UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GEOBOTÂNICA POR SENSORIAMENTO REMOTO
EM FLORESTAS TROPICAIS E A ABORDAGEM
SISTÊMICA: UMA FERRAMENTA AUXILIAR NO
MAPEAMENTO GEOLÓGICO REGIONAL E NA
PROSPECÇÃO MINERAL**

Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida

Tese apresentada ao concurso para obtenção do título de Livre-Docente junto ao Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo na área de conhecimento de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

SÃO PAULO
2005

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GEOBOTÂNICA POR SENSORIAMENTO
REMOTO EM FLORESTAS TROPICAIS E A
ABORDAGEM SISTÊMICA: UMA FERRAMENTA
AUXILIAR NO MAPEAMENTO GEOLÓGICO
REGIONAL E NA PROSPECÇÃO MINERAL**

Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida

DEDALUS - Acervo - IGC

30900018124

Tese apresentada ao concurso para obtenção do título de Livre-Docente junto ao Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo na área de conhecimento de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

SÃO PAULO
2005

Sumário

Sumário.....	i
Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tabelas.....	iv
Agradecimentos	v
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1. A geobotânica: definição e história.	2
1.2. Estrutura e objetivos desta tese.....	6
Capítulo 2 – A geobotânica e o comportamento das coberturas vegetais no espectro óptico: uma revisão.....	7
2.1. Histórico da geobotânica no Brasil.....	8
2.2. - Formas de expressão das anomalias geobotânicas.....	12
2.3. Comportamento espectral de coberturas vegetais.....	16
2.3.1 – Introdução.....	16
2.3.2 - Propriedades ópticas das folhas	17
a) O visível (400 a 700nm)	19
b) O infravermelho próximo (700 a 1300nm)	22
c) O infravermelho ondas curtas (1300 a 2500nm)	22
d) Propriedades direcionais das folhas.....	25
e) Análise dos fatores que afetam as propriedades ópticas das folhas	25
2.3.3 - Propriedades ópticas dos outros órgãos vegetais	30
2.2.3. Propriedades ópticas das coberturas vegetais e sua aplicabilidade na geobotânica por sensoriamento remoto.....	32
Capítulo 3 – A abordagem sistêmica: contribuição metodológica para a geobotânica por sensoriamento remoto em florestas tropicais e equatoriais.....	35
3.1 - A diferença conceitual entre a geobotânica em climas temperados e tropicais-equatoriais.....	36
3.1.1 - Caracterização da distribuição de espécies arbóreas na Floresta Amazônica.....	36
3.1.2 - A influência de solos e geologia na Mata Atlântica.....	41
3.1.3 - A forma de expressão geobotânica dominante em florestas tropicais úmidas e a necessidade de informação sistêmica	47
3.2 - O conjunto de métodos da abordagem sistêmica	51
3.2.1. Informações espectrais da vegetação utilizadas	51

3.2.2. As técnicas de processamento digital	53
a) As razões de bandas.....	53
b) A análise por principais componentes.....	57
c) Introdução da imagem de albedo.....	62
3.2.3 A aplicabilidade do método à Floresta Amazônica.....	66
3.2.4. A abordagem sistêmica frente a técnicas semelhantes	67
3.2.5. Histórico de experiências de aplicações da abordagem sistêmica.....	68
a) A origem do método.....	68
b) Aplicação do método em imagem hiperespectral das savanas do	70
Brasil Central (Anexo 1).	
c) Aplicação agrícola do método (Anexo 2).....	71
Capítulo 4 – Aplicação da abordagem sistêmica na prospecção de depósitos epitermais	73
na Amazônia: o caso de um depósito high sulfidation	
4.1. Introdução.....	74
4.2 - Geologia das mineralizações auríferas.....	76
4.3 - Materiais e métodos.....	78
4.4 - Resultados e Discussão.....	80
Capítulo 5 – Análise crítica da aplicação prévia da geobotânica nas florestas brasileiras e	93
do potencial de aplicação da abordagem sistêmica e métodos assemelhados.....	
Capítulo 6 – Conclusões.....	97
Referências citadas	99
Anexo 1 - <i>Principal component analysis applied to feature-oriented band ratios of</i>	
<i>hyperspectral data: a tool for vegetation studies</i>	115
Anexo 2 - <i>ASTER and Landsat ETM+ Images Applied to Sugarcane Yield Forecast</i>	
.....	135

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Representação esquemática da interação da radiação com os tecidos de uma folha de dicotiledônea	18
Figura 2.2 - Classes de modelos para abordar as propriedades ópticas das folhas em ordem de complexidade.....	19
Figura 2.3 – Espectros dos principais pigmentos foliares.	20
Figura 2.4 - Picos de absorção de Fv em 660 nm e Fve em 730 nm.....	21
Figura 2.5 – Indução da fotoconversão do fitocromo Fv em Fve pela presença de luz e o processo inverso	21
Figura 2.6 – Espectro de reflectância de folha seca (topo) e com crescente adição de água	23
Figura 2.7 – Espectros de absorção de proteína, celulose, hemicelulose, amido, açúcar e lignina em folhas secas.	24
Figura 2.8 – Detalhe da Figura anterior, no intervalo de 2150 e 2350 nm.....	24
Figura 2.9 – Reflectância e transmitância bidirecional em coordenadas polares para ângulos de iluminação de 0°, 20°, 30°, 40°, e 60°.....	26
Figura 2.10 – Distribuição angular da radiação refletida e transmitida por uma folha na região espectral do azul (485nm) e do infravermelho próximo (731nm) para ângulos de incidência de 0° e 60°.....	26
Figura 2.11 – Comportamento de fluxo luminoso perpendicular à superfície da folha ao atravessar diferentes tecidos.....	27
Figura 2.12 – Espectros de reflectância de uma folha de trigo durante a senescência	28
Figura 2.13 – Espectros de reflectância de folhas, flores, madeira e casca seca de duas espécies. Os espectros estão deslocados verticalmente para visualização e a reflectância (%) está anotada para todos os espectros em 1,3 µm.....	31
Figura 3.1- Perfil esquemático dos perfis florestais I, sobre metabasitos sem alteração hidrotermal e II, sobre cordierita-granada- cummingtonita anfíbolito.....	44
Figura 3.2 – Distribuição de espécies arbóreas coletadas nos perfis florestais, classificadas de acordo com seu estágio sucessional.....	45
Figura 3.4 – Índices espectrais baseados em razões de bandas do sensor Aster, respectivamente entre as bandas 3/1(A), 3/2(B), 3/4(C), 3/5(D), 3/7(E) e 3/(5*6*7*8*9)(F).....	55
Figura 3.5 – Imagens das principais componentes geradas pela APC sobre os seis índices espectrais utilizados.	60
Figura 3.6 – Espectros de absorção de compostos bioquímicos entre 2150 e 2350 nm.....	62
Figura 3.7 – Região da Província Aurífera do Tapajós (PA). Em A, PCs 243 em RGB de uma APC sobre um conjunto de seis índices construídos sobre imagem ASTER. Em B, a mesma imagem com a presença de componente de intensidade dada pela PC1 de APC sobre as bandas Aster 2, 3 e 4. Abaixo um segmento de Mapa Geológico em 1:250.000 da CPRM, com parte das folhas Mamãe Anã e Caracol.....	64
Figura 3.8 – Composições coloridas em RGB: (A) CP2 CP4 CP3; (B) CP2 CP1 CP3 e CP1 CP2 CP3. Considerar que a imagem (A) tem 34,35% da variância total e as em (B) e (C) têm 92,92%.....	65
Figura 3.9 – Fluxograma com seqüência dos processamentos digitais utilizados.....	66

Figura 3.10 – Imagem da região de Kourou, Guiana Francesa: NDVI em pseudo cor (A); CCFC dos 3 índices utilizados (B) e das CPs 1 4 8 (C), 3 5 6 (D), 2 3 6 (E) e 2 3 5 (F).....	69
Figura 3.11 – Composição colorida das CPs 2, 3 e 5 em RGB e Mapa de Vegetação da região.....	70
Figura 4.1 – Fluxograma com sequência dos processamentos utilizados na detecção de zonas de alteração hidrotermal pelo comportamento espectral de floresta densa.....	79
Figura 4.2 – CP1 das bandas TM3, 4, 5 e 7 (A); razões das bandas TM 2/1 (B), 2/3 (C), 4/1 (D), 4/2 (E), 4/3 (F), 4/5 (G), 4/7 (H) e 4/5*7 (I).....	81
Figura 4.3 – PC1 de APC sobre as bandas TM4, TM5 e TM7, informando do albedo do dossel das florestas e da geomorfologia.....	84
Figura 4.4 – Composição colorida das CPs 4 7 8 em RGB em A e com superposição de imagem de albedo em B..	84
Figura 4.5 - Filtro proporcional puro aplicado às imagens das CPs 4, 7 e 8.....	85
Figura 4.6 – Composições coloridas falsa cor das CPs 3, 1 2 e 8 -4 e 7 obtidas do conjuntos dos oito índices em RGB (A e B), com a CP1 das bandas TM 3, 4, 5 e 7 em canal de intensidade (C e D) e com o filtro proporcional de 11 x 11 elementos da Figura 4.5 (E e F)....	86
Figura 4.7 – Segmento de imagem TM Landsat de área mais ampla com o processamento utilizado na Figura 4.6F, referente à área indicada pela seta. No retângulo branco, a área da Figura 4.8.....	87
Figura 4.8 – Detalhe da Figura 4.7.....	88
Figura 4.9 – Imagem da Figura 4.6 F sobre MDT observada de quatro diferentes direções. O Norte aproximado está indicado.....	89
Figura 4.10 – Interpretação parcial da imagem final do processamento baseado na abordagem sistêmica, à luz dos pontos feitos em campo por Caetano Juliani e das imagens em 3 D. Observar que os contatos das zonas de alteração 4 e 5 não estão fechado por ausência de informação de campo.....	90
Figura 4.11 – Em A imagem de albedo com setas mostrando áreas sem cobertura vegetal (em vermelho), área de alto albedo em floresta (amarelo) e área fortemente sombreada. Em B imagem NDVI mostrando, em tons quentes, alta intensidade do platô do infravermelho próximo (associado às folhas fotossinteticamente ativas) e em tons frios solo exposto ou resposta espúria em sombra.....	91

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Alterações em plantas afetadas por mineralizações.....	12
Tabela 3.1 – Resultado de análises de solos coletados nas parcelas exploratórias.....	43
Tabela 3.2 – Matriz de correlação entre as razões de bandas de imagem Aster de parte da Província Aurífera de Tapajós.....	54
Tabela 3.3 – Índices espectrais e respectivos sensores utilizados neste capítulo e nos anexos bem como a autoria dos índices.....	56
Tabela 3.4 – Intervalos de comprimentos de onda em nanômetros relativos das bandas do espectro refletido dos sensores Aster (satélite Terra) e TM-ETM+ (satélites Landsat 5 e 7).....	57
Tabela 3.5 – Matriz de autovalores, expressando a porcentagem da variância total do conjunto de seis índices presente em cada componente principal.....	58
Tabela 3.6 – Matriz de autovetores, expressando o peso da participação (em módulo) de cada imagem (no caso de cada índice) na composição de cada componente principal.	61
Tabela 4.1 – Matriz de Correlação entre os índices espectrais utilizados em imagem TM Landsat 5. A correlação média refere-se apenas à de cada índice com os demais, excluindo-se a correlação total com o próprio índice.....	81
Tabela 4.2 – Matriz dos autovetores, com o cálculo das covariâncias e loadings médios (em módulo).	83
Tabela 4.3 - Matriz de autovalores, informando da porcentagem da variância total do conjunto de 8 índices explicado por cada PC.....	83

Agradecimentos

Agradeço aos diversos bons amigos e colegas que me incentivaram na vida acadêmica, inclusive a fazer esta Livre-Docência. Lista-los é desnecessário, pois os de postura companheira ao longo da vida sabem que o foram: sintam-se muito agradecidos, pois sem vocês, no mínimo, esta tese não existiria.

Sem demérito aos demais, tenho de citar os nomes de:

Caetano Juliani, que em 1994 me perguntou da possibilidade de detecção, em imagens orbitais, de anomalias geobotânicas que encontrara do Grupo Serra do Itaberaba. Dessa questão iniciou-se uma cooperação científica que me levou a adotar a geobotânica por sensoriamento remoto como linha de pesquisa.

Carlos Roberto Souza Filho, que, desde que lhe contei da abordagem sistêmica, sempre me incentivou enormemente a desenvolvê-la.

Agradeço também, e especialmente, à minha parceira de vida, Maria Helena, e aos meus filhos Guilherme e Juliana, todos os três mui companheiros nas delícias e nos apertos que a vida nos apronta. E aos meus pais, já há tantos anos falecidos, por terem ajudado a despertar em mim o hábito de observar, com curiosidade, a natureza.

Capítulo 1

Introdução

- 1.1. A geobotânica: definição e história.
- 1.2. A geobotânica na Brasil: histórico e possibilidades
- 1.3. Estrutura e objetivos desta tese

1.1- A geobotânica: definição e história.

O termo geobotânica é utilizado em diferentes acepções. Na que é mais comum na literatura em geociências e sensoriamento remoto, designa um método de prospecção mineral baseado nas alterações da cobertura vegetal devidas à presença de uma mineralização (Brooks, 1972; Drury, 2001; Ustin *et al.*, 1999). Mas muitos pesquisadores o consideram sinónimo de fitogeografia ou biogeografia, um ramo da geografia (Fosberg, 1976) ou da ecologia (Heshmatti e Squires, 1997). Segundo estes últimos autores a geobotânica é uma abordagem botânica que combina geomorfologia e solos com a florística e fisionomia das coberturas vegetais para classificar unidades da paisagem e da vegetação que suportam.

A abordagem que se dá historicamente ao tema, entretanto, converge com a correlação com a geologia: como citam Ustin *et al.* (1999), nos primeiros trabalhos da literatura ecológica moderna, em fins do século XIX, descrevia-se a relação entre a geografia das plantas e os solos, incluindo associações de plantas com solos de composição química particular. A observação da relação entre a cobertura vegetal e o meio ambiente físico é intuitiva e decerto vem das origens de nossa espécie e não é impossível que a tenha antecedido: o *Homo neanderthalensis* possivelmente já se utilizava desta relação na busca de rochas úteis a sua sobrevivência ou, ao contrário, procurava determinados vegetais em ambientes caracterizados por determinadas rochas. Mas a análise da vegetação como método auxiliar na prospecção mineral provavelmente é conhecida pela humanidade desde que esta passou a procurar minérios metálicos, já que a composição química destes se afasta muito da de solos comuns, o que se traduz em diferenças mais sensíveis na cobertura vegetal. Concretamente, entretanto, há apenas pouco mais de 2.000 anos, sob o reinado de César Augusto, esta relação foi descrita pelo pesquisador romano Vitruviusio (Brooks, 1983). Posteriormente esta análise é sistematizada por Georgius Agrícola, considerado na cultura ocidental como o criador da geologia. Aquele pesquisador cita, em *De Re Metallica* (publicado em latim em 1556), haver senescência precoce e nanismo de plantas crescidas sobre corpos de minério (Ustin *et al.*, 1999), tal como irão repetir muitos autores contemporâneos. Apesar deste longo histórico, de acordo com o clássico trabalho de Brooks (1972) a aplicação de métodos biológicos na prospecção mineral é considerada muito complexa, por envolver a resposta de plantas ao ambiente sob dois aspectos: a geobotânica e a biogeoquímica. A geobotânica baseando-se na pesquisa visual da cobertura vegetal e a biogeoquímica na análise química de plantas ou húmus. A coletar fragmentos de plantas para análise química, o geólogo prefere adotar a geoquímica e análise visual da vegetação exige uma acuidade e conhecimentos também normalmente ausentes do geólogo. Mesmo assim a geobotânica esteve presente na literatura, particularmente na da antiga União Soviética e na dos

EUA, como mostra Brooks (1972) em levantamento dos trabalhos com este método publicados entre 1857 e 1968: de um total de 199 publicações, a União Soviética colabora com 89 e os EUA com 61, restando 49 para os demais países.

Com a disponibilidade das imagens orbitais de sensoriamento remoto multiespectral no domínio óptico, a partir de 1972, a informação geológica presente na vegetação passa a ser, em princípio, passível de utilização sem a necessidade de equipes multidisciplinares ou conhecimentos de botânica para o prospector: interessa ao geólogo a existência de respostas espectrais diferenciadas e não as causas florísticas ou fisionômicas dessas diferenças. As primeiras imagens orbitais comerciais foram obtidas pelo sensor **Multi Spectral Scanner (MSS)** do satélite ERTS 1, depois renomeado para Landsat 1. O projeto do sensor escolheu os comprimentos de onda a serem abrangidos por suas 4 bandas em função do comportamento espectral da vegetação. Os geólogos, já habituados há décadas com o uso de fotografias aéreas pancromáticas, passam a utilizar aquelas novas imagens com voracidade. E surge um novo grupo de pesquisadores voltados à geobotânica: não mais botânicos, ecólogos ou naturalistas, mas geólogos que se especializavam em sensoriamento remoto.

O sensoriamento remoto geológico *sensu strictu* foi julgado, a princípio, ser uma panacéia, o que evidentemente não se confirmou, pois, como todo método, tem limitações. Por conta do infundado entusiasmo inicial, a técnica enfrentou um período de quase ostracismo. Com a geobotânica por sensoriamento remoto parece ter acontecido o mesmo e o entusiasmo inicial se arrefeceu em poucos anos. Isto ocorre quando diversos autores começam a constatar um dos maiores problemas do método, muito discutido, entre outros, nos trabalhos de Brooks (1972, 1983), Labovitz, Masuoka e Bell (1983), Schwaller (1984): a freqüente falta de um padrão definido nas respostas das coberturas vegetais frente a solos anômalos, o que vai se refletir também na dificuldade de se replicar experiências. Ou seja, muitas relações geobotânicas podem ser válidas apenas para as condições específicas do local onde foram descritas. Este tema foi amplamente discutido pelo autor em 1998 com Robert Green (NASA-JPL, EUA) e em 1999 com Marie-José Lefèvre (CNES – Toulouse, França), com as mesmas conclusões. A estes aspectos considera o autor dever se somar a existência de um fator abiótico extremamente atuante nas coberturas vegetais e independente da geologia e pedologia: a topografia, particularmente a orientação da vertente frente à iluminação solar, como descrito, entre outros, por Florinsky e Kuryakova (1996).

Como a maior parte do planeta tem coberturas vegetais e como estas são densas justamente em regiões de difícil acesso e muitas vezes com potencial mineral, a geobotânica por sensoriamento remoto, enquanto ferramenta de prospecção mineral, tem grandes perspectivas

por sua capacidade de otimizar os trabalhos de campo e gerar alvos. E com a crescente disponibilidade de sensores orbitais multiespectrais com melhor resolução espectral e sensores hiperespectrais, bem como de avanços nas técnicas de processamento digital de imagens, aumentam as possibilidades tanto na detecção de estresses como de se identificar florestas florística e fisionomicamente dissimilares através das respostas em imagens.

Uma abordagem interessante é apresentada em Paradella e Bruce (1990), que dividem os estudos geobotânicos em duas categorias, em função de sua escala: a Geobotânica de Reconhecimento e a Geobotânica de Alvo. Na primeira as anomalias são caracterizadas por mudanças fisionômicas e taxonômicas que sejam passíveis de detecção por sensores de baixa a média resolução espacial e espectral. Na segunda abordagem o objetivo de busca são variações nas plantas e requerem sensores de alta resolução espectral e espacial. Tais variações podem ser morfológicas, fisiológicas ou fenológicas. Considerando sensores orbitais já operacionais neste início de século XXI, embora ainda não disponibilizando largamente seus produtos, pode-se prever para breve poder-se trabalhar, na geobotânica de alvo, com sensores hiperespectrais similares ao Hyperion (NASA, 220 bandas entre 0,4 e 2,5 μ m) ou PROBA (lançado pela ESA ou European Space Agency, com 200 bandas no mesmo intervalo de comprimentos de onda). Estes sensores, embora tendo uma resolução espacial de apenas 30m, permitem identificar, em acréscimo ao passível de obtenção por sensores adequados a uma abordagem regional (Landsat TM e ETM+, IRS, ASTER, CBERS etc), variações de numerosas características de coberturas vegetais, como conteúdo em diversos pigmentos e traços de informação de compostos bioquímicos foliares. Com isso uma *geobotânica de alvo* feita com sensores hiperespectrais, seja sobre uma floresta estressada (ou simplesmente dissimilar, como se discute à frente), pode definir melhor alvos ou prospectos para os trabalhos de campo. Uma resolução espacial da ordem de 10 a 15m seria mais adequada na detecção de variações espacialmente menos importantes e não perderia o necessário caráter sinóptico, que inexistiria em sensores de *pixels* muito menores. A informação geobotânica é indireta e se caracteriza numa comunidade de plantas, representada numa área de dossel. Um pixel de dimensões muito restritas pode restringir a aplicabilidade do método.

Com a disponibilidade de avançado ferramental de sensoriamento remoto, interessarão menos, à equipe que faz prospecção mineral, as causas de dissimilaridades nas florestas, do que sua localização dentro de um determinado ambiente geológico. Interessará apenas a informação de que florestas dissimilares têm respostas espectrais diferenciadas, gerando zonas homólogas nas imagens que devem ser analisadas sob critérios geológicos, otimizando os trabalhos de campo e podendo chegar a indicar prospectos. A ciência continuará avançando e no futuro a

geobotânica por sensoriamento remoto poderá avançar enormemente, mas no curto prazo a técnica já pode ser considerada operacional enquanto ferramenta de prospecção mineral, posto que a detecção de florestas dissimilares em imagens multiespectrais é já relativamente consolidada e os primeiros resultados com a abordagem sistêmica, apresentada nesta tese, são muito positivos na detecção de fácies de alteração hidrotermal associada a depósito aurífero epitermal na Província Aurífera do Tapajós.

Estrutura e objetivos desta tese

Esta tese traz uma revisão da literatura sobre o histórico das aplicações de geobotânica por sensoriamento remoto no Brasil e no comportamento espectral da vegetação em geral e frente a mineralizações, temas necessários a uma análise sobre a geobotânica. O seu cerne, entretanto, é a proposição de metodologia de processamento digital de imagens de sensoriamento remoto óptico. Nesta proposição é necessária a discussão das diferenças conceituais entre as alterações na vegetação em função do substrato rochoso em florestas tropicais e equatoriais e as de climas temperados ou frios. Nesta discussão, feita em parte sobre a literatura ecológica, mas principalmente sobre dados obtidos em pesquisa coordenada pelo autor, emerge a questão das relações entre a presença de alteração hidrotermal e a rica biodiversidade dos climas quentes e úmidos, a qual permite uma muito mais efetiva seleção por concorrência entre espécies que em biomas de pobre biodiversidade. Este aspecto é fundamental para o desenho de método de processamento voltado à geobotânica por sensoriamento remoto em climas tropicais-equatoriais, já que irá focar mais diferenças florísticas e fisionômicas de florestas que discretas variações na resposta espectral, por estresses de uma comunidade pouco variável de poucas espécies de vegetação arbórea. A partir desta constatação fica evidente a necessidade de uma abordagem espectral que contemple o maior número possível de propriedades ou processos da vegetação. A seguir apresenta-se o conjunto de passos da proposta metodológica. Ao invés de apresentar breve descrição do método seguida de exemplos de aplicação, decidiu-se apresentar o método e os resultados que vão sendo obtidos passo a passo em uma aplicação sobre ampla região de Floresta Amazônica. Considerou-se que, desta forma, a compreensão da proposta pelo leitor seria mais ampla. Como a geobotânica por sensoriamento remoto é amplamente dirigida à prospecção mineral, no capítulo seguinte apresentam-se os resultados, todavia inéditos, da detecção de diferentes fácies de alteração hidrotermal no substrato rochoso da densa floresta na região da Província Aurífera do Tapajós. Ao fim da tese encontram-se, em anexo, duas aplicações do método, em temas e regiões muito diferenciadas entre si e com o exemplo utilizado na descrição do método e de sua aplicação em prospecção mineral na Amazônia: um trabalho publicado sobre a distinção de vegetação do Brasil Central, em imagens hiperespectrais aeroportadas, e sobre previsão de safra em plantação de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Procura-se, assim, demonstrar a potencialidade do método em pesquisas tão diversificadas e, ao mesmo tempo, mostrar as adaptações necessárias em diferentes condições de aplicação.

Capítulo 2

A geobotânica e o comportamento das coberturas vegetais no espectro óptico:uma revisão

2.1 - Histórico da geobotânica na Brasil

2.2 - Formas de expressão das anomalias geobotânicas

2.3 Comportamento espectral de coberturas vegetais

2.3.1. Introdução

2.3.2. Propriedades ópticas das folhas

2.3.3. Propriedades ópticas dos outros órgãos vegetais

2.3.4. Propriedades ópticas das coberturas vegetais

2.1 - Histórico da geobotânica no Brasil

As dimensões continentais do Brasil e a existência de potencial mineral em extensas áreas ainda recobertas por vegetação natural e com grande dificuldade de acesso tornam o país um destino ideal para ter na geobotânica por sensoriamento remoto (GbSR) uma ferramenta de prospecção mineral e também como fonte de informação preliminar no mapeamento geológico, como advoga Rianza *et al.* (1998). E, no entanto, uma busca na literatura revela pequeno histórico de publicações no tema. Além de pouco numerosos, tais estudos foram feitos em regiões do país com distintas características climáticas e coberturas vegetais: Floresta Amazônica, Mata Atlântica, Cerrados do Brasil Central, caatingas do semi-árido do nordeste e em savanas sub-tropicais do sul. Com isso o já reduzido histórico se torna ainda mais insuficiente para gerar uma cultura no tema, adaptando a técnica às condições e necessidades brasileiras. Em resumo, nossa cultura nesta técnica de prospecção é pequena. Algum desencanto pela técnica pode ser debitado à sua origem, pois foi técnica desenvolvida em regiões de clima temperado e frio e considera um quadro muito diferente do das florestas tropicais úmidas. Isto pode ter levado a comunidade a aceitar que a aplicação de geobotânica em florestas tropicais úmidas não teria o mesmo sucesso, com os poucos resultados positivos sendo devidos ou a condições excepcionais do terreno ou a correlação com os atributos espaciais do terreno, como afirmam Paradella e Bruce (1990).

São raros os trabalhos publicados de aplicação de geobotânica no bioma mais amplo do Brasil, a Floresta Amazônica. A mais antiga pesquisa publicada que se localizou é a de Ribeiro Filho (1961), tratando da prospecção de urânio no norte do Estado do Mato Grosso e é na verdade mais voltado à biogeoquímica, pois não cita variações na cobertura vegetal, mas na composição química de partes de *Xyris sp.* gramínea de expressão regional. A aplicação da GbSR na Amazônia foi inicialmente considerada pouco provável, pela fraca interação rocha-solo-vegetação e a complexidade do ambiente (Lyon, 1975 *apud* Paradella e Bruce, 1990). Nas aplicações do método na região destacam-se os trabalhos de Amaral (1982), Almeida Filho *et al.* (1984), de Paradella (1992) e de Paradella *et al.* (1989, 1994), estes últimos no sudeste da Amazônia, na Província Mineral de Carajás, destacando-se o mais recente, que é considerado um trabalho de referência. Os autores combinaram imagens processadas do sensor TM-Landsat com um Modelo Digital de Terreno, obtendo boas correlações entre as classes de vegetação e a geologia. Concluem os autores que a topografia exerce um papel fundamental na distribuição das classes de vegetação definidas por sensoriamento remoto. Do ponto de vista botânico, concluem ser a fisionomia, e não a florística, o principal elemento das florestas a explicar as diferentes respostas nas imagens. São também raros os trabalhos botânicos sobre mineralizações, como os de Silva e Rosa (1987), sobre a florística na região das jazidas de ferro de Carajás e de Silva e Rosa (1989) que analisam o estrato arbóreo sobre

jazida de cobre na Serra do Carajás. Tais trabalhos, entretanto, por não focar a prospecção mineral, não se baseiam em parcelas vizinhas, sobre minério e encaixantes e colaboram pouco na discussão que aqui se faz.

Nos cerrados do Brasil Central, Almeida Filho (1984) mostra clara associação da cobertura vegetal com fácies greisenizadas ou albitizadas, associadas frequentemente a mineralizações estaníferas em Goiás. Estes autores mostram a associação de campos abertos, esparsamente vegetados (sobretudo por gramíneas) sobre áreas com metassomatismo, vizinhas a outras, mais densamente vegetadas, em solos desenvolvidos sobre biotita granitos. O realce das diferentes coberturas vegetais foi feito a partir da informação espectral do *red edge*, utilizando-se a razão de bandas MSS7/MSS5 (NIR/R), que indica a intensidade do platô do infravermelho próximo. O autor testou o método em imagens da estação de seca e de chuva, com o resultado desta última sendo claramente superior, em constatação importante para a implementação da técnica e a indicação da área alterada foi precisa. Almeida Filho, Vitorello e Correia (1996) obtiveram resultados semelhantes sobre imagens TM Landsat, replicando os excelentes resultados anteriormente obtidos em imagens MSS Landsat. Já Almeida Filho e Vitorello (1996, 1997) fizeram uma fusão de imagem TM com fotografias pancromáticas de mais alta resolução espacial (5 m), permitindo a obtenção de uma imagem classificada ricamente informativa das coberturas vegetais, com as áreas esparsamente vegetadas se associando às rochas alteradas hidrotermalmente. Baseados nas respostas dos espectros obtidos em campo foram selecionadas as bandas 1, 2 e 7 como as mais diagnósticas para os materiais alterados hidrotermalmente. Interessante observar que tiveram melhores resultados com a composição colorida em cores naturais.

Uma curiosa associação geobotânica muito bem descrita no Centro-Oeste do país é a associação da palmeira carandá (*Copernicia alba*) com os lagos salinos e hipersalinos do Pantanal da Nhecolândia, como descrito em Conceição e Paula (1988). Em Almeida *et al.* (2003) confirma-se aquela associação e descreve-se a presença da palmácea bocaiúva (*Acronomia sclerocarpa*), de mesmo porte, mas de ocorrência indiferenciada.

Em trabalho na província fluorítica do Estado de Santa Catarina, Almeida e Ferreira (1989) citam que alterações na vegetação auxiliaram a identificação das falhas transcorrentes associadas às mineralizações em fluorita. Foi verificado em campo que nos pastos havia concentração de samambaia-açu, enquanto nas imagens a menor reflectância na banda TM5 indicava menor teor em água foliar no dossel das florestas. Nos campos do estado do Rio Grande do Sul, onde de uma forma geral os solos são rasos e a topografia plana, a interação rocha-solo-vegetação é intensa, fornecendo indicadores geobotânicos que auxiliam grandemente a utilização do sensoriamento remoto no mapeamento geológico regional na região de Camaquã (Almeida *et al.*, 1995a, 1997). Estes trabalhos

demonstram que a resposta da vegetação é muito correlacionada com as diferentes formações geológicas, embora a resposta a nível de *pixel* seja sempre mista, com participação de solo e rocha. Saldanha e Cunha (2005) apresentam resultados de pesquisa sobre terrenos com ultramáficas serpentinizadas na região de Lavras do Sul. A abordagem destes autores considerou a proposta de Paradella e Bruce (1990) na divisão de abordagem de geobotânica de reconhecimento e de alvo. Na primeira, sobre imagens TM Landsat, encontraram na densidade total da vegetação, realçada pela aplicação do índice NDVI, um dos principais contribuintes na caracterização das ultramáficas. Já a variação taxonômica não foi significativa na resposta espectral, pela baixa densidade das espécies endêmicas. Na geobotânica de alvo os autores reconheceram a presença de uma associação peculiar de espécies vegetais.

O nordeste brasileiro apresenta locais de alta potencialidade para a aplicação da metodologia, pela necessariamente grande interação, quase direta, rocha-vegetação, como mostram Paradella e Bruce (1990) e, principalmente, Paradella e Vitorello (1995), que encontraram excelente correlação de espécies vegetais e da densidade da cobertura vegetal com as rochas subjacentes. Por outro lado as respostas espectrais, principalmente nas imagens adquiridas no período de seca, informam notavelmente da geologia, o que minimiza a aplicabilidade da GbSR.

Carvalho Jr *et al.* (2004) separam a vegetação crescida sobre rochas básicas e ultrabásicas no Complexo de Niquelândia, centro do Estado de Goiás, utilizando as bandas do espectro refletido do sensor Aster (satélite Terra). Os bons resultados foram obtidos particularmente em função da proporção de vegetação fotossinteticamente ativa e não ativa. Por fim, dois trabalhos dos primórdios do sensoriamento remoto brasileiro abordaram o tema sobre a jazida de zinco de Vazante, Minas Gerais, o de Carraro (1971) e o de Nascimento e Chen (1976). Anteriormente Amaral (1968) descrevera a associação de espécies vegetais com minério de zinco daquele depósito, mostrando inclusive, em fotografia de campo, como se distingue facilmente o campo de gramíneas do gênero *Panicum* sobre estéril e do gênero *Heteropogon* sobre minério. Sobre rochas mineralizadas ocorrem ainda espécies dos gêneros *Paspalum*, *Axonopus* e *Gomphrena*, este último de afinidade notável com aquele metal, podendo crescer sobre pilhas de minério. Do ponto de vista da biogeoquímica, os cinco gêneros citados apresentaram altos teores em Zn, notadamente a espécie *Axonopus chrysodactus*, com 14.400 ppm de Zn.

Outros trabalhos isolados, por vezes tomando o termo geobotânica como fitoecologia ou fitogeografia, são encontrados em anais de reuniões científicas. Ocasionalmente pesquisas botânicas, sem utilizar o termo, exploram o tema, como em Godoy (2001) e Sztutman e Rodrigues (2002), trabalhos que serão discutidos no próximo capítulo. Mas o resultado da busca de referências é muito pobre. Sabins (1999) apresenta uma revisão sobre o sensoriamento remoto na prospecção mineral

e, no item destinado à geobotânica, termina o texto dizendo que “There is little research today on remote sensing of vegetation spectra for mineral exploration, to my knowledge. The original researchers are retired or are working on environmental projects”. Em seguida o autor deixa uma porta aberta: “The availability of hyperspectral data may encourage new investigations”. Repetindo o que acontece nos EUA, os pesquisadores Raimundo Almeida Filho e Waldir Renato Paradella, que são os autores brasileiros que mais trabalharam no tema da GbSR, não têm mais se dedicado a ele, tornando ainda mais difícil ter uma perspectiva positiva no curto prazo.

Não parece fácil compreender como uma técnica barata, que se mostrou capaz de fornecer indicações precisas de mineralizações em algumas poucas aplicações, não ser utilizada no Brasil. Embora o país tenha conquistado um espaço importante no sensoriamento remoto internacional, a origem desta comunidade foi focada em poucos pesquisadores. É possível que, caso houvesse trabalhos pioneiros, em equipes mistas de geólogos com botânicos e ecólogos, voltadas a criar as bases para uma geobotânica tropical-equatorial, poderia o quadro ser diferente. É possível, ainda, que opiniões de pesquisadores estrangeiros renomados, ao afirmarem da suposta aleatoriedade da distribuição de espécies na Floresta Amazônica, tenham colaborado para esta ausência de esforço coletivo. Mas, como atrás mencionado, houve um desencanto generalizado com a técnica, indicando que as dificuldades não foram encontradas apenas no Brasil.

O exposto no capítulo 2 desta tese mostra claramente haver nichos com comunidades florística e fisionômica distintas em função de variações nos solos na mais homogênea e de distribuição mas ampla das florestas amazônicas, a floresta de terra firme. Mostra também que o mesmo ocorre na Mata Atlântica. Parece ser claro que a condição essencial que permitiria a aplicação da GbSR existe: a interferência da geologia sobre as coberturas vegetais. A segunda condição necessária é a disponibilidade de imagens. Ora, hoje existe um imenso arquivo histórico de imagens dos satélites da série Landsat, obtidas a um tempo em que depósitos minerais hoje conhecidos, e mesmo já em lavra, eram recobertos por florestas sem intervenção antrópica significativa. É uma fonte imensa de dados a serem explorados. Sendo estabelecidos padrões, buscar respostas similares é muito mais simples! Há um outro aspecto: o sensoriamento remoto vem evoluindo e são largamente disponíveis imagens de resolução espectral muito mais ampla que as dos sensores da série de satélites Landsat, como as do sensor ASTER, do satélite Terra, com formidável potencial para discriminar florestas dissimilares. São ainda disponíveis as primeiras imagens hiperespectrais obtidas pelo sensor orbital Hyperion e PROBA. Em breve outros sensores estarão operacionais, permitindo identificar mais de parâmetros das coberturas vegetais e, por consequência, identificar discretas variações nas coberturas vegetais densas, sejam elas florísticas ou fisionômicas.

2.2- Formas de expressão das anomalias geobotânicas

As alterações na cobertura vegetal em função de mineralizações podem ter diferentes expressões na natureza: distribuição anômala de espécies e/ou comunidades de plantas; nanismo ou gigantismo da vegetação e/ou decréscimo da cobertura vegetal; alteração nos pigmentos das folhas e/ou processos fisiológicos que produzem alteração na cor das folhas e alterações no ciclo fenológico, como senescência precoce no outono, alteração no período de floração e retardo no período de rebrota na primavera (Lillesand e Kiefer, 1994). Outros autores, como Hodcroft e Moore (1988) dividem as relações vegetação-substrato em estresse sazonal, estresse espacial/espectral e alterações na assembléia vegetal ou crescimento anômalo. Já Mouat (1982) divide a resposta da vegetação às condições geoquímicas em fatores estruturais (alterações na fisiologia, incluindo fenologia) e fatores taxonômicos (conjunto de espécies presentes, ilustrando ainda a existência de plantas indicadoras universais e regionais).

Os *estresses químicos sobre mineralizações* de acordo com Brooks (1983) podem ser resumidos na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Alterações em plantas afetadas por mineralizações (Brooks, 1983).	
Elemento ou mineral	Alterações nas plantas afetadas por mineralização
Alumínio	Encurtamento de raízes e queimadura de folhas
Betume	Gigantismo; florada adicional ou precoce
Boro	Interrupção no crescimento, deformação e manchas marrons nas folhas
Cromo	Clorose
Cobalto	Clorose
Cobre	Clorose
Ferro	Escurecimento das folhas
Manganês	Clorose e manchas brancas na folhas
Molibdênio	Clorose, vulnerabilidade a ataques de insetos
Níquel	Clorose e necrose das folhas
Serpentina	Nanismo, interrupção do crescimento, alteração da cor de flores
Minerais radioativos	Variações nas cores de flores, frutos anormais, crescimento acelerado
Zinco	Clorose, sintomas de deficiência em Mn.

Bowen (1966 *apud* Brooks, 1972) sugere que os elementos podem ser classificados em função de sua toxidez na vegetação. Assim os divide em *muito tóxicos*, quando teores abaixo de 1 ppm no substrato já geram sintomas (Be, Cu, Hg, Ag e Sn), em *moderadamente tóxicos*,

quando o aparecimento de sintomas exige teores entre 1 e 100 ppm (elementos de transição e a maioria dos elementos dos Grupos III, IV, V e VI da tabela periódica) e os *fracamente tóxicos*, que dificilmente geram sintomas de toxidez nas concentrações normalmente encontradas (os Halogênios, N, P, S, Ti, metais alcalinos e alcalino-terrosos).

De acordo com Brooks (1972, 1983), os dois livros mais importantes no abordar a geobotânica enquanto técnica de prospecção mineral, os mecanismos mais comuns da ação tóxica dos elementos nas plantas são os seguintes:

- envenenamento por enzimas, processo eu varia de espécie para espécie e que é dado por metais mais eletronegativos que são reativos com muitas enzimas, destacando-se, na ordem de toxidez, Hg, Cu, Sn, Pb, Ni, Co, Cd, Fe, Zn, Mn, Ca, Sr e Ba;

- substituição de nutrientes essenciais, como cloretos por fosfatos

- precipitação de nutrientes essenciais: Al, Ti e Be precipitam rapidamente fosfato;

- substituição de elementos estruturalmente importantes nas células, como Na^+ por Li^+ e Cl^- por Br^- ;

- combinação com membranas celulares e redução de sua permeabilidade: Cu, Au, Pb e Hg podem impedir o livre trânsito de K, Na e moléculas orgânicas;

- decomposição catalítica de nutrientes essenciais e metabólitos, com elementos como La.

Ainda de acordo com aqueles trabalhos, estresses químicos podem levar a seis tipos de alterações na vegetação:

- formas anômalas de elementos das plantas: sinal da presença de boro ou elementos radioativos no substrato;

- clorose (amarelado) na folhas: é o mais comum resultado de estresse químico, indica deficiência de Fe na planta. Esta deficiência, entretanto, dificilmente reflete carência deste elemento no substrato, mas resulta do efeito de antagonismo por outros elementos. Pode significar teores elevados em Cr, Co, Cu, Mn, Ni e Zn no solo, levando à substituição de Fe em moléculas que passam a não ter o mesmo desempenho no metabolismo da planta. Mas pode também significar carência de Mn.

- alteração de cor nas flores: a maior parte das cores nas plantas se deve a poucos pigmentos, principalmente os carotenóides e os antocianinas, as quais são susceptíveis à presença de teores anômalos de diversos metais, como Fe, Al, Cr, Ti, Sn e U;

- nanismo ou crescimento incompleto, é uma das mais comuns manifestações de estresse químico na vegetação. Um exemplo notável é da planta neozelandesa *Pittosporum rigidum*, que nas condições normais cresce até 5m e sobre serpentinitos não ultrapassa poucos centímetros;

- gigantismo, muito mais incomum que o nanismo, é associado à presença de betum. Não deve ser confundido com crescimento estimulado pela presença anormal de nutrientes ou condições ambientais excepcionalmente favoráveis.

- distúrbios na ritmicidade das plantas: a floração pode ser adiantada ou atrasada ou ainda ocorrer uma segunda floração. Avanços na senescência no inverno são bem descritos. A coloração amarelada/avermelhada do outono é adiantada pela degradação mais precoce da clorofila, no que há auxílio, no caso de sério estresse químico, pela presença prévia de clorose, que já implica em queda nos teores de clorofila.

Apesar das dificuldades inerentes ao método, em regiões de clima temperado e frio a aplicação da geobotânica por sensoriamento remoto apresenta diversas facilidades quando comparada à aplicação em climas tropicais e equatoriais. Há autores que consideram, no caso de coberturas florestais densas, haver possibilidade de sucesso da geobotânica por sensoriamento remoto apenas nas florestas relativamente homogêneas do hemisfério norte (Green *et al.*, 1985 e Defeo *et al.*, 1986 *apud* Paradella *et al.*, 1994).

Diversas causas explicam esta tendência a priorizar a aplicação da geobotânica por sensoriamento remoto nas altas latitudes:

- a interação rocha-solo-vegetação é mais intensa;
- salvo nas florestas de coníferas, há um ciclo fenológico muito marcado que permite a identificação de variações na senescência e na rebrota sazonal;
- a pequena biodiversidade implica em grande homogeneização da resposta espectral e facilita sua interpretação.

Em função destes aspectos, em altas latitudes as coberturas vegetais sobre mineralizações metálicas apresentam estresses diversos, gerando o que se convencionou denominar de **anomalias geobotânicas**.

Goetz *et al.* (1983) citam diversos resultados positivos da aplicação da geobotânica por sensoriamento remoto na prospecção mineral em médias a altas latitudes, obtidos tanto com a utilização de sensores de alta resolução espectral (aeroportados ou em laboratório) como sensores de baixa resolução, como as imagens MSS-Landsat. De uma forma geral, as anomalias geobotânicas se expressam pela presença de clorose e de alterações no ciclo fenológico, com a vegetação estressada por metais apresentando senescência precoce e rebrota tardia. Descrevem também aumento de reflectância entre 630 e 690 nm e entre 1550 e 1750 nm, o primeiro por perda em clorofila e o último por diminuição do conteúdo foliar em água, efeitos habituais em vegetação estressada quimicamente. O mais freqüente efeito de estresses citado é, entretanto, o deslocamento do *red edge* (como definido por Horler, 1983). Tais deslocamentos, que podem ser

da ordem de 1,5nm, são de difícil detecção mesmo em sensores aeroportados (Singhroy *et al.*, 2000). E mesmo se passível de detecção, esta variação pode ser de difícil uso, pois Yost e Wenderoth (1971) mostram que, na presença de uma mesma mineralização, o deslocamento do *red edge* pode ser, conforme a espécie do vegetal, tanto para menores comprimentos de onda (*blue shift*) como para maiores (*red shift*). Como o sensoriamento remoto tem como fonte de informação não as folhas individuais de uma única espécie, mas o dossel de uma floresta, o deslocamento do *red edge* pode ser mascarado mesmo em sensores hiperespectrais, se a biodiversidade local implicar na presença de diversas espécies, com comportamento individual desconhecido frente ao estresse químico. Outros autores, como Darch e Barber (1983) e Banninger (1991) encontraram evidências de intensa variação sazonal da toxicidade de um mesmo metal ao longo do ano, em função da variação na intensidade dos processos metabólicos. A alteração mais significativa da reflectância deu-se no verão, na intensidade da resposta do platô no infravermelho próximo. Considerando-se que nas baixas latitudes as estações do ano apresentam menores variações climáticas, este dado tem reduzida sua importância em climas tropicais e equatoriais.

Ao quadro acima exposto, sobre o qual não há discussões notáveis e privilegia, para aplicações de geobotânica por sensoriamento remoto, os climas temperados e boreais, acrescenta-se mais um aspecto referente às florestas de baixa latitude e altitude (FBLA): a forma como ocorre a distribuição das espécies na floresta. Segundo alguns autores a distribuição é aleatória, independentemente de variações ambientais, o que virtualmente impediria a aplicação da geobotânica por sensoriamento remoto. Mas esta opinião é no mínimo polêmica, como se verá.

Apresenta-se a seguir uma discussão sobre a forma como se distribuem as espécies arbóreas na Floresta Amazônica e uma mais breve discussão sobre o mesmo tema na Mata Atlântica.

2.3. Comportamento espectral de coberturas vegetais

2.3.1 – Introdução

A descoberta de que a luz ou radiação eletromagnética (REM) era fundamental no metabolismo da vegetação foi gradual. De acordo com <http://www.iq.ufrj.br/~almenara/fotossintese.htm> (consultado em 6/8/2005), o médico Johan Baptista van Helmont verificou, na primeira metade do século XVII, que a maior parte da massa das plantas não provinha do “consumo” de solo. Em 1727 o botânico inglês Stephan Hales observa que principal fonte de nutrientes para o vegetal é o ar. Na década de 1770, o químico Joseph Priestly verifica que a planta “regenera” o ar inicialmente “viciado” por uma vela acesa em ambiente fechado, permitindo que um camundongo sobreviva num ambiente fechado (não se conhecia o gás O₂). Em 1778 Jan Ingenhousz observa ser a luz a responsável pela “restauração do ar” ao interagir com as partes verdes da planta. Em 1796, Jean Senebier mostra ser o CO₂ quem “viciava” o ar e que o “purificava” ao ser fixado pelas plantas. Quase concluída, a reação básica da fotossíntese ainda exigiria saber que o aumento da massa das plantas, durante o seu crescimento, devia-se não somente à fixação de CO₂, mas também à incorporação da água, o que Theodore de Saussure demonstra em seguida, chegando-se à conhecida equação

Portanto, desde o fim do século XVIII sabe a humanidade que a interação da REM era essencial à vegetação. Passou-se daí a investigar um seu corolário – de que variações nesta interação explicariam características da vegetação. Embora na agronomia o tema venha sendo estudado a mais tempo, no sensoriamento remoto isso vai ocorrer logo após o invento das fotografias sensíveis ao infravermelho, na primeira metade da década de 1940. Em *Photography by infrared* (Clark, 1946 *apud* Knipling, 1970) é feita uma revisão sobre a reflectância das folhas já sob o ponto de vista do sensoriamento remoto. Knipling, por sua vez, publica o trabalho *Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation* em 1970, antecedendo a disponibilidade de imagens orbitais. O autor aborda as bases físicas e fisiológicas da reflectância da vegetação no intervalo entre 400 a 2700 nm, tratando, portanto, também do infravermelho ondas curtas. Este intervalo de comprimento de onda coincide com parte mais expressiva da REM de origem solar e apresenta diversas feições espectrais diagnósticas. Este trabalho sintetiza os conhecimentos básicos da reflectância, absorvância e transmitância foliar e permanece essencialmente atual após décadas. Outro trabalho de revisão que se destaca é o Guyot (1995): *La Réflectance des Couverts Végétaux*. É deste trabalho que este capítulo empresta muito de sua estrutura.

2.3.2 - Propriedades ópticas das folhas

As folhas não compõem apenas a principal superfície dos dosséis como também são responsáveis por absorção de energia e troca de gases. O estudo de suas propriedades ópticas é essencial para a compreensão do comportamento espectral da vegetação e seu inverso, ou seja, a estimativa das características bioquímicas e biofísicas da vegetação e, por extensão, a definição de coberturas dissimilares ou o estado de sanidade de uma cobertura mais homogênea.

A REM interage com as folhas, no intervalo óptico (300 a 3000 nm), com reflectância e transmitância especular e difusa, criando, com a absortância, um quadro rico em feições de absorção e que é válido para todas as espécies, com variações apenas em amplitude. De acordo com Knipling (1970), na região espectral do visível, a intensa absorção se deve aos pigmentos foliares, principalmente as clorofilas, mas com os carotenóides, xantofilas e antocianinas também tendo algum efeito. Já entre 700 e 1300 nm, a absorção de REM é muito reduzida, com os pigmentos foliares sendo transparentes e a alta reflectância no intervalo se devendo à estrutura celular interna (Willstätter e Stoll, 1913 apud Knipling, 1970). A partir de 1300 nm a absorção de REM cresce rapidamente e é devida à água. Essencialmente o mesmo quadro é citado na literatura recente, demonstrando ser um conhecimento bem estabelecido. Assim, Guyot (1995) divide em três intervalos de comprimento de onda, 400 a 700 nm, 700 a 1300 nm e 1300 a 2500 nm, enquanto Jacquemoud e Ustin (2001) os divide em 400 a 800 nm, 800 a 1100 nm e 1100 a 2500 nm, considerando para o último intervalo a absorção de REM por matéria seca (compostos bioquímicos como celulose, lignina, açúcar etc.).

A forma como se dá a interação da REM com as folhas é complexa e, apesar de discutida desde os princípios do século XX, ainda apresenta questões não resolvidas (Jacquemoud e Ustin, 2001). A Figura 2.1 mostra a complexa estrutura de uma folha e como a reflectância, a absortância e a transmitância resultam de combinações de diferentes mecanismos (Guyot, 1995).

Grosso modo a difusão da REM pelas folhas deve-se essencialmente às descontinuidades do índice de refração existente entre as paredes celulares hidratadas, a água livre nos espaços intercelulares e o ar das lacunas do parênquima lacunoso. Diversos modelos físicos foram desenvolvidos para compreender os fatores principais dos quais dependem as propriedades ópticas das folhas e seu peso relativo (Guyot, 1995). Este autor resenha diversos modelos, todos simplificações ora mais ora menos grosseiras de uma realidade muito mais complexa, exceto o inicialmente desenvolvido por Allen *et al.* (1973), que exige um profundo conhecimento do mesófilo da folha em estudo, o que na prática é impossível para estudos em sistemas imageadores, que trazem informação de numerosas folhas, de diversas espécies e em diferentes

posições e estados de sanidade. Na Figura 2.2, Jacquemoud e Ustin (2001) ilustram os principais modelos para abordar as propriedades ópticas das folhas, listados em ordem de complexidade. Em **A** o modelo representa a folha como uma ou várias placas com superfícies rugosas levando a uma difusão isotrópica, ao qual necessariamente se deve adicionar a bioquímica e o teor em clorofila da folha; em **B**, o modelo considera a folha como um pacote de materiais que difundem e absorvem a REM; o modelo em **C**, estocástico, considera a folha constituída por diferentes tecidos e suas propriedades ópticas sendo encadeadas por uma cadeia de Markov (Tucker e Garat, 1977); em **D** o modelo requer detalhada descrição da estrutura interna da folha (forma, tamanho, posição e conteúdo bioquímico das células) e as constantes ópticas dos diferentes materiais.

Figura 2.2 - Classes de modelos para abordar as propriedades ópticas das folhas em ordem de complexidade (Jacquemoud e Ustin, 2001)

a - O visível (400 a 700 nm)

As folhas neste intervalo de comprimento de onda têm uma fraca reflectância (máximo de 15%) e ainda mais fraca transmitância e a REM é absorvida pelos pigmentos foliares. Destes, as clorofilas *a* e *b* são os mais importantes, representando 65% dos pigmentos na plantas superiores. O teor em clorofila nas folhas varia com sua idade. Em geral folhas muito jovens têm menos clorofila (são mais claras), o teor aumenta ao atingir a fase adulta e cai com a maturidade e envelhecimento. De acordo com Girard e Girard (1989) a concentração em clorofila em folhas jovens de milho (*Zea mays*, L.) é de 15,8 mg/l, ao que se associa uma reflectância de 13,7%. Em folhas com mais idade a concentração cai para 13,9 mg/l e a reflectância sobe para 14,4%.

O segundo grupo de pigmentos em importância são os carotenóides, que compreendem os carotenos e as xantofilas. Deste grupo os mais comuns e bem conhecidos são o α e o β -caroteno, que têm seus intervalos de absorção de REM mascarados pelos das clorofilas *a* e *b*, o que explica não aparecerem normalmente nas folhas sãs, tornando-se visíveis quando do envelhecimento da folha ou na presença de estresse, já que a concentração em clorofila diminui mais rapidamente nestes casos (Guyot, 1995). As xantofilas têm coloração amarelada e fórmula química geral semelhante à dos carotenos ($C_{40}H_{56}$), mas com uma hidroxila em acréscimo ($C_{40}H_{56}OH$). A

antocianina é um pigmento dependente do pH e é espectralmente não correlacionada com os carotenóides. Embora seja de hábito mascarada pelos pigmentos dominantes, a antocianina pode aparecer nos caules, ramos, pecíolos e nervuras de folhas, como na espécie amazônica *Solanum sessiliflorum* Dunal (Paiva, 1999). Estes pigmentos, que são, em geral, completamente mascarados nas folhas sãs, aparecem como pigmentos marrons na senescência. Por fim, há compostos não pigmentares que desempenham também o papel de fotoreceptores em comprimentos de onda abaixo de 450 nm (Guyot, 1995).

A clorofila a tem dois picos de absorção, a 442 e 676nm, com o primeiro sendo mais intenso, mas o segundo mais isolado e mais diagnóstico (Figura 2.3). A clorofila b tem picos a 472 e 656nm, com o segundo sendo muito menos intenso, porém mais específico: o pico a 472nm está próximo ao de β -caroteno (Baret, 1999).

Figura 2.3 – Espectros dos principais pigmentos foliares. (simplificado de Baret, 1999)

A fotossíntese não é o único processo em que a luz é essencial para a vegetação. Há a morfogênese, que é o processo, comandado pelo fitocromos, em que a luz direciona o curso do crescimento das plantas em resposta à diferentes condições de iluminação (Kendrick e Kronenberg, 1994). O processo da morfogênese inclui desde a germinação de sementes à definição da intensidade do crescimento do caule, da síntese de pigmentos à expansão foliar ou floração e baseia-se em fotoreceptores. Estes podem ser de três tipos, em função dos intervalos de comprimento de onda em que absorvem a energia: fitocromos, que absorvem predominantemente o comprimento de onda do vermelho (650-680 nm) e “vermelho-extremo” (710-740 nm), os que absorvem a luz azul/UV-A (320-400 nm), denominados criptocromos, e os que absorvem o UV-B (280-320 nm). O único destes fotoreceptores com interesse para o

sensoriamento remoto é também o mais importante, o fitocromo. Este fotorreceptor se alterna entre as formas de fitocromos inativos (Fv) e ativos (Fve), e embora a tradução da informação da luz em sinais bioquímicos se dê por processos ainda pouco elucidados, o seu comportamento espectral é bem definido (Figura 2.4).

Figura 2.4 - Picos de absorção de Fv em 660 nm e Fve em 730 nm (conforme Carvalho e Perez, 2005).

Esta inter-conversão se dá em função da iluminação. A forma inativa do fitocromo (Fv ou P660) ao absorver REM no comprimento de onda do vermelho é convertida à forma biologicamente ativa (Fve ou P730). Embora Fv absorva muito pouco no comprimento de onda do azul, a REM nesse comprimento de onda também converte Fv em Fve. Já a reversão de Fve a Fv se dá pela ausência de REM no visível, com a escuro (Figura 2.5).

Figura 2.5 – Indução da fotoconversão do fitocromo Fv em Fve pela presença de luz e o processo inverso (conforme Carvalho e Perez, 2005).

Os fitocromos são proteínas dos pigmentos e direcionam o curso do crescimento das plantas em resposta às diferentes condições de iluminação. Embora a literatura não se aprofunde em sua química, as suas características espectrais são bem documentadas (Kendrick e Frankland, 1976). Alguns autores, como Lawlor (1993), afirmam que os fitocromos correspondem a uma diminuta fração do conjunto de pigmentos foliares se comparada à das clorofilas a e b. Bogner (1999) demonstra que apenas a variação no horário da iluminação solar direta (matutina, vespertina) impõe severas diferenças nas coberturas vegetais, em função de variações diurnas da interação radiação eletromagnética com os fitocromos.

b – O infravermelho próximo (700 a 1300 nm)

Neste intervalo espectral, os pigmentos e a celulose, que constitui as paredes celulares, são transparentes e a água celular tem tênues picos de absorção de REM. Isto explica que a porcentagem de REM absorvida seja tão reduzida, no máximo 10%, com o restante sendo refletido ou transmitido (Guyot, 1995). Esse aumento brutal da reflectância, em até mais de dez vezes entre 660 nm e 800 nm, forma a feição espectral mais intensa e explorada das folhas: o *red edge*, definido por Horler *et al.* (1983), que é um dos mais extremos *slopes* encontrados no espectro de materiais naturais de ocorrência comum (Clark *et al.* 1995). A intensidade do platô entre 800 e 1100 nm depende da estrutura anatômica interna das folhas, sendo mais elevado quando os tecidos são constituídos por células de formas irregulares e conteúdos heterogêneos e por maior número de camadas celulares (Guyot, 1995). Assim, continua aquele autor, em folhas delgadas a transmitância pode ser maior que a reflectância, como no caso das monocotiledôneas, enquanto folhas espessas, com parênquima lacunoso muito desenvolvido, podem ter reflectância da ordem de 80% e transmitância zero, como no caso de dicotiledôneas adaptadas à seca, como as oliveiras. A existência de discretas feições de absorção por água neste intervalo pode ser utilizada, em sensores hiperespectrais, na detecção de água foliar, como descreve Peñuelas *et al.* (1993) ao definir o *Water Band Index* (WI), utilizando uma banda de absorção a 970 nm e como referência, a reflectância em 900 nm.

c – O infravermelho ondas curtas (1300 a 2500 nm)

As folhas fotossinteticamente ativas, neste intervalo espectral, têm suas propriedades ópticas essencialmente devidas ao seu teor em água, que mascaram as feições de absorção devidas aos compostos bioquímicos como lignina, celulose, amido, açúcares e proteínas. Estes compostos têm nas ligações O-H a causa para a absorção da REM, como a água (Elvidge, 1990), mas também compõem o espectro das folhas, principalmente entre 2100 e 2400 nm.

Numerosos trabalhos, notadamente a partir da década de 1990, vêm estudando a obtenção de dados bioquímicos pelo comportamento espectral das folhas no infravermelho ondas curtas a partir de espectrômetros de reflexão ou em imagens hiperespectrais, como Peterson *et al.* (1988), Card *et al.* (1988) Curran (1989), Wessmann *et al.* (1989), Elvidge (1990), Gao e Goetz (1994), Gastellu-Etchegorry *et al.* (1995), Kupiec e Curran (1995), Hong *et al.* (1996), Zagolski *et al.* (1996), Baret e Fourty (1997), Fourty e Baret (1997), Kokaly e Clark (1999) e Curran *et al.* (2001).

Kokaly e Clark (1999) apresentam espectros de uma folha seca e espectros sucessivos referentes à adição de água àquela folha (Figura 2.6). Observa-se que o aumento na absorção de REM não é constante, com máximos em 1450 e 1940 nm e mínimos em 1730 e entre 2150 e 2350, particularmente entre 2250 e 2300 nm, onde praticamente não há influência da água no espectro de reflectância. Este resultado discorda do apresentado em Guyot (1995) e abre uma perspectiva importante na detecção de absorção de REM devida a compostos bioquímicos, pela possibilidade de remover a assinatura espectral da água, liberando a informação subjacente dos compostos bioquímicos.

Os espectros de absorção da Figura 2.7, obtidos por Baret (1999) para o intervalo de 800 a 2400 nm, mostram a dificuldade de se diferenciar compostos como amido, açúcar, celulose, hemicelulose, lignina e proteínas, pela freqüente superposição de picos de absorção, dificuldade acirrada pela superposição da intensa e generalizada absorção por água. De qualquer forma, a

obtenção de traços de informação de compostos bioquímicos nas janelas indicadas por Kokaly e Clark (1999) é esperada, particularmente de amido (1750 e 2150 nm), lignina (2300 nm).

Por outro lado, considerando-se apenas o intervalo de 2150 a 2350 nm, observa-se na Figura 2.8 que lignina, hemicelulose e açúcar têm comportamentos semelhantes, mas amido, proteína e celulose não.

Considerando-se ainda que no intervalo de comprimentos de onda entre 2150 e 2350 nm variações no teor em água foliar não implicam em mudanças significativas na absorção de REM, esta região do espectro pode informar de parte considerável dos compostos bioquímicos, principalmente se a assinatura espectral da água (quase não variante no intervalo) for retirada.

d – Propriedades direcionais das folhas

As variações direcionais da reflectância (e transmitância) nas folhas dependem de dois processos diferentes: (i) a reflectância e transmitância difusa, no interior das folhas e que são função de sua estrutura celular, da composição em pigmentos, em compostos bioquímicos e em água e (ii) a reflexão especular na superfície cerosa das folhas (Guyot, 1995).

Devido à reflexão especular, as folhas não podem ser consideradas uma superfície lambertiana (que espalha perfeitamente) e sua luminância depende do ângulo de visada, como demonstra a Figura 2.9. De acordo com Guyot (1995), a reflexão especular das folhas no visível e no infravermelho próximo é praticamente independente do comprimento de onda, mas a reflectância difusa das folhas é relativamente fraca no visível e forte no infravermelho próximo, permitindo compreender porque a reflexão das folhas no visível se afasta tanto da lei de Lambert enquanto no infravermelho próximo a segue bem (Figura 2.10).

Um aspecto adicional é dado pelo comportamento diferenciado entre a face dorsal e a ventral das folhas. Na primeira encontra-se o mesófilo esponjoso e esta face é normalmente mais refletiva, principalmente no visível Ponzoni (2001). Govaerts *et al.* (1996) demonstram a diferença no fluxo de REM (675nm) ao longo de uma folha e verificam que o grosso da absorção ocorre no mesófilo palissádico (Figura 2.11).

e – Análise dos fatores que afetam as propriedades ópticas das folhas

De acordo com Guyot, cinco fatores afetam as propriedades ópticas das folhas: a estrutura anatômica, a idade, o teor em água, as deficiências minerais e os ataques parasitários. Podem-se acrescentar os *estresses químicos sobre mineralizações* como um sexto fator, de particular interessa nesta tese.

A *estrutura anatômica*, embora afete a interação com todo o espectro óptico, é mais sensível no infravermelho próximo. Como comportamento geral, considera-se que as dicotiledôneas refletem mais que as monocotiledôneas, da mesma forma que as plantas adaptadas à seca. As faces superiores das folhas refletem menos que as inferiores e a presença de pelos diminui a reflexão no visível e infravermelho ondas curtas, não afetando o infravermelho próximo.

Figura 2.9 – Reflectância e transmitância bidirecional em coordenadas polares para ângulos de iluminação de 0°, 20°, 30°, 40°, e 60° (Adaptado de Govaerts *et al.*, 1996)

Figura 2.10 – Distribuição angular da radiação refletida e transmitida por uma folha na região espectral do azul (485nm) e do infravermelho próximo (731nm) para ângulos de incidência de 0° e 60° (modificado de Guyot, 1995).

A *idade* afeta as propriedades ópticas das folhas apenas em sua fase juvenil e na senescência. Durante a maior parte de sua existência o comportamento é estável e a fase juvenil começa por ser pouco expressiva no comportamento espectral do dossel pela também pouco expressiva área que têm. E rapidamente chegam à fase adulta. Já a senescência é um processo longo, que pode afetar sensivelmente o comportamento do dossel mesmo em florestas tropicais. O processo de senescência se inicia com a degradação das clorofilas a e b, o que implica em crescente aumento na reflectância nos comprimentos de onda do vermelho, pois os pigmentos mais resistentes – os carotenóides e a xantofila têm suas bandas de absorção de REM na região do azul e verde. Como a participação das clorofilas decresce gradualmente, a coloração da folha migra de verde para laranja e daí a vermelho vivo. Todo este processo é acompanhado por um aumento na reflectância, pois o que se vai perdendo são os pigmentos fotoreceptores. No intervalo do infravermelho próximo o comportamento permanece igual até que a estrutura celular se desorganiza, com a folha totalmente seca. Já no infravermelho ondas curtas há um aumento de reflectância pela diminuição do teor em água, o qual começa a ocorrer quando as clorofilas já estão se degradando. Assim o processo de senescência se inicia pelo visível, posteriormente evoluindo também no infravermelho ondas curtas e somente ao fim afeta o infravermelho próximo (Figura 2.12). Este conceito é fundamental, porque o platô do infravermelho próximo se mantém praticamente inalterado durante grande parte do processo e, mesmo ao fim do ciclo, é o intervalo de comprimento de onda em que as mudanças são proporcionalmente menores, mantendo-se uma alta reflectância mesmo com a folha seca.

Figura 2.12 – Espectros de reflectância de uma folha de trigo durante a senescência (modificado de Guyot, 1995).

O teor em água nas folhas influencia de forma intensa o infravermelho ondas curtas, mas também modifica, discretamente, a reflectância no visível e infravermelho próximo por modificar a turgescência celular. Este efeito permite avaliar, em condições extremas, a disponibilidade em água de uma cobertura vegetal, o que ensejou a criação, por Thomas (1971) de um índice para analisar o teor em água foliar que, entretanto, exige que o déficit hídrico seja muito intenso. Neste aspecto, Ceccato *et al.* (2001) expõem a importância da evapotranspiração na análise das condições hídricas de plantações (ou quaisquer coberturas vegetais), já que folhas sob intenso estresse hídrico podem ter seus estômatos fechados preventivamente, para garantir um teor de água suficiente para o funcionamento da planta. Neste caso, embora já não havendo atividade fotossintética, a concentração de clorofila permanece estável e a única ferramenta de sensoriamento remoto apta a identificar o estresse é o infravermelho termal, pois a evapotranspiração cai enormemente. Por outro lado, a resposta no infravermelho ondas curtas é excelente na distinção de diferentes espécies vegetais, já que o teor em água foliar varia, em indivíduos sãos de diferentes espécies, mais do que a intensidade do platô no infravermelho próximo.

As *deficiências minerais* afetam inicialmente o teor em clorofila nas folhas e posteriormente sua estrutura anatômica e seu teor em água. A deficiência em ferro é a mais comum e se expressa pela clorose. A falta de nitrogênio também afeta a reflectância, mas de forma sutil e pouco clara. São numerosas as pesquisas para detectar alterações de deficiência em nitrogênio, mas com sucesso ainda relativo, destacando-se o método apresentado por Curran *et al.* (2001). Uma severa carência em ferro pode levar a alterações na estrutura do mesófilo, com a diminuição do número de paredes celulares e de matéria seca, levando a uma queda na

reflectância. Em deficiências mais intensas, à queda no metabolismo vai se seguir queda na eficiência do sistema vascular e, por consequência, no teor em água foliar.

Os *estresses químicos sobre mineralizações* estão descritos no Capítulo 1 desta tese. Seus efeitos mais comuns nas folhas são a presença de clorose, de manchas escuras ou brancas e de necrose. A toxidade dos elementos é muito variada, sendo mais tóxicos elementos como Cu e Hg, segundo Brooks (1983).

2.3.3. Propriedades ópticas dos outros órgãos vegetais

Os órgãos vegetais que não as folhas têm raros estudos de comportamento espectral, já que têm, em geral, pouca expressão em área e um comportamento pouco diagnóstico. As flores podem desempenhar sazonalmente um papel importante na resposta espectral de dossel, alterando intensamente a resposta espectral normalmente devida às folhas principalmente na região espectral do visível, obviamente em função de suas cores. De acordo com as medidas espectrométricas de diferentes flores apresentadas entre 400 e 800 nm em Girard e Girard (1989), os espectros têm alta reflectância (entre 50 e 70%, conforme a espécie) no princípio do infravermelho próximo, enquanto no visível o comportamento varia em função de suas cores, mas tendo como padrão geral um aumento da reflectância com o aumento do comprimento de onda. Nas flores brancas e amarelas há uma feição de absorção a 680 nm.

O comportamento espectral de troncos, galhos e suas cascas é pouco presente na literatura. De acordo com Guyot (1995), a casca dos galhos cresce progressivamente do visível ao infravermelho ondas curtas. Hoffman e Kirchhof (1991), em estudo espectrométrico entre 400 e 2500 nm sobre galhos saudáveis e com folhas e galhos doentes ou mortos, com líquens e musgos, não acrescenta informação espectral específica. Já Elvidge (1990) apresenta, em longo estudo, espectros de órgãos vegetais secos (marrons) e secos ao extremo (com coloração cinza). Madeira, flores e folhas secas (marrons) apresentam comportamentos semelhantes, com aumento expressivo e quase contínuo aumento de reflectância entre 0,4 e 1,0 μm , seguindo-se um platô no infravermelho próximo, caindo progressivamente a partir de 1,3 μm (Figura 3.13). Com a madeira e folha cinza os comportamentos espectrais são mais diferenciados e simples. Para a madeira há progressivo aumento de reflectância de 0,40 a 1,9 μm , oscilando até 2,5 μm , enquanto nas folhas há um aumento até 1,3 μm e queda posterior. A razão para estes comportamentos está na estrutura celular dos diferentes materiais, ainda presente quando estão marrons, e nos compostos bioquímicos como lignina e celulose, que permanecem íntegros mesmo com a madeira completamente seca, implicando em absorção de REM particularmente na região de 2,0 a 2,5 μm .

Na Figura 2.13 estão apresentados os espectros de duas espécies de hábitos diferentes e pode-se observar que as respostas são muito semelhantes para cada material, mostrando a potencialidade diagnóstica do conjunto. Considerando-se que em florestas maduras a presença relativa de órgãos vegetais secos varia em função das espécies presentes e das condições ambientais, a presença de informação espectral destes materiais auxilia a diferenciação, nas imagens, de florestas dissimilares. É importante acrescentar que os solos, muito influenciados

pelo substrato rochoso se não forem transportados, são parcialmente responsáveis pela disponibilidade média de água, aspecto que influencia fortemente a proporção de material seco no dossel bem como, em paralelo, nos teores em pigmentos e água foliares.

2.3.4. Propriedades ópticas das coberturas vegetais e sua aplicabilidade na geobotânica por sensoriamento remoto

De acordo com Guyot (1995) a reflectância bidirecional de uma cobertura vegetal depende de 4 parâmetros principais inerentes à superfície imageada e três outros, de origem externa:

- (i) as propriedades ópticas das folhas;
- (ii) o índice de área foliar;
- (iii) a orientação e a inclinação das folhas e sua distribuição no plano vertical e
- (iv) as propriedades ópticas do solo subjacente.
- (v) a posição do sol;
- (vi) a orientação e a inclinação do eixo de visada do sensor e
- (vii) o estado da atmosfera.

Apesar da complexidade acima exposta, a reflectância de um dossel guarda grandes semelhanças com a reflectância de uma folha e muito do que foi apresentado para estas também é válido para dosséis. Baret *et al.* (1994) demonstram, a partir de experimentos sobre plantações de beterraba, que a reflectância do dossel é governada pelas propriedades ópticas das folhas. Alertam que os resultados são válidos em áreas planas e sem que haja contribuição espectral significativa de outros órgãos vegetais e de solo. Por isso a quase totalidade das pesquisas sobre o comportamento espectral de compostos foliares é feita em laboratório, sobre folhas secas ou verdes, numa situação em que se simplificam as variáveis para gerar conhecimentos básicos, a serem aplicados, no futuro, no estudo de dosséis. Baret *et al.* (2003) consideram que há variáveis biofísicas comprovadamente passíveis de identificação acurada por sensoriamento remoto no domínio óptico, citando o conteúdo em clorofila, o albedo, a fração da superfície coberta por vegetação e eventualmente a fração da radiação fotossinteticamente absorvida pelo dossel. Já estimativas do teor em água foliar e da área foliar são consideradas mais difíceis ou não há opinião consensual na literatura. Embora aquele trabalho não cite a possibilidade de identificação de compostos bioquímicos no dossel por imagens de sensoriamento remoto, a literatura apresenta diversos casos com relativo sucesso, como em Gastellu-Etcheberry *et al.* (1995) para nitrogênio e celulose e Zagolski *et al.* (1996) para nitrogênio e lignina, em imagens hiperspectrais AVIRIS.

As propriedades ópticas das coberturas vegetais, ainda que dominadas pela folhas verdes em uma floresta densa e não decídua, são uma combinação das propriedades ópticas de cada folha, da distribuição média de suas orientações e da arquitetura do dossel (Pinty, Verstraete e

Dinkinson, 1990). Há que se considerar que a transmitância é efetiva e importante, particularmente no infravermelho próximo, o que implicará em fluxo de REM atingindo folhas de camadas inferiores à superfície do dossel, refletindo e transmitindo também parcialmente esta energia, numa sucessão de eventos que tende ao infinito. Cerca de 40 a 50% da radiação no infravermelho próximo é transmitida pelas folhas e assim são necessárias várias camadas de folhas para impedir que a radiação chegue ao solo (Guyot, 1995). Portanto, neste intervalo de comprimento de onda, mesmo em florestas com dossel denso, a radiação irá interagir com os estratos arbustivo e herbáceo e eventualmente com a serrapilheira e solo. Já no visível e no infravermelho ondas curtas a transmitância foliar é baixa e apenas em cobertura vegetal com dossel aberto a radiação chega a interagir significativamente com os estratos arbustivo e herbáceo e com serrapilheira e solo.

A literatura não questiona que o comportamento espectral das folhas informa de pigmentos foliares, de fitocromos, da estrutura celular das folhas e de seu teor em água. Já de sua composição em compostos bioquímicos como lignina, celulose e amido, o comportamento espectral irá variar mais se as folhas estiverem secas. Mas, mesmo em vegetação fotossinteticamente ativa, o intervalo entre 2150 e 2350 nm que é menos dependente da variação em teor de água foliar tem potencialidade de informar de diversos compostos, sobretudo da razão celulose-amido e das razões proteína-amido, lignina -amido, hemicelulose-amido e açúcar-amido. Esta capacidade aumenta enormemente na disponibilidade de bandas entre 2150 e 2225 e 2300 e 2350. Entretanto, mesmo em sensores de bandas largas esta região do espectro é potencialmente discriminadora de dissimilaridades florísticas. Segundo Ustin et al. (1999) a bioquímica dos componentes do dossel afeta o espalhamento e a absorção da REM, mas menos que outros elementos da paisagem. Recorde-se, entretanto, que em Tuomisto *et al* (2003b) verificou-se haver maior capacidade de discriminação de sub-tipos de floresta de terra firme na banda TM7 (2080 a 2350 nm), justamente a que abrange os picos de absorção dos compostos bioquímicos. Descarta-se a possibilidade de ser a água foliar a responsável por esta discriminação, porque na banda TM5 (1550 a 1750 nm) a variação na reflectância devida à água é muito maior (ver Figura 2.6).

Considerando-se as grandes variações das comunidades de espécies presentes numa floresta tropical e seu padrão de dispersão, o quadro é necessariamente complexo. (Ustin et al., 1999) definem que a estrutura e composição do dossel são definidas pela área foliar, pelo número de camadas de folhas, pela distribuição angular das folhas e pela distribuição dos diferentes elementos da vegetação (folhas, galhos, flores no dossel, no estrato arbustivo e herbáceo, serrapilheira e solo e rochas aflorando). Na floresta de terra firme há que se

acrescentar a presença, em certos sub-tipos, de grandes árvores emergentes do dossel e em outros, de dosséis mais homogêneos e planos, o que implica em grandes variações no albedo.

A área foliar, em geral apresentada como Índice de Área Foliar (IAF), é dada pela razão da área do conjunto de folhas do dossel e a área total do terreno. Já a distribuição angular foliar (DAF) é função da posição das folhas em relação ao azimute. A DAF, de acordo com Ponzoni (2001), varia consideravelmente em função das características da distribuição das folhas nas plantas. Dos seis tipos mencionados por aquele autor, os extremos são as planófilas e as erectófilas, com a inclinação angular média para as primeiras sendo de $26,76^\circ$ e de $63,24^\circ$ para as erectófilas, o que representa uma alteração brutal na reflectância do dossel, como pode ser depreendido pela Figura 2.8. Um exemplo bastante conhecido deste efeito é a intensidade da reflexão do infravermelho próximo em plantações de certas gramíneas e de banana (*Musa sp.*). Estas plantas são muitas vezes planófilas e, neste caso, comportam-se como eficientes refletoras de radiação, particularmente naquele intervalo de comprimento de onda, gerando áreas extremamente claras nas imagens no infravermelho próximo. Assim, a arquitetura do dossel, o IAF e o DAF são elementos de grande importância na resposta das coberturas vegetais à REM, pois influenciam notadamente o albedo.

Finalmente, a questão do ângulo de iluminação solar e de visada do sensor também segue, em essência, o apresentado para as folhas, embora o dossel seja muito mais próximo da lei de Lambert.

Os diversos modelos matemáticos desenvolvidos para explicar e prever o comportamento espectral de coberturas vegetais permitem, em tese, inferir características ecológicas. São chamados de modelos BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) e classificados de acordo com a forma de representação da transferência da radiação (Ustin et al., 1999), em tema que não será tratado aqui.

Capítulo 3

A abordagem sistêmica: uma proposta metodológica para a geobotânica por sensoriamento remoto em florestas tropicais e equatoriais

3.1 - A diferença conceitual entre a geobotânica em climas temperados e tropicais-equatoriais

3.1.1. Caracterização da distribuição de espécies arbóreas na Floresta Amazônica

3.1.2. A influência de solos e geologia nas florestas da Mata Atlântica

3.1.3. Discussão sobre a forma de expressão geobotânica dominante em florestas tropicais úmidas

3.2- O conjunto de métodos da abordagem sistêmica

3.2.1. Componentes da vegetação relevantes em estudos espectrais

3.2.2. As técnicas de processamento digital

a) As razões de bandas

b) A análise por principais componentes

c) Introdução da imagem de albedo

3.2.3. A aplicabilidade do método à Floresta Amazônica

3.2.4- A abordagem sistêmica frente a técnicas semelhantes

3.2.5. Histórico de experiências de aplicações da abordagem sistêmica

3.1 - A diferença conceitual entre a geobotânica em climas temperados e tropicais-equatoriais

3.1.1- Caracterização da distribuição de espécies arbóreas na Floresta Amazônica

A Floresta Amazônica, por ser a mais ampla floresta tropical do planeta, vem merecendo numerosos estudos ecológicos e é aqui utilizada como base para a discussão de como se dá a distribuição das espécies em florestas em baixas latitudes e altitudes (FBLA).

Embora as coberturas vegetais da Amazônia apresentem 23 fitofisionomias diferentes, a Floresta Amazônica pode ser dividida em apenas três grandes formações florestais: as florestas de igapó, de várzea e de terra firme (RADAMBRASIL, 1976), sendo esta última amplamente dominante em área. Trabalhos botânicos mostram que as parcelas de floresta de terra firme são mais semelhantes floristicamente entre si do que aquelas inventariadas em áreas de transição e de igapó. Isto sugere que a floresta de terra firme possa ser mais uniforme em termos físicos e que maior variação ambiental possa ocorrer na floresta de igapó, onde os níveis de inundação e luz e a variação topográfica podem controlar as diferenças florísticas (Rodrigues *et al.*, 2004).

As florestas de terra firme apresentam uma paisagem fisionomicamente uniforme, mas, estudadas em detalhe, mostram constante variação da sua composição botânica em função das condições do meio ambiente, dos tipos de solo, da drenagem, da aeração e da disponibilidade de água superficial e profunda (Pires, 1973). Gentry (1988) mostra que o oeste da Amazônia possui a floresta com maior riqueza em espécies arbóreas do planeta e Oliveira e Mori (1999) demonstram ser esta biodiversidade comparável com a encontrada em uma floresta de terra firme, na Amazônia Central. Esta constatação obriga a abandonar o conceito de dependência de alta biodiversidade a solos ricos. Aqueles autores sugerem que esta riqueza em espécies deva-se à combinação de heterogeneidade ambiental e história geológica. A maior parte dos trabalhos sobre as florestas de terra firme, entretanto, localiza-se no oeste na Amazônia, sobre solos mais ricos.

De acordo com Tuomisto *et al.* (2003a) há três hipóteses alternativas para explicar como se dispõe a grande biodiversidade das FBLA: (i) as plantas são igualmente competitivas e a composição florística local resulta de imigrações e extinções aleatórias; (ii) a floresta é essencialmente homogênea e uma pequena proporção de espécies são dominantes em amplas áreas, por serem mais competitivas; (iii) diferenças nos solos ao longo das florestas tropicais são

suficientemente importantes para gerar numerosos mosaicos de florestas floristicamente diferentes.

Para o primeiro caso, Hubell (1997) defende o modelo ecológico neutro, que considera que as propriedades ecológicas de qualquer indivíduo em uma população são idênticas. Em função desta neutralidade, Condit *et al.* (2002) consideram que a similaridade florística é relacionada com o logaritmo da distância geográfica, o que indica mudanças graduais e ausência de contatos bruscos.

Na segunda hipótese, baseado em estudo de 21 parcelas florestais na Amazônia peruana, Pitman, (2001) afirma ter chegado a três conclusões: (i) que a grande maioria das espécies arbóreas ocorre indistintamente em toda a América do Sul e que 2/3 das espécies também foram coletadas na Amazônia equatoriana, a 1.500 km de distância; (ii) que 15% das espécies parece estar restrita a um único tipo de floresta e (iii) que a densidade média de ocorrência de 88% das espécies é praticamente invariável nas 21 parcelas estudadas. Esta hipótese, portanto, considera a presença de um amplo conjunto de espécies onipresentes na floresta, sem relação com condições ambientais locais. Com poucas espécies localmente dominantes, as respostas espectrais do dossel seriam relativamente homogêneas, deixando à geobotânica por sensoriamento remoto poucas possibilidades de sucesso.

A terceira hipótese considera a existência de variações ambientais pronunciadas, mesmo em biomas tidos como mais homogêneos, como a floresta de terra firme, em função de variações na topografia e solos (Tuomisto *et al.*, 1995). Considerando-se que o padrão de abundância das espécies e a composição florística devem refletir condições ambientais, mudanças no padrão florestal devem refletir condições ambientais diferentes (Tuomisto *et al.*, 2003c). Neste caso considera-se a existência de mosaicos de ambientes, em que a proximidade geográfica teria pouca relação com a similaridade florística, a qual seria função de variações ambientais, particularmente na topografia, no solo e na disponibilidade de água. Assim um determinado grupo de espécies seria dominante onde as condições ambientais fossem mais favoráveis e, por consequência, onde aquele grupo fosse dominante as condições ambientais seriam previsíveis. Esta é a base da geobotânica e, estando correta a hipótese, existem as condições básicas de ser a geobotânica por sensoriamento remoto aplicada como ferramenta auxiliar no mapeamento geológico e na prospecção mineral na Amazônia.

Esta última hipótese vem sendo confirmada por numerosos trabalhos, como em Poulsen e Balslev (1991), Tuomisto e Poulsen (1996), Ruokolainen *et al.* (1997), Rianza *et al.* (1998), Svenning (1999), Schulze (2003), Phillips *et al.* (2003), Tuomisto *et al.* (2003a), Tuomisto *et al.* (2003b) e Tuomisto *et al.* (2003c). A maior parte destes trabalhos contou com muitos dados de

campo, o que dá segurança às conclusões, em que pese haver autores que continuem a advogar pela hipótese da neutralidade ecológica.

Tuomisto *et al.* (2003a) para testar as hipóteses acima inventariaram 163 sítios de floresta Amazônica em quatro regiões no oeste da Amazônia, na Colômbia, no Equador e no norte e no sul do Peru, dos quais 122 de terra firme. Foram inventariados dois grupos de plantas, as pteridófitas (samambaias) e as da família *Melastomaceae*. Estes grupos são fitogeneticamente muito diferentes e são dispersos por diferentes agentes, o vento e animais, compondo casos independentes para diversos testes, inclusive o de diferenciação de nichos. O estudo incluiu 286 espécies e 297.000 indivíduos de pteridófitas e 265 espécies e 40.300 indivíduos de *Melastomaceae* e amostras de solo de cada sítio estudado. Embora em torno de 25% das variações florísticas entre os sítios de floresta de terra firme não tenha sido explicada, menos de 25% são devidas à distância geográfica e mais da metade se devem a fatores mistos entre ambientais e geográficos, ambientais e residuais e puramente ambientais e residuais. Afirmam ainda os autores que composições mineralógicas variam sobre diferentes formações geológicas, o que pode ser ecologicamente importante, ao afetar diversas propriedades dos solos, as quais, entretanto não foram estudadas.

Tuomisto *et al.* (2003b) encontraram grande diversidade florística na floresta de terra firme na Amazônia peruana. Fizeram um transecto com 43 km de comprimento, divididos em parcelas de 500m de comprimento e 400 de largura. O Índice de Jaccard é comumente utilizado para quantificar a similaridade florística entre duas coberturas vegetais ou parcelas, considerando as espécies que são exclusivas de cada parcela e as que estão presentes em ambas. Quando o índice resulta superior a 0,25, indica similaridade florística (Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974). Tuomisto *et al.* (2003b) obteve índices de Jaccard variando de 0,01 a 0,71 e com valor médio de 0,27. Considerando apenas pteridófitas (avencas, samambaias) o índice variou entre 0 e 0,80, muito similar ao encontrado para *Melastomataceae*. Considerando que valores deste índice abaixo de 0,25 implicam em coberturas vegetais dissimilares, pode-se concluir que a dissimilaridade média é alta e que foram encontradas florestas completamente diferentes entre si enquanto outras eram altamente similares. Aqueles autores expõem ainda que sítios ambiental e floristicamente dissimilares podem ocorrer em grande proximidade e que, por fim, há previsibilidade de abundância de determinadas espécies em sítios ambientalmente semelhantes. Estes autores analisaram também a correlação entre a resposta de pixels de imagem TM Landsat com os dados de campo. A maior correlação entre resposta espectral e os dados florísticos se deu na banda TM7 (2080 a 2215nm). Observe-se que esta região espectral é afetada pelo conteúdo em água foliar, mas sensivelmente menos que na região de 1750 nm e, por outro lado, tem picos

de absorção devidos aos compostos bioquímicos da vegetação, como açúcares, amidos, celulosas, ligninas, proteínas. Já Lacruz (1996), embora não tratando de geobotânica, constata, em campo, que as imagens TM Landsat 5 permitem a separação de florestas de igapó, de várzea e de terra firme, subdividindo esta última em três subunidades, graças às diferenças espectrais fornecidas pela estrutura e composição florísticas e pelo conteúdo de umidade. A autora conclui que as TM4 e TM5 são as de maior potencial na separação das unidades florestais.

Tuomisto *et al.* (2003c) fizeram 27 transectos de 500 x 5m na Amazônia equatoriana, analisando a relação entre solos e florística e sua detectabilidade em imagens TM Landsat. Enquanto a riqueza de biodiversidade não teve qualquer correlação com os dados das imagens, os padrões de similaridade florística obtidos em campo tiveram grande correlação com a resposta dos pixels, ocorrendo o mesmo com a maioria dos parâmetros de solo analisados. Dos parâmetros de solo estudados, o pH apresentou a menor correlação com a florística, seguida por Na e P. Já os de maior correlação foram Ca, K, Mg, perda ao fogo, teor de argila e de areia. O único parâmetro associado à riqueza de espécies foi o teor de argila. Quanto ao sensoriamento remoto, concluem que as imagens podem ser usadas para identificar áreas com similaridade no conjunto de espécies, mas não em sua riqueza.

Phillips *et al.* (2003), ao estudarem a extensão e a penetrabilidade da associação de árvores com ambientes, numa área de 10.000 km² de floresta de terra firme no sudeste do Peru, concluem existir alta correlação entre ambiente e espécies arbóreas: embora as espécies associadas a um único ambiente sejam muito raras (2,2% das 230 espécies arbóreas descritas), há grande tendência de associação a determinados ambientes, com 76,5% das espécies mais comuns na área de estudo sendo significativamente associadas a ambientes específicos; variações de comunidades florísticas estão associadas a 14 das 16 variáveis de solo medidas; apenas 10% das variações florísticas podem ser atribuídas a uma correlação espacial. Observe-se que a dissimilaridade florística não exclui a dissimilaridade fisionômica.

Pyke *et al.* (2001), estudando uma floresta tropical de baixa altitude no Panamá, embora concluam que a similaridade florística decaia rapidamente com a distância geográfica, afirmam que apenas a pluviosidade e a geologia podem ser utilizadas para prever variações florísticas a nível de espécie em escalas mais amplas.

A existência de alguma influência da proximidade geográfica na composição florística é inevitável, já que as florestas sobre ambientes vizinhos e ambientalmente diferentes o suficiente para sustentar florestas com alguma dissimilaridade terão sempre um fácies de transição nos limites de ocorrência de cada ambiente. A disponibilidade de sementes de uma dada planta melhor adaptada ao ambiente vizinho decairá com o aumento da distância de seu limite e,

embora menos adaptada àquele ambiente, alguns exemplares sobreviverão. Em outras palavras, os limites de mosaicos de diferentes comunidades florísticas apresentarão alguma gradação.

A correlação entre uma imagem ASTER e o mapa geológico da região da Província Aurífera do Tapajós, Estado do Pará, como apresentado em Almeida *et al.* (2005 *a*), demonstra uma alta correlação de coberturas florestais densas com as formações geológicas. Na maior parte daquelas florestas a informação é essencialmente do dossel e, mesmo nas florestas classificadas como abertas, a complexa estrutura do sub-bosque e a abundância de lianas torna apenas a vegetação responsável pela reflectância.

3.1.2 -A influência de solos e geologia na Mata Atlântica

Scudeller *et al.* (2001) analisaram dados florísticos da Mata Atlântica obtidos em 17 diferentes pesquisas. Foram amostrados 19.677 indivíduos e a maior parte identificados em 771 espécies. Em função destes dados dividiram a Mata Atlântica em dois grandes grupos florísticos-estruturais: a Província Costeira e o Platô Atlântico que, entretanto, possuem pequenos nichos florísticos. O padrão predominante de distribuição restrita e alta variação local de espécies, segundo aqueles autores, pode indicar variabilidade de condições ambientais, com a predominância de espécies em nichos ecológicos restritos e com a presença de poucas espécies generalistas, as quais apresentaram alta constância no estudo.

Sztutman e Rodrigues (2002) estudaram a florística, estrutura e fisionomia de três florestas do Parque Estadual da Campina do Encantado (PECE), no município de Pariqueira-Açu. As florestas não apresentam perturbação antrópica e são crescidas sobre turfeira pouco profunda (floresta turfosa rasa), sobre turfeira profunda (floresta turfosa profunda) e sobre solo firme e seco (floresta sobre morrote). Considerando que as três unidades estão sujeitas ao mesmo clima, as diferenças florísticas e estruturais estão principalmente ligadas às características fisiográficas locais, como a topografia e o substrato. Na floresta sobre morrote foram encontradas 112 espécies, com maior riqueza, em termos de famílias, de Myrtaceae seguida de Lauraceae, Leguminosae e Rubiaceae. Na floresta turfosa rasa foi encontrado em total de 46 espécies, com as duas famílias mais ricas sendo também Myrtaceae e Lauraceae. Já a floresta turfosa profunda apresentou apenas cinco espécies. Entre a floresta sobre morrote e a turfosa rasa ocorreram apenas 16 espécies em comum, implicando em índice de similaridade de Jaccard de 0,109 para estas duas florestas. A comparação destas florestas com outras da região mostra similaridades altas da floresta sobre morrote com áreas sobre o embasamento cristalino em Pariqueira-Açu ($J_{ac}=0,460$) e baixa com floresta sobre planície litorânea em Cananéia ($J_{ac}=0,103$). Já a floresta turfosa rasa tem, ao contrário, similaridade alta com floresta sobre planície litorânea em Cananéia ($J_{ac}=0,328$) e baixa com florestas sobre embasamento cristalino em Pariqueira-Açu ($J_{ac}=0,088$). As florestas do PECE são e em uma a influência da flora das planícies litorâneas é mais intensa em uma e em outra predomina a dos terrenos cristalinos da baixa encosta da Serra do Mar, com a proximidade geográfica não preponderando sobre a ambiental.

Godoy (2001) estudou a estrutura e a composição de Mata atlântica secundária sobre calcários e filitos no Alto Ribeira, Estado de São Paulo. Dividiu seu estudo em florestas com períodos de abandono após uso agrícola de 15 anos (inicial), de 25 anos (médio) e de pelo menos 40 anos (avançado). Os resultados demonstram importante dissimilaridade em todos os intervalos de regeneração das florestas. Sobre os calcários ocorreram 129 espécies e apenas 99

sobre os filitos. Do total, 68 espécies são exclusivas sobre calcários e 38 sobre filitos e apenas 61 são comuns às duas formações geológicas, revelando alguma dissimilaridade ($J_{ac}=0,37$). Entretanto ao se calcular aquele índice separadamente nos intervalos, o valor cai para em torno de 0,20, abaixo portanto do limite de similaridade florística (0,25). Segundo o autor, a principal causa para estas dissimilaridades foi o solo, destacando-se os menores teores de alumínio e a maior fertilidade dos solos sobre calcários. Em segundo lugar é a geomorfologia, parâmetro também dependente da geologia.

Enquanto Godoy (2001) demonstra a presença de dissimilaridades florísticas e fisionômicas em florestas crescidas sobre duas litologias muito diferentes, mas comuns, Almeida *et al.*, (submetido *b*) apresentam estudo feito na Serra do Itaberaba, entre os municípios de Guarulhos e Santa Isabel, Estado de São Paulo, com análise de 17 parcelas de 5 x 5 m e em duas parcelas de 30 x 4 m em floresta ombrófila densa em avançado estágio sucessional. As duas últimas foram localizadas sobre solos residuais de duas rochas de protolitos semelhantes e com apenas uma submetida a intensa alteração hidrotermal. Observe-se que, posteriormente ao processo hidrotermal, um evento de metamorfismo regional, fácies anfibolito, afetou todo o conjunto, o que introduziu alguma homogeneização entre as duas rochas. Mesmo assim, a identificação de alterações florísticas e fisionômicas na cobertura florestal sobre as rochas com e sem alteração hidrotermal demonstram a potencialidade da geobotânica na detecção da presença daquele processo. No conjunto dos trabalhos de campo foram coletadas 94 espécies, comuns em Mata Atlântica em avançado estágio sucessional, distribuídas em um total de 40 famílias. A família com maior riqueza foi Rubiaceae, com 13 espécies (12,5%). Nas dezessete parcelas exploratórias de 5 x 5m foram descritas 78 espécies, das quais 41 espécies arbóreas com DAP maior que 15 cm, distribuídas em uma média de 4 espécies arbóreas nas parcelas localizadas sobre rochas com presença de alteração hidrotermal e de 4,6 espécies nas parcelas sobre terrenos sem identificação de alteração significativa. Não foi identificada a correlação de espécies com a presença de alteração, exceto a clara correlação de grupos de *Calathea cylindrica* com altura acentuadamente maior que a habitual, em aparente gigantismo. As espécies arbóreas mais comumente encontradas foram *Aspidosperma olivaceum*, *Sloanea guianensis* e *Sloanea monosperma*, denotando avançado estágio de sucessão, embora houvesse a presença freqüente de gêneros pioneiros iniciais como *Tibouchina*.

Foram coletadas nas parcelas 17 amostras de solo, analisadas para M.O. (matéria orgânica), pH, P, K, Ca, Mg, H+Al (alumínio ativo), S.B. (soma de bases), CTC (capacidade de troca catiônica), V (saturação em bases), B, Cu, Fe, Mn e Zn. Das 17 amostras, 7 foram de solos sobre cordierita-granada-cummingtonita anfibolitos e as demais sobre as diferentes tipos de

ocorrência na área, sendo 7 em metabásicas, e uma em metatufos, uma em metapelito e uma em xisto manganífero, rochas sem ou com incipiente alteração hidrotermal. Os resultados na Tabela 3.1 mostram serem os solos sobre as rochas alteradas notadamente mais pobres. Destacam-se naquela tabela os mais baixos teores em diversos nutrientes minerais (P, K, Ca, Mg, Cu, Fe e Zn), bem como na saturação em bases, capacidade de troca catiônica e presença de matéria orgânica e, ao contrário, maior teor no tóxico Alumínio Ativo. Há que se acrescentar que os solos sobre as rochas alteradas são menos espessos, o que, juntamente com as características químicas, implica em maior pobreza na floresta.

Tabela 3.1 – Resultado de análises de solos coletados nas parcelas exploratórias.

	Rochas intensamente alteradas	Rochas não alteradas
	MÉDIA (n=7)	MÉDIA(n=10)
MO (g/dm ³)	26,33 ± 7,71	35,27 ± 7,54
pH (KCl)	3,93 ± 0,08	3,88 ± 0,12
P (mg/kg)	3,12 ± 1,88	5,55 ± 2,78
K (g/kg)	0,50 ± 0,24	0,79 ± 0,16
Ca (g/kg)	1,00 ± 0,00	1,66 ± 1,42
Mg (g/kg)	1,00 ± 0,00	1,36 ± 0,48
H+Al	95,00 ± 28,17	127,55 ± 21,64
S.B.	2,52 ± 0,21	3,82 ± 1,73
CTC	97,67 ± 28,16	131,40 ± 20,92
V (%)	2,78 ± 0,66	3,06 ± 1,51
B (g/dm ³)	0,35 ± 0,10	0,43 ± 0,11
Cu (g/dm ³)	1,88 ± 0,86	2,96 ± 1,46
Fe (g/dm ³)	45,33 ± 15,53	61,91 ± 44,99
Mn (g/dm ³)	15,27 ± 11,52	14,52 ± 11,02
Zn (g/dm ³)	0,67 ± 0,26	1,17 ± 0,59

Os dois perfis de 4 x 30m são distantes menos de 100 m e têm as mesmas condições de declividade, de direção de vertente, altitude e estágio sucessional da floresta. Têm também protolitos muito semelhantes, predominantemente basaltos para o perfil 1 e basaltos andesíticos, basaltos e andesitos para o perfil 2. No perfil 1 não foi detectada presença de alteração hidrotermal e no perfil 2 as rochas foram intensamente alteradas a cordierita-granada-cummingtonita anfibolito. Estes perfis, portanto, permitiram o estudo daqueles fragmentos

florestais em uma situação quase ideal, na qual as diferenças florísticas e fisionômicas devem ser debitadas principalmente à presença ou ausência de alteração hidrotermal. Os dados florísticos e fisionômicos foram inequívocos: as duas florestas apresentavam grande dissimilaridade.

Do ponto de vista das diferenças fisionômicas, visualiza-se na Figura 3.1 uma floresta mais desenvolvida sobre substrato sem alteração hidrotermal, com estrutura complexa em seu sub-bosque, incluindo lianas. A floresta do perfil 2, além de comparativamente empobrecida, apresenta dossel significativamente mais aberto.

Figura 3.1- Perfil esquemático dos perfis florestais I, sobre metabasitos sem alteração hidrotermal e II, sobre cordierita-granada-cummingtonita anfíbolito. Observar a floresta mais alta e de dossel mais fechado no perfil I.

Nos dois perfis foram descritas 49 espécies de 28 famílias com 10 exclusivamente no perfil 1, 7 no perfil 2 e 11 de ocorrência comum aos dois perfis. A distribuição das espécies entre os perfis evidencia florestas significativamente dissimilares fisionômica e floristicamente, o que pode ser verificado enquanto fisionomia na Figura 3.1 e no aspecto florístico com os resultados da aplicação do índice de Jaccard e na figura 3.2. Resultados deste índice abaixo de 0,25

implicam em florestas dissimilares. Para o conjunto de plantas dos dois perfis em questão o Índice de Jaccard fica em 0,14 e de 0,17 para as espécies arbóreas e 0,05 para as arbustivas, herbáceas e lianas.

Pode-se concluir que as espécies encontradas nos dois perfis analisados, embora de ocorrência comum na floresta ombrófila densa Atlântica, caracterizam a existência de duas comunidades florísticas diferentes como resposta à presença, no substrato, de rochas hidrotermalmente alteradas. Não há dúvidas, portanto, que os dois perfis apresentam alta

dissimilaridade florística e fisionômica entre si. As causas, como foram eliminadas diferenças de altitude e de inclinação e direção de vertente, repousam nos solos. Como os perfis foram demarcados no topo de morro, com a topografia caindo suavemente no extremo oeste, os solos são residuais e suas diferenças se devem às rochas subjacentes. Como as diferenças químicas e mineralógicas entre os protolitos são pequenas, o que diferencia os solos é a presença da alteração hidrotermal.

Embora a literatura específica seja muito pobre, parece evidente a importância da geologia nas características da floresta ombrófila densa Atlântica. As referências acima comentadas abrangem diferentes ambientes geológicos da planície costeira de Cananéia/Pariqueira-Açu, do Neoproterozóico do Grupo Açungui, no médio vale do Ribeira e de rochas do Mesoproterozóico com e sem alteração hidrotermal pré-metamórfica do Grupo Serra do Itaberaba, nas proximidades de Guarulhos. A nota publicada por Amaral (1992) sobre geobotânica no Vale do Ribeira pouco acrescenta, salvo que imagens MSS Landsat, tratadas por classificação não supervisionada, mostram que as classes de vegetação distribuem-se espacialmente de forma semelhante aos mapas geológicos da região. A literatura ecológica consultada para o bioma Mata atlântica não questiona a presença de nichos ambientais bem definidos e restritos espacialmente e com comunidades florísticas diferenciadas, mas os dados de floresta sobre alteração hidrotermal aqui apresentados mostram não só a existência como a importância das alterações na cobertura florestal em função da presença daquele processo.

3.1.3 - A forma de expressão geobotânica dominante em florestas tropicais úmidas e a necessidade de informação sistêmica

A literatura indica que as anomalias geobotânicas associadas a *estresses químicos* da vegetação crescida sobre depósitos minerais são muito mais importantes nas florestas boreais e temperadas, embora também possam existir em florestas tropicais. Nos climas temperados e frios a geobotânica se expressa principalmente por tais estresses sobre comunidades floristicamente pobres. Aí a pobre biodiversidade não propicia uma concorrência entre numerosas espécies, com a não fixação daquelas menos adaptadas ao ambiente. Por outro lado a literatura indica que o grande número de espécies arbóreas das florestas tropicais permite notável seleção, a nível de espécie, em função das variações nas condições ambientais locais. Em situações extremas o estresse poderá se impor, mas as diferenças florísticas e fisionômicas são a principal fonte de informação geobotânica a ser buscada. O encontrado em Almeida *et al.* (submetido *b*) na Serra do Itaberaba indica tanto um estresse (floresta mais baixa, menor número de espécies) como uma dissimilaridade florística e fisionômica, motivada por solos mais pobres em macro e micro nutrientes, soma de bases, matéria orgânica, capacidade de troca catiônica e com maior teor no tóxico alumínio reativo.

Por outro lado o relatado em Sztutman e Rodrigues (2002) não pode ser considerado como ambiente com estresse químico e a dissimilaridade entre as florestas analisadas é enorme. Godoy (2001), tratando de ambientes geologicamente diferentes, ainda que menos extremos, também encontra florestas com alguma dissimilaridade. Já a discussão da literatura sobre a distribuição das espécies na Floresta Amazônica de Terra Firme mostra haver importante dependência da florística às variações ambientais, aí incluídas as relativas à geologia. Embora não sejam apresentados dados sobre a existência de estresses químicos naquela floresta, isto pode ocorrer, como foi demonstrado para a Mata Atlântica.

Por todo o apresentado, a geobotânica por sensoriamento remoto parece ter, nos trópicos, uma grande aplicabilidade. E, ao contrário do que determinaram as pesquisas em altas e médias latitudes, nas baixas latitudes não devem ser buscadas áreas com estresse na vegetação, porém áreas em que as florestas se apresentam diferentes do padrão regional.

Na diferenciação de florestas dissimilares, a adoção do maior número possível de parâmetros naturalmente aumenta a possibilidade de sucesso. Há que se considerar que as variações florísticas implicam em diferentes teores nos compostos bioquímicos, pigmentos, água e atividade dos fitocromos, bem como nos índices de área foliar e de distribuição angular foliar e participação de outros órgãos vegetais. Por outro lado, em função das variações ambientais,

mesmo para uma única espécie as coberturas apresentam potencialmente diferenças em todos os aspectos acima, implicando, por exemplo, em maior ou menor participação de outros órgãos vegetais que não as folhas. Já o teor em água foliar em um dossel é fortemente influenciado pelas características e condições do solo, evidentemente, da mesma forma que a proporção entre os pigmentos foliares. Alterações mais discretas ocorrem com os compostos bioquímicos. Assim, em plantas saudáveis, o teor em amido aumenta durante o dia e é drenado à noite e, na presença do estresses, o acúmulo diurno de amido com a fotossíntese é menos eficiente (Marur, 1998). Paciullo et al. (2001) reportam aumento no teor em lignina com o aumento de idade das folhas, o que não ocorre com celulose e hemicelulose. Espécies vegetais que tenham folhas mais longevas tenderão a ter folhas com mais lignina, o que terá implicações na resposta do *pixel* correspondente à área de dossel que contém tais folhas.

Parte dos compostos foliares tem comportamento interdependente ou parcialmente interdependente em intervalos específicos de comprimentos de onda, com correlações positivas (como clorofila no visível e água foliar no infravermelho ondas curtas), ou negativas (como clorofilas e carotenos no visível, ou água foliar e compostos bioquímicos em parte do infravermelho ondas curtas). Já outros obedecem a condições variadas, como os casos citados para amido e lignina, que podem ser ora mais ora menos reproduzidas em dosséis de florestas dissimilares, o mesmo ocorrendo com os demais compostos bioquímicos.

O peculiar e quase invariável comportamento espectral das folhas fotossinteticamente ativas e o fato da região espectral do vermelho e do infravermelho próximo conter, segundo diversos autores, mais de 90% da informação relacionada à vegetação tiveram um efeito antagônico no sensoriamento remoto de vegetação. Por um lado, rapidamente se avançou e, por outro, grande parte da comunidade se acomodou. Os índices de vegetação baseados na intensidade da resposta do platô do infravermelho próximo são muito eficientes na determinação do que é e não é vegetação fotossinteticamente ativa e não por acaso todos os sensores orbitais de sensoriamento remoto contemplam este intervalo de comprimento de onda, que contém a mais espetacular das feições espectrais das folhas: o *red edge*. A existência desta magnífica feição espectral, talvez a mais intensa entre todas as existentes em materiais naturais comuns (Clark *et al.*, 1995) mascarou de tal forma o uso de outras informações espectrais que diversos trabalhos vieram explicitar a importância de complementar, com o espectro do infravermelho ondas curtas, o visível e o infravermelho próximo (Geberman *et al.*, 1984; Baret *et al.*, 1988; Malthus *et al.*, 1993; Clever, 1999, Apan *et al.*, 2004), bem como pelo do infravermelho termal (Ceccato *et al.*, 2001).

Enquanto os usuários de sensoriamento remoto predominantemente se restringem ao intervalo vermelho-infravermelho próximo, na comunidade acadêmica seu uso é também muito freqüente e ainda predominam os artigos que usam a informação espectral da região espectral do *red edge* sobre os que exploram outras feições do espectro óptico. Esta postura pode ser analisada como uma visão reducionista, que aprofunda o estudo de uma particularidade sem observar o todo. A introdução de complexa matemática ou de sensores hiperespectrais nos trabalhos mais recentes, como em Rondeaux, Steven e Baret (1996), Thenkabail *et al.* (2000 e 2002) e Schuerger *et al.* (2003), apenas aperfeiçoam a análise de informação contida naquela feição.

À visão reducionista de estudar uma única feição espectral e, portanto, um único aspecto da vegetação, se contrapõe a abordagem sistêmica. Como cita Branco (1989), *são as relações de interdependência entre as partes de um todo que constituem a realidade principal*. Esta afirmação refere-se à visão de ecossistema, mas pode ser transposta para uma abordagem, por sensoriamento remoto, de uma planta ou de um conjunto de plantas. Considerando esta questão filosófica – com óbvios efeitos práticos – elaborou-se um método de processamento de imagens que aborda, no limite da resolução espectral dos sensores disponíveis, a planta enquanto sistema. Um sistema que tem água, pigmentos foliares, compostos bioquímicos e estruturas celulares fundamentais em sua sobrevivência e que influenciam a interação com a radiação incidente nas folhas. Mesmo que exista interdependência entre estes compostos e propriedades, esta independência será sempre relativa e as variações possíveis são numerosas. Considerou-se, assim, que a abordagem simultânea destes aspectos aumentaria a possibilidade de diferenciar comunidades vegetais, no caso de coberturas vegetais naturais, e do estado de sanidade ou vigor, em plantações. A abordagem sistêmica procura analisar a planta fotossinteticamente ativa enquanto um sistema que possui pigmentos, água e compostos bioquímicos em conjunto harmônico e vivo e o dossel como uma superfície característica de um conjunto de plantas. Nesta abordagem as possibilidades de combinações de variações são muito numerosas, o que permitirá separar coberturas vegetais com parâmetros altamente correlacionados, mas que se distinguem no detalhe. Um processamento digital que concentre informações espectrais relacionadas a compostos ou processos da vegetação e as hierarquize terá, assim, maiores possibilidades de distinguir pequenas variações das coberturas vegetais, as quais, por sua vez, refletirão as condições ambientais locais.

Além das informações potencialmente presentes entre 400 e 2500 nm, há o infravermelho termal, outra fonte de informação parcialmente independente que, entretanto, foi explorada apenas em aplicação agrícola do método criado. Para o futuro pretende-se introduzir esta fonte

de informação na geobotânica, pois informa, além da evapotranspiração, da fitossociologia e do estado hídrico das coberturas vegetais, esta última inegavelmente relacionada às características do solo.

3.2 - O conjunto de métodos da abordagem sistêmica

3.2.1. Componentes da vegetação relevantes em estudos espectrais

As plantas são constituídas por água, compostos orgânicos e material inorgânico de origem mineral. Os compostos orgânicos podem ser agrupados de diferentes maneiras e a mais clássica e adequada à análise espectral é dividi-los em carboidratos, lipídios, proteínas e pigmentos (Coutinho, 1970). Os carboidratos são os principais componentes orgânicos da vegetação, sendo divididos em monossacarídeos, oligossacarídeos e polissacarídeos. Estas duas últimas classes podem ser genericamente denominados de açúcares e sua detecção pode ser altamente significativa na agricultura. Já os monossacarídeos compõem a maior parte das plantas e a celulose é o mais abundante, com em torno de 30 a 50% em peso das plantas secas. Lignina é o segundo componente mais expressivo em peso e tem, entre outras funções, a de proteger a celulose da degradação (Elvidge, 1990). O amido é o terceiro mais importante e é uma reserva de energia para o metabolismo vegetal, podendo ser transformado em açúcares. A identificação dos monossacarídeos por espectrometria de reflexão, em material seco, é mais efetiva que na planta viva, pois o essencial de suas feições de absorção tem origem na ligação O-H, ligação que também ocorre na água, o que mascara as respostas espectrais, como citado anteriormente. Parte destes compostos, por ocorrerem em grandes quantidades, pode ser identificada em imagens multiespectrais de alta resolução espectral no intervalo de 2000 a 2450 nm.

De acordo com Coutinho (1970), os lipídeos são óleos e, à semelhança dos carboidratos, são também formados por C, H e O, mas são pobres em oxigênio. As proteínas têm também nitrogênio em sua composição e, se são essenciais à planta, ocorrem em pequenas quantidades. Por serem fonte de nitrogênio, que está ligado à produtividade agrícola, a detecção por espectrometria de imageamento das proteínas é mais estudada. Entretanto, em imagens multiespectrais, sua detecção ainda não está resolvida.

Os pigmentos podem ser divididos em três categorias, as clorofilas, os carotenóides (carotenos e xantofilas) e antocianinas (Coutinho, 1970). As clorofilas são os mais importantes, desempenhando um papel essencial na captação da energia luminosa para a fotossíntese e mascaram os demais pigmentos. Como são os primeiros a se degradarem (Schwaller, 1984), é na senescência (ou em estresses diversos) que os demais pigmentos são mais observados. O teor em clorofila no início da vida das folhas é também reduzido, o que torna os carotenos, a segunda categoria mais importante dos pigmentos, visíveis nesta fase. Já as xantofilas são normalmente visíveis na senescência, além de muito presentes em flores e frutos. Todos estes pigmentos têm comportamentos espectrais diagnósticos no visível. A detecção, em função das largas feições de

absorção, não é em princípio difícil em espectrometria. Em imagens multiespectrais, normalmente pobres em bandas na região do visível, pode-se detectar clorofila b + carotenóides na região entre 450 e 500 nm e clorofilas a+b na região de 630 a 680 nm. Já na senescência os carotenóides são amplamente detectáveis, com sua feição de absorção aparecendo vigorosamente na região entre 450 e 550 nm.

A água, que pode compor até 90% do peso celular (Schwaller, 1984) é essencial nas reações bioquímicas. Como apresentado anteriormente, sua detecção, mesmo em sensores de bandas largas, não apresenta problemas.

Considerando que a abordagem sistêmica baseia-se no exame conjunto dos diversos compostos químicos presentes na vegetação e com resposta espectral diagnóstica, o maior número possível dos compostos acima, na dependência da resolução espectral do sensor, devem ser tentativamente detectados. Por exemplo, a participação de carotenóides será mais intensa em parte de floresta estressada. Por outro lado, o albedo do dossel, embora fortemente influenciado pelas características foliares, também informa de sua macro-textura, o que é importante no reconhecimento de coberturas vegetais dissimilares.

Assim as informações espectrais podem ser divididas de acordo com os intervalos de comprimento de onda. Como apresentado no capítulo 2, no visível o essencial das feições de absorção são devidas a pigmentos e, secundariamente, a compostos fotocaptadores não pigmentares. A exigência mínima para viabilizar a identificação de um dado composto por espectrometria de laboratório (bem como em imagens hiperespectrais ou multiespectrais), é a existência de feições de absorção que sejam, ao mesmo tempo, passíveis de identificação por um dado sensor e que não se confundam, na resolução daquele sensor, com feições de absorção de outros compostos. Neste sentido, pode-se listar, ainda que com graus de dificuldade diversos, a identificação das clorofilas *a* e *b*, carotenóides, α -caroteno, xantofila, antocianina, da razão carotenóides/clorofilas e da intensidade de absorção por fitocromos. Como a reflexão difusa é pouco importante no visível, a reflectância do dossel será muito influenciada pela reflectância especular, função quase que unicamente de sua superfície. Com isso, considerando-se a reflexão em todo o intervalo do visível, a informação relativa à arquitetura do dossel estará presente e será muito importante.

O infravermelho próximo informa tanto das estruturas celulares do conjunto de folhas como da arquitetura do dossel. Entretanto, como neste intervalo de comprimentos de onda a transmitância da REM é intensa, como também a reflexão difusa das folhas, a superfície do dossel tende a se comportar de acordo com a lei de Lambert e deve informar menos de sua

rugosidade: as “sombras” (áreas não iluminadas diretamente) serão menos absolutas que no visível e no infravermelho ondas curtas, o que tenderá a minimizar a informação de albedo.

No infravermelho ondas curtas, além da água foliar, de fácil detecção mesmo em sensores de bandas largas, diversos compostos bioquímicos são passíveis de identificação, em que pese a tendência da água de mascarar toda resposta neste intervalo de comprimentos de onda. Zagolski *et al.* (1996) indicam feições de absorção independentes (com pelo menos 10 nm de distanciamento de outras feições) de nitrogênio (2180 e 2190 nm), de lignina (1722 e 2270 nm) e celulose (1734 e 2100 nm). Já Curran *et al.* (2001) indicam feições de absorção diagnósticas causadas por lignina, celulose, proteína, açúcar, amido, água, nitrogênio e amino-ácidos. Martin *et al.* (1998) fazem uma classificação sobre imagem AVIRIS considerando apenas feições espectrais de proteínas e lignina, obtendo excelente resultado.

3.2.2. As técnicas de processamento digital

a) As razões de bandas

O método proposto tem quatro fases. Na primeira são utilizadas simples razões de bandas (ou índices espectrais baseados em simples razões de bandas), voltados a realçar as respostas em tese associadas a componentes da vegetação. O princípio básico das razões de bandas é suprimir a informação espectral comum a ambas e realçar a diferente. Diversos modelos teóricos foram desenvolvidos para prever a reflectância foliar associada a pigmentos, estrutura celular, água e compostos bioquímicos, como em Jacquemoud *et al.* (1996) e Dawson *et al.* (1998). Entretanto tais modelos têm dificuldade para inverter a previsibilidade (da reflectância observada, prever as concentrações nos diversos compostos) e, por conseqüência, a maior parte das relações entre reflectância foliar e pigmentos é obtida empiricamente e o mais simples e mais utilizado dos métodos de realce espectral é a aplicação de razões entre bandas. Embora as razões de bandas não sejam métodos precisos (Curran, 1989), Mustard e Sunshine (1999) consideram que, quando construídas sobre uma base de espectrometria, as razões de bandas podem ser ferramentas efetivas na análise espectral. Esta ferramenta vem sendo intensamente utilizada desde os primórdios do sensoriamento remoto multiespectral e são numerosos os trabalhos que a utilizam, inclusive em pesquisas recentes com imagens hiperespectrais (por exemplo Blackburn, 1998; Thenkabail *et al.*, 2000 e Apan *et al.*, 2004). As razões de bandas devem ser antecedidas de correção dos efeitos atmosféricos, sob risco de alterar seriamente a resposta, notadamente quando utilizados os comprimentos de onda no visível e, sobretudo, na região do azul. As razões de bandas normalmente utilizam um *comprimento de onda de referência* (em geral entre 750 e 900 nm) e um *comprimento de onda índice* (Sims e Gamon, 2002).

Em função da resolução espectral do sensor utilizado, estes índices podem ser mais ou menos numerosos. Por exemplo, em Almeida e Souza Filho (2004) foram utilizados 15 índices sobre imagens hiperespectrais AVIRIS, com 224 bandas contíguas. Já em Almeida *et al.* (em preparação) foram 8 índices sobre imagens TM Landsat. A aplicação de razões de bandas sobre imagens multiespectrais, de bandas largas, resulta no realce de informações não desejadas, pois num intervalo espectral da ordem de dezenas a uma centena de nanômetros, diferentes compostos têm picos de absorção. Assim as informações realçadas desta forma em imagens hiperespectrais, ou multiespectrais de resolução mais fina, produzem informação muito mais específica, reduzindo a inevitável superposição de feições espectrais de diferentes origens. Mas, de qualquer forma, se as razões forem construídas sobre feições espectrais de dimensões ao menos similares ao intervalo de comprimentos de onda coberto pela banda, uma parte considerável da informação realçada na imagem resultante será relacionada às feições espectrais do composto que se desejava realçar a resposta. Uma parte da resposta, entretanto, será espúria e não correlacionada aos compostos de vegetação sob estudo ou mesmo à vegetação.

As imagens resultantes destas razões de bandas - ou índices espectrais – apresentam uma correlação variável. Como exemplo, apresenta-se a matriz de correlação entre as razões de bandas utilizadas na exposição deste capítulo, em área da Província Aurífera de Tapajós (Tabela 3.2), bem como as respectivas imagens (Figura 3.4).

Tabela 3.2 – Matriz de correlação entre as razões de bandas de imagem Aster de parte da Província Aurífera de Tapajós.

	3/1	3/2	3/4	3/5	3/7	3/5*6*7*8*9
3/1	1	0,915	-0,231	0,824	0,813	-0,484
3/2	0,915	1	-0,159	0,77	0,759	-0,378
3/4	-0,231	-0,159	1	-0,056	-0,036	0,693
3/5	0,824	0,77	-0,056	1	0,9	-0,329
3/7	0,813	0,759	-0,036	0,9	1	-0,313
3/5*6*7*8*9	-0,484	-0,378	0,693	-0,329	-0,313	1
correlação média (em módulo)	0,711	0,664	0,363	0,647	0,637	0,533

As correlações muito elevadas, como entre as razões 3/1 e 3/2, são esperadas, pois estes índices relacionam-se essencialmente aos mesmos pigmentos foliares, as clorofilas a e b, com pequena participação de carotenóides no primeiro. A simples proximidade dos intervalos de comprimento de onda não explica totalmente a alta correlação. Como se observa na Tabela 3.3, os intervalos de comprimentos de onda das bandas 5 e 7 do sensor utilizado são mais próximos e, por outro lado, muito mais discretos. Pelo critério de proximidade, deveriam apresentar uma correlação mais elevada, mas como utilizam intervalo espectral mais discreto, as feições de

absorção serão também mais específicas, ainda que altamente correlacionadas: em ambas a água foliar tem absorção relevante e os compostos bioquímicos ressaltados, respectivamente amido e lignina, têm comportamento espectral e bioquímico também semelhantes.

As imagens referentes aos seis índices são, já visualmente, muito dessemelhantes. Mesmo as imagens mais correlacionadas, referentes aos índices 3/1 e 3/2 são distintas. O conjunto (Figura 3.4) se apresenta bastante variado. As seis imagens tiveram o mesmo realce de contraste.

Figura 3.4 – Índices espectrais baseados em razões de bandas do sensor Aster, respectivamente entre as bandas 3/1(A), 3/2(B), 3/4(C), 3/5(D), 3/7(E) e 3/(5*6*7*8*9)(F). Os dois primeiros índices referem-se a pigmentos, o terceiro a água e os últimos a matéria seca e água foliares

Na Tabela 3.3 estão apresentadas as razões utilizadas na tese, incluindo os anexos.

Tabela 3.3 – Índices espectrais e respectivos sensores utilizados neste capítulo e nos anexos bem como a autoria dos índices.

Composto/propriedade foliar	ETM e TM	ASTER	AVIRIS	Referência original
Clorofilas <i>a</i> e <i>b</i>	ETM2/ETM3	Ast1/Ast2		Chamard <i>et al.</i> (1991)
Clorofilas <i>a</i> e <i>b</i> e carotenóides	ETM4/ETM2	Ast3/Ast1		Almeida e Souza Filho (2004)
Água foliar (LWC)	ETM4/ETM5	Ast3/Ast4	1066/1452	Thomas <i>et al.</i> (1971)
Compostos bioquímicos (material seca)	ETM4/ETM7	-		Almeida e Souza Filho (2004)
Compostos bioquímicos 1	ETM4/ETM5*ETM7	-		Almeida e Souza Filho (2004)
Compostos bioquímicos 2	-	Ast3/Ast5*Ast6*Ast7*Ast8		Almeida e Souza Filho (2004)
Compostos bioquímicos (ênfase amido)	-	Ast3/Ast5		Almeida e Souza Filho (2004)
Compostos bioquímicos (ênfase lignina)	-	Ast3/Ast8		Almeida e Souza Filho (2004)
NDVI (red edge)	(ETM4-ETM3)/(ETM4+ETM3)	-		Rouse <i>et al.</i> (1973)
Clorofila <i>a</i>			461/422 807/638	Almeida e Souza Filho (2004)
Clorofila <i>b</i>			520/470 807/648	Almeida e Souza Filho (2004)
α -caroteno			520/442	Almeida e Souza Filho (2004)
Carotenóides			539/490 807/490	Almeida e Souza Filho (2004)
Antocianina			510/530	Almeida e Souza Filho (2004)
Fitocromo P730			730/845	Almeida e Souza Filho (2004)
Fitocromo P660			778/658	Almeida e Souza Filho (2004)
Lignina			1028/2101	Almeida e Souza Filho (2004)
Celulose			2211/2400	Almeida e Souza Filho (2004)
Nitrogênio			1731/1691	Almeida e Souza Filho (2004)
NDVI			(750-692)/(750+692)	(Galvão <i>et al.</i> 1999)

Para maior clareza, apresentam-se na Tabela 3.4 os intervalos de comprimentos de onda em nanômetros relativos às bandas do espectro refletido dos sensores Aster (satélite Terra) e TM-ETM+ (satélites Landsat 5 e 7). Já as imagens AVIRIS são obtidas em 224 bandas contíguas de 10nm de intervalo de comprimento de onda, entre 400 e 2500 nm.

Tabela 3.4 – Intervalos de comprimentos de onda em nanômetros relativos das bandas do espectro refletido dos sensores Aster (satélite Terra) e TM-ETM+ (satélites Landsat 5 e 7).

Bandas Aster								
Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8	Banda 9
520-600	630-690	760-860	1600-1700	2145-2185	2185-2225	2235-2285	2295-2365	2360-2430
Bandas TM-ETM+								
Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7			
450-520	520-600	630-690	760-900	1550-1750	2080-2350			

b) A análise por principais componentes

Na segunda fase, o conjunto de imagens geradas com as razões de bandas ou de índices espectrais é submetido a uma análise por principais componentes (APC). A APC é uma técnica estatística multivariante que seleciona combinações lineares não correlacionadas de variáveis em um espaço n dimensional (Davis, 1970). Na primeira combinação, ou componente principal, está presente a informação mais correlacionada do conjunto de imagens original, o que representará uma parte considerável de sua variância total, sendo tanto maior quanto mais correlacionadas entre si forem as imagens originais. Não raramente concentra-se na primeira componente (CP1) mais de 90% da variância de um conjunto de imagens multiespectrais. Com o aumento da ordem de cada combinação linear extraída (ou componente principal - CP) a combinação obtida possuirá menor variância e representará respostas menos correlacionadas nas imagens originais e a última componente tem geralmente milésimos a centésimos de milésimos da variância total e é apresentada na matriz de autovalores.

Esta técnica tem três funções simultâneas: a de separar as parcelas de informação redundante e as de informação espúria e de concentrar a informação de interesse em componentes específicas. A informação redundante está concentrada na primeira componente, que contém a maior parte da variância total e a informação mais correlacionada no conjunto de imagens geradas pelos índices. Na Tabela 3.5 está a matriz dos autovalores, exprimindo a

porcentagem da variância total em cada componente principal da APC sobre a série de imagens de razões de bandas da Figura 3.4.

Tabela 3.5 – Matriz de autovalores, expressando a porcentagem da variância total do conjunto de seis índices presente em cada componente principal.

PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
62,81	24,86	5,25	4,24	1,66	1,16

Pode-se observar que nas duas PCs de maior ordem há 87.67% da variância total, a qual pode ser considerado como a informação presente. Esta porcentagem é bem mais elevada em imagens referentes a bandas espectrais, já que a correlação entre as imagens originais é muito superior à encontrada em um grupo de imagens obtidas pela aplicação de índices espectrais.

Na componente de maior ordem estará a informação menos correlacionada de todo o conjunto e, se as razões de bandas forem construídas sobre intervalos discretos (ou seja, relacionando-se essencialmente com feições de absorção específicas) a informação presente não terá relação com o objeto de estudo. Isto é claramente demonstrado em Almeida e Souza Filho (2004) onde, em imagens hiperespectrais AVIRIS, as informações de origem mineral se concentram na CP de maior ordem. É assim importante salientar que a aplicação da APC dentro do método utilizado não tem como objetivo principal a redução da dimensionalidade, mas a ordenação da informação presente em um conjunto de imagens no qual cada uma contém informação realçada de compostos selecionados.

O terceiro passo é a escolha das CPs, a qual, em função da aplicação que se faz, obedece a diferentes conceitos. No caso de uma aplicação agrícola (como a apresentada no Anexo 2), é na CP1 que está a essência da informação a ser traduzida como previsão de safra: num dossel de plantas geneticamente idênticas, a informação buscada deve representar o essencial da planta, que será expresso na resposta comum à composição em pigmentos, em água, compostos bioquímicos e evapotranspiração foliar, o que se encontra representado na CP1. As demais CPs informarão apenas aspectos secundários, ainda que eventualmente importantes, como carências específicas. Numa abordagem regional, em que a porcentagem de cobertura do solo é muito variável (como no Anexo 1), a presença da CP1 é necessária, com a informação dominante definindo o que é vegetação e o que não é. Para as demais CPs a compor o triplete da composição colorida falsa-cor, escolhe-se ou duas CPs que tenham pesos dominantes de índices de comportamento mais independente entre si ou a CP2 (que comporá com a CP1 algo em torno de 90% da informação total) e a CP que tiver peso dominante das clorofilas *a* e *b*, principais

pigmentos fotossintéticos. Numa abordagem de geologia regional (ou de geobotânica *sensu strictu*, sobre uma mineralização) em que a cobertura vegetal for muito densa e a informação espectral de outra origem possa ser considerada excepcional, a informação mais correlacionada não tem maior importância, pois o que se procura são variações dentro de um padrão regional: não há necessidade da informação altamente correlacionada à resposta geral da vegetação para determinar onde é vegetação e onde é solo ou rocha. Nestes casos a escolha das três CPs deve priorizar aquelas em que informações mais independentes estejam dominantes, como clorofilas (pigmentos fotossintéticos), água foliar (essencial pela alta correlação com a disponibilidade hídrica dos solos, o qual tem, por sua vez, alta correlação com as rochas que o formaram), matéria seca (compostos bioquímicos como celulose, lignina, mais passíveis de resposta espectral em folhas secas, galhos e casca de árvores) ou em pigmentos como carotenóides, xantofila e antocianina, que aparecem mais notadamente em folhas senescentes. No caso da geobotânica na prospecção de depósitos metálicos, como apresentado no Capítulo 4, as CPs ideais tenderão a ser de ordem mais elevada, pois as coberturas vegetais sobre as mineralizações, em princípio, deverão ter uma resposta que foge das variações do background regional, da mesma forma como a composição química do solo se afastará do usual da região.

Quando é necessário conhecer a origem da informação presente em cada CP para a escolha das que forem compor uma composição colorida falsa-cor, a escolha é feita a partir da análise da matriz dos autovetores. Esta matriz permite identificar a origem da informação presente em cada CP, indicando qual ou quais índices espectrais colaboram e como colaboram (intensidade e sinal) com a imagem assim criada. Na CPI é semelhante o peso ou fração de informação aportada por cada imagem, enquanto nas demais componentes há uma distribuição bastante desigual, idealmente predominando em uma dada CP informação oriunda de índices de esperada alta correlação, como, por exemplo, de índices que se associem a folhas fotossinteticamente ativas ou a índices que se associem a matéria seca (lignina, celulose) ou aos chamados pigmentos marrons. De qualquer forma, na CP em que a informação de um dado índice domina, os demais índices aportam uma fração de informação complementar e correlacionada ao índice dominante. Não é exagerado considerar que parte desta informação complementar seja originalmente espúria, não relacionada à feição espectral teoricamente realçada pelos índices, mas sim, direta ou indiretamente, à feição dominante na CP em questão. Na Figura 4.2 estão as seis imagens referentes às PCs obtidas no ensaio de aplicação do método à geologia regional da Província Aurífera de Tapajós e na Tabela 3.6 está apresentada a matriz de autovetores correspondente. Observe-se, finalmente, que a análise visual das imagens deve ser feita conjuntamente com a análise da matriz dos autovetores.

Figura 3.5 – Imagens das principais componentes geradas pela APC sobre os seis índices espectrais utilizados. Observar como a PC1 apresenta resposta mais homogênea e como as CPs 2, 3 e 4 (dominadas respectivamente por água foliar, água foliar e matéria seca e pigmentos – Tabela 3.5) permitem a distinção de florestas dissimilares.

Tabela 3.6 – Matriz de autovetores, expressando o peso da participação (em módulo) de cada imagem (no caso de cada índice) na composição de cada componente principal.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
3/1	-0,432	-0,113	0,179	0,345	-0,009	0,806
3/2	-0,416	-0,167	0,343	0,591	-0,03	-0,576
3/4	0,214	-0,655	-0,635	0,349	0,008	0,015
3/5	-0,458	-0,281	-0,079	-0,403	0,731	-0,086
3/7	-0,464	-0,302	-0,108	-0,46	-0,681	-0,078
3/(5*6*7*8*9)	0,411	-0,6	0,655	-0,19	0,002	0,072

Em negrito na tabela acima estão indicados os pesos relativos aos índices que justificaram sua escolha para compor a composição colorida falsa-cor. Enquanto na CP1 os pesos estão bem distribuídos, exceção para o índice que expressa água foliar, na CP2 a água foliar domina, com os índices 3/4 e 3/(5*6*7*8*9) apresentando pesos similares e sinais iguais, o que reforça a qualidade da informação presente, pois ambos informam da água foliar. Observe-se ainda a água foliar também estará presente nos índices 3/4 e 3/5, os quais têm, nesta CP2, o mesmo sinal e pesos não desprezíveis. Na CP3 a informação parece ser dominada pelos mesmos índices, mas agora com sinais invertidos, o que leva a considerar que o índice 3/(5*6*7*8*9) aporta informação da matéria seca (principalmente lignina e celulose) expressa em números digitais elevados. Finalmente, na CP4 a informação presente é dominada pela participação do índice 3/2, que informa de clorofila a+b, pigmentos fotossintéticos. Deve ainda ser observado que ocorre nesta componente uma importante participação e com igual sinal do índice 3/1 (também relacionado às clorofilas) e 3/4, (água foliar). Os demais índices, que informam de compostos bioquímicos (ou matéria seca) estão representados com sinal invertido, o que seria de se esperar, pois sua presença é mais efetiva na ausência de folhas fotossinteticamente ativas. Assim, uma composição com a presença destas três imagens terá condições de separar florestas dissimilares por abordar, simultaneamente, aspectos muito diferentes e parcialmente independentes da cobertura vegetal. Aqui, em função da conhecida dificuldade de se obter informações sobre compostos bioquímicos em dosséis, retorna-se às Figuras 2.6 e 2.8. Simulando-se a resolução espectral do sensor Aster nos dados da Figura 2.8, observa-se na Figura 3.6 que o comportamento espectral de vários compostos bioquímicos na resolução daquele sensor permite sua distinção ou, ao menos, que a presença mais efetiva de um ou outro implique em reflectância diferenciada nas bandas Aster 5 a 8. Como se depreende da Figura 2.6, o teor em água foliar não altera a reflectância no intervalo de comprimentos de onda abrangidos por aquelas bandas e como a absorvância dos compostos bioquímicos é pouco intensa entre 760 e 860 nm (intervalo de sensibilidade da banda Aster 3), sugere-se haver razoável presença de informação espectral

daqueles compostos nas razões feitas tendo como banda de referência a Aster 3 e como bandas índice as bandas 5, 6, 7, 8 e 9.

c) Introdução da imagem de albedo

A porcentagem de sombras no dossel florestal é função do tamanho das copas e da arquitetura do dossel, do índice de área foliar, das propriedades ópticas das folhas e da geometria de iluminação e de visada do sensor (Li & Strahler, 1992). Estes parâmetros, exceto os dois últimos, se associam à dissimilaridade florística e/ou fisionômica e são fracamente representados no NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) nas florestas tropicais (Asner & Warner, 2003), bem como em índices espectrais baseados em razões de bandas, pois as sombras se referem ao albedo, que independe do comprimento de ondas e é em sua maior parte anulado na operação. A introdução de informação de albedo é de grande interesse em coberturas florestais densas e o caminho mais eficiente é a obtenção de uma CP1 sobre um subconjunto das bandas originais. A escolha das bandas a comporem a análise por principais componentes depende das características do sensor e da atmosfera dominante na região. Na Amazônia, é interessante não se utilizar das bandas no visível, sobretudo nos menores comprimentos de onda, dado a intensa interferência atmosférica por espalhamento de Rayleigh. O infravermelho próximo informa menos do albedo do dossel devido à elevada transmitância das folhas, mas, por outro lado, é particularmente adequado para informar da textura dada pela geomorfologia, um aspecto

essencial para a interpretação geológica. Já para informar do albedo do dossel, deve-se usar imagens em comprimentos de onda que apresentem baixa transmitância, mas importante reflectância, como na região de 1650 nm. Esta banda, entretanto, apresenta a absorção de REM essencialmente por água e seu uso isolado ou mesmo o de uma CPI de bandas apenas no infravermelho ondas curtas irá ser altamente correlacionada com variações no teor de água foliar. Assim considera-se ideal obter a CPI de um conjunto de bandas no infravermelho próximo (muito pouco afetadas por variações no teor em água foliar), no infravermelho ondas curtas e, quando possível, em comprimentos de onda relativos ao vermelho. A introdução desta imagem de albedo, como um componente de intensidade, auxilia na interpretação geológica, como se observa na Figura 3.7.

Na composição colorida da Figura 3.7 foram utilizadas as CPs 2, 3 e 4, que explicam respectivamente 24,86%, 5,25% e 4,24%, ou seja, apenas 34,35% da variância total dos seis índices. Esta observação é importante quando analisada à luz do significado da informação predominante na distinção de diferentes superfícies. Na Figura 3.8 (A) está a mesma imagem da Figura 4.4 (A). Nas Figuras 3.8 (B) e (C) a PC4, que explica 4,24% da variância, foi substituída pela PC1, que explica 62,81%. Para fins de excluir a possibilidade da infeliz composição colorida falsa-cor PC2 PC1 PC3 em RGB, como em (B), pudesse levar a uma conclusão equivocada, apresenta-se em (C) a melhor composição encontrada para estas PCs: PC1 PC2 PC3 em RGB. As três imagens da Figura 3.8 não deixam dúvida que a imagem mais “pobre” (34,35%) em informação ocupa melhor o espaço RGB que as “ricas”, com 92,92% da variância, o que é explicado pela maior homogeneidade da imagem CP1.

Na Figura 3.9 é apresentado um fluxograma com as várias fases do processamento. Para ilustrar a apresentação do método, apresenta-se a aplicação a uma imagem Aster, de região recoberta por florestas na Província Aurífera de Tapajós, Estado do Pará. O objetivo é o realce das dissimilaridades florestais, que em parte são devidas à geologia. A imagem final é comparada ao mapa geológico 1:250.000 da CPRM.

Como alternativa adicional, o uso de filtros de convolução passa-baixas pode ser útil, não só ao uniformizar as zonas homólogas, mas também ao realçar as respostas dominantes. Pelo espírito do método espera-se alguma variabilidade nas respostas, mesmo sobre áreas de solos relativamente homogêneos, como utilizado no Capítulo 4.

Figura 3.7 – Região da Província Aurífera do Tapajós (PA). Em **A**, PCs 243 em RGB de uma APC sobre um conjunto de seis índices construídos sobre imagem ASTER. Em **B**, a mesma imagem com a presença de componente de intensidade dada pela PC1 de APC sobre as bandas Aster 2, 3 e 4. Abaixo um segmento de Mapa Geológico em 1:250.000 da CPRM, com parte das folhas Mamãe Anã e Caracol. Considerar zonas homólogas em textura e tonalidade e sua semelhança com as formações geológicas. Considerar virtual ausência de resposta espectral de origem mineral e a relativa monotonia mineralógica entre a maioria das formações.

Figura 3.8 – Composições coloridas em RGB: (A) CP2 CP4 CP3; (B) CP2 CP1 CP3 e CP1 CP2 CP3. Considerar que a imagem (A) tem 34,35% da variância total e as em (B) e (C) têm 92,92%.

3.2.3. A aplicabilidade do método à Floresta Amazônica

Como citado anteriormente, a Floresta Amazônica pode ser dividida em três grandes formações florestais, com a de terra firme sendo amplamente dominante em área. Na área de estudo apenas a floresta de terra firme está representada e, em sua quase totalidade, está intocada, condição essencial para a abordagem desta pesquisa. O sub-tipo de floresta predominante na região é a Floresta Ombrófila Tropical, mas também tem ampla ocorrência na região a Floresta Tropical Aberta, caracterizada por árvores espaçadas e grande quantidade de lianas lenhosas e estratos arbustivo e herbáceo, implicando em denso recobrimento de afloramentos de solo e rochas, afastando uma participação significativa de origem mineral na resposta espectral obtida por sensores remotos. Assim as semelhanças encontradas entre a imagem e a geologia mapeada têm na vegetação sua origem, indicando tanto a potencialidade do método de processamento digital utilizado em realçar as respostas espectrais de florestas florística e fisionômica dissimilares como a presença de importante correlação entre estas e

a geologia. Estas florestas, aparentemente monótonas fisionomicamente, apresentam constante variação da sua composição botânica, em função das condições do meio ambiente, dos tipos de solo, da drenagem, da aeração e da disponibilidade de água superficial e profunda (Pires, 1973), aspectos influenciados em maior ou menor grau pela geologia, o que justifica o encontrado.

3.2.4. A abordagem sistêmica frente a técnicas semelhantes

A aplicação de APCs sobre conjuntos de razões de bandas orientadas para o realce de materiais específicos não é corriqueira mas tão pouco novidade. Diversos trabalhos a utilizaram com sucesso no mapeamento de minerais, como em Fraser e Green (1987), Chavez e Kwarteng (1989), Loughlin (1991) e Souza Filho e Drury (2001). Em aplicações sobre vegetação, entretanto, a única referência encontrada foi a do trabalho de Paradella *et al.* (1994).

A abordagem utilizada em Paradella *et al.* (1994) utiliza razões de bandas seguidas de aplicação de APC no realce de diferentes classes de vegetação, tal como no método de abordagem sistêmica. O método utilizado por aqueles autores, entretanto, guarda pouca relação tanto filosófica como prática com o que aqui se propõe. Aqueles autores utilizaram-se das razões de bandas para minimizar os efeitos da topografia e no realce da resposta espectral. As razões foram escolhidas em função de seu aspecto visual e não a partir do comportamento espectral de componentes da vegetação. Entretanto, tratando-se de imagens TM Landsat, com apenas 6 bandas no espectro refletido, a quase totalidade das razões selecionadas se confunde com a série desenvolvida sobre os espectros de pigmentos e água foliares e compostos bioquímicos. Neste aspecto, a diferença predominante é filosófica, pois das oito razões de bandas TM utilizadas em Almeida *et al.* (em preparação) cinco coincidem com as 6 razões de Paradella *et al.* (1994). Já na aplicação da APC as diferenças entre as duas abordagens são profundas. Aqueles autores utilizam a APC apenas na redução de dimensionalidade, selecionando as três primeiras componentes sem análise da matriz dos autovetores, seguramente por conterem a maior parte da variância, embora não cite textualmente este aspecto. Aqui as diferenças filosóficas são profundas e as práticas também. Finalmente, a introdução de informação de albedo inexistente naquele trabalho que, aliás, é um dos marcos na história da geobotânica por sensoriamento remoto no Brasil.

3.2.5. Histórico de experiências de aplicações da abordagem sistêmica

a) A origem do método

O método foi desenhado em suas formas gerais durante o estágio de pós-doutoramento no Laboratoire d'Écologie Terrestre (LET), do CNRS de Toulouse. Aquela instituição, voltada a estudos da ecologia da paisagem em escalas variadas, tem na extremamente variada e bem estudada vegetação costeira da região de Kourou, Guiana Francesa, um sítio para testes de desenvolvimento de aplicações de sensores remotos ao estudo de coberturas vegetais naturais, tanto no espectro óptico como em microondas. O método foi desenvolvido sobre uma imagem TM-Landsat 5 e adotando o princípio filosófico básico de que as diferentes coberturas vegetais poderiam ter em seus dosséis diferentes teores médios de água foliar, diferentes teores em pigmentos fotossintéticos e diferentes áreas foliares. Considerou-se a seguir que tais índices concentrariam informação de vegetação, mas parte desta informação restaria não extraída das bandas originais. Para complementar a informação dos índices estudou-se um método estatístico que permitisse hierarquizar a informação de um conjunto de bandas espectrais utilizando como “guia” os diferentes índices. Assim aplicou-se uma análise por principais componentes sobre o conjunto dos três índices e das bandas do sensor TM Landsat neles utilizadas. Nas componentes que concentrassem a informação dos índices estariam também as informações das bandas originais a eles correlacionadas. Composições coloridas das CPs de menor ordem, que explicavam a maior parte da variância, também informavam muito pouco. As composições coloridas das CPs que tinham os maiores pesos dos índices, mesmo explicando pequena parcela da variância total, concentravam a informação relativa à vegetação, permitindo separar a maior parte das formações florestais presentes e parte das diferentes savanas (Figura 3.10).

A abordagem sistêmica foi testada em um conjunto de pesquisas ainda pequeno, mas já bastante diversificado. Quando de seu desenvolvimento o objetivo era a geobotânica. E a identificação de florestas dissimilares em função de ambientes diferentes foi considerada o caminho mais promissor. Dentro do objetivo original, a técnica foi aplicada em Almeida e Fromard (2000), Almeida e Souza Filho (2000), Almeida e Souza Filho (2004), Almeida *et al.* (2005a), Almeida *et al.* (2005b) e Almeida *et al.* (submetido). Em aplicações na previsão de safra de cana-de-açúcar, foi aplicada em Almeida (2000), Almeida, Rosseto e Souza Filho (2002) e Almeida, Souza Filho e Rossetto (submetido).

Figura 3.10 – Imagem da região de Kourou, Guiana Francesa: NDVI em pseudo cor (A); CCFC dos 3 índices utilizados (B) e das CPs 1 4 8 (C), 3 5 6 (D), 2 3 6 (E) e 2 3 5 (F)

O princípio geral foi bem atingido, como se pode verificar na Figura 3.11, onde se compara a imagem 3.10F com o mapa de vegetação da região estudada.

Figura 3.11 – Composição colorida das CPs 2, 3 e 5 em RGB e Mapa de Vegetação da região (modificado de Puig *et al.*, 1995)

b) Aplicação do método em imagem hiperespectral das savanas do Brasil Central Anexo 2.

Principal component analysis applied to feature-oriented band ratios of hyperspectral data: a tool for vegetation studies

Após o estágio de pós-doutoramento resolveu-se testar o método sobre outras imagens, incluindo imagens hiperespectrais. Foi utilizada uma cena do sensor aeroportado AVIRIS, sobre região próxima à cidade de Alto Paraíso de Goiás, GO, parcialmente sobre a Chapada dos Viadeiros. A construção dos índices espectrais, sobre um conjunto de 224 bandas, foi feita sobre dados da literatura, com enorme auxílio dos espectros de compostos foliares cedidos por Frédéric Baret, do Institut National de Recherche Agricole – INRA - (Avignon, França). Após muitas dezenas de testes, decidiu-se por um conjunto de 15 índices, representando diversos pigmentos e compostos bioquímicos foliares, fitocromos e água foliar. O conjunto de índices procurava abarcar desde respostas de coberturas fotossinteticamente ativas, densas ou esparsas, a coberturas com variado grau de estresse hídrico, incluindo savanas completamente secas. Imagens com a soma de índices de clorofilas a+b destacavam a vegetação fotossinteticamente ativa (Figura 3), enquanto a soma de índices de celulose e lignina mostravam em cinza médio as savanas com biomassa não-fotossintética. Nesta pesquisa, ao contrário da feita sobre Kourou, não se utilizou das bandas originais na APC, que foi feita apenas sobre os 15 índices. A matriz dos autovetores mostrou uma CP1 construída sobre pesos semelhantes dos 15 índices e informou tanto de vegetação fotossinteticamente ativa ou não (Figura 5a), enquanto a CP2 teve pesos invertidos das clorofilas e o maior peso de α -caroteno e informou sobretudo da vegetação rupestre da Chapada dos Viadeiros (Figura 5b). A CP14 (Figura 5c), totalmente dominada pela resposta de clorofilas a+b e pelo fitocromo P660 informava essencialmente da vegetação fotossinteticamente ativa. Uma composição colorida destas três CPs destacadas gerou uma imagem muito rica em informação das coberturas vegetais e, indiretamente, da geologia, incluindo as lentes de metapelitos nos quartzitos dominantes do Grupo Arai na Chapada dos Viadeiros (Figura 6). Já a CP15, explicando centésimos de por cento da variância mostrava com perfeição o traçado da estrada de terra e os montes de terra à sua borda, ou seja, explicava a parte mais puramente mineral de toda a cena (Figura 5d). Finalmente na Figura 7, apresenta-se uma combinação colorida das CPs 1, 2 e 3 de sete índices relacionados a vegetação fotossinteticamente ativa e realça as bordas, efeito comum, mas principalmente a borda sul, que tem menor insolação anual.

c) Aplicação agrícola do método (Anexo 2)

ASTER and Landsat ETM+ Images Applied to Sugarcane Yield Forecast

Considerou-se interessante testar o princípio da abordagem sistêmica sobre uma cultura agrícola em que todas as plantas são clones idênticos do ponto de vista genético, plantados em curto espaço de tempo, em condições de plantio iguais sobre solo homogêneo e com topografia plana: condições ideais, mas não raras nas culturas agrícolas de alta produtividade, como no caso da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Com o apoio da Usina da Barra S.A. foi desenvolvida pesquisa com dados de produtividade, tanto históricos como da safra, que normalizaram para t/ha respostas em números digitais médios de imagens dos sensores ETM+ e Aster, previamente processadas por variante do método em questão. Enquanto para diferenciar florestas dissimilares a informação mais adequada pode ser fracamente correlacionada ao conjunto de informação de uma imagem multiespectral, no caso da previsão de safra de cana-de-açúcar a informação buscada, ao contrário, é a síntese da resposta de cada aspecto da planta, resposta-síntese que será comparada às demais suas idênticas. Além dos índices espectrais, foi utilizada na pesquisa a banda termal do sensor ETM+, que informa da evapotranspiração com eficiência, parâmetro altamente significativo do estado de sanidade da plantação. As bandas termais do sensor Aster não puderam ser utilizadas por sua baixa resolução espacial, insuficiente para o tamanho dos talhões da pesquisa. Assim, sobre o conjunto de índices e incluindo a banda termal, no caso da imagem ETM+, foram aplicadas APCs. Na primeira componente está a informação mais correlacionada entre a informação presente em todas as imagens-índices e na imagem termal. Esta informação comum explica, no caso de um dossel de plantação, seu conjunto de parâmetros associados à qualidade de seu metabolismo, de sua saúde. Para eliminar respostas espúrias de solo exposto e, ao mesmo tempo, adicionar uma variável limitante para o caso de haver resposta de solo ao meio da plantação, multiplica-se a CPI por um NDVI binário (0 e 1). O tratamento que se dá considera a produtividade por talhão na safra anterior.

Os resultados obtidos foram muito superiores aos da previsão feita pelos técnicos da Usina e, principalmente, demonstraram um potencial enorme quando normalizados pelos dados reais da colheita: reproduziram-na quase perfeitamente.

Além do manuscrito presente no Anexo 2, submetido recentemente à Revista Brasileira de Ciência do Solo, informa-se que os resultados foram considerados muito interessantes pela comunidade técnico-científica da cana-de-açúcar, levando a uma apresentação convidada em simpósio. Motivaram ainda diversas reportagens em periódicos do interior do Estado de São Paulo, uma reportagem de página da “Folha Ciência” (1º de novembro de 2003) e da Seção I do Diário Oficial do Estado de São Paulo de 21 de agosto de 2003.

Capítulo 4

Aplicação da abordagem sistêmica
na prospecção de depósitos epitermais
na Amazônia: o caso de um depósito
high sulfidation

4.1. Introdução

Neste capítulo estão apresentados os resultados parciais de pesquisa coordenada pelo autor e tendo como co-autores Caetano Juliani, Carlos Roberto de Souza Filho e Fábio Cardinale Branco, que preparam manuscrito a ser encaminhado brevemente para publicação em periódico.

A pesquisa foi desenvolvida na região de ocorrência da mineralização aurífera do tipo high-sulfidation descrita por Juliani *et al.* (2005) na Província Aurífera do Tapajós (PAT). De acordo com RADAMBRASIL (1976), a cobertura vegetal predominante é a Floresta Ombrófila Tropical Densa-uma floresta caracterizada por grandes árvores com até mais de 50 metros de altura, se destacando do dossel uniforme a 25 a 35 m., com variações fisionômicas importantes, inclusive com espécies autóctones dominantes. Em todos estes sub-ambientes, em função da densa cobertura vegetal, a obtenção de informações espectrais de minerais é pouco provável. A região em estudo, assim como a maior parte da Amazônia, é muito pouco habitada e quase não há acessos por terra, características estas que tornam particularmente importantes as fontes indiretas de informação geológica, como a GbSR – Geobotânica por Sensoriamento Remoto (Riaza *et al.*, 1998).

A PAT foi responsável por grande parte da produção de ouro no Brasil até a década de 80, mas as lavras foram desenvolvidas quase que exclusivamente em depósitos secundários. Com a exaustão destes depósitos iniciou-se a busca pelas mineralizações primárias, tendo sido encontradas mineralizações filonianas mesotermiais orogenéticas, em zonas de cisalhamento, hospedadas em granitos, epitermais do tipo *high-* e *low-sulfidation* e relacionadas a pórfiros (Santos *et al.*, 2001; Juliani *et al.*, 2002; 2004, 2005). Todos estes tipos de mineralizações têm associadas zonas de alteração hidrotermal, ainda mais expressivas nos três últimos tipos, o que motivou essas investigações.

São ainda raros os trabalhos de aplicação de GbSR no centro-leste da Amazônia, destacando-se o de Paradella (1994), na Província Mineral de Carajás. Os autores combinaram imagens processadas do sensor TM-Landsat com Modelo Digital de Terreno, obtendo boas correlações entre as classes de vegetação e geologia. Concluem aqueles autores que a topografia exerce um papel fundamental na distribuição das classes de vegetação definidas por sensoriamento remoto. Do ponto de vista botânico, concluem ser a fisionomia, e não a florística, o principal elemento das florestas a explicar as diferentes respostas nas imagens. A literatura internacional é mais prolífica, mas principalmente sobre terrenos em climas temperados, e não apresenta resultados uniformes quanto às alterações espectrais do dossel de floresta sobre rochas alteradas hidrotermalmente, como em Rowan *et al.* (2000) e Xu & Ma (2004).

A pesquisa teve como objetivo investigar a presença de anomalias geobotânicas detectáveis em imagens multiespectrais de ampla disponibilidade em área de floresta localizada na Província Aurífera do Tapajós (PAT). Foram utilizadas imagens do sensor TM do satélite Landsat-5, processadas segundo a abordagem sistêmica, algoritmos destinados ao realce de respostas espectrais da vegetação. A área de estudo situa-se no Estado do Pará, em região geomorfologicamente pertencente ao Alto Platô do Xingu–Tapajós (RADAMBRASIL, 1976), nas proximidades do igarapé Urubuquată.

4.2 - Geologia das mineralizações auríferas

O estudo das mineralizações auríferas, da granitogênese e do vulcanismo na PAT tem evoluído significativamente nos últimos anos (Dall'Agnol *et al.*, 1994; Santos *et al.*; 2001; Lamarão *et al.*, 2002; Juliani *et al.*, 2002; 2004; 2005). As mineralizações de ouro são consideradas como sendo principalmente orogênicas mesotermiais; epitermais e mesotermiais em zonas de cisalhamento; além de tipos associados a *intrusion-related gold systems* e hospedados em metassedimentos (Klein, 2001; Santos *et al.*, 2001). Tais evidências tem sugerido baixa potencialidade para mineralizações nas rochas vulcânicas do Grupo Iriri, mas, recentemente, mineralizações *high-* e *low-sulfidation* tem sido descritas em complexos de *ash-flow calderas* (Nunes, 2001; Juliani *et al.*, 2004; 2005), às quais relacionam-se mineralizações do tipo pórfiro em granitos, ou relacionadas a sistemas pórfiros, como no Granito Batalha (Juliani *et al.*, 2002), pertencente à suíte tardi- a pós-colisional do evento Parauari.

A mineralização de ouro *high-sulfidation* ocorre em brechas hidrotermais em crateras de vulcões anelares de complexos de *ash-flow calderas*. As zonas de alteração hidrotermal configuram um núcleo de sílica maciça, capeado por um *silica cap* com hematita, produto de forte lixiviação ácida. Este núcleo tem a forma de um cone invertido e é envolvido por uma zona alteração argílica avançada com alunita–natroalunite (disseminada, em veios e alunititos), pirofilita, andalusita, diásporo, rutilo, caolinita–dickita, woodhouseita–svanbergite, pirita, calcopirita, bornita, covelita, esfalerita, enargita–luzonita e Au, Ag e Cu nativos. Esta zona de alteração é, por sua vez, envolvida por uma zona de alteração argílica avançada com alunita ausente ou em pequenas quantidades e discretas zonas de alteração argílica, rica em caolinita. O halo de alteração hidrotermal mais externo é propilítico e, em níveis profundos, predomina alteração sericítica. O contexto geológico da mineralização Cu–Mo–(Au) *low-sulfidation* é análogo ao da *high-sulfidation*, mas a alteração principal caracteriza-se pela presença de adularia e sericita e o *silica cap* não está presente. Em profundidade, diques e *stocks* de pórfiros riódacíticos e riolíticos responsáveis pelas alterações hidrotermais cortam as vulcânicas.

Os granitos aos quais se associam as mineralizações epitermais exibem uma alteração sódica inicial localizada, seguida por forte metassomatismo potássico, responsável por intensa cristalização de microclínio e biotita e pela cor vermelho forte das rochas. Segue-se ao metamossotismo potássico uma alteração propilítica pervasiva a fissural, com sulfetos associados, e alterações sericíticas com sulfeto, predominantemente fissurais, às quais associam-se as mineralizações de ouro e de metais base. Este padrão de alteração hidrotermal é semelhante ao verificado em depósitos do tipo pórfiro e são análogos ao descrito no Granito Batalha, também mineralizado em ouro (Juliani *et al.*, 2002).

Entretanto, apesar do Granito Batalha apresentar os tipos e o padrão da alteração hidrotermal e o conteúdo de halógenos da biotita semelhante aos observados em pórfiros ricos em Au, a baixa fO_2 da cristalização da biotita e a sua colocação mesozonal não permite a classificação de sua mineralização como do tipo pórfiro. Assim, os dados sugerem que a mineralização do Granito Batalha correlaciona-se ao mesmo evento magmático que gerou as mineralizações epitermais (evento Parauari) nas vulcânicas do Grupo Iriri, mas sua colocação foi mais profunda do que aquela presumida para os pórfiros típicos.

Os granitos e granófiros cálcio-alcálinos, provavelmente relacionados aos estágios tardios do arco Parauari, mostram seqüências de alteração hidrotermal pós-magmática pervasiva, semelhantes às observadas em depósitos de Cu–Au porfiro, o que permite supor que os granitos Parauari mais rasos podem estar associados à evolução dos complexos de caldeiras e à formação dos depósitos epitermais, como o Granito Palito, em estudo pela equipe.

A preservação dos sistemas epitermais pode vincular-se com a formação de bacias *pull-apart*, desenvolvidas concomitantemente ou logo após a atividade vulcânica (Juliani *et al.*, 2005) e a existência de hialoclastitos indica que, em parte, o vulcanismo desenvolveu-se em ambiente subaquático lacustre ou marinho raso o que pode, potencialmente, ter possibilitado a formação de depósitos exalativos de sulfetos de metais base, disseminados ou maciços, associados a sedimentos de ambiente mais calmo, ou em caldeiras submersas, ou a rochas vulcânicas.

Zonas de cisalhamento com alteração sericítica predominante cortam as mineralizações epitermais e as associadas aos granitos.

Assim, o contexto geral indica um alto potencial para a ocorrência de depósitos epitermais *high-* e *low- sulfidation* no Grupo Iriri e de pórfiros de Cu–Mo–(Au) em granitos Parauri tardios mais rasos e mais oxidados e de Au nos mais reduzidos (Juliani *et al.*, 2005) na PAT.

4.3 - Materiais e métodos

Foi utilizada a imagem do sensor TM, satélite Landsat 5, de órbita 228 e ponto 64, adquirida em 30/7/1984. O método utilizado para realçar a resposta espectral dos prováveis nichos diferenciados da vegetação baseia-se no modelo de abordagem sistêmica, apresentado em Almeida & Fromard (2000) e em Almeida & Souza Filho (2004) e descrito no Capítulo 3 desta tese.

Nesta pesquisa foram utilizados 8 índices espectrais construídos no limite das seis bandas no espectro refletido do sensor TM. Dois índices foram construídos como divisões de bandas no visível ($TM2/TM1$ e $TM2/TM3$), três no infravermelho próximo/visível ($TM4/TM1$; $TM4/TM2$; $TM4/TM3$) e três no infravermelho próximo/infravermelho ondas curtas ($TM4/TM5$; $TM4/TM7$ e $TM4/TM5*TM7$). Os quatro primeiros compreendem informações principalmente sobre pigmentos foliares; o quinto, de clorofila e área foliar; o sexto de água foliar e os dois últimos de água e componentes bioquímicos foliares.

Sobre o conjunto de oito índices foi aplicada uma APC e a partir da análise das matrizes de correlação entre os índices e de covariância dos autovetores, um conjunto de CPs foi selecionado e filtrado por filtro de convolução proporcional (Branco et al., submetido). Esse filtro se utiliza de matrizes passa-baixas ponderadas, visando tanto a generalização da informação como o realce tonal. Filtro com dimensões de 9 linhas e 9 colunas foram utilizados nesse trabalho.

A imagem de albedo, adicionada como um canal de intensidade, sem prejuízo da informação tonal já realçada, resulta de APC sobre as bandas originais no infravermelho próximo e ondas curtas (bandas TM4, 5 e 7).

Foi finalmente introduzido o modelo digital de terreno (MDT) gerado a partir de imagens ASTER, com resolução espacial original de 20 metros no terreno. A figura 4.1 apresenta diagrama com a sequência de processamentos utilizados.

4.4 - Resultados e Discussão

A correlação entre os índices adotados (Tabela 4.1) sugere haver excessiva redundância entre parte dos índices, pelas altas correlações nos construídos a partir de bandas próximas no denominador, como comprimento de onda índice e a banda TM4 no numerador, como comprimento de onda referência (NIR/VIS e NIR/SWIR). A presença do conjunto destes índices é justificada porque explicam diferentes compostos foliares, os quais, embora tendo comportamento altamente correlacionado, têm potencial de distinção entre diferentes espécies e/ou estados de sanidade da vegetação, o que é relevante para o segundo passo na estratégia de processamento digital aqui definida. Observe-se que a correlação com os demais índices é muito variada, por haver realce de informações diferenciadas. Por exemplo, um índice com correlação média muito elevada, TM4/TM2, apresenta uma correlação de 0,452 com o índice TM2/TM1 e de apenas 0,284 com o TM2/TM3. Considerando-se apenas do ponto de vista matemático, com as variáveis da vegetação não interferindo fortemente nos resultados, esta diferença de correlação não é sustentável. Já considerando que o índice TM4/TM2 realça pigmentos foliares, incluindo os carotenóides, e que o índice TM2/TM1 os realçará tanto ou mais que as clorofilas, é esperada uma correlação muito mais importante. Outro exemplo, mais evidente, é a correlação entre índices construídos sobre as bandas no visível. Por se tratar de regiões espectrais vizinhas, uma alta correlação é prevista. No entanto, entre os índices 2/1 e 2/3, a correlação é baixa. Isso é explicado pela ausência de feições de absorção de clorofila *a* na banda TM1 e de carotenóides na banda TM3. Ou seja, a informação foliar, nas bandas TM1 e TM3, são muito diferentes: embora nas duas bandas a absorção seja intensa, a origem da absorção é diferente. Esta última observação encontra respaldo na comparação das correlações entre os índices TM4/TM1 e TM2/TM1 (0,622) e TM4/TM1 e TM2/TM3 (0,336).

Na Figura 4.2 a apresentação das oito razões e da CP1 sobre as bandas TM3, 4, 5 e 7 mostra que as imagens D a F e G a I são visualmente muito parecidas, mostrando ser que no detalhe não óbvio é onde está a informação procurada.

Tabela 4.1 – Matriz de Correlação entre os índices espectrais utilizados em imagem TM Landsat 5. A correlação média refere-se apenas à de cada índice com os demais, excluindo-se a correlação total com o próprio índice.

	2/1	2/3	4/1	4/2	4/3	4/5	4/7	4/5*7
2/1	1	0,438	0,622	0,452	0,502	0,335	0,325	0,32
2/3	0,438	1	0,336	0,284	0,543	0,352	0,343	0,336
4/1	0,622	0,336	1	0,971	0,938	0,481	0,598	0,567
4/2	0,452	0,284	0,971	1	0,941	0,501	0,618	0,587
4/3	0,502	0,543	0,938	0,941	1	0,506	0,62	0,592
4/5	0,335	0,352	0,481	0,501	0,506	1	0,743	0,888
4/7	0,325	0,343	0,598	0,618	0,62	0,743	1	0,954
4/5*7	0,32	0,336	0,567	0,587	0,592	0,888	0,954	1
Média*	0,374	0,329	0,564	0,544	0,580	0,476	0,525	0,531

Ainda na Tabela 4.1, nota-se que a correlação média é maior no índice TM4/TM3, referente à citada feição do *red edge*. Isto é esperado, pois se trata da informação mais comum à vegetação.

Observe-se ainda que todos os índices que têm a banda TM4 no numerador possuem correlações médias maiores. Isto se deve ao “platô do infravermelho próximo” (700 a 1300nm), caracterizado por alta reflectância das folhas fotossinteticamente ativas em todas as espécies.

A possibilidade de se diferenciar coberturas vegetais evidentemente cresce com o aumento de aspectos analisados. As pesquisas que se fixam na utilização de índices baseados no *red edge*, como o NDVI, desprezam grande volume de informação disponível nas imagens, como a relacionada à água foliar e a pigmentos foliares, que não a resposta conjunta de clorofila *a* e *b*. O trabalho de Xu & Ma (2004), que realçou respostas anômalas da vegetação sobre mineralizações auríferas, selecionou razões de bandas que inequivocamente são pobres em informação e que desprezam muitas das características da vegetação. O aumento linear de reflectância da vegetação sobre os depósitos auríferos reportado por aqueles autores deve ser considerado com extrema cautela, pois é inexplicável frente a outras observações feitas por aqueles autores, que reportam aumento em pigmentos foliares e queda no teor em água foliar sobre os corpos mineralizados. Não há dúvida que um aumento nos teores em clorofila diminui a reflectância entre 400 e 700nm e a redução em água foliar, ao contrário, a aumenta no intervalo de 1.300 a 2.500nm.

Aplicada a APC sobre os oito índices, foram escolhidas para uma composição colorida falsa-cor as PCs 4, 7 e 8 em função da análise da matriz dos autovetores e da de correlação, bem como dos compostos foliares em princípio realçados por cada índice. A escolha da PC4 foi feita em função do índice TM2/TM1 apresentar, na matriz de covariância dos autovetores (Tabela 4.2), a maior contribuição (*loading*). Este índice aporta informação da variabilidade na composição pigmentar indicada pela resposta no visível: (i) na banda TM1 (azul) há picos de absorção de radiação eletromagnética em clorofila *b* e carotenóides; (ii) na banda TM2 (verde), há menor absorção destes pigmentos e, (iii) na banda TM3 há picos de absorção das clorofilas *a* e *b*, os pigmentos mais comuns e, portanto, aqui considerados como menos diagnósticos de diferenças florísticas. A PC7 também apresenta informação destes pigmentos (maior contribuição de TM4/TM1), mas por processo diferente, pois os pigmentos na banda TM4 (infravermelho próximo) são transparentes, não ocorrendo qualquer absorção. A PC8 tem as maiores contribuições dos índices TM4/TM2 e TM4/TM5*TM7 e contém informações tanto da composição dos principais pigmentos foliares (clorofilas *a* e *b* e carotenóides), como em água e compostos bioquímicos foliares. É interessante observar que na composição da PC1 há baixo desvio padrão entre as contribuições dos auto-vetores, que a maior contribuição é do índice construído sobre o *red edge* (TM4/TM3) e que as menores contribuições estão associadas aos dois índices construídos em bandas no visível. Estes últimos índices são assim variáveis mais independentes e, entretanto, dominam completamente as PC3 e PC4 (individualmente e em

conjunto), demonstrando sua importância na variância do conjunto. O conjunto de índices construídos sobre razões infravermelho próximo e ondas curtas domina a PC2 enquanto o índice TM4/TM3 domina apenas a PC6, indicando que a informação exclusiva daquele índice é pouco significativa em comparação com os demais. As CPs resultantes da aplicação de APC sobre a série de oito razões estão na Figura 4.3.

Tabela 4.2 – Matriz dos autovetores, com o cálculo das covariâncias e *loadings* médios (em módulo).

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	<i>loadings</i> médios
2/1	0,262	-0,356	-0,384	-0,775	-0,109	0,053	-0,159	0,130	0,279
2/3	0,228	-0,139	-0,783	0,492	-0,019	-0,219	0,155	0,044	0,260
4/1	0,407	-0,326	0,258	-0,063	0,027	-0,094	0,626	-0,506	0,288
4/2	0,405	-0,250	0,385	0,138	0,115	-0,515	-0,181	0,544	0,317
4/3	0,415	-0,281	0,099	0,324	0,060	0,676	-0,405	-0,098	0,295
4/5	0,336	0,474	-0,118	-0,159	0,724	-0,119	-0,176	-0,233	0,292
4/7	0,369	0,402	0,043	0,005	-0,652	-0,251	-0,323	-0,328	0,297
4/5*7	0,358	0,469	0,003	-0,063	-0,145	0,376	0,477	0,508	0,300
Covariância Média	0,348	0,337	0,259	0,252	0,231	0,288	0,313	0,299	0,291

A Matriz de autovalores (Tabela 4.3) mostra que as três primeiras PCs explicam 89,7% da variância total, enquanto as PCs selecionadas para compor a composição colorida falsa-cor da Figura 4.3 explicam apenas 6,98%, dos quais 6,80% referentes à PC4. Este resultado é esperado, já que as dissimilaridades entre as florestas não excluem terem um comportamento espectral geral igual.

Tabela 4.3 - Matriz de autovalores, informando da porcentagem da variância total do conjunto de 8 índices explicado por cada PC.

Principais Componentes	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Auto-valores (%)	63,5	15,2	11,0	6,8	3,01	0,25	0,11	0,07

A introdução da imagem de albedo (Figura 4.3) não apenas aporta informação de albedo em função das diferentes arquiteturas de dosséis, mas mantém a textura da imagem preservada, permitindo a interpretação geológica do modelado, incluindo a identificação de feições geradas pelo evento vulcânico associado às mineralizações, aspecto que não deve ser negligenciado.

Figura 4.3 – PC1 de APC sobre as bandas TM4, TM5 e TM7, informando do albedo do dossel das florestas e da geomorfologia.

A composição colorida das CPs 4, 7 e 8 em RGB (Figura 4.4 A) é uma imagem de difícil interpretação. Já superpondo-se a imagem de albedo da Figura 4.3 a imagem resultante é muito mais informativa (Figura 4.4 B).

Figura 4.4 – Composição colorida das CPs 4 7 8 em RGB em A e com superposição de imagem de albedo em B.

É importante considerar que os índices espectrais foram construídos sobre bandas espectralmente largas, abordando diversas feições de absorção de compostos foliares simultaneamente. Acrescente-se que a área de cada *pixel*, de 900m^2 , há enorme quantidade de folhas de árvores de diferentes espécies, idades e estado de sanidade, resultando em considerável complexidade em analisar a origem das respostas espectrais obtidas (Fraser & Green 1987). Da mesma forma há que se esclarecer que a resposta espectral de compostos bioquímicos foliares, como celulose, lignina, amido, açúcares e proteínas é, em sua maior parte, mascarada pela

resposta da água foliar, já que as feições de absorção daqueles compostos são originadas pela ligação O-H (Elvidge, 1990). Assim, quando se refere à informação de compostos bioquímicos, considera-se haver apenas traços de informação, a qual, entretanto, pode auxiliar significativamente na identificação de dissimilaridades nas coberturas vegetais, como já constatado, indiretamente, por Tuomisto *et al* (2003c), como discutido no item 2.3.4 da tese. Por este conjunto de razões, as informações têm mais consistência se consideradas como tendências presentes em conjuntos de pixels e não em pixels isolados, o que torna recomendado o uso de filtros passa-baixas. Foram considerados dois tipos de filtros, o gaussiano e o proporcional e, testados, este último, desenvolvido em Branco, Almeida e Souza Filho (submetido) mostrou um realce mais intenso em um kernel puro, de 11 x 11 elementos, como apresentado na figura 4.2.

0.1414	0.1562	0.1715	0.1857	0.1961	0.2	0.1961	0.1857	0.1715	0.1562	0.1414
0.1562	0.1768	0.2	0.2236	0.2425	0.25	0.2425	0.2236	0.2	0.1768	0.1562
0.1715	0.2	0.2357	0.2774	0.3162	0.3333	0.3162	0.2774	0.2357	0.2	0.1715
0.1857	0.2236	0.2774	0.3536	0.4472	0.5	0.4472	0.3536	0.2774	0.2236	0.1857
0.1961	0.2425	0.3162	0.4472	0.7071	1	0.7071	0.4472	0.3162	0.2425	0.1961
0.2	0.25	0.3333	0.5	1	0	1	0.5	0.3333	0.25	0.2
0.1961	0.2425	0.3162	0.4472	0.7071	1	0.7071	0.4472	0.3162	0.2425	0.1961
0.1857	0.2236	0.2774	0.3536	0.4472	0.5	0.4472	0.3536	0.2774	0.2236	0.1857
0.1715	0.2	0.2357	0.2774	0.3162	0.3333	0.3162	0.2774	0.2357	0.2	0.1715
0.1562	0.1768	0.2	0.2236	0.2425	0.25	0.2425	0.2236	0.2	0.1768	0.1562
0.1414	0.1562	0.1715	0.1857	0.1961	0.2	0.1961	0.1857	0.1715	0.1562	0.1414

Figura 4.5 - Filtro proporcional puro aplicado às imagens das CPs 4, 7 e 8.

Aplicando-se o filtro acima definido sobre os canais RGB da figura 4.4B resulta em imagem de fácil de interpretação para gerar um mapa de zonas homólogas. Recorde-se que as três primeiras CPs explicam 79,8% da variância total e as CPs 4, 7 e 8 explicam apenas 6,98%. Na Figura 4.6 estão apresentadas as combinações coloridas das CPs 1, 2 e 3 e das 4, 7 e 8 em RGB, seguindo-se estas composições com a superposição da imagem de albedo e, por fim, ambas filtradas pelo filtro da figura 4.5. Não há dúvidas quanto ao fato da composição de menor variância ocupar mais intensamente o espaço RGB. Mais que isso, entretanto, é a correlação que apresenta com dados de campo, como será visto à frente.

A Figura 4.6 F é rica em informação tonal, a qual, juntamente com os dados obtidos em campo, permite considerar as áreas indicadas como de grande probabilidade de predominância de um dado fácies de alteração. Este aspecto é da maior importância quando considerado que a ocorrência

de grupos de tonalidades semelhantes e em disposição coerente do ponto de vista geológico configura um alvo potencial. Acrescenta-se que o conjunto de respostas que aqui se associa a um conjunto de fácies de alteração hidrotermal em ocorrência aurífera já estudada é característica do local e não ocorre senão em poucos locais da imagem, sempre em situação em que a geologia em princípio permite a existência de quadro semelhante. Na Figura 4.7 apresenta-se uma área de 20km de extensão na direção E-W, onde não ocorre, senão em poucos pontos, nenhuma área significativa de comportamento espectral semelhante ao da ocorrência em questão. A Figura 4.8 é uma ampliação de uma destas áreas, a demarcada na Figura 4.7. Na ampliação pode-se a presença de tonalidades de azul, cian e verde a verde amarelado em vulcânicas do Grupo Iriri, com possibilidade de também estarem associadas a brechas hidrotermais em crateras de vulcões anelares de complexos de *ash-flow calderas*. Em um trabalho de prospecção a área da Figura 4.8 seria um alvo potencial, a ser pesquisado por outras técnicas e local prioritário para trabalho de campo.

Figura 4.8 – Detalhe da Figura 4.7.

Um derradeiro aspecto, entretanto, deve ser considerado. A visualização da natureza em projeção horizontal exclui importantes informações do modelado. A disponibilidade de Modelos Digitais do Terreno (MDT) pode permitir não apenas aperfeiçoar a interpretação como dar maior segurança aos resultados obtidos.

A influência da topografia nas coberturas vegetais é inevitável e a visualização tridimensional pode ser importante. Mais essencial, entretanto, é o aporte de informação para a interpretação geológica, já que a visualização da topografia, neste caso específico, permite ao intérprete separar respostas espectrais da vegetação exclusivamente devidas ao relevo daquelas que dele independem. Da mesma forma, a visualização tridimensional permite interpretar as diferentes tonalidades da imagem agregando, à textura, o eixo “Z”, frequentemente essencial na compreensão da disposição espacial da geologia. Em princípio as diferentes tonalidades observadas na Figura 4.6F são referentes a florestas com dissimilaridades em função das diferentes zonas de alteração hidrotermal, posto que não há dependência nem da topografia, nem de protolitos (não há senão vulcânicas ácidas) e que a cobertura florestal é densa. A área em amarelo daquela Figura parece estar numa discreta elevação pela simples sucessão de cores frias para quentes (localmente há uma seqüência de azul - cian - verde - amarelo) que induz o cérebro a entender como aclave topográfico o “aclave” de cores. O leitor pode fazer o teste. Neste caso a interpretação geológica mais imediata, de acordo com o modelo de mineralização de ouro *high-sulfidation* descrita para o local (Nunes, 2001; Juliani *et al.*, 2004; 2005), poderia sugerir a associação da área amarela ao *silica cap* que capeia a zona de alteração hidrotermal compreendida por núcleo de sílica maciça, a verde à zona de alteração argílica avançada com alunita-natroalunita e andaluzita e a cian/azul à argílica avançada sem alunita.

Na Figura 4.9 está apresentada a imagem 4.6F sobreposta a modelo digital de terreno (obtido por diferença de paralaxe em imagens no infravermelho próximo do sensor Aster) em quatro diferentes visadas. Cada uma favorece a interpretação em diferentes lugares. A região não tem topografia muito acentuada e, mesmo com o exagero vertical de 3 vezes, nem sempre a topografia

sobre o platô fica evidente. Não há dúvidas, entretanto, que a declividade do terreno é para o quadrante Leste (Figura 4.9A) e que a área em amarelo está no meio da suave encosta, em área plana ou quase plana que abarca a área em verde e parte da em cian (Figuras 4.9B e C). Considerando que a área cian/azul mais significativa está em posição claramente mais elevada, pode-se interpretar a área em cian no plano como função de solo transportado da elevação imediatamente a Oeste. Já a Figura 4.9D sugere uma encosta suave com caída contínua para Leste, o que não encontra respaldo nas outras três visadas. De qualquer forma a interpretação geológica pode se alterar substancialmente com o MDT, ainda mais em se considerando que o mapa topográfico disponível, como é comum nestes casos, é algo precário e não dá a confiança desejada.

Comparando-se o conjunto de imagens com o mapa de pontos feito por Caetano Juliani (informação escrita, 12 de setembro de 2005) observa-se notável superposição de áreas de tonalidades específicas com diferentes zonas de alteração hidrotermal. E o quadro que se cria,

extrapolando as informações pontuais, é coerente com o modelo geológico. Assim, na porção mais elevada, em tons de cian, é o *silica cap* (1), formado por quartzo microcristalino com *vuggy* com relíquias de drusas, hematita $\pm$ pirifolita $\pm$ alunite $\pm$ sulfetos e relíquias de feldspatos; em azul escuro, pirofilita, andalusita, diásporo, rutilo, caolinita-dickita, woodhouseita–svanbergite, pirita, calcopirita, bornita, covelita, esfalerita, enargita–luzonita e Au, Ag e Cu nativos (2); em vermelho arroxeadado, grande concentração de aluninitos (3); em verde e amarelo, zona de alteração argílica avançada com alunite ausente ou em pequenas quantidades e discretas zonas de alteração argílica, rica em caolinita (4); as zonas de alteração propilitica e sericítica bem como granitos pórfiros não alterados ou pouco alterados estão em vermelho sangue e cores variegadas (5). Na Figura 4.10 apresenta-se um esboço de interpretação da imagem, à luz dos pontos de campo e das imagens em 3D. Observar, entretanto, que por ausência de informação de campo não se fecham os contatos das zonas de alteração 4 e 5.

- (1) *silica cap*, formado por quartzo microcristalino
- (2) - zona de alteração argílica avançada com alunite
- (3) grande concentração de aluninitos
- (4) zona de alteração argílica avançada sem alunite
- (5) zonas de alteração propilitica e sericítica bem como granitos pórfiros

Figura 4.10 – Interpretação parcial da imagem final do processamento baseado na abordagem sistêmica, à luz dos pontos feitos em campo por Caetano Juliani e das imagens em 3 D. Observar que os contatos das zonas de alteração 4 e 5 não estão fechados por ausência de informação de campo.

Os dados de campo, obtidos anteriormente ao processamento das imagens, não permitem uma verificação da associação das diferentes respostas espectrais da floresta com as diferentes zonas de alteração hidrotermal. Não há dúvidas quanto a estar a origem das diferentes cores e tonalidades essencialmente ligada a dissimilaridades na floresta, pois a cobertura vegetal é densa. Possíveis respostas de origem mineral, de afloramentos que ocorrem sob a mata, dificilmente seriam

significativas a ponto de influenciar notadamente a resposta média dos *pixels*. Na Figura 4.11 estão apresentadas uma imagem de albedo, para localização, e uma imagem em pseudo-cor do índice NDVI sobre a mesma imagem TM utilizada na pesquisa, com cores quentes se associando aos altos números digitais e à vegetação. Como é bem conhecido, este índice tem excelente capacidade de distinguir vegetação fotossinteticamente ativa de não vegetação. As áreas mais significativas em azul (ausência de vegetação) se associam a uma pista de pouso de garimpo e a áreas vizinhas de ocupação por garimpo secundário, como indicado pelas setas em vermelho, ou ainda a respostas espúrias em áreas sombreadas (seta verde). Já a área em cinza claro sobre o platô da mineralização (seta amarela) se associa a maior presença de *pixels* em vermelho (alta intensidade do platô do infravermelho próximo) em indicação inequívoca de alta resposta de vegetação fotossinteticamente ativa.

Os resultados obtidos nesta pesquisa superaram as expectativas, pois o que se buscava era o realce de respostas espectrais de florestas com alguma diferenciação em áreas com alteração hidrotermal. O que se obteve, entretanto, foram indicações dos principais fácies de alteração hidrotermal. Isto é particularmente importante, pois as mineralizações, estando associadas a zonas de alteração argílica avançada com alunita, podem estar ausentes de rochas com igual processo de alteração hidrotermal, por estar o fácies mineralizado já erodido. Neste aspecto, a identificação da zona de alteração *silica cap* é particularmente importante, pois é o fácies que ocupará a posição mais superior da seqüência. Os dados ora apresentados indicam que a associação

de respostas associadas aos fácies *silica cap* e Argílica avançada com alunita pode ser considerada uma indicação de potencial mineralização e área prioritária para verificações em campo, por excluir grande parte da possibilidade de respostas espúrias.

Capítulo 5

Análise crítica da aplicação prévia
da geobotânica nas florestas
brasileiras e do potencial de aplicação
da abordagem sistêmica e métodos
assemelhados

A geobotânica, enquanto método de prospecção mineral, jamais atingiu o mesmo status de outras técnicas, como a geofísica e a geoquímica. A primeira causa certamente está na tendência à não replicação de resultados. A segunda, na inaptidão do geólogo em analisar as coberturas vegetais. Fosse uma técnica precisa e de aplicação geral, o mercado exigiria a formação de especialistas na técnica. Como não o fez, conclui-se facilmente que os profissionais da área, não acreditando no método, não pressionaram pela formação de *geobotânicos*.

Com o advento do sensoriamento remoto a geobotânica teve um alento. Na existência de padrões de reflectância de coberturas vegetais associados a depósitos minerais, o geólogo não necessitaria da formação complementar em botânica. Mas este alento sucumbiu frente à persistência do problema da não replicação: cada caso seria um caso e a busca de alterações espectrais específicas teve pequeno sucesso, ressaltando-se a tendência à clorose e a deslocamentos do *red edge*. O clássico trabalho de Yost e Wenderoth (1971), mostrando, experimentalmente, que diferentes espécies reagem à presença de minério com deslocamentos opostos do *red edge* é um exemplo crítico da impossibilidade de se criar modelos. Diversos autores comentam, posteriormente, da especificidade da reação das plantas à exposição a minérios. O trabalho de Schaller (1984) apresenta diversos exemplos de comportamentos antagônicos em função da variação do rumo de vertentes.

A proposta da abordagem sistêmica, desde o início, partiu do pressuposto da inexistência de padrões espectrais a serem buscados. Em discussão com Marie-José Lefèvre, pesquisadora francesa com Doutorado de Estado em geobotânica e que hoje tem destacada posição no CNES, Lefèvre declarou que o caminho da abordagem sistêmica era exatamente o oposto ao que a geração dela seguira. E que, por isso, poderia ter sucesso. Assim dois pressupostos norteiam a proposta metodológica desta tese:

- não se sabe *a priori* o que se encontrará nas imagens
- o que se procura são desvios de um padrão regional

Superada a principal *questão sem resposta* dos comportamentos padrões, uma outra se interpôs: a biodiversidade tropical-equatorial e a inexistência ou fraca resposta, nestes climas, das coberturas vegetais às *pequenas* variações ambientais devidas às mineralizações. Este aspecto foi trabalhado, do ponto de vista botânico, na Serra do Itaberaba, nas proximidades da cidade de São Paulo, e os resultados mostraram inequivocamente duas florestas diferentes em função da presença de alteração hidrotermal. Não se tratava de grande depósito metálico, mas simplesmente da presença do processo de alteração hidrotermal, modificando a mineralogia das rochas e a química dos solos. Esta pesquisa permitiu dar um passo importante, ao demonstrar que a rica biodiversidade tropical permite franca seleção de espécies frente à presença da alteração

hidrotermal. As não adaptadas simplesmente não se fixam e as adaptadas ocupam o nicho. Embora aquela pesquisa não tenha tido resultados significativos em sensoriamento remoto pelas pequenas dimensões dos corpos de rochas alteradas, permitiu segurança na expectativa de comportamento espectral diferenciado em zonas de alteração hidrotermal: diferentes espécies não têm o mesmo comportamento espectral em função de numerosos fatores, desde a composição em pigmentos, água e compostos bioquímicos foliares até a proporção, no dossel, de folhas e outros elementos da vegetação, como galhos. Paradella *et al.* (1994) afirmam que, em seu trabalho, as diferentes respostas nas imagens foram devidas principalmente às diferentes fisionomias e não às diferenças florísticas. Caso as diferenças da floresta se concentrassem na fisionomia, seria menor a aptidão do sensoriamento remoto óptico na GbSR, pois o forte da técnica, em contraposição às imagens em microondas, é justamente a possibilidade de informar da química e da estrutura celular das folhas. O explorar a resposta de diferentes fisionomias florestais associadas a zonas de alteração hidrotermal é uma pesquisa a parte e aí as imagens em microondas podem ser notáveis: o autor e equipe obtiveram do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) um sobrevôo e obtenção de imagens multipolarimétricas em larga faixa da Província Aurífera do Tapajós. Mas o tema foge do escopo desta tese.

Ao associar o encontrado nas pesquisas sobre a Serra do Itaberaba com o apresentado na farta literatura ecológica da Amazônia, que demonstra a existência de mosaicos florísticos em função de alterações ambientais, foi possível ter alguma segurança no sucesso da aplicação da abordagem sistêmica àquele bioma.

Com os aspectos *externos* ao método de processamento digital de imagens ópticas resolvidos, ou seja, concluindo-se haver potencial existência de comportamentos florística e fisionomicamente diferenciados associados a zonas de alteração hidrotermal, há outra questão *interna*: o **método proposto** é adequado para a GbSR em terrenos tropicais e equatoriais?

A literatura sobre GbSR no Brasil tem poucos títulos e não há uma tendência a adotar qualquer padrão metodológico. A abordagem sistêmica foi criada para ambientes de alta biodiversidade e tem como uma de suas características básicas o abordar os diferentes componentes orgânicos da vegetação (sempre na limitação da resolução espacial e espectral) e também o albedo do dossel, que informa muito da fisionomia de uma floresta. O método caracteriza-se também por ser aberto à evolução dos sensores: quanto mais numerosas e discretas forem as bandas espectrais disponíveis, mais preciso será. Embora seja um método ainda novo, com pequeno histórico de utilização, mostrou maleabilidade para ser adaptado a condições e objetivos diferentes. A compreensão de seu funcionamento geral não é difícil e sua aplicação pode ser feita por usuários de sensoriamento remoto. Já a compreensão de suas sutilezas é

complexa e muito ainda escapa mesmo de seu autor, como na nem sempre simples escolha das componentes principais para a composição colorida a ser interpretada. Esta *carência* pode ser considerada positiva, pois se os resultados obtidos no atual estágio de conhecimento da técnica parecem superar, em termos de Amazônia, o que foi feito no passado, a evolução deste conhecimento deve aprimorar os resultados futuros.

Considerando-se, portanto, o histórico de aplicações da GbSR no Brasil e a ausência prévia de uma técnica desenvolvida para aplicar em coberturas florestais de alta biodiversidade, a apresentação da abordagem sistêmica pode, desde já, redundar em tentativas de aplicação da GbSR como efetiva ferramenta de prospecção mineral em biomas como a Floresta Amazônica.

Capítulo 6

Conclusões

Os dados indicam que a geobotânica por sensoriamento remoto, em terrenos tropicais e equatoriais úmidos recobertos por florestas, tem um potencial de aplicação tanto amplo como pouco explorado. O histórico da técnica, enquanto ferramenta de prospecção mineral, parece não existir no Brasil. Os poucos trabalhos encontrados na literatura se referem a depósitos minerais já conhecidos, embora por vezes com resultados excelentes, que poderiam levar a novos depósitos.

Os dados indicam que as características das indicações geobotânicas estão associadas tanto às diferenças florísticas (gerando diferentes respostas espectrais *sensu strictu*) como fisionômicas (albedo) em relação ao dominante regionalmente. Os estudos botânicos efetuados sobre rochas com alteração hidrotermal na Serra do Itaberaba, no bioma Mata Atlântica, corroboram com os dados de sensoriamento remoto obtidos na Amazônia, pois a riqueza em tonalidades sobre o depósito aurífero apresentado no capítulo 4 não poderia ter origem apenas fisionômica.

Os resultados alcançados sobre mineralização na Província Aurífera do Tapajós, onde o produto final da aplicação da abordagem sistêmica permitiu a separação de fácies de alteração hidrotermal, a partir de resposta espectral da floresta, abrem uma perspectiva para a prospecção mineral, sobretudo de depósitos epitermais, não só na Amazônia mas também em outros biomas de alta biodiversidade, com grande extensão e poucas vias de acesso.

A abordagem sistêmica configura uma técnica aberta à evolução dos sensores e do conhecimento do comportamento espectral da vegetação. No atual estágio, associada ao uso de filtros passa-baixas proporcionais, demonstra ser capaz de realçar respostas espectrais de florestas de dissimilaridade associada à presença de diferentes fácies de alteração hidrotermal na floresta de terra firme na Amazônia.

A disponibilidade de imagens obtidas em décadas passadas é uma fonte de informação inestimável, como demonstra o Capítulo 4, onde uma imagem 21 anos após ser obtida, admite um processamento inovador gerando informações significativas. Porções consideráveis das florestas tropicais e equatoriais vêm sendo desmatadas e continuarão a sê-lo no futuro. As imagens obtidas previamente ao desmatamento deverão ser analisadas e re-analisadas, pois as técnicas de extração de informação de imagens naturalmente evoluem e estes registros de coberturas florestais extintas poderão informar da geologia e, principalmente, de depósitos minerais nas capoeiras e savanas que as substituirão e que provavelmente não exibirão as mesmas informações de ordem geobotânica.

Com a futura disponibilidade de sensores hiperespectrais esta ferramenta deverá se tornar mais precisa: com sensores multiespectrais far-se-ia a GbSR regional e com sensores hiperespectrais, de acesso a áreas mais reduzidas, a GbSR de alvo.

Referências

ALLEN, W. A.; GAUSMAN, H. W.; RICHARDSON, A. J. Willstätter-Stoll theory of leaf reflectance evaluation by ray tracing. *Applied Optics*, v. 12, p. 2448-2453, 1973.

ALMEIDA FILHO, R. Multiseazonal and geobotanical approach in remote detection of albitized-greisenized areas in the Serra da Pedra Branca granitic massif, Goiás State, Brazil. *Economic Geology*, v. 78, n. 8, p. 1914-1920, 1984.

_____; CASTELO BRANCO, R. M. G. Location of kimberlites using Landsat Thematic Mapper images and aerial photographs: the Redondão diatreme, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, v. 13, p. 1449-1457, 1992.

_____; PAYOLLA, B. L.; PINTO, O. G.; BETTENCOURT, J. S. Utilização de imagens digitais Landsat no estudo de corpos granitóides em Rondônia: caso-exemplo do maciço de Pedra Branca. In: SYMPOSIUM AMAZÔNICO, 2., 1984, Manaus. *Anais...* Manaus: DNPM, 1984. p. 409-416.

_____; VITORELLO, I. Remote sensing data integration in the definition of hydrothermally altered áreas in vegetated terrain, central Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, v. 18, n. 8, p. 1835-1842, 1997.

_____; _____. Mapping of hidrothermally altered areas in vegetated terrain, using multisource data integration and segmentation techniques. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 31, parte B7, p. 7-13, 1996.

_____; _____. CORREIA, V. R. M. Use of Landsat Thematic Mapper Imagery as Mineral Prospecting Tool in the Tin Province of Goiás, Brazil. *Geocarto International*, v. 11, n. 1, p. 61-69, 1996.

ALMEIDA, T. I. R. Nova técnica de sensoriamento remoto para diagnóstico do vigor de cana em áreas extensivas. *Saccharum*, v. 2, p. 6-7, 2000.

_____; FAMBRINI, G. L.; SAYEG, H.; MCREATH, I.; MACHADO, R.; CESAR, A. R. S. F. Procesamiento digital y interpretación geológica de imágenes TM-Landsat del área al Este de la Mina de Camaquã (Límite Proterozóico-Fanerozóico), Estado do Rio Grande do Sul, Brazil. In: SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, 7., 1995, Puerto Vallarta. *Memorias*. México: SELPER, 1995. p. 457-469.

_____; FERREIRA, A. C. Tectônica transcorrente e imagens TM-LANDSAT aplicadas à prospecção de fluorita e barita em Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 19, n. 2, p. 207 - 233, 1989.

_____; FROMARD, F. A proposal of digital processing of multispectral images to enhance geobotanical anomalies. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31., 2000, Rio de Janeiro. *Abstracts volume...* Rio de Janeiro: CPRM, 2000. 1 CD-ROM.

_____; JULIANI, C.; MANTOVANI, W.; AGUILAR, A. P. Comunidades florestais como indicadores geobotânicos: o caso do depósito aurífero da Serra do Itaberaba, São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Submetido em 2005b.

_____; _____. SOUZA FILHO, C.R. A geobotânica em terrenos tropicais úmidos: uma discussão conceitual e dois exemplos de sua aplicabilidade na prospecção de depósitos auríferos de origem hidrotermal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO

REMOTO, 12., 2005, Goiânia. *Anais...* S.I.: INPE, 2005a. p. 1709-1716.

_____; _____. SILVA FILHO, W. F.; AGUILAR, A. P. Aplicación de imágenes TM-Landsat en la detección de zonas de alteración hidrotermal pré-metamórfica con mineralizaciones en Au en una secuencia volcano-sedimentar précambrica: Grupo Serra do Itabaraba, São Paulo. In: SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, 7., 1995, Puerto Vallarta. *Memorias*. México: SELPER, 1995. p. 470-478.

_____; _____. SOUZA FILHO, C. R.; BRANCO, F. C. Detecção de fácies de alteração hidrotermal por geobotânica na Floresta Amazônica. Trabalho apresentado no I. Simpósio Brasileiro de Metalogenia, em maio de 2005. Gramado, 2005a. Não publicado.

_____; _____. Detecção de fácies de alteração hidrotermal por geobotânica na Floresta Amazônica, Brasil, utilizando imagens TM Landsat. *Revista Brasileira de Geociências*. A ser submetido em 2005.

_____. ROSSETTO, R.; SOUZA FILHO, C. R. Imagens ASTER e Landsat ETM aplicadas à previsão de safra de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo: discussão metodológica e primeiros resultados. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 8., 2002, Recife. *Anais...* Piracicaba: STAB, 2002. v. 1, p. 488-492.

_____. SIGOLO, J. B.; FERNANDES, E.; QUEIROZ NETO, J. P.; BARBIERO, L.; SAKAMOTO, A. S. Proposta de Classificação e Gênese das lagoas da Baixa Nhecolândia-MS com base em sensoriamento remoto e dados de campo. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, n. 2, p. 83-90, 2003.

_____. SILVA FILHO, W. F.; FAMBRINI, G. L.; SAYEG, H.; MCREATH, I.; MACHADO, R.; FRAGOSO CESAR, A. R. F. Digital processing and geological interpretation of TM-Landsat images of the area east of the Camaquã mine in Rio Grande do Sul State, southern Brazil. *Boletim IG-USP. Série Científica*, v. 28, p. 101-118, 1997.

_____. SOUZA FILHO, C. R. Principal component analysis applied to feature-oriented band ratios of hyperspectral data: a tool for vegetation studies. *International Journal of Remote Sensing*, v. 25, n. 5005-5023, 2004.

_____. Feature-oriented band-ratios coupled with principal components applied to tropical vegetation mapping: results using hyperspectral data in central Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE APPLIED GEOLOGIC REMOTE SENSING, 14., 2000, Las Vegas. *Proceedings...* Ann Arbor, MI: ERIM, 2000. p.127.

_____. ROSSETTO, R. ASTER and Landsat ETM+ images applied to sugarcane yield forecast. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Submetido em 2005a.

AMARAL, G. Estudos geobotânicos no Vale do Ribeira com base em sensoriamento remoto. *Boletim IG-USP. Publicação Especial*, v. 12, p. 11-12, 1992.

_____. Aplicabilidade da análise automática de imagens Landsat na pesquisa mineral no interflúvio Araguaia Xingu. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2., 1982, Brasília. *Anais...* Brasília: CNPQ, 1982. v. 1, p. 197-206.

_____. Geologia e Depósitos de Minério da região de Vazante, Estado de Minas Gerais. 1968. 103 p. Tese (Doutorado) - Cadeira de Mineralogia, Petrografia e Geologia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1968.

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.

ASNER, G. P.; WARNER, A. S. Canopy shadow in IKONOS satellite observations of tropical forests and savannas. *Remote Sensing of Environment*, v. 87, p. 521-533, 2003.

BAKER, A. M. J.; BROOKS, R. R. Botanical exploration for minerals in the humid tropics. *Journal of Biogeography*, v. 15, p. 221-229, 1988.

BANNARI, A.; MORIN, D.; BONN, F.; HUETE, A. R. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, v. 13, p. 95-120, 1995.

BANNINGER, C. Analysis of Airborne Imaging Spectrometer (AIS) data for geobotanical prospecting. In: THEMATIC CONFERENCE ON GEOLOGIC REMOTE SENSING, 6., 1988, Houston. *Proceedings...* S.I.: ERIM, 1988. p. 489-498.

BARET, F. Espectros de pigmentos e compostos bioquímicos foliares: planilhas com dados de reflectância. Informação escrita enviada por Frédéric Baret, INRA Avignon, França, 1999.

_____; FAIVRE, R.; SEGUIN, B. Remote sensing of vegetation phenology: issues to be resolved. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON USE OF EARTH OBSERVATION DATA PHENOLOGICAL MONITORING, 2002, Itália. *Proceedings...* S.I.: s.n., 2003. p. 63-77.

_____; FOURTY, T. The limits of a robust estimation of canopy biochemistry. In: Guyot, G.; Fulpin, T. (Ed.). *Physical measurements and signatures in remote sensing*. Rotterdam: Balkema, 1997. v. 2, p. 413-420.

_____; GUYOT, G.; BEGUÉ, A.; MAUREL, P. Complementarity of Middle-Infrared with Visible and Near-Infrared for monitoring wheat canopies. *Remote Sensing of Environment*, v. 26, p. 213-225, 1988.

_____; VANDERBILT, V. C.; STEVEN, M. D.; JACQUEMOUD, S. Use of spectral analogy to evaluate canopy reflectance sensitivity to leaf optical properties. *Remote Sensing of Environment*, v. 48, p. 253-260, 1994.

BELJAVSKY, P.; GARDA, G. M.; JULIANI, C. Características das mineralizações auríferas no Grupo Serra do Itaberaba, Guarulhos, SP. *Revista do Instituto Geológico*, v. 14, n. 1, p. 21-29, 1993.

BLACKBURN, G. A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sensing of Environment*, v. 66, n. 273-285, 1998.

BOGNAR, L. K.; HALL, A.; ADAM, E.; THAIN, S. C.; NAGY, F. E.; MILLAR, A. J. The circadian clock controls the expression pattern of the circadian input photoreceptor, phytochrome. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 96, n. 25, p. 14652-14657, 1999.

BRANCO, F. C.; ALMEIDA, T. I. R.; SOUZA FILHO, C. R. Proportional convolution filters: a new technique for non-distorted image enhancement. *Computers & Geoscience*, 2005. Submetido.

- BRANCO, S. M. *Ecossistêmica*. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 202 p.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo*: folha Brasília SD. 23. Brasília: DNPM, 1976.
- _____. *Projeto RADAM*: folha SB.21 Tapajós: levantamento de recursos naturais. Rio de Janeiro: SUDENE, 1976. v. 9.
- BROOKS, R. R. Biological Methods of prospecting for minerals. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1983. 322 p.
- _____. Geobotany and Biogeochemistry in Mineral Exploration. New York: Harper & Row, 1972. 290 p.
- BUSCHMANN, C.; NAGEL, E. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as a basis for remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, v. 14: p. 711–722, 1993.
- CARD, D. H., PETERSON, D. L.; MATSON, P. A. Prediction of leaf chemistry by the use of visible and near infrared reflectance spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, v. 26, p. 123–147, 1988.
- CARRARO, C. C. *Reconhecimento de rocha mineralizada de vazante nas transparências falsa cor*. São José dos Campos: INPE, 1971. 28 p. (Relatório INPE-2882-RI/71).
- CARVALHO, R. F.; PERES, L. E. P. *Fotomorfogênese*. Apostila da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP. 21 p.
- CARVALHO JR., O. A. ; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO, A. P. F. ; MARTINS, E. S. Spectral Mixture Analysis of Aster Image to Geobotanical Investigation between ultramafic and mafic rocks from Niquelandia, Brazil. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM - IGARSS 2004, 2004, Anchorage. Science for society, exploring and managing a changing planet: proceedings... S.I.: IEEE, 2004. p. 250-253. Disponível em: <<http://140.98.193.112/xpl/tocresult.jsp?isnumber=29944&isYear=2004&count=188&page=5&ResultStart=125>>. Acesso em: 20 set. 2005.
- CECCATO, P.; FLASSE, S.; TARANTOLA, S.; JACQUEMOUD, S.; GRÉGOIRE, J. M. Detecting vegetation leaf water using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, v. 77, p. 22-33, 2001.
- CHAMARD, P.; CUREL, M. F.; DUCOUSSO, M. ; GUENEGOU, M. C.; RHUN, J. L.; LEVASSEUR, J. E.; LOISEL, C. Utilisation des bandes spectrales du vert et du rouge pour une meilleure évaluation des formations végétales actives. In : TÉLÉDÉTECTION et Cartographie. Paris: AUPELF-UREF, 1991. p. 203-209.
- CHAVEZ, P. S.; KWARTENG, A. Y. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 55, p. 339–348, 1989.
- CLARK, R. N.; GALLAGHER, A. J.; SWAYZE, G. A. Material absorption band depth mapping of imaging spectrometer data using a complete band shape least-squares fit with library reference spectra. In: AIRBORNEVISIBLE / INFRARED IMAGING SPECTROMETER

(AVIRIS) WORKSHOP, 2., 1990, Pasadena, CA. *Proceedings...* Pasadena, CA: JPL, 1990. p. 176–186. (Publication 90-54).

_____; KING, T. V. V.; AGER, C.; SWAYZE, G. A. Initial vegetation species and senescence/stress mapping in the San Luis Valley, Colorado using imaging spectrometer data. In: SUMMITVILLE FORUM, 1995, Fort Collins, CO. *Proceedings...* Denver: CGS, 1995. p. 64–69 (Colorado Geological Survey. Special Publication, 38).

_____; SWAYZE, G. A.; LIVO, K. E.; KOKALY, R. F.; SUTLEY, S. J.; DALTON, J. B.; MCDUGAL, R. R.; GENT, C. A. Imaging spectroscopy: a tool for Earth and planetary system science remote sensing with the USGS Tetracorder algorithm. *Journal of Geophysical Research: planets*, v. 108, n. E12, art. 5131, 2003.

CLEVER, J. G. P. W. The use of imaging spectrometry for agricultural applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 54, n. 299-304, 1999.

CONCEIÇÃO, C. A.; PAULA, J. E. Contribuição para o conhecimento da flora do Pantanal mato-grossense e sua relação com a fauna e o homem. In: SIMPÓSIO RECURSOS NATURAIS E SÓCIO-ECONÔMICOS DO PANTANAL, 1., 1984, Corumbá. *Anais...* Brasília: Embrapa. DDT, 1986. p. 107-130.

CONDIT, R.; PITMAN, N.; LEIGH E.G. JR.; CHAVE, J.; TERBORGH, J. E.; FOSTER, R. B. Beta-diversity in tropical forest trees. *Science*, v. 295, p. 666-669, 2002.

COUTINHO, L. M. Botânica. São Paulo: Cultrix, 1970. 197 p.

CURRAN, P. J. Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sensing of Environment*, v. 30, p. 271–278, 1989.

_____; DUNGAN, J. L.; PETERSON, D. L. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry: testing the Kokaly and Clark methodologies. *Remote Sensing of Environment*, v. 76, p. 349-359, 2001.

DALL'AGNOLL, R.; LAFON, J. M.; MACAMBIRA, M. J. B. Proterozoic anorogenic magmatism in the Central Amazonian Craton: geochronological and geochemical aspects. *Mineralogy and Petrology*, v. 50, p. 113-138, 1994.

DARCH, J. P.; BARBER, J. Multitemporal remote sensing of a geobotanical anomaly. *Economic Geology*, v. 78, n. 4, p. 770-782, 1983.

DATT, B. Identification of green and dry vegetation components with a crosscorrelogram spectral matching technique. *International Journal of Remote Sensing*, v. 21, p. 2133–2139, 2000.

_____. Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll azb and total carotenoid content in Eucalyptus leaves. *Remote Sensing of Environment*, v. 66, n. 111–121, 1998.

DAVIS, J. C. Statistics and data analysis in Geology. New York: John Wiley & Sons, 1970. 646 p.

DAWSON, T. P.; CURRAN, P. J.; PLUMMER, S. E. LIBERTY: modeling the effects of leaf biochemical concentration on reflectance spectra. *Remote Sensing of Environment*, v. 65, p. 50-60, 1998.

- DIAS, R. R.; PARADELLA, W. R. Integration of airborne gammaspectrometric data with Landsat TM in the geological mapping of the Pojuca area, Carajás mineral province. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 15, n. 1, p. 23-34, 1997.
- DRURY, S. A. *Image interpretation in Geology*. 3. ed. Cheltenham, UK: Nelson Thornes; Malden, MA: Blackwell Science, 2001. 290 p.
- ELVIDGE, C. Visible and infrared reflectance characteristics of dry plant materials. *International Journal of Remote Sensing*, v. 11, p. 1775–1795, 1990.
- FLORINSKY, I. V.; KURYAKOVA, G. A. Influence of topography on some vegetation cover properties. *Catena*, v. 27, p. 123–141, 1996.
- FOLLY, P.; ENGEL, N. Chlorophyll b to chlorophyll a conversion precedes chlorophyll degradation in *Hordeumvulgare* L. *Journal of Biological Chemistry*, v. 274, n. 21, p. 811–816, 1999.
- FOSBERG, F. R. Geography, Ecology, and Biogeography. *Annals of the Association of American Geographers*, v. 66, n. 1, p. 117-128, 1976.
- FOURTY, T.; BARET, F. On spectral estimates of fresh leaf biochemistry. *International Journal of Remote Sensing*, v. 19, p. 1283-1297, p. 1998.
- FRASER, S. J.; GREEN, A. A. A software defoliant for geological analysis of band ratios. *International Journal of Remote Sensing*, v. 8, p. 525-532, 1987.
- GALVÃO, L. S.; VITORELLO, I.; ALMEIDA FILHO, R. Effects of band positioning and bandwidth on NDVI measurements of tropical savannahs. *Remote Sensing of Environment*, v. 67, p. 181–193, 1999.
- GAMON, J. A.; FIELD, C. B.; ROBERTS, D. A.; USTIN, S. L.; VALENTINI, R. Functional patterns in annual grassland during an AVIRIS overflight. *Remote Sensing of Environment*, v. 44, p. 239–253, 1993.
- GAO, B.; GOETZ, A. F. H. Extraction of dry leaf spectral features from reflectance spectra of green vegetation. *Remote Sensing of Environment*, v. 47, p. 369–374, 1994.
- GASTELLU-ETCHEGORRY, J. P.; ZAGOLSKY, F.; MOUGIN, E.; MARTY, G.; GIORDANO, G. An assessment of canopy chemistry with AVIRIS: a case study in the Landes forest, south-west France. *International Journal of Remote Sensing*, v. 16, n. 3, p. 487–501, 1995.
- GEBERMAN, A. H.; CUELLAR, J. A.; GAUSMAN, H. W. Relationship of Sorghum canopy variables to reflected infrared radiation for two wavelengths and two wavebands. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 50, p. 209-213, 1984.
- GENTRY, A. H. Tree species richness of upper Amazonian forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 85, p. 156-159, Jan. 1988.
- GITELSON, A. A.; MERZLAK, M. N. Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Advances in Space Research*, v. 22, p. 689–692, 1998.
- GIRARD, M. C.; GIRARD, C. M. *Téledétection appliquée: zones tempérées et intertropicales*.

Paris: Masson, 1989. 147 p.

GODOY, J.R.L. Estrutura e composição específica da Mata Atlântica secundária de encosta sobre calcário e filito, no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira, Iporanga, SP. 2001. 112 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

GOETZ, A. F. H.; ROCK, B. N.; ROWAN, L. C. Remote sensing for exploration: an overview. *Economic Geology*, v. 78, n. 4, p. 573-590, 1983.

GOVAERTS, Y. M.; JACQUEMOUD, S.; VERSTRAETE, M. M.; USTIN, S. L. Three-dimensional radiation transfer modeling in a dicotyledon leaf. *Applied Optics*, v. 35, n. 33, p. 6585-6598, 1996.

GREEN, R. O.; CONEL, J. D.; ROBERTS, D. A. Estimation of aerosol optical depth pressure elevation, water vapor, and calculation of apparent surface reflectance from radiance measured by the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) using a radiative transfer code. *Proceedings of the International Society for Optical Engineering – SPIE*, v. 2037, p. 2–11. 1993.

_____; CONEL, J. E.; MARGOLIS, J.; CHOVIT, C.; FAUST, J. In-flight calibration and validation of the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). In: ANNUAL JPL AIRBORNE EARTH SCIENCE WORKSHOP, 6., 1996, Pasadena, CA. *Proceedings...* Pasadena, CA : JPL, 1996. v. 1, p. 115–126. (JPL Publication 96-4).

GUENEGOU, M. C.; LEVASSEUR, J. E.; ANSEAU, C.; PALMIER, C.; LOISEL, C.; COUREL, M. F. Limites de l'utilisation de la haute resolution spectrale et des paramètres spectraux dans le visible et proche infrarouge pour l'étude de la végétation. In: SYMPOSIUM INTERNATIONAL MESURES PHYSIQUES ET SIGNATURES EN TELEDETECTION, 6., 1994, Val d'Isère. *Annales...* Aussois, FR: CNES, 1994. p. 285-290.

GUYOT, G. La réflectance des couverts végétaux. *Photo-Interprétation*, v. 95, n. 3, p. 157-180, 1995.

HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; TREMBLAY, N.; ZARCO-TEJEDA, P. J.; DEXTRAZE, L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, v. 81, p. 416-426, 2002.

HALL, F. G.; HUENNRICH, K. F.; GOETZ, S. J.; SELLERS, P. J.; NICKELSON, J. E. Satellite remote sensing of surface energy balance: successes, failures and issues in FIFE. *Journal of Geophysical Research*, v. 97, p. 19061-19089, 1992.

HESHMATTI, G. A.; SQUIRES, V. R. Geobotany and range ecology: a convergence of thought? *Journal of Arid Environments*, v. 35, p. 395-405, 1997.

HODCROFT, A. J. T.; MOORE, J. McM. Remote sensing of vegetation: a promising exploration tool. *Mining Magazine*, p. 274-279, Oct. 1988.

HOFFMANN, H.; KIRCHHOF, W. The spectral reflexion behaviour of branches and branch components of healthy and damaged beech trees. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM PHYSICAL MEASUREMENTS AND SIGNATURES IN REMOTE SENSING, 5., 1991, Courchevel, FR. *Proceedings...* S.l.: s.n., 1991. p. 191-196.

HONG, J. H.; IKEDA, K.; YASUMOTO, K. Near infrared diffuse reflectance spectroscopic

analysis of the amounts of moisture, protein, starch, amylose and tanin in Buckwheat flours. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, v. 42, n. 4, p. 356–366, 1996.

HORLER, D. N. H.; DOCKRAY, M.; BARBER, J. The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, v. 4, n. 2, p. 289–297, 1983.

HSIAO, T. C. Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology*, v. 24, p. 519–570, 1973.

_____; XU, L. K. Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport. *Journal of Experimental Botany*, v. 51, p. 1595–1616, 2000.

HUBELL, S. P. A unified theory of biogeography and relative species abundance and its application to tropical rain forests and coral reefs. *Coral Reefs*, v. 16, p. S9–S21, 1997.

HUGUENIN, R. L.; ERDMAN, C. D.; KARASKA, M. A. Distilling hyperspectral imagery for forest and agricultural species discrimination. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 2., 2000, Lake Buena Vista, FL. *Proceedings...* Ann Arbor, MI: ERIM, 2000. v. 1, p. 356.

HUNT, E. R. Analysis of hyperspectral imagery for assessment of Wyoming rangelands. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 2., 2000, Lake Buena Vista, FL. *Proceedings...* Ann Arbor, MI: ERIM, 2000. v. 1, p. 579–583.

JACQUEMOUD, S.; USTIN, S. L.; VERDEBOUT, J.; SCHMUCK, G.; ANDREOLI, G.; HOSGOOD, B. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. *Remote Sensing of Environment*, v. 56, p. 194–202, 1996.

_____; USTIN, S. Leaf optical properties: a state of the art. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM PHYSICAL MEASUREMENTS & SIGNATURES IN REMOTE SENSING, 8., 2001, Aussois, FR. *Proceedings...* Aussois, FR: CNES, 2001. p. 223–232.

JULIANI, C. *Geologia, petrogênese e aspectos metalogenéticos dos Grupos Serra do Itaberaba e São Roque na região das serras do Itaberaba e da Pedra Branca, NE da cidade de São Paulo, SP*. 1993. 2 v. Tese (Doutorado) Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

_____; CORRÊA-SILVA, R. H.; MONTEIRO, L. V. S.; BETTENCOURT, J. S.; NUNES, C. M. D. The Au-Granite Batalha system–Tapajós Gold Province, Amazonian Craton, Brasil: hydrothermal alteration and regional implications. *Precambrian Research*, v. 119, p. 225–256, 2002.

_____; MONTEIRO, L. V. S.; BETTENCOURT, J. S.; CORRÊA-SILVA, R. H. Paleoproterozoic epithermal high and low-sulfidation and porphyry-related Au mineralizations in the Tapajós Gold Province, Brazil: exploration prospectives. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE EXPLORAÇÃO MINERAL, 2004, Ouro Preto. *Anais...* Brasília: ADIMB, 2004. 1 CD-ROM.

_____; RYE, R. O.; NUNES, C. M. D.; SNEE, L. W.; CORRÊA-SILVA, R. H.; MONTEIRO, L. V. S.; BETTENCOURT, J. S.; NEUMANN, R.; ALCOVER NETO, A. Paleoproterozoic volcanic-hosted quartz–alunite epithermal deposits in the Tapajós Gold Province, Amazonian Craton, Brazil. *Chemical Geology*, v. 215, p. 95–125, 2005.

KENDRICK, R. E.; FRANKLAND, B. Phytochrome and plant growth. In: NOBEL, P. S. (Ed.). *Physicochemical and environmental plant physiology*. San Diego: Academic Press, 1976. p. 90 a 258.

_____; KRONENBERG, G. H. M. *Photomorphogenesis in plants*. 2. ed. Dordrecht: Kluwer, 1994. 265 p.

KLEIN, E. L.; SANTOS, R. A.; FUZIKAWA, K.; ANGELICA, R. S. Hydrothermal fluid evolution and structural control of the Guarim gold mineralization, Tapajós Province, Amazonian Craton, Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 36: p. 149-164, 2001.

KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*, v. 1, p. 155-159, 1970.

KOKALY, R. F. Investigating a physical basis for spectroscopic estimates of leaf nitrogen concentration. *Remote Sensing of Environment*, v. 85, p. 153-161, 2001.

_____; CLARK, R. N. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. *Remote Sensing of Environment*, v. 67, p. 267-287, 1999.

_____; DESPAIN, D. G.; CLARK, R. N.; LIVO, K. E. Mapping vegetation in Yellowstone National Park using spectral feature analysis of AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, v. 84, p. 437-456, 2001.

KUPIEC, J. A.; CURRAN, P. J. Decoupling effects of the canopy and foliar biochemicals in AVIRIS spectra. *International Journal of Remote Sensing*, v. 16, p. 1731-1739, 1995.

LABOVITZ, M. L.; MASUOKA, E. J.; BELL, R. A "Blind" examination for the use of remote sensing in researching for geobotanical anomalies. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 3., 1984, Colorado Springs. Proceedings... Ann Arbor, MI: ERIM, 1984. p. 171-172.

LACRUZ, M. S. P. *Sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica como subsídio para levantamentos fisionômico-estruturais em floresta tropical úmida – estudo de caso: estação científica Ferreira Penna, PA*. 1996. 114 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1996.

LAMARÃO, C. N.; DALL'AGNOL, R.; LAFON, J. M.; LIMA, E. F. Geology, geochemistry and Pb–Pb zircon geochronology of the paleoproterozoic magmatism of Vila Riozinho, Tapajós Gold Province, Amazonian Craton, Brazil. *Precambrian Research*, v. 119, p. 189-223, 2002.

LAWLOR, D. W. *Photosynthesis: molecular, cellular and environmental processes*. Essex: Longman Scientific and Technical, 1993. 318 p.

LI, X.; STRAHLER, A. H. Geometric-optical bi-directional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 30, p. 276-292, 1992.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. *Remote sensing and image interpretation*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. 750 p.

LOUGHLIN, W. P. Principal component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric*

Engineering and Remote Sensing, v. 57, p. 1163–1169, 1991.

MALTHUS, T. J.; ANDRIEU, B.; DANSON, F. M.; JAGGARD, K. W.; STEVEN, M. D. Candidate high spectral resolution infrared indices for crop cover. *Remote Sensing of Environment*, v. 46, p. 204–212, 1993.

MARTIN, M. E.; NEWMAN, S. D.; ABER, J. D.; CONGALTON, R. G. Determining forest species composition using high spectral resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, v. 65, p. 249–254, 1998.

MARUR, C. J. Fotossíntese e translocação de carboidratos em algodoeiros submetidos à déficit hídrico após a aplicação de cloreto de mepiquat. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, v. 10, n. 1, p. 59–64, 1998.

MOUAT, D.A. The response of vegetation to geochemical conditions. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 1982, Fort Worth. *Proceedings...* Ann Arbor, MI: Erim, 1982. 2nd Thematic Conference, p. 75–84.

MUSTARD, J. F.; SUNSHINE, J. M. Spectral analysis for Earth Sciences: investigations using remote sensing data. In: RENCZ, A. N. (Ed.). *Remote sensing for the Earth Sciences*. 3. ed. New York: John Wiley, 1999. p. 251–307. (Manual of Remote Sensing, 3).

NASCIMENTO, F. S.; CHEN, S. C. *Sensoriamento remoto aplicado à prospecção de minerais de zinco no Grupo Bambuí, baseado em estudos geobotânicos*. São José dos Campos: INPE, 1976. 25 p. (Relatório INPE 951-pe/042).

NUNES, C. M. D. *Caracterização de um sistema epitermal high-sulfidation paleoproterozóico na Província Aurífera do Tapajós, Pará*. 2001. 174 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

OLIVEIRA, A. A.; MORI, S. A. A central Amazonian terra firme Forest; I. High tree species richness on poor soils. *Biodiversity and Conservation*, v. 8, n. 9, p. 1219–1244, 1999.

PACIULLO, D. S. C.; GOMIDE, J. A.; QUEIROZ, D. S. Composição química e digestibilidade in vitro de lâminas foliares e colmos de gramíneas forrageiras, em função do nível de inserção no perfilho, da idade e da estação de crescimento. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v.30, n.3, p. 964–974, 2001.

PAIVA, W. O. Taxa de polinização cruzada em cubiu. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 34, n. 1, p. 145–149, 1999.

PARADELLA, W. R.; BRUCE, W. D.; HORNSB, J. K.; KUSHIGBOR, C. A background Geobotany model applied to geologic exploration in tropical forest environments: first results from Landsat-tm and Dtm for the Pojuca Cu-Zn Deposits, Carajas Province, Brazil. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 1989, Vacouver. *Proceedings...* S.l.: IEEE, 1989. v. 4, p. 2511–2513.

_____; SILVA, M. F. F.; ROSA, N. A.; KUSHIGBOR, C. A. A geobotanical approach to the tropical rain forest environment of the Carajás Mineral Province (Amazon Region, Brazil), based on digital TM data and DEM data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 15, n. 8, p. 1633–1648, 1994.

- PEARSON, R. L.; MILLER, L. D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation the productivity of the short-grass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 8., 1972, Ann Arbor, MI. *Proceedings...* Ann Arbor: Institute of Science and Technology. University of Michigan, 1972. p. 1357-1381.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; BIEL, C.; SERRANO, L.; SAVÉ, R. The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*, v. 14, p. 1887–1905, 1993.
- PETERSON, D. L.; ABER, J. D.; MATSON, P. A.; CARD, D. H.; SWANBERG, N.; WESSMAN, C.; SPANNER, M. Remote sensing of forest canopy and leaf biochemical contents. *Remote Sensing of Environment*, v. 24, p. 85-108, 1988.
- PHILLIPS, O. L.; VARGAS, P. N.; MONTEAGUDO, A. L.; CRUZ, A. P.; ZANS, M. E. C.; SÁNCHEZ, W. G.; YLI-HALLAS, M.; ROSE, S. Habitat association among Amazonian tree species: a landscape-scale approach. *Journal of Ecology*, v. 91, p. 757-775, 2003.
- PINTY, B.; VERSTRAETE, M. M.; DINKINSON, R. E. A physical model of the bidirectional reflectance of vegetation canopies, 2. Inversion and validation. *Journal of Geophysical Research*, v. 95, p. 767-775, 1990.
- PIRES, J. M. Tipos de vegetação da Amazônia. In: O MUSEU Goeldi no ano do sequicentenário. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 1973. p. 179-202. (MPEG. Publicações Avulsas, 20).
- PITMAN, N. C. A.; TERBORGH, J.; SILMAN, M. R.; NUÑEZ, V. P.; NEIL, D. A.; CERÓN, C. E.; PALACIOS, W. A.; AULESTIA, M. Dominance and distribution of tree species in upper Amazonian terra firme forests. *Ecology*, v. 82, p. 2101-2117, 2001.
- PONZONI, F. J. Comportamento spectral da vegetação. In: MENEZES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Ed.). *Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais*. Brasília: Editora da UnB: Embrapa Cerrados, 2001. 262 p.
- POULSEN, A. A.; BALSLEV, H. Abundante and cover of ground herbs in a Amazonian rain forest. *Journal of Vegetation Science*, v. 2, p. 315-322, 1991.
- PUIG H., FROMARD F., FONTES J., CADAMURO L., SOLACROUP F. Structure et dynamique de la végétation du périmètre du Centre Spatial Guyanais (Guyane française). Toulouse: CNES. Centre Spatial Guyanais, 1995. 30 p.
- PYKE, C. R.; CONDIT, R.; AGUILAR, S.; LAO, S. Floristic composition across a climatic gradient in a neotropical lowland forest. *Journal of Vegetation Science*, v. 12, p. 553-566, 2001.
- RIAZA, M. L.; MARTINEZ-TORRES, R.; RAMON-LLUCH, J.; ALONSO, P. Heras Evolution of equatorial vegetation communities mapped using Thematic Mapper images through a geographical information system (Guinea. Equatorial Africa). *International Journal of Remote Sensing*, v. 19, n. 1, p. 43–54, 1998.
- RIBEIRO FILHO, E. Prospecção geobotânica de Urânio e geologia a nordeste de Cuiabá, Mato Grosso. *Boletim da SBG*, v. 10, n. 2, p. 63-72, 1961.

- RODRIGUES, S. T.; ALMEIDA, S. S. L.; ANDRADE, H. C.; BARROS, I. C. L.; VAN DEN BERG, M. E. Composição florística e abundância de pteridófitas em três ambientes da bacia do rio Guamá, Belém, Pará, Brasil. *Acta Amazônica*, v. 34, n. 1, p. 35-42, 2004.
- RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v. 55, p. 95-107, 1996.
- ROUSE, J. W.; HAAS, J. A.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES. TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. *Proceedings...* Washington: NASA, 1973. p. 309-317.
- ROWAN, L. C.; CROWNLEY, J. K.; SCHMIDT, R. G.; AGER, C. M.; MARS, J. C. Mapping hydrothermally altered rocks by analyzing hyperspectral image (AVIRIS) data of forested areas in the Southeastern United states. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 68, p. 145-166, 2000.
- RUOKOLAINEN, K.; LINNA, A.; TUOMISTO, H. Use of Melastomaceae and pteridophytes for revealing phytogeographic patterns in Amazonian rain forests. *Journal of Tropical Ecology*, v. 13, p. 243-256, 1997.
- SABINS, F. F. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, v. 14, n. 3, p. 157-183, 1999.
- SALDANHA, D. L.; CUNHA, M. C. L. Anomalia geobotânica de reconhecimento e de alvo em área de ocorrência de rochas ultramáficas no Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. *Anais...* S.l.: INPE, 2005. p. 1883-1889.
- SANTOS, J. O. S.; GROVES, D. I.; HARTMANN, L. A.; MOURA, M. A.; MCNAUGHTON, N. J. Gold deposits of the Tapajós and Alta Floresta Domains, Tapajós-Parima orogenic belt, Amazon Craton, Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 453-488, 2001.
- SCHUERGER, A. C.; CAPELLE, G. A.; DI BENEDETTO, J. A.; MAO, C.; THAI, C. N.; EVANS, M. D.; RICHARDS, J. T.; BLANK, T. A.; STRYJEWSKI, E. C. Comparison of two hyperspectral imaging and two laser-induced fluorescence instruments for the detection of zinc stress and chlorophyll concentration in bahia grass (*Paspalum notatum* Flugge). *Remote Sensing of Environment*, v. 84, n. 4, p. 572-588, 2003.
- SCHULZE, M. D. *Ecology and behavior of nine timber tree species in Pará, Brazil: links between species life history and forest management and conservation*. 2003. 371 p. Thesis (PhD) – College of Science, Pennsylvania State University, Pennsylvania, 2003.
- SCHWALLER, M. R. *Remote sensing for geobotanical prospecting*. 1984. 118 p. Thesis (PhD) – University of Michigan, 1984.
- SCUDELLER, V. V.; MARTINS, F. R.; SHEPHERD, G. J. Distribution and abundance of arboreal species in the atlantic ombrophilous dense forest in Southeastern Brazil. *Plant Ecology*, v. 152, p. 185-199, 2001.
- SELLERS, P. J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, v. 6, p. 1335-1372, 1985.
- SILVA, M. F. F.; ROSA, N. A. Análise do estrato arbóreo da vegetação sobre jazidas de cobre na Serra dos Carajás, PA. *Boletim do Instituto Paraense Emílio Goeldi (Série*

Botânica), v. 5, p. 176-206, 1989.

_____; ROSA, N. A.; OLIVEIRA, J. Estudos botânicos na área do projeto Ferro Carajás: aspectos florísticos da mata do rio Gelado, Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi* (Série Botânica), v. 3, p. 1-20, 1987.

SIMS, D. A.; GAMON, J. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, v. 81, p. 337–354, 2002.

SINGHROY, V. ; SAINT JEAN, R. ; LEVESQUE, J. Reflectance spectra of the Boreal Forest over mineralized sites. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2000, Honolulu. *Proceedings...* S.I.: IEEE, 2000. v. 4, p. 1379-1381.

SOUZA FILHO, C. R.; DRURY, S. A. Evaluation of JERS-1 (FUYO-1) OPS and Landsat TM images for mapping of gneissic rocks in arid areas. *International Journal of Remote Sensing*, v. 19, p. 3569-3594, 1998.

SVENNING, J. C. Microhabitat specialization in a species-rich palm community in Amazonian Ecuador. *Journal of Ecology*, v. 87, p. 55-65, 1999.

SZTUTMAN, M. E RODRIGUES, R. R. O mosaico vegetacional numa área de floresta contínua da planície litorânea, Parque Estadual da Campina do Encantado, Pariquera-Açu, SP. *Revista Brasileira de Botânica*, v. 25, n. 2, p. 161-176, 2002.

THENKABAIL, P. S.; SMITH, R. B.; DE PAUW, E. Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 68, p. 607-621, 2002.

_____; _____. Hyperspectral vegetation indices and their relationship with agricultural characteristics. *Remote Sensing of Environment*, v. 71, p. 158-182, 2000.

THOMAS, J. R.; NANKEM, L. N.; OERTHER, G. F.; BROWN, R. G. Estimating leaf water content by reflectance measurements. *Agronomy Journal*, v. 63, p. 845-847, 1971.

TUCKER, C. J.; GARRATT, M. W. Leaf optical system modeled as a stochastic process. *Applied Optics*, v. 16, n. 3, p. 635-642, 1977.

TUOMISTO, H.; POULSEN, A. D.; RUOKOLAINEN, K.; MORAN, R. C.; QUINTANA, C.; CELI, J.; CAÑAS, G. Linking floristic patterns with soil heterogeneity and satellite imagery in Ecuadorian Amazonia. *Ecological Applications*, v. 13, p. 352-371, 2003b.

_____; RUOKOLAINEN, K.; AGUILAR, M.; SARMIENTO, A. Floristic patterns along a 43-km long transect in an Amazonian rain forest. *Journal of Ecology*, v. 91, p. 743–756, 2003a.

_____; _____. KALLIOLA, R.; LINNA, A.; DANJOY, W.; RODRIGUEZ, Z. Dissecting Amazonian biodiversity. *Science*, v. 269, p. 63-66, 1995.

_____; _____. YLI-HALLA, M. Dispersal, environment and floristic variation of Western Amazonian forests. *Science*, v. 299, p. 241-244, 2003c.

USTIN, S. L.; SMITH, M. O.; JACQUEMOUD, S.; VERSTRAETE, M.; GOVAERTS, Y. Geobotany: vegetation mapping for Earth Sciences. In: RENCZ, A. N. (Ed.). *Remote sensing*

for the Earth Sciences. 3. ed. New York: Wiley, 1999. p. 251-307. (Manual of Remote Sensing, 3)

WESSMAN, C. A.; ABER, J. D.; PETERSON, D. L. An evaluation of imaging spectrometry for estimating forest canopy chemistry. *International Journal of Remote Sensing*, v. 10, p. 1293-1316, 1989.

XU, R.; MA, Y. Remote sensing research in biogeochemistry of the Hetai gold deposit, Guandong Province, China. *International Journal of Remote Sensing*, v. 25, n. 2, p. 437-453, 2004.

YANG, X. H.; ZHOU, Q. M.; MELVILLE, M. Estimating local sugarcane evapotranspiration using Landsat TM image and a VITT concept. *International Journal of Remote Sensing*, v. 18, p. 453-459, 1997.

YOST, E.; WENDEROTH, S. The reflectance spectra of mineralized trees. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 7., 1971, Ann Arbor, MI. *Proceedings...* Ann Arbor: Institute of Science and Technology. University of Michigan, 1971. p. 269-284.

ZAGOLSKI, F.; PINEL, V.; ROMIER, J.; ALCAYDE, D.; FONTANARU, J.; GASTELLU-ETCHEGORRY, J. P.; GIORDANO, G.; MARTY, G.; MOUGIN, E.; JOFFRE, R. Forest canopy chemistry with high spectral resolution remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, p. 1107-1128, 1996.

ZUR, Y.; GITELSON, A. A.; CHIVKUNOVA, O. B.; MERZLYAK, M. N. The spectral contribution of carotenoids to light absorption and reflectance in green leaves. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 2., 2000, Lake Buena Vista, FL. *Proceedings...* Ann Arbor, MI: ERIM, 2000. v. 2, p. 17-23.

Anexo 1

Principal component analysis applied to feature-oriented band ratios of hyperspectral data: a tool for vegetation studies

Reprodução de trabalho conjunto com Carlos Roberto Souza Filho, publicado no International Journal of Remote Sensing

Principal component analysis applied to feature-oriented band ratios of hyperspectral data: a tool for vegetation studies

T. I. R. ALMEIDA

Geosciences Institute, University of São Paulo, Rua do Lago, 562 Cidade Universitária, 05508-080 São Paulo, SP, Brazil

and C. R. DE SOUZA FILHO*

Geosciences Institute, University of Campinas, PO Box 6152, 13081-970 Campinas, SP, Brazil; e-mail: beto@ige.unicamp.br

(Received 22 October 2002; in final form 19 May 2004)

Abstract. This paper presents a simple but effective method to identify and map the distribution of vegetation using hyperspectral data, which involves band ratios and principal component analysis (PCA). Using spectral data from the literature, we devised spectral indices focused on specific vegetation constituents (band positions are in nm): chlorophyll-a (461/422 and 807/638); chlorophyll-b (520/470 and 807/648); α -carotene (520/442); carotenoids (539/490 and 807/490); anthocyanin (510/530); phytochrome P730 (845/730), phytochrome P660 (778/658); lignin (1028/2101); cellulose (2211/2400); nitrogen (1731/1691); and leaf water content (1066/1452). In a second step, these indices were submitted to PCA. PCA eigenvector loadings were examined to decide which of the principal component (PC) images concentrate information directly related to the spectral signatures of specific vegetation constituents. An important aspect of this approach was that it predicted whether the target surface type would be highlighted by dark or bright pixels in the relevant PC image. Finally, the optimal PCs are selected and combined in a colour composite. In this study, we applied this method to atmospherically corrected Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) data collected in the Alto Paraíso de Goiás (APG) region of central Brazil. The results from identifying and mapping the distribution of vegetation in the APG region were very encouraging. Photosynthetic and non-photosynthetic vegetation or a mixture of both were mapped on the basis of feature-oriented PC loadings. Discriminations between vegetation types were made, including identifying riparian forests, burn grasslands and resurgence zones, crops and several types of savannah and pastures.

1. Introduction

Remote sensing of vegetation has overwhelmingly focused on the examination of the chlorophyll absorption feature at $0.68 \mu\text{m}$. The long-wavelength side of the chlorophyll absorption (~ 0.68 to $\sim 0.73 \mu\text{m}$) forms one of the most extreme slopes found in spectra of naturally occurring common materials (Clark *et al.* 1995). Remote sensing of chlorophyll-containing vegetation species is strongly based on

*Corresponding author.

this exceptional spectral feature positioned at the popularly known 'red-edge' region of the spectrum. This feature and vegetation indices rooted in ratios of broad near-infrared (NIR) and visible (VIS) (red) bandwidths have been a primary focus of remote sensing investigations of vegetation since the launch of Landsat 1. The small number of broadband channels available from multispectral sensors and the band positioning of these channels have kept attention on the chlorophyll feature. Certainly, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Rouse *et al.* 1973) and other indices have been successfully applied to many studies. However, the remote sensing literature abounds with papers that address the shortcomings of vegetation indices.

In contrast to earlier multispectral sensors covering the 0.4–2.5 μm wavelength region, a new generation of imaging instruments, known as imaging spectrometers, measure reflected sunlight in hundreds of narrow spectral bandwidths. These data provide an almost continuous reflectance spectrum of vegetation that can be used to identify specific, subtle vegetation constituents (Card *et al.* 1988, Curran 1989, Wessmann *et al.* 1989, Elvidge 1990, Buschmann and Nagel 1993, Gao and Goetz 1994, Kupiec and Curran 1995, Hong *et al.* 1996, Zagolski *et al.* 1996, Baret and Fourty 1997, Blackburn 1998, Datt 1998, Fourty and Baret 1998, Gitelson and Merzlak 1998, Kokaly and Clark 1999, Zur *et al.* 2000). Although hyperspectral remote sensing provides a substantial amount of information throughout the VIS, NIR and short-wavelength infrared part of the spectrum, the 'red edge' is still considered the main source of information for vegetation studies in many contemporary contributions (Clever 1999, Hunt 2000). The red edge is very useful to distinguish vegetated from non-vegetated areas. This is due to the fact that the red edge feature not only is the most important but also the most ordinary spectral feature found in vegetation, persisting throughout plant development until the initial stages of plant senescence. But the use of the red edge may be limited if applied for determining the chlorophyll content of leaves (Buschmann and Nagel 1993, Fourty and Baret 1998), leaf area index, biomass (Sellers 1985) or species discrimination and vegetation health state (Guenegou *et al.* 1994).

The use of the red edge or chlorophyll absorption at 680 nm to study vegetation has proved advantageous in many applications, from the limited multispectral sensor case to the greater options available with hyperspectral data (Galvão *et al.* 1999). However, several studies indicate restrictions in the use of NDVI as chlorophyll indices (Datt 1998, Gitelson and Merzlak 1998), or as a tool to discriminate vegetation species and map vegetation changes due to environmental conditions (Guenegou *et al.* 1994).

In this study, we favour a holistic and systematic approach, considering vegetation not only as a whole but also in the view of its basic constituents, including pigments, water leaf content, starches, waxes, structural biochemical molecules (proteins, lignin and cellulose), nitrogen, among others, which all contribute to the reflectance spectra of vegetation. Specific absorption features akin to these components can be resolved by imaging spectroscopy, using hyperspectral sensors, although some of their detailed spectral characteristics may be poorly portrayed due to the strong water absorption features that mask those of weaker absorbers (Fourty and Baret 1998) and because different organic compounds (water, cellulose, sugar, starch and lignin) have the O–H bonds in the absorption spectra (Elvidge 1990). We also emphasize the importance of the inadequately addressed non-photosynthetic vegetation constituents, which contribute in plant canopy reflectance (Elvidge 1990). Dry plant material such as dry leaves, bark,

wood and dry reproductive structures form a significant part of the standing biomass and ground litter, and they influence the vegetation spectral response (Datt 2000).

The mapping of materials in hyperspectral data has been successfully achieved using spectra libraries of known materials and 'matching' algorithms (Clark *et al.* 1990, 2003, Boardman and Goetz 1991). The notion is to use not only the greater number of channels available but also directly take advantage of the spectrometer's power in resolving absorption features present in the reflectance spectrum of each pixel (Kokaly *et al.* 2001). The characteristics of vegetation have been mapped within specific scenes of imaging spectroscopy data, using the full spectrum (Gamon *et al.* 1993, Martin *et al.* 1998, Roberts *et al.* 1998), only the bandwidths that correspond to the principal absorption features of vegetation (Kokaly and Clark 1999, Kokaly 2001) or bandwidths that seem to offer distinction between specific vegetation constituents (Asner and Lobell 2000).

Although hyperspectral data processing techniques are becoming increasingly popular, traditional methods, such as band ratios and principal component analysis (PCA), are still the focus of recent successful studies of vegetation (Thenkabail *et al.* 2000). Specific band ratios can be built to successfully highlight specific vegetation components, based on the shape and relative intensity of their reflectivity curves. Using spectral libraries, it is theoretically easy to know how to interpret the results of band ratios (in terms of reflectance spectra) and they are already decorrelated for effects such as albedo (Fraser and Green 1987). However, because of overall similarities among many of the vegetation components, ratios often fail to separate them clearly. It may be argued that the magnitude of the ratio should help define or characterize certain components, though in the real world of pixels, end-member spectra are degraded by mixing with other components, resulting in considerable confusion (Fraser and Green 1987). To avoid such confusion, the application of PCA on several input band ratio images—i.e. ratios oriented to host information regarding specific vegetation constituents of interest—may be helpful, as verified in similar work but applied to mineral mapping only (Fraser and Green 1987, Chavez and Kwarteng 1989, Loughlin 1991, Souza Filho and Drury 1998).

Therefore, the aim of this study was to develop a method to discriminate and map variations in photosynthetic and non-photosynthetic fractions of vegetation. Specifically, we applied PCA to band ratios that were defined for spectral features of vegetation and its constituents.

2. AVIRIS data

The Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) data of Alto Paraíso de Goiás (APG) region (figure 1) were acquired at an altitude of 20 km in August 1995, at the peak of the dry season. The solar elevation angle was 62°. Nominal spatial resolution was 20 m. The data were collected in 224 contiguous channels (10 nm bandwidth) in the 400–2500 nm spectral interval. Two contiguous subscenes were selected to compose a rectangular area of 11 km × 20 km (figure 1).

AVIRIS data were provided by the Jet Propulsion Laboratory in radiance units, after being spectrally, radiometrically and geometrically calibrated using laboratory and in-flight procedures (Green *et al.* 1996). The effects of atmospheric absorption and scattering on the radiance data were corrected by the use of a radiative transfer model (MODTRAN) combined with laboratory and in-flight calibration data (Green *et al.* 1993). The technique comprises a set of algorithms designed to characterize and compensate the effects of the atmospheric water vapour

Figure 1. Regional geological map of Alto Paraíso de Goiás (DNPM 1976). Note the location of the AVIRIS scene within the map. A representation of the AVIRIS hyperspectral data cube is on the right, with one of the 224 spectral bands (band 58 = 0.903 μm) shown on top. Variations in grey levels on the upper and right side of the cube represent spectral signatures of pixels located along these edges, ranging from 0.400 to 2.500 μm .

absorption on the airborne data, as expressed by the 940 nm absorption band, as well as the scattering properties of other atmospheric constituents, such as the well-mixed gases and aerosols. The final step of the method is the conversion of radiance to atmospherically corrected 'apparent' surface reflectance, which provides sufficiently good precision for vegetation mapping.

3. Physiography and geology of Alto Paraíso de Goiás

Figure 1 shows the geographic location and the regional geology of the study area in central Brazil. The region of Alto Paraíso de Goiás (APG) is located in Goiás State, between the geographic coordinates 47° 30'–47° 40' W and 14° 00'–14° 15' S.

The geology of APG is comprised of the outer portion of the Brasília Fold Belt, a major tectonic unit formed lately during the Brasiliano/Pan African orogeny (~600 Ma). The region contains a variety of metasediments folded and sheared under ductile deformation. The lithostratigraphic units that occur in this region belong to the Araí Group (Meso-Proterozoic) and to the Paranoá Group (Meso- to Neo-Proterozoic). The Araí Group is represented by the Arraías Formation, a thick sequence of coarse quartzites intercalated by metasilites and phyllites that sustain steep hills with elongated forms in the NE direction in the central and north-eastern portions of the region (figure 1 and figure 2(a) and 2(b)). The Paranoá Group, in the southern portion of the area, comprises a sequence of meta-pelites, metasilites and minor quartzites that form gently rolling hills (figure 2(d)).

The dominant vegetation type in the APG region is the 'cerrado' (savannah-type vegetation). The cerrado is composed of scattered small trees interspersed by shrubs and grasses, in variable proportions. However, because of the influence of agents

Figure 2. Physiographic aspects and main vegetation cover types in the study area. A = sparse savannas; B = savannah grasslands; C = tree and/or shrub savannas; D = gallery (riparian) forests; E = perennial vegetation over quartzites.

other than the macroclimate, such as bedrock, soil fertility and drainage, local topography, depth of the water table and fire frequency, a wide variety of savannah types can be distinguished (Galvão *et al.* 1999). In the study area, based on the predominance of physiognomic types, three main categories of cerrado were recognized (Galvão *et al.* 1999): savannah grasslands (figure 2(c) and 2(d)), tree and/or shrub savannah (figure 2(c)) and woodland savannah. A variety of grassland and tree and/or shrub savannas evolved over the rocks of the Paranoá Group (fine grained sediments). These areas have been disturbed by human activities (figure 2(d)). The rugged terrains formed by Arari Group rocks, over which sparse savannas occur (figure 2(a)), are less affected by human activities. Woodland savannas present a tree canopy cover of 60–80% and are distributed in complex patterns with transitions occurring in narrow belts not wider than a few tens of metres (figure 2(b) and 2(c)). Gallery (riparian) forests occupy the valleys of meandering drainage streams, present a tree canopy cover of almost 100% (figure 2(a) and 2(c)) and are the type of vegetation least subjected to the consequences of the cyclic water supply. Coarse-textured and freely drained lithosols are associated with fractured quartzites that outcrop at the crest of steep hills and provide support for the growth of some perennial vegetation (figure 2(a) and 2(b)).

4. Vegetation constituents relevant to systematic spectral studies

Generally, plants are composed of water, organic matter and inorganic material of mineral derivation. Among a number of categories in which organic components may be grouped, the classic division into carbohydrates, lipids, proteins and

pigments seems favourable to analyse plant spectral characteristics (Coutinho 1970).

Carbohydrates are the main organic compounds found in plants and are divided into monosaccharides, oligosaccharides and polysaccharides. The last two correspond to highly complex types of sugar, and they will be spectrally dealt with in this work, generically referred to as sugar. Cellulose is found in the cell walls of all plants and is the most abundant organic compound, forming one third to one half of the dry weight of most plants (Elvidge 1990). Lignin is the second most important biochemical compound by weight and, among other structural roles, acts as a barrier to the degradation of cellulose (Elvidge 1990). Starch is also usually found in plants and it is a supplementary source of nutrients, being the third most important biochemical compound among the carbohydrates.

Lipids, as well as carbohydrates, are C, H and O compounds but poor in oxygen, playing an important energetic role. They are often found in plant cells and also provide an additional source of nutrients for plants. Oils, fat and waxes belong to this group of organic components (Coutinho 1970), but in this work they will be spectrally treated all together as oil.

Proteins are composed of C, H, O, N and other elements in very small abundance. They are the most abundant constituents in cell protoplasts. They are essential for triggering metabolic reactions (Coutinho 1970). The largely abundant nitrogen-bearing compound in green leaves is the protein D-ribulose 1-5-diphosphate carboxylase, which plays a critical role in the fixation of carbon in photosynthesis (Elvidge 1990).

Pigments can be grouped into three main categories: the tetrapyrrole plant pigments (dominated by chlorophylls), the carotenoids (carotenes and xanthophylls) and anthocyanins (Coutinho 1970). Chlorophylls a and b represent the fundamental components of the light harvesting system by which autotrophic plants satisfy their needs for energy by photosynthesis. They are also the first to degrade (Schwaller 1984). The rise in the content of chlorophyll during a plant's life before senescence and the production of different types of chlorophylls are a function of environmental conditions.

Carotenoids contribute to photosynthesis and also play other roles. Carotenes ($C_{40}H_{56}$) are divided mainly into types α and β . These have an important role in leaf reflectance, especially in the early stages of leaf growth and during senescence. Xanthophylls have oxygen in their composition ($C_{40}H_{56}OH$) and have a different function as a leaf pigment. The anthocyanins are the most common flavonoids and are widely distributed in leaves, flowers and fruits of higher plants, mainly in their latter life stages (Schwaller 1984). Anthocyanins have spectral behaviour dependent on cellular pH (Coutinho 1970) and are strongly spectrally uncorrelated with carotenoids.

Water measures up to 90% by weight in herbaceous plants' living cells (Schwaller 1984) and it is essential for many biochemical reactions and for cell enlargement, growth and maintenance of plant form.

Phytochromes are protein plant pigments linked to two types of chromophores, and serve to direct the course of plant growth and development in response to different illumination conditions. Although not fully addressed in the literature in terms of chemistry, their spectral characteristics are well documented on the basis of morphogenetic growth aspects and plant development (Kendrick and Frankland 1976). Some authors (e.g. Lawlor 1993), however, state that phytochromes

correspond to very small fractions of a plant's overall pigments compared to chlorophylls a and b.

5. Methods

Our systematic approach to map vegetation involves two steps. First, using spectral data from the literature, we devise band ratios and/or spectral indices potentially capable of distinguishing specific vegetation constituents, focusing on those described in the previous section. In a second step, these ratios are submitted to a PCA.

5.1. Band ratios

The band ratio is one of the simplest and yet one of the most useful spectral processing techniques. Band ratios can be employed to suppress information that is common to both input images whilst simultaneously enhancing spectral differences. However, band ratios applied to distinguish foliar chemistry is not considered a very precise method (Curran 1989). This is due to a number of reasons, among which are: (i) the inevitable superposition of spectral absorption features of different vegetation constituents; and (ii) the association of many strong absorption features with the presence of O-H bonds, the latter being concurrently present in cellulose, starch, lignin, sugar and water. Despite such limitations, band ratios can be employed in a qualitative approach as will be demonstrated in this research.

The use of band ratios is appropriate to solve specific problems by targeting absorption features akin to particular vegetation constituents. The NDVI, which is a variation of the band ratio technique, is an efficient method that allows the distinction between exposed soils and vegetation. Other individual and more specific ratios are extremely useful. For example, Folly and Engel (1999) demonstrated that overall chlorophyll degeneration in plants is preceded by a conversion of chlorophyll-a to chlorophyll-b. These show subtle but distinct absorption features in the VIS part of the spectrum that can be enhanced by band ratio techniques, making it possible to detect if the plants are under stress owing to deprivation of water or nutrients or poisoned by an excess of a toxic element.

If one individual band ratio designed to enhance spectral information related to a particular vegetation constituent can be useful, a much more robust approach, proposed here, is to use a set of several band ratios aimed at targeting a number of plant components that simultaneously contribute to reflectance spectra of vegetation. The relative contents of constituents in plants are a function of different bedrock and soils over which they grow, stages of phenological cycles, water supply to roots, light, infestation by pathogens, and plant species differences. Therefore, this holistic notion, employing most of the principal vegetation compounds, potentially allows for an improved distinction among vegetation cover, as many of the variables involved in plant spectra are represented. In practice, part of the spectral response of some plant constituents may be masked by dominant organic compounds.

Using vegetation spectral data documented in the cited literature, and two additional datasets provided by Frédéric Baret (INRA, France; written communication, June 2000) and Raymond Kokaly (USGS, USA; written communication, June 2000), we devised a variety of ratios aiming to target plant compounds that could be relevant to the phenological cycle, species, density, morphology and structure of plants in the study area.

Ratios were favourably devised as follows: (i) band positions where spectral absorptions were insignificant or absent were assigned to numerators; and (ii) band positions at absorption peaks for each plant constituent were assigned to denominators. This strategy eases interpretation of results as an increase in the abundance of a constituent will have a disproportionate effect on the ratio imagery of one band to another, resulting in bright pixels (high digital number (DN) values). The choice of bandwidths for numerators varied for each constituent. The use of absorption-free band positions available close to absorption peaks and yielding significant slopes was favoured.

All of the band ratios were tested considering two field-checked end-members: dense riparian forests (chlorophyll-active vegetation) and exposed soils, avoiding ambiguities driven by other complex spectral mixtures. Twelve categories of ratios were selected in this process (table 1; band positions are in nm).

The ratios here proposed constitute an attempt to address some of the main plant constituents, but we emphasize that this should not be taken as a definitive framework, either in terms of band positions or selected vegetation compounds. There are a number of other ratios that could be tested for the same or other substances using different bandwidths, but that must await further investigations.

5.2. Principal component analysis

The principal components transformation is a multivariate statistical technique that selects uncorrelated linear combinations (eigenvector weights or loadings) of variables in n -dimensional space in such a way that each successively extracted linear combination, or principal component (PC), has a smaller variance (Souza Filho and Drury 1998 and references therein). The technique was applied to the 15 selected band ratios to decorrelate possible redundant information and to concentrate the information of interest into some specific PCs.

Before visual analysis of the PC imagery, careful examination of the eigenmatrix can reveal some important information about the structure of the original data and the results of the transformation (Loughlin 1991). It can be shown that although the sum of the variance of the original band ratios is equal to the sum of the variance of the PCs (their eigenvalues), the variances are very different for each new variable PC. Therefore, following one of the PCA's basic premises, it is evident that there is no loss or addition of information or noise during the process but just a reorganization of the dataset. Each eigenvector can be used to assess the percentage of the original band ratios variance making up successive PCs. In addition, it is

Table 1. Vegetation-oriented band ratios.

Chlorophyll-a	461/422 and 807/638
Chlorophyll-b	520/470 and 807/648
α -carotenes	520/442
Carotenoids	539/490 and 807/490
Anthocyanin	510/530
Phytochrome P730	730/845
Phytochrome P660	778/658
Lignin	1028/2101
Cellulose	2211/2400
Nitrogen	1731/1691
Leaf water content	1066/1452
NDVI	(750-692)/(750+692) (Galvão <i>et al.</i> 1999)

possible to roughly approximate the contribution of each band ratio to the individual PC images, by examining the eigenvectors for the original bands (Loughlin 1991).

The statistical dimensionality of the data and, in particular, the magnitude of the standard deviations, have great influence over the actual weighting of the original band ratios mapped into successive PCs. Examination of the magnitude and sign (i.e. positive or negative) of eigenvector loadings also gives an indication of which spectral properties of vegetation are responsible for the statistical variance mapped into each PC. This is the basis for the spectro-vegetation mapping approach examined here.

6. Results and discussion

6.1. Band ratios

Table 2 is a correlation matrix for the 15 selected band ratios of AVIRIS data. The low variability of the mean of correlations among these ratios (low standard deviation) signifies that a specific material dominates the overall spectral signature of the study area, i.e. vegetation. Correlations among ratios vary considerably, indicating that the information content between some ratios is distinct. The recognition of low correlations among several ratios suggests that our holistic approach is more complete for vegetation studies compared to simple applications of NDVI and another vegetation indices based in the red edge. The low correlations also suggest that better results can be achieved by increasing the numbers of ratios employed. On the other hand, data redundancies are inevitable. These redundancies are tackled by the use of PCA.

The lack of very high correlations among chlorophyll and carotene ratios (table 2), which were built on the basis of different but close bandwidths, is attributed to the great variety of pigments involved. In some cases, spectrally mixed responses do occur, particularly in the blue region—note, for example, the correlation between the alpha-carotene ratio (520/442) and the chlorophyll-a ratio (461/422) (table 2). Conversely, the high correlation found for N and leaf water content (LWC) ratios, using slightly close bandwidths, corroborates the natural high correlation of these components, since the N that is absorbed by plants is firstly dissolved in water.

Analysis of images of chlorophyll ratios built on the basis of absorption peaks in the blue region and reflectance peaks in the green region of the spectrum do not show responses as clear as the chlorophyll ratios made of absorption pits in the red region and the NIR plateau (where pigments are transparent) (table 2). This intriguing result may be due to insufficient atmospheric correction in the blue region, because the absorption pits within this waveband are notably more important to chlorophyll-a and -b than the similar peaks in the red region. Nevertheless, the use of ratios targeting chlorophyll absorption features in the blue region proved useful for mapping riparian forests in the study area (figure 3).

Band ratios targeting biochemical constituents (cellulose and lignin) show a high response for the majority of the savannahs (figure 4), which, although mostly photosynthetically inactive/chlorophyll-free during the dry season (grey shades in figure 4), yet compose a remarkable standing biomass in the study area.

The NDVI, usually considered as the best choice for vegetation studies, is not particularly uncorrelated to other band ratios (table 2). Also, some correlations are not clearly 'logic', possibly meaning that some ratios could be improved.

False colour composites of less correlated band ratios, particularly those focusing

Table 2. Correlation matrix of the 15 band ratios employed in this study (mean and standard deviation for all indices are 0.717 ± 0.064).

	NDVI	N	LWC	Chlor a	Chlor a	Chlor b	Chlor b	Carot	Carot	α -carot	Antho	P730	P660	Cellulose	Lignin
NDVI	1	0.674	0.813	0.5	0.869	0.555	0.84	0.685	0.751	0.495	0.818	0.593	0.847	0.51	0.712
N	0.674	1	0.767	0.516	0.725	0.546	0.719	0.74	0.674	0.534	0.676	0.572	0.711	0.696	0.792
LWC	0.813	0.767	1	0.557	0.903	0.59	0.887	0.837	0.79	0.556	0.822	0.593	0.889	0.669	0.934
Chlor a	0.5	0.516	0.557	1	0.58	0.64	0.577	0.689	0.726	0.761	0.683	0.498	0.572	0.594	0.594
Chlor a	0.869	0.725	0.903	0.58	1	0.496	0.982	0.835	0.741	0.51	0.814	0.728	0.984	0.575	0.838
Chlor b	0.555	0.546	0.59	0.64	0.496	1	0.481	0.671	0.819	0.862	0.702	0.439	0.475	0.669	0.642
Chlor b	0.84	0.719	0.887	0.577	0.982	0.481	1	0.854	0.724	0.498	0.794	0.723	0.992	0.579	0.835
Carot	0.685	0.74	0.837	0.689	0.835	0.671	0.854	1	0.853	0.679	0.814	0.606	0.843	0.778	0.898
Carot	0.751	0.674	0.79	0.726	0.741	0.819	0.724	0.853	1	0.788	0.909	0.511	0.724	0.731	0.802
α -carot	0.495	0.534	0.556	0.761	0.51	0.862	0.498	0.679	0.788	1	0.68	0.515	0.491	0.655	0.62
Antho	0.818	0.676	0.822	0.683	0.814	0.702	0.794	0.814	0.909	0.68	1	0.538	0.798	0.667	0.796
P730	0.593	0.572	0.593	0.498	0.728	0.439	0.723	0.606	0.511	0.515	0.538	1	0.702	0.486	0.588
P660	0.847	0.711	0.889	0.572	0.984	0.475	0.992	0.843	0.724	0.491	0.798	0.702	1	0.561	0.825
Cellulose	0.51	0.696	0.669	0.594	0.575	0.669	0.579	0.778	0.731	0.655	0.667	0.486	0.561	1	0.807
Lignin	0.712	0.792	0.934	0.594	0.838	0.642	0.835	0.898	0.802	0.62	0.796	0.588	0.825	0.807	1
Mean	0.71	0.69	0.77	0.63	0.77	0.64	0.77	0.79	0.77	0.64	0.77	0.61	0.76	0.67	0.78

Figure 3. Image portraying the sum of four chlorophyll ratios: chlorophyll-a (461/422 and 807/638) and chlorophyll-b (520/470 and 807/648). Chlorophyll-containing vegetation species in the study area (riparian forests) are depicted in lighter tones (high DN values).

on plant constituents with contrasting functions and spectral characteristics, might be used to ease discrimination between plant species, between healthy and stunted members of the same species, and to study variations in plant phenological cycles. Optimally, this could be carried out with ratios to enhance green or 'brown' pigments, nitrogen or LWC and biochemical constituents.

6.2. Principal component analysis

Table 3 presents the eigenvector matrix for the PCs of the 15 selected band ratios. Theoretically, the first three PCs should concentrate most of the information related to vegetation. PC1 (figure 5(a)) shows similar weights for all band ratios

Figure 4. Image portraying the sum of lignin and cellulose ratios. Light shades show photosynthetic fractions of vegetation (riparian forests); very dark (black) shades represent large burned areas; whereas grey shades show mostly fractions of standing non-photosynthetic biomass.

(table 3) and its image allows the distinction between riparian forests (white), savannahs (grey) and exposed soil or burned areas (black). PC2 (figure 5(b)) displays higher weights of chlorophylls, α -carotene and phytochrome P660, and is particularly able to enhance rupestrian fields over quartzites (lighter tones) that sustain rugged terrains in the study area. These quartzites are poorly covered by green vegetation in the dry season, when these AVIRIS data were collected. Increasingly higher order PCs portray increasingly less correlated band ratios, allowing specific constituents to be enhanced. As a way of illustration, we analyse PC14. This PC has the highest weights for the chlorophyll-a and chlorophyll-b for ratios based on the red and NIR regions of the spectrum (table 3). The PC14 image highlights where these ratios have the greatest contribution compared to other

Table 3. PC eigenvector matrix based on covariance statistics.

	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7	PC 8	PC 9	PC 10	PC 11	PC 12	PC 13	PC 14	PC 15
NDVI	0.216	0.18	0.014	0.289	0.268	-0.287	0.317	0.25	-0.258	0.32	0.403	-0.427	0.025	0.072	-0.02
N	0.236	0.087	-0.264	-0.35	-0.043	-0.804	-0.163	-0.244	0.023	-0.055	-0.055	0.051	-0.003	-0.003	0.003
LWC	0.279	0.188	-0.211	0.084	0.001	0.056	-0.284	0.519	0.261	-0.16	0.093	0.174	0.589	0.03	0.036
Chlor a	0.265	-0.339	0.47	0.123	-0.658	-0.206	0.034	0.233	-0.147	-0.159	0.026	-0.028	-0.008	0.007	-0.001
Chlor a	0.282	0.304	0.121	0.096	0.012	0.056	-0.063	0.002	-0.092	0.13	-0.095	0.175	-0.161	-0.838	0.063
Chlor b	0.246	-0.441	-0.105	0.069	0.477	0.03	-0.132	0.1	-0.527	-0.363	-0.25	0.027	-0.011	-0.027	0.002
Chlor b	0.269	0.299	0.117	0.062	-0.039	0.121	-0.114	-0.143	-0.194	0.13	-0.148	0.137	-0.089	0.396	0.715
Caroten	0.267	0.008	-0.111	-0.057	-0.195	0.305	-0.134	-0.55	-0.122	-0.155	0.221	-0.482	0.358	-0.111	-0.035
Caroten	0.277	-0.177	-0.123	0.268	0.079	0.032	0.241	-0.274	0.225	-0.227	0.536	0.485	-0.195	0.046	0.02
α -carot	0.26	-0.489	0.192	-0.054	0.212	0.033	-0.363	-0.073	0.333	0.597	0.021	-0.038	0.017	0.007	0.006
Antho	0.264	-0.024	-0.066	0.348	0.044	-0.06	0.419	-0.122	0.443	-0.098	-0.59	-0.226	0.06	0.021	0.002
P730	0.218	0.16	0.555	-0.567	0.332	0.079	0.244	0.049	0.18	-0.27	0.078	-0.047	0.041	0.047	-0.034
P660	0.278	0.316	0.118	0.116	-0.04	0.104	-0.128	-0.136	-0.2	0.162	-0.176	0.249	-0.046	0.331	-0.691
Cellulose	0.234	-0.179	-0.384	-0.447	-0.218	0.226	0.497	0.141	-0.19	0.336	-0.082	0.183	0.103	-0.017	0.004
Lignin	0.268	0.073	-0.296	-0.14	-0.116	0.2	-0.222	0.293	0.195	-0.157	0.059	-0.341	-0.659	0.086	-0.059

(a) PC1 *(b) PC2* *(c) PC14* *(d) PC15*

Figure 5. PCs 1, 2, 14 and 15 derived from the 15 band ratios.

ratios, enhancing the appearance of the riparian forests (figure 5(c)). The last PC (PC15) is predictably the component least correlated with all others and contains little (if any) information on vegetation constituents. Therefore, it concentrates only the information related to exposed soils (dark tones in figure 5(d)), the road that cross-cuts the imagery being a good control of areas lacking completely in vegetation.

Having demonstrated the utility of individual PCs, results can be further improved by combining the PCs in some way. We experimented with several techniques, concluding that an interesting practice is to assign PC1 and PC2 (together containing most of the total data variance related to vegetation) for two of the available red, green, blue (RGB) channels and choosing one PC with loadings from a specific ratio aimed to enhance a particular vegetation constituent. Using this notion, we built a false colour composite (RGB) of PC1, PC2 and PC14

Figure 6. Colour composite of PC1, PC2 and PC14 in RGB.

(figure 6) that allowed the simultaneous assessment of information on a variety of vegetation types observed in the APG region. Thus, the main covering types in the area are represented in contrasting colours (figure 6): (i) riparian forests in vivid cyan; (ii) green savannahs influenced by drainages in light green; (iii) rupestrian savannahs in orange; (iv) variably dry savannahs in dark green and dark blue—greenish colours; (v) burned areas in violet and black; (vi) soil partially exposed in magenta; and (vii) completely exposed soil (e.g. bare roads) in black.

An alternative strategy to enhance specific vegetation constituents is to constrain the set of band ratios to be used. We can select, for example, seven ratios that express only compounds relevant to photosynthetic vegetation (NDVI, LWC, nitrogen, and chlorophyll-a and -b; table 1). Applying PCA to these ratios and choosing the first three PCs allows concentrating over 95% of the total variance related to the spectral response of green vegetation. Figure 7 displays PC1, PC2 and PC3 (RGB) yielded from these seven band ratios—note that this is an enlargement of the riparian forests located in the southern portion of the study area (figure 6). This image shows an impressive zoning within the riparian forest (magenta tones in the centre and green tones in the border) and also a larger concentration of some constituents in the southern part of it (thick and very bright green strip). These spectral differences are interpreted as related both to: (i) annual, different conditions of illumination affecting plant development—in the southern hemisphere, during the dry season, the solar illumination is greater from south to north; and (ii) a border effect—the outer parts interact more with local surrounding environmental conditions.

7. Conclusions

The method proposed in this work differs from NDVI and similar approaches by providing a more holistic and systematic approach to the spectral differences of vegetation. On the basis of the spectral signature of vegetation constituents, spectral feature-oriented band ratios were coupled with PCA in order to: (i) distinguish efficiently the spectral information related to vegetation from other cover types; (ii) discriminate between vegetation assemblages; and (iii) assess vegetation's phenological state. These seem difficult if not impossible to be achieved by 'conventional methods' such as the NDVI. The technique could also be applied to vegetation mapping for use in geobotanical, agricultural and ecological studies.

Figure 7. Colour composite of PC1, PC2 and PC3 (RGB) of seven band ratios related to green vegetation.

This work also suggests that the claim of some authors that the numbers of channels provided by current imaging spectrometers are redundant to study vegetation (Huguenin *et al.* 2000) and that hyperspectral data are superfluous in agricultural applications (as over 96% of the 224 AVIRIS bands are concentrated in the first three PCs; Clever 1999), seems difficult to support.

The continuous improvement of ratios aimed at targeting vegetation constituents and using the simple logic developed here will potentially allow the unravelling of aspects of vegetation perhaps yet limitedly grasped in remote sensing.

Acknowledgments

T. I. R. Almeida acknowledges Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo (FAPESP) for research project No. 98/06913-6. C. R. de Souza Filho acknowledges the support from Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), through research grant 301.227/94. The authors thank Dr Frédéric Baret (INRA, France) for making available a superb database of vegetation spectral data, and are grateful to Dr Raymond Kokaly (USGS, USA) for providing a remarkably helpful review on the preliminary version of this paper and for his assistance with data and references.

References

- ASNER, G. P., and LOBEL, D. B., 2000, A biogeophysical approach for automated SWIR unmixing of soils and vegetation. *Remote Sensing of Environment*, **74**, 99–112.
- BARET, F., and FOURTY, T., 1997, The limits of a robust estimation of canopy biochemistry. In *Proceedings of the 7th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, edited by G. Guyot and T. Phulpin (Courchevel, France; Balkema, Rotterdam), vol. 1, pp. 413–420.
- BLACKBURN, G. A., 1998, Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sensing of Environment*, **66**, 273–285.
- BOARDMAN, J. W., and GOETZ, A. F. H., 1991, Sedimentary facies analysis using AVIRIS data: a geophysical inverse problem. *Proceedings of the 3rd Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop*, edited by R. O. Green, JPL Publication 93-26 (Pasadena, CA, USA: JPL), pp. 11–14.
- BUSCHMANN, C., and NAGEL, E., 1993, In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as a basis for remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, **14**, 711–722.
- CARD, D. H., PETERSON, D. L., and MATSON, P. A., 1988, Prediction of leaf chemistry by the use of visible and near infrared reflectance spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, **26**, 123–147.
- CHAVEZ, P. S., and KWARTENG, A. Y., 1989, Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **55**, 339–348.
- CLARK, R. N., GALLAGHER, A. J., and SWAYZE, G. A., 1990, Material absorption band depth mapping of imaging spectrometer data using a complete band shape least-squares fit with library reference spectra. *Proceedings of the 2nd Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop*, edited by R. O. Green, JPL Publication 90-54 (Pasadena, CA, USA: JPL), pp. 176–186.
- CLARK, R. N., KING, T. V. V., AGER, C., and SWAYZE, G. A., 1995, Initial vegetation species and senescence/stress mapping in the San Luis Valley, Colorado using imaging spectrometer data. *Proceedings of Summitville Forum '95*, edited by H. H. Posey, J. A. Pendleton and D. Van Zyl, Colorado Geological Survey Special Publication 38, pp. 64–69.
- CLARK, R. N., SWAYZE, G. A., LIVO, K. E., KOKALY, R. F., SUTLEY, S. J., DALTON, J. B., McDOUGAL, R. R., and GENT, C. A., 2003, Imaging spectroscopy: a tool for Earth

- and planetary system science remote sensing with the USGS Tetracorder algorithm. *Journal of Geophysical Research*, **108**, Art. No. 5131.
- CLEVER, J. G. P. W., 1999, The use of imaging spectrometry for agricultural applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **54**, 299–304.
- COUTINHO, L. M., 1970, *Botânica* (São Paulo, Brazil: Ed. Cultrix).
- CURRAN, P. J., 1989, Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sensing of Environment*, **30**, 271–278.
- DATT, B., 1998, Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a + b and total carotenoid content in Eucalyptus leaves. *Remote Sensing of Environment*, **66**, 111–121.
- DATT, B., 2000, Identification of green and dry vegetation components with a cross-correlogram spectral matching technique. *International Journal of Remote Sensing*, **21**, 2133–2139.
- DNPM (DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL), 1976, Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo. Folha Brasília SD. 23.
- ELVIDGE, C., 1990, Visible and infrared reflectance characteristics of dry plant materials. *International Journal of Remote Sensing*, **11**, 1775–1795.
- FOLLY, P., and ENGEL, N., 1999, Chlorophyll b to chlorophyll a conversion precedes chlorophyll degradation in *Hordeum vulgare* L. *Journal of Biological Chemistry*, **274**, 21811–21816.
- FOURTY, T., and BARET, F., 1998, On spectral estimates of fresh leaf biochemistry. *International Journal of Remote Sensing*, **19**, 1283–1297.
- FRASER, S. J., and GREEN, A. A., 1987, A software defoliant for geological analysis of band ratios. *International Journal of Remote Sensing*, **8**, 525–532.
- GALVÃO, L. S., VIFORIELLO, I., and ALMEIDA FILHO, R., 1999, Effects of band positioning and bandwidth on NDVI measurements of tropical savannahs. *Remote Sensing of Environment*, **67**, 181–193.
- GAMON, J. A., FIELD, C. B., ROBERTS, D. A., USTIN, S. L., and VALENTINI, R., 1993, Functional patterns in annual grassland during an AVIRIS overflight. *Remote Sensing of Environment*, **44**, 239–253.
- GAO, B., and GOITZ, A. F. H., 1994, Extraction of dry leaf spectral features from reflectance spectra of green vegetation. *Remote Sensing of Environment*, **47**, 369–374.
- GITELSON, A. A., and MERZLAK, M. N., 1998, Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Advances in Space Research*, **22**, 689–692.
- GREEN, R. O., CONEL, J. D., and ROBERTS, D. A., 1993, Estimation of aerosol optical depth, pressure elevation, water vapor, and calculation of apparent surface reflectance from radiance measured by the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) using a radiative transfer code. *Proceedings of the International Society for Optical Engineering*, SPIE 1937, (Orlando, FL, USA: SPIE), pp. 2–11.
- GREEN, R. O., CONEL, J. E., MARGOLIS, J., CHOVIT, C., and FAUST, J., 1996, In-flight calibration and validation of the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). *Proceedings of the Sixth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*, JPL Publication 96-4, vol. 1 (Pasadena, CA, USA: JPL), pp. 115–126.
- GUENEGOU, M. C., LEVASSEUR, J. E., ANSEAU, C., PALMIER, C., LOISEL, C., and COUREL, M. F., 1994, Limites de l'utilisation de la haute resolution spectrale et des paramètres spectraux dans le visible et proche infrarouge pour l'étude de la végétation. *6ème Symposium International Mesures Physiques et Signatures en Télédétection* (Val d'Isère, France: Balkema, Rotterdam), pp. 285–290.
- HONG, J. H., IKEDA, K., and YASUMOTO, K., 1996, Near infrared diffuse reflectance spectroscopic analysis of the amounts of moisture, protein, starch, amylose and tannin in Buckwheat flours. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, **42** (4), 356–366.
- HUGENIN, R. L., ERDMAN, C. D., and KARASKA, M. A., 2000, Distilling hyperspectral imagery for forest and agricultural species discrimination. *Proceedings of the Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry* (Lake Buena Vista, FL, USA: ERIM Ann Arbor, MI, USA), vol. 1, p. 1–356.
- HUNT, E. R., 2000, Analysis of hyperspectral imagery for assessment of Wyoming rangelands. *Proceedings of the Second International Conference Geospatial Information in Agriculture and Forestry* (Lake Buena Vista, FL, USA: ERIM Ann Arbor, MI, USA), vol. 1, pp. 579–583.
- KENDRICK, R. E., and FRANKLAND, B., 1976, Phytochrome and plant growth. In

- Physicochemical and Environmental Plant Physiology*, edited by P. S. Nobel (San Diego, USA: Academic Press).
- KOKALY, R. F., 2001, Investigating a physical basis for spectroscopic estimates of leaf nitrogen concentration. *Remote Sensing of Environment*, **75**, 153–161.
- KOKALY, R. F., and CLARK, R. N., 1999, Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. *Remote Sensing of Environment*, **67**, 267–287.
- KOKALY, R. F., DESPAIN, D. G., CLARK, R. N., and LIVO, K. E., 2001, Mapping vegetation in Yellowstone National Park using spectral feature analysis of AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, **84**, 437–456.
- KUPON, J. A., and CURRAN, P. J., 1995, Decoupling effects of the canopy and foliar biochemicals in AVIRIS spectra. *International Journal of Remote Sensing*, **16**, 1731–1739.
- LAWTOR, D. W., 1993, *Photosynthesis: Molecular, Cellular and Environmental Processes*. Longman Scientific and Technical (Essex, U.K.), 318 pp.
- LOUGHELIN, W. P., 1991, Principal component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **57**, 1163–1169.
- MARTIN, M. E., NEWMAN, S. D., ABER, J. D., and CONGALTON, R. G., 1998, Determining forest species composition using high spectral resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, **65**, 249–254.
- ROBERTS, D. A., GARDNER, M., CHURCH, R., USTIN, S., SCHEER, G., and GREEN, R. O., 1998, Mapping chaparral in the Santa Monica mountains using multiple endmember spectral mixture models. *Remote Sensing of Environment*, **65**, 267–279.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A., and DIERING, 1973, Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Goddard Space Flight Center, Washington D.C., NASA SP-351, vol. 1, pp. 309–317.
- SCHWALLER, M. R., 1984, Remote sensing for geobotanical prospecting. PhD thesis, University of Michigan, USA.
- SELLERS, P. J., 1985, Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, **6**, 1335–1372.
- SOUZA FILHO, C. R., and DRURY, S. A., 1998, Evaluation of JERS-1 (FUYO-1) OPS and Landsat TM images for mapping of gneissic rocks in arid areas. *International Journal of Remote Sensing*, **19**, 3569–3594.
- THENKABAIL, P. S., SMITH, R. B., and DE PAUW, E., 2000, Hyperspectral vegetation indices and their relationship with agricultural characteristics. *Remote Sensing of Environment*, **71**, 158–182.
- WESSMAN, C. A., ABER, J. D., and PETERSON, D. L., 1989, An evaluation of imaging spectrometry for estimating forest canopy chemistry. *International Journal of Remote Sensing*, **10**, 1293–1316.
- ZAGORSKI, E., PINEL, V., ROMIER, J., ALCAYDE, D., FONTANARU, J., GASTELLU-ETCHEGORRY, J. P., GIORDANO, G., MARTY, G., MOUGIN, E., and JOFFRE, R., 1996, Forest canopy chemistry with high spectral resolution remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, **17**, 1107–1128.
- ZUR, Y., GITELSON, A. A., CHIVKUNOVA, O. B., and MERZLYAK, M. N., 2000, The spectral contribution of carotenoids to light absorption and reflectance in green leaves. *Proceedings of the Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry* (Lake Buena Vista, FL, USA: ERIM Ann Arbor, MI, USA), pp. 11–17–23.

Anexo 2

ASTER and Landsat ETM+ Images Applied to Sugarcane Yield Forecast

Trabalho desenvolvido em conjunto com Raffaella Rossetto e Carlos Roberto de Souza Filho. Submetido em agosto de 2005 à Revista Brasileira de Ciência do Solo

ASTER and Landsat ETM+ Images Applied to Sugarcane Yield Forecast¹

T. I. R. ALMEIDA²

C. R. SOUZA FILHO³

R. ROSSETTO⁴

Resumo. Este trabalho propõe um método para previsão de safra de cana de açúcar usando índices espectrais, análise por principais componentes e dados históricos de safra. O método mostrou eficiência na previsão de produtividade e foi mais preciso que os métodos tradicionais utilizados pela usina.

Termos de indexação: previsão de safra, cana de açúcar, sensoriamento remoto, índices espectrais, análise por principais componentes

Summary. This paper proposes a method to support sugarcane yield forecast using vegetation spectral indices, principal component analysis and historic yield data. The method proved efficient in yield prediction and was more accurate than traditional methods used by the sugarcane agro-industry.

Indexation Terms: sugarcane, yield forecast, remote sensing, vegetation spectral indices, principal component analysis

1. INTRODUCTION

Optical remote sensing is an important tool in extensive and technologically competitive agriculture, due to its generation of summarized information of various planting properties, essential in agricultural and agro-industrial planning. Remote

¹ Pesquisa coordenada pelo primeiro autor, financiada pela Usina da Barra S.A.

² Professor Doutor- Instituto de Geociências USP - Rua do Lago, 562 - Butantã – 05508-080 – São Paulo (SP) e-mail: talmeida@usp.br

³ Professor Associado- Instituto de Geociências USP Rua do Lago, 562 e-mail: ejuliani @usp.br

⁴ Pesquisadora- Diretora do Pólo Regional Centro-sul, Apta/DDD/Instituto Agrônômico de Campinas, Cx. Postal 28 CEP 13400-970 Piracicaba, SP e-mail: rrossetto@uol.com.br

sensing data and techniques have a large potential for use in the prediction of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) yields (t / ha) and in regional evaluation of the status of plantations. This theme, however, is little discussed in the specialized literature (Rudorff and Batista, 1990; Yang et al., 1997; Chen et al. 2000; Daamen et al., 2003), due to the proprietary nature of past work.

The image processing for yield estimations includes an enhancement of the vegetation spectral responses. The spectral indices based on band ratios are a simple and practical method to enhance spectral behaviours and have been used as vegetation indices in agriculture not only with the orbital broad band images since the 70's but also with the experimental hyperspectral images from Hyperion EOS1 (Apan et al., 2004). These indices constitute a notable method for many applications, including the evaluation of vegetation cover density and crop prevision (Bannari et al., 1995). Recent papers such as Thenkabail et al. (2000, 2002), Haboudane et al. (2002), Datt et al. (1998) and Apan et al. (2004) have determined crop biophysical properties using spectral indices built with narrow bands.

Independently of the approach, hyperspectral sensors are clearly superior to detect and quantify vegetation biophysical properties. However, the most of the agro-industry is yet unable to acquire and process hyperspectral images and has not fully benefited from the possibilities of broad bands images, largely available. Most practical applications adopt vegetation indices based on the *red edge spectral feature*, as originally proposed by Pearson and Miller (1972), relating yield, health, foliar area and biomass to the red edge intensity. Although the red edge is the clearest vegetation spectral feature and may contain more than 90% of the information related to vegetation (Bannari et al., 1995), it is also the most common and cannot be sufficient to diagnose

modifications due to environmental conditions or vegetation health (Guenegou et al., 1994). Numerous papers show that the shortwave infrared (SWIR) spectrum complements the visible and near infrared (NIR) reflectance in crop studies (e.g. Geberman et al., 1984; Baret et al., 1988; Malthus et al., 1993; Clever, 1999, Apan et al., 2004) and also the thermal infrared (Ceccato et al., 2001).

Sources of foliar information detectable by low-spectral resolution, multispectral sensors may be categorized into four main groups: canopy temperature (related to evapotranspiration), chlorophyll content, leaf water content and traces of information regarding biochemical compound proportion. Of these groups, the first three are convincingly present in the literature. However, the detection of biochemical compounds by multispectral remote sensing is still controversial, because their key absorption features are masked by water (Curran, 1989; Fourty and Baret, 1998; Kokaly and Clark 1999). Information regarding the proportions of foliar biochemical compounds may vary according to the plant condition or, in sugarcane plants, also to the growing phase.

Ceccato et al. (2001) pointed out the importance of evapotranspiration in the analysis of the plantation condition, presenting the case of maize leaves (*Zea mays*) with serious hydric stress. They observed that photosynthetic activity decayed under stress, although the concentration of chlorophyll remained stable - the plant stomata closed preventively in order to guarantee enough water for the functioning of the plant. In this case, the only evidence of hydric stress was shown by a fall in evapotranspiration (ET). The sugarcane is a plant that requires large amounts of water and studies about the water stress effects on sugarcane yield are not scarce (Robertson et al., 1999, Wiedenfeld, 2000, Hsiao and Xu, 2000 and Wiedenfeld, 2004). Water transport is an

integral part of cell expansion and accounts for most of the increase in cell volume, which characterizes growth. Water deficiency inhibits the growth of stalks and leaves, and favors, at same time, growth of roots (Hsiao and Xu, 2000).

The growth of sugarcane is characterized by three development phases, which are: germination and tillering; stalk growth; and maturation. The importance of water availability to sugarcane crops is the greatest when ET demand and growth rates are the largest (Wiedendenfeld, 2000) and when the canopy has been well established (Robertson et al., 1999). The same occurs with chlorophyll, essential in all sugarcane phases but with lower importance at the maturation stage.

In this study, we present a simple sugarcane yield prediction method based on the enhancement of vegetation spectral responses and the establishment of a relationship between processed remote sensing multispectral data and yield. The approach used herein uses a set of physical and biochemical plant parameters with distinct absorption/reflectance controls. The work employed images acquired by the satellites/sensors Terra/ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) and Landsat 7/ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) and harvest data from years 2000 and 2001 on areas of sugarcane cultivation in the State of São Paulo, Brazil. The method uses the correlation of spectral behaviour of leaves and their physical and physiological properties to estimated part of these properties. The approach involves a twofold algorithm. Initially, we make several spectral indices from the multispectral dataset. Principal Component Analysis (PCA) is subsequently applied to such indices. The notion is to concentrate plant information in the higher order PCs separately from other information, including minor plant information. A normalization

based in historical yield data, in tons of stalks per hectare, is used to transform DNs to yield (t/ha).

The paper objective is to demonstrate that working in homogenous conditions, considering variety, age of plants, soil and even lighting (due to very gentle topography), it is possible to identify reasonably subtle responses from the canopy of the sugarcane, even when using sensors with broad bands, and correlate this information with the sugar cane yield.

2. METHODS

The specific area belongs to a sugar factory (Usina da Barra S.A.) located in the neighborhood of the Mineiros do Tietê city, State of São Paulo, Brazil. The area (**Figure 1**) covers 108.75ha and is divided into 11 production plots, where sugarcane of the RB85 5536 variety is cultivated on red latossol (Oxisol-type) soil and flat topography. For the crops analysed the planting took place in September 1999, at 1m intervals between rows. The mean yield of these production plots in the 2000 harvest was of 131.80t/ha (ton of stalk/hectare), and in the 2001 harvest (the harvest referring to the images used here) of 120.96t/ha. The evaluation of this study reports to the second, 2001 sugarcane harvest.

The Landsat 7 ETM+ (acquired on 11 June 2001) and ASTER (acquired on 08 April 2001) images, were processed through different steps, comprising: (1) pre-processing; (2) enhancement of specific spectral responses; (3) reduction of spectral dimensions with prioritization of information and weighing of parameters related to foliar area; the data processed through these steps were then reduced to a single image, from which the mean DN (digital number) per cultivated area was calculated; (4) the

image DNs were subsequently transformed into t/ha through normalization, which requires knowledge of the previous year's yield for the cultivated production plots under analysis.

Figure 1 – Localization of the study area.

a. Pre-processing

Pre-processing procedures were focused on the geometric correction of radiometrically-calibrated ETM and ASTER images to plot data. These images were geocorrected using a 1:2.500 scale topographic map of the plots; positional errors were below one pixel for both imagery datasets.

b. Enhancement of Spectral Responses with Spectral Indices

The enhancement of spectral responses of vegetation can be accomplished through spectral indices oriented to highlight specific vegetation constituents. Spectral indices designed in the past (Bannari et al.; 1995; Sims and Gamon, 2002; Apan et al. 2004) and new or adapted versions of such indices were used in this work. **Table 1**

provides a summary of (i) the main chemical/structural controls on absorption and reflectance features associated to vegetation (chlorophyll, carotenoid, leaf water, biochemical compounds (starch, lignin)), (ii) selected ETM and ASTER bands where these features can be sensed, and (iii) ETM and ASTER spectral indices needed to their detection.

Table 1 – Spectral indices used in this paper.

Leaf compound/property	ETM	ASTER	reference
chlorophyll	ETM2/ETM3	Ast1/Ast2	Gamon & Surfus. (1999)
chlorophyll and carotenoid	ETM4/ETM2	Ast3/Ast1	This paper
Leaf water content (LWC)	ETM4/ETM5	Ast3/Ast4	Thomas <i>et al.</i> (1971)
biochemical compounds (BC)	ETM4/ETM7	$\frac{\text{Ast3}}{\text{Ast5} * \text{Ast6} * \text{Ast7} * \text{Ast8}}$	This paper
BC 1	ETM4/ETM5*TM7		This paper
BC emphasis starch	-	Ast3/Ast5	This paper
BC emphasis lignin	-	Ast3/Ast8	This paper
NDVI (red edge intensity)	$(\text{ETM4-TM3})/(\text{TM4} + \text{TM3})$	$(\text{Ast3-Ast2})/(\text{Ast3} + \text{Ast2})$	Rouse <i>et al.</i> , 1973

The ETM+ images in the TIR, with spatial resolution of 60m, were also used in this investigation because they bring information regarding evapotranspiration (ET), which in turn indirectly indicates moisture availability, an essential aspect in sugarcane studies. Yang *et al.* (1997), using Landsat-5 TM thermal data and surface temperature data acquired over sugarcane fields, showed that there is a consistent negative correlation between radiometric surface temperature and remotely-sensed measurements of actively transpiring vegetation, such as the Normalization Difference Vegetation Index (NDVI; Rouse *et al.*, 1973). Their results demonstrated that the combined use of Landsat TM thermal data and the NDVI can provide a practical means for studying the

spatial variation in ET and making useful estimates of ET and water status of the sugarcane field. Depending on the size of fields under investigation, coarse spatial resolution may pose a hindrance on ET estimates and, in this case, the 90m spatial resolution of ASTER TIR data makes its use difficult on the scale demanded in this study.

c. Reduction of Spectral Dimensions, Weighing of Parameters Related to Foliar Area and Data Reduction to a Single Image.

The procedures to achieve data reduction to a single image will be firstly explained considering ETM+ data; the same processing steps were then applied to ASTER data.

The six spectral indices images and the ETM+ thermal image were submitted to Principal Components Analysis (PCA). PCA is a multivariate statistical technique that selects non-correlated linear combinations of variables in an n-dimensional space . These combinations (or principal components – PCs) have successively lower correlation, and the greatest variance is concentrated in the first component, which contains highly correlated information (Davis, 1970; Souza Filho and Drury, 1998 and references therein).

The spectral indices, based on known spectral features, gather the vegetation information. However, as they are designed using broad bands, these indices will also enhance unwanted and/or spurious information that bear no relation to vegetation. PCA allows concentrating most of the spectral indices variance in the first principal component and to isolate relevant vegetation information (co-variant and thus concentrated in the first PC) from soils, noise and other uncorrelated data (not co-

variant and thus placed in the last PCs). The same reasoning applies to the thermal image – the fraction of information related to vegetation parameters is placed in the first components. Using this notion, the method permits not only a reduction of dimension (six spectral indices and the ETM+6 thermal band are concentrated in only one image), but also the concentration of information regarding the vegetation parameters (Almeida and Souza Filho 2004). Thus, PCA was used here to concentrate and scale the pertinent vegetation information.

A healthy sugarcane crop, before the maturation stage, has high content of chlorophyll, leaf water (LWC) and biochemical compounds and it also performs ET efficiently. Since the indices employed here was built using the absorption features in the denominator, crops with healthier conditions will be displayed as areas with higher index values. In contrast, the same healthier plantations will be associated to lower DN values in thermal images, as efficient ET is akin to lower canopy temperatures and water availability (Yang et al., 1997 and references therein). In the eigenvector matrix, the importance of the indices and the ETM thermal band in PC1 will be a function of their correlation with the health state of the plantation – therefore, using this notion, theoretically, the eigenvectors should appear with the same sign for each index and with an opposite sign for the thermal band.

The DN value of a pixel can be the result of a mix of different soils and/or a mix of soil and vegetation. This frequently poses a problem to yield estimates using remote sensing data but the sugarcane has some characteristics that reduces or eliminates this problem. Healthy sugarcane constantly gives raise to leaves and normally shows seven leaves still rolled and near ten opened green leaves. These attributes, together with the stalk growth, results in a migration of green leaves to the top (Alexander, 1972). So, the

canopy is formed uniquely by youth or mature green, photosynthetically active, leaves. This situation remains still up to the harvest period, before which it is unlikely that a sensor will detect any bulk presence of dry leaves or soil. Dry or senescent leaves appear only after the growing season and are absent of the canopy before it – so, the detection of dry leaves and/or exposed soils in images acquired at the end of the main growing season is most indicative of crop damage. In order to enhance signs of crop damage in an image, a simple approach is to multiply the PC1 by the NDVI, which works as a ‘proportional’ mask - where the LAI is zero, the pixel is assigned to zero; where the LAI is 100%, the pixel is assigned the DN value of the PC1. This notion is supported by Hall *et al.* (1992), who noted an improvement in the relationship between the NDVI and the LAI when the green LAI was used instead of the total LAI. The image that results from the proportional mask procedure give in information essentially regarding the plantation as a system in a single image, here named the **yield index**.

The main reasoning and processing steps necessary to achieve data reduction to a single image is presented in **Figure 2**.

d. Transformation of Image DNs into Yield (t/ha)

The transformation of image DNs into yield information is achieved through normalization. One production plot per farm (or group of homogeneous farms) is used as a reference, and is chosen in the synthesis image as the one with the best status (having the largest mean DN or DN_{max}). The DN_{max} is associated with the historical

farm mean yield plus the standard deviation (H). The remaining production plots are normalized through the following relation:

$$\text{Yield}_{\text{production plot}} = (\text{DN}_{\text{production plot}} / \text{DN}_{\text{max}}) * (\text{mean yield} + \text{standard deviation})$$

The sugar factory supplied yield data per production plot for 2000 and 2001 harvests, as well as yield estimates made through the sugar company's traditional method. The estimates made by the factory take into account the history of the cultivated area, the variety, climate aspects and visual observation in the field, particularly at the outskirts of the production plots. Yield data (t/ha), are obtained at harvest time by weighing all trucks carrying sugarcane that leave the production plot. Although data per cultivated production plot may present a large deviation (there can be a mix of sugarcane from different production plots, especially when using nocturnal mechanical harvesters), the yield per farm or block of farms is very accurate.

Figure 3 shows a flowchart that synthesizes the procedures to convert image DNs to t/ha.

4. RESULTS

The eigenvector matrix based on ETM+ data (**Table 2**) shows that PC1 hosts high and consistent loadings, with positive signs, from each vegetation index. Therefore, the information related to vegetation, that was pre-concentrated in the indexes, is now abundantly grouped into one single image after the APC was applied to the dataset (> 90% of the data variance is concentrated in PC1). In contrast, the image here related to ET shows a negative sign and a lower eigenvector loading. This is expected as the ET image is a variable highly independent from the indices as it is based only in the thermal band (i.e., image shows completely different characteristics; it is a record of emitted instead of reflected radiance). Nonetheless, the ET dominates PC2, meaning that it is covariant with all dataset in a high order PC, which also indicates its importance as a vegetation parameter.

Table 2 – Eigenvectors matrix based on the ETM spectral index

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Chlorophyll	-0.356	0.004	0.913	0.07	-0.072	-0.171	0.026
Pigments	-0.405	-0.269	-0.252	0.369	0.499	-0.552	0.105
Red edge	-0.431	-0.209	-0.017	0.264	0.236	0.793	-0.125
LWC + N	-0.418	-0.013	-0.248	0.182	-0.689	-0.166	-0.478
LWC + BC	-0.444	-0.005	-0.18	-0.329	-0.293	0.069	0.756
BC	-0.359	0.183	-0.058	-0.741	0.339	-0.067	-0.408
Evapotranspiration	0.151	-0.922	0.074	-0.316	-0.121	-0.031	-0.081

The eigenvector matrix based on ASTER data (**Table 3**) shows similar loadings from the vegetation indices in PC1 and also with positive signs, which signifies that these indices are all extremely covariant.

In order to test the method, 2001 harvest data were used to normalize the synthesis images derived from satellite image data acquired before the actual sugarcane harvest took place. Using this ideal scenario, results show that the mean yield estimated from ASTER images of April/2001 and ETM+ images of June/2001 for the entire block

of 11 production plots are close to the true mean yield and yield errors estimates are below 1% using both image datasets (**Table 4**). These results suggest the importance of the harvest data in normalizing the synthesis image derived from remote sensing data and also they demonstrate the overall consistent performance of the method.

Table 3 – Eigenvectors matrix based on the Aster spectral index

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Chlorophyll	0.371	0.128	0.608	0.336	0.075	0.464	0.108
Pigments	0.360	0.308	0.023	0.062	-0.021	-0.771	-0.029
Red edge	0.367	0.299	0.179	0.209	-0.111	-0.114	-0.174
LWC+N	0.372	0.165	0.066	0.648	0.548	0.119	0.299
Biochemical Compounds (BC)	0.354	-0.469	-0.059	-0.221	0.057	0.041	0.767
BC (emphasis on Starch)	0.304	0.471	0.282	0.547	0.473	0.072	0.271
BC (emphasis on Lignin)	0.333	-0.450	0.003	-0.265	-0.637	0.089	0.443

Table 4 – Results of the normalization with the historical data.

	Productivity (t/ha)	productivity error estimate (%)
Real productivity	120.96	-
Usina da Barra S.A. estimate	110	9.06
ASTER estimate (based on 2000 data)	124.07	2.57
ETM estimate (based on 2000 data)	127.8	5.65
ASTER estimate (based on 2001 data)	119.89	0.88
ETM estimate (based on 2001 data)	119.87	0.90

The results derived by normalizing the synthesis images with 2000 yield data also showed low yield estimate errors in relation to the 2001 true yield. Errors were between 2.57% (Aster) and 5.65% (ETM+), which are inferior to the sugarcane factory error estimate of 9.06%. The reasons for the lower error estimates accomplished with ASTER data are probably related to the higher spectral and spatial resolution of the sensor in relation to the ETM+.

DISCUSSION

The results achieved here confirm an apparent efficiency of the proposed method and also suggest a great dependence on the production plot yield data used in

the normalization process. If the farm's accountability for each production plot data is accurate, deviations in production estimates from satellite imagery will be much lower than those obtained through traditional estimates: bulk estimates errors used by the sugar factory for this block of production plots was 14% in the 2000 harvest and 9% in the 2001 harvest.

The minimum spectral resolution required for the approach proposed here must include visible, NIR and SWIR bands, at least to the degree covered by the ETM+ sensor. The ratios using SWIR bands are themselves as essential for the formation of PC1 as those stemming from the visible and NIR bands. The use of thermal bands may be also important, but it is more advantageous in cases where the spatial resolution of the TIR images is sufficient in determining internal variations of the production plots – this may be a problem using the 90m of the ASTER TIR data. The ASTER sensor although does not cover the blue region of the spectrum, has 5 bands in the SWIR region between 2100 and 2400nm, against only one in the ETM+ sensor. Whereas these bands have been little exploited in this study, their potential in detecting biochemical compounds in plants is very large.

The spatial resolution provided by either the ETM+ or ASTER sensors is certainly not ideal, although the estimates checked in this study are very close to those seen in production after harvest. ASTER data have a clear spatial resolution advantage over ETM+, with three bands with 15m resolution, against 30m in ETM+ in all reflected wavelengths, but the panchromatic band. ASTER TIR data have an excellent spectral resolution, with five bands between 9,000 and 12,000nm, but at low spatial resolution (90m), making it difficult to use in studies of production plots in the 10ha range. In comparison, the ETM+ sensor provides thermal data at 60m resolution in a

single band covering the 10,400 - 12,500nm interval. This spatial resolution is near compatible with this kind of study, as shown here by the negative correlation of ET (ETM6) for all ratios, although the weight of its participation in PCI is much below that of the ratios.

Temporal resolution, or revisiting frequency, is much below the ideal. In the region being studied, there were few passes in a year without clouds. In the 2000/2001 agricultural year, 12 successive passes by the Landsat 7 satellite acquired images that could not be used in the study due to considerable cloud cover. This introduces an essential question: what is the interval in which images may be used for harvest estimates?

In this analysis, at least two aspects must be considered. There is a limitation, related to aspects of plant evolution, when the plantation has not yet reached development that will provide minimum assurance of its physiological condition in the pre-harvest period. On another extreme, the estimate may not be made based on images too close to harvest period, due to the fact that the plantation may be excessively mature, thus modifying spectral behaviours related to yield. In addition, close to the harvest, the canopy architecture can be modified by the wind: between 10 to 12 months after harvest or planting, it is common for plants to fall, mainly when considering sugarcane that is being cut for the first or second time.

The best results were obtained with the ASTER image of April 2001 – i.e., six months prior to the harvest. These results were also close to those obtained with the ETM+ image of June 2001 – i.e., four months before the harvest. The ETM+ image of August 2001, acquired closer to harvest, showed that the sugarcane was largely tilted and inadequate for yield estimates, considering the large percentage of dry leaf that

interferes with the spectral composition of the pixels. As the previous harvest took place in August 2000, and the current harvest was due between September and October, images collected in the period between eight to 10 months after the previous harvest or three to six months prior to harvest may be considered adequate for production estimates.

It is important to observe that the method relies on and produces the best results on images acquired between the final growing phase of sugarcane plantations and the initial phase of plant maturation. The method will not perform accurately if images acquired during the growing phase or in later plant maturation stages (last month before harvest) are employed.

The accuracy of the sugarcane yield estimates using remote sensing is also dependent on the season's harvest. The plantations with harvest in the dry season can be imaged after the stalk growth, coincidentally with the rainy season, when the plantation has its yield tendencies defined and the maturation phase initiated. The maturation process is stimulated by the drought and is characterized by the end of stalk growth and numerous modifications in the stalks and leaves, including sucrose accumulation and a decline in chlorophyll, leaf water content and turgor (Hsiao, 1973). Alexander (1972) demonstrated that sugarcane submitted to gradual hydric stress shows a continuous increase in sugar content at leaf, with a simultaneous reduction in sugar content at stalks. The author also verified the presence of polysaccharide in substitution to starch in immature leaves, sheaths and stalks. It is thus evident that the sugarcane leaves, with the advance of the maturation process, will present different reflectance signatures during the growth phase, when photosynthesis is most intense. Therefore, the use of optic remote sensing in yield estimates of sugarcane must consider these

questions, essentials for the definition of the best period for image acquisition and the application of the method.

CONCLUSIONS

1- The method developed in this study proved efficient in yield prediction and was more accurate than traditional methods used in the Brazilian sugarcane agro-industry for the limited selection of study sites analysed. This is a matter of relevance as Brazil is the world's largest sugarcane producer.

2- Using an ideal harvest data (ie. harvest data that were quantified after image acquisitions) to normalize the spectral information enhanced in the synthesis image, yield estimates showed an error of ~1% to the actual harvest. Therefore, using PCA derived from spectral indices and an algorithm to normalize image DN_s into t/ha, sugarcane crop spectral responses were used to estimate yield. Using more realistic historic harvest data (ie., harvest data that were quantified before image acquisitions), the yield estimate with ASTER data showed an error of 2.57%, lower than the estimate made by the sugarcane factory (error of 9.06%).

3- The method does show some drawbacks. It proved successful considering yet only a single study site, with flat topography and comprising the same soil type. The experiment was also restricted to one sugarcane variety and to a harvest period within the dry season. Another problem is related to the frequency of image acquisition, which is below that necessary to guarantee the use of cloud-free imagery. The spatial resolution, principally of the TIR bands of the sensors tested here, is not ideal either. This can be quite sensitive in the case of the ASTER bands, which cannot be applied at

the scale of production plots, although their application in extensive, regional agriculture analysis is very promising.

4- The best spectral resolution in the SWIR bands and the 15m spatial resolution in the VNIR bands are probably key factors accountable for the better yield estimates achieved with ASTER data in relation to ETM+ data. With the imminent commercial availability of orbital acquisitions of hyperspectral data, a new research field will be opened for precision agriculture, where discrete spectral features may be analyzed and resolved, such as those related to specific compounds, as previously shown in studies with airborne hyperspectral sensors. Preliminary results using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery in detecting diseases in sugarcane (Apan et al., 2004) also show the potential in using similar orbital data in yield estimation of sugarcane and different agricultural crops. Conceivably, in the near future, information derived from orbital remote sensors will no longer be limited to precise mass yield estimates, but will include estimates of sugar contained in the plant, perhaps with the possibility even to point out the best date for harvest.

REFERENCES

- ALEXANDER, A.G. Sugarcane Physiology. Amsterdam, Netherland, Elsevier, 1972. 752p.
- ALMEIDA, T.I.R., & C.R. SOUZA FILHO, Principal component analysis applied to feature-oriented band ratios of hyperspectral data: a tool for vegetation studies. *Int. J. Remote Sensing*, **25**: 5005-5023, 2004.

- APAN, A., A. HELD, S. PHINN, AND J. MARKLEY, Detecting sugarcane 'orange rust' disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. *Int. J. Remote Sensing*, 25:489-498, 2004.
- BANNARI, A., D. MORIN & F. BON, A Review of Vegetation Indices. *Remote Sensing Reviews*, 13: 95-120, 1995.
- BARET, F, G. GUYOT, A BEGUÉ & P. MAUREL, Complementarity of Middle-Infrared with Visible and Near-Infrared for monitoring wheat canopies, *Rem. Sen. Environ.*, 26:213-225, 1988.
- CECCATO, P., S. FLASSE, S. TARANTOLA, S. JACQUEMOUD, & J.M GRÉGOIRE, Detecting vegetation leaf water using reflectance in the optical domain, *Rem. Sen. Environ.*, 77: 22-33, 2001.
- CHEN M, B. GLAZ, R.A. GILBERT, S.H. DAROUB, F.E. BARTON & Y. WAN, Near-infrared reflectance spectroscopy analysis of phosphorus in sugarcane leaves, *Agr. J.*, 94: 1324-1331, 2002.
- CLEVER, J.G.P.W., The use of imaging spectrometry for agricultural applications", I. *J. Photog. Rem. Sen.*, 54: 299-304, 1999.
- CURRAN, P. J.; DUNGAN, J. L. & PETERSON, D. L., Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry Testing the Kokaly and Clark methodologies. *Rem. Sen. Environ.*, 76: 349-359, 2001.
- DAAMEN, M.L.J., J.V ROCHA, R.A.C. LAMPARELLI, & J. ZULLO JR., Comparação entre estimativa de produção de cana-de-açúcar auxiliada por processamento digital de imagens de satélite e métodos tradicionais de observação de campo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., Foz do Iguaçu, 2003. p. 47-49

- DATT, B., Remote sensing of Chlorophyll a, Chlorophyll b, Chlorophyll a+b and total Carotenoid content in Eucalyptus leaves. *Rem. Sen. Env.*, 66: 111-121, 1998.
- DAVIS, J. C. *Statistics and Data Analysis in Geology*. New York. John Wiley & Sons, 1970. 646 p.
- FOURTY, TH., & F. BARET, On spectral estimates of fresh leaf biochemistry. *Int. J. Rem. Sen.*, 19: 1283-1297, 1998.
- GAMON, J.A. & J.S. SURFUS, Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytologist*, 143: 105-117, 1999.
- GEBERMAN, A.H., J.A. CUELLAR & GAUSMAN H.W. Relationship of Sorghum Canopy Variables to Reflected Infrared Radiation for two Wavelengths and two Wavebands. *Photogram. Eng. Rem. Sen.*, 50: 209-213, 1984.
- GUENEGOU, M.C., LEVASSEUR, J.E. ANSEAU, C. PALMIER, C. LOISEL, C. AND COUREL, M.F. Limites de l'utilisation de la haute resolution spectrale et des paramètres spectraux dans le visible et proche infrarouge pour l'étude de la végétation. In : *Symposium International Mesures Physiques et signatures en Télédétection*, 6., Val d'Isère, 1994, pp. 285-290.
- HABOUDANE, D.; J.R. MILLER, N. TREMBLAY, P.J. ZARCO-TEJEDA AND L. DEXTRAZE, Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Rem. Sen. Envir.*, 81: 416-426, 2002.
- HALL, F.G., K.F. HUENNRICH, S.J. GOETZ, P.J. SELLERS AND J.E. NICKELSON, Satellite remote sensing of surface energy balance: successes, failures and issues in FIFE. *J. Geoph. Res.*, 97: 19061-19089, 1992.
- HSIAO, T. C., 1973. Plant responses to water stress. *An. Rev. Plant Phys.*, 24:519-570.

- HSIAO, T.C. AND L.K. XU, Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport. *J. Exp. Botany*, 51:1595-1616, 2000.
- KOKALY, R. AND R. N., CLARK, Spectroscopic Determination of Leaf Biochemistry Using Band-Depth Analysis of Absorption Features and Stepwise Multiple Linear Regression. *Rem. Sen. Env.*, 67: 267-287, 1999.
- MALTHUS, T.J., B. ANDRIEU, F.M. DANSON, K.W. JAGGARD AND M.D. STEVEN, Candidate High Spectral Resolution Infrared Indices for Crop Cover. *Rem. Sen. Env.*, 46: 204-212, 1993.
- PEARSON R.L. AND MILLER L.D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation the productivity of the short-grass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. In: *International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 8., Ann Arbor , 1972. *Proceedings. Ann Arbor, 1972*, p.1357-1381.
- ROBERTSON, M.J., N.G INMAN-BAMBER, R.C. MUCHOW AND A.W. WOOD, Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. *Field Crops Research*, 64: 211-227, 1999.
- ROUSE, J.W., J.A HAAS, J.A. SCHELL AND D.W. DEERING, Monitoring vegetation systems in the Great Plans with ERTS. In *Earth Resources. Technology Satellite-1 Symposium*, 1973, Washington, 1973 p. 309-317.
- RUDORFF, B.F.T., AND G.T. BATISTA, Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. *Rem. Sen. Env.*, 33: 183-192, 1990.

- SIMS, D.A. AND GAMON, J.A., Relations ship between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Rem. Sen. Env.* 81: 337– 354, 2002.
- SOUZA FILHO, C.R. AND S.A. DRURY, Evaluation of JERS-1 (FUYO-1) OPS and Landsat TM Images for Mapping of Gneissic rocks in Arid Areas. *I. J. Re. Sen.*, 19: 3569-3594, 1998.
- THENKABAIL, P.S., R.B. SMITH AND E. DE PAUW, Evaluation of Narrowband and Broadband Vegetation Indices for determining Optimal Hyperspectral Wavebands for Agricultural Crop Characterization. *Photog. Eng. & Rem. Sen.*, 68:607-621, 2002.
- THENKABAIL, P.S., R.B. SMITH AND E. DE PAUW, Hyperespectral vegetation indices for determining agricultural crop characteristics, *Rem. Sen. Env.*, 71:158-182, 2000.
- THOMAS, J.R.; L.N. NANKEM, G.F. OERTHER, AND R.G. BROWN, Estimating leaf water content by reflectance measurements. *Agron. J.*, 63: 845-847, 1971.
- WIEDENFELD, B., Scheduling water application on drip irrigated sugarcane. *Agric. Water Man.*, 64: 169-181, 2004.
- WIEDENFELD, R., Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilization. *Agric. Water Man.*, 43: 173-182, 2000.
- YANG XH, Q.M. ZHOU AND M. MELVILLE, Estimating local sugarcane evapotranspiration using Landsat TM image and a VITT concept. *Int. J. Rem Sen*, 18: 453-459, 1997.