

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**RELAÇÕES DOS NDVIS DERIVADOS DAS BANDAS
DO ETM⁺, MODIS E HRV SIMULADOS POR MEIO DE
DADOS 'HYPERION' PARA CANA-DE-AÇÚCAR E
VEGETAÇÃO NATURAL NO NORTE FLUMINENSE**

PEDRO QUARTO JÚNIOR

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título em Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier

Co-orientador: Prof. Dr. Julião Soares de Souza Lima

**ALEGRE
ESPÍRITO SANTO – BRASIL
FEVEREIRO – 2007**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

RELAÇÕES DOS NDVIs DERIVADOS DAS BANDAS DO ETM⁺, MODIS E HRV SIMULADOS POR MEIO DE DADOS 'HYPERION' PARA CANA-DE-AÇÚCAR E VEGETAÇÃO NATURAL NO NORTE FLUMINENSE

PEDRO QUARTO JÚNIOR

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título em Mestre em Produção Vegetal.

Aprovado: 27 de fevereiro de 2007.

Prof. Dr. José Marinaldo Gleriani
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. Paulo de Tarso F. O. Fortes
Centro de Ciências Agrárias – UFES

Prof. Dr. Julião Soares de Souza Lima
Centro de Ciências Agrárias – UFES
(Co-orientador)

Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier
Centro de Ciências Agrárias – UFES
(Orientador)

À MINHA FAMÍLIA

MARIA LAURINDA DA SILVA TATAGIBA QUARTO

IGOR TATAGIBA QUARTO

PÂMELA TATAGIBA QUARTO

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus.

Ao Professor. Alexandre Cândido Xavier, pela objetividade e segurança com que orientou este trabalho, pelo ganho de conhecimentos proporcionado em longas discussões e, em particular, pela amizade, compreensão e paciência que me foi dispensada.

Ao Professor. Julião Soares de Souza Lima, meu co-orientador que muito contribuiu com o seu conhecimento, pelo incentivo, dedicação e grande amizade que temos.

Aos membros da banca examinadora, pelas sugestões apresentadas para a melhoria deste trabalho.

Ao Dr. Lênio Soares Galvão, por ter orientado para fazer a correção atmosférica na imagem.

Aos meus amigos e professores Gilson Fernandes da Silva, José Augusto Teixeira do Amaral, Edvaldo Fialho dos Reis, Sebastião Martins Filho, Paulo César Oliveira, José Tarcísio da Silva Oliveira, Mauro Eloi Nappo, José Eduardo Macedo Pezzopane e Flávio Lopes Rodrigues (*in memorium*), pela confiança e oportunidade para que eu realizasse este trabalho.

Às secretárias, Madalena Caetana Capucho de Oliveira e Therezinha Gonçalves Olmo, pelo apoio e dedicação ao curso.

Aos colegas de Pós-Graduação, Adriano, Regina, Rone, Marcílio, Vítor, Izaias, Janaína, Rosemberg, Sassá, Aline, Cristina, Alaert, que tive uma convivência saudável e momentos de alegria neste período.

Aos meus pais, Pedro Quarto (*in memorium*) e Elzira Lima Quarto, cujos ensinamentos me estruturaram para a vida.

Às minhas irmãs e irmão, Cléria, Joares, Ângela, Joana D'Arc e Maria Luzia, pelo incentivo para a concretização desta jornada.

E finalmente à minha esposa Laurinda e meus filhos Igor e Pâmela, pelo tempo que deixei de passar com eles para à realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Páginas
DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS	iii
SUMÁRIO.....	iv
RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Cultura da cana-de-açúcar	4
2.2. Princípios básicos do sensoriamento remoto	5
2.2.1. Radiação eletromagnética	5
2.2.2. Reflectância, transmitância e absorvância	8
2.2.3. Interação da radiação solar com a atmosfera terrestre	9
2.3. Sensores remotos	11
2.3.1. TERRA/MODIS.....	13
2.3.2. LANDSAT/ETM ⁺	14
2.3.3. SPOT/HRV	15
2.3.4. EO-1/HYPERION	16
2.4. Comportamento espectral da vegetação e do solo	18
2.4.1. Comportamento espectral da vegetação	18

2.4.2. Comportamento espectral do solo.....	20
2.5. Índices de vegetação.....	21
2.6. Importância do posicionamento e da largura de banda.....	22
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1. Área de estudo.....	25
3.2. Imagem e processamento.....	27
3.3. Campanha de campo.....	28
3.4. Coleta das amostras hiperespectrais.....	28
3.5. Avaliação das bandas originais de reflectância Ver e IVP dos sensores analisados.....	29
3.6. Avaliação do NDVI calculado a partir das bandas originais.....	30
3.7. Análise de sensibilidade.....	31
3.7.1. Avaliação das características espectrais nas bandas do MODIS.....	31
3.7.2. Avaliação das características espectrais no NDVI.....	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1. Relação da reflectância das bandas individuais entre os diferentes sensores..	39
4.2. Relações entre NDVI dos diferentes sensores.....	43
4.3. Análise das características espectrais.....	46
4.3.1. Análise de sensibilidade das características espectrais nas bandas individuais.....	46
4.3.2. Análise de sensibilidade das características espectrais no NDVI.....	48
5. CONCLUSÕES.....	55
6. REFERÊNCIAS.....	56

QUARTO JÚNIOR, Pedro, M.S., Universidade Federal do Espírito Santo, fevereiro de 2007. **Relações dos NDVIs derivados das bandas do ETM⁺, MODIS e HRV simulados por meio de dados ‘Hyperion’ para cana-de-açúcar e vegetação natural no Norte Fluminense.** Orientador: Alexandre Cândido Xavier. Co-orientador: Julião Soares de Souza Lima.

RESUMO – Este trabalho teve como objetivos: *i*) analisar a inter-relação da reflectância das bandas do vermelho (*Ver*) e do infravermelho-próximo (*IVP*) e do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) dos sensores multiespectrais MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), ETM⁺ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) e HRV (*High Resolution Visible*); e *ii*) avaliar a importância das características espectrais das regiões do pico do verde (~550 nm), da borda do vermelho (~680 nm a ~780 nm) e da absorção de água na folha (~940 nm) nas bandas *Ver*, *IVP* e no NDVI. Uma imagem hiperespectral do Hyperion foi adquirida sobre a região de Campos dos Goytacazes, Estado do Rio de Janeiro, tendo os efeitos atmosféricos corrigidos. A simulação das bandas foi realizada a partir de 210 e 50 amostras de dados de reflectância hiperespectral, coletadas da imagem Hyperion, em áreas de cana-de-açúcar e de floresta natural, respectivamente. Como resultados têm: *a*) as relações entre as bandas individuais e o NDVI dos diferentes sensores têm comportamento variado, por exemplo, foi observado que as diferenças de *Ver* entre os diferentes sensores foram significativas, o mesmo não ocorrendo para *IVP*; *b*) as translações do NDVI_{ETM⁺} para NDVI_{MODIS} e do NDVI_{ETM⁺} para NDVI_{HRV}, têm boa relação, ambas com $R^2=0,71$, já a translação do NDVI_{HRV} para NDVI_{MODIS} apresenta uma relação inferior ($R^2=0,31$), e *c*) quanto à influência das características espectrais frente às bandas e o NDVI, verifica-se que à medida que as características são mais incorporadas, maiores são as diferenças quando comparados às bandas e o NDVI do MODIS.

PALAVRAS-CHAVE: sensoriamento remoto, índice de vegetação, hiperespectral, simulação.

QUARTO JÚNIOR, Pedro, M.S., Universidade Federal do Espírito Santo, february, 2007. **Relationship between NDVIs derived from ETM⁺, MODIS and HRV bandpasses simulated by Hyperion data for sugar cane and vegetal forest at North Fluminense.** Advisor: Alexandre Cândido Xavier. Co-advisor: Julião Soares de Souza Lima.

ABSTRACT - The objectives of this paper were: *i*) to analyze cross-sensor relation of the normalized difference vegetation index (NDVI) and red/near-infrared reflectance of the multispectral sensors MODIS (“Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer”), ETM⁺ (“Enhanced Thematic Mapper Plus”) and HRV (“High Resolution Visible”); and *ii*) to evaluate the importance of the spectral features green peak (~550 nm), red edge (~680 nm to ~780 nm) and leaf liquid water absorption region (~940 nm) in red/near-infrared reflectance and in NDVI. A Hyperion hyperspectral image acquired over Campos dos Goytacazes, State of Rio de Janeiro in Brazil, having the atmospheric effects corrected. The simulated bandpasses were done for 210 and 50 samples of hyperspectral reflectance data over sugar cane and natural forest, respectively, collected from Hyperion reflectance data. The results are: *a*) the relationship between the individual bands and NDVI of the different sensors have diverse behavior, for example, it was observed that the differences of *red* among sensors are statistical significant and the same is not observed for *NIR*; *b*) Translation of NDVI_{ETM⁺} to NDVI_{MODIS} and of NDVI_{ETM⁺} to NDVI_{HRV}, present good relationship, both with $R^2=0.71$, nevertheless the translation of NDVI_{HRV} to NDVI_{MODIS} is not good ($R^2=0.31$); *c*) it is verified that when the spectral features are incorporated in the reflectance bands and NDVI, the differences are bigger when compared to the bands and NDVI of MODIS.

KEY WORDS: remote sensing, vegetation index, hyperspectral, simulation.

1. INTRODUÇÃO

Há necessidade de se conhecer, de modo acurado, o comportamento da vegetação ao longo do tempo, seja ela vegetação natural ou agrícola. Em pequena escala, isto só é possível por meio de dados temporais de sensoriamento remoto (*SR*). Como exemplo, a partir de dados de *SR*, em uma área de expansão agrícola, pode-se gerar diversos mapas de uso do solo e, com estes, avaliar a dinâmica da cobertura do solo, onde e para que direção está ocorrendo, o impacto desta mudança na paisagem pelo uso e cobertura do solo.

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) é de grande importância no contexto da economia brasileira, sendo o açúcar e o álcool seus principais produtos. A cultura da cana-de-açúcar, no Brasil, abrange mais de 5 milhões de hectares com uma produção de aproximadamente 387 milhões de toneladas (UNICA, 2007). O agronegócio sulcroatcooleiro, que envolve basicamente a utilização da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e álcool, representa 8% do PIB nacional. A produção do álcool combustível figura como a principal alternativa brasileira para os combustíveis derivados de petróleo, sendo produzidos mais de 16 bilhões de litros de álcool no ano de 2005 (ANP, 2007).

A técnica mais usual para estudos da vegetação por meio de dados de *SR* é utilizando de índices de vegetação (*IV*). Os *IVs* são funções de bandas espectrais, onde os mesmos buscam minimizar a variabilidade causada por fatores externos como, por exemplo, geometria da fonte-sensor-alvo e diferenças de solos (PONZONI, 2001).

Os *IVs* são utilizados no monitoramento espacial e temporal das variações das atividades fotossintéticas da vegetação e das suas propriedades biofísicas. Baseiam-se no fato da vegetação possuir uma resposta característica nas regiões do

espectro eletromagnético relativas às bandas do vermelho (*Ver*) e infravermelho-próximo (*IVP*), diferenciando-a de outros alvos terrestres. Um dos *IVs* mais amplamente utilizado é o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), definido como a diferença de reflectância da banda do *IVP* e *Ver* dividida pela soma destas ($NDVI = (IVP - Ver) / (IVP + Ver)$).

O NDVI pode ser calculado a partir de dados de diferentes sensores. Podendo-se destacar na série de satélites Landsat: os sensores TM (*Thematic Mapper*) e ETM⁺ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) que possuem um banco de dados de imagens de alta resolução espacial do nosso planeta desde 1972 (JENSEN, 2007); o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo dos satélites Terra e Aqua, que coleta dados da superfície terrestre desde 1999 e 2002, tendo grande importância para o monitoramento temporal de ecossistemas (HUETE et al., 2002); e o imageador HRV (*High Resolution Visible*) a bordo do satélite francês SPOT em órbita desde 1986 (MOREIRA, 2001).

Valores para o NDVI, calculados de diferentes sensores, para mesmos alvos e sob condições idênticas de imageamento, não são diretamente comparáveis, porque, dentre outros fatores (p.ex.: resolução espacial), os sensores apresentam bandas com intervalos espectrais distintos, o que resultará em valores diferentes para as bandas *Ver* e *IVP*, logo no NDVI calculado (TEILLET et al., 1997). Esse é um grande problema para análise temporal de um longo período, pois para se trabalhar com uma série temporal longa, haverá, quase sempre, a necessidade de se utilizar sensores de características espectrais diferentes. Inclusive, com um mesmo tipo de sensor, como é o caso da série de sensores AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo do NOAA, o problema de compatibilidade do NDVI vai ocorrer, pois há sempre características espectrais distintas entre os sensores (GAO, 2000).

Uma das maneiras de contornar esse problema é por meio da utilização de funções de translação de sensores (MIURA et al., 2006). Ou seja, uma imagem NDVI de um sensor qualquer é transformada por meio de função matemática em uma imagem NDVI de outro sensor, tornando-as assim comparáveis.

Um dos objetivos deste trabalho é investigar a relação da reflectância das bandas do *Ver* e *IVP* e do NDVI calculada de acordo com os sensores ETM⁺, MODIS e o HRV. Outro objetivo é avaliar a influência das características espectrais das

regiões do pico do verde (~550 nm), da borda do vermelho (~680 nm e ~780 nm) e da absorção de água na folha (~940 nm) para as bandas *Ver* e *IVP* e o NDVI. Os alvos analisados foram a cana-de-açúcar e a vegetação natural. A simulação das bandas foi realizada a partir de dados de reflectância do sensor Hyperion para estes alvos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea semi-perene, chamada de “cana de ano” quando é plantada no início da estação chuvosa, entre setembro e novembro, pois apresenta um ciclo vegetativo com duração média de 12 meses. Quando é plantada no meio da estação chuvosa, é chamada de “cana de ano e meio” e seu ciclo vegetativo se estende de 14 até 21 meses. A variação na duração do ciclo depende, principalmente, do ambiente e das técnicas de manejo. Antes do primeiro corte, a cana-de-açúcar é denominada de “cana-planta”. Após o corte, restam no campo as socas ou soqueiras que em torno de 20 a 30 dias brotam, originando a “cana-soca”, e seu ciclo se completa em, aproximadamente, um ano (UNICA, 2007).

O Brasil é um dos líderes mundiais na produção e exportação de vários produtos agropecuários, sendo o primeiro produtor de cana-de-açúcar e exportador de açúcar e álcool do mundo. Metade da produção de açúcar é exportada e gera mais de 2 bilhões de dólares anualmente para a balança comercial brasileira (INPE, 2007). A importância da cana-de-açúcar está se tornando maior nos últimos anos devido à popularização dos carros bi-combustível. Esta cultura se expandiu em quase todos os estados do país ocupando extensas áreas, sendo os principais produtores São Paulo, Pernambuco e Alagoas. No Estado do Rio de Janeiro ocupa uma área de aproximadamente 137 mil hectares, dos quais 91% localizados na região norte Fluminense (PESAGRO, 2007).

2.2. Princípios básicos do sensoriamento remoto

Segundo Asrar (1989), o sensoriamento remoto (SR) pode ser definido como sendo uma técnica de aquisição de informações sobre a condição ou estado dos objetos existentes na superfície terrestre, por um sensor, sem que haja um contato físico com o mesmo. Se não há contato físico entre o sensor e o objeto, o que resulta na ausência de matéria no espaço entre eles, ou seja, a informação sobre o objeto passa a ser transportada ou transferida para o sensor através do espaço vazio, neste caso a atmosfera.

2.2.1. Radiação eletromagnética

Toda matéria que possui temperatura superior ao zero absoluto (0 K ou -273° C) emite radiação eletromagnética, como resultado de suas oscilações atômicas e moleculares. A radiação eletromagnética propaga-se no vácuo a uma velocidade constante (v) de aproximadamente 300.000 km/s, denominada de velocidade da luz. A onda eletromagnética é composta de dois campos ortogonais entre si, um elétrico e outro magnético, e ambos oscilam perpendicularmente à direção de propagação da onda. Duas características importantes da radiação eletromagnética são: o comprimento de onda e a frequência. O comprimento de onda (λ) é definido pela distância média entre dois pontos semelhantes da onda, como, por exemplo, dois mínimos ou dois máximos. A frequência (f) é o número de vezes que uma onda passa por um ponto no espaço num determinado intervalo de tempo, geralmente é expressa em ciclos por segundo ou Hertz. A relação entre o comprimento de onda e a frequência da radiação eletromagnética é baseada na fórmula: $v = \lambda f$, isto é, o comprimento de onda (λ em μm) é o inverso da frequência (f em Hz), ou seja, os curtos comprimentos de onda possuem uma alta frequência, e os longos comprimentos de onda possuem uma baixa frequência, e a amplitude de uma onda é a medida da magnitude da máxima perturbação do meio durante um ciclo da onda (Figura 1), costumam ser expressas em decibéis (JENSEN, 2007).

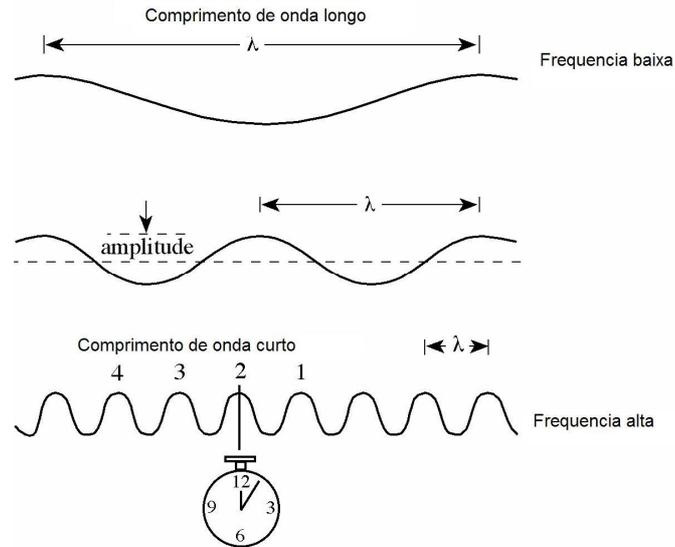


Figura 1- Relação inversa entre o comprimento de onda e a frequência.
 Fonte: Adaptado de Jensen, 2007, p. 40.

A fonte principal de radiação natural é o Sol, que emite grandes quantidades de energia a uma temperatura de aproximadamente 6.000 K (Figura 2). Essa radiação forma um espectro contínuo desde comprimentos de ondas de milésimos de nanômetros até dezenas de quilômetros. As variações da intensidade da radiação eletromagnética, ao longo do espectro são explicadas através das Leis de Radiação, como exemplo, a lei de *Wien* que foi derivada da lei de *Planck* ($E = h \cdot \nu / \lambda$, em que h é a constante de *Planck*) em relação ao λ . Através da lei de *Wien*, pode-se determinar o λ de máxima emitância espectral, para uma dada temperatura. Essa lei é expressa como $\lambda_{max} = C/T$, onde, $C=2,898 \cdot 10^3$ K é a constante de *Wien* e T é a temperatura absoluta (K). As técnicas de SR por sistemas passivos são as que utilizam como fonte de radiação somente aquela compreendida no intervalo de comprimento de onda de $0,4 \mu\text{m}$ até $3,0 \mu\text{m}$, correspondendo à faixa espectral do visível ao infravermelho refletido (CAMPBELL, 1996).

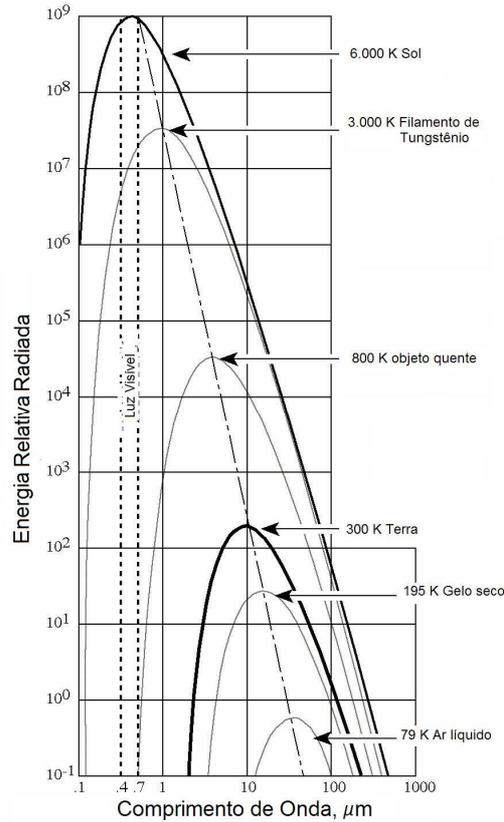


Figura 2 – Curvas de radiação emitidas por alguns objetos.
 Fonte: Adaptado de Jensen (2007), p. 41.

A radiação eletromagnética da banda espectral do visível representa só um pequeno intervalo de comprimento de onda que está entre $0,4 \mu\text{m}$ e $0,7 \mu\text{m}$. Essa faixa de radiação, ao incidir no sistema óptico humano, é capaz de provocar a sensação de cor no cérebro, ou seja, o fato do ser humano enxergar colorido é devido aos estímulos do cérebro, que utiliza este recurso para diferenciar uma onda da outra, isto é, uma frequência de outra. Quando a luz branca é decomposta através de um prisma, por exemplo, o que se observa é que uma cor contém várias radiações eletromagnéticas de comprimentos de onda diferentes, ou seja, diferentes frequências (MOREIRA, 2001).

O espectro visível pode ser subdividido de acordo com a cor, com vermelho nos comprimentos de onda longos e violeta para os comprimentos de onda mais curtos. As cores que estão contidas na Tabela 1 compõem a luz branca e as suas respectivas faixas espectrais dentro do espectro eletromagnético.

Tabela 1 - Cores que compõem a luz branca e os respectivos comprimentos de onda em nanômetro (nm) e micrômetro (μm)

Cores	Comprimento de onda (λ)	
	Nanômetro (nm)	Micrômetro (μm)
Violeta	400 a 446	0,400 a 0,446
Azul	446 a 500	0,446 a 0,500
Verde	500 a 578	0,500 a 0,578
Amarelo	578 a 592	0,578 a 0,592
Laranja	592 a 620	0,592 a 0,620
Vermelho	620 a 700	0,620 a 0,700

Fonte: Moreira, 2001, p. 22.

A radiação eletromagnética da banda espectral do infravermelho está compreendida no intervalo de comprimento de onda de $0,7 \mu\text{m}$ até $1.000 \mu\text{m}$, sendo dividida em três faixas espectrais: infravermelho-próximo (*IVP*), que varia de $0,7 \mu\text{m}$ a $1,1 \mu\text{m}$; infravermelho médio (*IVM*), variando de $1,1 \mu\text{m}$ a $3,0 \mu\text{m}$; e infravermelho distante (*IVD*), de $3,0 \mu\text{m}$ a $1.000 \mu\text{m}$. O *IVP* e o *IVM* comportam-se como a luz visível, porque é provocado pela reflexão solar, enquanto que o *IVD* é caracterizado principalmente pela radiação térmica emitida pela Terra (MATHER, 1999).

2.2.2. Reflectância, transmitância e absorvância

O importante para o SR é a identificação das feições da superfície terrestre, que é obtida através do fluxo radiante que, ao se propagar pelo espaço, pode interagir com a atmosfera ou objetos na superfície terrestre, sendo por estes refletido, absorvido ou emitido. Fluxo radiante (ϕ) é definido como a taxa de transferência de energia radiante por unidade de tempo e é medida em watts (W). A interação do fluxo radiante espectral incidente ($\Phi_{\lambda i}$) sobre um alvo qualquer, pode ser refletida ($\Phi_{\lambda r}$), transmitida ($\Phi_{\lambda t}$) ou absorvida ($\Phi_{\lambda a}$), segundo a Equação 1 (JENSEN, 2007):

$$\Phi_{\lambda i} = \Phi_{\lambda r} + \Phi_{\lambda t} + \Phi_{\lambda a} \quad (1)$$

dividindo a Equação 1 por $\Phi_{\lambda i}$, tem-se:

$$1 = \rho(\lambda) + \tau(\lambda) + \alpha(\lambda) \quad (2)$$

em que: $\rho(\lambda) = \Phi_{\lambda r} / \Phi_{\lambda i}$ é a reflectância espectral, $\tau(\lambda) = \Phi_{\lambda t} / \Phi_{\lambda i}$ é a transmitância espectral e $\alpha(\lambda) = \Phi_{\lambda a} / \Phi_{\lambda i}$ é a absorptância espectral.

Para o *SR*, na maioria dos casos que envolvem estudos da superfície terrestre como vegetação, solo e água, a reflectância espectral é a mais utilizada entre os três fenômenos analisados.

2.2.3. Interação da radiação solar com a atmosfera terrestre

De toda a energia solar que chega ao topo da atmosfera terrestre somente 47% da radiação atingem a superfície e 53% são refletidas ou absorvidas pela atmosfera. Da radiação solar que atinge a superfície terrestre 19% são de raios solares diretos e 26% de raios difusos. São refletidas de volta para o espaço 37% da radiação solar, sendo que desta, 26% são refletidas pelas nuvens, 11% pelas partículas dispersas na atmosfera e os 16% restantes são absorvidos por gases e vapor d'água que se encontram na atmosfera (MOREIRA, 2001).

Quando a radiação solar penetra a atmosfera terrestre, ela é sujeita à modificação devido a vários processos físicos, que são: espalhamento, absorção e refração, causados pelos constituintes atmosféricos como as partículas dispersas, os aerossóis e as nuvens. Esses efeitos atmosféricos causam grande impacto na qualidade e nos dados das imagens de *SR* (CAMPBELL, 1996).

O espalhamento é um processo físico em que a radiação eletromagnética interage com as partículas ou grandes moléculas de gases presentes na atmosfera e a fazem se redirecionar a partir da sua trajetória inicial. Essas partículas possuem tamanhos variáveis que podem ser moléculas de gases naturais, poeira, poluição e grandes gotas de água e granizo. A quantidade do espalhamento depende de vários fatores incluindo o comprimento de onda da radiação, a abundância e o diâmetro das partículas ou gases (MOREIRA, 2001).

Podem ocorrer três tipos de espalhamento, conforme o tamanho das partículas: espalhamento Molecular ou Rayleigh; o espalhamento Mie; e o espalhamento Não-seletivo. O espalhamento Molecular ou Rayleigh ocorre quando os diâmetros das partículas são muito menores que o comprimento de onda da radiação eletromagnética incidente. Esse espalhamento ocorre predominantemente

no topo da atmosfera, sendo produzido por moléculas de gases, como por exemplo, o oxigênio e o nitrogênio, constituintes da atmosfera. Essas moléculas têm uma maior eficiência para espalharem a energia eletromagnética de menores comprimentos de ondas. Esse fenômeno é responsável pela aparência azul do céu durante o dia (JENSEN, 2007).

Já o Espalhamento Mie ocorre quando os diâmetros das partículas presentes na atmosfera são do mesmo tamanho ou próximo ao do comprimento de onda da radiação incidente. Ocorre nas porções mais baixas da atmosfera onde essas partículas são abundantes. Esse tipo de espalhamento é produzido por poeira e fumaça (poluição) constituintes da atmosfera (MATHER, 1999).

Por fim, o espalhamento Não-Seletivo ocorre quando o tamanho das partículas presentes na atmosfera são muito maiores que os comprimentos das ondas eletromagnéticas que incidem sobre elas, normalmente causado por gotas d'água, cristais de gelo e grandes partículas de poeira. O espalhamento não-seletivo possui este nome pelo fato de todos os comprimentos de ondas serem igualmente espalhados. Esse tipo de espalhamento é causado por nevoeiro e nuvens, e causa o aparecimento da cor branca, pois as luzes azul, verde e vermelha são espalhadas em quantidades aproximadamente iguais (MOREIRA, 2001).

A absorção atmosférica é um processo pelo qual a energia eletromagnética absorvida é convertida em outra forma de energia. As moléculas de gases e o vapor d'água são os principais responsáveis pela absorção da radiação, sendo o ozônio (O_3) e o oxigênio (O_2) responsáveis pela absorção na região do ultravioleta. O vapor d'água (H_2O), o dióxido de carbono (CO_2) e o óxido nitroso (N_2O) são responsáveis pela absorção na região do infravermelho e microondas (JENSEN, 2007).

Quando a radiação de determinados comprimentos de onda é pouco absorvida pela atmosfera, ou seja, a atmosfera é transparente, define-se aí uma janela atmosférica (Figura 3). As janelas atmosféricas são muito importantes para o SR, pois os sensores são construídos nestes intervalos de comprimentos de ondas, onde a radiação eletromagnética é pouco absorvida pela atmosfera terrestre (MOREIRA, 2001).

Quando a radiação eletromagnética passa do vácuo para um outro meio ela se refrata e sua velocidade diminui. Assim, o fenômeno da refração é atribuído às diferentes velocidades da radiação ao atravessar diferentes meios, sofrendo mudanças de direções, isto ocorre devido à diferença de densidade de cada

substância como atmosfera ou água. Na atmosfera esse fenômeno ocorre quando a radiação atravessa diferentes camadas de umidade e temperatura (CAMPBELL, 1996). Para a correção dos efeitos atmosféricos podem-se utilizar programas computacionais específicos como, por exemplo, o ACORN e o 6S.

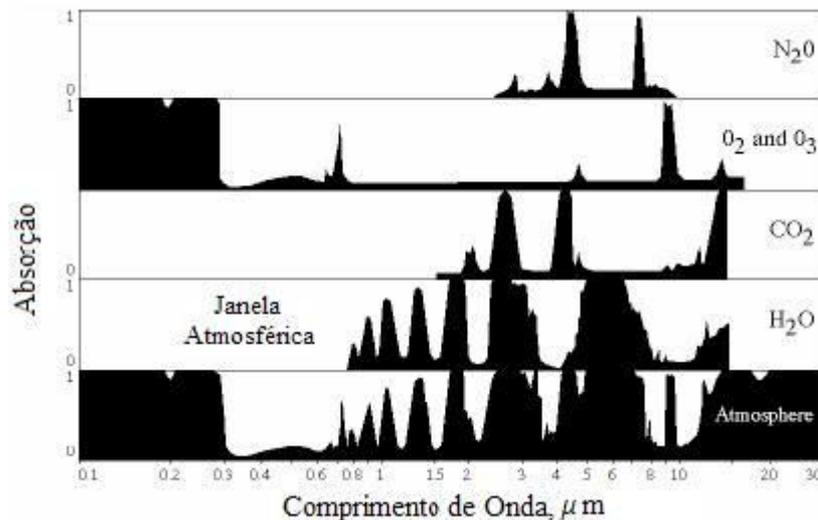


Figura 3 – Região de absorção da energia eletromagnética por vários gases na atmosfera.

Fonte: Adaptado de Jensen (2007), p. 52.

2.3. Sensores remotos

Segundo Moreira (2001), os sensores podem obter informações sobre um objeto ou uma extensão geográfica, captando e registrando a radiação eletromagnética de uma determinada faixa do espectro, transformando-a em uma forma compreensível de interpretação que pode ser uma imagem, gráfico ou tabela.

São quatro os tipos de resolução que caracterizam os dados de *SR*: a resolução espectral, espacial, radiométrica e temporal. A resolução espectral se refere ao número e a dimensão do intervalo de comprimento de onda específico no espectro eletromagnético na qual o instrumento é sensível (MATHER, 1999).

A resolução espacial está relacionada com a área da superfície terrestre imageada instantaneamente pelo sistema sensor, que é representada por um elemento na imagem digital denominado *pixel*. Assim, quanto menor a área da superfície terrestre individualizada pelo sistema sensor, maior será sua resolução espacial (SCHOWENGERDT, 1997).

A resolução temporal está relacionada ao tempo necessário que o sensor leva para voltar a recobrir a mesma área, isto é, obter duas imagens de um mesmo local. Entretanto, alguns sistemas sensores possuem a capacidade de adquirir imagens em visada lateral para imagear uma determinada área localizada à esquerda ou à direita em relação à órbita real do satélite. Isso permite aumentar a frequência de observações em uma determinada área de interesse, além de possibilitar a visão estereoscópica. Outra forma de reduzir o período de obtenção de imagens de um mesmo local é a utilização de um conjunto de satélites com sensores similares e com órbitas intercaladas (JENSEN, 2007).

A resolução radiométrica (Figura 4) está relacionada à capacidade de um sistema sensor, em discriminar variações da energia refletida ou emitida pelos alvos, quanto maior a resolução radiométrica, maior é a capacidade do sensor em detectar diferentes intensidades de energia. Para expressar a resolução radiométrica emprega-se a expressão 2^n , sendo “n” o nível de quantização da imagem, ou seja, o número de *bits* utilizado na geração desta. Como exemplo, para as imagens geradas a partir de sensores remotos que utilizam uma quantização de 8 *bits*, os níveis de cinza possíveis de serem representados na imagem são dados por 2^8 , ou seja, 256 tons de cinza (MATHER, 1999).

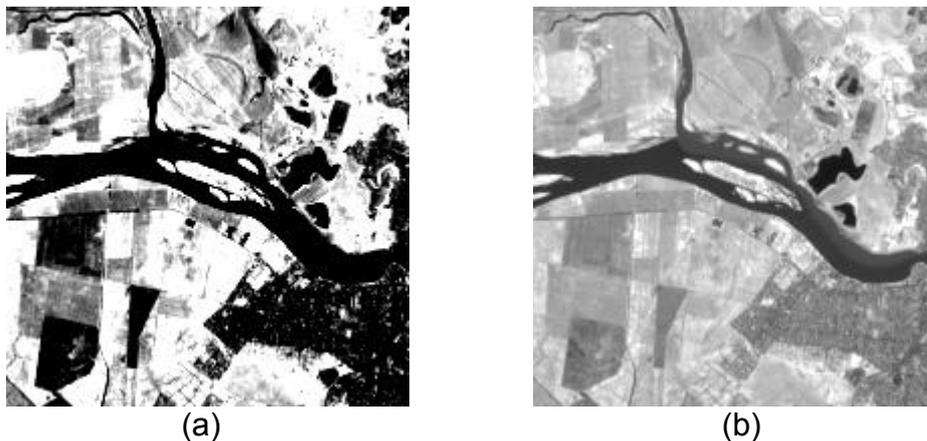


Figura 4 – Parte da imagem Hyperion da cidade de Campos dos Goytacazes, com diferentes resoluções radiométricas: (a) 4 bits e (b) 8 bits.

Existe um grande número de sensores remotos. Nesta seção serão abordados somente aqueles sensores que serão utilizados neste trabalho, MODIS, ETM⁺, HRV e o Hyperion.

2.3.1. TERRA/MODIS

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) está a bordo dos satélites Terra e Acqua, lançados pela NASA em 18 de dezembro de 1999 e 4 de maio de 2002, respectivamente. Esses satélites fazem parte do projeto EOS (*Earth Observing System*), constituído por uma série de plataformas para monitoramento terrestre em várias áreas de conhecimento e, em diferentes escalas. O satélite Terra começou a coletar dados em fevereiro de 2000, com o horário de passagem às 10 h 30 min da manhã no equador. Dentre os sensores que esse satélite transporta, o sensor MODIS foi projetado para atender três diferentes campos de estudos do nosso planeta: a atmosfera, o oceano e a superfície continental (WAN et al., 2002). Esse sensor apresenta bandas de resolução espectral e espacial selecionadas para o conhecimento de diferentes necessidades observacionais e para oferecer uma cobertura global quase diariamente (SALOMONSON et al., 1989). Na Tabela 2, estão dispostas algumas das especificações técnicas deste sensor.

Tabela 2 – Especificações técnicas do sensor MODIS a bordo do satélite Terra

Órbita do satélite Terra	705 km, heliosíncrona; 10 h 30 min.
Cobertura de repetição do satélite Terra	Diária, a norte da latitude 30° e a cada dois dias, para latitudes inferiores a 30°.
Cobertura dos imageamentos	± 55°; 2.330 km (varreduras contínuas simétricas em relação ao nadir).
Resolução espacial	250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas), 1.000 m (29 bandas) no nadir.
Quantização do sensor MODIS	12 bits

Fonte: Adaptada de Justice et al. (2002), p.4.

O sensor MODIS possui 36 bandas espectrais, sendo que as primeiras 19 bandas estão posicionadas na região do espectro eletromagnético situado entre os comprimentos de onda de 405 nm a 2.155 nm, de forma que as bandas 1 a 7 estão direcionadas para as aplicações terrestres, as bandas 8 a 16 para as observações oceânicas e as bandas 17 a 19 para as medições atmosféricas. As bandas 20 a 36, com exceção da banda 26 (1.360 nm a 1.390 nm), cobrem a porção termal do espectro eletromagnético (3.660 nm a 14.385 nm) e podem ser utilizadas por diferentes campos das ciências naturais (KING et al., 1992).

O sensor MODIS possui bandas espectrais estreitas, se comparadas com outros sensores multiespectrais, específicas para as necessidades da comunidade científica, que desenvolvem pesquisas nas áreas continentais do planeta (FRIEDL et al., 2002). A faixa espectral das 7 primeiras bandas e suas aplicações pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3 – Bandas espectrais do sensor MODIS para o estudo da superfície terrestre

Uso preliminar	Bandas	Largura da banda (nm)
Terra, nuvens e limites de aerossóis.	1	620 – 670
	2	841 – 876
Terra, nuvens e propriedade de aerossóis.	3	459 – 479
	4	545 – 565
	5	1.230 – 1.250
	6	1.628 – 1.652
	7	2.105 – 2.155

Fonte: Adaptada de Barnes et al (1998), p 1090.

2.3.2. LANDSAT/ETM⁺

A série Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*) foi iniciada em 1972 com o lançamento do satélite ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite*), mais tarde renomeada para Landsat-1. Ela teve seqüência com os Landsat 2, 3, 4 e com o Landsat 5 e 7, visto que o 6 explodiu no lançamento. O principal objetivo do sistema Landsat foi o imageamento multiespectral em alta resolução da superfície da Terra (MATHER, 1999).

O último satélite da série, o Landsat-7, foi lançado em 15 de abril de 1999 com um novo sensor a bordo denominado ETM⁺ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*). Devido a problemas técnicos sua vida útil foi encerrada em 31 de maio 2003. Uma imagem Landsat-7 ETM⁺ é composta por 8 bandas espectrais. Entre as principais melhorias técnicas em relação ao Landsat-5, destacam-se: a adição de uma banda espectral (banda pancromática) com resolução nominal de 15 metros, perfeitamente registrada com as demais bandas; as melhorias nas características geométricas e radiométricas; o aumento da resolução espacial da banda termal para 60 metros; e a adição de dois calibradores solares (JENSEN, 2007).

O sistema Landsat-7 pode adquirir imagens numa área que se estende desde 81° de latitude norte até 81° de latitude sul e em todas as longitudes do globo

terrestre. Uma órbita do Landsat-7 é realizada em aproximadamente 99 minutos, permitindo ao satélite dar 14 voltas em torno da Terra por dia. A órbita do Landsat-7 é heliosíncrona, ou seja, sempre passa num mesmo local no mesmo horário.

A antena do INPE, em Cuiabá, recebe de forma contínua imagens do satélite Landsat de todo o território nacional, desde os anos setenta, e isto constitui um enorme acervo de dados sobre o país (EMBRAPA, 2007). Na Tabela 4, pode-se observar as principais características do sensor ETM⁺.

Tabela 4 – Principais características do sensor ETM⁺ a bordo do satélite Landsat-7

Parâmetro do Sensor	ETM ⁺
Bandas Espectrais (μm)	Banda (1) 0,45 – 0,52
	Banda (2) 0,53 – 0,61
	Banda (3) 0,63 – 0,69
	Banda (4) 0,78 – 0,90
	Banda (5) 1,55 – 1,75
	Banda (6) 10,4 – 12,5
	Banda (7) 2,09 – 2,35
	Banda (8) 0,52 – 0,90
Resolução Espacial Nominal	30 m (bandas 1 a 5 e 7)
	60 m (banda 6)
	15 m (banda pancromática)
Número de detectores	16 para as bandas (1 a 5 e 7)
	8 para a banda 6
Resolução radiométrica	32 para a banda pancromática
	8 bits (256 níveis)
Área de Imageamento	185 km x 185 km
Órbita e Inclinação	705 km, heliosíncrona
	98,2°
Resolução Temporal	16 dias

Fonte: Adaptado de Jensen (2007), p. 211.

2.3.3. SPOT/HRV

O primeiro satélite SPOT (*Système Probatoire de Observation de la Terre*) foi lançado em 21 de fevereiro de 1986. Ele foi desenvolvido pela França através do CNES (*Centre National d'Etudes Spatiales*) em cooperação com a Bélgica e Suécia. O SPOT-2 e SPOT-3 foram lançados em 22 de janeiro de 1990 e 25 de setembro de 1993, respectivamente. Os três satélites possuem equipamentos idênticos com dois sensores de alta resolução HRV (*High Resolution Visible*) a bordo. Esses sensores foram concebidos para operarem no modo multiespectral, aquisição de dados em três faixas do espectro eletromagnético com uma resolução espacial de 20 metros, e

no modo pancromático com uma banda de resolução espacial de 10 metros (Tabela 5). Uma das características marcantes do sistema HRV é a possibilidade de coletar informações de alvos terrestres “off-nadir”, ou seja, apontamento do coletor fora da posição perpendicular à linha de deslocamento do satélite, variando de $\pm 0,6^\circ$ até $\pm 27^\circ$, em relação ao eixo vertical, sendo possível a determinação de 45 ângulos de visadas. Os três satélites coletaram mais de 5 milhões de cenas da superfície terrestre durante suas vidas úteis (JENSEN, 2007).

Tabela 5 – Principais características do sensor HRV, a bordo dos satélites SPOT 1, 2 e 3

Parâmetro do Sensor	HRV
Bandas Espectrais (μm)	Banda (1) 0,50 – 0,59
	Banda (2) 0,61 – 0,68
	Banda (3) 0,79 – 0,89
	Banda (Pan) 0,51 – 0,73
Resolução Espacial (Nadir)	20 m (bandas 1, 2 e 3)
	10 m (banda pancromática)
Área de Imageamento	60 km x 60 km nadir e 80 km x 80 km off-nadir
Órbita e Inclinação	832 km, heliosíncrona, 10 h 30 min 98,7°
Resolução Temporal	26 dias

Fonte: Adaptada de Jensen (2007), p. 224.

2.3.4. EO-1/HYPERION

O sensor Hyperion é o primeiro sensor hiperespectral orbital. Foi lançado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) em 21 de novembro de 2000, a bordo da plataforma EO-1 (*Earth Observing-1*), com uma órbita heliosíncrona a 705 km de altitude, passando pelo equador 1 minuto depois do Landsat-7 (atualmente o Landsat-7 está desativado), a inclinação da órbita é de $98,2^\circ$ com um período de 98,9 minutos (DATT et al., 2003). O sensor Hyperion coleta dados contínuos em 242 bandas espectrais posicionadas entre 356 nm a 2.577 nm, com largura das bandas de aproximadamente 10 nm, resolução espacial de 30 metros e resolução espectral de 16 bits, destas bandas 44 não são calibradas (Tabela 6). O volume de dados coletados pelo Hyperion, para uma mesma área, é 75 vezes maior do que a da banda 6 do ETM⁺ (THENKABAIL et al., 2004a).

O sensor Hyperion possui algumas vantagens em relação aos sensores multiespectrais, pois ele fornece mais informações para a correção atmosférica, maiores detalhes da medida espectral, e pode ser utilizado para simular bandas espectrais equivalentes a dos sensores multiespectrais (DATT et al. 2003). Essas características conferem ao sensor Hyperion uma alta resolução espectral, principalmente quando comparadas aos sensores multiespectrais, que operam com um número muito inferior de bandas espectrais e bandas muito largas dentro do espectro eletromagnético.

Tabela 6 – Bandas do Hyperion que são calibradas e as que não são calibradas

	Bandas	Comprimento de onda (nm)	Status
Canais do Visível e <i>IVP</i>	1 - 7	356 – 417	não calibrada
	8 - 55	426 – 895	Calibrada
	56 - 57	913 – 926	Calibrada
	58 - 70	936 – 1058	não calibrada
	71 - 76	852 – 902	não calibrada
Canais do <i>IVM</i>	77 - 78	912 – 923	Calibrada
	79 - 224	933 – 2396	Calibrada
	225 - 242	2406 – 2578	não calibrada

Fonte: Adaptado de USGS (2006).

Vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos utilizando o sensor Hyperion em diversas áreas, por exemplo, Apan et al. (2004), estudou *IVs* hiperespectrais para a detecção de doença foliar em cana-de-açúcar; Galvão et al. (2005) conseguiram discriminar algumas variedades de cana-de-açúcar usando valores de reflectância das bandas, razões de reflectância e índices hiperespectrais; Gong et al. (2003) estimaram o índice de área foliar utilizando vários índices de vegetação em uma floresta na Argentina; e Huete et al. (2003) fizeram uma análise da degradação da cobertura do solo em uma região semi-árida utilizando diversos índices, também na Argentina.

Para algumas aplicações, como a classificação de alvos agrícolas, as imagens geradas a partir de sensores de bandas espectrais estreitas podem melhorar a capacidade de discriminação e a acurácia de classificação, quando comparadas às imagens geradas a partir de sensores de bandas espectrais largas (GALVÃO et al., 2005).

2.4. Comportamento espectral da vegetação e do solo

Cada objeto reflete, absorve e transmite a radiação eletromagnética em proporções que podem variar em função das suas características e do meio ambiente no qual se encontram. As variações da energia refletida pelos objetos podem ser representadas por meio de curvas, chamadas de curvas espectrais, que representam o comportamento espectral de cada objeto (MOREIRA, 2001).

2.4.1. Comportamento espectral da vegetação

Para o monitoramento da vegetação, são utilizados sensores eletro-ópticos para a detecção da energia refletida por ela. Esses sensores podem gerar imagens multiespectrais ou hiperespectrais, ou seja, um conjunto de imagens que mostram a energia refletida em diferentes faixas do espectro eletromagnético, principalmente na região do visível e do *IVP*, onde a vegetação interage mais intensamente com a radiação solar incidente. A interação da radiação solar com a vegetação se dá principalmente pelas folhas, órgãos vegetais altamente especializados na absorção da radiação eletromagnética na região espectral do visível, onde ocorre o processo da fotossíntese (PONZONI, 2001).

A região do espectro eletromagnético entre 400 nm e 700 nm, correspondente à radiação fotossinteticamente ativa (*PAR*), cujos comprimentos de onda são capazes de provocar a reação da fotossíntese nas plantas, justificando a grande absorção apresentada pelas folhas, nesta faixa espectral, devido a grande quantidade de pigmentos (clorofila *a* e *b*) encontrados nelas (BLACKBURN, 1998). O aumento da energia refletida em torno de 550 nm, denominada por região do pico do verde, é ocasionado pela reflexão da radiação eletromagnética pelas clorofilas, que são os pigmentos fotossintéticos mais abundantes na vegetação verde sadia. As clorofilas *a* e *b* apresentam, respectivamente, dois picos de absorção, o maior nos comprimentos de onda de 660 nm e 643 nm e o menor nos comprimentos de onda de 430 nm e 453 nm, respectivamente (MOREIRA, 2001).

Para a vegetação verde saudável, a região compreendida entre os comprimentos de onda de 700 nm a 735 nm é caracterizada por um rápido aumento nos valores da reflectância, sendo denominada de borda do vermelho. Na região do *IVP*, os valores de reflectância para a vegetação verde saudável são maiores que os da região do visível. Esse fato ocorre devido normalmente à radiação

eletromagnética incidente ser espalhada internamente na folha pelos espaços intercelulares ocupados por ar ou água, ou seja, há uma mudança no ângulo de incidência da radiação conforme o meio em que se encontra no interior da célula, ocasionado pelo índice de refração: quando as células estão hidratadas este índice é de 1,425 e quando estão ocupadas apenas pelo ar este índice é 1,0, causando múltiplas reflexões ou espalhamentos desta radiação (GAUSMAN, 1974) Nessa região também ocorrem duas pequenas bandas de absorção da água, uma com centro em 985 nm e outra em 1215 nm (THENKABAIL et al., 2004b). A Figura 5 ilustra as variações nas porções absorvida, transmitida e refletida da radiação solar incidente em diferentes λ do espectro óptico, após a interação da radiação com uma folha individual.

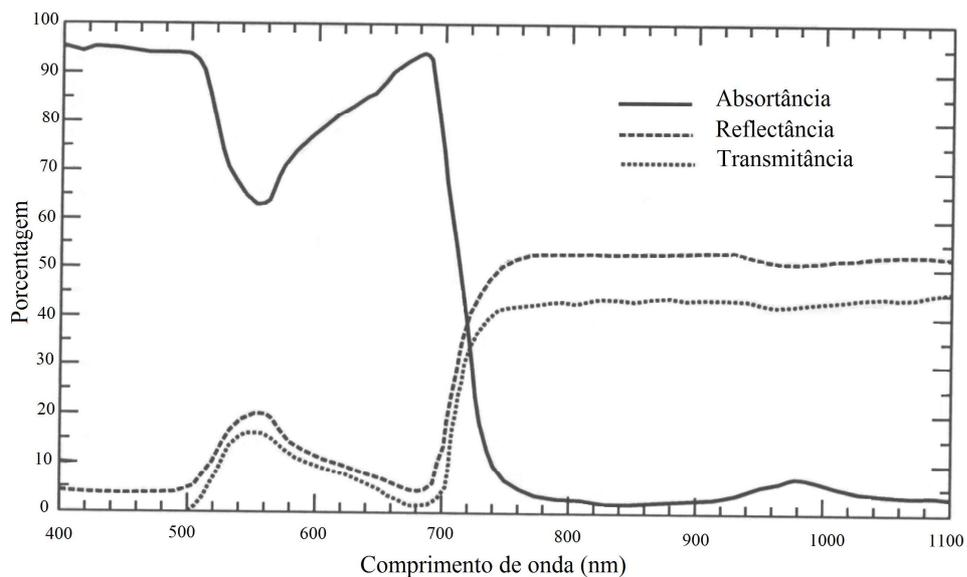


Figura 5 - Valores médios das frações refletida (reflectância) transmitida (transmitância) e absorvida (absortância) da radiação incidente após interação com uma folha individual em função do comprimento de onda do visível e *IVP*.

Fonte: Adaptada de Ponzoni (2001), p. 163.

Tratando do estudo de um dossel, ou seja, da cobertura vegetal aglomerada, o número de variáveis aumenta, tornando o estudo mais complexo tendo que considerar, por exemplo, as variações no ângulo de iluminação, a orientação espacial da folha, as sombras, e a resposta do solo. Essas variações reduzem a

reflectância da vegetação em campo, quando comparados com a reflectância da folha isolada e ainda há a influência de outros fatores como a geometria do plantio e a umidade relativa. Os valores de reflectância dependem das características particulares de cada espécie vegetal, além do estágio fenológico, aspectos sanitários e de condições adversas do clima (como secas e geadas). Em geral, a vegetação verde sadia apresenta um comportamento muito próximo do padrão de resposta de suas folhas, o que não significa dizer que um dossel terá o mesmo comportamento espectral do tipo de folha que o compõe, quando estudada individualmente (PONZONI, 2001). A Figura 5 ilustra as variações nas porções absorvida, transmitida e refletida da radiação solar incidente em diferentes λ do espectro óptico, após a interação da radiação com uma folha individual.

2.4.2. Comportamento espectral do solo

A reflectância do solo é uma propriedade cumulativa que deriva do comportamento espectral da combinação heterogênea de matéria orgânica, mineral, e da fase líquida que combinados compõem os solos. Com o desenvolvimento de sensores orbitais com alta resolução espectral, o *SR* tornou-se uma importante ferramenta nos diversos aspectos relacionados aos estudos de solos, fundamentado para a interpretação dessas imagens por estudos espectrorradiométricos, que medem a reflectância, realizados em laboratórios ou no campo, e sendo expressa em curvas de reflectância espectral (MADEIRA NETTO, 2001).

As curvas de reflectância espectral do solo apresentam feições típicas ou bandas de absorção, devido à interação dos átomos ou moléculas dos diferentes constituintes do solo com a radiação eletromagnética em comprimento de onda específico. Como cada solo apresenta uma diferente constituição, a respectiva curva espectral terá diferentes bandas de absorção. O comportamento espectral do solo depende diretamente de sua composição química, física, biológica e mineralógica. Os principais constituintes que afetam seu comportamento espectral são: o conteúdo de umidade, a textura (proporção de areia, silte e argila), a rugosidade da superfície, a concentração de óxidos de ferro e o conteúdo de matéria orgânica decomposta ou não (DALMOLIN et al., 2005).

Solos úmidos apresentam menor reflectância que solos secos, isto acontece porque as películas d'água ao cobrir as partículas sólidas do solo aumentam as

reflexões internas fazendo com que a maior parte da energia permaneça no solo (MADEIRA NETTO, 2001).

Quando o solo é arado há formação de torrões gerando certa rugosidade no solo e com isto há uma interferência na sua reflectância, causando efeito de espalhamento e sombreamento no solo (MOREIRA, 2001).

Geralmente, há um aumento na reflectância do solo à medida que diminui o tamanho da partícula, pois partículas menores apresentam superfície mais uniforme e o solo é menos poroso para reter a energia incidente, enquanto que, em solos com granulometria maiores a superfície é mais irregular, criando sombreamento e maior retroespalhamento interno (MADEIRA NETTO, 2001).

Os minerais hematita (Fe_2O_3) e goethita (FeOOH) são os óxidos de ferro que ocorrem com mais freqüência nos solos das regiões tropicais e subtropicais e influenciam no comportamento espectral dos solos, principalmente na região do visível e *IVP*. Para a hematita, são atribuídas as feições de absorção na curva espectral para os comprimentos de onda de 530 nm e 885 nm, e para a goethita de 480 nm e 917 nm (DALMOLIN et al., 2005).

À medida que aumenta o teor de matéria orgânica do solo, diminui a reflectância em toda a região do visível e do *IVP*. A matéria orgânica presente no solo com um conteúdo maior do que 2% pode mascarar as características de absorção de outros constituintes do solo. Quando está presente em conteúdo superior a 5%, a curva de reflectância dos solos freqüentemente apresenta um perfil côncavo entre 500 nm e 1.300 nm. Solos que contêm matéria orgânica acima de 20% têm um comportamento espectral variável, dependendo do grau de decomposição em que se encontra essa matéria orgânica (IRONS et al., 1989).

2.5. Índices de vegetação

Os *IVs* baseiam-se no fato da vegetação possuir uma resposta característica nas regiões do espectro eletromagnético relativas ao vermelho e ao infravermelho próximo, diferenciando-a de outros alvos terrestres. Matematicamente, um determinado *IV* é função de um conjunto de operações aritméticas realizadas entre bandas espectrais (JENSEN, 2007).

Apesar da complexidade da vegetação, os *IVs* servem como indicadores do crescimento e do vigor de vegetação verde (PONZONI, 2001). Várias pesquisas em *SR* vêm demonstrando uma relação entre propriedades espectrais e propriedades

biofísicas da vegetação como: o Índice de Área Foliar (IAF) (TURNER, et al., 1999; XAVIER & VETTORAZZI, 2004), a biomassa (VERBESSELT et al., 2006), a porcentagem de cobertura verde (XIAO & MOODY, 2005), e a atividade fotossintética (CARTER, 1998). Muitas dessas relações são determinadas para locais específicos, sendo ainda dependentes da variação do solo, ângulos de visada e de iluminação e outros fatores (EPIPHANIO et al., 1996).

Dentre os índices de vegetação, o NDVI é o mais conhecido e utilizado para estudos de caracterização e monitoramento da vegetação (SOUSA & PONZONI, 2007). O NDVI é a razão entre a diferença e a soma da reflectância na região do infravermelho-próximo (ρ_{IVP}) e a reflectância na região espectral do vermelho (ρ_{Ver}), calculado por:

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_{Ver}}{\rho_{IVP} + \rho_{Ver}} \quad (3)$$

Embora numericamente os valores do NDVI possam variar entre -1 e 1, a vegetação está associada aos valores positivos. Materiais que refletem mais intensamente na porção do *Ver* em comparação com o *IVP* (nuvens, água e neve) apresentam NDVI negativo. Solos descobertos e rochas refletem o *Ver* e o *IVP* quase na mesma intensidade, por conseguinte, seu NDVI aproxima-se de zero.

Uma peculiaridade atribuída ao NDVI é a rápida saturação, que o torna insensível ao aumento da biomassa vegetal a partir de determinado estágio de desenvolvimento, ou seja, o índice estabiliza em um patamar, apresentando um mesmo valor, mesmo com o aumento da densidade do dossel. Sellers (1989) comentou que a partir do IAF de 3 ou 5 o NDVI apresenta características de saturação, apesar de indicar uma boa sensibilidade ao desenvolvimento inicial de dosséis.

2.6. Importância do posicionamento e da largura de banda

Conforme indicado na Tabela 7, os sensores multiespectrais adquirem dados com posicionamento e largura de bandas bastante variáveis. Como exemplo, a largura da banda do *Ver* para os sensores relacionados nesta tabela varia de 50 nm a 100 nm, enquanto que para a banda do *IVP* a variação é de 35 nm a 375 nm.

Tabela 7 – Exemplo de sensores com as bandas *Ver* e *IVP* indicando o intervalo, largura e centro das bandas

Sensor/Satélite	Banda do <i>Ver</i> (nm)			Banda do <i>IVP</i> (nm)		
	Intervalo	Largura	Centro	Intervalo	Largura	Centro
ASTER/Terra	630 – 690	60	660	760 – 860	100	810
AVHRR/NOAA-14	580 – 680	100	630	725 – 1.100	375	912
MODIS/Terra	620 – 670	50	645	841 – 876	35	858
MSS/Landsat-5	600 – 700	100	650	800 – 1.100	300	950
HRVIR/Spot-4	610 – 680	70	645	790 – 890	100	840
TM/Landsat-5	630 – 690	60	660	760 – 900	140	830

Fonte: Adaptado de Jensen (2007).

A importância do posicionamento e da largura das bandas no cálculo do NDVI, ou de qualquer outro *IV*, é que, sensores com bandas distintas terão diferentes valores de reflectância para um mesmo alvo sob condições idênticas de imageamento. Logo, para esses mesmos alvos, os NDVIs calculados dos diferentes sensores serão diferentes, não permitindo a comparação (MIURA et al., 2006). Teillet et al. (1997) variando as larguras das bandas do *Ver* e *IVP* de 10 nm a 150 nm e a resolução espacial variando de 20 m a 1.100 m para sensores específicos (HRV, TM, AVHRR, MODIS e MERIS), concluíram que o NDVI e outros *IVs* são afetados pelas diferenças na largura e no posicionamento das bandas utilizadas, principalmente para o *Ver*. Galvão et al. (1999) concluíram que a largura de bandas não influencia na determinação do NDVI para a vegetação verde, desde que as bandas do *Ver* e do *IVP* estejam posicionadas fora do domínio da região da borda do vermelho. Por outro lado, o posicionamento das bandas afeta diretamente o contraste espectral entre a vegetação verde e a vegetação seca.

Para se estudar a interação entre composição atmosférica, clima e vegetação requerem dados de séries temporais altamente acurados (GITELSON & KAUFMAN, 1998). Para avaliação de dados de NDVI de diferentes sensores, diversos autores têm proposto equações de translação, por exemplo, Trishchenko et al. (2002) analisaram a influência das bandas espectrais do visível, *IVP* e do NDVI de diversos sensores da série AVHRR/NOAA, MODIS/Terra e Vegetation/SPOT, verificando que a diferença entre os dados dos diferentes sensores era suficientemente significativa para ser levada em consideração. Para as diferenças entre os sensores AVHRR, tendo como referência o AVHRR/NOAA-9, observaram

que na banda espectral do *Ver*, as diferenças entre os sensores variaram de -25% a 12%, para *IVP* de -2% a 4% e para o NDVI, em valores absolutos, a variação foi de -0,02 a 0,06. Já quando comparado AVHRR/NOAA-9 com o MODIS, a diferença relativa foi de 30% a 40%.

Gao (2000) propôs um método prático para a translação do NDVI do MODIS para o NDVI do AVHRR: a banda *Ver* do AVHRR foi estimada por meio das bandas *Ver* e *Verde* do MODIS, enquanto a banda *IVP* do AVHRR foi estimada por meio das bandas *IVP* e a banda de vapor de água do MODIS. Essa transformação fez com que o viés que existia entre as imagens NDVIs desses sensores fosse reduzido em pelo menos 88%.

Steven et al. (2003) também propuseram funções de translação do NDVI de diversos sensores (p. ex: AVHRR; ATSR-2; Landsat (MSS, TM e ETM+); SPOT-2 e 4 (HRV); IKONOS; MODIS) sobre os alvos de beterraba e milho em diferentes condições de densidade do dossel, solo e cor das folhas. A precisão das translações encontradas por esses autores variou de 1% a 2%.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A área de estudo (Figura 6) está localizada no norte do Estado do Rio de Janeiro no município de Campos dos Goytacazes, entre as coordenadas geográficas 21°37'04" e 22°03'35" de Latitude Sul e 41°18'04" e 41°28'30" de Longitude Oeste. Pode-se observar: a cidade de Campos dos Goytacazes na parte norte; o que se encontra na cor verde próxima à cidade de Campos se refere basicamente ao plantio da cana-de-açúcar; na parte sul da cena, na cor que varia de vermelha a amarronzada, está localizada a Lagoa Feia; regiões de inundação nas áreas de cor escura; áreas de floresta natural se encontram na cor verde escuro, basicamente ao longo dos cursos d'água; na parte norte da imagem, também pode ser visto o rio Paraíba do Sul atravessando a cidade e um dos seus afluentes, o rio Muriaé.

Conforme o sistema de classificação de Köppen, o clima da região Norte Fluminense é do tipo Aw, tropical quente e úmido, com período seco no inverno e chuvoso no verão, com precipitação média anual em torno de 1020 mm (DAHER et al., 2002).

Do ponto de vista geomorfológico, o Norte Fluminense apresenta, basicamente, três ambientes distintos: a serra, o tabuleiro costeiro e a planície fluviomarinha (baixada), o que resulta numa grande diversidade de solos. De um modo geral, os tabuleiros costeiros têm topografia plana e com menor frequência suavemente ondulada. Nos tabuleiros prevalecem duas classes de solos, a dos latossolos amarelos e a dos argissolos amarelos (SOUZA, 2004).

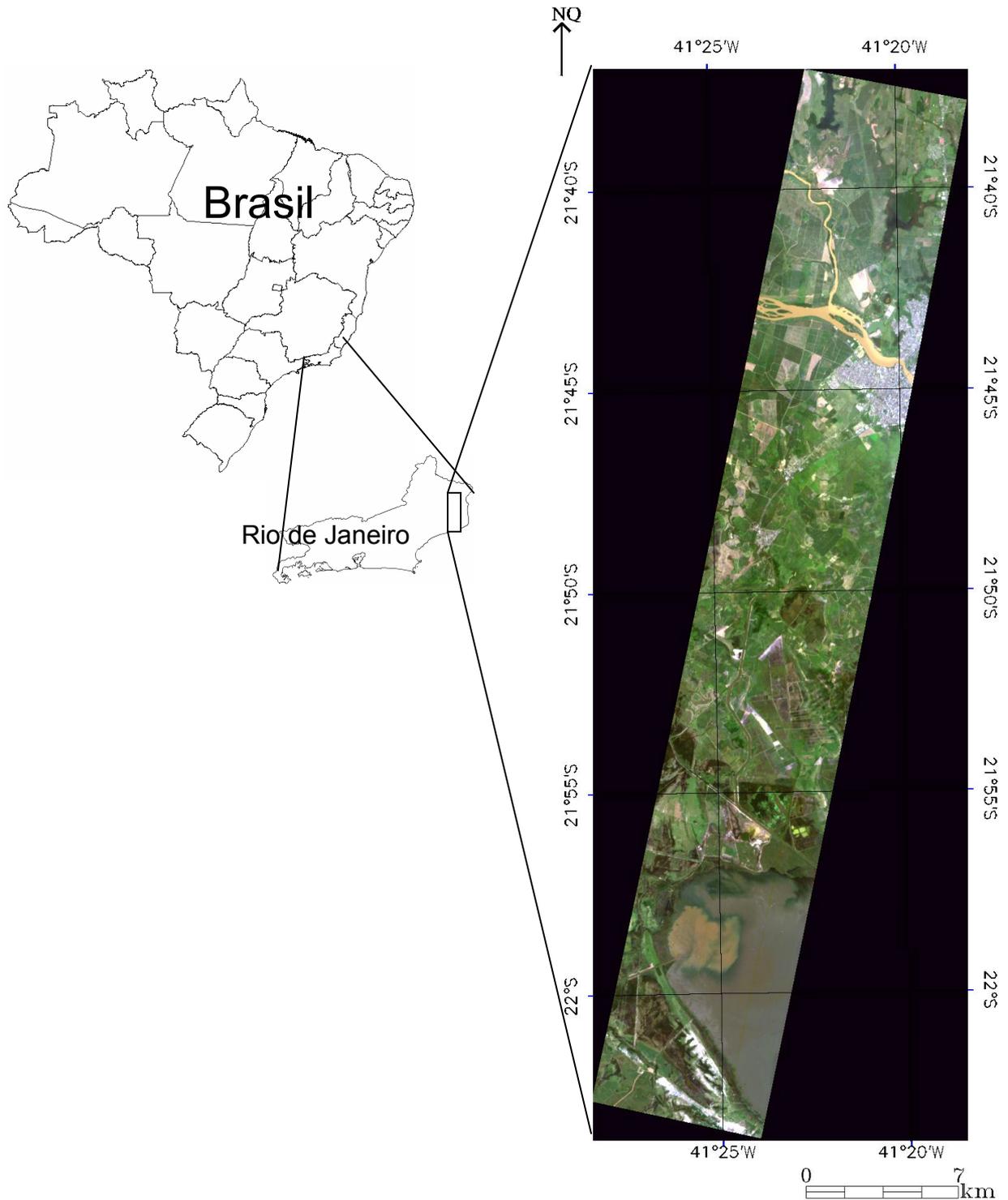
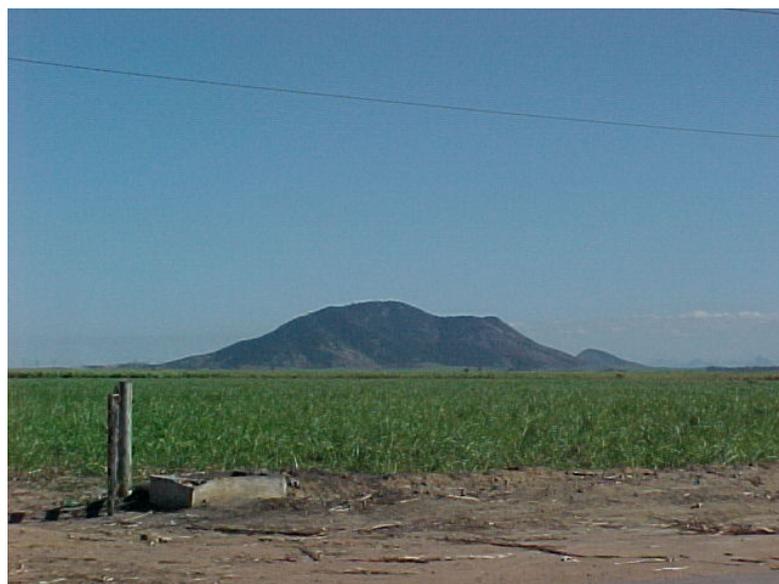


Figura 6 – Área de Estudo (composição colorida R650G550B450 da imagem Hyperion).

Na Figura 7a-b, são apresentadas, respectivamente, uma visão geral de áreas de plantio de cana-de-açúcar e de área inundada, localizada dentro da imagem Hyperion, na região de Campos dos Goytacazes no Estado do Rio de Janeiro.



(a)



(b)

Figura 7 – Exemplo de área de plantio de cana-de-açúcar (a) e de área inundada na região de estudo (b).

3.2. Imagem e processamento

Para a simulação das bandas espectrais do *Ver* e do *IVP* dos sensores que serão analisados (MODIS, ETM⁺ e HRV), foi utilizada uma imagem do sensor hiperespectral Hyperion (EO1H2160752003364110PZ). Essa imagem foi obtida através do site <http://edcsns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer>, adquirida em 30 de dezembro de 2003.

A imagem Hyperion é fornecida originalmente na unidade de radiância, que foi convertida para reflectância de superfície com o uso do aplicativo ACORN (*Atmospheric Correction Now*), que faz a correção para os efeitos de espalhamento e absorção atmosférica (IMSPEC, 2001). Utilizou-se como parâmetros de entrada para a correção desses efeitos o modelo atmosférico tropical, com altitude média local de 10 m e visibilidade de 100 km.

Por apresentarem ruído, foram excluídas as seguintes bandas: banda 1 (355,59 nm) a banda 8 (426,82 nm); banda 58 (935,58 nm) a banda 78 (922,54 nm); banda 117 (1.316,05 nm) a banda 134 (1.487,53 nm); banda 165 (1.800,29 nm) a banda 182 (1.971,76 nm); e banda 223 (2.385,40 nm) a banda 242 (2.577,07 nm). A correção geométrica foi realizada utilizando imagem Landsat WGS-84 como referência (NASA, 2006), sendo que, para a simulação dos dados dos diferentes sensores, utilizou-se a imagem de reflectância não registrada.

3.3. Campanha de campo

Foi realizada uma campanha de campo para o reconhecimento da área de estudo em meados de março de 2005, sendo coletados informações de uso da terra com o auxílio de GPS de navegação Garmin 12. Nessa campanha de campo verificou-se que na região havia basicamente áreas de cana-de-açúcar e poucos remanescentes de floresta natural, localizados, essencialmente ao longo dos cursos d'água. Dessa forma, neste trabalho foram consideradas para análise apenas as classes de cobertura do solo, cana-de-açúcar e floresta natural, distinguíveis na imagem, pelo fato da cultura de cana-de-açúcar apresentar talhões regulares e a floresta natural ser restrita às matas ciliares. Vale salientar também que estas classes possuem padrões de texturas distintas entre si, a cana-de-açúcar com textura lisa e a floresta natural com textura mais rugosa.

3.4. Coleta das amostras hiperespectrais

Para cada uma das classes, foram coletadas amostras de reflectância hiperespectral extraídas diretamente sobre a imagem Hyperion. Cada amostra representa o comportamento espectral de uma área de um pixel na imagem. Foram extraídas 210 amostras para a cultura de cana-de-açúcar e 50 amostras para floresta natural, totalizando 260 amostras. O número maior de amostras coletadas

para a cana-de-açúcar se deve ao fato de que, para um mesmo período, ela pode se encontrar em vários estádios de desenvolvimento, apresentando diferentes características de comportamento espectral (RUDORFF et al., 2005).

3.5. Avaliação das bandas originais de reflectância *Ver* e *IVP* dos sensores analisados

Os sensores simulados para este trabalho foram o ETM⁺ a bordo do satélite Landsat7, o MODIS a bordo do satélite Terra e o HRV a bordo dos satélites SPOT-1, 2 e 3. A simulação das bandas individuais do *Ver* e *IVP* foram realizadas a partir das médias da reflectância hiperespectral das amostras dos alvos de cana-de-açúcar e floresta natural coletados do sensor Hyperion. Na Tabela 8, são apresentados os intervalos de comprimento de onda para as bandas nas quais os sensores são sensíveis, assim como as bandas equivalentes no sensor Hyperion em que foram calculadas as médias (JENSEN, 2007; USGS, 2006).

Tabela 8 – Banda espectral do *Ver* e *IVP* dos sensores multiespectrais e equivalência com as bandas do Hyperion

Sensor	Largura da Banda em (nm) e equivalência com o Hyperion			
	<i>Ver</i>	Hyperion	<i>IVP</i>	Hyperion
ETM ⁺	630 – 690	B28 – B34	760 – 900	B41 – B55
MODIS	620 – 670	B27 – B32	841 – 876	B49 – B52
HRV	610 – 680	B26 – B33	790 – 890	B44 – B54

Para o cálculo da reflectância da banda do *Ver* e *IVP* de cada sensor, foram utilizadas as Equações:

$$\rho_{Ver(ETM+)} = \frac{\sum_{i=28}^{34} \rho Hy_i}{n} \quad (4)$$

$$\rho_{Ver(MODIS)} = \frac{\sum_{i=27}^{32} \rho Hy_i}{n} \quad (5)$$

$$\rho_{Ver(HRV)} = \frac{\sum_{i=26}^{33} \rho Hy_i}{n} \quad (6)$$

$$\rho_{IVP(ETM^+)} = \frac{\sum_{i=41}^{55} \rho Hy_i}{n} \quad (7)$$

$$\rho_{IVP(MODIS)} = \frac{\sum_{i=49}^{52} \rho Hy_i}{n} \quad (8)$$

$$\rho_{IVP(HRV)} = \frac{\sum_{i=44}^{54} \rho Hy_i}{n} \quad (9)$$

em que: ρHy_i é o valor da reflectância hiperespectral; i é o índice das bandas; e n é o número de bandas do Hyperion no intervalo considerado.

Numa análise preliminar, fez-se uma comparação entre as bandas individuais dos sensores analisados. Essa análise foi realizada entre pares de sensores, sendo estes: *i*) ETM⁺ e MODIS; *ii*) HRV e MODIS; e *iii*) HRV e ETM⁺. Para cada um desses pares foram calculadas as diferenças de reflectância entre eles, para a banda do *Ver* e do *IVP*, a partir das seguintes Equações:

$$\Delta\rho_{Ver(ETM^+-MODIS)} = (\rho_{Ver(ETM^+)} - \rho_{Ver(MODIS)}) \quad (10)$$

$$\Delta\rho_{Ver(HRV-MODIS)} = (\rho_{Ver(HRV)} - \rho_{Ver(MODIS)}) \quad (11)$$

$$\Delta\rho_{Ver(HRV-ETM^+)} = (\rho_{Ver(HRV)} - \rho_{Ver(ETM^+)}) \quad (12)$$

$$\Delta\rho_{IVP(ETM^+-MODIS)} = (\rho_{IVP(ETM^+)} - \rho_{IVP(MODIS)}) \quad (13)$$

$$\Delta\rho_{IVP(HRV-MODIS)} = (\rho_{IVP(HRV)} - \rho_{IVP(MODIS)}) \quad (14)$$

$$\Delta\rho_{IVP(HRV-ETM^+)} = (\rho_{IVP(HRV)} - \rho_{IVP(ETM^+)}) \quad (15)$$

3.6. Avaliação do NDVI calculado a partir das bandas originais

Para avaliação da variação do NDVI dos sensores analisados, calcularam-se as diferenças de NDVI entre os pares de sensor, utilizando as Equações:

$$\Delta NDVI_{(ETM^+-MODIS)} = (NDVI_{ETM^+} - NDVI_{MODIS}) \quad (16)$$

$$\Delta NDVI_{(HRV-MODIS)} = (NDVI_{HRV} - NDVI_{MODIS}) \quad (17)$$

$$\Delta \text{NDVI}_{(\text{HRV}-\text{ETM}^+)} = (\text{NDVI}_{\text{HRV}} - \text{NDVI}_{\text{ETM}^+}) \quad (18)$$

Foram ajustadas equações a essas diferenças, utilizando-se uma função de resposta quadrática (Equação 19) para a translação das diferenças de um sensor para outro, segundo metodologia proposta por Miura et al. (2006).

$$\Delta \text{NDVI}_{\text{DE}} = \beta_0 + \beta_1 \text{NDVI}_{\text{DE}} + \beta_2 \text{NDVI}_{\text{DE}}^2 + \varepsilon \quad (19)$$

em que: $\Delta \text{NDVI}_{\text{DE}} = \text{NDVI}_{\text{DE}} - \text{NDVI}_{\text{PARA}}$ e os subscritos DE e PARA indicam a translação de um sensor para o outro; os β s são os parâmetros da regressão a serem calculados; e ε o erro experimental. As translações analisadas foram: de $\text{NDVI}_{\text{ETM}^+}$ para $\text{NDVI}_{\text{MODIS}}$; de NDVI_{HRV} para $\text{NDVI}_{\text{MODIS}}$; e de $\text{NDVI}_{\text{ETM}^+}$ para NDVI_{HRV} .

3.7. Análise de sensibilidade

Uma análise de sensibilidade foi conduzida para examinar a importância relativa das características espectrais (região do pico do verde, região da borda do vermelho e região de absorção de água na folha) e a variação que a inclusão das características tem sobre as bandas *Ver* e *IVP* e o NDVI.

3.7.1. Avaliação das características espectrais nas bandas do MODIS

As bandas do MODIS, *Ver* e *IVP*, por serem mais estreitas, foram utilizadas como referência. A largura dessas bandas foi aumentada gradualmente para maiores e menores comprimentos de onda para incluir três características espectrais da vegetação verde: *i*) o pico do verde (~550 nm); *ii*) a borda do vermelho (transição da banda *Ver-IVP*) (~680 nm a ~780 nm); e *iii*) absorção de água na folha (~940 nm). As bandas aumentadas às quais abrangem as características espectrais são apresentadas nas Tabelas 9 e 10. Para a banda do *Ver*, serão analisadas as influências das características espectrais da região do pico do verde e da região da borda do vermelho, enquanto que para a banda do *IVP*, serão analisadas as características espectrais da região da borda do vermelho e da região de absorção de água na folha.

Tabela 9 – Bandas utilizadas para avaliação da influência das características espectrais das regiões do pico do verde e da borda do vermelho na banda *Ver*, juntamente com o respectivo intervalo de bandas do Hyperion para simulação

Característica espectral	Largura da Banda em (nm) e equivalência com o Hyperion	
	<i>Ver</i>	Hyperion
Pico do Verde	560 – 670	B21 – B32
	580 – 670	B23 – B32
	600 – 670	B25 – B32
	620 – 690	B27 – B34
Borda do Vermelho	620 – 710	B27 – B36
	620 – 730	B27 – B38

Tabela 10 - Bandas utilizadas para avaliação da influência das características espectrais da região da borda do vermelho e da absorção de água na folha na banda *IVP*, juntamente com o respectivo intervalo de bandas do Hyperion para simulação

Característica espectral	Largura da Banda em (nm) e equivalência com o Hyperion	
	<i>IVP</i>	Hyperion
Borda do Vermelho	720 – 876	B37 – B52
	760 – 876	B41 – B52
	800 – 876	B45 – B52
Absorção de Água na Folha	841 – 900	B49 – B55
	841 – 1000	B49 – B86

Para melhor visualização da posição e largura das bandas aumentadas frente ao comportamento espectral de alvos de vegetação de uma amostra de floresta natural e de duas amostras de cana-de-açúcar em diferentes estádios de desenvolvimento, ou diferença de biomassa verde, é apresentada a Figura 8. A cana-de-açúcar I apresenta menor estágio de desenvolvimento, isto é, possui menor biomassa que a cana-de-açúcar II. Ao se coletar estas amostras na imagem procurou uma melhor representatividade para a cultura, pois ela se encontra em campo deste a fase de brotação e plantio, a qual possui uma menor biomassa, até a cana-de-açúcar madura pronta para a colheita que possui uma maior biomassa, já a floresta natural foram coletados amostras ao longo dos cursos d'água.

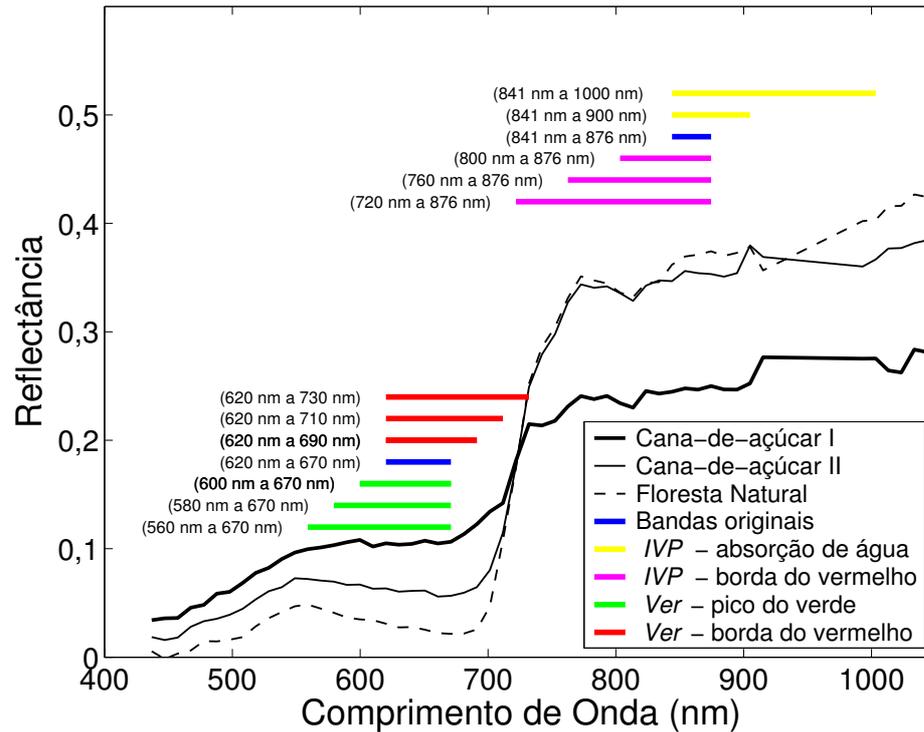


Figura 8 – Curvas espectrais de cana-de-açúcar em dois diferentes estádios de desenvolvimento e floresta natural com as bandas *Ver* e *IVP* simuladas para inclusão das características espectrais do pico do verde, borda do vermelho e absorção de água na folha.

Para o cálculo das reflectâncias (ρ) de cada característica espectral, simulada a partir das bandas do Hyperion, fez-se o cálculo da média das reflectâncias das amostras de cana-de-açúcar e das amostras de floresta natural, no intervalo de comprimento de onda, na qual está relacionada a característica espectral, conforme Tabelas 9-10. Os valores de reflectância simulados para a banda do *Ver* com as características da região do pico do verde ($\rho_{Ver(560)}$, $\rho_{Ver(580)}$ e $\rho_{Ver(600)}$) e da região da borda do vermelho ($\rho_{Ver(690)}$, $\rho_{Ver(710)}$ e $\rho_{Ver(730)}$) foram calculados para todas as amostras conforme as Equações:

$$\rho_{Ver(560)} = \frac{\sum_{i=21}^{32} \rho Hy_i}{n} \quad (20)$$

$$\rho_{Ver(580)} = \frac{\sum_{i=23}^{32} \rho Hy_i}{n} \quad (21)$$

$$\rho_{Ver(600)} = \frac{\sum_{i=25}^{32} \rho Hy_i}{n} \quad (22)$$

$$\rho_{Ver(690)} = \frac{\sum_{i=27}^{34} \rho Hy_i}{n} \quad (23)$$

$$\rho_{Ver(710)} = \frac{\sum_{i=27}^{36} \rho Hy_i}{n} \quad (24)$$

$$\rho_{Ver(730)} = \frac{\sum_{i=27}^{38} \rho Hy_i}{n} \quad (25)$$

Os valores de reflectância simulados para a banda do *IVP* com as características da região da borda do vermelho ($\rho_{IVP(760)}$, $\rho_{IVP(760)}$, e $\rho_{IVP(800)}$) e da região de absorção de água na folha ($\rho_{IVP(900)}$ e $\rho_{IVP(1000)}$) foram calculados para todas as amostras conforme as Equações:

$$\rho_{IVP(720)} = \frac{\sum_{i=37}^{52} \rho Hy_i}{n} \quad (26)$$

$$\rho_{IVP(760)} = \frac{\sum_{i=41}^{52} \rho Hy_i}{n} \quad (27)$$

$$\rho_{IVP(800)} = \frac{\sum_{i=45}^{52} \rho Hy_i}{n} \quad (28)$$

$$\rho_{IVP(900)} = \frac{\sum_{i=49}^{55} \rho Hy_i}{n} \quad (29)$$

$$\rho_{IVP(1000)} = \frac{\sum_{i=49}^{86} \rho Hy_i}{n} \quad (30)$$

As bandas aumentadas para conter as diferentes características espectrais foram comparadas, uma a uma, com as bandas originais do MODIS. Para tanto, calculou-se a diferença entre os valores de reflectância da banda aumentada com o

valor de reflectância da banda original do MODIS para cada amostra ($\Delta\rho$), como segue:

para a banda do *Ver*, com a característica da região do pico do verde:

$$\Delta\rho_{PV(560)} = (\rho_{Ver(560)} - \rho_{Ver(MODIS)}) \quad (31)$$

$$\Delta\rho_{PV(580)} = (\rho_{Ver(580)} - \rho_{Ver(MODIS)}) \quad (32)$$

$$\Delta\rho_{PV(600)} = (\rho_{Ver(600)} - \rho_{Ver(MODIS)}) \quad (33)$$

para a banda do *Ver*, com a característica da região da borda do vermelho:

$$\Delta\rho_{BV(690)} = (\rho_{Ver(690)} - \rho_{Ver(MODIS)}) \quad (34)$$

$$\Delta\rho_{BV(710)} = (\rho_{Ver(710)} - \rho_{Ver(MODIS)}) \quad (35)$$

$$\Delta\rho_{BV(730)} = (\rho_{Ver(730)} - \rho_{Ver(MODIS)}) \quad (36)$$

para a banda do *IVP*, com a característica da região da borda do vermelho:

$$\Delta\rho_{BV(720)} = (\rho_{IVP(720)} - \rho_{IVP(MODIS)}) \quad (37)$$

$$\Delta\rho_{BV(760)} = (\rho_{IVP(760)} - \rho_{IVP(MODIS)}) \quad (38)$$

$$\Delta\rho_{BV(800)} = (\rho_{IVP(800)} - \rho_{IVP(MODIS)}) \quad (39)$$

por fim, para a banda do *IVP*, com a característica da região de absorção de água na folha:

$$\Delta\rho_{AAF(900)} = (\rho_{IVP(900)} - \rho_{IVP(MODIS)}) \quad (40)$$

$$\Delta\rho_{AAF(1000)} = (\rho_{IVP(1000)} - \rho_{IVP(MODIS)}) \quad (41)$$

3.7.2. Avaliação das características espectrais no NDVI

A avaliação das características espectrais sobre o NDVI foi realizada por meio do cálculo de diferença entre o NDVI, calculado levando-se em consideração

determinada característica espectral, e o NDVI, calculado a partir das bandas originais do MODIS, onde o $NDVI_{MODIS} = (\rho_{IVP(MODIS)} - \rho_{Ver(MODIS)}) / (\rho_{IVP(MODIS)} + \rho_{Ver(MODIS)})$.

Dessa forma têm-se:

para banda do *Ver*, com a característica espectral da região do pico do verde:

$$\Delta NDVI_{PV(560)} = \frac{\rho_{IVP(MODIS)} - \rho_{Ver(560)}}{\rho_{IVP(MODIS)} + \rho_{Ver(560)}} - NDVI_{MODIS} \quad (42)$$

$$\Delta NDVI_{PV(580)} = \frac{\rho_{IVP(MODIS)} - \rho_{Ver(580)}}{\rho_{IVP(MODIS)} + \rho_{Ver(580)}} - NDVI_{MODIS} \quad (43)$$

$$\Delta NDVI_{PV(600)} = \frac{\rho_{IVP(MODIS)} - \rho_{Ver(600)}}{\rho_{IVP(MODIS)} + \rho_{Ver(600)}} - NDVI_{MODIS} \quad (44)$$

para a banda do *Ver*, com a característica espectral da região da borda do vermelho:

$$\Delta NDVI_{BV(690)} = \frac{\rho_{IVP(MODIS)} - \rho_{Ver(690)}}{\rho_{IVP(MODIS)} + \rho_{Ver(690)}} - NDVI_{MODIS} \quad (45)$$

$$\Delta NDVI_{BV(710)} = \frac{\rho_{IVP(MODIS)} - \rho_{Ver(710)}}{\rho_{IVP(MODIS)} + \rho_{Ver(710)}} - NDVI_{MODIS} \quad (46)$$

$$\Delta NDVI_{BV(730)} = \frac{\rho_{IVP(MODIS)} - \rho_{Ver(730)}}{\rho_{IVP(MODIS)} + \rho_{Ver(730)}} - NDVI_{MODIS} \quad (47)$$

para a banda do *IVP*, com a característica espectral da região da borda do vermelho:

$$\Delta NDVI_{BV(720)} = \frac{\rho_{IVP(720)} - \rho_{Ver(MODIS)}}{\rho_{IVP(720)} + \rho_{Ver(MODIS)}} - NDVI_{MODIS} \quad (48)$$

$$\Delta NDVI_{BV(760)} = \frac{\rho_{IVP(760)} - \rho_{Ver(MODIS)}}{\rho_{IVP(760)} + \rho_{Ver(MODIS)}} - NDVI_{MODIS} \quad (49)$$

$$\Delta NDVI_{BV(800)} = \frac{\rho_{IVP(800)} - \rho_{Ver(MODIS)}}{\rho_{IVP(800)} + \rho_{Ver(MODIS)}} - NDVI_{MODIS} \quad (50)$$

por fim, para a banda do *IVP*, com a característica da região de absorção de água na folha:

$$\Delta \text{NDVI}_{AAF(900)} = \frac{\rho_{IVP(900)} - \rho_{Ver(MODIS)}}{\rho_{IVP(900)} + \rho_{Ver(MODIS)}} - \text{NDVI}_{MODIS} \quad (51)$$

$$\Delta \text{NDVI}_{AAF(1000)} = \frac{\rho_{IVP(1000)} - \rho_{Ver(MODIS)}}{\rho_{IVP(1000)} + \rho_{Ver(MODIS)}} - \text{NDVI}_{MODIS} \quad (52)$$

em que: os subscritos *PV* é o pico do verde, *BV* é a borda do vermelho e *AAF* a absorção de água na folha.

Também foram avaliados os efeitos sobre o NDVI do aumento simultâneo das características nas bandas do *Ver* e *IVP*, a partir das seguintes Equações: para a banda do *Ver*, com a característica da região do pico do verde e banda do *IVP*, com a característica da região da borda do vermelho:

$$\Delta \text{NDVI}_{Ver(560)-IVP(720)} = \frac{\rho_{IVP(720)} - \rho_{Ver(560)}}{\rho_{IVP(720)} + \rho_{Ver(560)}} - \text{NDVI}_{MODIS} \quad (53)$$

$$\Delta \text{NDVI}_{Ver(580)-IVP(760)} = \frac{\rho_{IVP(760)} - \rho_{Ver(580)}}{\rho_{IVP(760)} + \rho_{Ver(580)}} - \text{NDVI}_{MODIS} \quad (54)$$

$$\Delta \text{NDVI}_{Ver(600)-IVP(800)} = \frac{\rho_{IVP(800)} - \rho_{Ver(600)}}{\rho_{IVP(800)} + \rho_{Ver(600)}} - \text{NDVI}_{MODIS} \quad (55)$$

para a banda do *Ver* e *IVP*, com a característica da região da borda do vermelho:

$$\Delta \text{NDVI}_{Ver(730)-IVP(720)} = \frac{\rho_{IVP(720)} - \rho_{Ver(730)}}{\rho_{IVP(720)} + \rho_{Ver(730)}} - \text{NDVI}_{MODIS} \quad (56)$$

$$\Delta \text{NDVI}_{Ver(710)-IVP(760)} = \frac{\rho_{IVP(760)} - \rho_{Ver(710)}}{\rho_{IVP(760)} + \rho_{Ver(710)}} - \text{NDVI}_{MODIS} \quad (57)$$

$$\Delta \text{NDVI}_{Ver(690)-IVP(800)} = \frac{\rho_{IVP(800)} - \rho_{Ver(690)}}{\rho_{IVP(800)} + \rho_{Ver(690)}} - \text{NDVI}_{MODIS} \quad (58)$$

para banda do *Ver* e *IVP*, com as características respectivamente, da região do pico do verde e da região de absorção de água na folha:

$$\Delta \text{NDVI}_{Ver(690)-IVP(800)} = \frac{\rho_{IVP(800)} - \rho_{Ver(690)}}{\rho_{IVP(800)} + \rho_{Ver(690)}} - \text{NDVI}_{MODIS} \quad (59)$$

$$\Delta\text{NDVI}_{Ver(560)-IVP(1000)} = \frac{\rho_{IVP(1000)} - \rho_{Ver(560)}}{\rho_{IVP(1000)} + \rho_{Ver(560)}} - \text{NDVI}_{\text{MODIS}} \quad (60)$$

por fim, para a banda do *Ver* e *IVP*, com as características respectivamente, da região da borda do vermelho e da região de absorção de água na folha:

$$\Delta\text{NDVI}_{Ver(690)-IVP(900)} = \frac{\rho_{IVP(900)} - \rho_{Ver(690)}}{\rho_{IVP(900)} + \rho_{Ver(690)}} - \text{NDVI}_{\text{MODIS}} \quad (61)$$

$$\Delta\text{NDVI}_{Ver(730)-IVP(1000)} = \frac{\rho_{IVP(1000)} - \rho_{Ver(730)}}{\rho_{IVP(1000)} + \rho_{Ver(730)}} - \text{NDVI}_{\text{MODIS}} \quad (62)$$

Para avaliar o quanto o NDVI foi sensível às mudanças ocasionadas pela inclusão das características espectrais, também foi calculado o percentual da diferença relativa entre estas medidas ($\%\Delta\text{NDVI}$), conforme a Equação 63:

$$\%\Delta\text{NDVI} = 100 \times \frac{\text{NDVI}_{\pm} - \text{NDVI}_{\text{MODIS}}}{\text{NDVI}_{\text{MODIS}}} \quad (63)$$

em que: NDVI_{\pm} é o valor do NDVI calculado para a refletância da banda do *Ver* e *IVP* considerando as características espectrais estudadas, conforme dito anteriormente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, será apresentada a relação entre as bandas *Ver* e *IVP* e do NDVI dos diferentes sensores analisados e, em seguida, a análise das características espectrais nas bandas *Ver* e *IVP* e no NDVI.

4.1. Relação da reflectância das bandas individuais entre os diferentes sensores

A Figura 9 mostra a curva espectral de uma amostra de floresta natural e de duas amostras de cana-de-açúcar em diferentes estádios de desenvolvimento, sendo que a cana-de-açúcar I com menor desenvolvimento (menor biomassa) e a cana-de-açúcar II com maior desenvolvimento (maior biomassa), juntamente com a posição e a largura das bandas do *Ver* e *IVP* dos sensores analisados: MODIS, ETM⁺ e HRV. Verifica-se que a largura das bandas referentes ao *Ver* dos três sensores são semelhantes (as diferenças são de 10 nm do MODIS e HRV para o ETM⁺ e de 20 nm do MODIS para o HRV), entretanto o posicionamento das mesmas no espectro eletromagnético é distinto: *i*) dentre as bandas *Ver*, a do HRV está mais próxima da região referente ao pico do verde (~550 nm); *ii*) e a do ETM⁺ se encontra mais próxima da região da borda do vermelho (~680 nm). Para as bandas *IVP* dos sensores analisados, tem-se que a do MODIS é a mais estreita e se localiza em uma região do espectro eletromagnético onde os valores de reflectância da vegetação verde são geralmente maiores. As bandas *IVP* do HRV e ETM⁺ são aproximadamente semelhantes. Todavia, a largura da banda *IVP* do ETM⁺ é maior, tanto para a região referente aos comprimentos de onda da borda do vermelho (~780 nm) como para a região mais próxima a banda de absorção de água na folha (~940 nm).

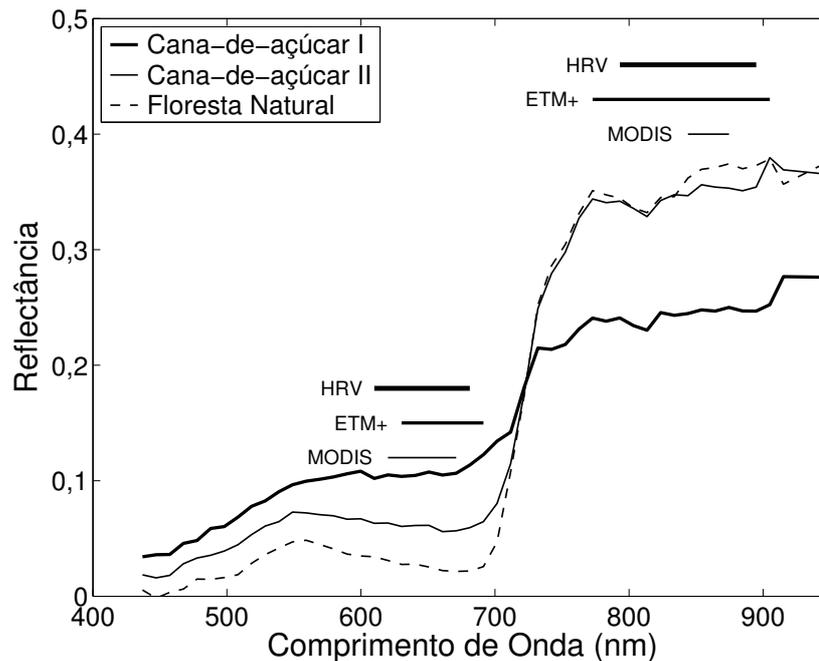


Figura 9 - Curvas espectrais adquiridas da imagem Hyperion de duas amostras sob cana-de-açúcar e uma de floresta natural. As barras horizontais indicam a posição e a largura da banda do *Ver* e do *IVP* de acordo com o sensor.

Na Figura 10, são observadas as diferenças das reflectâncias das bandas individuais do *Ver* e do *IVP* entre os sensores analisados para os alvos de cana-de-açúcar e floresta natural. A diferença de reflectância entre os sensores ETM⁺ e MODIS na banda do *Ver* aumenta à medida que cresceu a reflectância (Figura 10a), apresentando correlação de 0,76 (valor- $p < 0,05$). Para os menores valores de reflectância na banda *Ver*, correspondendo a quase todas as amostras de floresta natural e a algumas amostras de cana-de-açúcar (com maior quantidade de biomassa verde), a diferença é, geralmente, negativa, demonstrando que a reflectância do MODIS é maior. Esse fato deve-se a inclusão da região do pico do verde para esta banda. Por outro lado, para maiores valores de reflectância na banda *Ver*, observa-se que as diferenças são positivas, isto é, a reflectância do ETM⁺ é maior, justificado por esta banda, neste sensor, se localizar mais próxima à região da borda do vermelho.

Na Figura 10b, onde se analisa a diferença de reflectância entre os sensores ETM⁺ e MODIS para a banda do *IVP*, observa-se que não há relação dessa diferença com *IVP* (valor- $p > 0,05$). Contudo, pode-se observar, que a maioria das diferenças entre as amostras é negativa, isto porque os valores de reflectância do sensor MODIS, em média, são maiores que os valores *IVP* do sensor ETM⁺, pois a

banda *IVP* do MODIS é mais estreita e está localizada em uma região onde a reflectância de alvos com vegetação é maior.

Ao analisar a diferença de reflectância entre os sensores HRV e MODIS (Figura 10c) para a banda do *Ver*, observa-se que a diferença é próxima de zero. Isso se deve ao fato dos valores médios de reflectância das bandas dos dois sensores serem muito próximos, pois a largura das bandas destes sensores é semelhante. Apesar das pequenas diferenças, esta relação apresenta correlação significativa ($r=0,33$, $\text{valor-p}<0,05$). Para esse mesmo par de sensores, não há relação significativa ($\text{valor-p}>0,05$) entre a diferença de reflectância para a banda do *IVP* (Figura 10d). No entanto, pode-se observar que, um número maior de diferenças são negativas, mais uma vez, como resposta da banda do MODIS ser mais estreita e estar localizada em uma região onde os valores de reflectância são maiores.

A relação entre a diferença de reflectância *Ver* dos sensores HRV e ETM^+ e *Ver* do ETM^+ (Figura 10e) é negativa ($r=0,77$, $\text{valor-p}<0,05$). Para menores valores de reflectância, a diferença é positiva, principalmente para as amostras de floresta natural, demonstrando que a reflectância do HRV é maior. Esse resultado deve-se a inclusão da região do pico do verde na banda do *Ver* do sensor HRV. Por outro lado, para maiores valores de reflectância, observa-se que as diferenças são negativas, isto é, a reflectância do ETM^+ é maior, justificado por esta banda se localizar mais próxima à região da borda do vermelho.

A diferença de reflectância entre a banda *IVP* dos sensores HRV e ETM^+ (Figura 10f) não é significativa com o aumento do *IVP* ($\text{valor-p}>0,05$). Observa-se que esta variação também é próxima de zero. Isso se deve ao fato da largura e posição no espectro eletromagnético dessas bandas serem semelhantes.

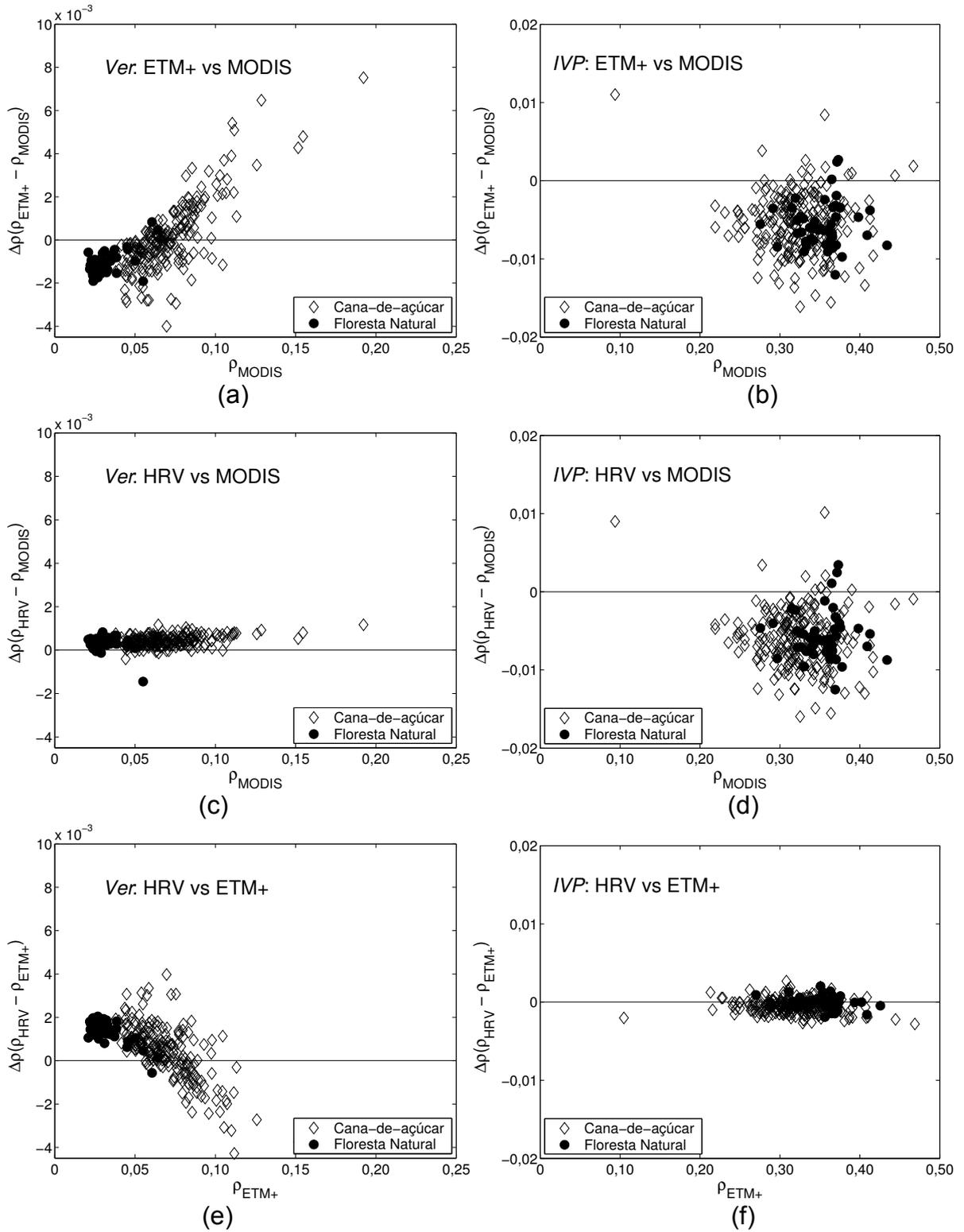


Figura 10 - Diferença de reflectância entre os sensores dos alvos cana-de-açúcar e floresta natural em relação ao valor do sensor.

4.2. Relações entre NDVI dos diferentes sensores

Na Figura 11, são observadas as diferenças do NDVI das amostras entre os pares de sensores analisados e as curvas de regressão ajustadas a estes dados. A variação da diferença do NDVI para o par de sensores ETM⁺ e MODIS (Figura 11a) mostra um aumento dos valores da diferença do NDVI à medida que aumenta o NDVI_{ETM⁺}. É para esse par de sensores que se verifica a maior variação das diferenças dos NDVIs. Para a cana-de-açúcar, os valores das diferenças dos NDVIs variam, de -0,036 a 0,017, e para a floresta natural, há uma variação menor, de -0,010 a 0,010. De um modo geral, tanto para as amostras de cana-de-açúcar como para as de floresta natural os valores das diferenças são negativos até aproximadamente NDVI_{ETM⁺} de 0,74, passando, a partir deste ponto, a diferenças positivas. O NDVI é mais sensível a pequenas mudanças de reflectância do *Ver* do que do *IVP*, para alvos de vegetação densa. Quando a vegetação é mais densa os valores das diferenças de NDVI são positivos, pois a reflectância do *Ver* é menor para o sensor ETM⁺ (ver Figura 10a), conseqüentemente, fazendo com que o valor do NDVI_{ETM⁺} seja maior que o do NDVI_{MODIS}. A diferença negativa é atribuída aos valores NDVI_{MODIS} serem maiores que os valores do NDVI_{ETM⁺}. Quando a vegetação tem menor quantidade de biomassa verde, o NDVI se torna mais sensível às variações do *IVP* (EPIPHANIO & HUETE, 1995). Em média, os valores de reflectância da banda do *IVP* do MODIS para as amostras analisadas são maiores que as do sensor ETM⁺ (ver Figura 10b), fazendo, então, com que os valores NDVI_{MODIS} sejam maiores.

Para o par HRV e MODIS (Figura 11b), também há um aumento nas diferenças do NDVI à medida que aumenta os valores do NDVI_{HRV}. Porém, há uma menor variação dessas diferenças quando comparadas às diferenças de NDVI dos outros pares de sensores analisados. A diferença do NDVI_{HRV} e NDVI_{MODIS} para a cana-de-açúcar varia de -0,020 a 0,006 e, para floresta natural de -0,009 a 0,003. Verifica-se que quase todos os valores das diferenças do NDVI são negativos, ou seja, o NDVI_{MODIS} é maior que o NDVI_{HRV}. Tal resultado pode ser atribuído tanto aos valores de *Ver* do sensor HRV ser maiores que aos do sensor MODIS, quanto aos valores de *IVP* do sensor HRV serem menores que os do sensor MODIS. Ambos os resultados fazem com que NDVI_{HRV} < NDVI_{MODIS}.

Para a diferença do $NDVI_{ETM^+}$ e $NDVI_{HRV}$ (Figura 11c), também há um aumento no valor da diferença dos NDVIs à medida que o valor do $NDVI_{ETM^+}$ aumenta. A diferença de NDVI nesse par para a cana-de-açúcar é de -0,023 a 0,015, enquanto para a floresta natural é de -0,004 a 0,010. De maneira geral, tanto para cana-de-açúcar como para floresta natural, a variação dos valores da diferença do NDVI é negativa até aproximadamente $NDVI_{ETM^+}$ igual a 0,57, passando, a partir deste valor, a apresentar diferenças positivas. Como as diferenças de *IVP* para esse par de sensores é próxima de zero (ver Figura 10f), as diferenças de NDVI são explicadas por *Ver*. A diferença quando positiva é atribuída aos valores do *Ver* do sensor HRV serem maiores que os do sensor ETM^+ , conseqüentemente o $NDVI_{ETM^+} > NDVI_{HRV}$ e, para os valores negativos acontece o inverso.

Na Tabela 11, são apresentadas as equações de translação ajustadas aos dados das diferenças de NDVI dos pares de sensores estudados (Figura 11). O modelo de regressão utilizado para ser ajustado aos dados foi do tipo polinomial de segundo grau. Para todos os pares as regressões são significativas (valor- $p < 0,01$). A translação dos dados do $NDVI_{ETM^+}$ para o $NDVI_{MODIS}$ e para o $NDVI_{HRV}$ apresenta R^2 de 0,71. Já para a translação do $NDVI_{HRV}$ para o $NDVI_{MODIS}$ o ajuste é menor, apresentando R^2 de 0,31. Estes resultados apresentam menores valores de R^2 quando comparados aos obtidos pelo estudo realizado por Miura et al. (2006), que analisaram as diferenças de NDVI para os sensores AVHRR, MODIS e ETM^+ tendo como alvos da região norte do Brasil: floresta, cerrado, pasto e solo exposto. Guardadas algumas restrições, as equações da Tabela 11 poderão, para a região de Campos dos Goytacazes e para os alvos estudados, ser utilizadas para transformar uma imagem NDVI de um sensor para outro. Algumas limitações para a realização de uma translação eficiente de dados NDVI temporal de diferentes sensores foram observadas por Trishchenko et al. (2002), podendo-se citar, as variáveis atmosféricas (e.g. vapor d'água, aerossol e ozônio) e a geometria fonte-alvo-sensor. A resolução espacial é outro fator limitante para a translação do NDVI de sensores distintos, devendo, este fator, ser levado em consideração (ver TEILLET et al., 1997).

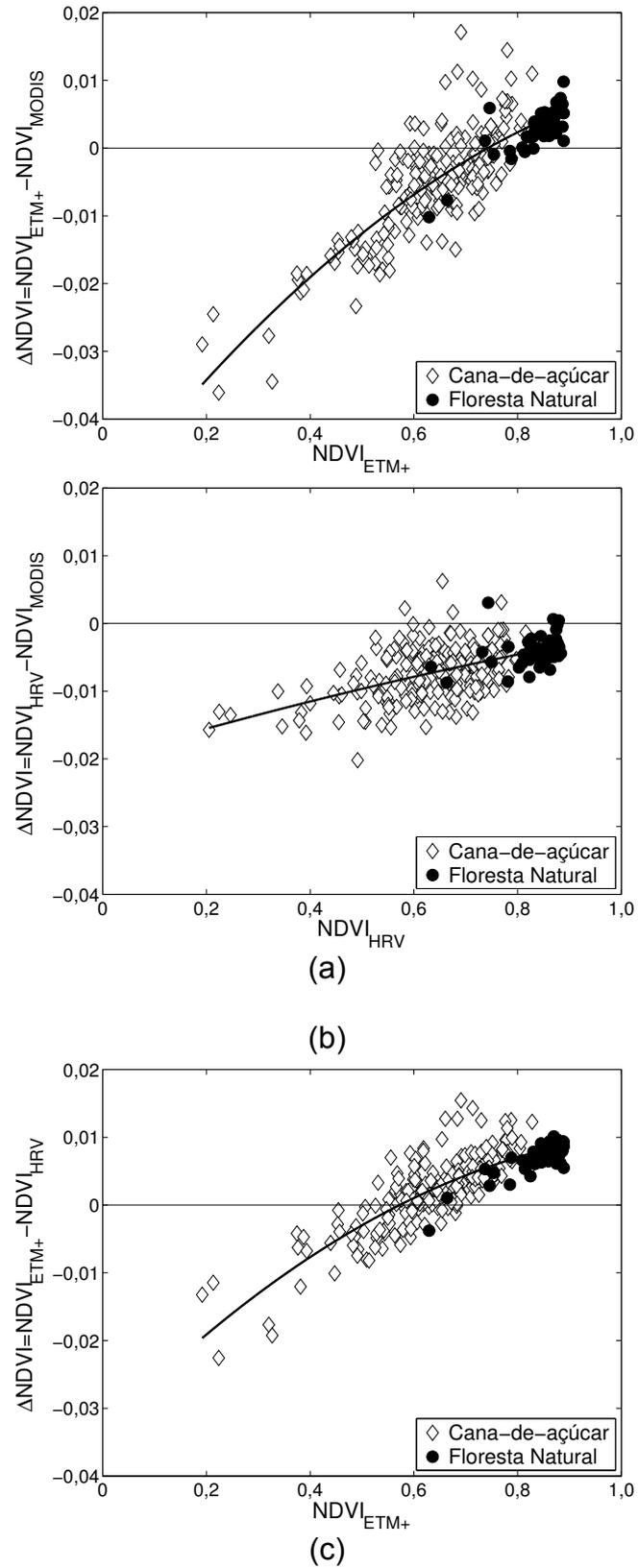


Figura 11 – Diferenças entre o NDVI de sensores distintos e modelos ajustados aos dados.

Tabela 11 - Equações de translação entre NDVIs de diferentes sensores. Variável dependente $\Delta\text{NDVI} = \text{NDVI}_{\text{DE}} - \text{NDVI}_{\text{PARA}}$ e variável independente NDVI_{DE}

DE	PARA	Equação	R ²	valor-p
ETM ⁺	MODIS	$-0,052346 + 0,0981x - 0,037181x^2$	0,71	P<0,01
HRV	MODIS	$-0,019916 + 0,022778x - 0,0045274x^2$	0,31	P<0,01
ETM ⁺	HRV	$-0,033255 + 0,077482x - 0,033896x^2$	0,71	P<0,01

4.3. Análise das características espectrais

Nesta seção, será analisado o comportamento da inclusão das características espectrais: *i*) da região do pico do verde e da borda do vermelho sobre a banda do *Ver* (referência banda do MODIS); *ii*) da região da borda do vermelho e da absorção de água na folha no *IVP* (referência banda do MODIS); e *iii*) do pico do verde, da região da borda do vermelho e da absorção de água na folha no NDVI.

4.3.1. Análise de sensibilidade das características espectrais nas bandas individuais

O resultado da simulação da diferença de reflectância das bandas do *Ver* e *IVP* do sensor MODIS com as bandas, incluindo cada uma das características espectrais, é apresentado na Figura 12. A Figura 12a mostra o resultado da inclusão da região do pico do verde na banda do *Ver*, onde se observa que, para a grande maioria das amostras, a inclusão desta característica resultou em maiores valores de reflectância para esta banda. Na medida em que a característica espectral da região do pico do verde é mais incorporada na banda, as diferenças com relação a banda *Ver* do MODIS passam a ser maiores: *i*) no intervalo do comprimento de onda de 560 nm a 670 nm variando de -0,009 a 0,014; *ii*) no comprimento de onda de 580 nm a 670 nm a variação é de -0,005 a 0,009; e *iii*) no comprimento de onda de 600 nm a 670 nm as diferenças de reflectância são as menores, de -0,002 a 0,005, pois esta banda simulada é a que mais se aproxima da banda original *Ver* do sensor MODIS (620 nm a 670 nm).

A Figura 12b mostra o resultado da inclusão da característica da região da borda do vermelho na banda do *Ver*. Nota-se que as diferenças de reflectância das amostras são, na grande maioria, positivas. Elas são maiores quanto mais a característica espectral da borda do vermelho é incorporada à banda original do

MODIS: *i*) para a banda de 620 nm a 730 nm a variação é de -0,004 a 0,056; *ii*) para a banda de 620 nm a 710 nm a variação é de 0,002 a 0,014; e *iii*) com a banda de 620 nm a 690 nm a variação é de -0,002 a 0,006, sendo as menores diferenças, pois esta banda é a que se aproxima mais da banda *Ver* do MODIS.

O resultado da inclusão da região da borda do vermelho na banda do *IVP* é apresentado na Figura 12c. Observa-se que a maioria das diferenças é negativa. Quanto mais a característica espectral da borda do vermelho é incorporada à banda original do MODIS aumentam-se as diferenças de reflectância: *i*) para banda de 720 nm a 876 nm, variação de -0,050 a 0,018; *ii*) para banda de 760 nm a 876 nm variação de -0,021 a 0,016; e *iii*) para banda de 800 nm a 876 nm a variação é de -0,018 a 0,010, apresentando as menores variações pois ela é a mais semelhante banda *IVP* do MODIS (841 nm a 876 nm).

A variação da diferença de reflectância, quando se inclui a região de absorção de água na folha na banda do *IVP* é mostrada na Figura 12d, onde se observa que a maioria dos valores das diferenças de reflectância é positiva, com a amplitude de variação semelhante para as bandas 841 nm a 1.000 nm e 841 nm a 900 nm analisadas. Este resultado é inconsistente, uma vez que é esperado que a incorporação da região de absorção de água na folha à banda *IVP* do MODIS deveria acarretar em menores valores de reflectância. A justificativa para esse fato não ter ocorrido, se deve à presença de ruído nas bandas do Hyperion nesta região espectral. Dessa forma, não se pode tirar conclusões a respeito da inclusão dessa característica na banda do *IVP*.

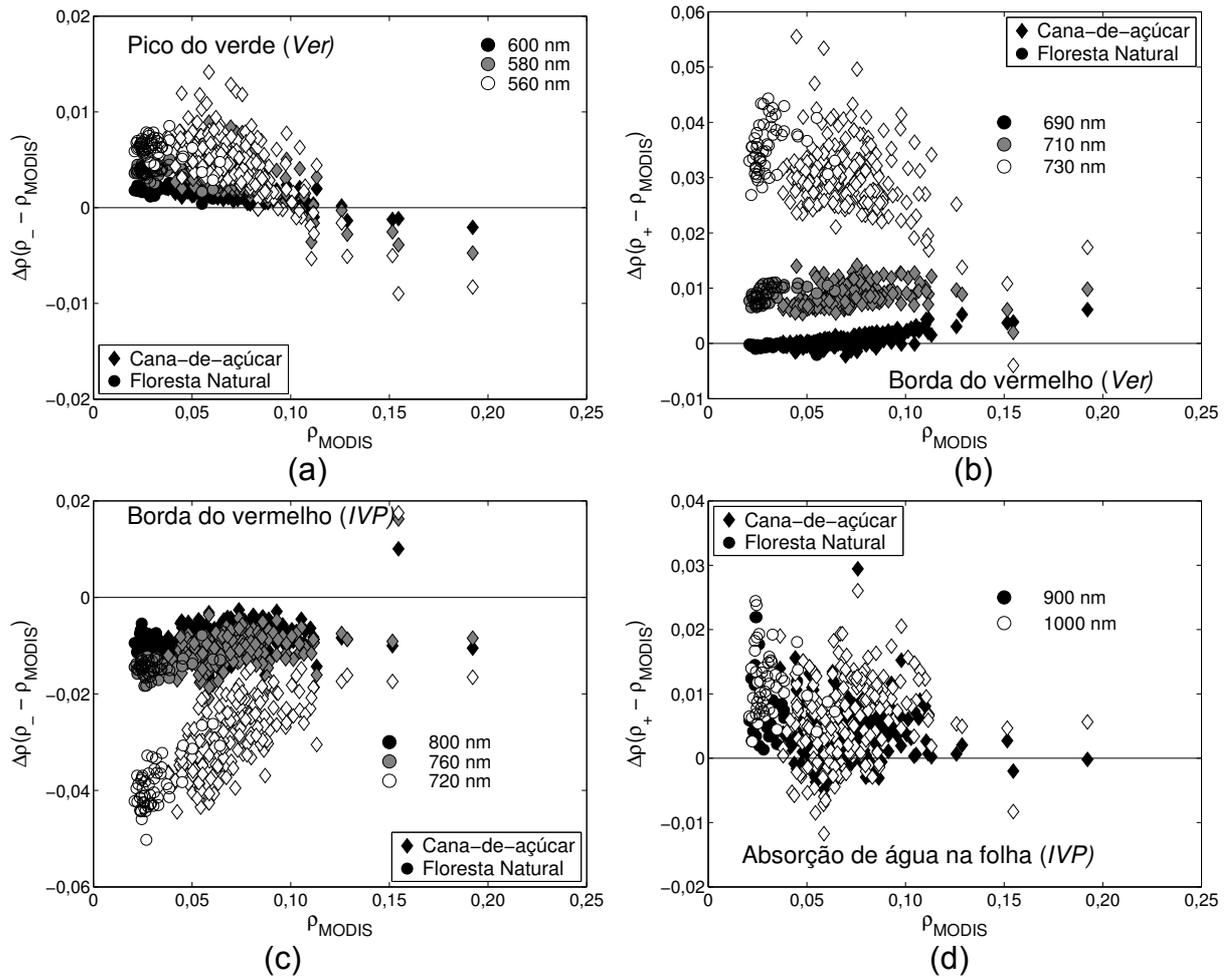


Figura 12 – Diferença de reflectância com a inclusão das características espectrais nas bandas *Ver* e *IVP* do MODIS em relação à banda original do MODIS.

4.3.2. Análise de sensibilidade das características espectrais no NDVI

Os resultados da simulação da diferença do NDVI com o aumento da banda do *Ver* e do *IVP* com a inclusão das características espectrais em relação ao $\text{NDVI}_{\text{MODIS}}$ são mostrados na Figura 13. Com relação à inclusão da característica do pico do verde na banda do *Ver* sobre o NDVI, observa-se que os valores de ΔNDVI decrescem à medida que aumenta os valores do $\text{NDVI}_{\text{MODIS}}$ para ambas as coberturas estudadas (Figura 13a). As diferenças são maiores à medida que a característica do pico do verde é mais incorporada à banda do *Ver*. Na maioria das amostras o ΔNDVI é negativo com a inclusão da região do pico do verde na banda do *Ver*. Esse fato ocorre devido aos valores de *Ver* serem maiores, quando incluída esta característica espectral, do que aqueles da banda original do MODIS (ver

Figura 12a), o que resulta nos menores valores de NDVI quando considerada a característica espectral.

A análise do NDVI com a inclusão da região da borda do vermelho na banda do *Ver* é basicamente uma relação linear (Figura 13b). Quanto mais se incorpora à banda do *Ver* a característica da borda do vermelho, o Δ NDVI aumenta. O aumento da banda do *Ver* até 690 nm faz com que a relação $\text{NDVI}_{\text{MODIS}}$ com o Δ NDVI seja positiva (valor- $p < 0,05$), enquanto para os aumentos na banda do *Ver* até 710 nm e 730 nm esta relação foi negativa (valor- $p < 0,05$).

A inclusão da região da borda do vermelho na banda do *IVP* sobre o Δ NDVI é mostrada na Figura 13c. Mais uma vez, tanto as amostras de cana-de-açúcar como as de floresta natural, na medida em que a inclusão da característica espectral é mais incorporada à banda do *IVP*, maiores o Δ NDVI são observados (maiores valores negativos). A relação entre $\text{NDVI}_{\text{MODIS}}$ e Δ NDVI para esta característica espectral é positiva para todos os comprimentos de onda incorporados à banda do *IVP* (valor- $p < 0,05$).

O Δ NDVI com a incorporação na banda do *IVP* da região de absorção d'água na folha (Figura 13d) não demonstra relação significativa (valor- $p > 0,05$). Este resultado é atribuído a ruído nos dados do Hyperion para esta banda, como explicado anteriormente.

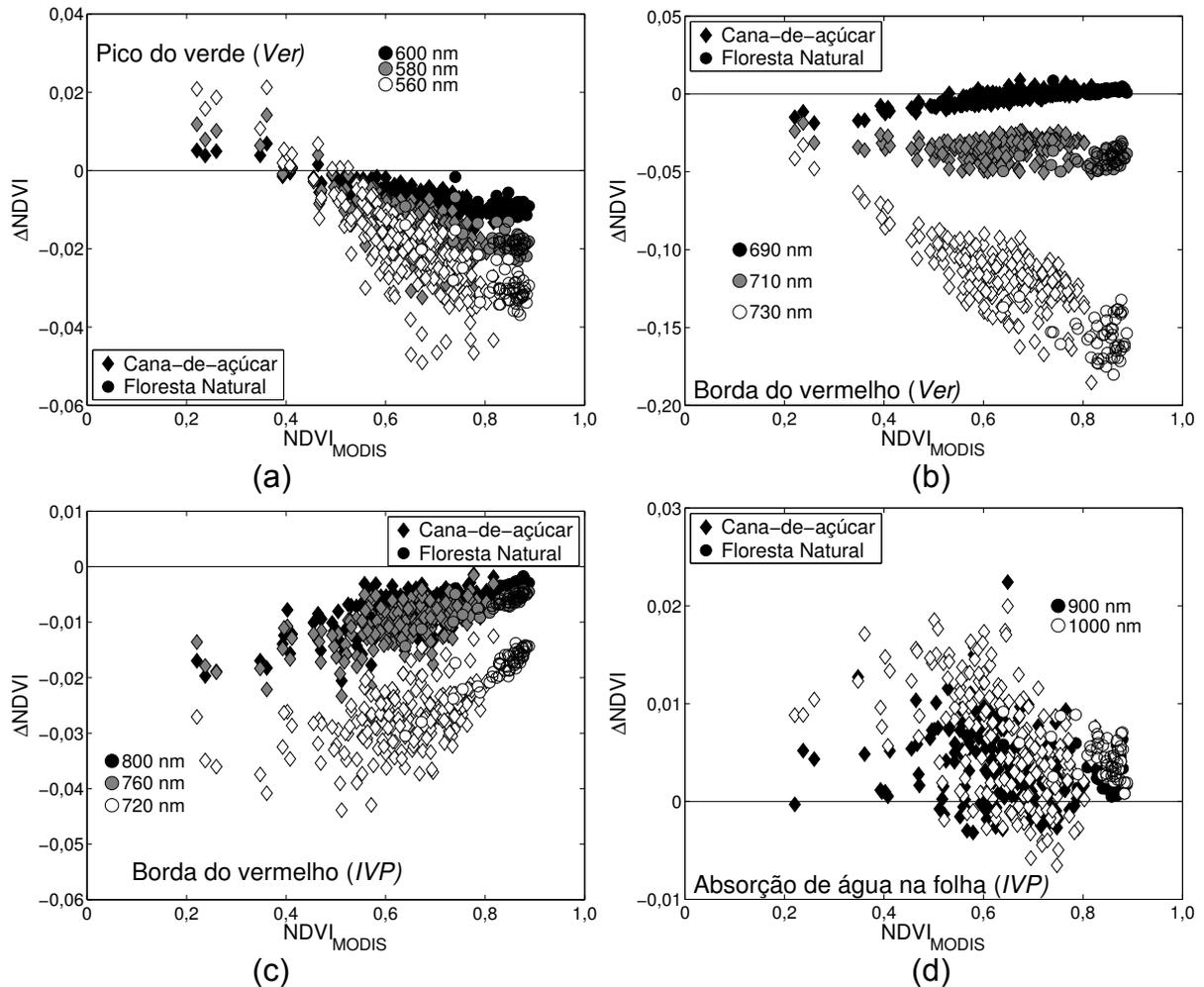


Figura 13 - Diferença de NDVI com o alargamento da banda do MODIS em relação ao $NDVI_{MODIS}$ original.

A Figura 14 mostra o resultado da diferença do NDVI quando, simultaneamente, nas bandas do *Ver* e do *IVP*, são incluídas as características espectrais estudadas. Observa-se as maiores $\Delta NDVI$ quando a largura das bandas *Ver* e *IVP* são aumentadas para conter a resposta da reflectância espectral da região da borda do vermelho (Figura 14b). Já as menores $\Delta NDVI$ ocorrem quando na banda do *Ver* é acrescida a característica espectral do pico do verde, e na banda do *IVP* aumentada para conter a característica espectral da região de absorção de água na folha (Figura 14c). Para todas as combinações simultâneas das bandas do *Ver* e do *IVP*, contendo as características espectrais para se calcular o $\Delta NDVI$, verifica-se que este resultado é aproximadamente igual à soma do $\Delta NDVI$, considerando o impacto de cada banda individual com determinada característica. Por exemplo, na Figura 15, é apresentado o resultado da soma do $\Delta NDVI$ para a

característica do pico do verde em *Ver* (ver Figura 13a) e de ΔNDVI para a característica da borda do vermelho em *IVP* (ver Figura 13c). O mesmo resultado foi observado por Miura et al. (2006).

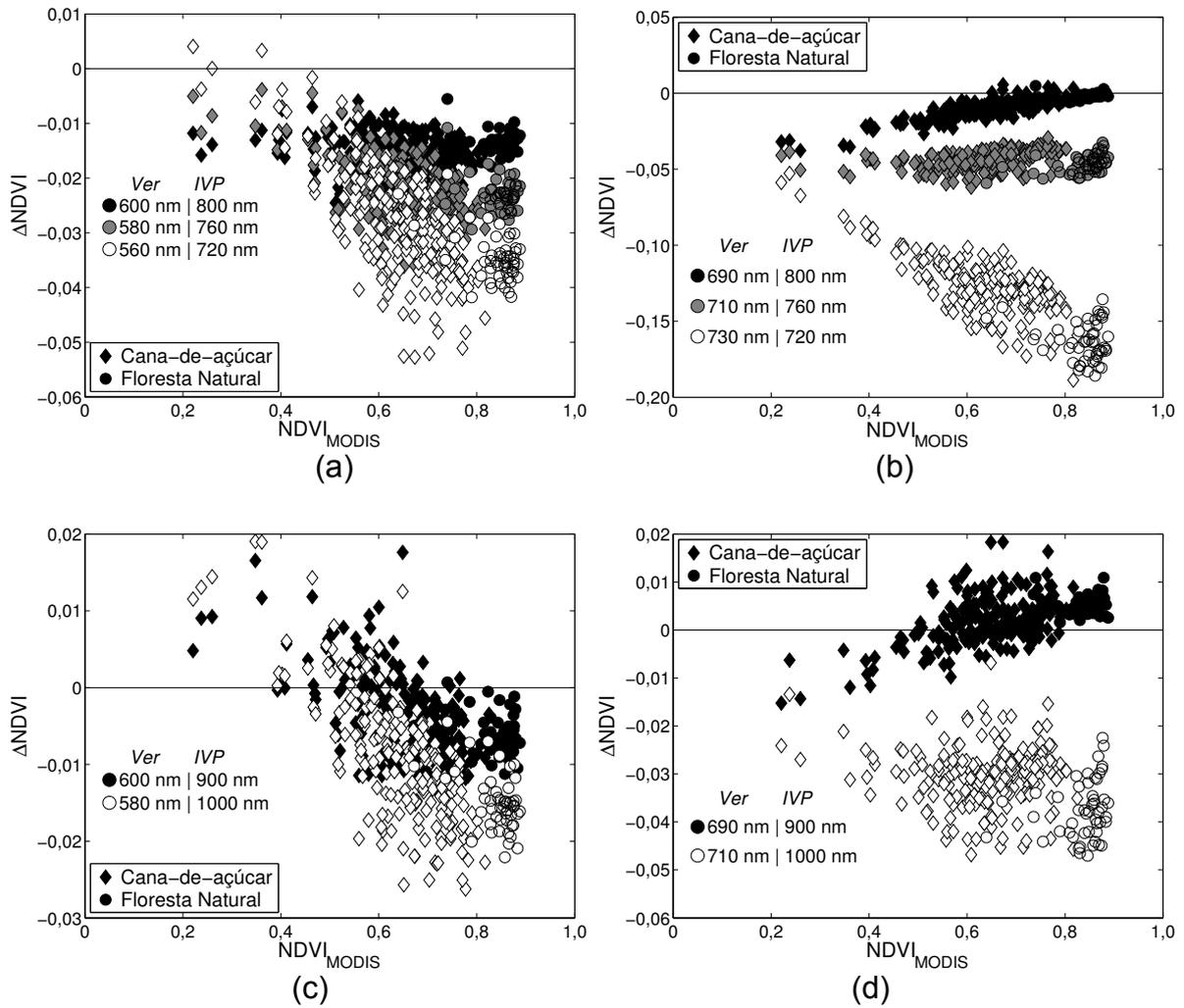


Figura 14 – Diferença simultânea entre o NDVI com o alargamento das bandas do *Ver* e *IVP* do MODIS em relação ao $\text{NDVI}_{\text{MODIS}}$ original.

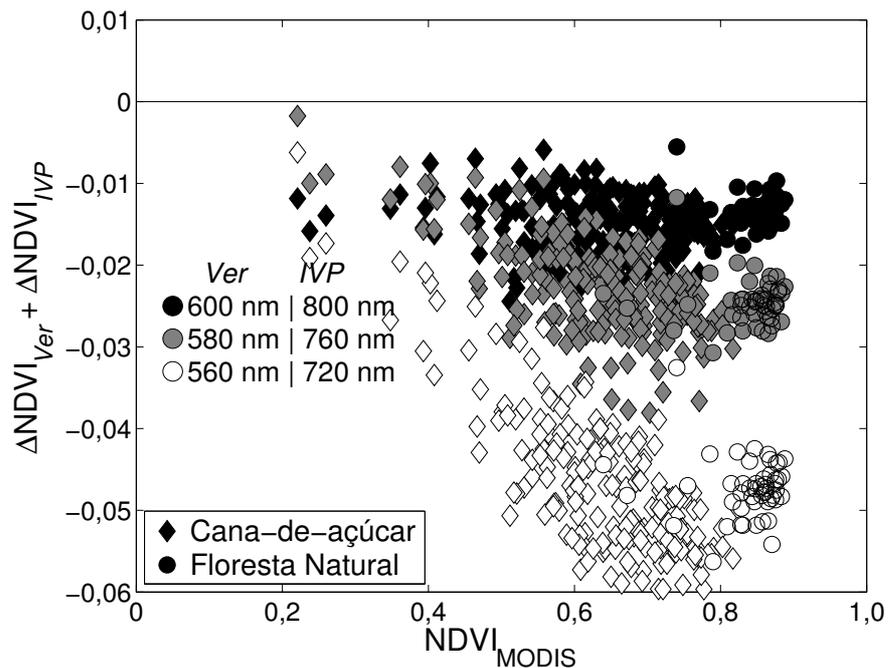


Figura 15 – Resultado da soma de $\Delta NDVI$ para a característica do pico do verde em *Ver* e de $\Delta NDVI$ para a característica da borda do vermelho em *IVP*.

Na Figura 16, são mostrados os resultados das médias das diferenças relativas do NDVI (ver Equação 63) das amostras de cana-de-açúcar e de floresta natural, com a inclusão no NDVI das características espectrais nas bandas do *Ver* e *IVP*, para a análise considerou os valores em módulo. Observa-se que o padrão de comportamento das diferenças relativas, para os alvos de cana-de-açúcar e de floresta natural com a inclusão de características espectrais na banda do *Ver*, é semelhante, com a maioria das diferenças negativas (Figura 16a). Os maiores valores são observados com a inclusão de características espectrais da borda do vermelho, chegando a -18% quando esta banda é aumentada até os 730 nm. Para esta mesma banda, observa-se que há um aumento linear na diferença relativa do NDVI para a cana-de-açúcar à medida que a banda original do MODIS (620 nm a 670 nm) passa a conter informação espectral da região do pico do verde. Para a floresta natural com o aumento da banda *Ver* para conter a característica espectral do pico do verde, há um aumento da diferença relativa do NDVI até a banda conter informação espectral referente a 600 nm (-4%), e a partir deste ponto há um decréscimo da diferença relativa do NDVI. Devido à amplitude de valores do NDVI da cana-de-açúcar ser maior, os desvios-padrão de $\% \Delta NDVI$ desta cultura são maiores que os de floresta natural. O padrão de comportamento do $\% \Delta NDVI$ para

cana-de-açúcar e floresta natural, quando incluída características espectrais da banda do *Ver* do MODIS, está de acordo com os resultados de Miura et al. (2006) para os alvos de floresta primária e savana arbórea (“Savanna woodland”).

Para a banda *IVP* do MODIS (841 nm a 876 nm) com a inclusão de características espectrais (Figura 16b), observa-se que as maiores $\% \Delta \text{NDVI}$ ocorrem para a cana-de-açúcar, quanto mais a característica espectral da borda do vermelho é incorporada à banda *IVP* do MODIS, maiores são os valores de $\% \Delta \text{NDVI}$. Já para a floresta natural há um acréscimo na $\% \Delta \text{NDVI}$ com a incorporação na banda *IVP* de característica espectral da borda do vermelho até o comprimento de onda de 800 nm de -0,7% (valor absoluto); até o comprimento de onda de 760 nm $\% \Delta \text{NDVI}$ diminui para 0,1%; e até o comprimento de onda de 720 nm volta a aumentar (-0,5%). Quando a característica da região de absorção de água na folha é incorporada à banda *IVP*, observa-se que, para a cana-de-açúcar a $\% \Delta \text{NDVI}$ é de 0,6% com a incorporação desta característica espectral até o comprimento de onda de 900 nm em *IVP*, depois diminui para 0,4% quando a banda passa a incorporar características espectrais até o comprimento de onda de 1.000 nm. Para a classe floresta natural, $\% \Delta \text{NDVI}$ aumenta à medida que mais se incorpora à característica da região de absorção de água na folha, de 0,4% (até 900 nm) a 1,0% (1.000 nm). Este último resultado não é o esperado, pois para alvos de vegetação, quando incorporada a característica espectral dessa região de absorção de água na folha, espera-se $\% \Delta \text{NDVI}$ sejam negativos, pois a incorporação dessa característica à banda do *IVP* resultaria em menores valores de reflectância que aqueles do MODIS, e assim o NDVI também deveria ter menores valores. O desvio-padrão da cana-de-açúcar é maior do que o da floresta natural, mais uma vez por ser maior a amplitude do NDVI da cana-de-açúcar.

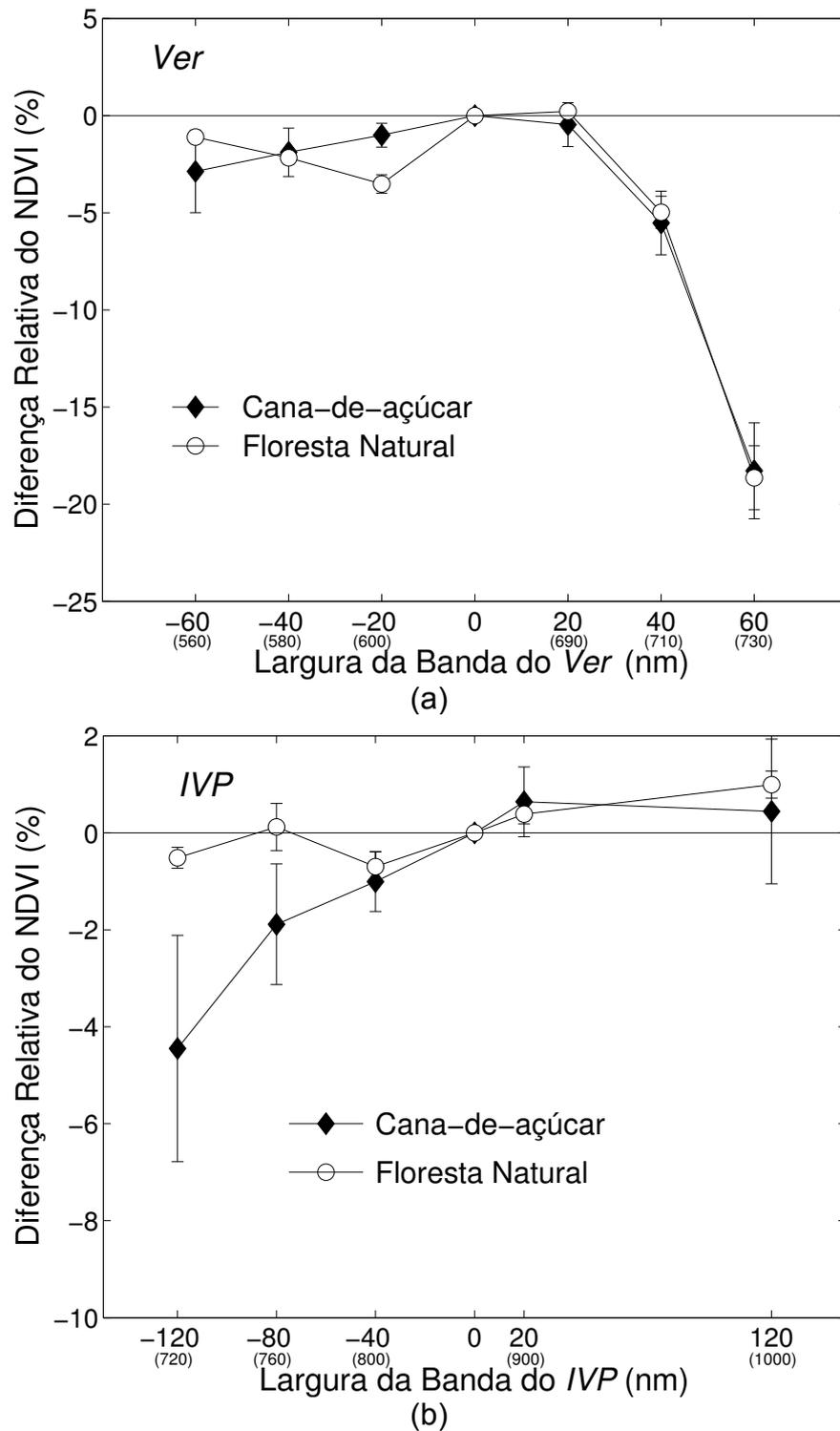


Figura 16 – Percentagem da diferença relativa do NDVI, e o desvio-padrão para a cana-de-açúcar e floresta natural, nas bandas do *Ver* (a) e do *IVP* (b).

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizadas, com o auxílio de dados hiperespectrais Hyperion sob alvos de cana-de-açúcar e floresta natural, as avaliações: *i*) relações das bandas do vermelho, do infravermelho próximo e do NDVI entre os sensores ETM⁺, MODIS e HRV; *ii*) da influência na banda do vermelho, do infravermelho próximo e no NDVI das características espectrais da região do pico do verde, borda do vermelho e absorção da água na folha. As conclusões são as seguintes:

- há uma correlação significativa para os sensores analisados para a banda do *Ver*, o mesmo não ocorrendo para a banda do *IVP*. Tais respostas estão associadas ao tamanho da largura e posição central das bandas desses sensores;
- para a relação entre o NDVI dos diferentes sensores, a maior variação da diferença do NDVI ocorre entre o par ETM⁺ e MODIS, e a menor variação da diferença é para o par HRV e MODIS;
- foram estabelecidas equações de translação entre sensores para os alvos estudados, sendo que do NDVI_{ETM+} para NDVI_{MODIS} e do NDVI_{ETM+} para NDVI_{HRV}, há bom ajuste, ambos com $R^2=0,71$, enquanto que a translação do NDVI_{HRV} para NDVI_{MODIS} o ajuste é inferior ($R^2=0,31$);
- quanto ao impacto das características espectrais nas bandas individuais, verifica-se que à medida que elas são incorporadas nas bandas há um aumento das diferenças de reflectância, quando comparadas às bandas originais;
- já a característica espectral frente ao NDVI verifica-se que à medida que se incorporam as características nas bandas individuais, o Δ NDVI aumenta (sempre comparando com NDVI_{MODIS}).

6. REFERÊNCIAS

- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: **Anuário Estatístico** – **2006**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/conheca/anuario_2006.asp>. Acesso em: 6 fev. 2007.
- APAN, A.; HELD, A.; PHINN, S.; MARKLEY, J. Detecting sugarcane orange rust disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 2, p. 489-498, 2004.
- ASRAR, G. Introduction. In: ASRAR, G. **Theory and applications of optical remote sensing**. New York: J. Wiley & Sons, 1989. cap. 1, p. 1-13.
- BARNES, W. L.; PAGANO, T. S.; SALOMONSON, V. V. Prelaunch characteristics of the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1088–1100, 1998.
- BLACKBURN, G. A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 4, p. 657-675, 1998.
- CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing**. 2. ed. New York: The Guilford Press, 1996. 622p.
- CARTER, G. A. Reflectance wavebands and indices for remote estimation of photosynthesis and stomatal conductance in pine canopies. **Remote Sensing of Environment**, v. 63, p. 61–72, 1998.
- DAHER, R. F. et al. Introdução e avaliação de 12 gramíneas forrageiras em Campos dos Goytacazes, RJ. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, Edição Especial, p. 1575-1579, 2002.
- DALMOLIN, R. S. D. et al. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, v. 35, n. 2, p. 481-489, 2005.

DATT, B. et al. Preprocessing EO-1 Hyperion hyperspectral data to support the application of agricultural indexes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6, p. 1246-1259, 2003.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <<http://www.cdbrasil.cnpm.embrapa.br/txt/landsat.htm>>. Acesso em: 15 jan. 2007.

EPIPHANIO, J. C. N.; HUETE, A. R. Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in alfalfa. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, p. 351-360, 1995.

EPIPHANIO, J. C. N. et al. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 31, n. 6, p. 445-454, 1996.

FRIEDL, M. A. et al. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 287–302, 2002.

GALVÃO, L. S.; VITORELLO, I.; A. FILHO, R. Effects of band positioning and bandwidth on NDVI measurements of tropical savannas. **Remote Sensing of Environment**, v. 67, p. 181-193, 1999.

GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; TISOT, D. A. Discrimination of sugarcane varieties in southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, p. 523-534, 2005.

GAO, B. C. A practical method for simulating AVHRR-consistent NDVI data series using narrow MODIS channels in the 0.5–1.0 μm spectral range. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 4, p. 1969-1975, 2000.

GAUSMAN, H. W. Leaf reflectance of near-infrared. **Photogrammetric Engineering**, v. 40, n. 2, p. 183-191, 1974.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J. MODIS NDVI optimization to fit the AVHRR data series-spectral considerations. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, p. 343-350, 1998.

GONG, P. et al. Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from Hyperion hyperspectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 41, n. 6, p. 1355-1362, 2003.

HUETE, A. R. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195–213, 2002.

HUETE, A. R.; MIURA, T.; GAO, X. Land cover conversion and degradation analyses through coupled soil–plant biophysical parameters derived from hyperspectral EO-1 Hyperion. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6, p. 1268-1276, 2003.

IMSPEC, 2001. ACORNTM user's guide. Analytical Imaging and Geophysics. Boulder, CO, USA. 64 p.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: **Canasat**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/mapdsr/intro.htm>> . Acesso em: 05 fev. 2007.

IRONS, J. R.; WEISMILLER, R. A.; PETERSEN, G. W. Soil reflectance. In: ASRAR, G. **Theory and applications of optical remote sensing**. New York: J. Wiley & Sons, 1989. cap. 3, p. 66-106.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2007. 592 p.

JUSTICE, C. O. et al. An overview of MODIS land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 3–15, 2002.

KING, M. D. et al. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS). **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 1, p. 2–27, 1992.

MADEIRA NETTO, J. S. Comportamento espectral dos solos In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. cap. 4, p. 127-154.

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. 2. ed. New York: J. Wiley & Sons, 1999. 210 p.

MIURA, T; HUETE, A. R.; YOSHIOKA H. An empirical investigation of cross-sensor relationships of NDVI and red/near-infrared reflectance using EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, n. 2, p. 223–236, 2006.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2001. 250 p.

NASA – National Aeronautics and Space Administration: Disponível em: <<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/mrsid.pl>>. Acesso em: 20 mar. 2006.

PESAGRO - Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro: **Informe Técnico**. Disponível em: <<http://www.pesagro.rj.gov.br/cana.html>>. Acesso em: 8 jan. 2007.

PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. cap. 5, p. 157-199.

RUDORFF, B. F. T. et al. Imagens de satélite no mapeamento e estimativa de área de cana-de-açúcar em São Paulo: ano-safra 2003/04. **Agricultura São Paulo**, v. 52, n. 1, p. 21-39, 2005.

SALOMONSON, V. V. et al. MODIS: advanced facility instrument for studies of the earth as a system. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 27, n. 2, p. 145–153, 1989.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing, models and methods for image processing**, 2. ed. San Diego: Academic Press, 1997. 522 p.

SELLERS, P. J. Vegetation-canopy spectral reflectance and biophysical processes. In: ASRAR, G. **Theory and applications of optical remote sensing**. New York: J. Wiley & Sons, 1989. cap. 8, p. 297-335.

SOUSA, C. L. de; PONZONI, F. J. Avaliação de índices de vegetação e de bandas TM/Landsat para estimativa de volume de madeira em floresta implantada de pinus spp. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 9, 1998, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. p. 1537-1547. CD-ROM.

SOUZA, M. S. **Caracterização do intervalo hídrico ótimo de três solos da região norte fluminense**. 2004. 72 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal)-Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Campos dos Goytacazes–RJ.

STEVEN, M. D. et al. Intercalibration of vegetation indices from different sensor systems. **Remote Sensing of Environment**, v. 88, p. 412-422, 2003.

TEILLET, P. M.; STAENZ, K.; WILLIAMS, D. J. Effects of spectral, spacial, and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices of forested regions. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, p. 139-149, 1997.

THENKABAIL, P. S. et al. Hyperion, IKONOS, ALI and ETM⁺ sensors in the study of African rainforests. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p. 23-43, 2004a.

THENKABAIL, P. S. et al. Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, p. 354-376, 2004b.

TRISHCHENKO, A. P.; CIHLARA, J.; LIA, Z. Effects of spectral response function on surface reflectance and NDVI measured with moderate resolution satellite sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, p. 1-18, 2002.

TURNER, D. P. et al. Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. **Remote Sensing of Environment**, v.70, p. 52–68, 1999.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar: **Cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.portalunica.com.br/portalunica/?Secao=UNICA%20em%20açãõ>>. Acesso em: 06 fev. 2007.

USGS – U. S. Geological Survey: **EO-1 User's Guide**. Disponível em: <http://eo1.usgs.gov/userGuide/hyp_prod.html>. Acesso em: 12 fev. 2006.

VERBESSELT, J. et al. Monitoring herbaceous biomass and water content with SPOT VEGETATION time-series to improve fire risk assessment in savanna ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v. 101, p. 399-414, 2006.

WAN, Z. et al. Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 163-180, 2002.

XAVIER, A. C.; VETTORAZZI, C. A. Mapping leaf area index through spectral vegetation indices in a subtropical watershed. **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 1661–1672, 2004.

XIAO, J.; MOODY, A. A comparison of methods for estimating fractional green vegetation cover within a desert-to-upland transition zone in central New Mexico, USA. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, p. 237-250, 2005.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)