

# MAPEAMENTO DO USO DA TERRA, VEGETAÇÃO E IMPACTOS AMBIENTAIS POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO

Jonas Luís ORTIZ <sup>1</sup> & Maria Isabel Castreghini de FREITAS <sup>2</sup>

(1) Floresteca Agroflorestal Ltda. Avenida Governador João Ponce de Arruda, 1054 – Jardim Aeroporto. Várzea Grande, MT. CEP 78110-971. Endereço eletrônico: jonas@planthae.com.br. (2) Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. Caixa Postal 178. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: ifreitas@rc.unesp.br

Introdução  
Características da Área Estudada  
Material  
Método  
    Geo-referenciamento das Imagens SPOT  
    Geo-referenciamento da SPOT-PAN de 1995  
    Geo-referenciamento da SPOT-XS de 1995  
    Classificação Supervisionada de Imagens Orbitais  
    Realce de Imagens Orbitais  
    Índices de Vegetação Diferença Normalizada  
    Operações Booleanas Sobre o Mapa Temático  
    Operação para Cálculo de Área  
Resultados  
    Classificação Multiespectral e Análise Qualitativa dos Mapas Convencional e Digital para 1995  
    Filtragem Digital Utilizando Filtro Laplaciano + Original  
    Índice de Vegetação Diferença Normalizada  
    Análise Quantitativa Comparativa Entre Mapeamento Digital e Convencional  
    Descrição das Vantagens e Desvantagens da Utilização da Metodologia Proposta  
Considerações Finais  
Agradecimentos  
Referências Bibliográficas

**RESUMO** – O mapeamento do uso da terra, vegetação e impactos ambientais utilizando sensoriamento remoto e geoprocessamento permite detectar, espacializar e quantificar as alterações provocadas pelo homem na natureza, contribuindo para o monitoramento e planejamento de atividades que provocam ou possam provocar danos ao meio ambiente. O objetivo desse trabalho constituiu-se em aplicar metodologias que utilizem processamento digital de imagens orbitais para o mapeamento do uso da terra, vegetação e atividades antrópicas que causam impacto ao meio, considerando uma área teste que corresponde ao distrito de Assistência e entorno, no município de Rio Claro (SP). A metodologia proposta foi aferida por meio do cruzamento, no SIG – Idrisi, de mapas obtidos com interpretação convencional de fotografias aéreas de 1995, posteriormente digitalizados no *software* CAD Overlay e geo-referenciados no AutoCAD Map, e mapas obtidos por meio da aplicação de sistemas de classificação digital em uma imagem orbital SPOT-XS e PAN, ano de 1995, e trabalho de campo. Foi observado que o cruzamento de mapeamentos convencionais e digitais de uma mesma área, dentro de um SIG, possibilita a aferição dos resultados obtidos por meio de manipulação computacional de imagens orbitais. Concluiu-se que, com as técnicas de processamento digital utilizadas, principalmente classificação multiespectral, pode-se detectar automaticamente e visualmente impactos relacionados com extração mineral, bem como mapear o uso da terra, vegetação e os impactos ambientais.

**Palavras-chave:** Uso da terra, vegetação, impacto ambiental, mapeamento, geoprocessamento, sensoriamento remoto.

**ABSTRACT** – J.L. Ortiz, M.I.C. de Freitas - *Mapping of the land use, vegetation and environmental impacts through remote sensing and geoprocessing*. The mapping of the land use, vegetation and environmental impacts using remote sensing and geoprocessing allow detection, spatial representation and quantification of the alterations caused by the human action on the nature, contributing to the monitoring and planning of those activities that may cause damages to the environment. This study apply methodologies based on digital processing of orbital images for the mapping of the land use, vegetation and anthropic activities that cause impacts in the environment. It was considered a test area in the district of Assistência and surroundings, in Rio Claro (SP) region. The methodology proposed was checked through the crossing of maps in the software GIS – Idrisi. These maps either obtained with conventional interpretation of aerial photos of 1995, digitized in the software CAD Overlay and geo-referenced in the AutoCAD Map, or with the application of digital classification systems on SPOT-XS and PAN orbital images of 1995, followed by field observations. The crossing of conventional and digital maps of a same area with the GIS allows to verify the overall results obtained through the computational handling of orbital images. With the use of digital processing techniques, specially multiespectral classification, it is possible to detect automatically and visually the impacts related to the mineral extraction, as well as to survey the land use, vegetation and environmental impacts.

**Keywords:** Land use, vegetation, environmental impact, mapping, geoprocessing, remote sensing.

## INTRODUÇÃO

A problemática ambiental assume importante papel, visto a ocupação desordenada do espaço e a intensa exploração dos recursos naturais, levando ao esgotamento e à degradação do meio natural. Torna-

se evidente a necessidade do conhecimento de uma série de informações, a mais completa possível, sobre o efeito que qualquer empreendimento industrial, urbana, agropastoril ou de mineração, possa provocar ao meio ambiente a curto, médio e longo prazos.

As técnicas de sensoriamento remoto, aliadas aos sistemas de informação geográfica, permitem identificar as características dos agentes modificadores do espaço, reconhecer e mapear, além de estimar a extensão e a intensidade das alterações provocadas pelo homem, contribuindo para o monitoramento presente e futuro dos fenômenos analisados (Gomes, 1995).

Atualmente, constata-se que as técnicas e metodologias de processamento e tratamento dos produtos

digitais de sensoriamento remoto têm evoluído, ampliando sua capacidade de utilização e aplicabilidade, sempre no sentido de se racionalizar as soluções e custos dos projetos, apresentando-se como importantes ferramentas na detecção de danos ambientais, monitoramento de impactos e planejamento da exploração dos recursos naturais.

O objetivo desse trabalho consiste em aplicar metodologias que utilizam processamento digital de imagens orbitais para o mapeamento do uso da terra, vegetação e impactos ambientais, assim como para a detecção das atividades antrópicas que causam impacto ao meio, considerando uma área teste que corresponde ao distrito de Assistência e entorno, no município de Rio Claro (SP).

## CARACTERÍSTICAS DA ÁREA ESTUDADA

A área de estudo, de aproximadamente 239 km<sup>2</sup>, localiza-se entre as latitudes 22°24'18"S e 22°33'03"S e longitudes 47°30'00"W e 47°40'00"W. Corresponde ao Distrito de Assistência e entorno, no município de Rio Claro, localizado no centro-leste do Estado de São Paulo, na região fisiográfica denominada Depressão Periférica, sub-região da Bacia do Médio Tietê.

Essa área apresenta diferentes tipos de jazidas (calcário, argila cerâmica, brita e areia) em diferentes estágios exploratórios. Na região, totalmente ocupada por lavouras de cana-de-açúcar e secundariamente por pastagens, reflorestamentos (eucalipto), citricultura e em pequena escala por culturas anuais (principalmente

milho e feijão), não existem mais formações florestais naturais representativas. As matas originais (vegetação do tipo mesófila semidecídua) são bastante raras e, com algumas exceções, aparecem na forma de bosques preservados por particulares, especialmente nas encostas declivosas (Garcia, 1998). Os problemas ambientais agravam-se na região devido à atividade exploratória indiscriminada de portos de areia na Bacia do Rio Corumbataí, à degradação de parte da mata ciliar dessa bacia hidrográfica pelos agricultores locais, à intensa atividade de mineração dos dolomitos calcários da Formação Irati e à expansão urbana das cidades da região.

## MATERIAL

Foi utilizado na realização desse trabalho o seguinte material:

- cartas topográficas, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na escala 1:50.000 e do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC) na escala 1:10.000, correspondentes as folhas de Rio Claro e Piracicaba;
- fotografias aéreas pancromáticas na escala 1:25.000, do levantamento aerofotogramétrico do mês de junho de 1995, da Base Aerofotogrametria e Projetos S.A;

- estereoscópio de espelhos, mesa de luz; poliéster Terkron, escalímetro;
- uma imagem SPOT-XS, bandas 1, 2, 3, órbita-ponto K714/J394, datada de 21 agosto de 1995, nos formatos analógico e digital;
- uma imagem SPOT-PAN, órbita-ponto K714/J394, datada de 21 agosto de 1995, no formato digital;
- programas computacionais: Idrisi 32, LDSCAN, DI-VIEW, AutoCAD Map R14, CAD Overlay R14, DXF3DAT.

## MÉTODO

A metodologia aplicada nesse estudo baseia-se em trabalhos disponíveis na literatura dessa área do conhecimento, que foram adaptados ao material disponível e às características da área de estudo, como os de Alencar et al. (1996), Burin (1997), Carrilho et al.

(1996), Crosta (1992), Cuadros & Baptista (1997), Fonseca Filho (1999), Foresti & Verona (1997), Miranda et al. (1996), Monceratt & Pinto (1996), Novo (1992), Ribeiro (1997), Vicens et al. (1998) e Watrin et al. (1998).

O procedimento metodológico seguiu as seguintes etapas:

1. levantamento e avaliação da bibliografia referente ao tema, área, e objetivos do estudo;
2. coleta e análise dos dados cartográficos, aerofotogramétricos e orbitais;
3. geo-referenciamento da imagem SPOT-PAN e SPOT-XS;
4. aplicação dos algoritmos de classificação supervisionada de imagens no Idrisi;
5. aplicação de técnicas de realce de imagens orbitais;
6. mapeamento digital – geração do mapa de uso da terra, vegetação e impactos ambientais resultantes da classificação digital da imagem orbital do ano de 1995;
7. verificação do desempenho dos sistemas de classificação digital testados;
8. comparação entre os resultados obtidos com o mapeamento digital e o convencional;
9. trabalho de campo.

#### **GEO-REFERENCIAMENTO DAS IMAGENS SPOT**

Utilizando o programa DI-VIEW foi realizado o recorte da área de estudo na imagem SPOT-XS (multiespectral), bandas 1, 2, 3, e na SPOT-PAN (pancromática). Após essa etapa, foram anotados o número de linhas e colunas das imagens no modo pancromático (banda P) e no multiespectral (banda 1, 2 e 3), sendo posteriormente exportadas para o Idrisi 32 (Eastman, 1998), onde foi realizada a aplicação de realce, do tipo linear com porcentagem de saturação de 2% nas quatro imagens, o que facilitou a seleção dos pontos de controle utilizados no geo-referenciamento.

#### **GEO-REFERENCIAMENTO DA SPOT-PAN DE 1995**

Os pontos de controle foram selecionados na imagem banda P realçada (imagem SPOT no modo pancromático), devido à sua resolução espacial de 10 m, superior ao modo multiespectral, de 20 m. Visualizando a imagem banda P realçada no monitor, foi realizada a coleta de pontos de controle por meio de

recursos do comando ZOOM WINDOW e a anotação dos valores das coordenadas de imagem (x, y) no monitor e das coordenadas de carta (E, N).

Como pontos de controle, foi dada preferência a cruzamentos entre estradas e cruzamentos entre estradas e cursos d' água, distribuídos de forma mais ou menos uniforme por toda a área da imagem, evitando-se zonas de baixa e alta concentração de pontos. Posteriormente, no Idrisi, foi criado o arquivo correspondência (COR) que permitiu relacionar coordenadas de imagem (x, y) e de carta (E, N) dos pontos de controle selecionados. O geo-referenciamento da imagem SPOT-PAN foi realizado com a função reamostragem do Idrisi.

Os testes realizados estão na Tabela 1 e apontaram a combinação da função mapeamento do tipo linear com reamostragem pelo algoritmo vizinho mais próximo como a que proporcionou menor erro de geo-referenciamento, assim como menor tempo de processamento computacional. O erro médio quadrático (EMQ) para o geo-referenciamento do tipo vizinho mais próximo foi de 4,03 m. Esse valor diminuiu com a omissão de 12 pontos de controle com os valores mais altos de erro residual. No novo cálculo foi obtido um erro de 2,25 m e um processamento computacional de 6 minutos de duração. Torna-se importante ressaltar que somente foram eliminados pontos que não prejudicassem a geometria da distribuição dos pontos na imagem. O teste com a função de mapeamento quadrática bilinear apontou erro de 4,44 m para 57 pontos, que foi diminuído para 2,78 m com a omissão dos 12 pontos com maior valor de erro residual, sendo que o geo-referenciamento durou aproximadamente 27 minutos. O teste com a função de mapeamento cúbica bilinear apresentou um erro enorme, igual a 5059,46 para 57 pontos, o que invalidou a continuidade do processo com o mesmo.

#### **GEO-REFERENCIAMENTO DA SPOT-XS DE 1995**

Foi gerada uma composição colorida com as bandas 1, 2 e 3, correspondentes, respectivamente, às cores azul, verde e vermelha, aplicando a ampliação linear de contraste do tipo linear com pontos de

**TABELA 1.** Combinações realizadas para o geo-referenciamento da imagem no modo pancromático e suas respectivas porcentagens de EMQ inicial e final.

<b>Função de Mapeamento</b>	<b>Tipo de Reamostragem</b>	<b>% de EMQ inicial</b>	<b>% de EMQ final</b>
Linear	Vizinho mais próximo	4,03	2,25
Quadrática	Bilinear	4,44	2,78
Cúbica	Bilinear	5059,46	---

saturação de 2%. Na composição colorida foram coletados os pontos de controle referentes à imagem multiespectral realçada, devido à melhor visualização dos pontos nessa do que nas banda 1, banda 2 e banda 3, individualmente.

De forma similar ao realizado para a SPOT-PAN, com a imagem multiespectral realçada (banda 2 *composit*) em tela, foi efetuada a coleta de pontos por meio dos recursos de ampliação em tela (comando ZOOM WINDOW), assim como a anotação dos valores das coordenadas de imagem (x, y). Os pontos de controle utilizados foram os mesmos da imagem pancromática (banda P); portanto, os valores das coordenadas de carta (E, N) já estavam coletados.

Como descrito anteriormente, procedeu-se ao geo-referenciamento das três bandas da imagem SPOT-XS (multiespectral), sendo que o melhor desempenho foi obtido com o algoritmo função mapeamento linear, com reamostragem pelo vizinho mais próximo, conforme mostra a Tabela 2. O total de erro médio quadrático (EMQ) para o geo-referenciamento com algoritmo linear vizinho mais próximo foi de 4,77 m. Esse valor diminuiu com a omissão de 4 pontos de controle, resultando num EMQ de 1,75 m. O processo de geo-referenciamento durou 1 minuto e foi realizado individualmente para cada uma das bandas do modo multiespectral.

**TABELA 2.** Combinações realizadas para o geo-referenciamento da imagem no modo multiespectral e suas respectivas porcentagens de EMQ inicial e final.

Função de Mapeamento	Tipo de Reamostragem	% de EMQ inicial	% de EMQ final
Linear	Vizinho mais próximo	4,77	1,75
Quadrática	Bilinear	7,29	5,23
Cúbica	Bilinear	1399,31	--

#### CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DE IMAGENS ORBITAIS

No Idrisi, foram aplicados três algoritmos de classificação supervisionada de imagens: máxima verossimilhança (*Maxlike*), mínima distância (*Mindist*) e paralelepípedo (*Piped*), visando maior acurácia no mapeamento digital do uso da terra, vegetação e impactos ambientais, com base nas informações da imagem orbital de 1995, assim como comparações entre os resultados para cada classe mapeada com os classificadores utilizados. Adotou-se o seguinte procedimento para a classificação das imagens:

1. uniformização do tamanho e da resolução das imagens SPOT – Foi realizado o recorte da SPOT-PAN geo-referenciada, utilizando o comando WINDOW e adotando valores de coordenadas geográficas dos limites da área de estudo. Em função da diferença de resolução entre SPOT-PAN (10 m) e SPOT-XS (20 m), foi necessária a uniformização da resolução espacial por meio da função EXPAND (fator de expansão 2) sobre a imagem SPOT-XS, de forma a simular a resolução de 10 m, equivalente à SPOT-PAN;
2. seleção de amostras representativas das classes – Foram localizados exemplos significativos de cada classe identificada na composição colorida banda 2 expandida, ou seja, feições relativas a silvicultura, vegetação natural, pastagem, agricultura, área urbana, extração mineral em curso

d'água, extração mineral em terra firme e comprometimento superficial do solo. A localização dessas áreas foi auxiliada pela análise prévia de fotografias aéreas verticais pancromáticas, escala de 1:25.000, ano de 1995;

3. digitalização dos polígonos correspondentes às amostras – Com o comando DIGITALIZE foram digitalizados e fechados polígonos correspondentes a cada classe descrita acima sendo que, para a classe agricultura foram designadas duas amostras distintas, ou seja, dois polígonos localizados em regiões diferentes da imagem. O arquivo contendo essas informações recebeu o nome de “amostras”;
4. criação das assinaturas espectrais das amostras – Foram criadas assinaturas espectrais para as amostras de cada classe com o comando MAKESIG;
5. comparação de assinaturas das amostras – Utilizando procedimento análogo ao do módulo de processamento de imagens, só que no SIGCOMP, foram analisados os *pixels* dentro das amostras de cada classe no quadro de comparação entre as assinaturas espectrais de cada classe para cada uma das bandas das imagens SPOT-XS e SPOT-PAN. Pode-se observar nas Tabelas 3 e 4 as facilidades ou dificuldades para distinção entre as assinaturas espectrais das amostras de cada classe, nas diferentes bandas espectrais.

**TABELA 3.** Distingção entre as assinaturas espectrais, no SPOT-XS (1, 2 e 3) e SPOT-PAN (P) das amostras de cada classe.

Classes	Silvicultura	Pastagem	Urbano	Ext. miner. - curso água
Silvicultura	---	Fácil (1, 2)	Fácil (1, 2, P)	Fácil (1, 2, P)
Pastagem	Fácil (1, 2)	---	Fácil (1, 2)	Fácil (1, 2, P)
Urbano	Fácil (1, 2, P)	Fácil (1, 2)	---	Difícil
Ext. miner. - curso d' água	Fácil (1, 2, P)	Fácil (1,2, P)	Difícil	---
Vegetação natural	Difícil	Fácil (1, 2)	Fácil (1, 2, P)	Fácil (1, 2, P)
Agricultura 1	Fácil (1, 2, P)	Difícil	Fácil (1, 2, P)	Fácil (1, 2, P)
Agricultura 2	Fácil (1, 2)	Difícil	Fácil (1, P)	Fácil (1, 2, P)
Comp. superf. solo	Fácil (1, 2, P)	Difícil	Fácil (1, 2)	Fácil (1, 2, P)
Ext. miner. - terra firme	Fácil (1, 2, P)	Fácil (1, 2)	Difícil	Difícil

**TABELA 4.** Distingção entre as assinaturas espectrais, no SPOT-XS (1, 2 e 3) e SPOT-PAN (P), das amostras de cada classe.

Classes	Agricultura 1	Agricultura 2	Comp. sup. solo	Ext. min. terra firme
Agricultura 1	-	Difícil	Difícil	Fácil (1, 2, P)
Agricultura 2	Difícil	-	Difícil	Fácil (1, 2)
Comp. superf. solo	Difícil	Difícil	-	Fácil (1, 2, P)
Ext. min. terra firme	Fácil (1, 2)	Fácil (1, 2)	Fácil (1, 2, P)	-
Vegetação Natural	Fácil (1, 2, P)	Fácil (1, 2, P)	Fácil (1, 2, 3, P)	Fácil (1, 2, 3, P)
Pastagem	Difícil	Difícil	Difícil	Fácil (1, 2)
Silvicultura	Fácil (1, 2, P)	Fácil (1, 2)	Fácil (1, 2, P)	Fácil (1, 2, P)
Urbano	Fácil (1, 2, P)	Fácil (1, P)	Fácil (1, 2)	Difícil

Após essa etapa, teve início o teste de algoritmos de classificação supervisionada de imagens orbitais disponíveis no módulo processamento de imagens. Os algoritmos escolhidos foram o da Máxima Verossimilhança (MaxVer); o da Mínima Distância pelo Raio (MDR) como Normalizada (MDN); e o do Paralelepípedo (PARAL).

### REALCE DE IMAGENS ORBITAIS

Além do realce por ampliação linear de contraste com saturação aplicado para a coleta de pontos de controle, descrita anteriormente, utilizou-se a técnica de realce por filtragem digital. Foram testados nas imagens classificadas seis tipos de filtros disponíveis no Idrisi: máxima, mínima, moda, mediana, laplaciano+original e *adaptative box*.

Com a aplicação dos filtros, foram atenuados os efeitos dos ruídos existentes nas imagens classificadas, assim como realçadas regiões de transição entre classes distintas, proporcionando maior distinção entre classes mapeadas por classificação digital, o que facilitou a extração e interpretação de informações na forma de imagens.

O filtro mediana e o de moda são tipos de filtros passa-baixa. No primeiro, a *pixel* é substituído pela mediana dos seus vizinhos. É um dos filtros que melhor

preserva as bordas de uma imagem. No filtro de moda, a *pixel* central é substituído pelo valor de *digital number* (DN) mais comum dentro da máscara. Uma maneira de se manter o contraste da imagem original e conseqüente informação tonal, ao mesmo tempo em que se tem o realce de bordas, facilitando a interpretação visual, é adicionar a imagem filtrada à imagem original. Isso pode ser feito com o filtro laplaciano+original. Para isso, toma-se a máscara e adiciona-se a unidade ao valor central da máscara. Testou-se o filtro laplaciano+original 3x3 com adição de cinco unidades ao valor da célula central da máscara, como apresentado abaixo:

-1	-1	-1
-1	14	-1
-1	-1	-1

### ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DIFERENÇA NORMALIZADA

No módulo VEGINDEX do Idrisi está disponível uma grande variedade de índices de vegetação, capazes de mostrar a distribuição e densidade da vegetação. Optou-se por aplicar o índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), tomando-se como referência os trabalhos de Foresti & Verona (1997) e Vicens et. al.

(1998), que apontam esse índice como o de melhor desempenho em estudos de vegetação. Aplicou-se o NDVI sobre as bandas 2 (vermelho) e 3 (infravermelho) originais, para realce da vegetação com clorofila ativa e posterior interpretação visual.

### **OPERAÇÕES BOOLEANAS SOBRE O MAPA TEMÁTICO**

Utilizando o comando OVERLAY foi selecionada a operação booleana ou lógica referente a adição (1ª imagem + 2ª imagem), possibilitando o teste dos resultados com os classificadores e filtros digitais. Por meio dessa operação foi possível unir, numa mesma imagem, o arquivo contendo a área das classes digitalizadas para o ano de 1995 no CAD Overlay e importadas para o Idrisi, com uma imagem classificada e/ou filtrada digitalmente. Também foi possível a comparação entre os resultados obtidos para detecção de impactos ambientais por meio do mapeamento digital (a partir do produto orbital) e convencional (a partir das fotos aéreas) para o ano de 1995.

### **OPERAÇÃO PARA CÁLCULO DE ÁREA**

Nas imagens classificadas e/ou filtradas foi realizado o cálculo de área do número de células (*pixels*) para cada classe, com o comando AREA. Utilizando o comando de cálculo de área por tabulação em células, foi obtido o número absoluto de células que pertencem a tal classe, p. ex., silvicultura, na imagem classificada ou classificada e filtrada, assim como para imagem convencional de tal classe que foi exportada do AutoCAD Map para o Idrisi. Como a amostra de área da classe silvicultura foi colocada no arquivo amostras

com valor de Z igual a 2 e o *boundary* da área mapeada de forma convencional dessa mesma classe foi exportado do AutoCAD Map para o Idrisi com valor 20, o valor 22 calculado pelo comando área representa todas as células mapeadas, tanto na forma digital como convencional como áreas com silvicultura. Desse modo, também ocorreu com as demais classes, mas com números diferentes, evitando possíveis confusões de classes nessa etapa.

O número relativo de células que pertencem a tal classe, tanto no mapeamento digital como convencional de 1995, foi adquirido por meio de uma regra de três, na qual o número absoluto de células da verdade terrestre para determinada classe, ou seja, área do mapeamento convencional foi colocado igual a 100% e o número absoluto de células que pertencem a tal classe na imagem classificada ou classificada e filtrada, assim como para imagem convencional de tal classe, foi chamado de X% (valor a ser calculado na operação). O tamanho de cada célula é de 0,01 x 0,01 km (ou 0,0001 km<sup>2</sup>) sendo assim, o número absoluto de área de cada classe, em km<sup>2</sup>, foi obtido com a multiplicação do número absoluto de área de cada classe em células por 0,0001.

O mesmo cálculo foi realizado para as classes mapeadas no modo convencional ano de 1995 e que foram exportadas do AutoCAD Map para o Idrisi. A área dessas classes mapeadas a partir de fotografias aéreas de 1995, presentes no mapa de 1995, serviu como verdade terrestre e permitiu a análise quantitativa dos resultados da comparação entre o mapeamento digital e convencional para o ano de 1995.

## **RESULTADOS**

### **CLASSIFICAÇÃO MULTIESPECTRAL E ANÁLISE QUALITATIVA DOS MAPAS CONVENCIONAL E DIGITAL PARA 1995**

Com a interpretação visual das imagens geradas por classificação digital, com base no conjunto de bandas originais dos sensores SPOT-PAN e SPOT-XS e comparação visual com o mapa temático de 1995, foi notado que os classificadores mínima distância e máxima verossimilhança obtiveram maior sucesso na detecção automática de impactos ambientais, principalmente em relação às áreas de extração mineral em terra firme e curso d'água.

Os algoritmos não diferenciaram com precisão as áreas de extração mineral em terra firme das áreas de extração mineral em água, confundindo ambas as classes. No entanto, tais algoritmos permitiram detectar as principais áreas de extração mineral mapeadas inicialmente por meio do modo convencional (fotografias aéreas).

Houve problemas na detecção automática das áreas com as duas demais classes de impactos ambientais inicialmente propostas para serem mapeadas: as áreas com comprometimento superficial do solo e as de desmatamento da vegetação natural. As áreas com comprometimento superficial do solo foram superexageradas por todos os classificadores devido à não existência de uma amostra de dimensão significativa na imagem orbital de 1995. A coleta de uma amostra pequena fez com que o computador classificasse as áreas de forma correta, porém, também muitas outras áreas que na verdade representam outras classes, foram inseridas indevidamente nessa classe, o que comprometeu o resultado da classificação desse tema. Da mesma forma, devido à pequena dimensão das áreas de vegetação natural e a falta de disponibilidade de imagens antigas da área de estudo, não foi possível estimar o desmatamento da vegetação natural por

classificação multiespectral. Assim, optou-se por realizar a análise dessas duas classes utilizando exclusivamente as fotografias aéreas das datas mapeadas convencionalmente.

A análise qualitativa, realizada a partir da comparação visual das imagens do entorno do município de Santa Gertrudes, onde ao sudoeste estão instaladas olarias e cerâmicas, indica que o algoritmo MDN obteve o melhor resultado para detecção de áreas com extração mineral em água, assim como para distinção entre essas áreas e aquelas com extração mineral em terra firme, enquanto que o MDR e MaxVer tiveram resultados semelhantes. Por último, o PARAL considerou quase que toda a área de extração mineral em água como sendo de extração mineral em terra firme. Esses resultados comprovam que as quatro formas de classificação testadas conseguiram detectar as áreas com ocorrência de extração mineral, porém com dificuldade de diferenciação entre extração em água e terra firme.

Comparando visualmente as imagens do entorno do Distrito de Assistência, onde estão instaladas empresas de extração de argila e calcário, notou-se que o PARAL classificou como extração mineral em terra firme uma área maior que a mapeada convencionalmente para essa classe, provavelmente por ser o único classificador que detectou conjuntamente áreas de extração mineral em atividade e abandonadas. Porém, na análise da imagem como um todo, foi o classificador que apresentou maior confusão e erro na classificação de extração mineral em terra firme, indicando áreas com extração mineral em água e muitas áreas de outras classes como sendo de extração mineral em terra firme.

Tomando-se a área de estudo como um todo, o classificador que apresentou melhor resultado foi o MaxVer, que selecionou muito bem as amostras por toda a imagem, ao contrário do PARAL. O classificador MaxVer, MDN e MDR só classificaram áreas com extração mineral ativa, o que foi muito positivo para esse trabalho já que inicialmente, no mapeamento convencional, as áreas de extração mineral em terra firme abandonadas foram temporariamente preservadas, pois se esperava que os classificadores iriam se confundir e acabar classificando essas áreas como de extração mineral, o que acabou não ocorrendo.

Analisando e comparando visualmente as imagens da área do Horto Florestal Navarro de Andrade, notou-se que o MDN, PARAL e MaxVer obtiveram resultados bons e semelhantes na classificação de áreas com silvicultura, o mesmo não ocorrendo com o MDR.

Observando as imagens a oeste do Horto Florestal Navarro de Andrade, encontramos o Município de Rio Claro e ao sul do Horto o Município de Santa Gertrudes. Notou-se que o PARAL foi o classificador que melhor

estimou a área urbana, conseguindo delimitar a área dos dois municípios, o mesmo não ocorrendo com o MaxVer, MDN e MDR que superestimaram tais áreas.

A partir da comparação visual das imagens da área com vegetação ciliar natural em torno do Rio Corumbataí a sudoeste do Distrito de Assistência, foi notado que o MDR apresentou um bom resultado. Porém, analisando toda a imagem, ficou evidente que ele foi o classificador que mais superestimou a área com vegetação natural. Nesse sentido, os demais classificadores não apresentaram resultados muito positivos: o PARAL confundiu silvicultura com vegetação natural, o MaxVer também, só que com menor frequência e o MDN confundiu área com vegetação natural com área agrícola (principalmente a cana-de-açúcar).

As classes agricultura e pastagem não eram objetivos desse estudo, e não se efetuou uma análise visual mais profunda das mesmas, que foram abordadas apenas no contexto das demais classes.

#### **FILTRAGEM DIGITAL UTILIZANDO FILTRO LAPLACIANO + ORIGINAL**

Para análise visual dos impactos ambientais foi testado um filtro laplaciano sobre o conjunto de imagens originais. Aplicou-se o filtro laplaciano+original com adição de cinco unidades ao valor da célula central da máscara sobre todas as bandas SPOT. A banda 2 apresentou o melhor resultado entre todas as bandas testadas, sendo nítida a melhora na qualidade da imagem filtrada no que diz respeito à detecção de bordas de áreas com extração mineral, principalmente na diferenciação entre áreas ativas e abandonadas. O produto resultante, a imagem filtrada, apresenta variação de tons que levam à distinção entre as classes abordadas nesse estudo. Ao contrário, a imagem banda 2 com realce linear em saturação de 2%, apresenta-se com pouca nitidez e saturada nas áreas de extração mineral em atividade.

#### **ÍNDICE DE VEGETAÇÃO DIFERENÇA NORMALIZADA**

Aplicou-se o índice de vegetação para detecção da vegetação clorofilianamente ativa. Foi aplicado o NDVI sobre as bandas 2 e 3 originais. No geral, a imagem gerada apresenta quatro tonalidades, diferenciando as grandes classes: verde para áreas com vegetação mais densa, amarela para áreas com vegetação menos densa, vermelha para áreas sem vegetação, e preto para corpos d'água. Os índices de vegetação obtidos variam entre -0,43 (área sem vegetação) e +0,45 (área com vegetação mais densa). Quanto menor o valor do índice, menor a densidade de vegetação nessas áreas. Comparando essa imagem com fotos

aéreas de 1995 chega-se à conclusão de que os tons de verde correspondem às áreas com vegetação natural, silvicultura e culturas agrícolas; os tons de amarelo, às áreas com culturas agrícolas e pastagens com presença considerada de vegetação arbustiva; os tons de vermelho, às áreas urbanas, pastagens (com arbustos esparsos), com extração mineral, solo exposto e desmatamento; os tons de preto, aos corpos d'água.

Por meio de análise visual foi notado que o uso do índice de vegetação NDVI não destacou as feições de interesse desse estudo. Não foi possível detectar uma contribuição significativa que justificasse seu uso para mapeamento temático de vegetação e uso da terra, como alternativa aos métodos já apresentados e discutidos nesse trabalho, embora um maior aprofundamento seja necessário para traçar considerações mais sólidas sobre tal alternativa.

#### ANÁLISE QUANTITATIVA COMPARATIVA ENTRE MAPEAMENTO DIGITAL E CONVENCIONAL

Nas imagens classificadas e ou filtradas foi realizado o cálculo de área do número de células (*pixels*) para cada classe. O mesmo cálculo foi realizado para as classes mapeadas no modo convencional, ano de 1995, e que foram exportadas do AutoCAD Map para o Idrisi. As áreas dessas classes mapeadas a partir de

fotografias aéreas de 1995, presentes no mapa de 1995, serviram como verdade terrestre e permitiram a análise quantitativa entre os resultados da comparação do mapeamento digital e convencional, que se apresentam nas Tabelas 5, 6, 7, 8 e 9.

Após essa etapa teve início o teste de algoritmos de classificação supervisionada de imagens orbitais disponíveis no módulo processamento de imagens. Os algoritmos escolhidos foram o da Máxima Verossimilhança (MaxVer); o da Mínima Distância pelo Raio (MDR) como Normalizada (MDN); e o do Paralelepípedo (PARAL).

- Silvicultura – Ao analisar essas tabelas, nota-se que a imagem classificada pelo PARAL com filtro de mínima foi a com o número absoluto de área, em km<sup>2</sup>, mais próximo ao da verdade terrestre para a classe silvicultura, foram 19,312 km<sup>2</sup> contra 19,773 km<sup>2</sup> da verdade terrestre. A imagem classificada pelo PARAL com filtro *adaptive box* detectou 20,805 km<sup>2</sup> para silvicultura, sendo a segunda mais eficiente, seguida da MaxVer com filtro de mínima, com 20,925 km<sup>2</sup>.
- Urbana – A imagem classificada pelo PARAL com filtro de máxima foi a com o número absoluto de área, em km<sup>2</sup>, mais próximo ao da verdade terrestre para a classe área urbana: foram 10,768 km<sup>2</sup>

**TABELA 5.** Número absoluto de área (km) para cada classe detectada pelos classificadores e pela verdade terrestre.

Classificadores/ Classes (km <sup>2</sup> )	Maxver	MDR	MDN	PARAL	Verdade terrestre
Silvicultura	14,661	06,904	13,218	22,721	19,773
Urbano	71,421	37,270	48,323	<b>20,862</b>	14,589
Ext. mineral água	07,765	<b>01,276</b>	11,643	25,458	01,046
Ext. mineral terra	00,651	<b>03,443</b>	00,134	00,464	03,517
Agricultura	55,472	92,662	<b>129,522</b>	17,975	169,982
Pastagem	76,642	40,585	33,704	79,245	15,299
Veget. natural	03,391	32,386	02,096	01,246	12,782
Com. super. solo	15,813	31,289	07,177	25,796	01,789

**TABELA 6.** Número absoluto de área (km<sup>2</sup>) para cada classe detectada pelos filtros utilizados na imagem classificada pelo Máxima Verossimilhança.

Filtros/Classes	Máxima	Mínima	Moda	Mediana	<i>Adaptive box</i>
Silvicultura	09,856	<b>20,925</b>	14,715	14,125	14,342
Urbano	47,737	95,481	71,837	71,247	70,330
Ext. min. - água	10,174	05,119	07,640	07,862	07,632
Ext. min. - terra	01,458	00,188	00,561	00,522	00,600
Agricultura	46,440	63,585	54,540	55,755	54,073
Pastagem	86,253	57,066	78,682	80,559	75,942
Veget. natural	<b>07,992</b>	00,577	03,065	02,750	03,157
Comp. superf. solo	35,908	<b>02,875</b>	14,775	12,997	14,869



**TABELA 7.** Número absoluto de área (km<sup>2</sup>) para cada classe detectada pelos filtros utilizados na imagem classificada pelo Mínima Distância pelo raio.

Filtros/Classes	Máxima	Mínima	Moda	Mediana	<i>Adaptative box</i>
Silvicultura	04,948	08,939	06,904	06,886	06,725
Urbano	22,840	52,710	37,616	36,933	36,568
Ext. min. Água	00,640	01,574	<b>01,264</b>	01,404	<b>01,251</b>
Ext. min. Terra	05,902	01,083	03,238	<b>03,405</b>	03,274
Agricultura	72,732	113,298	92,885	92,323	91,459
Pastagem	43,645	33,191	40,436	42,251	39,951
Veget. Natural	37,015	24,307	32,651	33,734	31,828
Comp. superf. solo	58,094	10,713	30,821	28,878	30,291

**TABELA 8.** Número absoluto de área (km<sup>2</sup>) para cada classe detectada pelos filtros utilizados na imagem classificada pelo Mínima Distância Normalizada.

Filtros/Classes	Máxima	Mínima	Moda	Mediana	<i>Adaptative box</i>
Silvicultura	10,137	16,969	13,163	12,981	13,006
Urbano	31,929	65,600	48,828	47,968	47,834
Ext. min. - água	13,466	09,260	11,436	11,833	11,443
Ext. min. - terra	00,378	00,028	00,096	00,091	00,108
Agricultura	117,676	<b>133,606</b>	130,659	<b>132,339</b>	128,343
Pastagem	49,170	<b>18,747</b>	33,419	33,498	33,060
Veget. Natural	05,462	00,284	01,727	01,547	01,900
Comp. superf. solo	17,600	<b>01,322</b>	64,889	05,558	06,335

**TABELA 9.** Número absoluto de área (km<sup>2</sup>) para cada classe detectada pelos filtros utilizados na imagem classificada pelo paralelepípedo.

Filtros/Classes	Máxima	Mínima	Moda	Mediana	<i>Adaptative box</i>
Silvicultura	17,751	<b>19,312</b>	21,478	22,633	<b>20,805</b>
Urbano	<b>10,768</b>	39,852	25,749	25,465	25,264
Ext. min. água	00,400	00,481	00,390	00,481	00,453
Ext. min. terra	13,398	05,192	09,591	10,031	09,707
Agricultura	52,480	65,790	59,719	61,330	60,137
Pastagem	91,471	62,818	81,097	81,108	78,983
Veget. natural	03,542	00,103	00,872	00,804	01,066
Comp. superf. solo	44,137	11,772	25,153	23,947	25,405

contra 14,589 km<sup>2</sup> para verdade terrestre, seguido da com o PARAL, com 20,862 km<sup>2</sup>.

- Extração água – O classificador MDR gerou uma imagem que, contemplada com o filtro *adaptative box*, contou com o número absoluto de área mais próximo à verdade terrestre para a classe área com extração mineral em água: foram 1,251 km<sup>2</sup> contra 1,046 km<sup>2</sup> contabilizados pela verdade terrestre. Em seguida ficou a imagem MDR com filtro de moda, com 1,264 km<sup>2</sup>, e em terceiro a MDR, com 1,276 km<sup>2</sup>.
- Extração água terra firme – Notou-se que a MDR foi a que contou com o número absoluto de área mais próximo ao número da verdade terrestre para a classe área com extração mineral em terra firme: foram 3,443 km<sup>2</sup> contra 3,517 km<sup>2</sup> contabilizados

pela verdade terrestre, seguidos da MDR com filtro de mediana, com 3,405 km<sup>2</sup> designados para áreas com extração mineral em terra firme. A imagem classificada pelo MDR com filtro *adaptative box* foi a com o número absoluto de área, em km<sup>2</sup>, mais próximo a verdade terrestre para as classes área com extração mineral em curso da água e área com extração mineral em terra firme em conjunto: foram 4,525 km<sup>2</sup> contra 4,563 km<sup>2</sup> contabilizados pela verdade terrestre, seguidos da MDR com filtro de moda, com 4,502 km<sup>2</sup>, MDR com filtro de mediana, com 4,809 km<sup>2</sup> e, por último, o MDR, com 4,719 km<sup>2</sup>.

- Agricultura – O classificador MDN gerou uma imagem que, contemplada com o filtro de mínima, contou com o número absoluto de área, em km<sup>2</sup>,

mais próximo a verdade terrestre para a classe área com agricultura: foram 133,606 km<sup>2</sup> contra 169,982 km<sup>2</sup> contabilizados pela verdade terrestre. Em seguida ficou a MDN com filtro de mediana, com 132,339 km<sup>2</sup>, e em terceiro a MDN, com 129,522 km<sup>2</sup>.

- Pastagem – O classificador MDN gerou uma imagem que, contemplada com o filtro de mínima, contou com o número absoluto de área, em km<sup>2</sup>, mais próximo ao número absoluto de área, em km<sup>2</sup>, da verdade terrestre para a classe pastagem: foram 18,747 km<sup>2</sup> contra 15,299 km<sup>2</sup> contabilizados pela verdade terrestre.
- Vegetação natural – A imagem classificada pela MaxVer com filtro de máxima foi a única com o número absoluto de área, em km<sup>2</sup>, próximo da verdade terrestre para as classes área com vegetação natural: foram 7,992 km<sup>2</sup> contra 12,782 km<sup>2</sup> contabilizados pela verdade terrestre.

Nota-se que a MDN com filtro de mínima foi a que contou com o número absoluto de área, em km<sup>2</sup> mais próximo ao da verdade terrestre para a classe áreas com comprometimento superficial do solo: foram 1,322 km<sup>2</sup> contra 1,789 km<sup>2</sup> da verdade terrestre, seguida da MaxVer com filtro de mínima, com 2,875 km<sup>2</sup>.

Os classificadores e filtros que apresentaram melhores resultados para cada classe, ou seja, número

absoluto de área, em km<sup>2</sup>, para cada classe mais próximo ao número de área contabilizados pela verdade terrestre das mesmas, tiveram seus resultados analisados de forma mais profunda por meio do cálculo do número absoluto e relativo de acerto das áreas classificadas e filtradas em relação à verdade terrestre.

A análise das Tabelas 10 a 17 indica que os números relativos, de áreas próximas ao ideal, foram obtidos apenas para as classes agricultura, silvicultura e urbano. Porém, deve-se levar em consideração distorções no mapeamento, quando áreas de determinadas classes não conseguiram encaixe perfeito e exato sobre as mesmas áreas dessas classes no mapeamento digital. Esse fato deve-se às imprecisões existentes, tanto no mapeamento convencional como digital, resultantes de vários fatores, sendo os principais: (1) a carta 1:50.000 utilizada como base topográfica dos mapeamentos possui tolerância planimétrica de erro com 25 m; (2) o mapeamento convencional foi realizado a partir da impressão do mapa base (original 1:50.000) na escala 1:25.000 e, portanto, com deformações; (3) a base cartográfica utilizada, assim como os mapeamentos temáticos posteriormente realizados, foram digitalizados, etapa que, por mais cuidadosamente que tenha sido realizada, implica na introdução de erros ao produto final; (4) as imagens orbitais utilizadas para o mapeamento digital possuem erro de até 10 m.

**TABELA 10.** Silvicultura: números absoluto e relativo de área (km<sup>2</sup>) para a classe detectada pelos classificadores, assim como pelo mapeamento convencional.

Classificadores / Classe	Maxver Mínima	PARAL Moda	PARAL <i>Adaptative Box</i>	PARAL Mínima
Silvicultura	12,589 (65%)	12,122 (62,7%)	11,180 (61,2%)	11,714 (60,6%)

**TABELA 11.** Área Urbana: números absoluto e relativo de área (km<sup>2</sup>) para a classe detectada pelos classificadores, assim como pelo mapeamento convencional.

Classificadores / Classe	PARAL	PARAL Máxima
Área Urbana	7,133 (48,8%)	2,879 (19,7%)

**TABELA 12.** Extração mineral em água: números absoluto e relativo de área (km<sup>2</sup>) para a classe detectada pelos classificadores, assim como pelo mapeamento convencional.

Classificadores / Classe	MDR Moda	MDR	MDR <i>Adaptative Box</i>
Ext. min. em água	0,115 (11%)	0,115 (11%)	0,114 (10,8%)

**TABELA 13.** Extração mineral em terra firme: número absoluto e relativo de área (km<sup>2</sup>) para a classe detectada pelos classificadores, assim como pelo mapeamento convencional.

Classificadores / Classe	MDR	MDR Mediana
Ext. min. terra firme	0,234 (6,6%)	0,222 (6,3%)

**TABELA 14.** Extração mineral em água e em terra firme: Número absoluto e relativo de área (km<sup>2</sup>) para a classe extração mineral em água e em terra firme detectada pelos classificadores, assim como pelo mapeamento convencional.

Classificadores / Classe	MDR	MDR Moda
Ext. min. em água e em terra firme	0,504 (11%)	0,485 (10,6%)

**TABELA 15.** Pastagem: Número absoluto e relativo de área (km<sup>2</sup>) para a classe pastagem detectada pelos classificadores, assim como pelo mapeamento convencional.

Classificadores / Classe	Mínima Distância pelo Raio c/ Mínima
Pastagem	5,085 (33,2%)

**TABELA 16.** Vegetação natural: Número absoluto e relativo de área (km<sup>2</sup>) para a classe vegetação natural detectada pelos classificadores, assim como pelo mapeamento convencional.

Classificadores / Classe	Máxima Verossimilhança c/ Máxima
Vegetação natural	2,950 (23%)

**TABELA 17.** Agricultura: Número absoluto e relativo de área (km<sup>2</sup>) para a classe agricultura detectada pelos classificadores, assim como pelo mapeamento convencional.

Classificadores / Classe	Mín. Dist. Norm. Mín.	Mín. Dist. Norm. Median.	Mín. Dist. Normal.
Agricultura	102,952 (60,5%)	99,310 (58,4%)	97,625 (57,4%)

## DESCRIÇÃO DAS VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Neste item são descritas as principais vantagens e desvantagens da utilização da metodologia proposta nesse trabalho para detecção e mapeamento do uso da terra, vegetação e impactos ambientais.

### a) Mapeamento convencional

- a geração e digitalização do mapeamento convencional é trabalhosa e demanda um tempo de duração muito longo quando comparado com a classificação multiespectral, embora apresente maior precisão na detecção de detalhes;
- o mapeamento convencional quando comparado com o digital apresentou defeitos no geo-referenciamento, que, de certa forma, limitou a qualidade dos resultados apresentados para a comparação quantitativa entre as classes do mapeamento convencional e digital.

### b) Classificação multiespectral

- uma desvantagem da classificação supervisionada é possibilitar a detecção automática de classes apenas quando as mesmas possuem amostras significativas na imagem orbital.

A seguir, detalha-se a análise para as diferentes classes estudadas:

- *Extração mineral* – (1) as técnicas de processamento digital utilizadas viabilizaram a detecção automática de impactos ambientais relacionados com extração mineral; (2) os quatro algoritmos de classificação testados conseguiram detectar as áreas com ocorrência de extração mineral, porém com dificuldade de diferenciação entre extração em água e terra firme; (3) os classificadores MD e MaxVer obtiveram maior sucesso na detecção automática de impactos ambientais (considerada a verdade terrestre), principalmente em relação às áreas de extração mineral em terra firme e curso d' água.
- *Extração mineral em água* – o algoritmo MDN possibilitou o melhor resultado para detecção de áreas com extração mineral em água (considerada a verdade terrestre) assim como para distinção entre essas e áreas com extração mineral em terra firme.
- *Extração mineral em terra firme* – (1) o algoritmo PARAL classificou como extração mineral em terra firme uma área maior que a mapeada convencionalmente para essa classe (considerada a verdade

terrestre), por ter sido o único classificador que detectou conjuntamente áreas de extração mineral em atividade e abandonadas; (2) na análise da imagem como um todo, o PARAL foi o classificador que apresentou maior confusão e erro na classificação de extração mineral em terra firme, indicando áreas com extração mineral em água e muitas áreas de outras classes como sendo de extração mineral em terra firme; (4) tomando-se a área de estudo como um todo, o classificador que apresentou melhor resultado foi o MaxVer, que classificou muito bem as feições de interesse por toda a imagem; (5) o classificador MaxVer, assim como o MDR e MDN, só classificaram áreas com extração mineral ativa, o que foi considerado um resultado muito positivo para esse trabalho, já que inicialmente, no mapeamento convencional, as áreas de extração mineral em terra firme abandonadas foram consideradas. Esperava-se que os classificadores iriam se confundir e acabar classificando as áreas desativadas, juntamente com áreas ativas de extração mineral, o que acabou não ocorrendo. Nesse aspecto, o desempenho dos classificadores superou as expectativas iniciais.

- *Comprometimento superficial do solo* – houve problemas na detecção automática das áreas com comprometimento superficial do solo, que foram super exageradas por todos os classificadores, devido à não existência de uma amostra de dimensão significativa.

- *Vegetação natural* – (1) devido à pequena dimensão das áreas de vegetação natural e à falta de disponibilidade de imagens orbitais antigas da área de estudo, não foi possível estimar o desmatamento da vegetação natural por classificação multiespectral; (2) analisando toda a imagem, ficou evidente que os quatro classificadores superestimaram as áreas com vegetação natural, não apresentando resultados positivos.

- *Silvicultura* – os classificadores MDN, PARAL e MaxVer apresentaram resultados bons e semelhantes entre si na classificação de áreas com silvicultura.

- *Área urbana* – o PARAL foi o classificador que melhor estimou a área urbana, conseguindo delimitar a área das duas cidades: Rio Claro e Santa Gertrudes, localizadas na área de estudo.

#### c) Filtragem digital

- com a utilização do filtro laplaciano+original houve uma melhora na qualidade da imagem filtrada no que diz respeito à detecção de bordas de áreas com extração mineral, principalmente na diferenciação entre áreas ativas e abandonadas. O produto resultante apresentou variações de tons que levam à distinção entre as classes abordadas nesse estudo. Como a proposta deste estudo prioriza o mapeamento digital a partir de classificação multiespectral, não se realizou o mapeamento da imagem filtrada pelo

método de análise visual em tela.

#### d) Índice de vegetação

- o uso do índice de vegetação NDVI não destacou as feições de interesse desse estudo. Não foi possível detectar uma contribuição significativa que justificasse seu uso para mapeamento temático de vegetação e uso da terra, como alternativa aos métodos já apresentados e discutidos nesse trabalho, embora um maior aprofundamento seja necessário para se traçar considerações mais sólidas sobre tal alternativa.

#### e) Operações booleanas

- essas operações permitiram a análise comparativa entre os mapeamentos convencional e o digital. O cruzamento de mapeamentos convencionais e digitais de uma mesma área, dentro de um SIG, possibilita a aferição mais eficaz dos resultados adquiridos com a manipulação computacional de imagens orbitais;

- a imagem classificada pelo PARAL com filtro de máxima foi a que apresentou resultado quantitativo (cálculo de área em km<sup>2</sup>) mais próximo da verdade terrestre para a classe área urbana e silvicultura;

- o classificador MDR com filtro adaptative box foi o que apresentou resultado quantitativo (cálculo de área em km<sup>2</sup>) mais próximo da verdade terrestre para a classe áreas com extração mineral em água e para as classes área com extração mineral em curso d'água e área com extração mineral em terra firme, em conjunto; - o MDR foi o que apresentou resultado quantitativo (cálculo de área em km<sup>2</sup>) mais próximo da verdade terrestre para a classe áreas com extração mineral em terra firme;

- o classificador MDN gerou uma imagem que, contemplada com o filtro de mínima, apresentou resultado quantitativo (cálculo de área em km<sup>2</sup>) mais próximo da verdade terrestre para a classe área com agricultura, com comprometimento superficial do solo e pastagem;

- a imagem classificada pelo MaxVer com filtro de máxima foi a que apresentou resultado quantitativo (cálculo de área em km<sup>2</sup>) mais próximo da verdade terrestre para a classe área com vegetação natural.

Um outro aspecto analisado nesse estudo foi a porcentagem de acerto do mapeamento digital, comparado com o convencional, para cada classe estudada. Nesse sentido:

- MaxVer com filtro de mínima foi o classificador de melhor desempenho para a classe silvicultura;
- PARAL foi o classificador com melhor desempenho para a classe urbano;
- MDR com filtro de moda foi o classificador com melhor desempenho para a classe extração mineral em água;

- MDR foi o classificador com melhor desempenho para a classe extração mineral em terra firme e extração mineral em água e em terra firme, em conjunto;
- MDR com filtro de mínima foi o classificador com melhor desempenho para a classe pastagem;
- MaxVer com filtro de máxima foi o classificador com melhor desempenho para a classe vegetação natural;
- MDN com filtro de mínima foi o classificador com melhor desempenho para a classe agricultura.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia proposta, embora trabalhosa, possibilitou detectar e quantificar as semelhanças e diferenças entre as classes de uso da terra, vegetação assim como, a evolução das atividades antrópicas que causam impacto ao meio, mapeadas por meio convencional e digital.

O uso do SIG-Idrisi, com tratamento de dados na forma *raster*, permitiu a produção de mapas digitais por meio da manipulação computacional, além de cruzamentos das informações desses com as de outros mapas obtidos por interpretação de fotografias aéreas e de classificação digital de imagem orbital SPOT-XS e PAN. Os resultados obtidos como mapeamento digital mostram que a imagem SPOT-XS é indicada para aplicação de classificação multiespectral, assim como a imagem SPOT-PAN é ideal na coleta de pontos de

controle, pelo usuário, para posterior georeferenciamento.

É importante frisar que, embora existam inúmeros métodos para detecção e quantificação de impactos ao meio ambiente, a aplicação de técnicas de processamento digital de imagens orbitais reduz o tempo e os custos desse processo, mesmo levando em consideração a grande demanda de mão-de-obra na preparação dos dados relativos ao mapeamento convencional.

Acredita-se que as alternativas metodológicas apresentadas nesse artigo contribuam para uma sistematização na detecção dos impactos abordados nesse trabalho, assim como enriqueçam a fundamentação científica dos estudos que abrangem geoprocessamento, sensoriamento remoto, uso da terra, vegetação e impactos ao meio ambiente.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica (Processo n.º 99/11240-3) a um dos autores (J.L.Ortiz).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALENCAR, A.A.C.; VIEIRA, I.C.G.; NEPSTAD, D.C.; LEFEBVRE, P. Análise multitemporal do uso do solo e mudanças da cobertura vegetal em antiga área agrícola da Amazônia Oriental. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, 1996, Salvador. **Atas...** Salvador: Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais-INPE/Sociedade de Especialistas Latino-Americanos em Sensoriamento Remoto-SELPER, 1996, CD-ROM.
2. BURIN, R.H. Mapeamento ambiental e estudo de erosão de solos na bacia do Ribeirão Preto (SP) utilizando sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 7, 1997, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná, 1997, CD-ROM.
3. CARRILHO, J.Z.; SOARES, J.V.; FILHO, M.V. Detecção automática de mudanças como recurso auxiliar no monitoramento da cobertura do terreno. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, 1996, Salvador. **Atas...** Salvador: Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais-INPE/Sociedade de Especialistas Latino-Americanos em Sensoriamento Remoto-SELPER, 1996, CD-ROM.
4. CROSTA, A.P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 1992, 170 p.
5. CUADROS, J.A.A. & BAPTISTA, G.M.M. Metodologia para elaboração de mapas de risco ambiental, por meio de um sistema de informação geográfica: aplicação no Distrito Federal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 7, 1997, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná, 1997, CD-ROM.
6. EASTMAN, J.R. **Idrisi32, version 32.11**. Worcester: Clark University, 1998.
7. FONSECA FILHO, H. **Otimização de um sistema especialista na avaliação de terras para fins de reflorestamento**. Rio Claro, 1999. 118 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
8. FORESTI, C. & VERONA, J.D. Cartografia da arborização urbana da cidade de Limeira - SP, com utilização de sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 7, 1997, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná, 1997, CD-ROM.
9. GARCIA, G.J. Métodos e técnicas na recuperação de áreas degradadas por mineração. **Geociências**, v. 17, n. 1, p. 187-208, 1998.
10. GOMES, AR. **Projeção de crescimento urbano utilizando imagens de satélite**. Rio Claro, 1995. 89 p. Monografia

- (Trabalho de Formatura em Ecologia) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista.
11. MIRANDA, E.E.; DORADO, A.J.; GUIMARÃES, M.; MANGABEIRA, J.A.C.; MIRANDA, J.R. Sistemas de informação geográfica na avaliação da sustentabilidade agrícola. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, 1996, Salvador. **Atas...** Salvador: Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais-INPE / Sociedade de Especialistas Latino-Americanos em Sensoriamento Remoto-SELPER, 1996, CD-ROM.
  12. MONCERATT, A.E. & PINTO, S.A.F. Caracterização e adequação do uso da terra utilizando técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, 1996, Salvador. **Atas...** Salvador: Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais-INPE / Sociedade de Especialistas Latino-Americanos em Sensoriamento Remoto-SELPER, 1996, CD-ROM.
  13. NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações.** São Paulo: Edgar Blücher, 1992, 2a. ed., 308 p.
  14. RIBEIRO, M.F. Uso do sensoriamento remoto em base orbital na geomorfologia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 7, 1997, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná, 1997, CD-ROM.
  15. VICENS, R.S.; CRUZ, C.B.M; RIZZINI, C.M. Utilização de técnicas de sensoriamento remoto na análise da cobertura vegetal da reserva florestal de Linhares, ES/Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9, 1998, Santos. **Atas...** Santos: Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais-INPE, 1998, CD-ROM.
  16. WATRIN, O.S.; VENTURIERI, A.; ROCHA, A.M.A.; SILVA, B.N.R.; SILVA, L.G.T. Zoneamento em área submetida a diferentes impactos antrópicos na Amazônia Oriental. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9, 1998, Santos. **Atas...** Santos: Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais-INPE, 1998, CD-ROM.