

UTILIZAÇÃO DE IMAGENS AVHRR/NOAA PARA CLASSIFICAÇÃO DA VEGETAÇÃO DO CERRADO QUANTO À SUSCEPTIBILIDADE AO FOGO

ALFREDO PEREIRA ¹, HELENA FRANÇA ², ALBERTO SETZER ³,
JOSÉ EDUARDO DOS SANTOS ⁴

^{1,2} Divisão de Sensoriamento Remoto / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 - São José dos Campos, SP, Brasil - 12201-970

¹ alfredo@ltd.inpe.br, ² helena@ltd.inpe.br

³ Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 - São José dos Campos, SP, Brasil - 12201-970

asetzer@cptec.inpe.br

⁴ Departamento de Hidrobiologia / Universidade Federal de São Carlos
Rodovia Washington Luis, km 235 - São Carlos, SP, Brasil- 13565-905

djes@power.ufscar.br

Palavras Chaves: savana, cerrado, fogo, queimada, IVDN, infravermelho termal, AVHRR.

RESUMO

Foi desenvolvido um método inovador para classificação da cobertura vegetal do Cerrado quanto à susceptibilidade ao fogo, a partir de mosaicos quinzenais do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (IVDN) e do canal 3 (3,7µm, infravermelho termal), gerados a partir de imagens do sensor 'Advanced Very High Resolution Radiometer / National Oceanographic and Atmosphere Agency - 14 (AVHRR/NOAA-14). Resultados indicaram a existência de sete classes de cobertura vegetal nos mosaicos. Por meio de um algoritmo estruturado em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), foram gerados mapas quinzenais para o período de maio a outubro/98. A cada classe de cobertura vegetal foi atribuído preliminarmente um grau de susceptibilidade ao fogo, variando entre muito baixo, baixo, médio e alto. Posteriormente, foi verificada a incidência de focos de queimadas detectados pelo AVHRR/NOAA-12 em cada classe, a fim de avaliar a adequação do grau da susceptibilidade ao fogo associado a elas. As áreas com susceptibilidade mais elevada, 'média' e 'alta', apresentaram maior incidência de focos, o que foi interpretado como efeito de maior disponibilidade de combustível vegetal. Casos de alta incidência de focos encontrados nas classes com susceptibilidade 'muito baixa' e 'baixa' foram atribuídos tanto à resolução grosseira de 1,5 km dos mosaicos AVHRR quanto aos erros de registro dos focos de queimadas e dos mosaicos e, em menor escala, às características espectrais das superfícies. Dos 11.190 focos de queimadas detectados, 73% ocorreram nas classes de susceptibilidade alta e média, indicando resultados satisfatórios no desenvolvimento preliminar desse método.

ABSTRACT

An innovative method was developed for classifying the vegetation coverage of the Brazilian Cerrado. The classification used two-weekly mosaic images of the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) and Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) channel 3 (3.7µm, thermal infrared) of the National Oceanographic and Atmosphere Agency - 14 (NOAA-14) satellite. Results indicated that seven vegetation cover classes exist in the mosaics. By using a structured algorithm inside a Geographic Information System (GIS), two-weekly maps were generated for the period between May and October 1998. In an early stage, a level of fire susceptibility was attributed to each class of vegetation cover. This level of fire susceptibility varied among very low, low, medium and high. In a late stage, the incidence of fire spots was verified by their detection inside each vegetation cover class as seen by the AVHRR/NOAA-12 sensor. That evaluated the adequacy of the class susceptibility level. The areas of high and medium susceptibility presented higher incidence of fire spots, which was interpreted as the effect of higher availability of vegetation fuel. Cases of high incidence of fire spots found in the very low and low susceptibility classes were attributed mainly to the coarse resolution of 1.5 km of the AVHRR mosaics as well to errors of geolocation of the fire spots and of the mosaics themselves. The spectral characteristics of the studied surfaces also played a role. From 11,190 fire spots detected here, 73% occurred in the high and medium susceptibility classes. This indicated satisfactory results for the preliminary development of the method employed here.

1. INTRODUÇÃO

O Cerrado foi incluído na lista de 'hotspots', ou seja, de áreas críticas para conservação em todo o mundo, pois: a) possui alta biodiversidade, estimada em cerca de um terço das espécies brasileiras e 5% da global; b) é o ecossistema brasileiro que mais alterações sofreu com a ocupação humana depois da Mata Atlântica (Alho & Martins, 1995; Conservation International [CI], 2002). Até o final da década de 60 a principal atividade econômica do Cerrado era a pecuária bovina extensiva, realizada em pastagens naturais. A partir de então, com a construção de Brasília, desenvolvimento da malha viária, e incentivos governamentais aplicados no setor agropecuário da região, expandiu-se a ocupação com culturas agrícolas e bovinocultura em pastagem implantada, que transformaram o Cerrado na maior região produtora de grãos do Brasil (Alho & Martins, 1995). A pecuária extensiva ocupa atualmente cerca de 60% da área do Cerrado e a monocultura intensiva de grãos, principalmente soja, cerca de 6% (Conservation International [CI], 2002). De fato, cerca de 65 a 80% do Cerrado já foram modificados pela atividade antrópica (Mantovani & Pereira, 1998; CI, 2002). Mas, apesar da utilização de modernas técnicas na agropecuária, ainda é mantida a prática de manejo antiga e de baixo custo baseada no uso do fogo para renovação e limpeza de pastagens, bem como para abertura de novas áreas agrícolas. Segundo Coutinho (1990), são essas as principais causas das queimadas no Cerrado.

O fogo é um evento natural no Cerrado, mas passou a ser utilizado pelo homem primitivo em diferentes atividades, como caça, guerra e limpeza de áreas. Nos dias atuais, usado em práticas agropecuárias, Coutinho (1990) e França (2000) estimaram que cerca de 20 a 30% do Cerrado são queimados anualmente. Além disso, França (2000) mostrou que entre 70 e 75% da área queimada ocorreram no período de estiagem. Essa elevada incidência de queimadas tem sido relacionada com efeitos prejudiciais ao ambiente, tais como: redução da biodiversidade; mudanças climáticas regionais; empobrecimento do solo pela emissão de nutrientes; erosão do solo pela maior exposição à chuva (Mueller-Dombois & Goldammer, 1990); poluição em nível local, como a causada pelo O₃ resultante de emissão de CO, NO_x, hidrocarbonetos; mudança climática em escala global devido ao efeito estufa decorrente da emissão de CO₂ e CH₄ (Crutzen & Andreae, 1990); etc. Por outro lado, a completa supressão do fogo no Cerrado também pode ter efeitos ambientais, como a redução de biodiversidade e aumento da densidade de plantas lenhosas com alteração na composição florística e fisionomia da vegetação (Pivello & Norton, 1996; Moreira, 1996).

As atividades de supressão do fogo tiveram, em geral, maior atenção no passado. Atualmente, é dada maior importância à prevenção ao fogo, pois é mais fácil evitar uma queimada ou combatê-la no início do que quando estabelecida e em propagação (Soares, 1985). Trabalhos sobre a susceptibilidade da cobertura vegetal à ocorrência de queimadas começaram no início do século passado, sendo que os primeiros índices de risco de fogo foram desenvolvidos na década de quarenta, visando aperfeiçoar as práticas de prevenção e manejo do fogo (Turner *et al.*, 1961). O conhecimento do risco possibilita o planejamento de medidas preventivas, otimizando a alocação de recursos pela melhor relação custo/benefício em comparação com as medidas supressivas (Soares, 1985). Tais índices podem ser úteis no Cerrado, auxiliando a preservação desse ambiente, com a emissão de avisos com o grau de susceptibilidade da vegetação, úteis no manejo do fogo. Por exemplo, conhecido o grau de risco numa região, poderiam ser emitidos alertas para as áreas com maior risco, incluindo aquelas destinadas à preservação e seu entorno, onde seriam tomadas medidas preventivas. Por outro lado, poderiam ser localizadas as áreas de menor risco, onde o uso do fogo controlado poderia ser autorizado.

A umidade da vegetação tem relação direta com sua inflamabilidade¹ sendo que abaixo de 30% pode ocorrer a queima (Ronde *et al.*, 1990, Chuvieco e Martin, 1994). Medidas diretas da umidade de vegetação são complexas e requerem custosas amostragens espaciais. Dados de sensoriamento remoto orbital estão sendo acrescentados aos índices de risco de fogo para auxiliar na estimativa da umidade da vegetação, tendo como vantagem principal a coleta de dados sobre extensões continentais em intervalos regulares de tempo, com melhor resolução espacial que os dados meteorológicos (Chuvieco & Martin, 1994). Estudos iniciados na década de setenta mostraram forte correlação entre índices de vegetação (IV) obtidos a partir de imagens digitais de sensores orbitais e parâmetros biofísicos da vegetação, como fitomassa foliar verde, Índice de Área Foliar (IAF), (Tucker, 1979; Tucker & Sellers, 1986) e umidade da fitomassa (Paltridge & Barber, 1988). Também foram encontradas altas correlações entre Índice de Vegetação de Diferença

¹ Inflamabilidade está relacionada unicamente à umidade da vegetação, enquanto susceptibilidade relaciona a inflamabilidade e a possibilidade de um agente iniciar o fogo.

Normalizada (IVDN) e variações fenológicas sazonais da vegetação (Tucker, 1979; Tucker & Sellers, 1986; França, 1994).

Os índices de risco de fogo que empregam dados orbitais são baseados principalmente em métodos que utilizam séries temporais de IV para caracterizar a atividade fotossintética da vegetação. Nesses casos, os melhores resultados são obtidos a partir de perfis temporais nos quais o contraste entre a vegetação verde e a senescente é mais pronunciado (Chuvieco & Martin, 1994). O IV mais utilizado é o IVDN, cuja fórmula é $IVDN = (IP - V) / (IP + V)$, onde **IP** é reflectância do pixel no infravermelho próximo e **V** é reflectância no vermelho (Tucker, 1979; Tucker & Sellers, 1986). Teoricamente, o IVDN pode variar de -1,0 a +1,0, mas os valores mais comuns em estudos de vegetação estão na faixa entre -0,1 e +0,6 (Justice *et al.*, 1985). Valores altos, ao redor de +0,5, indicariam vegetação verde, cobrindo densamente o solo, portanto com baixo risco de fogo. Valores baixos, por volta de +0,1, indicariam vegetação cobrindo esparsamente o solo, ou vegetação senescente ou seca e, portanto, com maior risco de fogo. Valores em torno de zero ou negativos indicariam a ausência de vegetação, incluindo corpos d'água e solo nu (Holben, 1986). Os seguintes intervalos de IVDN foram obtidos com dados AVHRR/NOAA para a vegetação do cerrado: 0,20-0,55 por Justice *et al.* (1985); 0,20-0,35 por Townshend *et al.* (1987); 0,12-0,28 por França (1994); e 0,14-0,59 por Almeida (1997).

Para o cálculo do risco de fogo, um dado útil é a quantidade de combustível vegetal disponível. O IVDN está relacionado com a fitomassa foliar verde (Tucker 1979; Tucker & Sellers, 1986), podendo ser um indicativo da quantidade de combustível, além de umidade. Mas, conforme observado por França (2000) no Cerrado e por Eva & Lambin (1998a, b) na savana africana, o IVDN diminui sazonalmente e, na estação seca, pode atingir valores tão baixos quanto os de queimada e solo exposto, dificultando a verificação da existência de combustível vegetal. Segundo França (1994, 2000) e França & Setzer (1998), dados do canal 3 (3,7µm, infravermelho termal) do sensor AVHRR/NOAA mostram que a diminuição da cobertura vegetal eleva a temperatura da superfície e, inversamente, a superfície recoberta por vegetação apresenta temperatura inferior a de solo exposto. França (2000) mostra que a partir dessas características do canal 3 e do IVDN é possível delimitar áreas queimadas, e possivelmente ainda obter uma indicação da quantidade de combustível vegetal.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é propor e avaliar um método para classificação da cobertura vegetal do Cerrado quanto à sua susceptibilidade ao fogo, a partir de mosaicos quinzenais de imagens AVHRR/NOAA. A classificação tem como perspectiva gerar mapas quinzenais de susceptibilidade ao fogo para a vegetação do Cerrado.

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo coincide com a definida por Pereira Jr. (1992) e França (2000), segundo interpretação do Mapa de Vegetação do Brasil produzido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 1993), conforme mostrado na Figura 1. Ela abrange a porção contínua da Região Fitoecológica do Cerrado, definida como 'Savana' no Mapa de Vegetação, junto com áreas de 'Tensão Ecológica', que indicam o contato entre Cerrado e outros tipos de vegetação. A área de estudo ocupa 2 200 000 km², cobrindo cerca de um quarto do território brasileiro, entre os paralelos 02°30' S e 26°00' S e os meridianos 41°45' O e 62°00' O, abrangendo quase a totalidade dos estados de Goiás, Tocantins e Mato Grosso do Sul, e parte dos estados de Mato Grosso, Maranhão, Piauí, Minas Gerais, Bahia, São Paulo, Paraná, Rondônia e Pará.

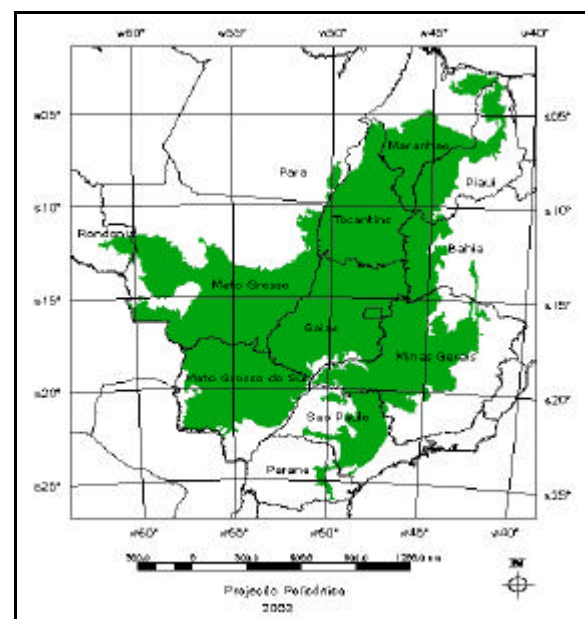


Figura 1 – Área de estudo com 2 200 000 km².

A cobertura vegetal predominante da área de estudo é o Cerrado *lato sensu*, caracterizada por seus diferentes tipos fisionômicos, que apresentam um gradiente de densidade de árvores, dispersas sobre um estrato herbáceo-arbustivo formado geralmente por gramíneas. A maior densidade arbórea é no Cerradão, passa pelo Cerrado *stricto sensu*, com árvores baixas e esparsas, e chega ao Campo Cerrado, Campo Sujo e Campo Limpo, no qual só ocorre o estrato herbáceo (Coutinho, 1990; Ribeiro & Walter, 1998).

O clima predominante é tropical-quente-subúmido (Aw), caracterizado por forte sazonalidade das chuvas e estabilidade da temperatura média diária. A precipitação média anual varia de 600 a 2000 mm, sendo que em 75% da área do Cerrado oscila entre 1000 e 1600 mm (Assad & Evangelista, 1994), com 5 a 10% ocorrendo no período de estiagem, que compreende o período de maio a setembro (Castro *et al.*, 1994). As temperaturas mais elevadas ocorrem na primavera-verão, com médias de 20 a 30°C e mais baixas no inverno com valores médios entre 15 e 24°C (Nimer & Brandão, 1989).

4. MATERIAIS

Para processamento dos dados georreferenciados foi utilizado o Sistema de Informações Geográficas (SIG) SPRING 3.5 para ambiente Windows (Câmara *et al.*, 1996; Divisão de Processamento de Imagens do INPE [DPI/INPE], 2002).

Foram utilizados mosaicos quinzenais do canal 3 e IVDN, com resolução espacial de 1,5 km, gerados a partir de séries de imagens digitais do AVHRR/NOAA-14, da passagem vespertina (18h30 GMT). Cada mosaico corresponde a um intervalo de quatorze a dezesseis dias consecutivos, do dia 01 a 14, e de 15 a 30 ou 31 de cada mês, do período de maio a outubro/98, obtidos por França (2000). No mosaico IVDN, o critério de seleção foi o máximo valor no período; no mosaico do canal 3 foi a máxima temperatura, que no caso do AVHRR correspondente aos menores números digitais. A utilização de mosaicos quinzenais diminui os problemas das imagens relacionados ao ângulo de imageamento, nuvens e ruídos, e cobertura parcial da área de estudo (Holben, 1986). Foi utilizado também o mosaico do máximo IVDN do período de maio/98 a abril/99, obtido por França (2000) a partir dos mosaicos quinzenais do IVDN.

Foram usados dados diários de coordenadas geográficas dos focos de queimadas detectados a partir das imagens do canal 3 do AVHRR/NOAA-12, passagem vespertina (21h30 GMT), do período de maio a outubro/98. Os dados foram gerados pela Divisão de Satélites Ambientais (DSA) do INPE, baseado no método descrito por Pereira & Setzer (1993).

5. MÉTODO

5.1. PREMISSAS

As seguintes premissas gerais foram adotadas nos dados dos mosaicos do IVDN e do canal 3 do AVHRR para classificar a cobertura da superfície quanto à inflamabilidade:

- o IVDN está relacionado positivamente com a umidade da vegetação verde;
- a temperatura no canal 3 é relacionada negativamente com o grau de recobrimento do solo pela vegetação e, dessa forma, é um parâmetro relacionado à quantidade de combustível vegetal existente.

A partir das premissas gerais foram estabelecidas as premissas específicas descritas abaixo.

— Áreas com alto recobrimento por vegetação verde — formações florestais e culturas anuais em fase de crescimento — apresentam maior teor de umidade nas plantas, condição que resulta em menor inflamabilidade. Nessas áreas, espera-se encontrar IVDNs superiores a 0,3, com valores máximos ao redor de 0,5 (França, 2000).

— Corpos d'água, como mar, represas e rios, assim como nuvens, têm IVDN próximo de zero ou negativo, enquanto que no canal 3 apresentam-se com temperaturas inferiores àquelas das áreas terrestres. Os corpos d'água têm inflamabilidade nula, enquanto que a persistência de nuvens em um mosaico pode indicar condições de chuva e umidade que diminuem a inflamabilidade da vegetação.

— Áreas com IVDNs baixos, entre zero e 0,3, associadas a temperaturas no canal 3 inferiores à de solo exposto, que corresponde a valores de número digital (ND) acima de 50 (França, 2000), indicam a existência de cobertura vegetal seca em quantidade suficiente para a ocorrência de uma queimada.

— Áreas queimadas são delimitadas a partir dos mosaicos do canal 3, onde correspondem aos locais com aumento de temperatura em relação ao mosaico da quinzena anterior, indicado por queda no ND igual ou superior a 50. Além disso, as áreas queimadas correspondem às com temperatura mais elevada no mosaico, apontado por valores de ND abaixo de 40. Essas áreas não queimam novamente durante a mesma estação seca (França, 2000).

Duas outras premissas são assumidas quanto à susceptibilidade do Cerrado ao fogo:

— a existência de áreas queimadas, bem como de focos de fogo ativo, indicam, além da inflamabilidade do combustível, a atividade do agente humano iniciador do fogo;

— não ocorrem queimadas de restos vegetais em áreas de culturas anuais mecanizadas (Ramos Neto, 2000) porque, de modo geral, essa prática foi substituída pela incorporação dos restos ao solo.

5.2. GERAÇÃO DOS MAPAS DE SUSCEPTIBILIDADE AO FOGO

A susceptibilidade da cobertura vegetal foi estimada com base nos mosaicos quinzenais obtidos das imagens AVHRR/NOAA-14. Operações do tipo “pixel a pixel” foram realizadas entre os mosaicos, utilizando um algoritmo implementado no SIG, gerando, ao final, mapas quinzenais com classes de cobertura da superfície. Para gerar os mapas foram realizadas as seguintes etapas:

1. importação pelo SIG dos mosaicos AVHRR/NOAA-14 e do limite da área de estudo;
2. realização de estudos e testes nos mosaicos IVDN e canal 3 para determinar os valores limiares das classes, considerando as características espectrais dos tipos de cobertura da área de estudo, com enfoque na susceptibilidade ao fogo;
3. estruturação do algoritmo em Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL) do SIG; no algoritmo foram utilizados os valores limiares das classes de susceptibilidade determinados no item anterior;
4. geração dos mapas quinzenais de susceptibilidade ao fogo;
5. análise da ocupação espaço-temporal do Cerrado pelas classes de susceptibilidade.

5.3. INTERSECÇÃO DOS MAPAS DE SUSCEPTIBILIDADE COM OS FOCOS DE QUEIMADAS

A avaliação das classes de susceptibilidade dos mapas quinzenais foi realizada através da intersecção com os focos de queimadas gerados a partir do AVHRR/NOAA-12. O procedimento teve as seguintes etapas:

1. importação pelo SIG dos dados diários de focos de queimadas do AVHRR/NOAA-12;
2. seleção de duas datas por quinzena dos dados de focos de queimadas, de passagens do NOAA-12 recobrindo toda a área de estudo, totalizando 24 datas;
3. intersecção dos mapas quinzenais de susceptibilidade com as coordenadas geográficas dos focos de queimadas da quinzena posterior à do mapa, o que possibilitou quantificar a incidência de focos por classe de susceptibilidade;
4. Análise espaço-temporal dos dados oriundos do item anterior.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. ALGORITMO PARA GERAÇÃO DOS MAPAS DE SUSCEPTIBILIDADE AO FOGO

Os critérios utilizados no algoritmo final, resultado de vários testes no SIG, estão na Tabela 1. Ressalta-se que: a) o algoritmo foi executado respeitando-se a seqüência cronológica das quinzenas, porque o critério sete (ver adiante) utilizou dados dos mapas de susceptibilidade anteriores; b) a seqüência de aplicação dos sete critérios foi seqüencial e no caso de sobreposição, o resultado do posterior prevaleceu.

Critério	Canal 3	IVDN	IVDN máximo	Outros	Classe
1	DN > 110	IVDN < 0,22	---	---	Água-Nuvem
2	--	IVDN ≥ 0,20	---	---	Verde
3	65 ≤ DN ≤ 140	-0,06 ≤ IVDN ≤ 0,24	---	---	Cerrado2
5	DN < 65	-0,06 ≤ IVDN ≤ 0,24	---	---	Cerrado1
4	---	---	IVDN ≥ 0,40	---	Cultura
6	DN < 45	---	---	(DN _{c3ant} - DN _{c3at}) ≥ 40	Queimada
7	---	---	---	Queimada-ant	Queimada-anterior

Obs.: a) c3ant = canal 3 na quinzena anterior c) c3at = canal 3 na quinzena atual; f) Queimada-ant = áreas queimadas classificadas nas quinzenas anteriores.

Tabela 1 – Critérios do algoritmo para gerar os mapas quinzenais de susceptibilidade ao fogo.

No algoritmo final, o critério 1 determinou áreas ocupadas por corpos d'água e nuvens, associadas à classe *Água-Nuvem*. O critério 2 delimitou áreas com alta densidade de vegetação verde, associadas aos IVDN iguais ou superiores a 0,2; essa classe foi denominada *Verde*. A classe *Cerrado2*, determinada pelo critério 3, correspondeu às áreas supostamente com combustível vegetal seco, identificadas pelos baixos IVDN, associadas a temperaturas intermediárias no canal 3. O critério 4 também procurou determinar áreas com combustível vegetal seco, porém associadas a temperaturas maiores no canal 3, ou seja, com menor quantidade de combustível que na classe *Cerrado2*; essa classe foi denominada *Cerrado1*. Culturas anuais, principalmente soja em fase de crescimento, foram delimitadas pelo critério 5 que identificou IVDN iguais ou superiores a 0,4; essa classe foi denominada *Cultura*. Áreas queimadas, incluídas na classe *Queimada*, foram delimitadas nos mosaicos pelas temperaturas elevadas e, simultaneamente, pelo aumento da temperatura da superfície quando comparada com dados da quinzena anterior. Finalmente, o critério 7 delimitou as áreas queimadas nas quinzenas anteriores e incluiu-as na classe *Queimada-anterior*. A aplicação do algoritmo gerou mapas de índice de susceptibilidade ao fogo para cada quinzena do período de estudo.

Em função das premissas e características das classes, inicialmente foram atribuídas as seguintes susceptibilidades ao fogo: a) muito baixa para *Água-Nuvem*, *Queimada*, *Queimada-anterior* e *Verde*; b) baixa para *Cultura*; c) média para *Cerrado1*; d) alta para *Cerrado2*.

6.2. ANÁLISE DOS MAPAS DE SUSCEPTIBILIDADE AO FOGO

A área percentual de cada classe, por quinzena, está na Tabela 2 e Figura 2. Com o decorrer do tempo, foi observada a conversão da classe *Verde* para *Cerrado2* e desta para *Cerrado1* até a 1ª quinzena de setembro, quando então passou a ocorrer o inverso, ou seja, a conversão foi da *Cerrado1* para *Cerrado2* e desta para *Verde*. Além disso, como as áreas queimadas foram agregadas na classe *Queimada-anterior*, a conversão das outras classes para esta foi definitiva.

A classe *Cerrado2* apresentou as maiores áreas em todas as quinzenas, com valores sempre superiores a 40% da área de estudo — aproximadamente 880 mil km². A área dessa classe aumentou progressivamente e por todo Cerrado, atingindo o máximo de 78% na 1ª quinzena de julho — cerca de 1.720 mil km² —, sempre devido à incorporação de áreas da classe *Verde*. Esse aumento acompanhou o avanço da estação seca, quando se verifica a senescência e queda de folhas do estrato herbáceo do cerrado e conseqüente aumento do combustível vegetal seco. A partir da 2ª quinzena de julho até a 1ª quinzena de setembro, a área dessa classe decresceu devido à incorporação de parte dela pela classe *Cerrado1*. A partir da 2ª quinzena de setembro a área manteve-se estável, pois, foram incorporadas áreas da classe *Cerrado1* e, de modo simultâneo, foi convertida para a *Verde*, possivelmente devido ao início das chuvas com conseqüente rebrota e aumento da umidade da vegetação.

A classe *Cerrado1* inicialmente cobriu uma área inexpressiva e começou a crescer na 1ª quinzena de julho, a partir da porção Norte do Cerrado em direção ao Sul, atingindo 29% na 1ª quinzena de setembro — aproximadamente 640 mil km² —, quando ocupava toda porção Centro-Norte. Posteriormente, esse valor decresceu, chegando a 7% na última quinzena de outubro. Conforme já citado, o crescimento da área foi devido à incorporação de áreas da *Cerrado2*, e vice-versa.

A classe *Verde* ocupou inicialmente 48% da área de estudo — cerca de 1.060 mil km² —, similar a *Cerrado2*, decrescendo até o mínimo de 1% na 1ª quinzena de setembro, devido à conversão para a classe *Cerrado2*. Durante esse decréscimo, os remanescentes da classe foram se concentrando na borda Amazônica do Cerrado. Nos períodos seguintes a área aumentou, atingindo 12% na 2ª quinzena de

outubro, pela incorporação de área da *Cerrado2*, sendo que a expansão foi a partir da porção Oeste e Sul do Cerrado. Os dados mostraram que a variação de área acompanhou o regime de chuvas, diminuindo com o avanço da estiagem e aumentando com o início das chuvas. A classe *Cultura* cobriu inicialmente 7% da área de estudo — cerca de 150 mil km² —, e finalizou com 4%, devido à conversão para as classes *Queimada* e *Queimada-anterior*, que ocorreu principalmente no Oeste da Bahia. Já a classe *Água-Nuvem* apresentou áreas inferiores a 4% da área de estudo, sendo que as variações verificadas foram decorrentes da persistência de nuvens nos mosaicos.

A classe *Queimada* acompanhou o ciclo das queimadas no Cerrado, apresentando crescimento até a 2^a quinzena de agosto, quando atingiu 9% da área de estudo, decrescendo em seguida, até 2% no final de outubro. A classe *Queimada-anterior* apresentou crescimento contínuo pelo fato de acumular áreas queimadas das quinzenas anteriores, atingindo 32% ao final do período — aproximadamente 700 mil km² —, ocupando principalmente a porção Centro-Norte do Cerrado. Foram incorporadas às classes *Queimada* e *Queimada-anterior* principalmente as classes *Cerrado2* e *Cerrado1*, e em menor escala a *Cultura*.

QUINZENA 1998	DIA 1998	FOCOS nº	CLASSE																				
			Água-Nuvem			Verde			Cultura			Cerrado1			Cerrado2			Queimada			Queimada-anterior		
			Área	Focos		Área	Focos		Área	Focos		Área	Focos		Área	Focos		Área	Focos		Área	Focos	
			%	nº	%	%	nº	%	%	nº	%	%	nº	%	%	nº	%	%	nº	%	%	nº	%
1ª Maio	22/maio	38	0	0	0	47	19	50	7	8	21	0	2	5	45	8	21	0	1	3	0	0	0
	26/maio	31		0	0		12	39		6	19		0	0		0	42		0	0		0	0
2ª Maio	4/jun	60	2	1	2	23	18	30	6	5	8	1	0	0	67	33	55	0	3	5	0	0	0
	9/jun	93		1	1		24	26		11	12		1	1		56	60		0	0		0	0
1ª Jun	18/jun	153	4	2	1	21	22	15	6	28	18	1	1	1	68	97	63	0	2	1	1	1	1
	22/jun	128		0	0		25	19		30	23		2	2		69	54		0	0		0	0
2ª Jun	1/jul	215	3	4	2	10	25	12	6	46	21	2	4	2	77	128	59	1	2	1	1	6	3
	6/jul	157		3	2		26	17		14	9		2	1		107	68		5	3		0	0
1ª Jul	20/jul	183	2	0	0	8	15	8	6	25	14	3	17	9	78	124	68	1	1	1	1	1	0
	29/jul	322		7	2		23	7		36	11		7	2		235	73		6	2		8	3
2ª Jul	3/ago	259	1	0	0	6	19	7	6	8	3	9	26	10	74	186	72	2	5	2	2	15	6
	12/ago	361		0	0		22	6		14	4		43	12		237	66		22	6		23	6
1ª Ago	16/ago	590	3	4	1	2	24	4	6	22	4	15	113	19	67	354	60	3	53	9	5	20	3
	21/ago	1.817		10	0		52	3		83	5		377	21		1137	63		98	5		60	3
2ª Ago	3/set	947	0	0	0	2	22	2	5	41	4	27	279	30	49	396	42	9	127	13	8	82	9
	12/set	1.226		0	0		22	2		46	4		423	34		548	45		109	9		78	6
1ª Set	17/set	1216	0	0	0	1	2	0	5	21	2	28	489	40	42	366	30	6	107	9	17	231	19
	26/set	991		0	0		7	1		18	2		381	39		302	31		71	7		212	21
2ª Set	1/out	1.274	0	0	0	4	1	0	4	28	2	22	456	36	40	324	26	6	103	8	24	362	28
	5/out	478		0	0		1	0		13	3		143	30		164	34		41	9		116	24
1ª Out	19/out	345	0	0	0	2	1	0	4	7	2	11	36	11	51	229	66	3	12	3	29	60	18
	23/out	306		0	0		19	6		7	2		26	9		175	57		9	3		70	23
2ª Out	---	---	0	---	---	12	---	---	4	---	---	7	---	---	44	---	---	2	---	---	32	---	---
	---	---		---	---		---	---		---	---		---	---		---	---		---	---		---	---

Obs.: área percentual calculada em relação ao total de 2 200 000 km².

Tabela 2 – Área percentual das classes e número absoluto e percentual de focos de queimadas, por classe de susceptibilidade ao fogo no Cerrado.

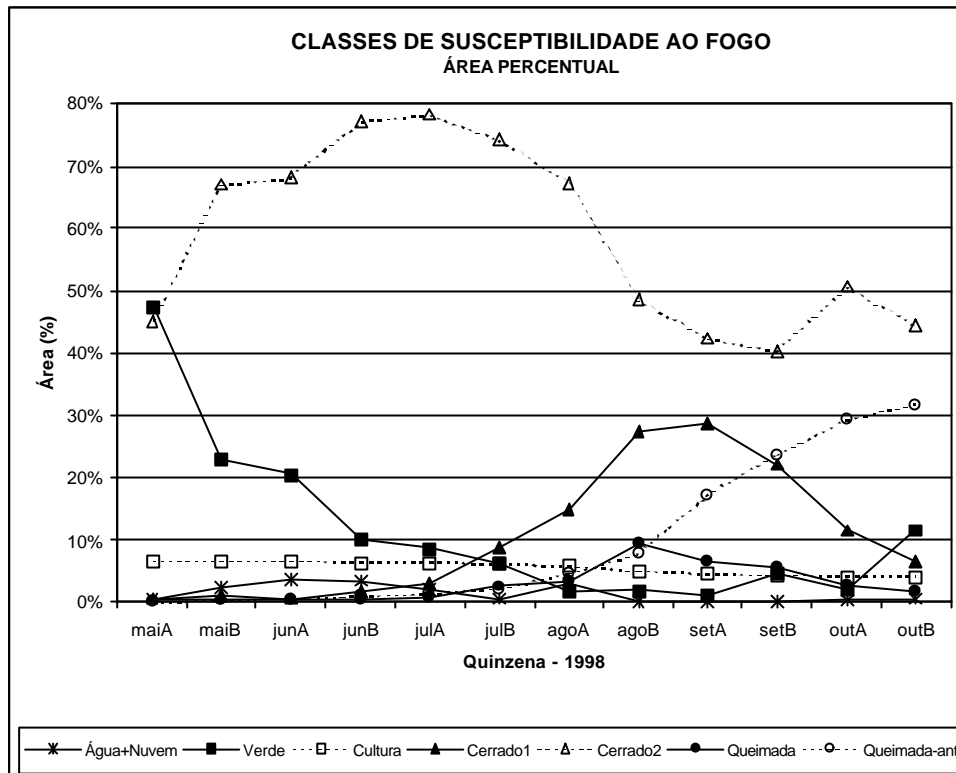


Figura 2 – Área percentual das classes de susceptibilidade ao fogo por quinzena, relativa à área total do Cerrado de 2 200 000 km².

6.3. INTERSECÇÃO DAS CLASSES DE SUSCEPTIBILIDADE COM OS FOCOS DE QUEIMADAS

A intersecção das coordenadas geográficas dos focos de queimadas do AVHRR/NOAA-12 com as classes de susceptibilidade ao fogo, permitiu verificar o número percentual de focos de queimada por classe, apresentados na Tabela 2 e Figura 3.

Água-Nuvem: Nessa classe ocorreu o menor número de focos de queimadas, com valor máximo de 2% do total de focos de uma data. A ocorrência de focos nessa classe decorreu da detecção de queimadas nas imagens AVHRR/NOAA-12 em áreas que se encontravam sob nuvens nos mosaicos do AVHRR/NOAA-14. Além disso, erros de registro das duas fontes de dados — 2 km nas coordenadas dos focos (Pereira e Setzer, 2001) e até 6 km nos mosaicos (França, 2000) — causaram imprecisão na localização de focos de queimadas. Apesar da ocorrência de focos nas áreas sob nuvens, a persistência destas em um mosaico pode indicar condições de chuva e umidade que diminuem a inflamabilidade da vegetação.

Verde: O número percentual de focos de queimadas nessa classe foi, em geral, abaixo de 10%, exceto no período entre o início de maio e o de julho. O alto percentual de focos nesse período, entre 12 e 50%, embora não fosse esperado, possivelmente decorreu da queima de cana-de-açúcar que ocorre no estado de São Paulo, principal região na qual eles foram constatados. Nessa cultura, o dossel superior permaneceu verde, enquanto o dossel inferior se torna senescente no decorrer do ciclo da cultura e inflamável no decorrer do período de estiagem. Dessa forma, essas áreas provavelmente foram classificadas nos mosaicos AVHRR como *Verde*, embora contivessem material vegetal inflamável.

Cultura: O percentual de focos de queimadas em áreas de cultura foi menor no período de agosto a outubro, com valor máximo de 5%, e maior no período de maio a julho, com valores entre 8 e 24%, sendo que possivelmente os maiores valores estão relacionados ao uso de queimadas para abertura de novas áreas agrícolas adjacentes às existentes. Essas áreas foram incluídas na classe *Cultura* em decorrência de erros de registro associados à localização dos focos e ao método de elaboração dos mosaicos (França, 2000). Ademais, a resolução de 1,5 km dos mosaicos possibilita a existência de outras classes de susceptibilidade no pixel, além de *Cultura*, nas quais podem ter ocorrido queimadas.

Queimada: Essa classe apresentou baixo percentual de focos de queimada nas datas ao longo do período de estudo, com valor máximo de 14% no início de setembro. No entanto, eram esperados valores ainda menores, pois áreas queimadas não contêm combustível vegetal. Esses valores possivelmente são explicados pela resolução espacial dos mosaicos e pelo tamanho das queimadas na área de estudo. Queimadas pequenas, com área menor que 1 km², são as mais frequentes no Cerrado (França, 2000) e têm dimensões inferiores às do pixel dos mosaicos que é 2,25km². Dessa forma, é possível que pixels classificados como *Queimada* contivessem áreas não queimadas e com combustível vegetal. Tais áreas posteriormente foram queimadas e detectadas como focos pelo AVHRR/NOAA-12. Além disso, os mesmos erros de registro descritos anteriormente para as classes *Água-Nuvem* e *Cultura* podem ter superestimado os números de focos nessa classe.

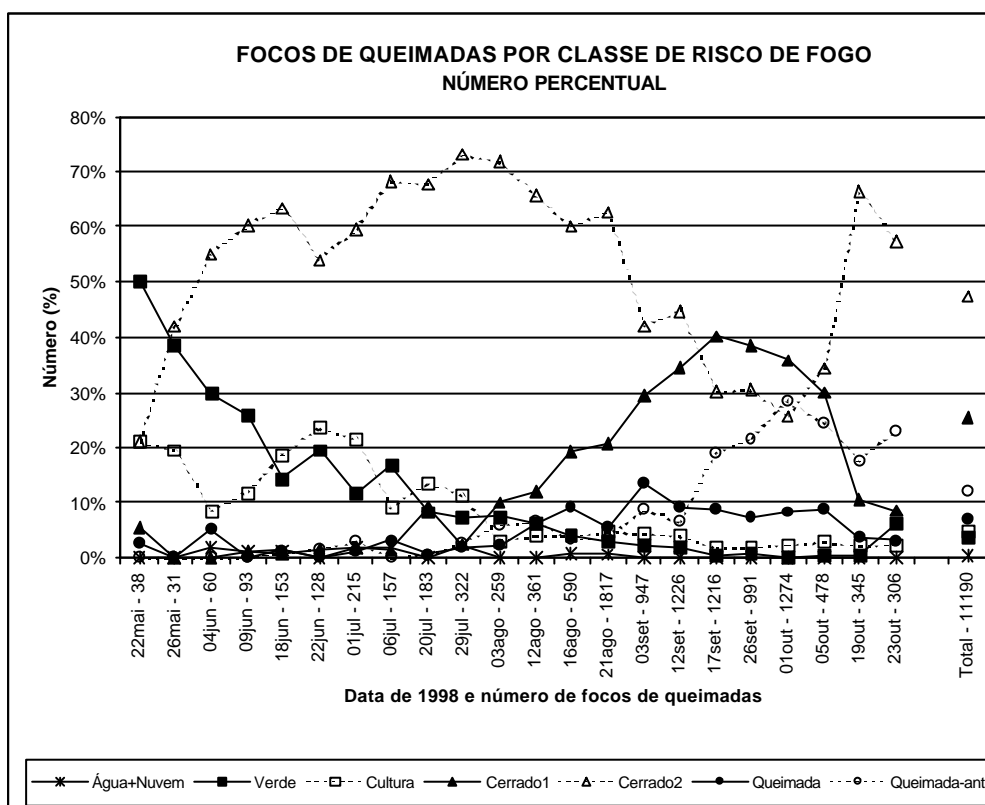


Figura 3 – Percentual de focos de queimadas por classe de susceptibilidade ao fogo.

Queimada-anterior: Eram esperados percentuais muito baixos de focos de queimadas nessa classe, pois supôs-se que eles não ocorreriam em áreas já queimadas. Foram verificados percentuais baixos de focos até meados de setembro, inferior a 9%. A partir dessa data, no entanto, esses valores aumentaram, atingindo o máximo de 28% no início de outubro. Esses valores não eram esperados, sendo explicados da mesma forma que na classe *Queimada*.

Cerrado1: O percentual de focos de queimadas aumentou ao longo do período de estudo, atingindo o máximo de 40% em meados de setembro e declinando nas datas seguintes. Os valores encontrados foram quase sempre inferiores aos da classe *Cerrado2*, com exceção de meados de setembro a início de outubro. Esses resultados indicaram que o algoritmo discriminou satisfatoriamente as áreas com boas condições de inflamabilidade, porém com menor quantidade de combustível do que a classe *Cerrado2*, concordando com a susceptibilidade média atribuída a ela.

Cerrado2: O percentual de focos dessa classe manteve-se acima de 21%, superior às demais classes, durante praticamente todo o período de estudo, chegando ao máximo de 73% do Cerrado no final de julho. De fato, era esperado que a maior parte dos focos de queimadas ocorressem nessa classe, pois a ela foi associada a maior quantidade de combustível vegetal e alta susceptibilidade ao fogo.

Considerando as características das classes e os resultados obtidos, principalmente o número de focos de queimadas por classe, sugere-se, mediante futuras alterações no algoritmo, a união das classes *Cerrado1* e

Cerrado2, constituindo a classe de susceptibilidade ao fogo mais elevada. Da mesma forma, as classes *Queimada* e *Queimada-anterior* também poderiam ser reunidas, constituindo uma única classe de susceptibilidade média, pois foi constatado que elas podem ser um bom indicador da presença de combustível vegetal nas áreas adjacentes às queimadas. Então, restariam três classes: baixa para a classe *Água-Nuvem* e *Verde*; média para *Queimada* e *Cultura*; e alta para *Cerrado*.

7. CONCLUSÕES

Foi proposto um método inovador para estimar a susceptibilidade ao fogo da vegetação da Região Fitoecológica do Cerrado, utilizando mosaicos AVHRR/NOAA-14. O método foi avaliado pela intersecção dos mapas de susceptibilidade com os dados de localização de focos de queimadas do AVHRR/NOAA-12. Os resultados indicaram que a possibilidade de determinar quatro classes de susceptibilidade ao fogo na área de estudo, utilizando mosaicos do IVDN e do canal 3. As classes com susceptibilidade mais elevada, 'média' e 'alta', foram satisfatoriamente delimitadas, pois foi possível identificar as áreas com maior disponibilidade de combustível vegetal. Problemas na classificação, encontrados principalmente nas classes com susceptibilidade 'muito baixa' e 'baixa' foram atribuídos à resolução grosseira de 1,5km dos mosaicos AVHRR, bem como aos erros de registro dos focos de queimadas e dos mosaicos e também às características espectrais das classes.

Queimadas em vegetação do Cerrado ocorrem sob três condições simultâneas: a) existência de combustível vegetal; b) condições meteorológicas propícias; c) ação humana para iniciar o fogo. Considerando que o enfoque desse trabalho é principalmente no combustível vegetal, os resultados da estimativa da susceptibilidade ao fogo devem melhorar com a inclusão de componentes meteorológicos e antrópicos. Sugere-se também que dados de novos sensores, especialmente o 'Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer' (MODIS), a bordo das plataformas Terra e Aqua, sejam testados para delimitar classes de susceptibilidade ao fogo no Cerrado, pois ele tem resolução temporal adequada, de 1 a 3 dias, melhor resolução espectral com 36 canais e melhor resolução espacial com 250m, 500m e 1km, quando comparadas com as do AVHRR/NOAA.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro e logístico fornecido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de São Carlos (PPG-ERN/UFScar) e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

BIBLIOGRAFIA

- Alho, C.J.R. e Martins, E.S., 1995, De grão em grão, o Cerrado perde espaço - Cerrado: impactos do processo de ocupação. WWF, Brasília.
- Almeida, S.A.O., 1997, Determinação da redução de umidade superficial na região dos Cerrados com imagens AVHRR/NOAA e precipitação pluviométrica. Tese de doutorado, Universidade de Brasília (UnB), Brasília.
- Assad, E.D. e Evangelista, B.A., 1994, Análise freqüencial da precipitação pluviométrica. In: Chuva no Cerrado: análise e espacialização, Ed. E.D. Assad. EMBRAPA-CPAC, Brasília. p. 25-42.
- Câmara, G., Souza, R.C.M., Freitas, U.M., Garrido, J., Li, F.M., 1996, SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. *Computers & Graphics*, 20(3): 395-403.
- Castro, L.H.R., Moreira, A.M., Assad, E.D., 1994, Definição e regionalização dos padrões pluviométricos dos Cerrados brasileiros. In: Chuva no Cerrado: análise e espacialização, Ed. E.D. Assad. EMBRAPA-CPAC, Brasília. p. 13-23.
- Chuvienco, E. e Martin, M.P., 1994, Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(5), 563-570.
- Conservation International [CI], 2002. Hotspots. <http://www.conservation.org.br> (agosto/2002).
- Coutinho, L.M., 1990, Fire in the ecology of the Brazilian cerrado. In: Fire in the tropical biota, Ed. J.G. Goldammer, Springer-Verlag, New York. p. 82-105.
- Crutzen, P.J., e Andreae, M. O., 1990, Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science*, 250, 1669-1678.

Divisão de Processamento de Imagens / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DPI/INPE), 2002.

<http://www.dpi.inpe.br/spring> (abril/2002).

Eva, H. e Lambin, E.F., 1998a, Burnt area mapping in Central Africa using ATSR data. *International Journal of Remote Sensing*, 19(18), 3473-3497.

Eva, H. e Lambin, E.F., 1998b, Remote sensing of biomass burning in tropical regions: sampling issues and multisensor approach. *Remote Sensing of Environment*, 64, 292-315.

França, H., 1994, Um estudo fenológico com imagens AVHRR/NOAA nos Cerrados do Parque Nacional das Emas, GO. Tese de mestrado, INPE-6120-TDI/581, INPE, São José dos Campos.

França, H., 2000, Metodologia de identificação e quantificação de áreas queimadas no Cerrado com imagens AVHRR/NOAA. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.

França, H. e Setzer, A.W., 1998, AVHRR temporal analysis of a savanna site in Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 19(16), 3127-3140.

Holben, B.N., 1986, Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1417-1434.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 1993, Mapa de Vegetação do Brasil, IBGE Rio de Janeiro.

Justice, C.O., Townshend, J.R.G., Holben, B.N., Tucker, C.J., 1985, Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 6, 1271-1318.

Kaufman, Y.J. e Remer, L.A., 1994, Detection of forests using mid-IR reflectance: an application for aerosol studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32, 672-683.

Mantovani, J.E. e Pereira, A., 1998, Estimativa da integridade da cobertura vegetal do Cerrado através de dados TM/Landsat. Anais, 9^o Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, 11-18/setembro/1998, INPE/SELPER.

Moreira, A., 1996, Proteção contra o fogo e seu efeito na distribuição e composição de espécies de cinco fisionomias de cerrado. In: Impactos de queimadas em áreas de cerrado e restinga, Ed. H.S.Miranda, C.H.Saito, B.F.S.Dias, ECL/UnB, Brasília. p 112-121.

Nimer, E. e Brandão, A.M.P.M., 1989, Balanço hídrico e clima da Região dos Cerrados, IBGE, Rio de Janeiro.

Mueller-Dumbois e Goldammer, 1990, Fire in the tropical ecosystems and global environmental change: an introduction. In: Fire in the tropical biota, Ed. J.G. Goldammer, Springer-Verlag, New York. p. 1-10.

Paltridge, G.W. e Barber, J., 1988, Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA/AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 25, 381-394.

Pereira Jr., A. C., 1992, Monitoramento de queimadas na região dos Cerrados com utilização de dados AVHRR/NOAA corrigidos com dados TM/Landsat. Tese de mestrado, INPE-5490-TDI/507, INPE, São José dos Campos.

Pereira, J.A.R. e Setzer, A., Brazilian Validation of AVHRR fire pixels. In: Global and regional vegetation fire monitoring from space: planning a coordinated international effort, Ed. F. Ahern, J.G. Goldammer, C. Justice, Academic Publishing, Netherlands.

Pereira, M.C. e Setzer, A.W., 1993, Spectral characteristics of deforestation fires in NOAA/AVHRR images. *International Journal of Remote Sensing*, 14(3), 583-597.

Pivello, V.R. e Norton, G.A., 1996, FIRETOOL: an expert system for the use of prescribed fire in Brazilian savannas, *Journal of Applied Ecology*, 33:348-356.

Ramos Neto, M.B., 2000, O Parque Nacional de Emas (GO) e o fogo: implicações para a conservação biológica. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Ribeiro, J.F. e Walter, B.M.T., 1998, Fitofisionomias do Cerrado. In: Cerrado: Ambiente e Flora, Ed. S.M. Sano e S.P. Almeida, EMBRAPA/CPAC, Planaltina. p. 89-166.

Ronde, C., Goldammer, J.G., Wade, D.D., Soares, R.V., 1990, Prescribe fire in industrial plantations. In: Fire in the tropical biota, Ed. J.G Goldammer, Spring-Verlag, Berlim, p. 216-272.

Soares, R.V., 1985, Incêndios florestais – controle e uso do fogo, FUFPEF, Curitiba, 218p.

Townshend, J.R.G., Justice, C.O., Kalb, V., 1987, Characterization and classification of South American land cover types using satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 8, 1189-1207.

Tucker, C.J., 1979, Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127-150.

Tucker C.J. e Sellers, P.J., 1986, Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1395-1416.

Turner, J.A., Lillywhite, J.W., Pieslak, Z., 1961, Forecasting for forest fire services, Technical Note No. 42, World Meteorological Organization (WMO), Geneva, Switzerland.