

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**INPE-9288-TDI/819**

**SISTEMAS DE INFORMAÇÃO PARA MONITORAMENTO DA  
CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Katia Castro de Matteo

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Bernardo  
Friedrich Theodor Rudorff, aprovada em 04 de março de 1998.

528.711.7

Matteo, K. C.

Sistemas de informação geográfica para monitoramento da cultura da cana-de-açúcar / K. C. Matteo. – São José dos Campos: INPE, 1998.

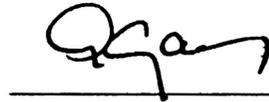
109p. – (INPE-9288-TDI/819).

1.Sistemas de Informação Geográfica (SIG). 2.Cana-de-açúcar. 3.Sensoriamento remoto. 4.Índice vegetativo.

I.Título.

Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de Mestre em Sensoriamento Remoto.

**Dr. Gilberto Câmara Neto**



\_\_\_\_\_  
**Presidente**

**Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff**



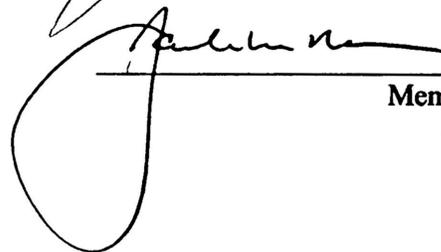
\_\_\_\_\_  
**Orientador**

**Dr. Getúlio Teixeira Batista**



\_\_\_\_\_  
**Membro da Banca**

**Dr. Jansle Vieira da Rocha**



\_\_\_\_\_  
**Membro da Banca  
- Convidado -**

Candidato (a): Katia de Castro Matteo

São José dos Campos, 04 de março de 1998.

Aos meus avós:  
Julieta  
e  
Orlantino  
pelo amor e lição de vida  
(in memoriam)

## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff, pela orientação, amizade, motivação, leitura e sugestões que muito contribuíram na realização deste trabalho.

Ao Dr. Antônio Miguel V. Monteiro pelo apoio em solucionar problemas surgidos durante as etapas realizadas.

Ao colega Cláudio Clemente Faria Barbosa pela grande ajuda e empenho na programação em LEGAL.

Aos engenheiros Luiz Antonio Dias Paes, Antonio Celso Joaquim e Jorge Luis Donzelli da COPERSUCAR, pelo fornecimento das informações relativas à produção da cana-de-açúcar.

## RESUMO

O gerenciamento e monitoramento da atividade canavieira utilizando um Sistema de Informação Geográfica através de consulta em banco de dados geográfico constitui a principal análise realizada neste trabalho. A integração entre mapa cadastral e dados de sensoriamento remoto foi estabelecida na tentativa de propor relações entre produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) e a resposta espectral de imagens de satélite (índice de vegetação com diferença normalizada). A área de estudo abrange os canaviais da Usina Catanduva situada no estado de São Paulo.

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS FOR MONITORING OF SUGARCANE  
FIELDS

ABSTRACT

The management and monitoring of sugarcane activity using a Geographic Information System consulting a geographical database is the main analysis conducted in this work. The integration between cadastral map and remote sensing data was established in an attempt to propose relationship between sugarcane productivity (*Saccharum officinarum*) and spectral response of satellite images (Normalized Difference Vegetation Index). The study area comprises sugarcane fields from the Catanduva Plant located in São Paulo State.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
1. INTRODUÇÃO .....	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	19
2.1 Produção agrícola da cana-de-açúcar.....	19
2.1.1 Cana-de-açúcar .....	21
2.1.2 Comportamento espectral da cana-de-açúcar....	23
2.2 Imagens de satélite.....	26
2.2.1 Registro de imagens.....	27
2.2.2 Índice de vegetação.....	28
2.3 Sistema de informação geográfica (SIG).....	30
2.3.1 Tecnologia de banco de dados relacionais.....	33
2.3.2 Modelagem de dados.....	33
2.3.3 Operações zonais.....	42
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1 Caracterização da área de estudo.....	47
3.1.1 Localização.....	47
3.1.2 Aspectos geomorfológicos.....	48
3.1.3 Aspectos geológicos.....	50
3.1.4 Aspectos pedológicos.....	51
3.1.5 Aspectos climáticos.....	52
3.1.6 Áreas canavieiras.....	53
3.2 Fontes de dados.....	54
3.3 Sistema operacional, aplicativos, equipamentos.	54
3.4 Copersucar.....	55
3.5 SPRING.....	56
3.5.1 Linguagem de Manipulação Espacial.....	57
3.6 Desenvolvimento do trabalho.....	57
3.6.1 Digitalização.....	58
3.6.2 Entrada de dados.....	58
3.6.3 Processamento do modelo numérico.....	59
3.6.4 Dados cadastrais.....	60
3.6.5 Tratamento das imagens de satélite.....	61
3.6.6 Operações zonais.....	62
3.6.7 Consultas.....	63
3.7 Produção de mídia digital (CD-ROM).....	64
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
4.1 Características da área de estudo.....	67
4.2. Exemplos de consultas.....	75

4.2.1 Consulta de variedade, área plantada e produtividade.....	75
4.2.2 Consulta de estágio de corte e produtividade.	78
4.2.3 Consulta do potencial produtivo dos solos....	78
4.2.4 Consulta da aplicação de vinhaça e defensivos	82
4.2.5 Consulta de áreas com besouro <i>Migdolus fryanus</i>	85
4.2.6 Queima da cana-de-açúcar e relevo.....	87
4.3. Estimativa de produtividade.....	89
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	93
6. RECOMENDAÇÕES .....	95
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
APÊNDICE A .....	103
APÊNDICE B .....	105
APÊNDICE C .....	110

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Conversão da energia solar em carboidratos pela folha.....	25
2.2	Porcentagem da energia absorvida, refletida e transmitida por uma folha em função do $\lambda$ .....	25
2.3	Reflectância de folhas de algodão superpostas até uma camada de seis folhas.....	30
2.4	Integração de dados.....	32
2.5	Exemplo de generalização/especialização.....	35
2.6	Exemplo de agregação.....	35
2.7	Universo conceitual.....	38
2.8	Estrutura vetorial em rede, utilizando nós (N) na conexão entre linhas (C).....	40
2.9	Polígonos simples e erros na topologia.....	41
3.1	Localização da área em estudo no contexto nacional.....	48
3.2	Mapa geomorfológico da área de estudo.....	50
3.3	Disposição das cartas topográficas digitalizadas.....	58
3.4	Talhões sobrepostos à imagem de NDVI de 21/02/96.....	62
3.5	Exemplo de como é realizado a consulta no SPRING.....	63
3.6	Apresentação de uma consulta realizada no <i>software</i> SPRING mostrando áreas com produtividade acima de 100 ton/ha.....	64
4.1	Resultado da impressão do PI das sedes municipais obtidos através da digitalização das cartas do IBGE na escala de 1:50000 em projeção UTM.....	67
4.2	Rede de drenagem e curvas de nível digitalizadas.....	68
4.3	Rede de drenagem sobreposta à imagem em tons de cinza obtida a partir das isolinhas.....	69
4.4	Modelo Numérico do Terreno, área de estudo visualizada em três dimensões.....	70
4.5	Mapa Temático de declividade gerado através do <i>software</i> SPRING.....	71
4.6	Sobreposição do mapa planimétrico dos 1717 talhões de cana da safra 96/97 à imagem Landsat-TM de 21/02/96 na banda 3.....	72
4.7	Sobreposição do mapa planimétrico de cana da safra 96/97 e dos Pis digitalizados à imagem Landsat-TM de 21/02/96 na banda 3 em uma porção da área de estudo.....	74
4.8	Consulta - variedades de cana-de-açúcar com as maiores porcentagens de área plantada.....	77
4.9	Resultado da consulta sobre o estágio de corte da cultura na safra 95/96.....	79

4.10	Agrupamento dos solos de acordo com o potencial de produtividade.....	81
4.11	Porção da usina Catanduva onde aplica-se vinhaça (rosa), exemplo para safra 95/96.....	84
4.12	Exemplo de consulta apresentando as áreas canavieiras da usina Catanduva afetadas pelo Migdolus.....	86
4.13	Consulta ao SGBD do SPRING - disposição espacial das áreas com corte manual e mecanizado....	88
4.14	Relação entre produtividade observada (ton/ha) e valores de NDVI da imagem de 17 de janeiro de 1995.....	90
4.15	Relação entre produtividade observada (ton/ha) e valores de NDVI da imagem de 10 de junho de 1995.	90
4.16	Relação entre produtividade observada (ton/ha) e valores de NDVI da imagem de 21 de fevereiro de 1996.....	91
4.17	Relação entre produtividade observada (ton/ha) e valores de NDVI da imagem de 25 de abril de 1996.	91

## LISTA DE TABELAS

2.1	Bandas do sensor TM do satélite Landsat 5 e suas principais aplicações.....	26
3.1	Agrupamento de solos da usina Catanduva e seu potencial de produtividade.....	52
3.2	Temperatura e pluviometria da área em estudo.....	53
4.1	Porcentagem de área plantada com cada variedade de cana-de-açúcar na usina Catanduva.....	75
4.2	Variedade da cana-de-açúcar e sua respectiva produtividade média (ton/ha).....	77
4.3	Área (ha e %) e produtividade (ton/ha) por estágio de corte.....	78
4.4	Aplicação de insumos e defensivos agrícolas no ano safra 95/96, usina Catanduva.....	82
4.5	Aplicação de insumos e defensivos agrícolas no ano safra 96/97, usina Catanduva.....	83

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

O planejamento e monitoramento do setor agrícola são atividades importantes, que visam o equilíbrio econômico, social e ambiental. Informações associadas às propriedades agrícolas e suas características, incluindo parâmetros como uso da terra, tipos e conservação do solo, vias de acesso, mapas cadastrais entre outros, são fundamentais para um efetivo gerenciamento.

A integração e análise conjunta das informações referentes às propriedades agrícolas bem como sua espacialização, se tornam cada vez mais complexas, uma vez que necessitam de controle e atualização.

A dificuldade no tratamento de um grande volume de dados pode ser auxiliada por meio de ferramentas computacionais. Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) pode ser usado para capturar, armazenar, editar, analisar, visualizar e plotar dados referenciados geograficamente (Korte, 1997).

Um SIG permite ordenar e acessar grande quantidade de informação para manejo de dados que estão especificamente relacionados aos componentes de dados espaciais, sendo capaz de fornecer uma sólida apresentação cartográfica (Juppenlatz e Tian, 1996).

A utilização integrada de técnicas de SIG e de sensoriamento remoto está sendo amplamente aplicada. A similaridade destas técnicas reside no fato de ambas tratarem de dados espaciais e serem mapeadas digitalmente (Juppenlatz e Tian, 1996).

Desde o advento das fotografias aéreas, a técnica de sensoriamento remoto vem sendo utilizada com frequência na área agrícola visando o levantamento de dados referentes à identificação de culturas, área de ocupação, estimativas de produtividade etc.

As imagens de sensoriamento remoto óptico captam a energia refletida por um alvo (p. ex. vegetação ou cultura agrícola) em faixas do espectro eletromagnético nas regiões do visível e infravermelho. Essa energia em diferentes faixas espectrais ou através da combinação linear destas faixas (p. ex. índice de vegetação com diferença normalizada; NDVI) pode ser associada a parâmetros biofísicos tal como a biomassa.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a integração de atributos não espaciais (p. ex. estágio de corte, área plantada, produção, variedade, aplicação de vinhaça, entre outros) referentes a cada talhão com os dados espaciais (mapa cadastral) através de um Sistema de Informação Geográfica (*software* SPRING) para gerenciamento e planejamento da produção agrícola em nível de usina canavieira, em dois anos safra.

Propõe-se também a integração de um mapa cadastral com dados de sensoriamento remoto, visando estabelecer relações entre a produtividade da cana-de-açúcar e a resposta espectral de imagens de sensoriamento remoto.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 Produção Agrícola da Cana-de-açúcar

Segundo Bray (1980), até o ano de 1937, o cultivo da cana-de-açúcar no estado de São Paulo era feito a critério dos dirigentes das lavouras canavieiras de acordo com diferentes técnicas adotadas por tradição e rotina. Com o aperfeiçoamento das técnicas experimentais de pesquisa no setor canavieiro, novas técnicas foram se estabelecendo.

O processo de decisão do agricultor no planejamento da produção da cana-de-açúcar foi beneficiado pela disponibilidade de computadores, permitindo assim selecionar alternativas mais adequadas após análise de grande quantidade de dados (Contini et al. 1984).

O desenvolvimento de variedades melhoradas, o conhecimento sobre solo e clima, a avaliação da declividade do terreno, a ocupação do solo anterior à introdução da cana, o desenvolvimento de novas técnicas e práticas de cultivo, o uso de maquinário moderno, o conhecimento sobre o comportamento do mercado, a informação sobre a previsão da safra, são importantes fatores a serem considerados no processo de tomada de decisão do setor canavieiro para que ele atue de forma eficiente e otimizada.

Segundo Koffler (1982), a previsão da produção, é de grande valor para o planejamento, armazenamento e transporte da produção, sendo que no Brasil, muita ênfase tem sido dada em relação à cana-de-açúcar, devido ao seu grande destaque na economia nacional, visando aumentar a produção de açúcar e álcool anidro.

Segundo Katz (1995), a produção da cana-de-açúcar fica na dependência dos atributos dos solos em que são cultivados e da tecnologia adotada, embora as flutuações anuais na produção estão principalmente ligadas às oscilações climáticas, em especial, a precipitação pluvial.

A condição ecológica é um fator importante no estudo da cultura canavieira, uma vez que ela envolve os limites e as possibilidades do domínio desta atividade agrária, no espaço geográfico (Bray, 1980).

O decreto do Governo do Estado de São Paulo de número 42.056 divulgado no dia 6 de agosto de 1997, permite a queimada da cana-de-açúcar para fins de colheita por mais quinze anos para áreas não mecanizáveis e oito para áreas mecanizáveis. Tal decreto tem causado profundas controvérsias no setor da agroindústria açucareira.

Em entrevista ao Jornal da Cana de Ribeirão Preto (agosto, 1997) o presidente da União da Agroindústria Canavieira do estado de São Paulo, Sérgio Simões Ometto, ressaltou que a queimada é uma prática efetuada para facilitar a colheita a qual é feita por trabalhadores rurais que hoje somam 360.000. O corte manual da cana crua é inviável tanto por razões econômicas quanto por motivo de segurança para o trabalhador. A questão desses prazos deve ser revista para que haja uma adequada realocação de mão-de-obra e a garantia de se dispor de tecnologia para a colheita mecanizada, sobretudo para áreas de relevo mais acidentado.

Os assuntos tratados acima, constituem alguns dos motivos da necessidade de planejamento e monitoramento das atividades agrícolas da produção da cana-de-açúcar.

A seguir será feita uma introdução sobre a cultura da cana-de-açúcar.

### **2.1.1 Cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar é originária da Ásia, provavelmente de Nova Guiné. Esta cultura tem um bom desenvolvimento entre as latitudes 35° Norte e Sul da linha do Equador (Doorenbos e Kassam, 1979).

É uma cultura de clima tropical, exigindo de 1500 a 2500 mm. de água durante o período de crescimento. O crescimento ótimo é alcançado com uma média diária de temperatura entre 22 e 30°C, sendo que a temperatura mínima para um efetivo crescimento é de 20°C (Doorenbos e Kassam, 1979). A deficiência hídrica e nutricional além de temperaturas extremas e baixa radiação solar são algumas das principais limitações ao seu desenvolvimento (Bray, 1980).

As necessidades climáticas da cana-de-açúcar variam em função do destino da produção desta: se para produzir açúcar, aguardente, álcool ou para forragem - sendo que normalmente, a cana oriunda de lavouras para a produção de açúcar é a mais exigente.

A cultura não é muito exigente quanto ao solo. Profundidade acima de 1 metro, com boa aeração e drenagem são desejáveis. O pH ótimo varia em torno de 6,5, entretanto, a cana-de-açúcar pode se desenvolver com um pH entre 5 e 8,5; apresenta alta demanda por nitrogênio e

potássio e uma quantidade inferior de fósforo (Doorenbos e Kassam, 1979).

A cana-de-açúcar é denominada cana planta até sua primeira colheita, tendo um período de crescimento em torno de 12 ou 18 meses, dependendo da época de plantio. Se for plantada de setembro a outubro geralmente é colhida com cerca de 12 meses e denominada cana de ano. Se for plantada de janeiro a março ela cresce por volta de 18 meses e portanto, é denominada de cana de ano e meio. Após a primeira colheita a cana sofre uma rebrota que é chamada de soca. As demais colheitas ocorrem anualmente por volta do mesmo período (mês), sendo chamadas de ressocas. As rebrotas da cana sofrem cerca de 4 a 5 cortes quando então a lavoura é renovada com uma cana de ano ou de ano e meio (Rudorff, 1985).

Segundo Bray (1980), durante o ciclo vegetativo, existem fases em que a planta apresenta alterações em função da ação do ambiente. As principais fases de desenvolvimento são: germinação, perfilhamento, crescimento e maturação. Para cada uma destas fases a cana apresenta diferentes exigências climáticas, sendo que algumas são mais exigentes do que outras.

Por exemplo, após a fase de crescimento, para haver boa produção de sacarose nos colmos, a cana necessita passar por um período de baixa temperatura ou de deficiência hídrica, para que cesse o crescimento vegetativo e comece a fase de maturação (Bray, 1980).

A produtividade da cana é dada tanto pelo peso dos colmos quanto pelo teor de sacarose. O teor de sacarose nos colmos deve ser acima de 15% do peso fresco pois ele é que

determinará a produção de açúcar ou de álcool por tonelada de cana (peso fresco). A produtividade é diretamente influenciada por fatores genéticos, condições climáticas, manejo e fertilidade dos solos, pragas e doenças.

A safra da cana-de-açúcar na região Centro-Sul tem início no mês de abril e termina em novembro do mesmo ano. Para que a unidade industrial, produtora do açúcar e do álcool, seja plenamente suprida de matéria prima (colmos de cana), é muito importante que antes do início da safra haja uma estimativa exata do volume de cana disponível para moagem. Esta informação, ao nível da usina, é utilizada para planejamento das atividades de corte e transporte da cana-de-açúcar, além de ser fundamental para as atividades industriais, econômicas e administrativas (Rudorff, 1985).

### **2.1.2 Comportamento Espectral da Cana-de-açúcar**

As propriedades espectrais de uma folha são função de sua composição, morfologia e estrutura interna, que por sua vez apresentam variações em função das diferentes variedades de cana.

Na faixa do espectro eletromagnético (EEM) de 0,4 a 2,6  $\mu\text{m}$ , onde atuam a maioria dos sensores ópticos a vegetação possui uma reflectância típica que a diferencia dos demais alvos da superfície terrestre.

Esta faixa do EEM pode ser dividida em sub faixas denominadas de:

- visível (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ );
- infravermelho próximo (0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ );
- infravermelho médio (1,3 a 2,6  $\mu\text{m}$ ).

A região do visível, é caracterizada por uma baixa reflectância da vegetação decorrente de uma alta absorção da radiação solar que incide sobre as folhas. Os pigmentos das folhas são os principais responsáveis por esta absorção, pois captam a energia solar nesta região do EEM para ser utilizada no processo fotossintético.

Segundo Taiz e Zeiger (1990), somente 5% da energia solar incidente sobre as folhas é utilizada no processo da fotossíntese para a produção de carboidratos. Isto ocorre em parte porque a maior fração da energia solar incidente não é absorvida pelos pigmentos. Além disso, uma parcela de energia absorvida é perdida na forma de calor. Da parcela absorvida e convertida em carboidratos uma parte é utilizada no metabolismo geral da folha (Figura 2.1).

Na região do infravermelho próximo, as propriedades ópticas da folha são dominadas principalmente, pelas suas estruturas celulares. A reflectância pode chegar até 50%, dependendo da estrutura anatômica das folhas sendo que a absorção é muito baixa (menos de 15%) (Tucker e Garratt, 1977).

No infravermelho médio, a presença de água nas folhas prevalece na resposta espectral em função dos picos de absorção da água em torno de 1,45, 1,95, 2,7 e 6,3  $\mu\text{m}$  (Ponzoni e Inoe, 1992).

A radiação solar nos comprimentos de onda de 400 a 700 nm é freqüentemente referido como sendo a radiação fotossinteticamente ativa ou PAR (Photosynthetic Active Radiation). Da PAR incidente 10 a 15% não é absorvida pelos pigmentos mas é refletida ou transmitida (Figura 2.2).

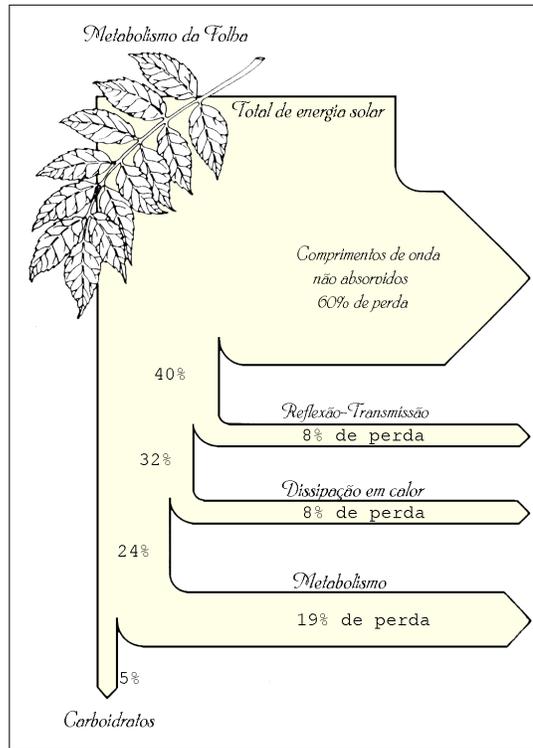


Fig. 2.1 - Conversão da energia solar em carboidratos pela folha.  
 FONTE: Adaptada de Taiz e Zeiger (1990)

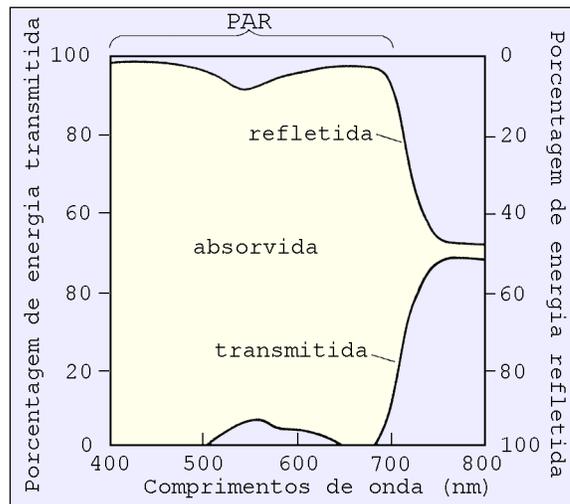


Fig. 2.2 - Porcentagem da energia absorvida, refletida e transmitida por uma folha, em função do comprimento de onda.  
 FONTE : Adaptada de Taiz e Zeiger (1990)

O comportamento espectral da cultura da cana-de-açúcar ao longo do seu ciclo de crescimento é melhor evidenciado pouco antes do início da safra na região Centro-Sul. Rudorff e Batista (1985) analisaram dados espectrais do sensor MSS de cinco passagens do satélite Landsat e concluíram que a melhor época para aquisição de imagens para fins de estimativa de produtividade (relação da resposta espectral com peso dos colmos) situa-se em torno do mês de fevereiro, isto ocorre pelo fato da biomassa encontrar-se bem desenvolvida devendo entrar no período de maturação.

## 2.2 Imagens de Satélite

Os sensores ópticos a bordo de satélites de sensoriamento remoto registram a energia refletida ou emitida pelos alvos da superfície terrestre (p.ex. vegetação, água) em faixas do espectro eletromagnético (EEM). Por exemplo, o satélite Landsat de órbita polar heliossíncrona obtém imagens sobre a mesma área a cada 16 dias próximo às 9:45 hs (horário local) e possui a bordo um sensor denominado Thematic Mapper (TM), que capta a radiação refletida ou emitida em 7 bandas espectrais conforme ilustra a Tabela 2.1 (NASA, 1984).

TABELA 2.1 - BANDAS DO SENSOR TM DO SATÉLITE LANDSAT 5 E SUAS PRINCIPAIS APLICAÇÕES

BANDAS	INTERVALO ESPECTRAL ( $\mu\text{m}$ )	APLICAÇÕES POTENCIAIS
1	0.45 - 0.52	Estudos batimétricos em regiões de águas limpas; sensibilidade à concentração de carotenos e clorofila.
2	0.52 - 0.60	Mapeamento de vegetação sadia pela reflectância verde, cujo pico se situa em 0.55 $\mu\text{m}$ .
3	0.63 - 0.69	Banda de absorção da clorofila; diferenciação de espécies vegetais.

4	0.76 - 0.90	Estudos de volume da biomassa e delimitação de corpos d'água.
5	1.55 - 1.75	Estresses de vegetação por desequilíbrio de água na folha
7	2.08 - 2.35	Considerada estritamente para fins geológicos; selecionada para identificar minerais com íons hidroxilas.
6	10.4 - 12.5	Propriedades termais do solo, rocha, vegetação e água. Estudos de contraste térmico entre litologias silicáticas.

### 2.2.1 Registro de Imagens

O registro de uma imagem é o processo pelo qual dois ou mais conjuntos de imagens sofrem alinhamento geométrico. Desta forma as imagens passam a ter uma referência cartográfica precisa podendo ser sobrepostas de forma digital ou visual (Jensen, 1986).

Para efetuar o registro de uma imagem é necessário obter pontos de controle que são feições identificadas tanto na imagem quanto no mapa, como por exemplo cruzamento de estradas. O mapa deve ser confiável e estar em uma escala adequada, podendo ser planimétrico ou plani-altimétrico. Os pontos de controle são identificados e posicionados de maneira interativa na imagem, na forma de coordenadas em linha e coluna. As coordenadas geográficas dos pontos de controle podem ser obtidas de mapas através de mesa digitalizadora, mapas já incorporados no sistema em formato digital ou ainda via teclado, pela informação das coordenadas dos pontos (INPE, 1997).

Com os pontos de controle determinados, obtém-se uma função polinomial de transformação, geralmente de 1º ou 2º grau, que ajusta a imagem segundo os pontos de controle fornecidos. A equação 2.1 fornece o número mínimo de pontos

de controle (PC) para a determinação de um polinômio de grau n.

$$PC = \frac{(n^2 + 3n + 2)}{2} \quad 2.1$$

É importante que os pontos de controle estejam bem distribuídos dentro da área de trabalho. Baseado na transformação geométrica, atribuem-se níveis digitais à imagem registrada pelo processo de reamostragem por interpolação, processo este necessário devido às coordenadas da imagem corrigida não coincidirem com as coordenadas da imagem original. O interpolador de alocação de vizinho mais próximo não altera o valor de cinza da imagem (INPE, 1997)

### **2.2.2 Índice de Vegetação**

Conforme apresentado no item 2.1.2 a vegetação tem baixa reflectância na região visível do EEM correspondente à banda 3 do TM (vermelho) devido a absorção da radiação solar pelos pigmentos e alta reflectância na região infravermelho próximo correspondente à banda 4 do TM.

Em geral, os valores dos níveis de cinza ou das reflectâncias nestas duas bandas podem ser transformadas para gerar os chamados índices de vegetação.

Diversas transformações lineares de bandas espectrais foram propostas. O índice mais comumente utilizado é o Índice de Vegetação com Diferença Normalizada (NDVI); (Rouse et al., 1974), obtido utilizando a seguinte equação:

$$NDVI = \frac{(IVP - VER)}{(IVP + VER)} \quad 2.2$$

onde IVP e VER, são os níveis digitais ou as reflectâncias nas regiões do espectro eletromagnético correspondentes ao infravermelho próximo e ao vermelho, respectivamente.

O NDVI ressalta o contraste entre a reflectância da vegetação no infravermelho próximo e no vermelho. Sendo o valor de reflectância no infravermelho próximo bastante superior ao da região do vermelho, tem-se como consequência que quanto maior a biomassa, maior será o valor do NDVI pois na região do infravermelho próximo, a quantidade de radiação refletida por várias camadas de folhas é bem maior do que a refletida por uma única folha. Isto ocorre devido ao alto grau de espalhamento (reflectância e transmitância) da radiação incidente nesta faixa do EEM. O efeito sobre a reflectância final em função das múltiplas reflectâncias e transmitâncias que ocorrem no IVP quando diversas camadas de folhas são sobrepostas é ilustrado na Figura 2.3 (Myers, 1970 em Moreira, 1997).

Tucker (1979) trabalhou com dois grupos de nove índices de vegetação. Um grupo gerado com medidas de reflectância nas faixas espectrais do verde e do vermelho e outro, gerado com reflectância obtida nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo. De acordo com os resultados obtidos, o segundo grupo apresentou melhores correlações com parâmetros biofísicos tais como: biomassa fresca e clorofila total.

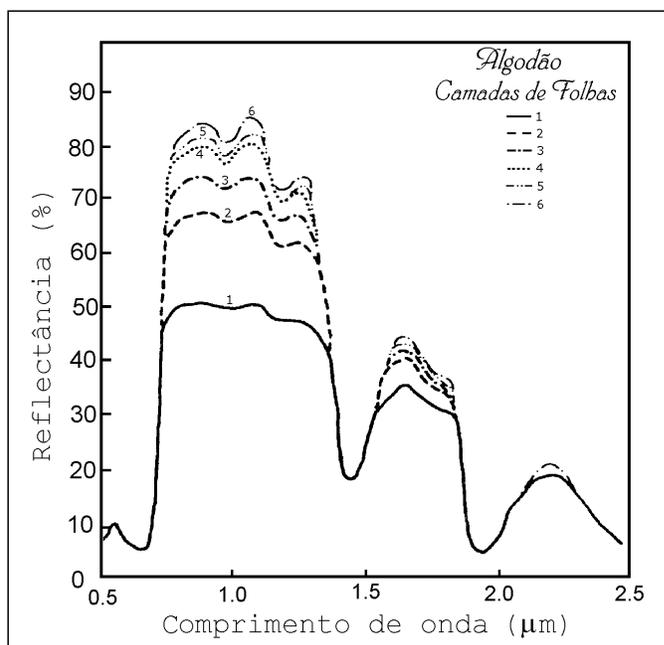


Fig. 2.3 - Reflectância de folhas de algodão superpostas até uma camada de seis folhas.

FONTE: Myers (1970) em Moreira (1997)

Rudorff e Batista (1990) desenvolveram um modelo de estimativa de produtividade agrometeorológico e espectral para a cultura da cana-de-açúcar e compararam o modelo de índice de vegetação (espectral, produtividade observada x índice de vegetação), o qual apresentou coeficientes de determinação de 0,59 na safra 1984/85, 0,24 na safra 1985/86 e 0,14 na safra 1986/87 com o modelo agrometeorológico-espectral onde obtiveram coeficientes de determinação de 0,69, 0,54 e 0,50 para os respectivos anos safra acima. Isto mostra que o uso do índice de vegetação em conjunto com o modelo que leva em consideração variáveis meteorológicas e agrônomicas melhora sensivelmente a estimativa da produtividade da cana-de-açúcar.

### 2.3 Sistema de Informação Geográfica (SIG)

Um Sistema de Informação Geográfica é um sistema para gerenciamento de informações que permite a entrada,

armazenamento, transformação e saída de informações geográficas. A tecnologia SIG é o resultado da ligação de desenvolvimentos paralelos em diferentes campos de processamento de dados (Burrough, 1986).

Os dados e informações são abstrações utilizadas para representar o mundo real e seus eventos, possuindo três diferentes dimensões: tema, tempo e localização (Salomonson, 1980).

Segundo Juppenlatz e Tian (1996), quando a informação ou os dados referem-se a objetos ou eventos de características geográficas, trata-se de uma informação geográfica, tendo como componentes:

1. os dados espaciais que fornecem o aspecto locacional das características geográficas junto com suas dimensões espaciais, sendo representados por ponto, linha ou extensão de área;
2. os atributos de dados que fornecem a descrição, a medida e a classificação das características geográficas, se distinguem nos aspectos quantitativos e qualitativos;
3. o tempo é responsável pela alteração da informação geográfica e, portanto, há necessidade de monitoramento da mudança de atributos como também da localização de objetos.

As principais características dos sistemas de informação geográfica são:

- integrar, numa única base de dados, as informações espaciais provenientes de diversas fontes tais como: dados cartográficos, dados censitários, dados

de cadastro urbano e rural, dados de imagens de satélite, dados de redes (drenagem, rodovias), dados de modelos numéricos de terreno (Figura 2.4);

- combinar as várias informações através de algoritmos de manipulação para gerar mapeamentos derivados;
- consultar, recuperar, visualizar e desenhar o conteúdo da base de dados geocodificados (Câmara, 1993).

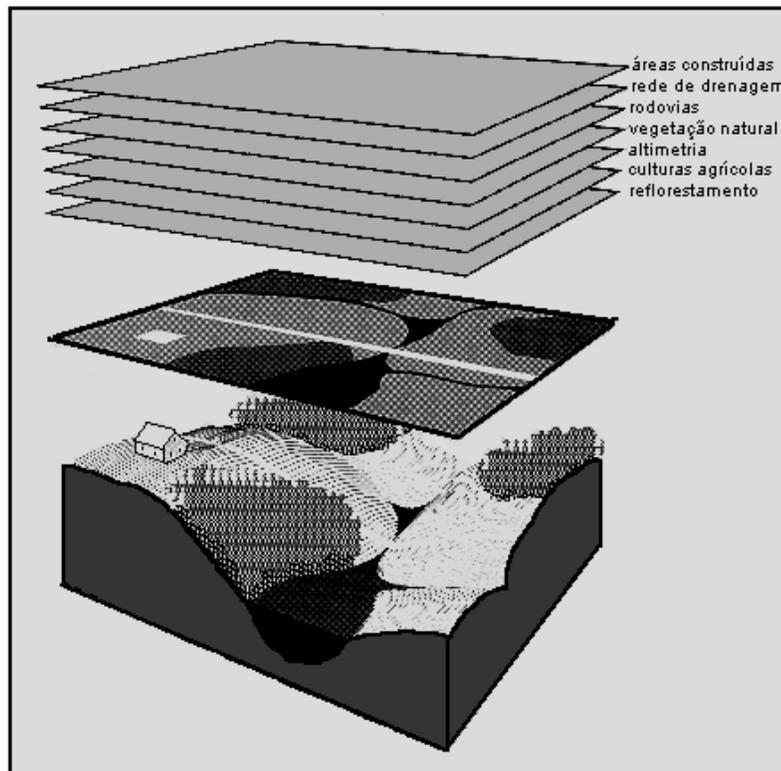


Fig. 2.4 - Integração de dados.

FONTE : Adaptada de Tomlin (1990)

### **2.3.1 Tecnologia de Banco de Dados Relacionais**

Um Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD) apresenta dados numa visão independente dos sistemas aplicativos, além de garantir três requisitos importantes:

- a) eficiência (acesso e modificações de grande volume de dados);
- b) integridade (controle e acesso por múltiplos usuários);
- c) persistência (manutenção por longo tempo) (Câmara, 1993).

Segundo Câmara e Medeiros (1996), a organização de bancos de dados geográficos mais utilizada é a chamada estratégia dual onde um SIG utiliza um SGBD relacional para armazenar os atributos convencionais dos objetos geográficos (na forma de tabelas) e arquivos para guardar as representações geométricas destes objetos.

Neste caso, como ocorre com o *software* SPRING, inicialmente, o usuário deve definir o esquema conceitual associado às entidades do banco de dados (particionado em projetos), indicando seus atributos e as representações geométricas. Um projeto é usualmente composto por um conjunto de planos de informação (PIs), que variam em número, tipos de formato e de temas (rede de drenagem, altimetria, uso do solo).

### **2.3.2 Modelagem de dados**

Segundo Câmara e Medeiros (1996), o conceito de modelagem de dados baseados em técnicas de orientação-por-objetos denota um paradigma de trabalho utilizado de forma

ampla para implementação de sistemas computacionais. Duas definições são importantes para o entendimento do processo:

1. objeto é uma entidade que possui uma descrição (atributos) e uma identidade;
2. classe reúne objetos que compartilham propriedades em comum.

O conceito de modelagem pode ser agrupado em quatro mecanismos de abstração, descritos a seguir:

- a) classificação;
- b) generalização/especialização;
- c) agregação;
- d) associação.

A classificação pode ser definida como o mapeamento de objetos com propriedades e comportamentos similares.

A generalização/especialização proporciona visualização do espaço geográfico em diferentes níveis de detalhes. Algumas classes de objetos que possuem muitas propriedades e comportamentos em comum são agrupadas junto às classes mais gerais, chamadas superclasses. Os termos subclasses e superclasses, caracterizam uma generalização hierárquica em que os objetos são ligados por uma relação de "is a" ou "é um". Um exemplo é ilustrado na Figura 2.5:

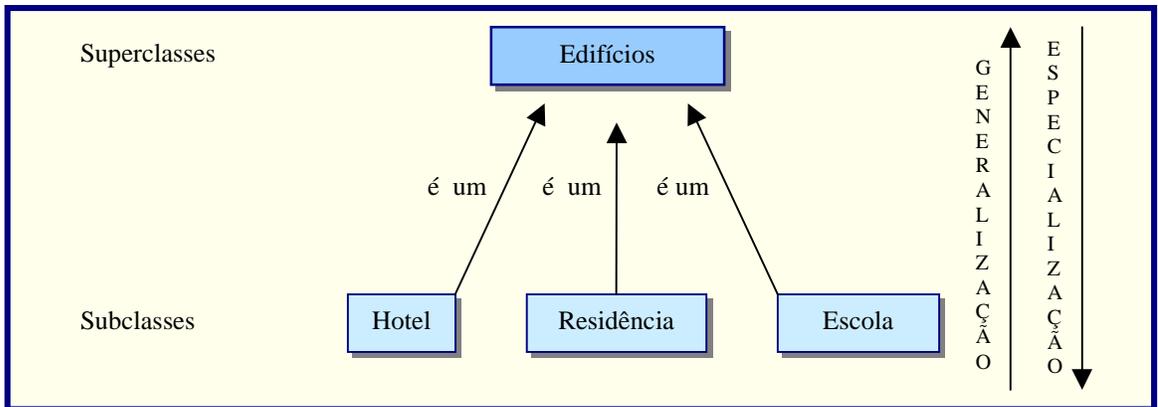


Fig. 2.5 - Exemplo de generalização/especialização.

A agregação é um mecanismo de abstração usado para modelagem de objetos compostos, onde os objetos gerais são combinados para formar um objeto de nível mais alto. Cada objeto constituinte da agregação tem propriedades e operações próprias. A hierarquia de agregação é freqüentemente expressa como uma relação de "part of" ou "parte de" devido aos objetos constituintes serem parte dos agregados. Um exemplo de agregação é apresentado na Figura 2.6.

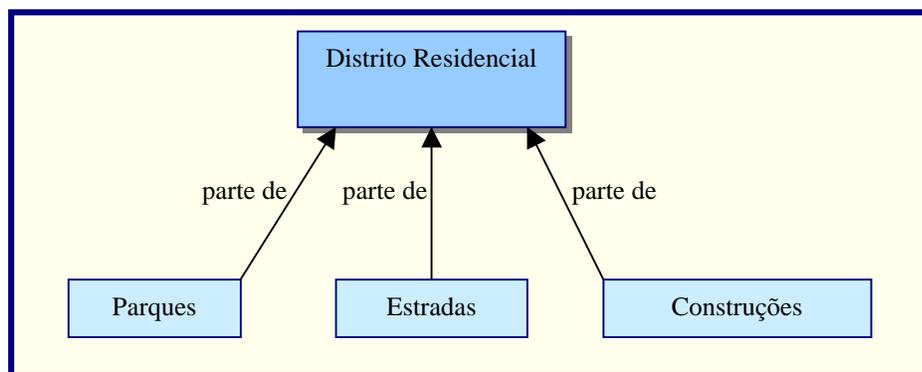


Fig. 2.6 - Exemplo de agregação.

A associação é uma forma de abstração onde relações de dois ou mais objetos independentes são consideradas como um outro objeto. Para esclarecer,

considerando um terreno, as relações topológicas (espaciais) dos objetos nele contidos são exemplos de associações.

O processo de modelagem segundo o paradigma dos quatro universos proposto por Gomes e Velho (1995) compreende:

1. universo do mundo real onde os fenômenos são representados (por ex. tipos de solo, cadastro urbano e rural, dados geofísicos e topográficos);
2. universo conceitual (matemático) onde pode-se distinguir dados contínuos e objetos individualizáveis, especializando estas classes nos tipos de dados geográficos (por ex. dados temáticos e cadastrais, modelos numéricos de terreno, dados de sensoriamento remoto);
3. universo de representação onde as entidades formais definidas no universo conceitual são associadas às diferentes representações geométricas distinguindo-se as representações matricial e vetorial;
4. universo de implementação onde ocorre a realização do modelo de dados através de linguagens de programação.

As classes básicas do modelo segundo Câmara (1996) e Câmara e Medeiros (1996) são: geo-campo, geo-objeto, mapa cadastral, objetos não-espaciais, plano de informação e banco de dados geográfico, sendo definidos a seguir:

1. geo-campo representa a distribuição espacial de uma variável que possui valores em todos os pontos pertencentes a uma região geográfica (superfície

- qualquer pertencente ao espaço geográfico), podendo ser especializados em geo-campo temático (associa a cada ponto do espaço um tema) e geo-campo numérico (associa a cada ponto do espaço, um valor real, por exemplo, dados de uma imagem de sensoriamento remoto);
2. geo-objeto é um elemento único que possui atributos não-espaciais e está associado a múltiplas localizações geográficas sendo que sua localização pretende ser exata e o objeto é distinguível de seu entorno;
  3. objeto não-espacial é um objeto que não possui localizações espaciais associadas;
  4. mapa cadastral é um objeto complexo que agrupa geo-objetos segundo uma projeção cartográfica e região geográfica sendo que a relação entre o objeto cadastral e os geo-objetos é "está mapeado em" (is mapped in);
  5. plano de informação é a generalização dos conceitos de geo-campos e de objeto cadastral, sendo uma forma de interface entre o usuário e os conceitos de geo-campo e mapa cadastral;
  6. banco de dados geográficos é composto por conjuntos de planos de informação, um conjunto de geo-objetos e um conjunto de objetos não-espaciais.

Em resumo, o universo conceitual (Figura 2.7) tem como entidade básica um banco de dados geográfico, composto por planos de informação (geo-campos ou objetos cadastrais), geo-objetos e objetos não-espaciais.

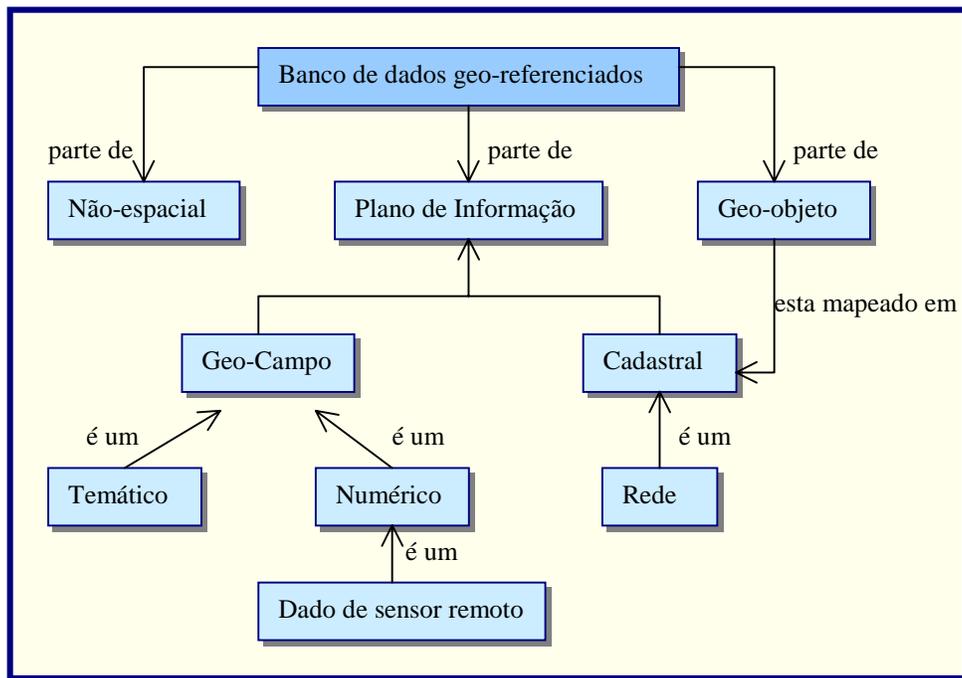


Fig 2.7 - Universo Conceitual  
 Fonte : Adaptada de Câmara e Medeiros, 1996

No universo de representação, definem-se as possíveis representações geométricas que podem estar associadas às classes do universo conceitual, a representação vetorial e matricial.

A representação vetorial de um elemento é uma tentativa de reproduzi-lo da forma mais exata. Assume-se o espaço como contínuo, o que permite que todas as posições, distâncias e áreas sejam definidas com um grau de exatidão elevado. Os métodos vetoriais assumem que as coordenadas dos pontos são matematicamente exatas, permitindo ainda que dados complexos ocupem menor espaço de armazenamento no computador (Burrough,1986).

Segundo Burrough (1986), a estrutura vetorial utilizada por um Sistema de Informação Geográfica é armazenada por pontos, linhas e áreas (polígonos), descritas a seguir:

1. entidades pontuais abrangem todas as entidades geográficas que podem ser posicionadas por um único par de coordenadas  $x,y$ , sendo que os atributos não gráficos devem ser arquivados para a indicação do tipo de ponto que está sendo tratado;
2. entidades lineares podem ser definidas como um conjunto de pelo menos dois pontos (dois pares de coordenadas  $x,y$ ) e, além das coordenadas dos pontos que compõem a linha, deve-se armazenar informação que indique qual o tipo de atributo associado;
3. as redes são linhas que não trazem informações a respeito de suas ligações, sendo que para estruturar uma rede de linhas a ser reconstruída pelo computador, devem ser utilizados apontadores dentro da estrutura de dados e baseiam-se no uso de pontos a que dá-se o nome de nós, conforme ilustra a Figura 2.8; os nós contém informação sobre o ângulo de confluência, mostrando o modo como cada linha se liga a ele. Assim a topologia da rede fica totalmente definida. As relações topológicas como adjacência, pertinência e intersecção, permitem estabelecer os relacionamentos entre objetos geográficos que são invariantes à rotação, translação e escala (Câmara e Medeiros, 1996).

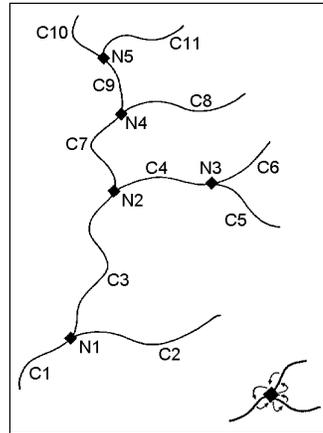


Fig. 2.8 - Estrutura vetorial em rede, utilizando nós(N) na conexão entre linhas(C).  
 FONTE: Burrough (1986)

4. áreas ou polígonos podem ser representadas de várias maneiras sendo que o objetivo da estrutura poligonal é descrever as propriedades topológicas de áreas como a forma, a vizinhança e a hierarquia, de tal maneira que os atributos associados possam ser manipulados como um mapa temático (Burrough, 1986).

Na representação por polígonos, cada elemento tem área, perímetro e formato individualizado. Os principais tipos de representação poligonais são apresentadas a seguir:

Os Polígonos Simples são representados de forma semelhante àquela usada para elementos lineares, ou seja, por um conjunto de coordenadas (x,y). Embora a representação seja simples, o método apresenta desvantagens pois as linhas entre polígonos adjacentes devem ser digitalizadas duas vezes, o que aumenta a possibilidade de ocorrência de erros (Figura 2.9). Além disto as informações sobre os polígonos vizinhos são inexistentes, e as ilhas (polígonos contidos em polígonos) são apenas construções

gráficas, não sendo possível verificar se a topologia está correta.

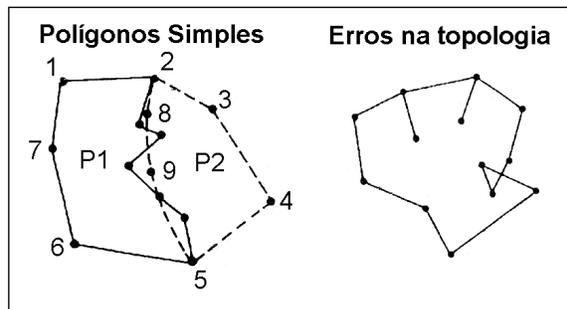


Fig. 2.9 - Polígonos simples e erros na topologia.  
FONTE : Burrough (1986)

Os polígonos com dicionário de pontos são formados por pares de coordenadas os quais são numerados seqüencialmente e referenciados a um dicionário onde são registrados os pontos que pertencem a cada polígono. Este método possui a vantagem de que os limites entre polígonos adjacentes são únicos. A desvantagem consiste na dificuldade de suprimir linhas entre polígonos e, também na maneira de tratar as ilhas.

Os polígonos com estrutura topológica explícita que apresentam problemas como ilhas e vizinhança só podem ser resolvidos se forem incorporadas relações topológicas explícitas na estrutura, construída de duas maneiras: a) durante a entrada de dados, e b) através do uso de programação específica que cria a topologia a partir de um conjunto de linhas ou cadeias.

A estrutura de dados matriciais (ou raster) caracteriza-se por matrizes de elementos inteiros (imagens de satélite) ou reais (grade de Modelo Numérico de Terreno-MNT) que representam uma dada variável (reflectância, altimetria, temperatura). A desvantagem desta estrutura de

dados em relação ao formato vetorial está ligada a alta necessidade de capacidade de armazenamento de dados, que todavia pode ser parcialmente contornado pelo uso de algoritmos de compactação (Erthal et al., 1984).

### **2.3.3 Operações de Análise Geográfica**

Segundo Câmara e Medeiros (1996) a partir do modelo de dados foi estabelecida uma taxonomia para as diversas operações de análise geográfica, que serão divididas em: operadores sobre geo-objetos, e operadores sobre geo-campos.

São descritas a seguir as operações sobre *geo-campos* e suas especializações (temático, numérico e dado de sensor remoto) que podem ser classificados como pontuais, de vizinhança e zonais (Tomlin, 1990).

#### 1. Operações sobre geo-campos

##### a) Operações Pontuais

Segundo Câmara e Medeiros (1996) as operações pontuais geram como saída um geo-campo cujos valores são função apenas dos valores dos geo-campos de entrada em cada localização correspondente. Podem operar apenas sobre um campo (p. ex., *fatiar* um modelo numérico de terreno, *classificar* uma imagem) ou realizar intersecções entre conjuntos espaciais (p. ex. *operações booleanas* entre mapas temáticos).

Dependendo dos domínios e contradomínios dos mapas de geo-campos, diferentes possibilidades podem ser consideradas:

- operações unárias: a entrada é um único geo-campo. Também são chamadas operações de

transformação, pois a operação equivale a um mapeamento entre os contradomínios dos campos de entrada e saída;

- operações booleanas: são utilizadas em análise espacial qualitativa e geram um temático a partir de regras aplicadas a geo-campos. As regras especificam o conjunto de condições a serem satisfeitas para cada tema de saída;
- operações matemáticas: funções aritméticas, logarítmicas e trigonométricas, aplicadas a modelo numérico do terreno e a dados de sensor remoto.

Segundo Câmara e Medeiros (1996) dentre os operadores matemáticos destaca-se as seguintes subclasses:

- operações de processamento de dados de sensoriamento remoto: subclasse de operadores matemáticos onde a entrada e saída são dados de sensor remoto;
- operações de classificação de dados de sensoriamento remoto: subclasse importante dos operadores matemáticos onde a entrada é uma instância da classe dado de sensor remoto e a saída é um temático.

#### b) Operações de Vizinhança

Nesta classe de operações, dado um geo-campo, computa-se o geo-campo de saída com base na dimensão e forma de uma vizinhança em torno de cada localização, conforme os exemplos a seguir:

- filtros para processamento de dado de sensor remoto;
- mapas de declividade e exposição para modelo numérico de terreno.

### c) Operações Zonais

Segundo Câmara e Medeiros (1996) as operações zonais são definidas sobre regiões específicas de um geo-campo de entrada, onde as restrições são fornecidas por outro geo-campo temático, como exemplos tem-se:

- "Dado um mapa de solos e um mapa de declividade da mesma região, obtenha a declividade média para cada tipo de solo";
- "Dados a altimetria e o mapa de municípios do Vale do Paraíba, crie um novo mapa aonde cada município será representado por sua altitude média".

Estas operações são sempre definidas sobre geo-campos das classes modelo numérico de terreno ou dado de sensor remoto. A restrição desta operação pode ser um temático ou cadastral, que é utilizado para definir uma região de interesse aonde é computada a função. Os operadores zonais incluem:

- média, máximo e mínimo e desvio padrão dos valores sobre uma região especificada;
- índice de variedade dos valores, onde cada valor no mapa de saída será computado a partir do número de valores diferentes do geo-campo de entrada que pertencem a uma mesma região zonal.

A operação de média zonal, gera um geo-campo destino onde o valor resultante em todas as posições geográficas que compõem uma região é igual à média aritmética dos valores do atributo nas mesmas posições geográficas no geo-campo origem (Barbosa, 1998).

## 2. Operações sobre geo-objetos

Segundo Câmara e Medeiros (1996) estando definidos os relacionamentos topológicos sobre geo-objetos, pode-se definir as operações sobre geo-objetos:

- restrições sobre atributos: computados em função das atributos de entidades espaciais (p. ex. "selecione todas as cidades de Alagoas com mortalidade infantil maior que 10% ");
- restrições espaciais: derivados a partir dos relacionamentos topológicos das entidades geográficas (p. ex. "dê-me todas as escolas municipais do bairro Jardim Satélite"), de direção ("ao norte de", "acima de") ou métricos (p. ex. "dê-me todas as escolas a menos de 500 m da Via Dutra");
- propriedades de geo-objetos: os resultados correspondem a predicados de um geo-objeto ou de um conjunto de geo-objetos (p. ex. "calcule a média do valor venal das casas do bairro Jardim Esplanada" ou "indique o caminho ótimo para o ônibus que vai do Centro ao Jardim Uirá").

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da Área de Estudo

##### 3.1.1 Localização

A área de estudo está localizada no estado de São Paulo e se refere às plantações com a cultura da cana-de-açúcar da usina Catanduva, abrangendo os seguintes municípios: Agulha, Aparecida de Monte Alto, Ariranha, Botelho, Cândido Rodrigues, Catanduva, Catiguá, Elisiário, Embaúba, Fernando Prestes, Itajobi, Monte Azul Paulista, Nova América, Novais, Palmares Paulista, Paraíso, Pindorama, Piranji, Roberto, Santa Adélia, Tabapuã, Tapinas, Turvânia, Uchoa (Figura 3.1).

O sistema de projeção utilizado é UTM "Universal Transverse Mercator", o retângulo envolvente em Coordenadas Planas (metros) é constituído pelos seguintes pontos:  $X1 = 690000$ ,  $X2 = 746000$ ,  $Y1 = 7616000$ ,  $Y2 = 7688000$ , totalizando uma área de  $4032 \text{ km}^2$ .

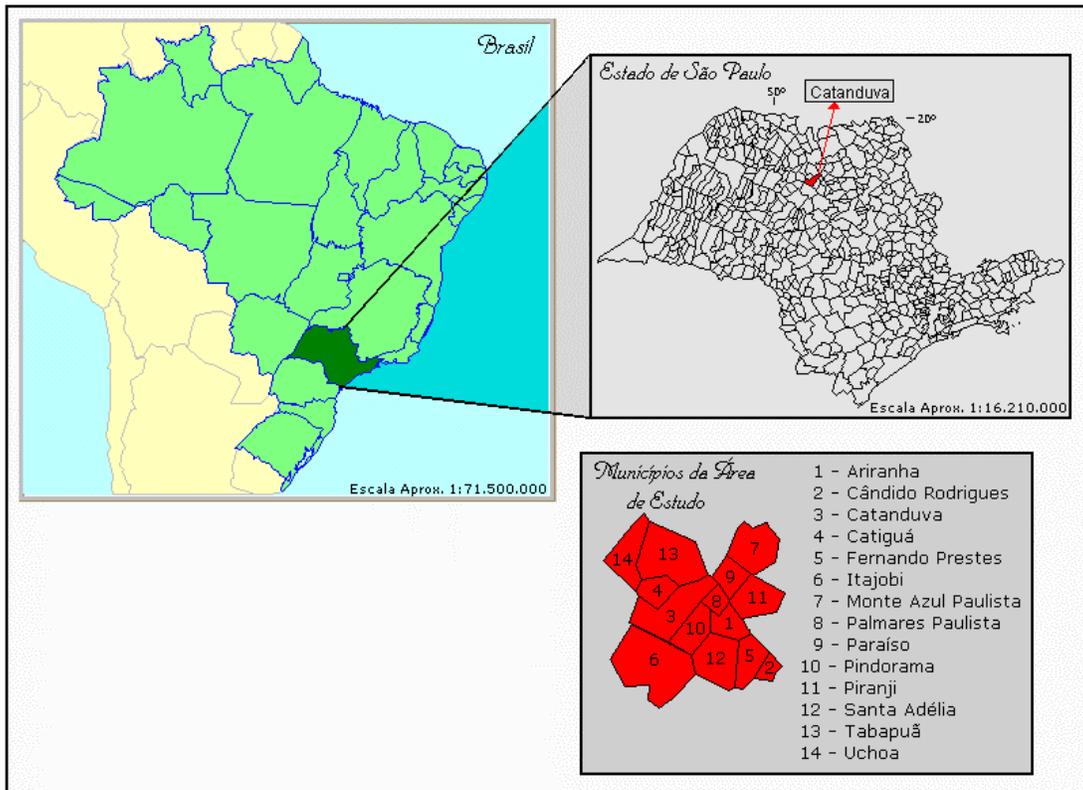


Fig. 3.1 - Localização da área em estudo no contexto nacional.

FONTE: adaptada do Sistema de Informações Estatísticas e Geográficas - IBGE (1996)

### 3.1.2 Aspectos Geomorfológicos

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1981), a área de estudo está localizada no Planalto Ocidental, o qual abrange uma área de cerca de 50% do estado de São Paulo, ocupada por relevos monótonos de colinas e morrotes, destacando entre outros a região acidentada de Catanduva.

O relevo varia de 420 a 620 metros de altitude, a rede hidrográfica é organizada por rios conseqüentes, cursos d'água tributários do rio Tietê e do rio Grande.

A Figura 3.2, mostra seis diferentes formas de relevo, sendo que três destas pertencem à classe de relevos de degradação, em planaltos dissecados:

a) Colinas Amplas onde predominam interflúvios com área superior a 4 km<sup>2</sup>, topos extensos e aplainados, vertentes com perfis retilíneos a convexos e, drenagem de baixa densidade, padrão subdendrítico, vales abertos, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes;

b) Colinas Médias onde predominam interflúvios com áreas de 1 a 4 km<sup>2</sup>, topos aplainados, vertentes com perfis convexos a retilíneos e, drenagem de média a baixa densidade, padrão sub-retangular, vales abertos a fechados, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes;

c) Morrotes Alongados e Espigões onde predominam interflúvios sem orientação preferencial, topos angulosos a achatados, vertentes ravinadas com perfis retilíneos e, drenagem de média a alta densidade, padrão dendrítico, vales fechados.

A classe representada por Planícies Aluviais, constitui-se de relevos de agradação com terrenos baixos e relativamente planos junto às margens dos rios, periodicamente sujeitos a inundações.

Constituindo relevos de transição, a forma de relevo Encostas Sulcosas por Vales Subparalelos, possui encostas não escarpadas, desfeitas em interflúvios lineares de topos angulosos a arredondados, vertentes com perfis retilíneos, com drenagem de média densidade, padrão subparalelo a dendrítico e vales fechados.

Outra forma de relevo é Escarpas Festonadas, desfeitas em anfiteatros separados por espigões, topos angulosos a arredondados, vertentes de perfis retilíneos, com drenagem de alta densidade, padrão subparalelo a dendrítico e vales fechados.

As feições de relevo subordinadas existentes na área são os limites superiores de relevos de transição não escarpados e as cristas assimétricas.

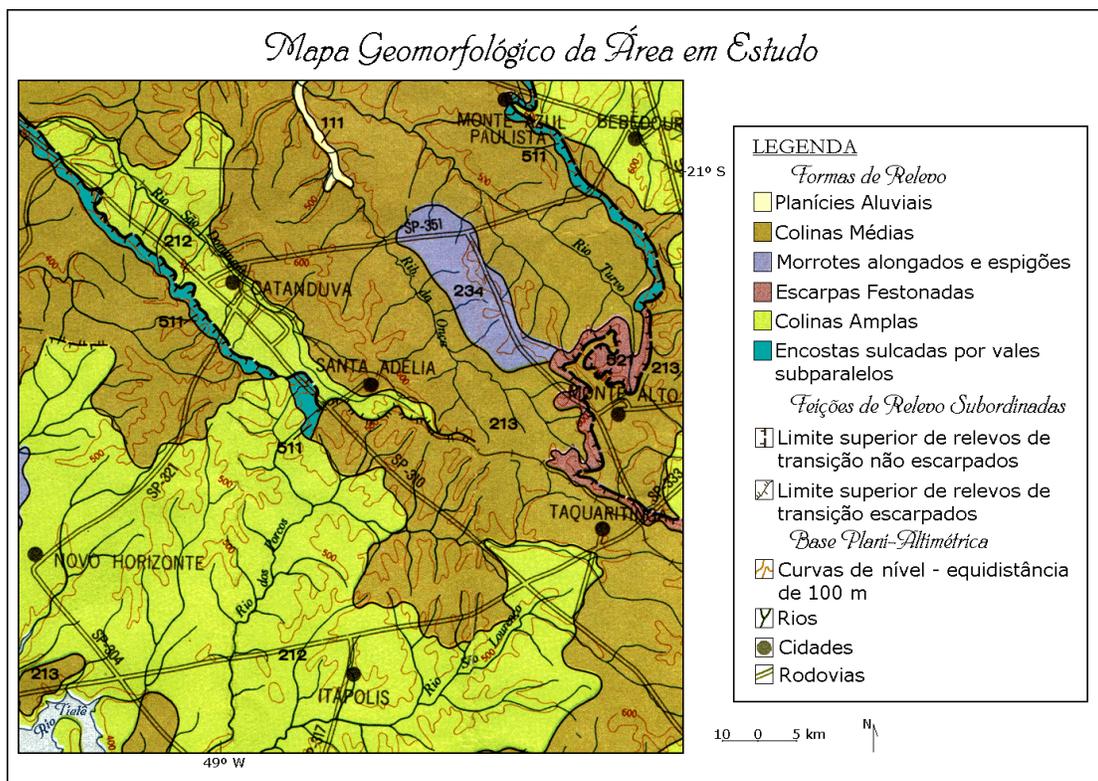


Fig. 3.2 - Mapa Geomorfológico da Área de Estudo.  
 FONTE: Mapa Geomorfológico de São Paulo, IPT (1981)

### 3.1.3 Aspectos Geológicos

Segundo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 1981), a geologia da área em estudo, localiza-se na Bacia do Paraná, pertencendo ao Grupo Bauru, Formação Adamantina (Ka). Descreve-se pela

presença de depósitos fluviais com predominância de arenitos finos a muito finos, podendo apresentar cimentação e nódulos carbonáticos, com lentes de siltitos arenosos e argilitos, ocorrendo em bancos maciços; estratificação plano-paralela e cruzada de pequeno a médio porte.

#### **3.1.4 Aspectos Pedológicos**

Um detalhado levantamento pedológico por talhão de cana foi realizado pela Copersucar (Cooperativa de Produtores de Cana, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo Ltda.) para a usina Catanduva.

Os tipos de solos existentes na área são Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), Litólicos (LI) e Podzólicos Vermelho Amarelo (PVA).

Os solos do tipo LVA são não-hidromórficos e apresentam um horizonte A fraco ou moderado e um horizonte B latossólico. São solos de perfis profundos, distróficos, com saturação de bases baixa e raramente aparecem com saturação de bases média a alta. Possuem perfis do tipo A, B e C. Ocorrem com maior freqüência em relevo plano a suave ondulado.

Os solos do tipo LI onde o horizonte A, por vezes chernozêmico, moderado ou mais freqüentemente fraco, repousa diretamente sobre a rocha ou mesmo sobre um horizonte C em evolução. São pouco evoluídos, bastante rasos e com textura e fertilidade variáveis. São encontrados normalmente em áreas de relevo ondulado.

Os solos do tipo PVA são bem desenvolvidos, bem drenados, normalmente ácidos, contém um horizonte A fraco ou moderado sobre um horizonte B com concentração de argila de baixa atividade. Normalmente são distróficos, ou seja,

baixa fertilidade natural, embora apareçam por vezes, com fertilidade média e alta (eutróficos). Apresentam textura que pode ir de média a muito argilosa (Vieira, 1988).

A Tabela 3.1 ilustra o agrupamento dos solos da usina Catanduva (dados fornecidos pelo Eng. Agrônomo Antonio Celso Joaquim da Seção de Manejos de Solos da Copersucar).

TABELA 3.1 - AGRUPAMENTO DE SOLOS DA USINA CATANDUVA E SEU POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE

GRUPO	POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE	TIPOS DE SOLO *
I	Alto	PVA-13, PVA-16, PVA-22, PVA-25, PVA28 e PVA-81
II	Médio/Alto	PVA-14, PVA-17, PVA-23 e PVA-26
III	Médio	PVA-15, PVA-24 e PVA-27
IV	Médio/Baixo	LVA-8, LVA-9, PVA-76 e PVA-77
V	Baixo	LVA-12 E LI-7

\* A legenda para os diferentes tipos de solos estão na Anexo A 1.

### **3.1.5 Aspectos climáticos**

A região apresenta os tipos climáticos Aw e Cwa da classificação internacional de Köppen. A precipitação pluviométrica varia entre 1.100 e 1.300 mm. anuais. Os meses de maior precipitação são dezembro, janeiro e fevereiro. O inverno é seco (Comissão de Solos, 1960).

A Tabela 3.2 fornece a média mensal da temperatura mínima e máxima dos anos de 1995 e 1996 e os totais pluviométricos mensais da Estação Experimental de Pindorama, SP, do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), localizada na latitude 21°13' e longitude 48°56', a uma altitude de 562 metros.

TABELA 3.2 – TEMPERATURA E PLUVIOMETRIA DA ÁREA EM ESTUDO

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA
TEMPERATURA (°C) - ANO													
Mínima – 1995	20,4	20,0	18,5	16,3	14,0	13,1	14,3	*	*	*	*	*	*
Máxima – 1995	31,2	29,1	30,8	28,9	26,6	26,5	27,5	31,7	31,3	29,6	30,5	30,3	29,5
Mínima – 1996	20,0	20,1	19,7	16,9	14,1	11,8	10,3	13,1	15,2	17,3	18,2	19,7	16,4
Máxima – 1996	30,3	31,0	30,1	29,6	26,7	25,8	26,7	29,4	29,6	32,2	30,4	30,7	29,4
PRECIPITAÇÃO (mm.) – ANO													TOTAL
1995	216,6	603,0	49,6	147,0	34,9	18,1	50,9	1,5	72,7	161,2	91,5	224,6	1671,6
1996	223,7	177,6	86,5	42,5	73,6	15,4	1,2	22,1	147,1	33,0	225,8	244,9	1293,4

\* Os dados referentes a temperatura mínima dos meses de agosto a dezembro de 1995, não foram fornecidos pelo IAC.

### 3.1.6 Áreas Canavieiras

As áreas cultivadas com cana-de-açúcar na usina Catanduva são divididas em: setores, fazendas, blocos e talhões. Os talhões são identificados através de um código sobre cartas planimétricas que contêm a distribuição espacial das lavouras de cana. Para cada mapa são disponíveis listagens contendo informações de cada talhão, tais como: variedade, estágio de corte, tipos de solos, aplicação de vinhaça, área, estimativa da produtividade, produção total, entre outros. No presente estudo foram utilizados os dados, em nível de talhão, referentes às safras 95/96 e 96/97. Na safra 95/96 foram analisados 1765 talhões e na safra 96/97 foram analisados 1717 talhões o que corresponde ao total de talhões disponível para a produção agrícola da usina. A diferença no número de talhões entre os dois anos safras é decorrente das áreas em reforma.

### **3.2 Fontes de Dados**

As principais fontes de dados utilizadas no presente trabalho para as safras 95/96 e 96/97 foram:

1. Mapas planimétricos contendo os limites dos talhões da usina Catanduva, digitalizados no *software* AutoCAD, no formato DXF, fornecidos pela Copersucar;
2. Planilhas contendo os atributos dos talhões relativos a variedade, estágios de corte, datas de plantio, data de corte, produção, produtividade e tipo de solo;
3. Cartas topográficas na escala 1:50.000, adquiridas junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE);
4. Imagens do satélite Landsat 5, sensor TM, base 221, ponto 75 adquiridas em 17 de janeiro e 10 de junho de 1995 e, 21 de fevereiro e 25 de abril de 1996.

### **3.3 Sistemas Operacionais, Aplicativos e Equipamentos.**

Os seguintes sistemas operacionais e aplicativos foram utilizados:

1. Sistemas Operacionais MSDOS (ambiente Windows 95 - versão 4.00), LINUX (versão 2.0.27);
2. Sistema de Informação Geográfica (SGI), desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI) do INPE, versão 2.4, comercializado pela Engespaço, São José dos Campos, SP;
3. SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas), versão 2.0 - Release 2.0.5 (ver item 3.5);
4. IMPIMA, módulo do *software* SPRING;
5. AutoCAD LT for Windows, Autodesk, Inc.;

6. Microsoft Excel 97, Microsoft Corporation;
7. FOXPROW for Windows, versão 2.5;
8. Aldus PhotoStyler, versão 2.0, Aldus Corporation;
9. Microsoft Word, versão 7.0, Microsoft Corporation.

Os seguintes equipamentos computacionais foram utilizados:

1. Microcomputador PC (*Personal Computer*), com microprocessador Pentium (Intel) com *chip* MMX 166 Mhz, 64 Mb de memória RAM, placa gráfica SuperVGA com 2 Mb de memória, disco rígido de 3,2 Gb, monitor Samsung 15", leitor de CD-ROM, gravador de CD-ROM marca *Hewlett Packard SureStore CD-Writer Plus*.
2. Mesa Digitalizadora;
3. Scanner *Genius ColorPage HR*;
4. Impressora *Hewlett Packard Deskjet 692C*;

### **3.4 Copersucar**

A Copersucar - Cooperativa de Produtores de Cana, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo - reúne 37 usinas e destilarias de álcool que respondem por 25% da produção de cana, açúcar e álcool do Brasil.

Com sede em Piracicaba, SP, possui cerca de 700 profissionais e uma área de 12800 m<sup>2</sup>. construídos. O centro de pesquisa possui quatro estações experimentais localizadas em Piracicaba, Jaú, Miracatú no estado de São Paulo e Camamú no estado da Bahia.

Em 1979, foi criado o Centro de Tecnologia Copersucar-CTC, que hoje é uma das principais instituições de pesquisa e desenvolvimento de tecnologia da atividade canavieira, sendo internacionalmente reconhecido. A

disseminação da tecnologia desenvolvida pelo CTC vem permitindo à agroindústria canavieira obter ganhos de produtividade da ordem de 3% ao ano, com conseqüentes reduções dos custos reais de produção.

O CTC possui especialistas atuando em todo o processo produtivo de açúcar e álcool, envolvendo as áreas agrícola e industrial, garantindo a transferência de tecnologia, assistência técnica e formação de pessoal através de cursos, treinamentos e elaboração de publicações técnicas para os cooperados.

Foi através da Copersucar que se obteve os dados da usina Catanduva, para a realização do presente trabalho.

### **3.5 SPRING**

O *software* SPRING (**S**istema para **PR**ocessamento de **IN**formações **Ge**oreferenciadas) é um banco de dados geográfico de 2º geração, para ambientes UNIX e Windows (em desenvolvimento) com as seguintes características:

- a) opera como um banco de dados geográfico suportando grande volume de dados (sem limitação de escala, projeção e fuso), mantendo a identidade dos objetos ao longo de todo o banco;
- b) administra dados vetoriais e matriciais, e realiza a integração de dados de sensoriamento remoto em um SIG;
- c) ambiente de menus e janelas com linguagem espacial facilmente programável pelo usuário (LEGAL-Linguagem Espaço-Geográfica baseada em Álgebra);
- d) escalonabilidade completa, operando em ambientes que variam desde microcomputadores a estações de trabalho RISC (INPE, 1997).

### **3.5.1 Linguagem de Manipulação Espacial**

A álgebra de mapas realiza operações sobre dados do tipo mapa temático, modelo numérico de terreno e imagem, sendo implementada, no SPRING-2.0 através da linguagem de manipulação espacial, chamada LEGAL (**L**inguagem **E**spacial para **G**eoprocessamento **AL**gébrico).

As operações algébricas em LEGAL envolvem dados georeferenciados representados sob a forma matricial e vetorial. Esta permite o modelamento de procedimentos sob a forma descritiva, onde dados e procedimentos são declarados e organizados segundo regras gramaticais, sob a forma de um programa.

Os Planos de Informação (PIs) caracterizados como geo-campos (temático, numérico e imagem) utilizam a representação matricial para operações algébricas, apesar do PI temático poder ter a representação vetorial associada. Já os PIs cadastrais, representados por mapas de geo-objetos, trabalham somente com a representação vetorial, de modo que o operador sobre objetos oferecido pelo LEGAL, a Reclassificação por Atributos, permite gerar a partir de um mapa cadastral, dados temáticos em representação vetorial (INPE, 1997).

### **3.6 Desenvolvimento do Trabalho**

Neste item serão descritos as etapas realizadas desde a digitalização da cartas topográficas, criação do plano de informação cadastral, processamento das imagens de satélite, confecção dos mapas finais até a produção de uma mídia digital.

### 3.6.1 Digitalização

Com a finalidade de caracterizar a região de estudo, foram criados vários Planos de Informação (PIs), utilizando o *software* SGI, através da digitalização de 12 cartas topográficas, na escala 1:50.000, cuja disposição e coordenadas UTM são apresentadas na Figura 3.3.



Fig. 3.3 - Disposição das cartas topográficas digitalizadas.

Foram digitalizadas as curvas de nível espaçadas de 20 metros, a rede de drenagem, as principais rodovias e os limites urbanos gerando mapas temáticos e numérico.

### 3.6.2 Entrada de Dados

Os arquivos gerados pelo SGI (PIs digitalizados) foram transferidos ao SPRING, no Banco de Dados "SIM", Projeto "CAT", contendo informações sobre o Sistema de Projeção UTM e Modelo da Terra "Hayford/Corrego" cuja origem é longitude oeste 51°. O retângulo envolvente em

coordenadas planas (metros) é constituído pelos seguintes pontos: X1 = 690000, X2 = 746000, Y1 = 7616000, Y2 = 7688000, sendo o mapa das curvas de nível um Plano de Informação de Modelo Numérico, e os demais representando um Modelo Temático.

O mapa de talhões fornecido pela Copersucar no formato digital, arquivo proveniente da digitalização no *software* AutoCAD (extensão .dxf) foi importado ao SPRING através da função "Importar", "Modelo Temático".

### **3.6.3 Processamento do Modelo Numérico**

O Modelo Numérico é representado por "Amostra" no SPRING. Através do comando "editar vetores" verificou-se as cotas e reconheceu-se as isolinhas.

Criou-se uma grade retangular, com resolução de 100 x 100 metros, utilizando o interpolador "Média Ponderada por Cota e Quadrante", com posterior refinamento (30 x 30 metros) utilizando o interpolador "Bicúbico".

Duas imagens, sombreada e níveis de cinza, foram geradas a partir da grade retangular, formando planos de textura para a visualização em três dimensões (3D), ou seja, podendo ser superposta a uma Modelo Numérico do Terreno.

Outro processamento realizado foi a geração da declividade, com posterior fatiamento, resultando em um mapa temático com as seguintes classes de declividade: muito baixa (0 a 1,7%), baixa (1,7 a 5,2%), média (5,2 a 10,5%) e alta (> que 10,5%).

### 3.6.4 Dados Cadastrais

Através da operação "mosaico", copiou-se as linhas do Plano de Informação (PI) - Modelo Temático (contendo o mapa de talhões) para um PI - Modelo Cadastral.

No tópico "Editar Vetores" eliminou-se os talhões que não pertenciam à safra 95/96, ajustou-se as linhas, com posterior junção de nós não ajustados. Efetuou-se um novo ajuste, a poligonalização e a verificação de polígonos. A operação foi repetida para o mapa correspondente ao ano safra 96/97.

O passo seguinte consistiu na associação das entidades (polígonos) com objetos, ou seja, criou-se um objeto para associá-lo a um polígono através da função "Editar Objetos".

Após a criação dos objetos foi gerado pelo sistema, uma tabela (geobject.dbf), cuja estrutura é basicamente:

ID	Nome (Rótulo)
Código do objeto	Nome dado ao objeto
Fornecido pelo sistema	

Para que os atributos de dados geográficos contidos na planilha do EXCEL fossem incluídos no SPRING, procedeu-se da seguinte maneira: a tabela CG00000\_.dbf criada automaticamente no SPRING, contendo em suas primeiras colunas dois campos (Geoid, Rótulo) foi transferida para o *software* FOXPROW, onde foram inseridos os valores do arquivo geobject.dbf bem como os atributos não espaciais contidos na planilha do EXCEL. Desta forma,

cada linha do banco de dados contém as características de um talhão específico.

Inserido o arquivo CG00000\_.dbf no SPRING, eliminou-se o arquivo índice (.mdx), assim o sistema atualiza o arquivo, reconhecendo os atributos de cada objeto.

A tabela gerada no SPRING correspondente ao ano safra 95/96 é o arquivo CG000004.dbf e para o ano safra 96/97 é CG000005.dbf

Todos os itens relacionados ao banco de dados podem ser recuperados, modificados, atualizados. Após sua inserção no *software* contendo os atributos gráficos, acionando-se uma função específica de consulta existente no sistema, é possível efetuar buscas de modo a se obter uma visão espacial de como os fenômenos estão ocorrendo e das relações passíveis de serem estabelecidas.

### **3.6.5 Tratamento das Imagens de Satélite**

As imagens de janeiro e junho de 95 e fevereiro e abril de 96, contendo as bandas 3 e 4, foram tratadas a partir dos dados brutos.

O passo inicial foi a leitura (módulo IMPIMA) e importação das imagens, em seguida registraram-se as imagens no modo tela com o mapa de talhões. Procurou-se selecionar pontos de controle espalhados no mapa (em média 10 pontos por imagem), obtendo um erro médio inferior a um pixel.

Ao cálculo do NDVI atribuiu-se o valor 127 para o Ganho e 128 para o Offset. Este processo é feito pelo sistema através da função "operações aritméticas".

A Figura 3.4 apresenta como exemplo parte da imagem resultante do cálculo do NDVI, em duas fazendas da usina Catanduva no ano-safra 96/97.

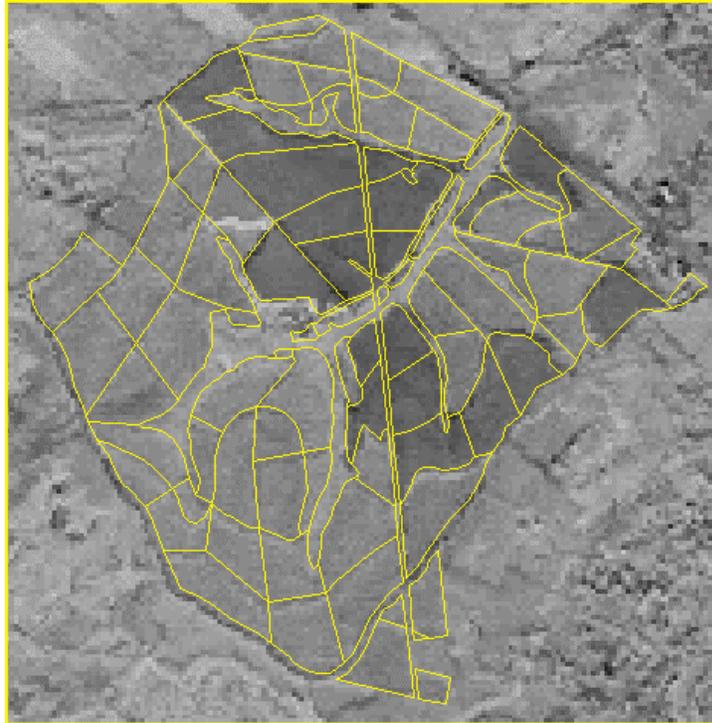


Fig. 3.4 - Talhões sobrepostos à imagem de NDVI de 21/02/1996

### **3.6.6 Operações Zonais**

No Anexo A2 são apresentados os quatro programas em LEGAL utilizados para extrair o valor médio de NDVI de cada talhão (objeto cadastral) e acrescentá-lo como atributo na coluna reservada ao valor de NDVI (ex. "NDVI\_IM1") correspondente no banco de dados para cada uma das quatro imagens.

Para que os valores de nível de cinza (NDVI) fossem inseridos no Banco de Dados em valores variando de zero a um, fez-se uma normalização, segundo a equação abaixo:

$$NDVI = \frac{(NC - 127)}{128}$$

### 3.6.7 Consultas

A próxima etapa realizada no trabalho foram as consultas, em que foi possível visualizar espacialmente os atributos que constam do banco de dados.

O ícone "consultar" dentro do Painel de Controle permite a visualização da tabela, contendo os atributos dos objetos, bem como a consulta propriamente dita, como mostra a Figura 3.5.

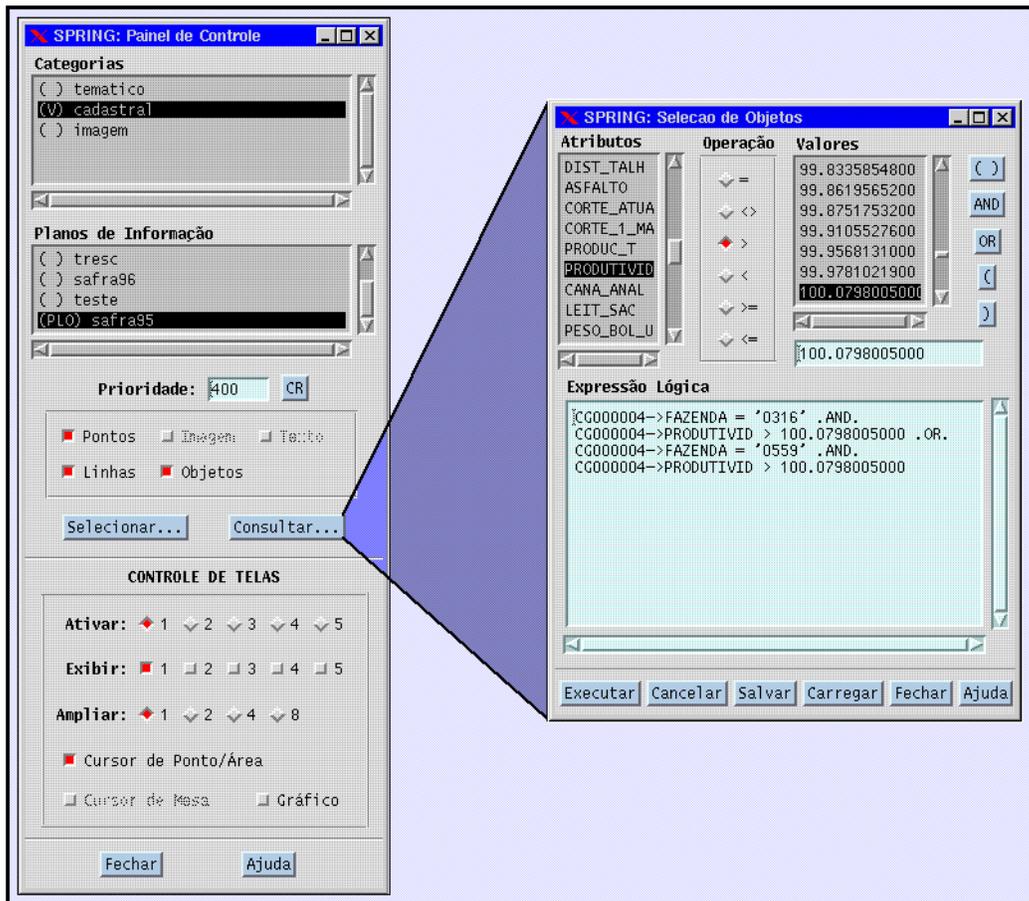


Fig. 3.5 - Exemplo de como é realizada uma consulta no SPRING.

Para efetuar uma consulta é necessário montar uma expressão lógica. Como mostra o exemplo acima, selecionou-

se uma área contendo duas fazendas (safra 95) e efetuou-se uma consulta para saber quais os talhões com alta produtividade de cana-de-açúcar (mais que 100 ton/ha), obtendo como resposta um mapa (Figura 3.6) onde os talhões que satisfazem a consulta estão em destaque (cor azul).

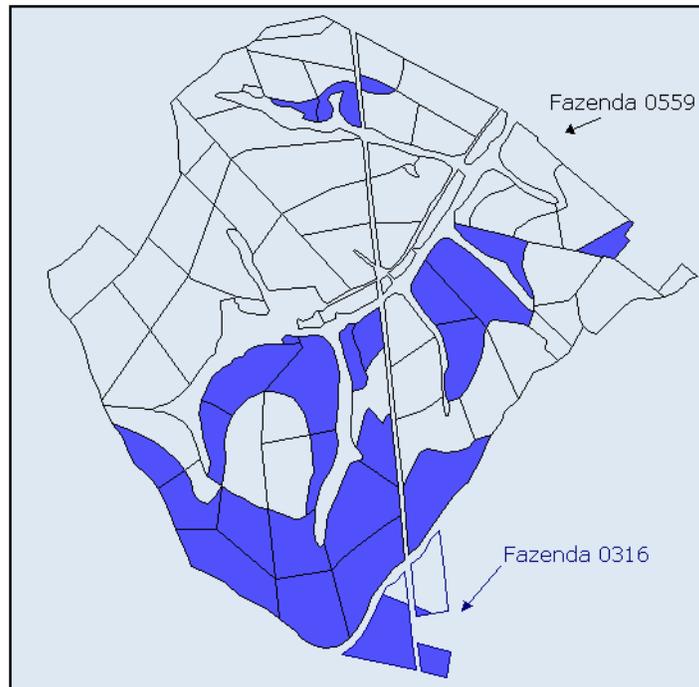


Fig. 3.6 - Apresentação de uma consulta realizada no software SPRING mostrando áreas com produtividade acima de 100 ton/ha.

### 3.7 Produção de Mídia Digital (CD-ROM)

Com o objetivo de possibilitar o acesso aos dados, os arquivos gerados no SPRING foram armazenados em um CD-ROM. Desta forma, o leitor pode realizar consultas de interesse.

Os arquivos gerados no SPRING foram compactados em um arquivo de extensão ".tgz", através do comando "tar cvfz final.tgz sim" no sistema operacional LINUX. Em seguida

este arquivo foi transferido ao Windows onde procedeu-se da seguinte forma para a gravação do CD-ROM:

- empregou-se uma mídia para gravação (CD-ROM Recordable) e um gravador de CD-ROM marca HP, modelo Surestore CD-Writer Plus;
- os arquivos foram copiados por meio de *software* do próprio equipamento e organizados em uma estrutura física em conformidade com o padrão ISO 9660 no CD-ROM.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 Características da Área de Estudo

A digitalização das 12 cartas topográficas, na escala 1:50000, foi uma etapa relevante que permitiu caracterizar a área de estudo em meio digital. A Figura 4.1 mostra o resultado da impressão do Plano de Informação contendo as sedes municipais.

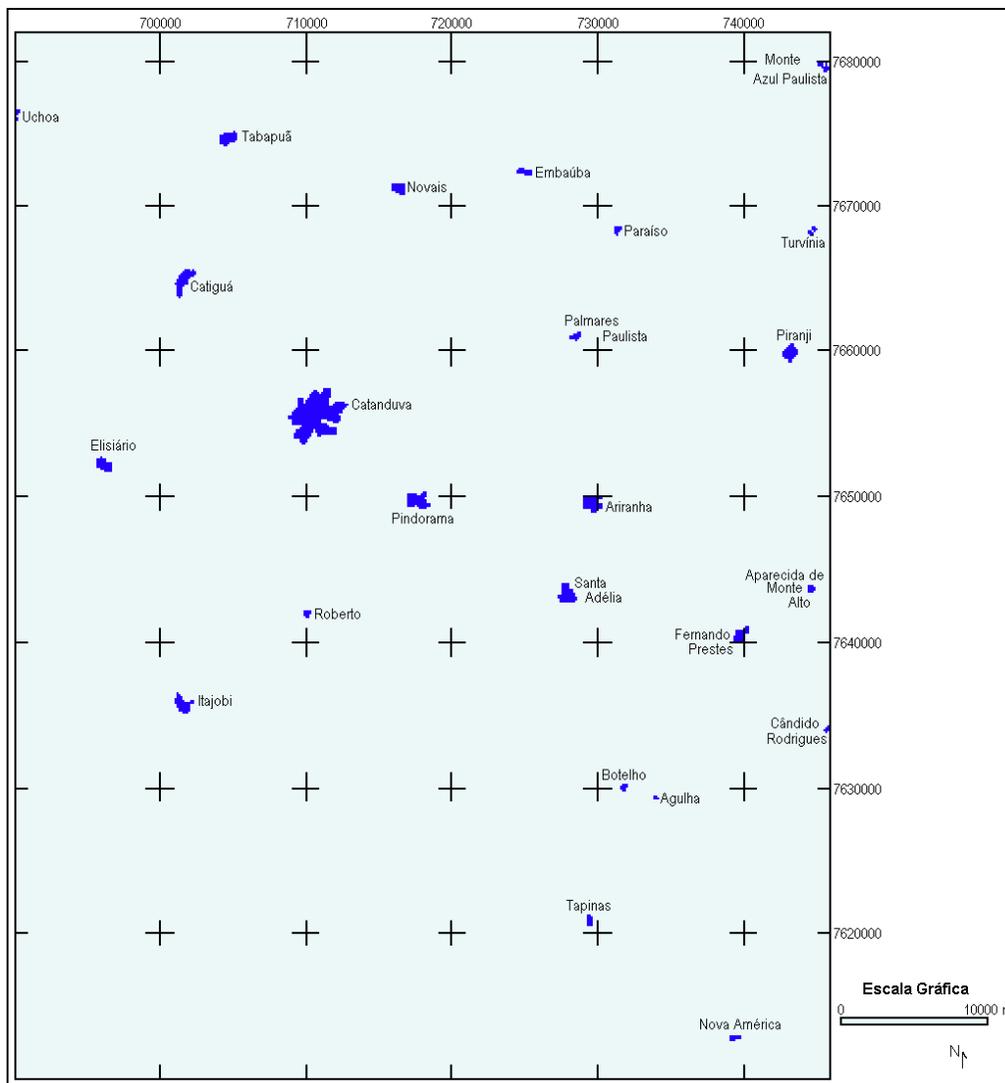


Fig. 4.1 – Resultado da impressão do PI das sedes municipais obtidos através da digitalização das cartas do IBGE na escala de 1:50000 em projeção UTM.

O mapa da rede hidrográfica e das curvas de nível com espaçamento de 20 metros é apresentado na Figura 4.2. A altitude do relevo varia de 420 a 620 metros.

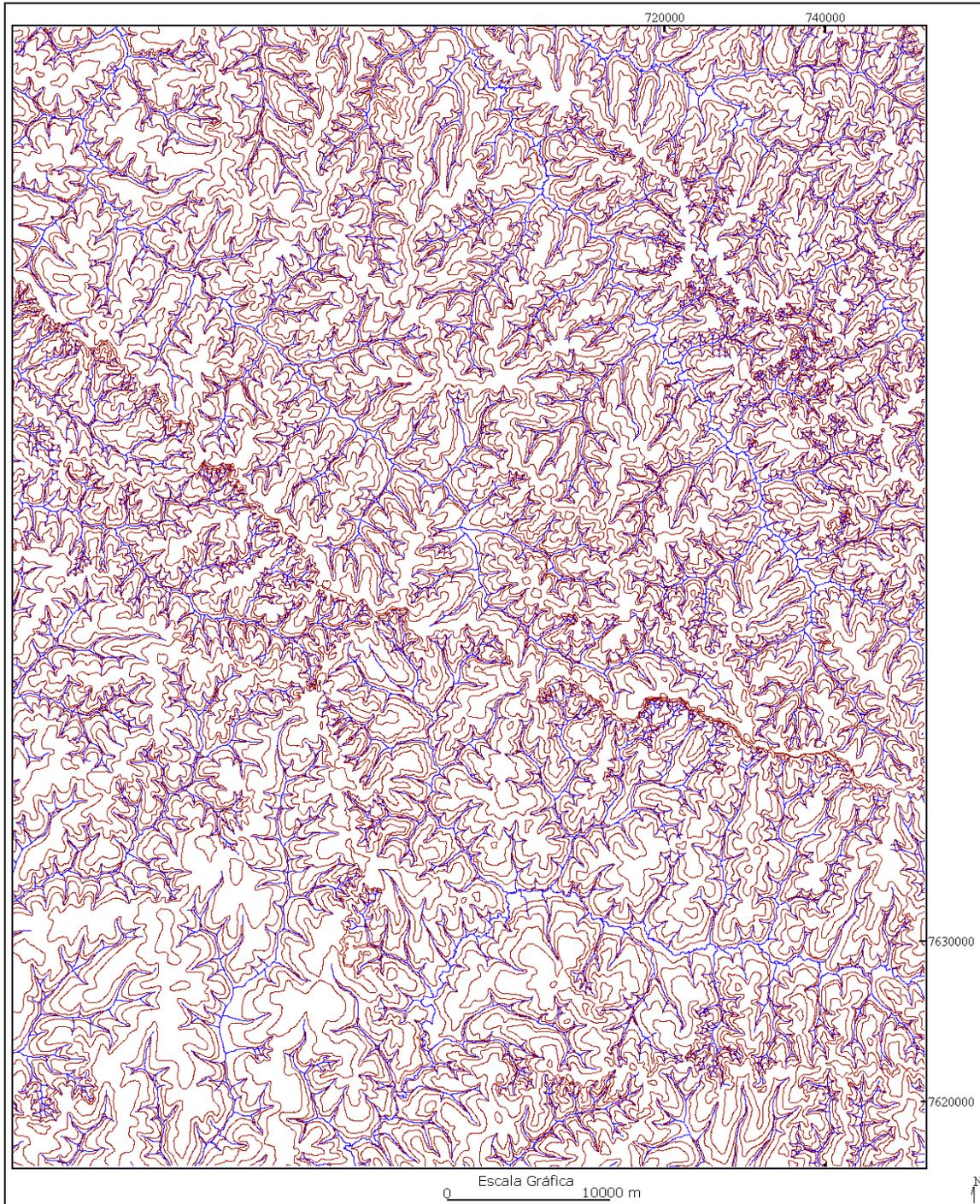


Fig. 4.2 - Rede de drenagem e curvas de nível digitalizadas no SGI/INPE em projeção UTM.

Com o objetivo de se visualizar os dados em três dimensões utilizaram-se duas imagens, a altimetria do relevo (isolinhas digitalizadas) e a imagem textura, uma imagem em nível de cinza, onde os valores mínimos e máximos das cotas obtidos a partir de uma grade retangular são apresentados em um intervalo de 0 a 256 (Figura 4.3).

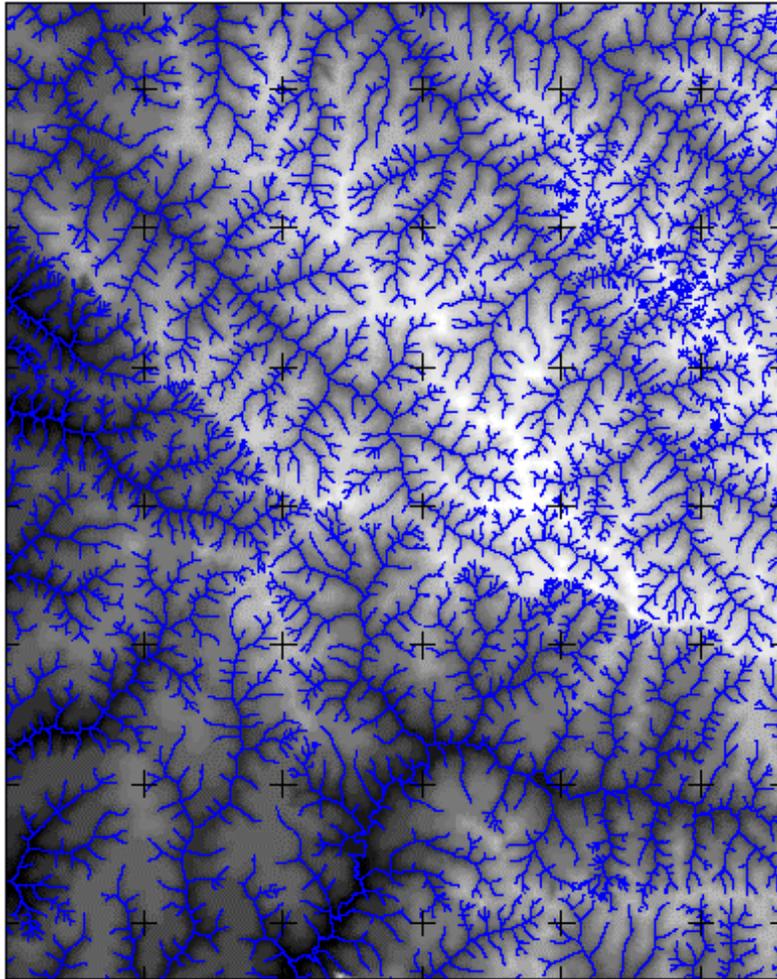


Fig. 4.3 – Rede de Drenagem sobreposta à imagem em tons de cinza obtida a partir das isolinhas (IBGE – 1:50.000).

A Figura 4.4 apresenta o Modelo Numérico do Terreno (visualização 3D) da área em estudo, com exagero vertical de 0,1, podendo-se observar a disposição do terreno e o fluxo de drenagem existente na área.

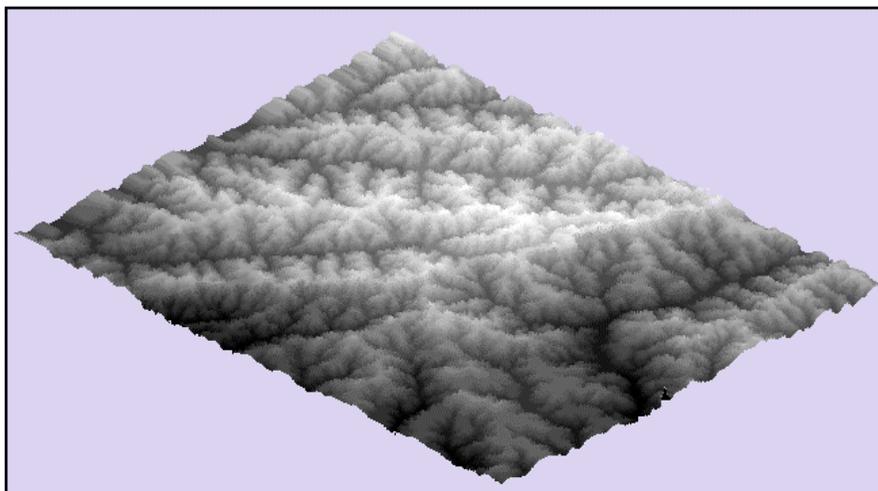


Fig. 4.4 - Modelo Numérico do Terreno, área de estudo visualizada em três dimensões.

A Constituição Federal de 1988 em seu artigo 225, reconhece Áreas de Preservação Permanente, desde 1965. O Código Florestal assinala que áreas como margens de rios, lagos, barragens, entornos de nascentes fluviais, áreas com declividades acentuadas e sujeitas à erosão etc., devem ser preservadas (Mauro et al., 1995).

O decreto do Governo do Estado de São Paulo de número 42.056 de 6 de agosto de 1997, permite as queimadas de cana-de-açúcar por 15 anos para áreas não mecanizáveis e oito para áreas mecanizáveis.

Assim, o conhecimento da declividade da área é relevante nas atividades agrícolas, tanto no que concerne o planejamento do cultivo quanto a atual necessidade de mecanização na colheita, além de facilitar a indicação de áreas a serem preservadas.

A Figura 4.5, ilustra a rede de drenagem em cor azul e as quatro classes de declividade, em porcentagem, geradas a partir do fatiamento de uma grade retangular de 30 x 30m.

A partir deste mapa observa-se que o terreno praticamente não possui relevos acidentados. Assim a região é propícia para o cultivo mecanizado da cana-de-açúcar.

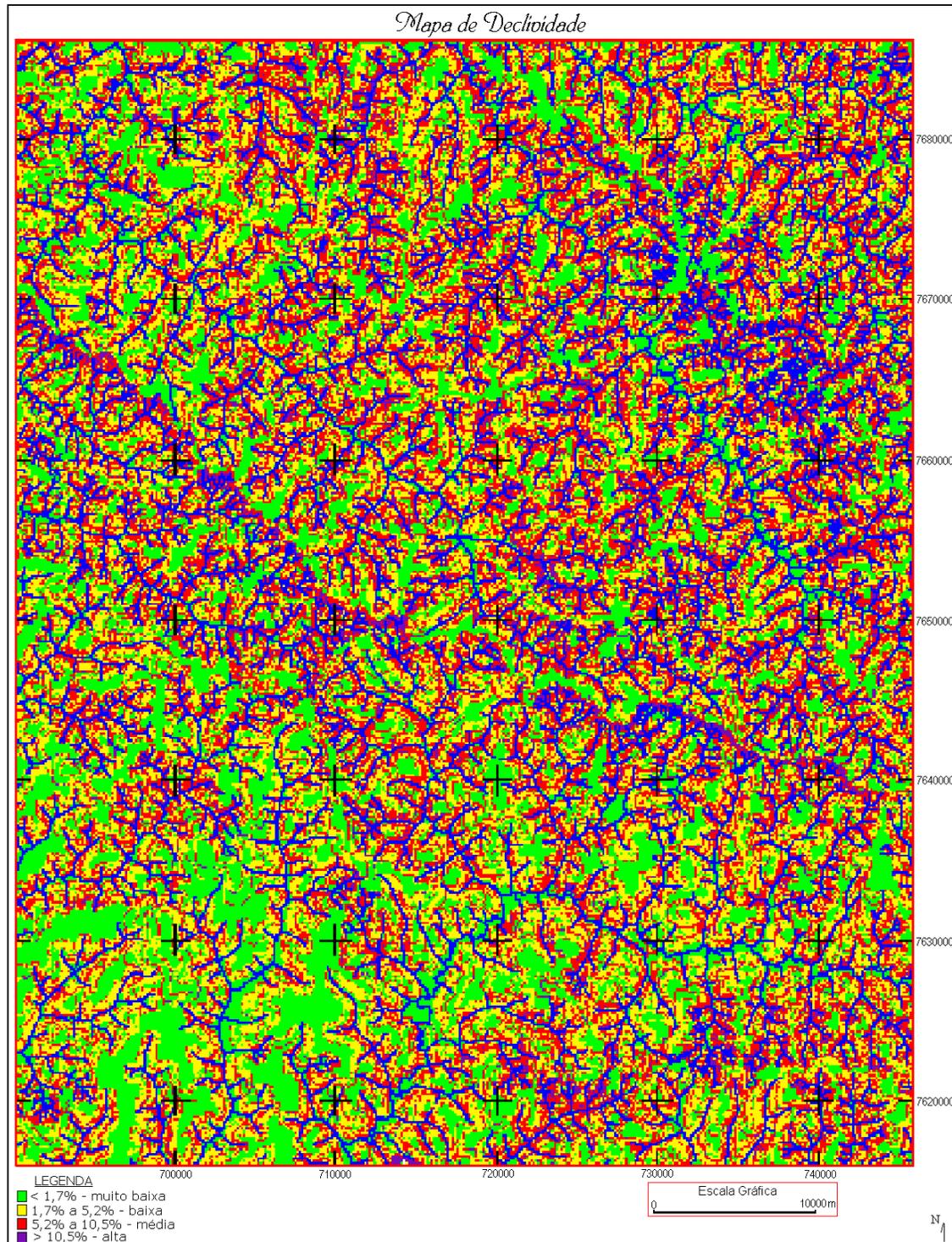


Fig. 4.5 - Mapa Temático de declividade gerado através do software SPRING

A Figura 4.6 ilustra o mapa planimétrico dos 1717 talhões da safra 96/97 sobrepostos à imagem Landsat-TM, banda 3, adquirida em 21 fevereiro de 1996.

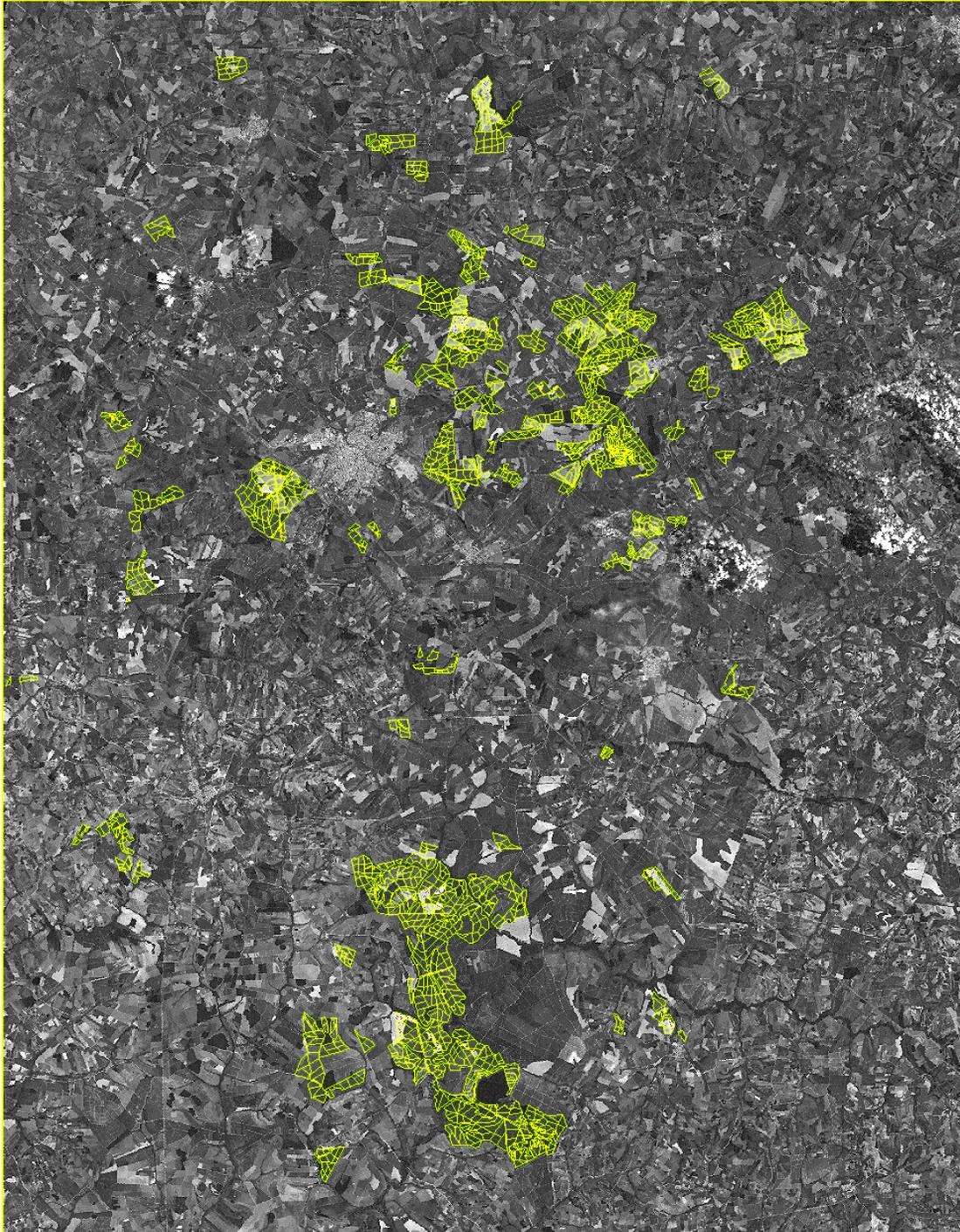


Fig. 4.6 – Sobreposição do mapa planimétrico dos 1717 talhões de cana da safra 96/97 à imagem Landsat-TM de 21/02/96 na banda 3.

A banda 3 do sensor TM corresponde a faixa vermelha do espectro eletromagnético onde a vegetação verde, sadia e com boa cobertura do solo reflete pouca energia devido a alta absorção da energia solar pela vegetação.

Portanto as áreas com tonalidade cinza médio a cinza escuro dentro dos limites dos talhões são áreas de cana bem desenvolvidas. Já as áreas com tonalidade cinza claro são predominantemente áreas de cana nova ou solo exposto, pois dada as características dos solos nesta região eles refletem boa parte da energia solar na faixa do vermelho do espectro eletromagnético.

A Figura 4.7 ilustra um trecho da área de estudo ampliado, facilitando assim a visualização, contendo os planos de informação digitalizados sobrepostos à imagem Landsat-TM de 21 fevereiro de 96, banda 3.

Pode-se observar o crescimento urbano ocorrido desde 1971, época da primeira edição das cartas topográficas do IBGE; a localização das principais rodovias, importantes no planejamento do escoamento da produção e a rede hidrográfica, muitas vezes destituídas de mata ciliar.

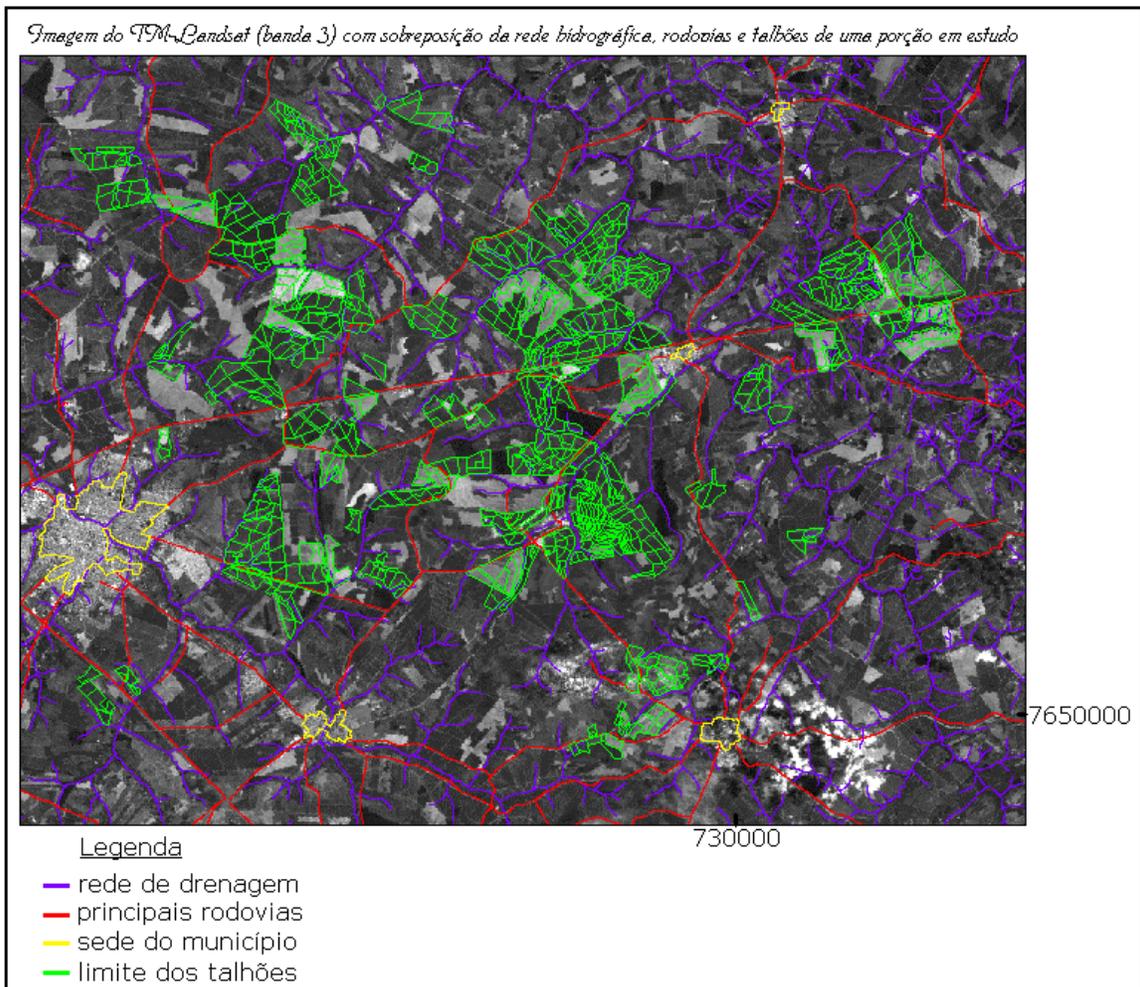


Fig. 4.7 - Sobreposição do mapa planimétrico de cana da safra 96/97 e dos PIs digitalizados à imagem Landsat-TM de 21/02/96 na banda 3 em uma porção da área de estudo.

De posse dos dados cadastrais nos dois anos safra em estudo, diferentes consultas são passíveis de serem realizadas através do Banco de Dados Relacional do *software* SPRING. Diferentes questionamentos, a título de exemplo, foram feitos com o objetivo de visualizar os atributos geográficos de forma espacial segundo determinado interesse.

## 4.2 Exemplos de Consultas

Obtidos os planos de informação de modelo cadastral, "safra95" e "safra96" e de posse da tabela de atributos que contém informações como área total (ha), variedade, estágio de corte (Anexo A3), foram realizadas consultas de modo a exemplificar o potencial de um sistema de informação geográfica para auxiliar no gerenciamento da produção agrícola da cana-de-açúcar, em nível de usina, de forma eficiente.

A seguir são apresentados alguns exemplos de consultas que podem ser realizadas com o SPRING.

### 4.2.1 Consulta de Variedade, Área Plantada e Produtividade

O declínio de produtividade de variedades da cana-de-açúcar, faz com que sua substituição após certo tempo de cultivo seja feita por cultivares com melhor produtividade e adaptação (Boletim Técnico Copersucar, 1993). As variedades de cana-de-açúcar com as porcentagens de área plantada existentes na usina Catanduva são mostradas na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 - PORCENTAGEM DE ÁREA PLANTADA COM CADA  
VARIEDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR NA USINA CATANDUVA

Variedade	% de área plantada (safra 95)	% de área plantada (safra 96)
CB49-260	0,092	0,090
NA56-79	0,342	-----
RB72-454	18,889	24,816
RB72-454E	0,834	-----
RB72-454R	3,948	-----
RB76-5418	2,154	3,196
RB765418R	1,129	-----
RB78-5148	0,211	0,206
RB80-6043	0,681	2,282
RB806043E	0,474	-----
SP70-1143	6,258	15,936
SP70-1143E	4,341	-----

SP70-1143F	2,480	-----
SP70-1143R	10,177	-----
SP71-1406	4,625	2,507
SP71-3501	0,085	-----
SP71-6163	22,246	15,861
SP71-6163R	0,380	-----
SP72-4928	0,812	0,579
SP79-1011	13,042	14,536
SP79-2233	3,458	6,927
SP79-2313	1,801	4,207
SP79-2313E	0,324	-----
SP80-1520	0,137	0,314
SP80-1842	1,068	7,560
SP81-1763	-----	0,477
SP81-3250	0,012	0,506

A Figura 4.8 mostra a espacialização das variedades mais significativas em área plantada, para o ano-safra 95/96.

A análise da capacidade de produção das variedades foi possível através do cálculo da produtividade média de cada variedade, não considerando aquelas cuja área plantada é inferior a 2%, tendo como resultado a Tabela 4.2.

TABELA 4.2 - VARIEDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR E SUA RESPECTIVA  
PRODUTIVIDADE MÉDIA (TON/HA)

Variedade	Produtividade média – ton/ha (ano safra 95/96)	Produtividade média - ton/ha (ano safra 96/97)
RB72-454	69,42	86,57
RB72-454R	105,97	-----
RB76-5418	92,08	95,78
RB80-6043	-----	43,99
SP70-1143	45,71	75,28
SP70-1143E	83,07	-----
SP70-1143F	74,44	-----
SP70-1143R	75,28	-----
SP71-1406	61,69	50,52
SP71-6163	72,71	64,55
SP79-1011	77,08	86,09
SP79-2233	4,63	46,07
SP79-2313	-----	38,03
SP80-1842	-----	7,67

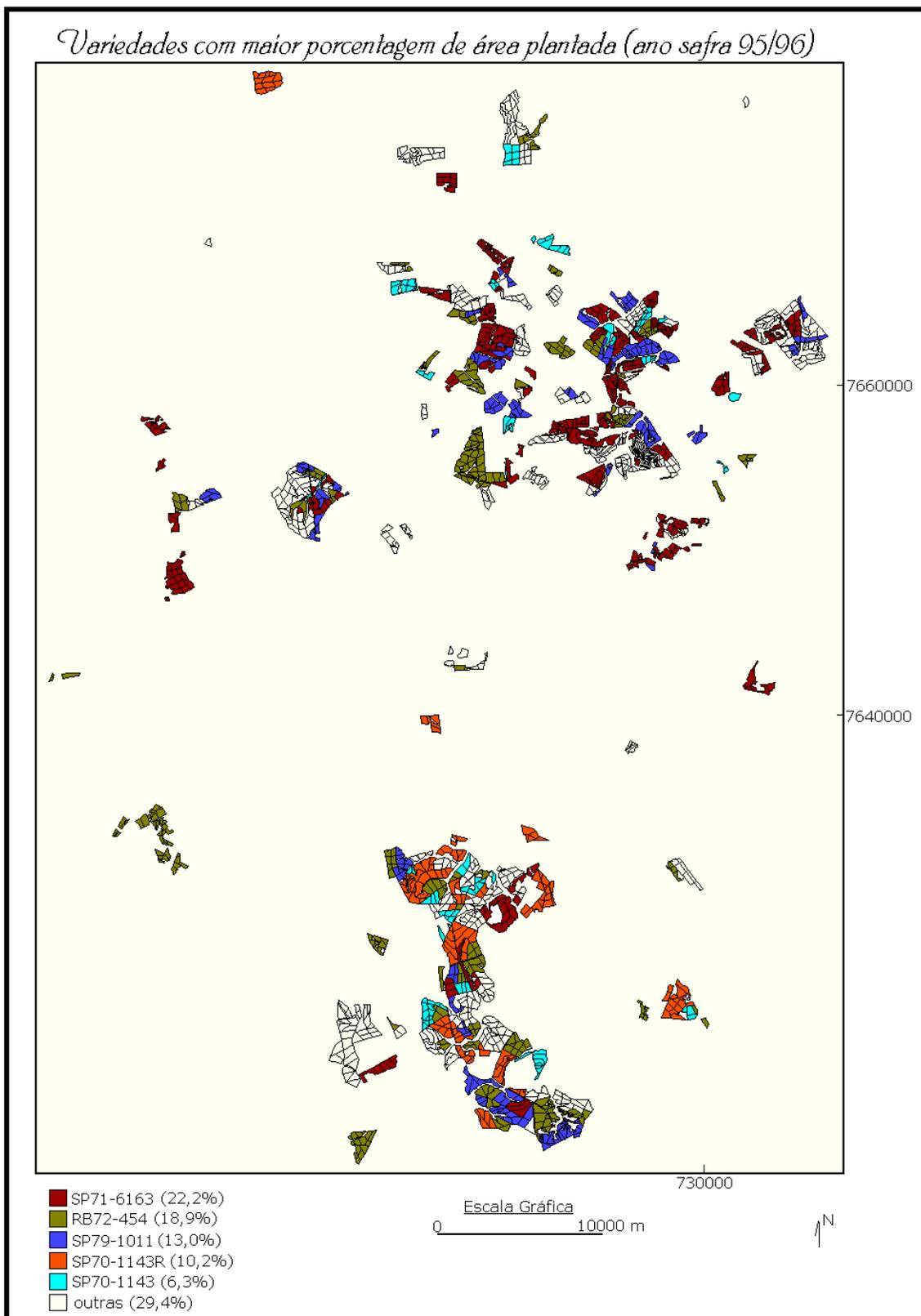


Fig. 4.8 - Consulta - variedades de cana-de-açúcar com as maiores porcentagens de área plantada.

Desta forma pode-se verificar a importância de gerenciar a atividade agrícola utilizando-se a tecnologia de SIG, que possibilita a constatação da área ocupada por cada variedade e as que apresentaram declínio (SP71-1406 e SP71-6163) ou aumento na média de produtividade (RB72-454, SP70-1143, SP79-1011 e SP79-2233) entre os anos safras. Tomadas de decisões das variedades que deverão ter sua área alterada, ou mesmo das variedades a serem substituídas é fundamental no planejamento de uma usina canavieira uma vez que objetiva-se constantemente um aumento de produção.

#### 4.2.2 Consulta de Estágio de Corte e Produtividade

Quanto ao estágio de corte da cana-de-açúcar a Figura 4.9 elucida a situação apresentada no ano safra 95/96 e a Tabela 4.3 apresenta os estágios de corte com a área ocupada (ha), sua porcentagem e a produtividade média (ton/ha).

TABELA 4.3 - ÁREA (HA E %) E PRODUTIVIDADE (TON/HA) POR ESTÁGIO DE CORTE

Temas	Área (ha)	Área (%)	Produtividade média ton/ha	Área (há)	Área (%)	Produtividade média (ton/ha)
	95/96			96/97		
Cana de ano	4178,50	21,42	100,96	3506,81	17,53	97,77
Segundo corte	3409,98	17,48	95,12	4164,45	20,82	90,18
Terceiro corte	1921,44	9,86	73,55	3375,60	16,87	77,85
Quarto corte	3023,21	15,50	71,01	1762,60	8,81	67,57
Quinto corte	1963,91	10,07	60,24	2371,16	11,85	62,80
Sexto corte	1064,99	5,46	72,84	431,54	2,15	61,76
Sétimo corte	242,48	1,24	61,42	432,27	2,16	72,34
Áreas em formação	3507,32	17,98	-----	3962,32	19,81	-----
Áreas em pousio	193,60	0,99	-----	0,00	0,00	-----

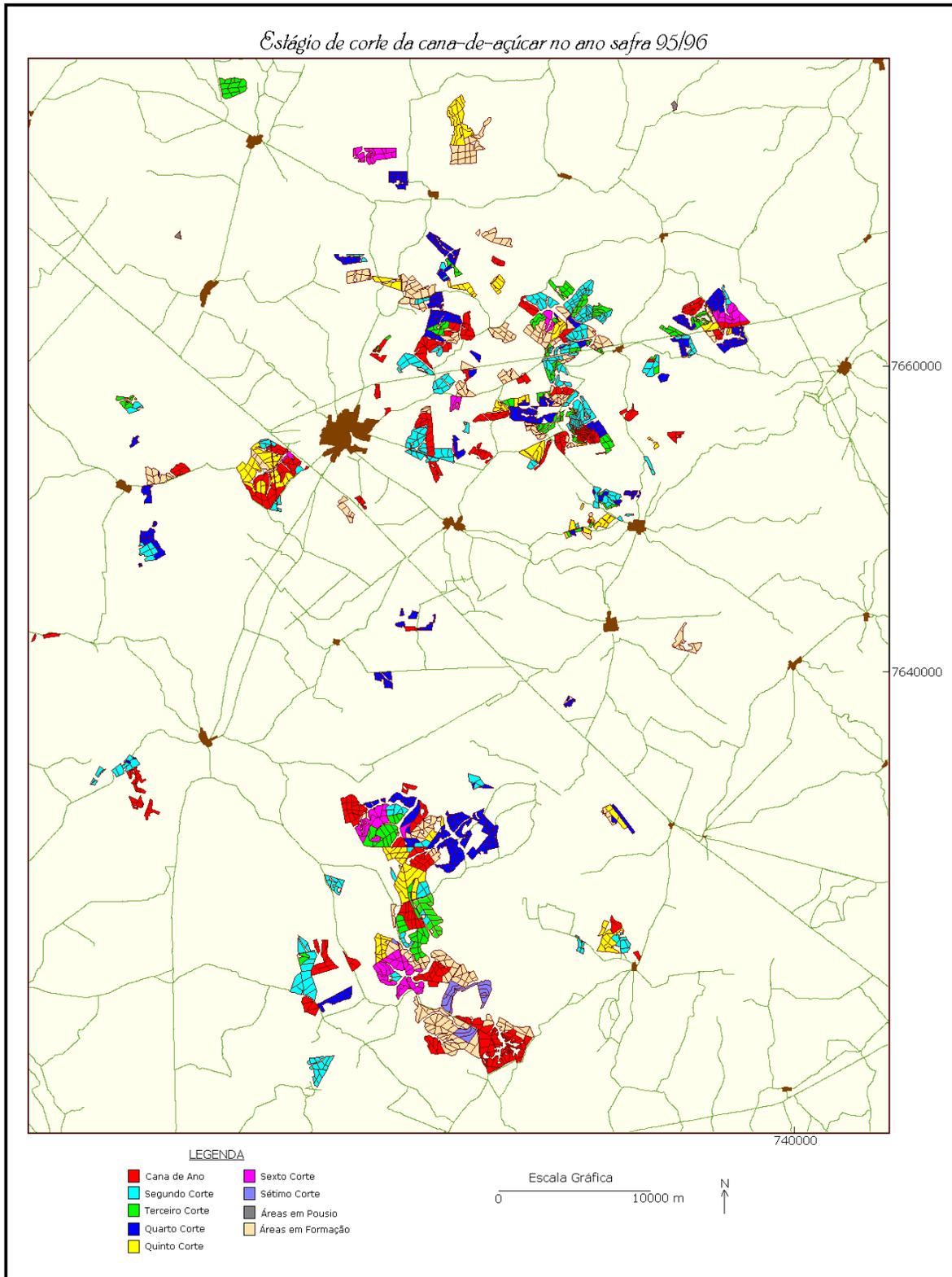


Fig. 4.9 - Resultado da consulta sobre o estágio de corte da cultura na safra 95/96.

Analisando os dados da Tabela 4.3, verifica-se a clara relação entre o estágio de corte e a produtividade. As áreas em formação na safra 95/96 que constituem talhões que não sofreram o primeiro corte, passam a representar a cana de ano na safra seguinte, com os maiores índices de produtividade. A tendência observada mostra que com o aumento do número de cortes na cana-de-açúcar, ocorre uma queda na produtividade.

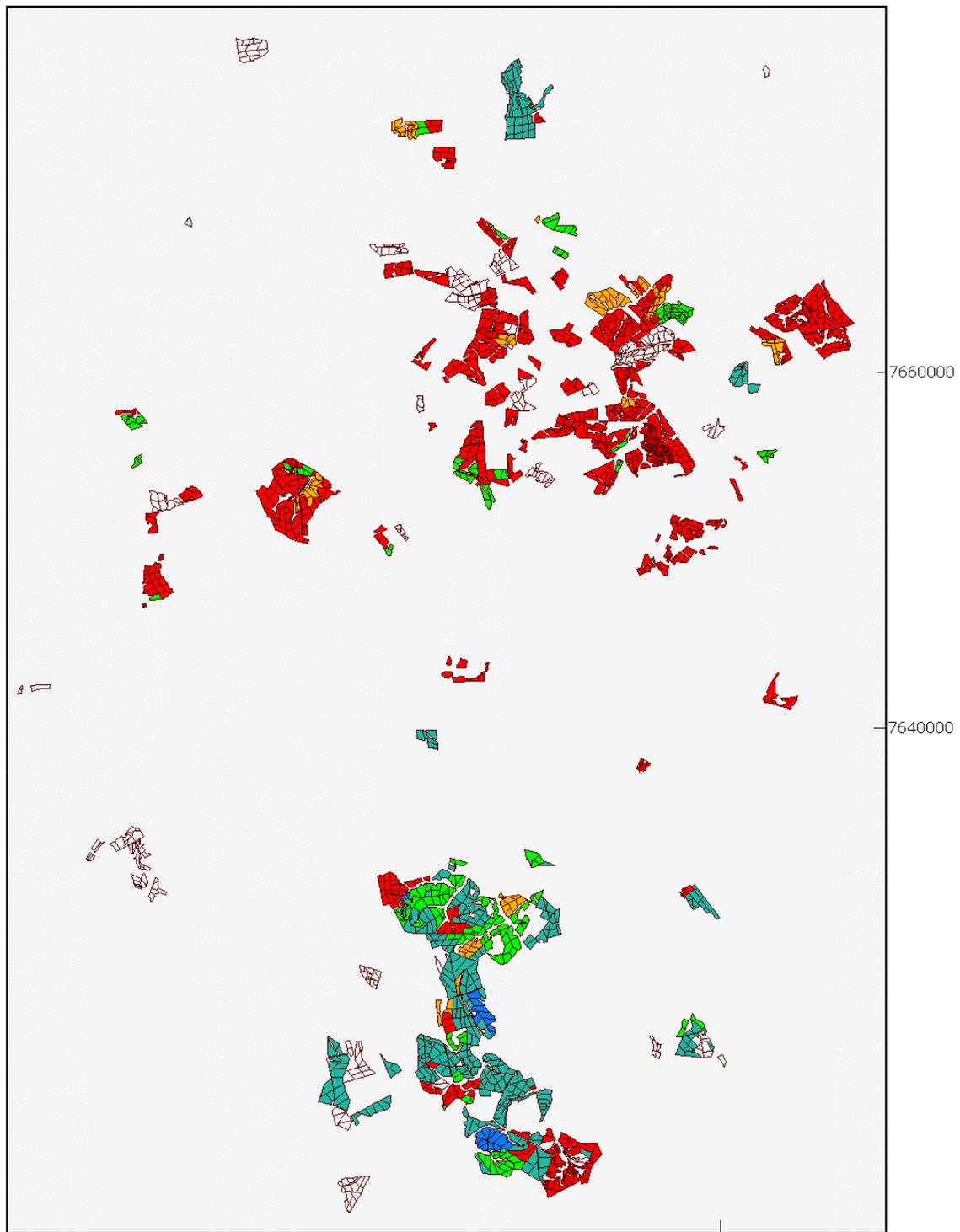
A verificação do estágio de corte em que a cultura se apresenta e sua respectiva produtividade oferecem um apoio efetivo para a reestruturação de talhões.

#### **4.2.3 Consulta do Potencial Produtivo dos Solos.**

O solo, como um recurso natural básico à produção de alimentos e de produtos agrícolas imprescindíveis às necessidades básicas da sociedade, não é uma fonte ilimitada e inesgotável de recursos, uma vez que é passível de processos de degradação acelerada provocados pela ação humana. O uso e manejo agrícola inadequados comprometem as propriedades e características dos solos favoráveis ao desenvolvimento das culturas (Carvalho et al., 1995).

Um bom preparo do solo antes de iniciar o plantio da cana-de-açúcar é condição básica para a obtenção de altos rendimentos. O conhecimento do tipo de solo, a disponibilidade de nutrientes e o potencial de produtividade do solo, permitem o uso racional do mesmo e um planejamento adequado no emprego de fertilizantes e prática de manejo.

A Figura 4.10 mostra a distribuição dos solos de acordo com seu potencial de produtividade.



**LEGENDA**

Grupo	Potencial de Produtividade	Tipos de Solo
■ I	alto	PVA-13, PVA-16, PVA-22, PVA-25, PVA-28 e PVA-81
■ II	médio/alto	PVA-14, PVA-17, PVA-23 e PVA-26
■ III	médio	PVA-15, PVA-24 e PVA-27
■ IV	médio/baixo	LVA-8, LVA-9, PVA-76 e PVA-77
■ V	baixo	LVA-12 e LI-7

□ Não existe levantamento semi detalhado do tipo de solo

Fig. 4. 10. – Agrupamento dos solos de acordo com o potencial de produtividade.

#### 4.2.4 Consulta da Aplicação de Vinhaça e Defensivos

Com um relevo de baixa declividade pode-se constatar que a região é propícia à produção mecanizada da cana-de-açúcar. As Tabelas 4.4 e 4.5 (anos safra 95/96 e 96/97, respectivamente) mostram a aplicação de insumos e defensivos agrícolas para alguns talhões, a título de exemplo.

A correta aplicação de insumos e defensivos agrícolas é fundamental tanto para uma boa produção visando fornecer os insumos em quantidades adequadas quanto para a aplicação de defensivos agrícolas no combate de pragas e doenças. Além disto, os insumos e defensivos devem ser aplicados de forma correta para minimizar o impacto ambiental negativo que pode ocorrer através do escoamento de águas pluviais, contaminando os rios.

TABELA 4.4 - APLICAÇÃO DE INSUMOS E DEFENSIVOS AGRÍCOLAS NO ANO SAFRA 95/96, USINA CATANDUVA

Sector	Fazenda	Bloco	Talhão	Mês	Insumo	Área aplicada (ha)	Quantidade aplicada (litros, ton ou m <sup>3</sup> )	Dose recomendada (litros, ton ou m <sup>3</sup> por ha)	Unidade
0001	0002	0006	0014	11	AGRAL	11.620	2.300	0.200	litros
0001	0001	0005	0012	6	AGREX	5.328	0.500	0.100	litros
0001	0485	0001	0001	5	AGRITRYN	11.040	16.000	1.500	litros
0001	0509	0018	0006	12	AMINAMAR	16.080	15.738	1.000	litros
0002	0007	0021	0047	12	AMINOL	22.400	16.174	0.120	litros
0002	0404	0007	0014	7	ATHERBANE	22.260	2.370	0.010	litros
0002	0017	0006	0008	7	CULTIVO	6.290	1.000	1.000	horas
0004	0479	0001	0001	8	DESSECAN	11.898	10.708	0.900	litros
0001	0418	0001	0003	7	DIURON	18.240	35.732	2.000	litros
0005	0323	0002	0035	3	ETHREL	15.880	31.815	2.000	litros
0005	0323	0017	0079	12	EXTRAVON	12.730	5.000	0.400	litros
0005	0326	0001	0001	5	GAMIT	2.120	4.584	2.200	litros
0005	0323	0040	0049	11	GESAPAX	7.000	12.088	1.500	litros
0001	0002	0012	0027	11	HERBIFLAN	36.580	70.000	1.800	litros
0001	0002	0012	0027	11	HERBIPAX	21.090	4.005	0.190	litros
0004	0478	0001	0001	7	HERBURON	7.364	14.956	2.000	litros
0005	0323	0017	0079	12	KARMEX	12.730	57.000	4.500	litros
0001	0488	0001	0001	12	BOXER	1.822	10.120	4.000	litros
0001	0488	0001	0001	11	COMBINI	38.520	46.000	1.200	litros

0001	0001	0001	0063	2	RB72454	12.980	65.732	12.000	ton.
0001	0002	0019	0038	10	SUP.FO.TRI	12.440	2.534	0.200	ton.
0001	0002	0018	0036	3	ROUND UP	10.210	47.000	4.600	Litros
0002	0017	0009	0037	4	TROP	8.590	2.370	0.350	Litros
0004	0022	0001	0001	5	U46D-FLUID	19.060	0.458	0.020	Litros
0005	0018	0014	0032	12	UREIA	5.036	1.008	0.200	ton.
0005	0018	0022	0044	11	VELPAR K	7.834	14.290	2.000	quilos
0001	0001	0011	0040	5	VINHACA	3.002	307.996	105.000	m <sup>3</sup>

TABELA 4.5 - APLICAÇÃO DE INSUMOS E DEFENSIVOS AGRÍCOLAS NO ANO SAFRA 96/97, USINA CATANDUVA

Setor	Fazenda	Bloco	Talhão	Mês	Insumo	Área aplicada (ha)	Quantidade aplicada	Dose recomendada	Unidade
0004	0559	0037	0071	11	AGRAL	11.980	2.400	0,200	litros
0004	0559	0037	0071	11	AGRITRYN	11.980	30.000	2.500	litros
0005	0018	0002	0117	10	AMINAMAR	27.520	14.000	0.500	litros
0005	0323	0016	0076	11	AMINOL	17.910	27.000	1.500	litros
0005	0411	0001	0002	5	ATHERBANE	16.160	0.226	0.010	litros
0006	0587	0002	0006	6	COMBINI	11.230	20.000	1.800	litros
0001	0509	0016	0003	10	CULTIVO	13.960	1.000	1.000	horas
0001	0546	0001	0001	12	DESSECAN	26.020	49.950	2.000	litros
0002	0404	0001	0001	3	ETHREL	11.950	23.923	2.000	litros
0002	0402	0004	0005	7	EXTRAVON	9.440	1.500	0.160	litros
0002	0404	0003	0007	3	GAMIT	19.940	22.140	1.300	litros
0002	0459	0001	0001	12	GESAPAX	22.920	35.700	1.500	litros
0002	0561	0004	0025	5	HERBIPAX	5.280	8.100	1.500	litros
0005	0411	0001	0001	7	HERBURON	22.340	45.000	2.000	litros
0006	0588	0001	0001	3	KARMEX	27.510	27.500	1.000	litros
0006	0588	0001	0001	1	ROUND UP	2.500	15.000	6.000	litros
0001	0001	0109	0069	5	SUP.FO.TRI	5.370	1.310	0.260	ton.
0006	0588	0001	0001	2	SUP.FOS.SI	27.510	15.720	0.550	ton.
0001	0004	0001	0008	3	TROP	15.900	3.842	0.300	litros
0001	0002	0022	0045	5	VELPAR K	2.350	3.500	1.200	quilos
0001	0334	0001	0021	6	VINHACA	12.140	5647.158	465.000	m <sup>3</sup>

Segundo Bray (1980) a vinhaça ou restilo é um resíduo da fabricação do álcool, trata-se de um resíduo altamente corrosivo e poluente, que despejado diretamente nos rios, produz efeitos catastróficos na fauna e flora. Por outro lado a vinhaça pode ser aproveitada na adubação de áreas canavieiras próximas à unidade industrial.

A vinhaça contém alto teor de matéria orgânica e potássio, sendo relativamente pobre em nitrogênio e cálcio, com baixos teores de fósforo e magnésio (Penatti e Forti,

1997). Quando aplicada na dose adequada e com a devida complementação mineral, esta fertirrigação, é uma prática que produz resultados positivos sobre a produtividade agrícola (Figura 4.11). Além disto acarreta economia na aquisição dos adubos minerais e principalmente, evita a poluição dos rios através da adequada aplicação deste resíduo industrial no solo, beneficiando a cultura da cana, sem todavia prejudicar o solo.



Fig. 4.11 – Porção da usina Catanduva onde aplica-se vinhaça (rosa), exemplo para a safra 95/96.

#### 4.2.5 Consulta de Áreas com Besouro *Migdolus fryanus*

Segundo o Boletim Técnico Copersucar (1989) a cana-de-açúcar é vitimada, periodicamente, por severas epidemias causadas por diversos organismos, assim a busca de variedades resistentes tem sido o principal estímulo para a criação e o desenvolvimento de programas de melhoramento em todo o mundo.

As áreas canavieiras pertencentes à usina Catanduva durante os anos safra 95/96 e 96/97 apresentaram uma praga de solo causada pelo besouro *Migdolus fryanus*, bastante danosa à lavoura canavieira podendo reduzir a produção em mais de 50% em áreas afetadas. Todavia, sua ocorrência tem distribuição geográfica relativamente restrita (Precetti et al., 1997)

A Figura 4.12 apresenta as áreas afetadas pelo besouro *Migdolus* na safra 95/96, representando 4,36% do total de talhões, 330,77 ha, ou seja, 1,69% da área total dos canaviais da usina Catanduva.

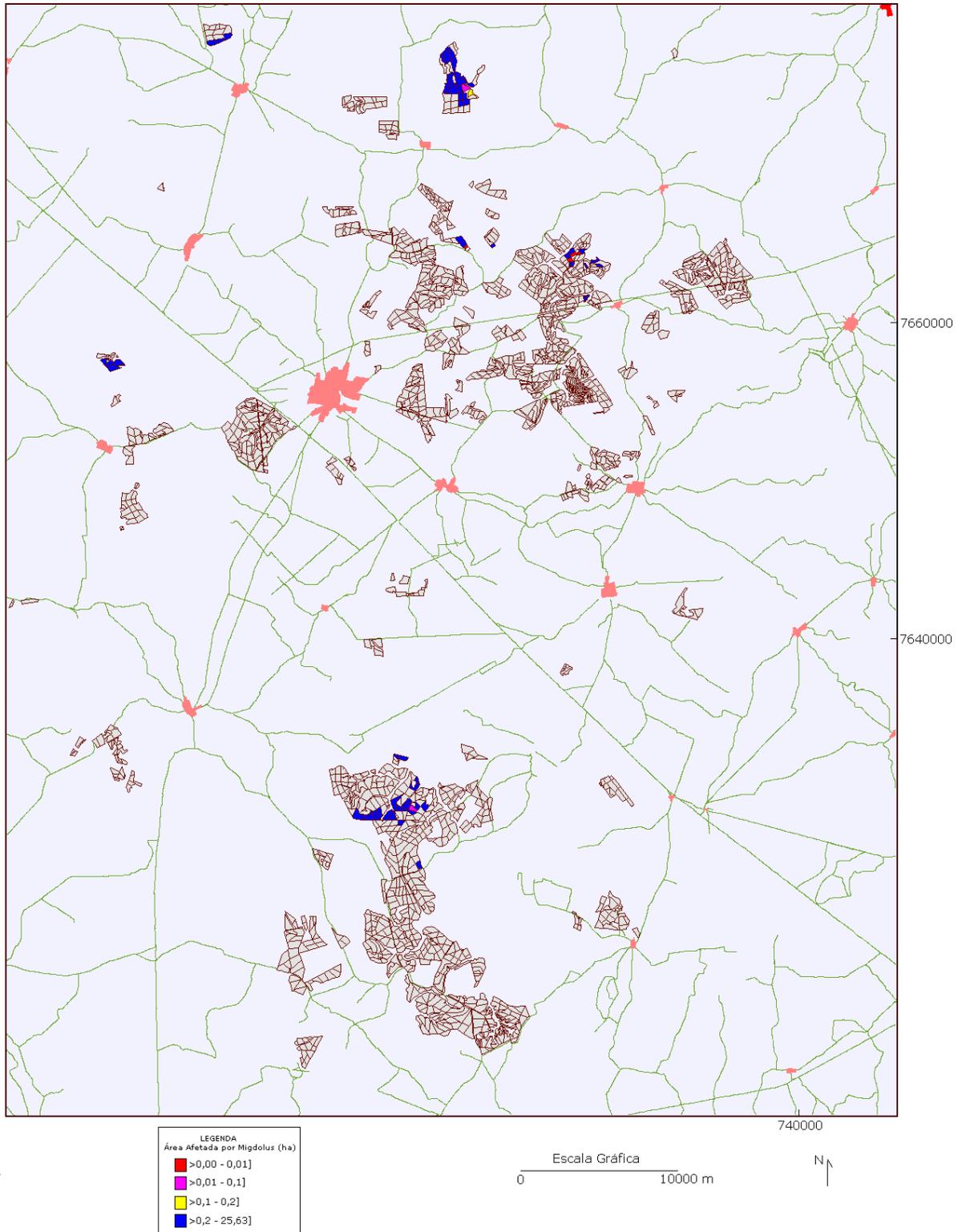


Fig. 4.12 – Exemplo de consulta apresentando as áreas canavieiras da usina Catanduva afetadas pelo Migdolus, na safra 95/96.

#### **4.2.6 Queima da Cana-de-Açúcar e Relevo.**

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar na usina Catanduva representou 23,65% do total da área de cana colhida na safra de 96/97, conforme é apresentado na Figura 4.13 (vermelho - colheita manual; amarelo - colheita mecanizada).

De acordo com o decreto emitido pelo Governo do Estado de São Paulo, a que se refere ao fim do processo de queima da cana-de-açúcar, constata-se que 76,35% da área pertencente à usina Catanduva deverá mecanizar o processo de corte nos próximos 5 anos pelo fato de que sua declividade raramente ultrapassa 10,5%.

A queima da cana-de-açúcar para permitir o corte manual acarreta prejuízos ao meio ambiente através da emissão de gases poluentes e fuligem para a atmosfera. A correção destes efeitos prejudiciais ao meio ambiente através de um decreto, deve ser acompanhada de medidas que beneficiam o reaproveitamento da mão-de-obra da colheita manual em outras atividades do setor agro-industrial da cana-de-açúcar.

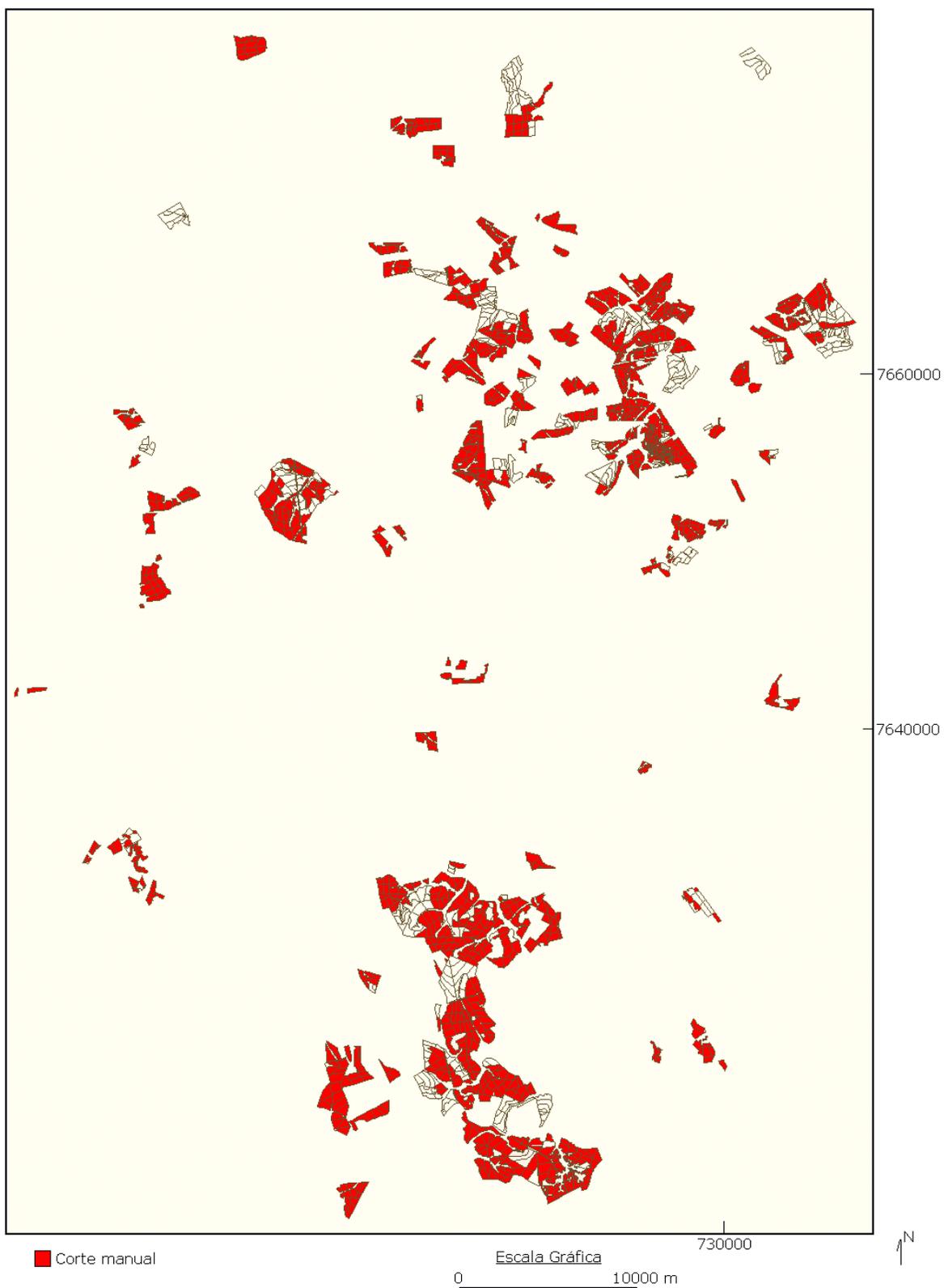


Fig. 4.13 - Consulta ao SGBD do SPRING - disposição espacial das áreas com corte manual (vermelho) e mecanizado (amarelo).

### 4.3 Estimativa de Produtividade

Através das operações zonais implementadas no SPRING pelo engenheiro Cláudio Clemente Faria Barbosa, foi possível a integração entre dados provenientes de sensoriamento remoto e dados cadastrais.

A média do valor do NDVI para cada talhão passou a representar um atributo no banco de dados. Os valores de nível de cinza da tabela de atributos (correspondente ao NDVI) foram normalizados, variando de 0 a 1.

Durante a fase de registro, foi verificado que as imagens de satélite correspondentes ao ano de 1995 apresentaram problemas de adjacência entre os quadrante A e B. Desta forma 11,3% dos talhões da imagem de junho e cerca de 2,54% do número de talhões de janeiro não foram considerados na obtenção do coeficiente de determinação.

A seguir são apresentados os gráficos da relação entre produtividade observada e os valores do NDVI além dos valores do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) para as duas imagens de cada ano safra analisadas. As Figuras 4.14 (17 de janeiro de 1995) e Figura 4.15 (10 de junho de 1995) se referem a safra 95/96 e as Figuras 4.16 (21 de fevereiro de 1996) e Figura 4.17 (25 de abril de 1996) se referem a safra 96/97.

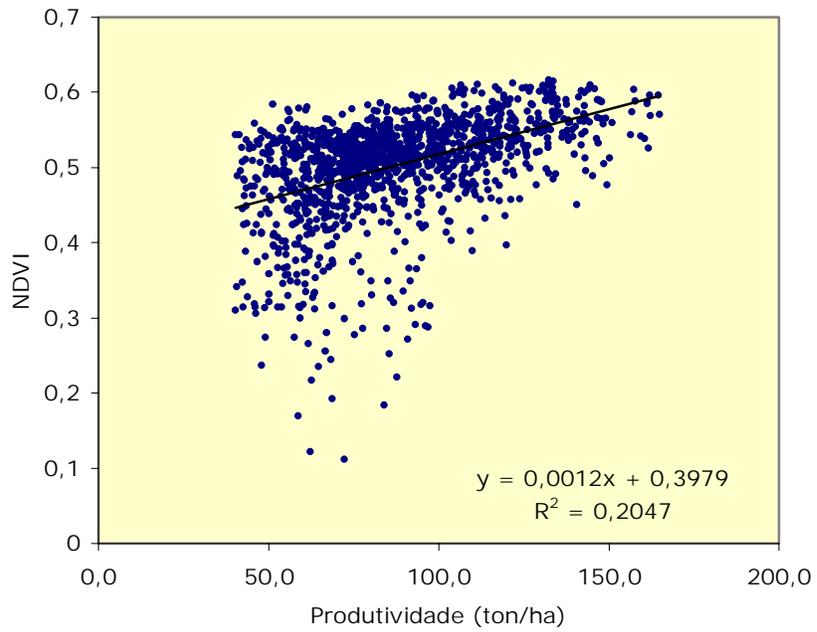


Fig. 4.14 - Relação entre produtividade observada (ton/ha) e valores do NDVI da imagem de 17 de janeiro de 1995.

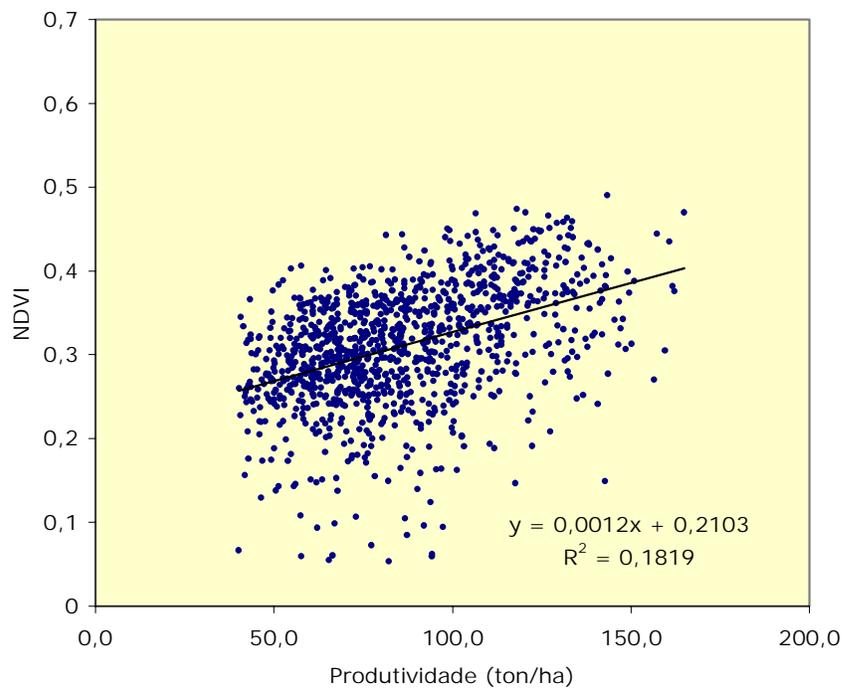


Fig. 4.15 - Relação entre produtividade observada (ton/ha) e valores do NDVI da imagem de 10 de junho de 1995.

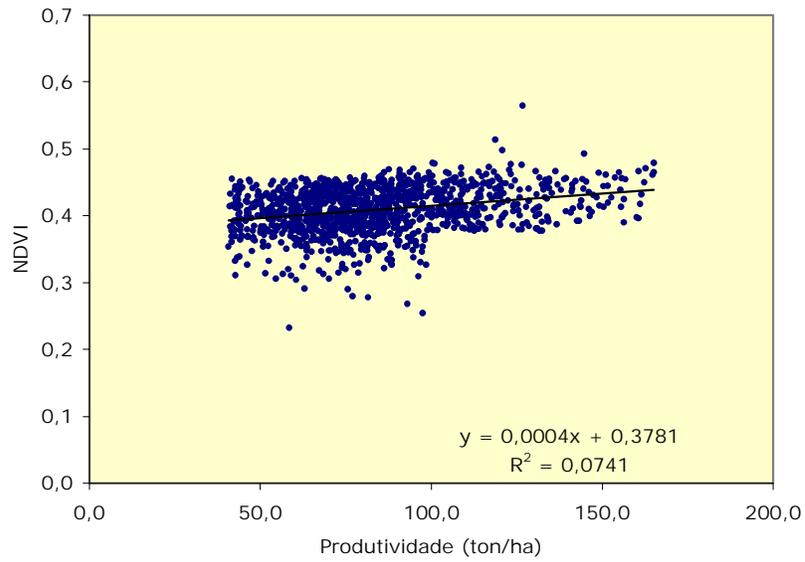


Fig. 4.16 - Relação entre produtividade observada (ton/ha) e valores do NDVI da imagem de 21 de fevereiro de 1996.

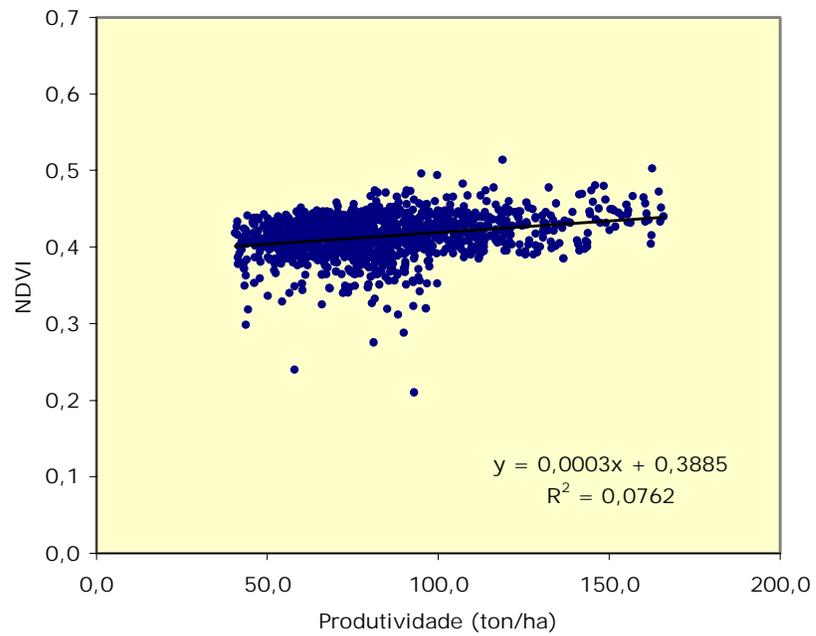


Fig. 4.17 - Relação entre produtividade observada (ton/ha) e valores do NDVI da imagem de 25 de abril de 1996.

Em comparação aos resultados encontrados por Rudorff e Batista (1990), os dados apresentados no ano safra 95/96 estão compatíveis com o coeficiente de determinação obtido para a safra de 86/87 que foi de 0,14. Já na safra 96/97, a regressão do NDVI com a produtividade observada não apresentou significância, ou seja, os valores de NDVI não explicaram qualquer variação na produtividade.

Estes resultados deixaram muito a desejar se comparados com aqueles obtidos através do modelo agrometereológico-espectral onde os valores de  $r^2$  passaram por exemplo, de 0,14 para 0,50 no ano safra 86/87.

Todavia, uma análise mais detalhada sobre o método utilizado para a obtenção dos valores médios do NDVI por talhão deve ser feita. A transformação dos níveis de cinza em reflectância para uma melhor homogeneização dos dados espectrais das diferentes imagens é recomendável.

É possível que os dados de produtividade por talhão não sejam muito confiáveis, merecendo análise cuidadosa.

Refinamentos no modelo de regressão podem melhorar a relação entre NDVI e produtividade observada. Por exemplo, fazer regressão de forma separada para cana planta e cana soca. Neste caso poderia se incluir no modelo de regressão para cana soca a produtividade do ano safra anterior. Enfim existem diversas alternativas para melhorar o modelo de regressão, inclusive a incorporação de variáveis qualitativas (variedade, estágio de corte), responsáveis pela variação na produtividade da cana-de-açúcar.

## CAPÍTULO 5

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do SPRING como ferramenta de auxílio no planejamento e gerenciamento da produção agrícola da cana-de-açúcar para abastecimento de uma usina canavieira, possibilitando a entrada, manipulação, armazenagem, integração e saída de dados geográficos apresentou-se viável.

Os dados cadastrais forneceram a possibilidade de manipular diferentes atributos relacionando-os e estabelecendo comparações que podem ser visualizadas de forma rápida e eficiente.

A experiência de se trabalhar em uma área relativamente grande possibilitou testar de forma efetiva o *software* SPRING. Diversos problemas (p. ex. edição de linhas, sem a possibilidade de desfazer ou sem prévia confirmação de uma determinada ação) surgiram no decorrer do trabalho, que foram solucionados pela equipe técnica do INPE encarregada da implementação do SPRING.

Apesar dos resultados se mostrarem desfavoráveis em relação à tentativa de relacionar o NDVI com a produtividade, este trabalho contribuiu de forma a permitir a implementação no sistema de uma função que integrasse dados cadastrais com imagens de satélite.

Conclui-se que o sistema SPRING é uma poderosa ferramenta, que possibilita um conhecimento efetivo da área de interesse auxiliando no gerenciamento da produção agrícola através da integração de dados temáticos, numéricos, cadastrais e imagens de satélite.

## CAPÍTULO 6

### RECOMENDAÇÕES

No intuito de melhorar a relação entre a produtividade observada e o índice de vegetação obtido através de imagem de satélite, recomenda-se o emprego de variáveis qualitativas sobre o modelo de regressão tais como a variedade e o estágio de corte (Rudorff et al., 1995).

Outro aspecto que pode melhorar a estimativa da produtividade a partir do índice de vegetação é a utilização de parâmetros agro-meteorológicos (Rudorff e Batista, 1990).

Com relação à utilização do SPRING, recomenda-se que este permita a exclusão de um plano de informação do modelo cadastral, sem que se invalidem os demais planos de mesmo modelo.

## CAPÍTULO 7

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbosa, C.C.F. *Álgebra de mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento*. 1997. 152p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). INPE, São José dos Campos.
- Boletim Técnico Copersucar. Edição Especial. Segunda Geração de Variedades de Cana-de-açúcar Copersucar. Piracicaba, SP. 1989. 23 p.
- Boletim Técnico Copersucar. Edição Especial. Quarta Geração de Variedades de Cana-de-açúcar Copersucar. Piracicaba, SP. 1993. 16 p.
- Bray, S.C. *A cultura da cana-de-açúcar no vale do Paranapanema: um estudo de geografia agrária*. 1980. 304p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. 1980.
- Burrough, P. A. *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Oxford: Clarendon Press. 1986. 193 p.
- Câmara, G. Anatomia de sistemas de informação geográfica: visão atual e perspectivas de evolução. *Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento*. São Paulo, SP. 1993.
- Câmara, G.; Medeiros, J.S. *Geoprocessamento para Projetos Ambientais*. São José dos Campos: INPE, 1996.

- Carvalho, W.; Pereira, N.R.; Barros, R.C. Mapa de uso do solo de uma área no município de Paty do Alferes RJ. *Boletim de Geografia Teorética*. AGETEO. v.25, p.127-138. 1995.
- Comissão de Solos Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado de São Paulo. *Boletim do Serviço Nacional de Pesquisas Agrônomicas*, n. 12.p. 634, 1960.
- Contini, E.; Araújo, J.D.; Oliveira, A.J.; Garrido, W.E. *Planejamento da propriedade agrícola: modelos de decisão*. Brasília: EMPRAPA - DDT. 1984. 300 p.
- Doorenbos, J.; Kassam, A. H. *Yield response to water*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979. 193 p. (FAO-Irrigation and Drainage Paper n.33).
- Erthal, G.J.; Oliveira, M.O.B.; Dutra, L.V.; Câmara, G.; Souza, R.C.M. *Um sistema geográfico de informações para uso com imagens de satélite*. São José dos Campos: INPE. 1984.
- Gomes, J.M.; Velho, L. *Computação visual: imagens*. Rio de Janeiro: SBM. 1995.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) *Sistema de Informações Estatísticas e Geográficas*. CD-ROM. Rio de Janeiro. 1996.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). *SPRING, Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas. NETGIS - Geoprocessamento e Informática Ltda. V. 1-4. 1997.*

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). *Mapa geomorfológico do estado de São Paulo*. São Paulo. 1981. V. 1/2.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). *Mapa geológico do estado de São Paulo*. São Paulo. 1981. v. 1-2.

Jensen, J. R. *Introductory digital image processing*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 1986. p. 124-129.

Juppenlatz, M.; Tian, X. *Geographic information systems and remote sensing*. Sydney: McGraw-Hill, 1996. 145 p.

Katz, E. *Influência climática na produção de cana-de-açúcar no núcleo canavieiro de Jaú (SP)*. 1995 Dissertação (Mestrado) - IGCE - UNESP, Rio Claro.

Koffler, N.F. *Identificação da cultura da cana-de-açúcar (*Sccharum ssp*) através de fotografias aéreas infravermelhas coloridas e dados multiespectrais do satélite Landsat*. 1982. 234p. Tese (Doutorado) - ESALQ-USP, Rio Claro.

Korte, G.B. *The GIS book*. 4 ed. local: OnWord Press, 1997. 414 p.

Mauro, C.A.; Sanchez, M.C.; Carvalho, P.F. A questão ambiental e novas relações na produção rural. *Boletim de Geografia Teorética*. AGETEO, v.25, n.49-50, p.419-426. 1995.

- Moreira, M.A. *Déficit hídrico na cultura do trigo e o impacto na resposta espectral e em parâmetros agronômicos*. Piracicaba. 142p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo. 1997.
- Myers, V.I. *Soil, water, plants relationships. Remote Sensing With Spectral Reference to Agriculture and Forestry*. Washington. National Academy of Science. 1970. p.253-79.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). *Landsat - 4. Data users handbook*. Washington: USGS. 1984. 210p.
- Penatti, C.P.; Forti, J.A. Doses de vinhaça versus doses de nitrogênio em cana soca. *In: Seminário de Tecnologia Agronômica.7, 1997. Anais*. Piracicaba: Copersucar, 1997. p.328-339.
- Ponzoni, F.J.; Inoe, M.T. *Alterações na reflectância de folhas "ex situ": uma abordagem metodológica*. São José dos Campos: INPE. 1992. 50p. (INPE-5407-PUD/51).
- Precetti, A.A.C.M.; Bianchi, G.; Coelho, A.L.; Salmeron, E. Avaliação econômica da interação do uso de inseticida e nematicida. *In: Seminário de Tecnologia Agronômica. 7, 1997. Anais*. Piracicaba: Copersucar, 1997. p.123-129.
- Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A., Deering, D.W., Harlan, J.C. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. Greenbelt: NASA/GSFC. 1974.

- Rudorff, B.F.T.; Shimabukuro, Y.E.; Batista, G.T.; Lee, D.C.L. The contribution of qualitative variables to a sugarcane yield model based on spectral vegetation index. *In: Simposio Latino Americano de Percepción Remota*, 7, 1995. Anais. Mexico: SELPER, 1997. p.705-708.
- Rudorff, B.F.T., Batista, G.T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. *Remote Sensing of Environment*, v.33, p.183-192. 1990.
- Rudorff, B.F.T.; Batista, G.T. *Resposta Espectral da Cana-de-açúcar Através de Dados Multiespectrais do MSS do Landsat-4*. São José dos Campos: INPE, 1985. 12p. (INPE-3474-PRE/717).
- Rudorff, B.F.T. Dados Landsat na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. 1985 114p. (INPE-3744-TDL/202). Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Salomonson, O. Data gaps in the planning process: applications to environmental planning . Enschede, Netherlands: ITC. 1980.
- Taiz, L., E. Zeiger. *Photosynthesis: physiological and ecological considerations*. In: Taiz, L.; Zeiger.E ed. *Plant physiology*. Reedwood-CA: The Benjamin/Cummings. 1990. p.249-264.
- Tomlin, C.D. *Geographic information systems and cartographic modeling*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall,. 1990. 249p.

Tucker, C.L. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetations. *Remote Sensing*. v.1, n.1, p.69-75. 1979.

Tucker, C.L.; Garratt, M.W. Leaf optical system modeled as stochastic process. *Applied Optical*. v.16, n.3, p.635-42. 1977.

Vieira, L.S. *Manual de ciência do solo: com ênfase aos solos tropicais*. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres. 1988.

**APÊNDICE A**

TABELA - LEGENDA PARA OS DIFERENTES TIPOS DE SOLOS APRESENTADOS NA  
TABELA 3.1, (FORNECIDOS PELO ENG. AGRONÔMICO ANTONIO CELSO  
JOAQUIM)

GRUPOS	TIPOS DE SOLO	DESCRIÇÃO
I	PVA-13	Podzólico Vermelho Amarelo, textura média, horizonte A<30cm, eutrófico (PV-1)
I	PVA-16	Podzólico Vermelho Amarelo, textura média, horizonte A:30 a 60cm, eutrófico (PV-2)
I	PVA-22	Podzólico Vermelho Amarelo, textura arenosa/média, horizonte A<30cm, eutrófico (PV-3)
I	PVA-25	Podzólico Vermelho Amarelo, textura arenosa/média, horizonte A:30 a 60cm, eutrófico (PV-4)
I	PVA-28	Podzólico Vermelho Amarelo, textura arenosa/média, horizonte A≥30cm, eutrófico (PV-5)
I	PVA-81	Podzólico Vermelho Amarelo, textura arenosa/média, horizonte A<30cm, moderadamente profundo, eutrófico (PV-6)
II	PVA-14	Podzólico Vermelho Amarelo, textura média, horizonte A<30cm, distrófico (PV-7)
II	PVA-17	Podzólico Vermelho Amarelo, textura média, horizonte A:30 a 60cm, distrófico (PV-8)
II	PVA-23	Podzólico Vermelho Amarelo, textura arenosa/média, horizonte A<30cm, distrófico (PV-9)
II	PVA-26	Podzólico Vermelho Amarelo, textura arenosa/média, horizonte A:30 a 60cm, distrófico (PV-10)
III	PVA-15	Podzólico Vermelho Amarelo, textura média, horizonte A<30cm, álico (PV-11)
III	PVA-24	Podzólico Vermelho Amarelo, textura arenosa/média, horizonte A<30cm, álico (PV-12)
III	PVA-27	Podzólico Vermelho Amarelo, textura arenosa/média, horizonte A:30 a 60cm, álico (PV-13)

IV	LVA-8	Latossolo Vermelho Amarelo, textura média, distrófico (LV-1)
IV	LVA-9	Latossolo Vermelho Amarelo, textura média, álico (LV-2)
IV	PVA-76	Podzólico Vermelho Amarelo latossólico, textura média, horizonte A<30cm, distrófico (PV-14)
IV	PVA-77	Podzólico Vermelho Amarelo, textura média, horizonte A<30cm, álico (PV-15)
V	LVA-12	Latossolo Vermelho Amarelo, textura média, álico (LV-3)
V	LI-7	Solos Litólicos, textura média, substrato arenito de Bauru, eutrófico (LV-2)

## APÊNDICE B

Programas em LEGAL utilizados para extrair o valor médio de NDVI de cada talhão:

### Imagem de janeiro de 1995:

```
{
Objeto      talhoes ("obj95");
Cadastral  pisafra95 ("cadastral");
Imagem     ndvi("imagem");
pisafra95 = Recupere (Nome = "safra95");
ndvi = Recupere (Nome = "ndvijan95-(OP5)");
talhoes."NDVI_IM1" = MedZ (ndvi,talhoes OnMap pisafra95);
}
```

### Imagem de junho de 1995

```
{
Objeto      talhoes ("obj95");
Cadastral  pisafra95 ("cadastral");
Imagem     ndvi("imagem");
pisafra95 = Recupere (Nome = "safra95");
ndvi = Recupere (Nome = "ndvijun95-(OP5)");
talhoes."NDVI_IM2" = MedZ (ndvi,talhoes OnMap pisafra95);
}
```

#### Imagem de fevereiro de 1996

```
{  
Objeto    talhoes ("obj96");  
Cadastral pisafra96 ("cadastral");  
Imagem    ndvi("imagem");  
pisafra96 = Recupere (Nome = "safra96");  
ndvi = Recupere (Nome = "ndvifev96sc-(OP5)");  
talhoes."NDVI_IM1" = MedZ (ndvi,talhoes OnMap pisafra96);  
}
```

#### Imagem de abril de 1996

```
{  
Objeto    talhoes ("obj96");  
Cadastral pisafra96 ("cadastral");  
Imagem    ndvi("imagem");  
pisafra96 = Recupere (Nome = "safra96");  
ndvi = Recupere (Nome = "ndviabr96sc-(OP5)");  
talhoes."NDVI_IM2" = MedZ (ndvi,talhoes OnMap pisafra96);  
}
```

**APÊNDICE C**

TABELA - LISTA DOS ATRIBUTOS UTILIZADOS NO BANCO DE DADOS  
GEOGRÁFICOS (SPRING)

safra	Setor	fazenda	bloco
talhão	Grupo	variedade	solo
área (ha)	área mudas	área inútil	área viveiro
plantio	corte anterior	primeiro corte	espaçamento
asfalto	corte atual	corte 1 (manual)	produção (ton)
peso bolo úmido	Estimativa produtividade	Tempo queima	data última análise
produtividade	estágio corte	distância talhão-usina	fornecedores
cana analisada	Leitura sacarimétrica	vinhaça	migdolus
NC (NDVI) (imagem 1)	NDVI (imagem 1)	NC (NDVI) (imagem 2)	NDVI (imagem 2)