção do modelo, a rede hidrográfica tem um peso secundário, comparado com aquele da rede viária, responsável maior pelo escoamento da madeira. Tal procedimento não foi adotado no uso do operador *booleano*, pois esse só realiza álgebra de mapas (cruzamentos entre mapas) de forma dual, ou seja, somente entre dois PIs.

2.3.3. Análise de correlação

Além da espacialização das faixas de distância das estradas, também foi realizada uma análise de relação entre as distâncias das estradas e as ACSMs, verificando-se a magnitude do comportamento entre essas duas variáveis. Para isso foi aplicada uma análise de regressão simples com função linear (NETER et al., 1989), através da fórmula:

$$Y_i = B_0 + B_i X_i + e_i$$

em que Y_i = variável dependente, áreas de corte seletivo (ha); X_i = variável independente, distância das estradas até as áreas de corte seletivo (km); B_i = coefi-

entes de ajuste de regressão; e e_i = erro de ajuste de regressão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Influência das estradas e da hidrografia em áreas de corte seletivo

Para analisar as ACSM, quanto a proximidade espacial das estradas florestais e da hidrografia, foram aplicados os operadores *booleano* e AHP. Na análise *booleana* foram consideradas duas faixas de distâncias: ACSM altamente influenciada pela proximidade das estradas, cuja categoria engloba aquelas áreas contidas em até 4 km de distância da malha viária; e ACSM moderadamente influenciada, que incluiu aquelas contidas em uma faixa de 4 a 16 km de distância das estradas. Para a modelagem pela AHP, além dessas duas categorias, foi acrescentada a faixa de distância com pouca influência sob as ACSM. Essa última faixa corresponde aos locais com uma distância de 16 km das estradas e leva em consideração ainda a rede de hidrografia da área de estudo. O resultado da espacialização das faixas de distâncias das estradas que mais influenciaram o corte seletivo, pelo método *booleano* e AHP, pode ser visualizado na Figura 6.

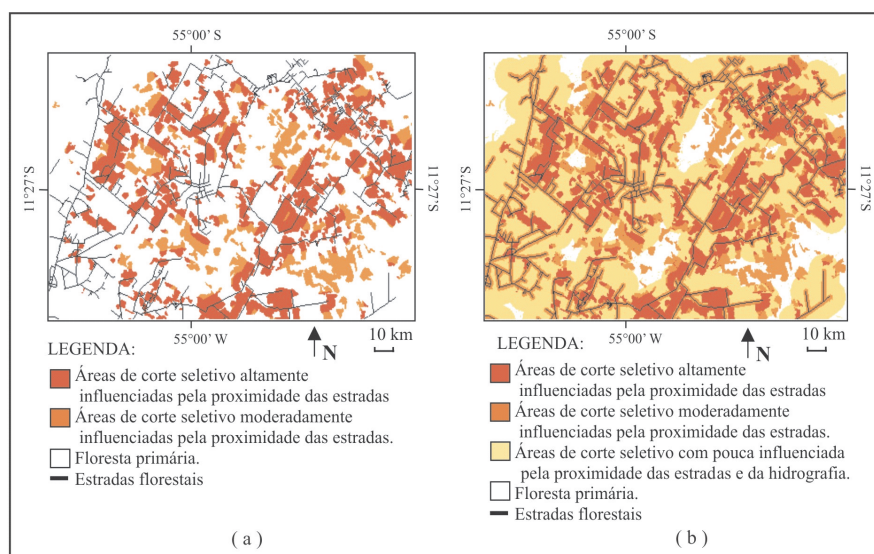


Figura 6 – Espacialização das áreas de exploração madeireira, classificadas pela proximidade das estradas pelo Método *Booleano* (a) e pela proximidade das estradas e hidrografia pelo método AHP (b).

Figure 6 – Spatial representation of timber exploitation areas defined by the closeness of roads, using the Boolean Method (a) and by the closeness of roads and hydrography, using the AHP method (b).

A análise da diferença entre o uso da técnica *booleana* e AHP neste trabalho indicou que, na AHP, foram consideradas três faixas de distância, acrescentando-se a influência da hidrografia (apesar de moderada). Além disso, nessa análise foram utilizados valores ponderados nas diferentes faixas de distâncias das estradas (Quadro 1), possibilitando a produção de um mapa temático mais criterioso.

Para determinar a correlação entre as ACSMs e a distância das estradas foi realizada uma análise de relacionamento entre variáveis. Para isso, foi feito um cruzamento entre os PIs do mapa de distância das estradas (Figura 4b) e das áreas de corte seletivo (Figura 5b), todos em formato matricial. Na Figura 7, pode-se perceber que há uma relação direta entre o tamanho da área de exploração madeireira e a proximidade da malha viária ($R^2=0,96$). Isso se deve, principalmente, à facilidade de acesso à etapa operacional de exploração e ao baixo custo de escoamento da produção, em comparação com as áreas distantes das estradas (SOUZA, 2001).

3.2. Áreas de corte seletivo em locais de preservação permanente

A partir do cruzamento entre os PIs das ACSM (polígonos de corte seletivo) e os *buffers* de áreas de APP, conforme descrito em 2.3.1., pode-se realizar uma quantificação do nível de degradação ocasionado pela exploração madeireira que está atingindo as APPs. Através desse cruzamento, percebeu-se que 5.143 ha de ACSM ocorreram em APP.

Quadro 1 – Valores das ponderações aplicadas às ACSM, conforme a distância das estradas

Table 1 – Values of weighting applied to ACSM according to the distance to roads

Distância das estradas (km)	Ponderação	Distância das estradas (km)	Ponderação
00 - 0,5	1	3,5 - 04	0,70
0,5 - 01	0,95	04 - 07	0,60
01 - 1,5	0,90	07 - 10	0,50
1,5 - 02	0,85	10 - 13	0,40
02 - 2,5	0,80	13 - 16	0,30
2,5 - 03	0,75	16 - 19	0,20
03 - 3,5	0,70	19 - 22	0,10

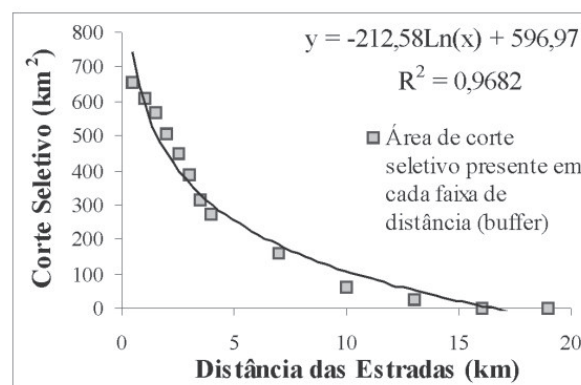


Figura 7 – Relação entre a dimensão das áreas sob exploração madeireira e a distância da malha viária.

Figure 7 – Relation between the dimension of areas under timber exploitation and the distance to the roads.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo, demonstrou-se a capacidade do uso de imagens de satélites e de um sistema de informação geográfica na análise, controle e fiscalização da atividade madeireira em uma área da Amazônia Central. A metodologia adotada para compreender a influência da proximidade das estradas nesse tipo de exploração dos recursos florestais e, mesmo, uma avaliação das ACSMs que não deveriam estar ocorrendo em APP apresentou-se eficiente.

Foi possível observar alta relação ($R^2=0,96$) entre ACSM e proximidade da rede viária que corta a região, indicando que a abertura de estradas nessa região é, sem dúvida, um importante fator de mudanças na paisagem, com a intensificação do uso da terra local. A espacialização das ACSMs influenciadas pela proximidade das estradas, tanto pelo método *booleano* quanto pelo hierárquico (AHP), produziu mapas temáticos similares para a categoria de faixa de distância de ACSMs altamente influenciadas pelas estradas. A AHP apresentou-se mais eficiente na espacialização desse fenômeno, por adotar diferentes pesos nas ponderações das diferentes faixas de distância das estradas.

O cruzamento temático entre os PIs das APPs e ACSMs indicou que houve um processo de degradação da paisagem que se estende para as áreas de preservação permanente, proibido pela legislação de uso da terra.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (código 33010013005P0) e ao CNPq (processos 300677/71-0 e 130124/2001-0). Este projeto está inserido no contexto do Programa C&T para Gestão de Ecossistemas (PPA 2000-2003/MCT).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, L.S. et al. Multitemporal TM/Landsat for monitoring timber exploitation areas in the Brazilian Amazônia. In: **International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS 2001**. Sydney: 2001. CD-ROM.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists, modeling with GIS**. Ontário: Pergamon, 1994. 398p.

BURROUGH, P.A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. Oxford: Oxford University Press, 1998. 333 p.

CÂMARA, G. et al. SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS with Object-Oriented Data Modelling. **Computers and Graphics**, v.15, n.6, p.13-22, 1996.

DSG - Diretoria de Serviço Geográfico. **SC.21-Z-D. (Sinop) Carta Topográfica**. 1:250.000. Rio de Janeiro. 1983.

MARKHAM, B.L.; BARKER, J.L. **Landsat MSS and TM postcalibration on dynamic ranges of exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures**. Lanham: EOSAT, 1986. 21 p. (Landsat Technical,1).

NEPSTAD, D.C. et al. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v. 398, n.6727, p. 505-508, 1999.

NEPSTAD, D.C. et al. Frontier governance in Amazonia. **Science**, v.295, n.25, p. 629-631, 2002.

NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M. H. **Applied linear regression models**. 2. ed. Boston: 1989. 667p.

PROGRAMA PILOTO PARA PROTEÇÃO DAS FLORESTAS DO BRASIL - PPG7.

Monitoramento das áreas de exploração madeireira da Amazônia. Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT. Brasília. Setembro de 2002 <http://www.mct.gov.br/prog/ppg7/revista_PPD/Ecossis/ecossis_09.htm>.

RADAMBRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Folha S/A 21-Santarém. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: DNPM, 1976. 510 p. (Levantamento dos Recursos Naturais, v. 10).

SANTOS, J.R.; KRUG, T.; ARAUJO, L.S. Corte de árvores visto do espaço. **Ciência Hoje**, v. 30, n.179, p. 67- 69, 2002.

SAATY, T. L. Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. **Management Science**, v.32, n.7, p. 841-855, 1986.

SECRETARIA DE ESTADO DO PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO GERAL. SEPLAN. **Diagnóstico sócio econômico e ecológico do Estado do Mato Grosso**. CEPROMAT - Centro de Processamento de Dados do Estado de Matogrosso. Cuiabá: 1999. CD-ROM.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-20. 1991.

SOUZA, C.M. et al. Extração de informações de imagens Landsat para modelos de alcance econômico da atividade madeireira. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR 2001**, 10. Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: 2001. CD-ROM.

VERÍSSIMO, A.; SOUZA, C.J.; STONE, S. Zoning of timber extraction in the Brazilian Amazon. **Conservation Biology**, v.12, n.1, p. 128-136, 1998.