



SENSORIAMENTO REMOTO DE ÁREAS QUEIMADAS

José Miguel Cardoso Pereira

· Instituto Superior de Agronomia
Universidade Técnica de Lisboa

introdução

- a queima de vegetação é um fenómeno ambiental de escala global.
- há fogos desde a tundra até às savanas e desde os desertos até às florestas tropicais húmidas.
- estima-se que no ano 2000 tenham sido queimados cerca de 3.5 milhões de km², resultando na combustão de 2580 Tg de biomassa e na emissão de 4054 tg de CO₂. Estes valores são considerados baixos (ano de La Niña).
- a grande extensão de área afectada pelo fogo, o carácter fortemente dinâmico do processo e a baixa acessibilidade de muitas das regiões importantes, tornam o sensoriamento remoto uma ferramenta de trabalho indispensável.



introdução

- o fogo produz 4 tipos de sinal espectral observável do espaço:
 - radiação directa da frente de chamas (calor e luz)
 - aerossóis (fumo)
 - resíduos sólidos (carvão e cinza)
 - estrutura vegetal alterada (cicatriz)
- a análise de **fogos activos** recorre ao sinal térmico.
- a análise de **áreas queimadas** baseia-se na detecção do carvão e da cicatriz.



introdução

- **fogos activos:** o sinal térmico é bastante específico, pouco equívoco, especialmente usando instrumentos que não saturam a baixa temperatura. Podem permanecer confusões geradas por refinarias de gás/petróleo e erupções vulcânicas, por exemplo.
- uma das limitações é que representam um instantâneo (*snapshot*), no momento da passagem do satélite, já que o sinal térmico é muito efémero.
- **área queimada:** o resíduo de carvão e a cicatriz na vegetação produzem sinais espectrais mais duradouros, que permitem estimar a área afectada pelo fogo, sendo preferível para avaliar danos ecológicos e económicos e estimar emissões.
- estes sinais são sujeitos a confusão com outros tipos de superfície e processos de alteração da cobertura do solo, ou mesmo com efeitos externos, como sombras.



introdução

- o sensoriamento remoto (DR) e mapeamento de áreas queimadas tem de resolver vários problemas:

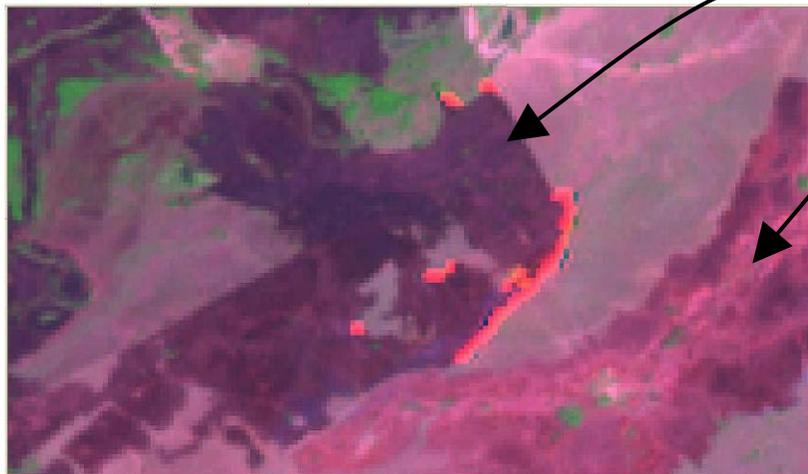
- variabilidade / separabilidade espectral do alvo
- persistência do sinal
- nuvens
- fumo
- copas da vegetação / fogo de sub-bosque
- padrão espacial do alvo / fragmentação



sinal espectral

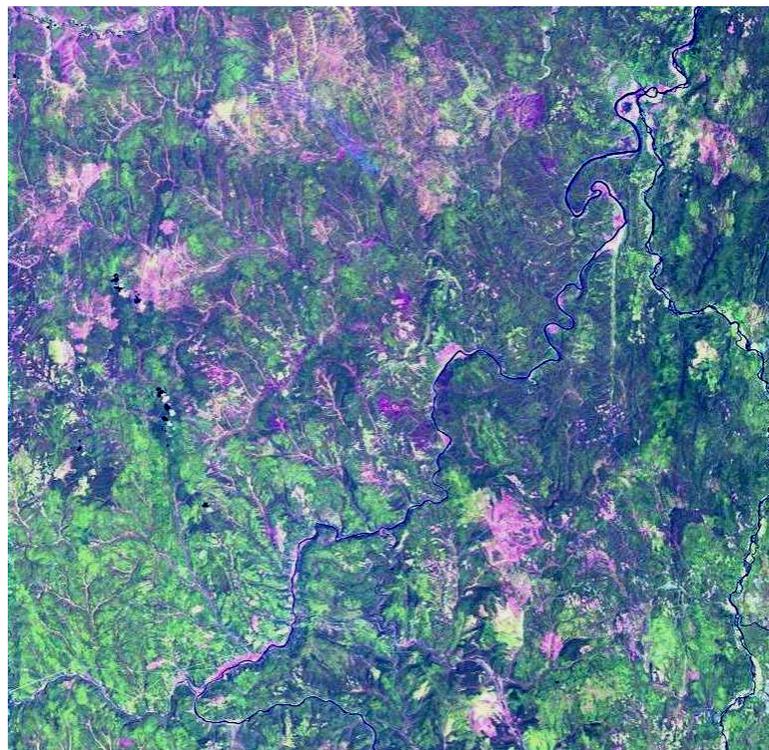
- o sinal espectral do escurecimento da superfície, devido à deposição da carvão, é uma consequência bastante específica da combustão de vegetação.
- porém, tem duração relativamente curta e é atenuado por dispersão pelo vento, ou lavagem pela chuva, num período de poucas semanas a alguns meses após o fogo.
- a cicatriz na vegetação é mais estável (de algumas semanas ou meses em savana tropical, até vários anos em florestas boreais).
- Mas este sinal é menos específico. A remoção parcial ou total da vegetação também pode dever-se a corte/colheita, pastoreio, derrube pelo vento, ou acção de insectos e outros patogénicos.



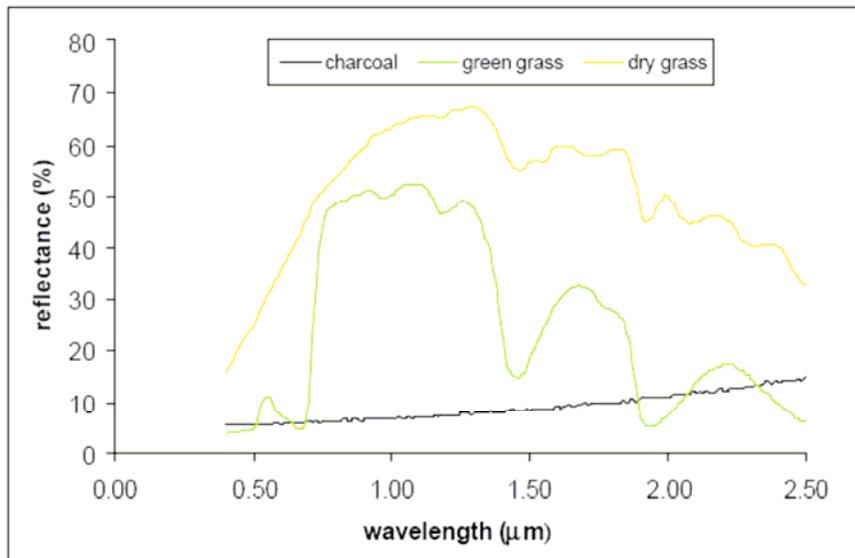


área **recém-queimada** e **sinal atenuado**, ao fim de alguns dias, em savana na Colômbia.

cicatrizes de idade variada, na floresta boreal da Sibéria.



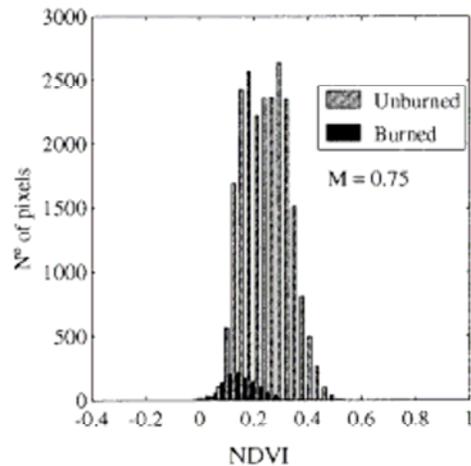
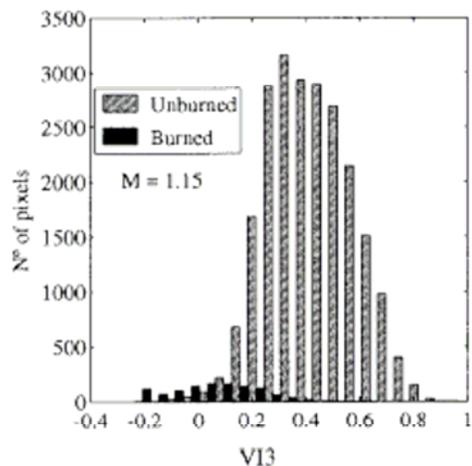
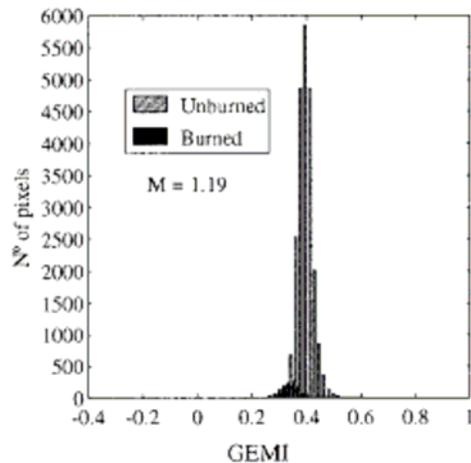
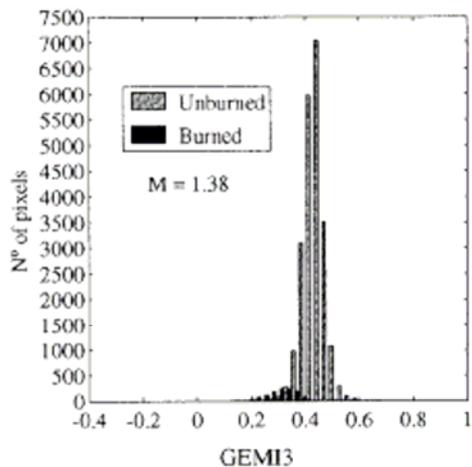
senal espectral



Pereira e Govaerts, 2001, EUMETSAT

- no visível (0.4-0.7 μm), o carvão confunde-se com a vegetação verde densa, e também com a água, solos muito escuros, zonas húmidas, etc.
- algumas destas confusões também se verificam na região espectral do IV médio, sobretudo nos 2.0-2.5 μm .
- porém, verifica-se frequentemente um aumento da reflectância espectral no IV médio, quando é queimada vegetação escura e densa.
- O IV próximo é, sem dúvida, a região espectral que melhor permite discriminar entre áreas queimadas e outras superfícies, como vegetação e solos não muito escuros.

senal espectral

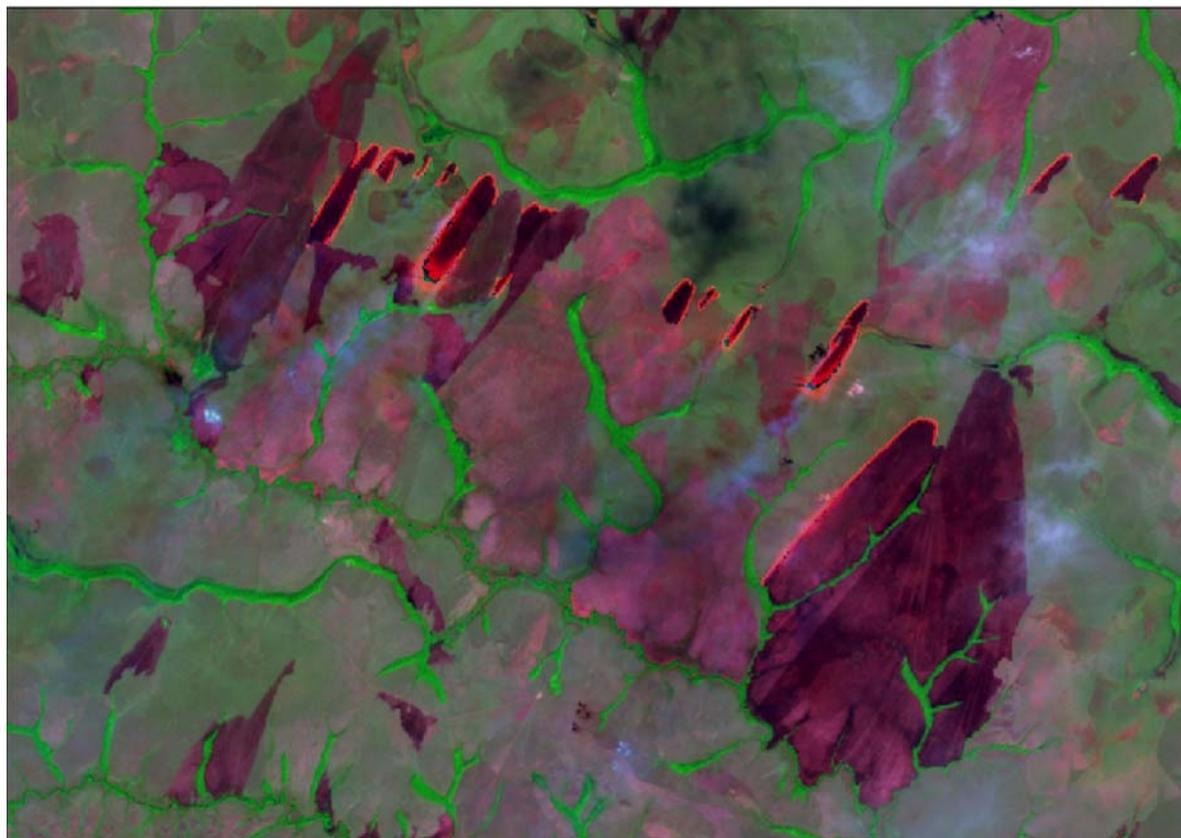


- para construção de um índice espectral para detecção de superfícies queimadas, o melhor espaço espectral é o IVP-IVM (GEMI3, NBR).

- a variação de reflectância espectral induzida pelo fogo é negativa no IVP e positiva no IVM, gerando um sinal bastante distinto.

sinal espectral

- Para visualização de áreas queimadas, funcionam bem as composições coloridas do tipo **R-IVM G-IVP B-Vis** (e.g. TM 743, ou AVHRR 321).



sinal espectral

- a maioria dos estudos de mapeamento de áreas queimadas, de escala regional/continental/global baseia-se em abordagens multi-temporais, de detecção de mudanças.
- tipicamente, a queima produz:
 - redução do albedo (com exceções...)
 - aumento de temperatura (albedo ↓, ET ↓)
 - perda de sinal fotossintético
 - perda de humidade da vegetação/solo (com exceções...)
- os algoritmos de detecção de área queimada usam um ou mais dos sinais espectrais gerados por estas alterações biofísicas da superfície. É a queimada vista como um **processo**, não como um tipo de **material**.



sinal espectral

- mas, o Diabo está nos detalhes... As exceções referidas incluem, p.ex.:
 - zonas áridas da Austrália, com vegetação escura sobre solos bastante claros. A queima eleva o albedo.
 - florestas boreais, em que a queima aumenta a irradiância solar sobre o solo, contribui para derreter o *permafrost* e induz aumento da humidade à superfície.
- zonas temporariamente alagadas (e.g. cabeceira do Zambeze, sul de África) também podem causar problemas.
- a colheita dos cereais, nos solos negros (*chernozem*) da Ucrânia e do Cazaquistão provoca falsos alarmes.
- a queda da folhagem em florestas caducifólias pode enganar algoritmos menos sofisticados.



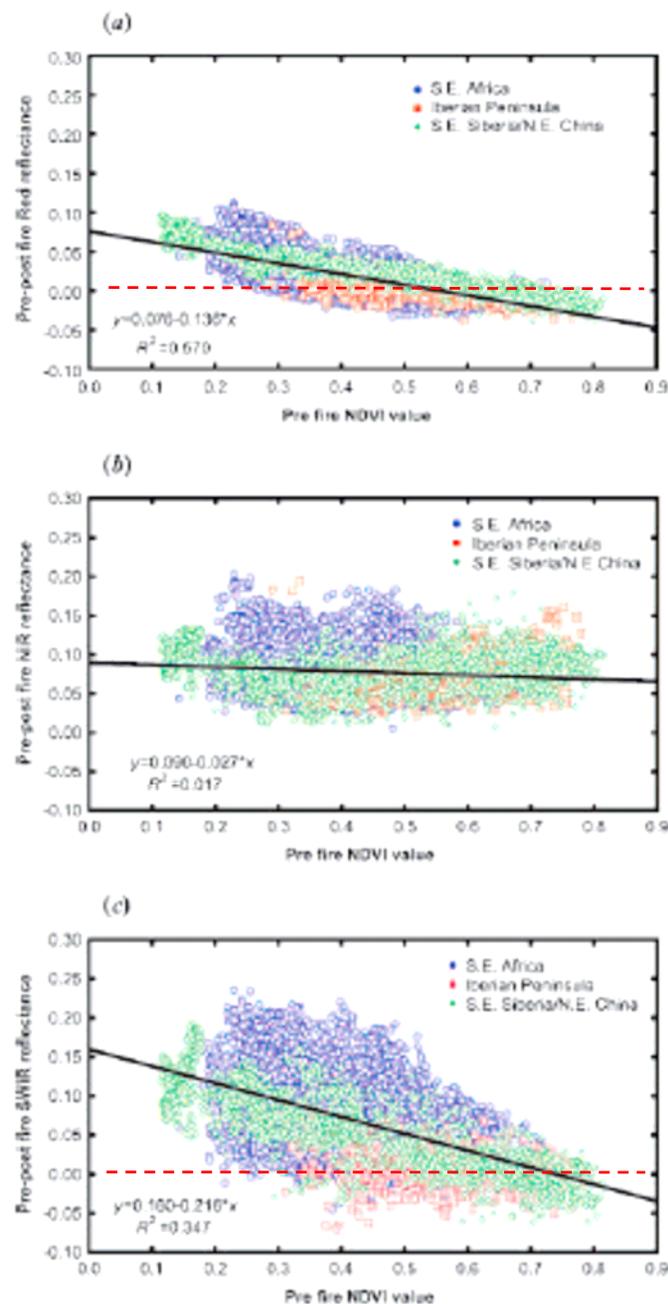
sinal espectral

- as alterações espectrais induzidas pelo fogo nas regiões do visível e do IV médio podem parecer ambíguas, contraditórias.
- na maioria das situações, a queima escurece a superfície, mas nalguns casos torna-a mais clara.
- isto depende do estado fenológico da vegetação antes do fogo:
 - quando o **NDVI pré-fogo é baixo** (e.g. erva seca, muito clara) a queima induz **escurecimento**.
 - quando o **NDVI pré-fogo é alto** e a vegetação razoavelmente escura (e.g. floresta) a queima pode **aclarar** a superfície, sobretudo se ficar exposto solo claro.
- este efeito pode ser incorporado num algoritmo, tornando a interpretação da variação espectral numa função do NDVI pré-fogo. Também poderia usar-se o próprio albedo.



senal espectral

- Relação entre a variação da refletância no Vermelho (a), IVP (b) e IVM (c) devida ao fogo, e o valor de NDVI antes do fogo.
- Dados SPOT-VGT do sul de África, Sibéria e Península Ibérica.

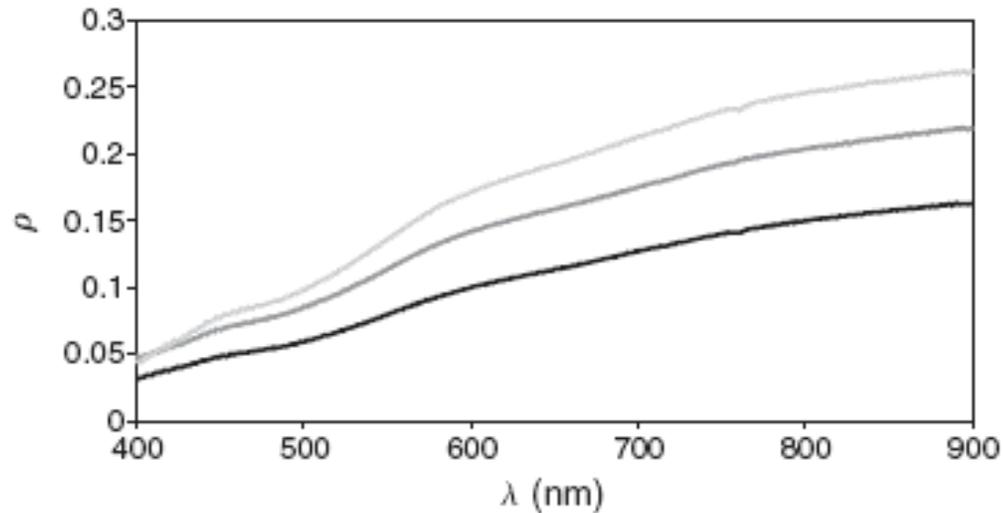


persistência

- a duração do sinal espectral produzido pelo carvão é curta, sobretudo quando o combustível queimado é muito fino, como a vegetação herbácea das savanas tropicais.



persistência

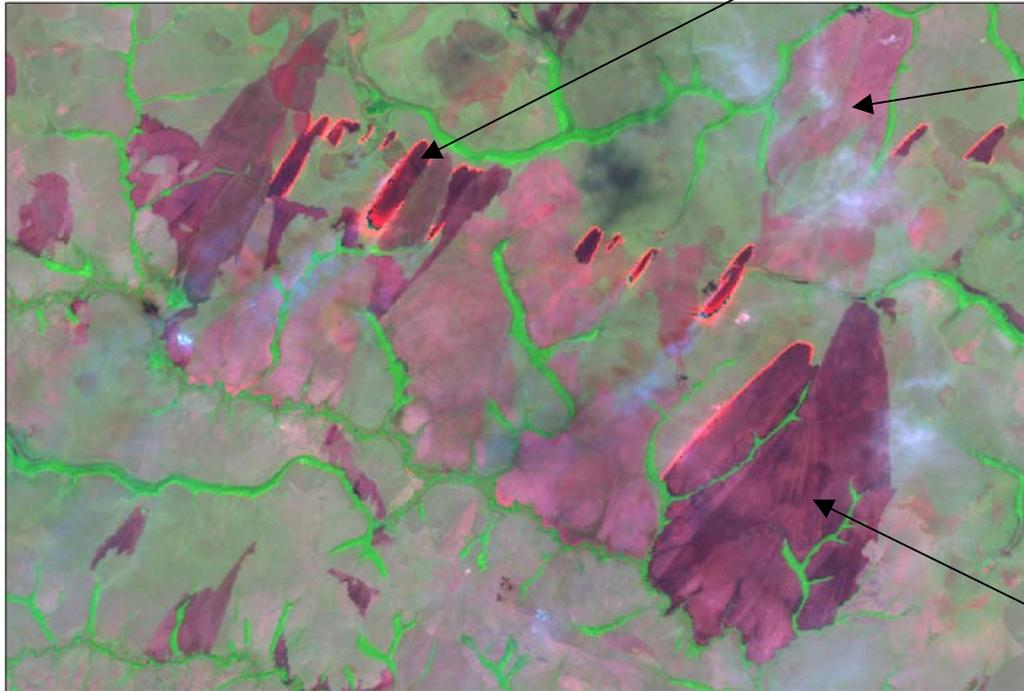


Pereira, 2003, IJWF

- dinâmica pós-fogo da reflectância espectral (ρ) de uma área queimada num prado hidromórfico da Província Ocidental da Zâmbia, no ano 2000. Linha inferior, 25 Agosto; linha central, 28 Agosto; linha superior, 1 Setembro.
- aos 800nm a reflectância aumentou de 0,15 para 0,25 (66%) em 1 semana, devido à remoção do carvão e exposição de solo claro.

persistência

recém queimado



**1
semana**

**1-2
dias**

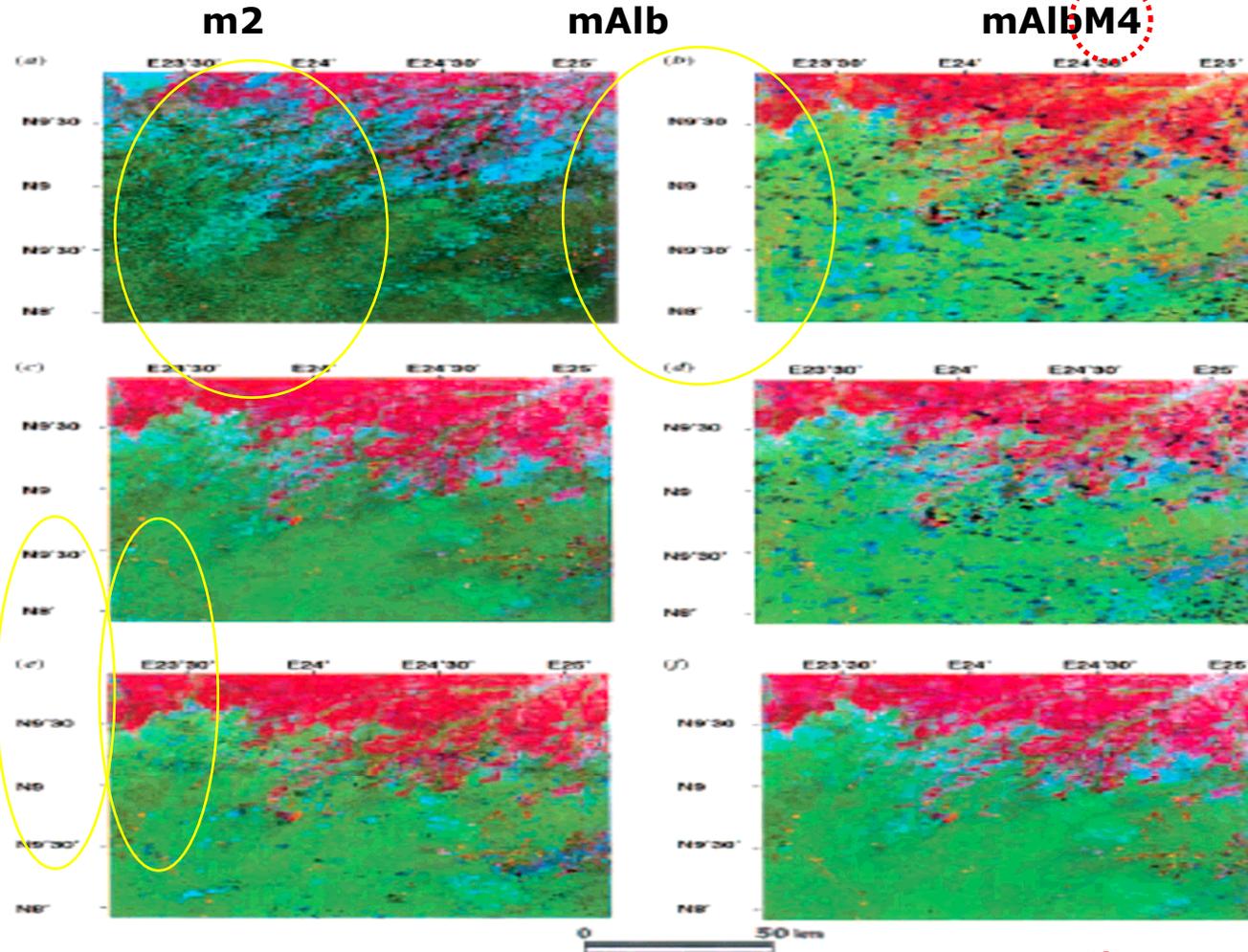
- ao fim de muito pouco tempo, o sinal espectral de uma savana queimada começa a ser dominado pela assinatura do solo. Em floresta, o sinal é mais persistente, porque os resíduos da combustão têm maior dimensão.

nuvens – compósitos

- a probabilidade média de ver nuvens quando se observa a Terra por satélite é de 0.62 no hemisfério N e de 0.53 no hemisfério S (WMO).
- a queima de vegetação ocorre durante a época seca, quando estas probabilidades são mais baixas. Mesmo assim, algumas regiões são problemáticas.
- a dificuldade de obter dados livres de nuvens estimulou o desenvolvimento de algoritmos para criação de **compósitos multi-temporais** de imagens. O MaxNDVI foi o 1º e é o mais usado.
- porém, o MaxNDVI prefere os pixels mais vegetados, isto é, pré-fogo. Isto atrasa a detecção da queima por um período mais ou menos longo.
- Entretanto, o sinal atenua-se...



nuvens - compósitos



m2

mAlb

mAlbM4

MNDVI

M4

m2M4

EXPRESSO
RCA 1996
AVHRR

Sousa et al., 2003,
IIRS

nuvens - compósitos

Sousa et al., 2003, IJRS

Compositing algorithm	Portugal	Central Africa	South America	Mean
MNDVI	1.241 (6)	1.766 (2)	1.623 (6)	1.543
m2	1.985 (2)	2.000 (1)	2.000 (1)	1.995
M4	1.968 (4)	2.000 (1)	1.869 (4)	1.946
mAlb	1.960 (5)	2.000 (1)	1.687 (5)	1.882
m2M4	2.000 (1)	2.000 (1)	1.932 (2)	1.977
mAlbM4	1.980 (3)	2.000 (1)	1.921 (3)	1.967
Mean	1.856	1.961	1.839	

- distâncias de Jeffries-Matusita entre assinaturas espectrais superfícies queimadas e não-queimadas, para 6 algoritmos de composição e 3 áreas de estudo for the six. Entre parêntesis a ordenação de cada algoritmo, em cada local. **MaxNDVI claramente o pior.**

nuvens – compósitos

- os algoritmos desenvolvidos para maximizar o sinal da vegetação verde não são adequados para a mapeamento de áreas queimadas. O maxNDVI é mesmo dos mais inadequados.
- o problema é mais fácil com sensores que têm canal térmico, o que facilita a exclusão das nuvens e das suas sombras.
- quando o sensor não tem canal térmico, funcionam bem algoritmos baseados na persistência das superfícies escuras, que não se verifica para as sombras das nuvens.



fumo

- nas regiões temperadas e boreais, onde o sinal espectral do carvão é mais persistente, pode esperar-se até ao fim de época de incêndios para fazer o mapeamento.
- nas savanas tropicais e prados temperados, o sinal é mais efêmero e o mapeamento tem de ser feita a intervalos relativamente curtos, durante a época seca, em simultâneo com a queima.
- mas, nessa altura, a atmosfera está bastante contaminada por aerossóis de fumo, que dificultam a observação da superfície e reduzem o contraste espectral entre diferentes tipos de cobertura do solo.

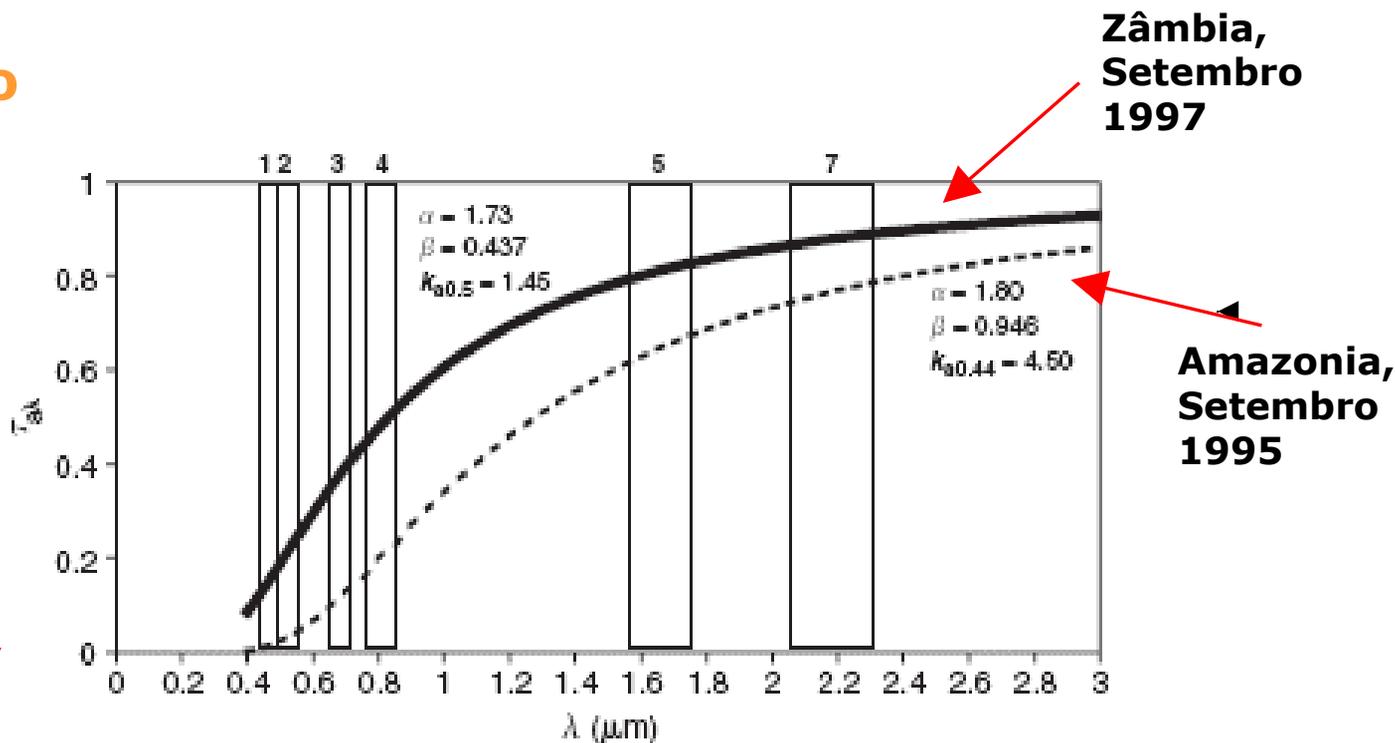


fumo

- as partículas de aerossol de fumo medem de $0.01\mu\text{m}$ a $1.0\mu\text{m}$, o que as torna muito eficientes a dispersar a radiação solar.
- o fumo da queima de biomassa também é um aerossol absorvente, porque contém concentrações elevadas de fuligem (*black carbon*).
- a perturbação causada à observação da superfície pelo aerossol de fumo pode quantificar-se através da **transmitância do aerossol**, $\tau_{a\lambda}$.



fumo



- α : parâmetro de Ångstrom, distribuição de tamanhos das partículas de aerossol.
- β : coeficiente de turbidez de Ångstrom, quantidade de aerossol na atmosfera, medida na vertical.
- $\kappa_{a\lambda}$: espessura óptica do aerossol, atenuação da radiação que se propaga através da atmosfera.
- λ : comprimento de onda da radiação.

fumo

- no caso da Amazónia, a transmitância do aerosol na gama do visível é <0.1 , sendo impossível observar a superfície. ◀
- no IVM a transmitância sobre para 0.6 – 0.8.
- durante a época seca, com a atmosfera carregada de fumo, os canais espectrais do visível são inúteis para observar a superfície.
- pelo contrário, a região do IVM, permite uma observação da superfície muito menos perturbada pelo efeito atmosférico.
- esta é mais uma razão para **preferir o espaço espectral IVP-IVM**, ao espaço espectral Vis-IVP, para o sensoriamento e mapeamento de áreas queimadas.



sub-bosque

- nas savanas e florestas tropicais predominam os fogos de superfície, que não consomem o combustível aéreo. ◀
- a intercepção da radiação e a projecção de sombras pelo dossel dificultam o sensoriamento dos fogos de superfície.
- a dificuldade aumenta com a densidade da floresta e com o seu índice de área foliar.
- estudámos o problema no “miombo” (savana arbórea semi-caducifólia (decídua?)) do sul de África.
- os resultados obtidos deverão ser mais extrapoláveis para o Cerrado do que para a floresta tropical húmida.



introdução | sinal espectral | persistência | nuvens - compósitos | fumo | **sub-bosque** | padrão espacial | exemplos |

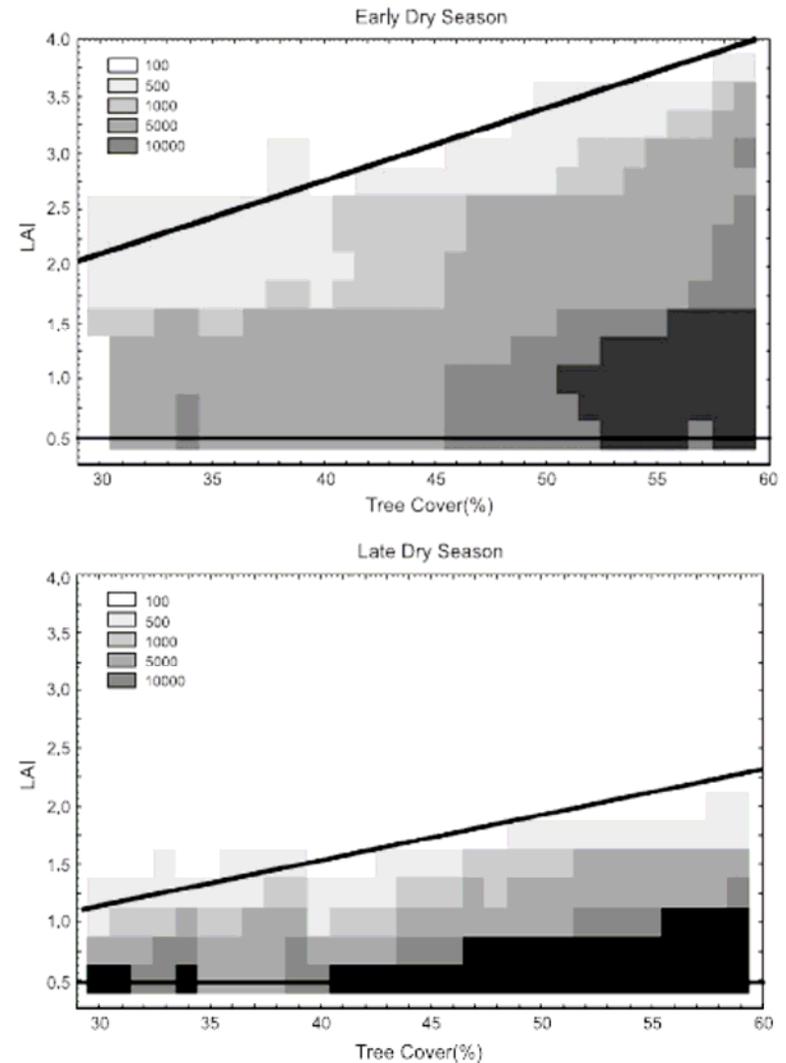
sub-bosque



- “miombo” em Angola e na Zâmbia.

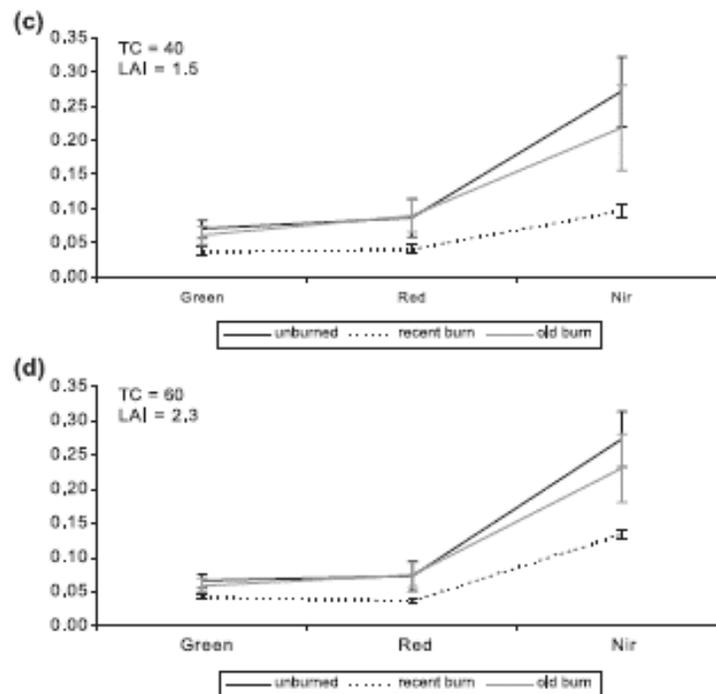
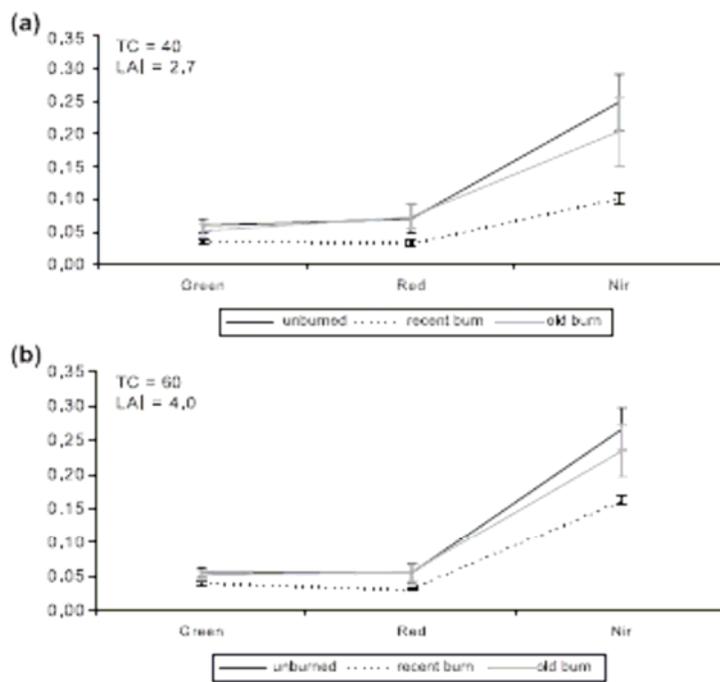
sub-bosque

- análise de simulação com o modelo HGORT.
- dados dendrométricos recolhidos no local: densidade arbórea, dimensões das copas, índice de área foliar.
- dados espectro-radiométricos: assinaturas espectrais de solo nú, erva verde e erva seca, área queimada, folhas de árvores (reflectância e transmitância).



sub-bosque

Pereira et al., 2004, RSE



- assinaturas espectrais modeladas, $R(\theta_I, \theta_V, \Phi_R)$, para vários pontos ao longo da recta de regressão do percentil 99. a) e b) início da época seca; c) e d) fim da época seca. As distâncias de JM entre queimado de 1 mês e não queimado são (a) 1.250; (b) 1.248; (c) 1.251; (d) 1.250. As distâncias JM entre não-queimado e recém-queimado atingem o valor máximo de 1.414 em todos os casos.

sub-bosque

- as áreas recém-queimadas no sub-bosque do *miombo* são claramente separáveis das não-queimadas, usando dados espectrais no verde-vermelho-IVP. Também é possível discriminar queimadas mais antigas (algumas semanas), mas com menor exactidão.
- os resultados da simulação são muito insensíveis a variações da estrutura das matas, para as gamas de valores testados. Respondem quase exclusivamente a diferenças nas propriedades espectrais ao nível do solo, porque o dossel é bastante transparente/transmissivo.
- a análise de dois casos de geometria de iluminação/observação revelou que a separabilidade espectral de queimadas no sub-bosque aumenta à medida que a geometria se aproxima da situação de **hotspot**.



padrão espacial

- há uma grande variabilidade, à escala global, da extensão de queima, dos padrões espaciais de área queimada e das funções de distribuição dos tamanhos dos fogos.
- em trabalhos de escala continental/global, usam-se imagens de resolução espacial relativamente grosseira, o que pode introduzir enviesamento no mapeamento dos fogos e estimativa da área queimada.
- o sinal e a magnitude do enviesamento dependem, precisamente, da extensão da área queimada, seu grau de fragmentação e importância relativa de grandes vs. pequenas queimadas.

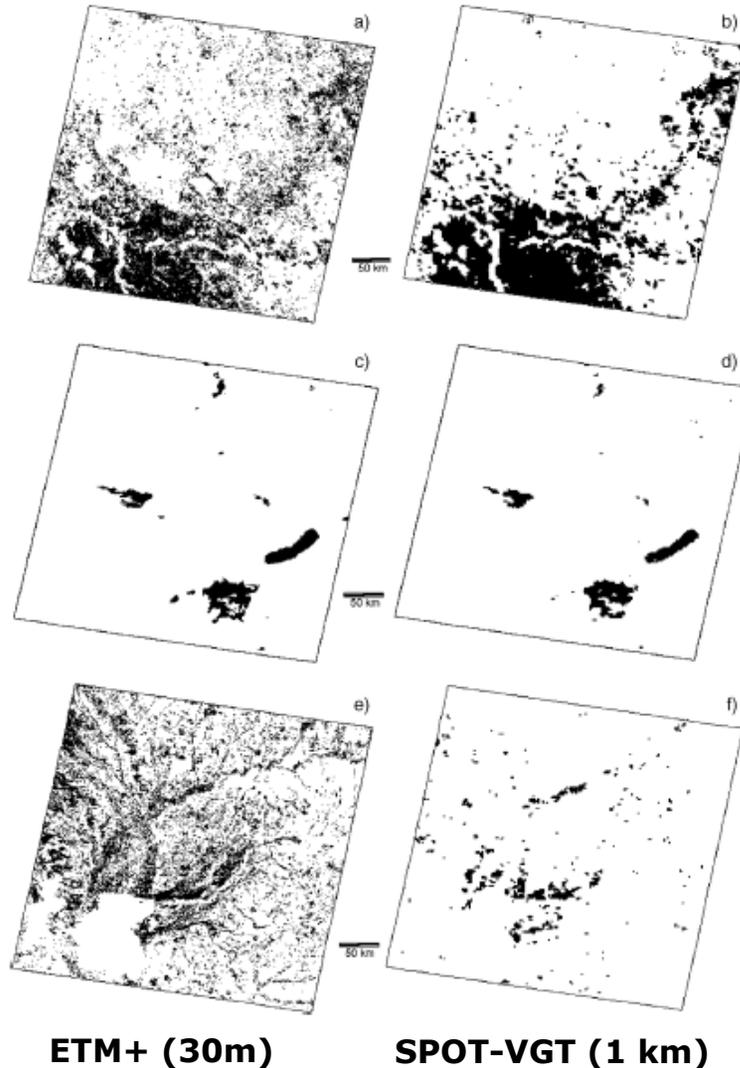


padrão espacial

- a maioria dos algoritmos usados para criar produtos de escala continental / global está vocacionada para capturar áreas queimadas relativamente grandes e compactas.
- os padrões heterogêneos de fogo, resultantes de regimes de com queima em mosaico são problemáticos para a maioria das actuais abordagens de detecção e mapeamento de queimadas.
- savanas tropicais e diversas áreas agrícolas exibem estes padrões espaço-tempo problemáticos. O enviesamento induzido pela baixa resolução pode produzir uma subestimativa importante da área queimada e/ou desvios no perfil sazonal da queima, em regiões com regimes de fogo-mosaico.



padrão espacial



Dindar,
Sudão

Okavango,
Botswana

Mongu,
Zambia

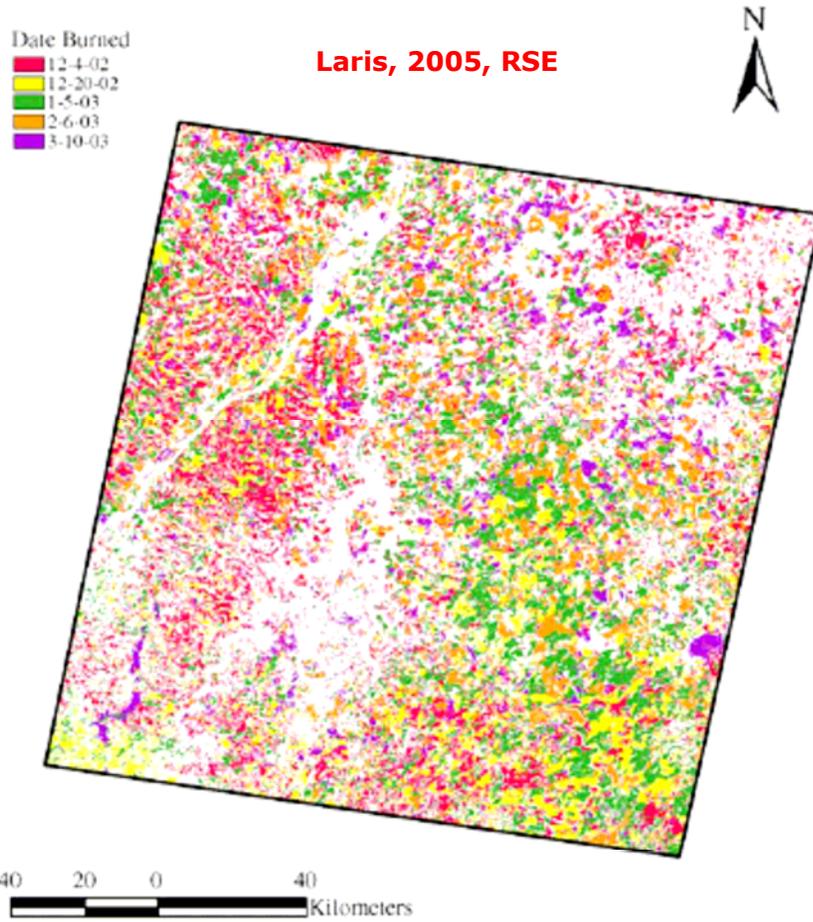
Silva et al.,
2005, RSE

- a concordância entre estimativas de área queimada Landsat e VGT varia em função do padrão espacial e distribuição do tamanho dos fogos.

- áreas pequenas e fragmentadas conduzem a forte subestimativa, à resolução de 1km.

- com áreas grandes e compactas, as estimativas VGT (1km) são bastante exactas e até pode ocorrer ligeira sobrestimativa.

padrão espacial

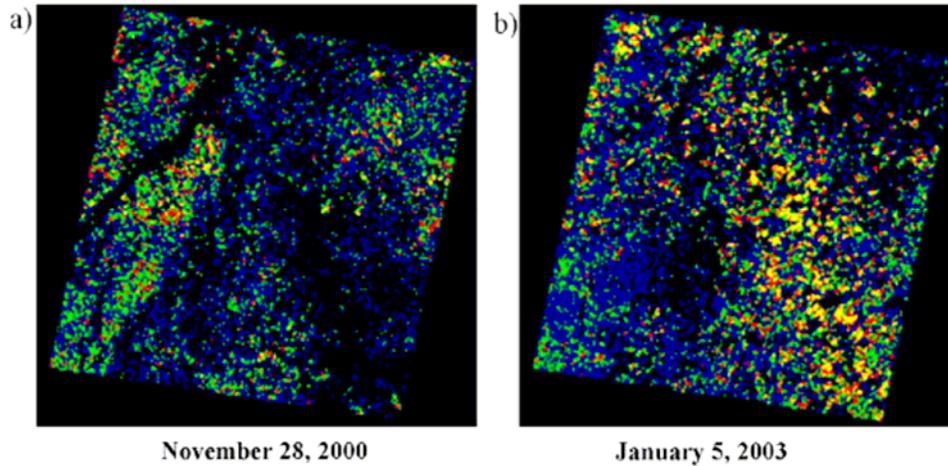


- a grande extensão de área queimada no fim da época resulta da acumulação de muitas pequenas manchas.

- se o mapeamento for frequente, as áreas serão menores e os erros de omissão maiores.

Fig. 2. Burn area for December 4, 2002–March 10, 2003. This seasonal-mosaic is created by the indigenous burning practices.

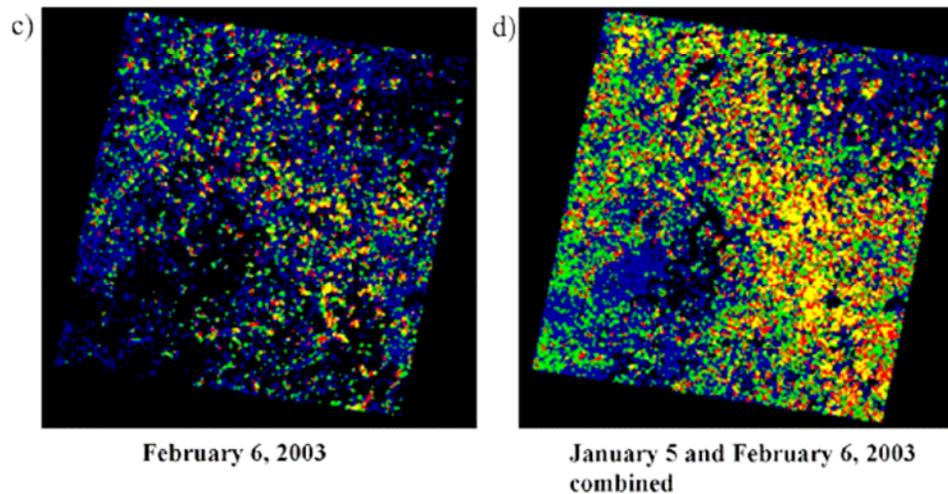
padrão espacial



% of burned area in 1km x 1km cells



Laris, 2005, RSE



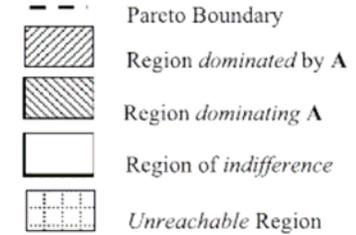
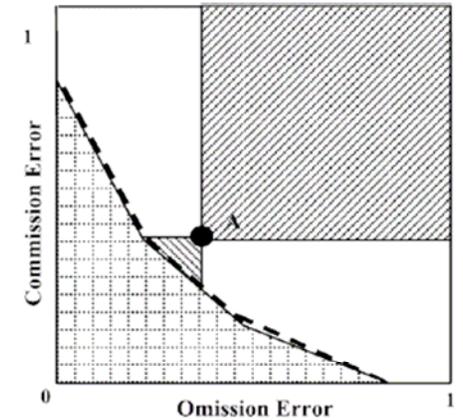
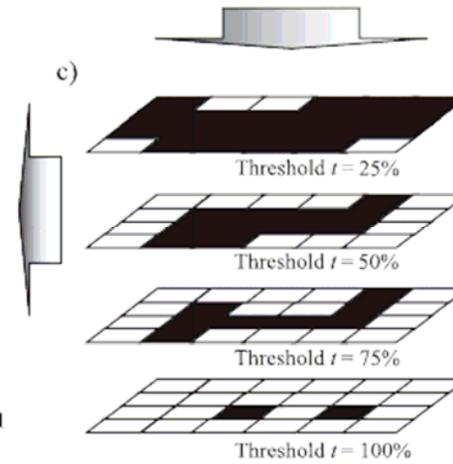
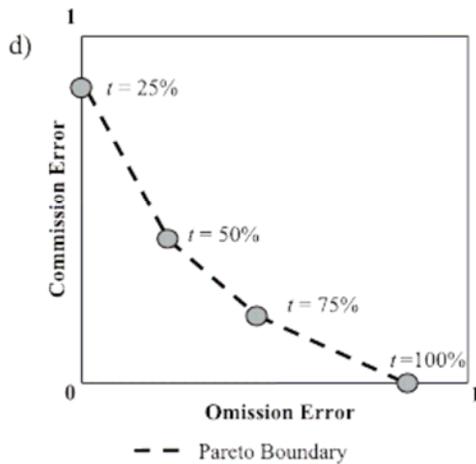
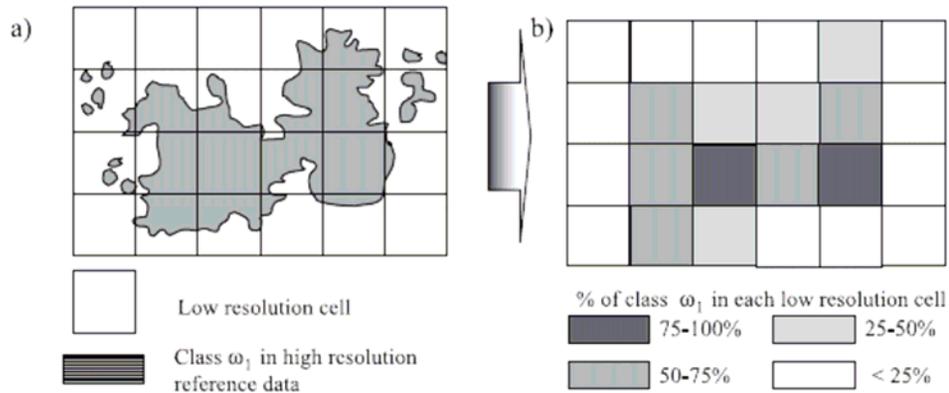
- em cada período, há poucos pixels de 1km com elevada fracção de área queimada. ◀
- muitos escapariam à classificação como queimado.
- na imagem final, cumulativa, a tarefa está facilitada porque as áreas queimadas contíguas são maiores.
- a exactidão da classificação da imagem cumulativa será maior, mas a frequência do produto será menor.

padrão espacial

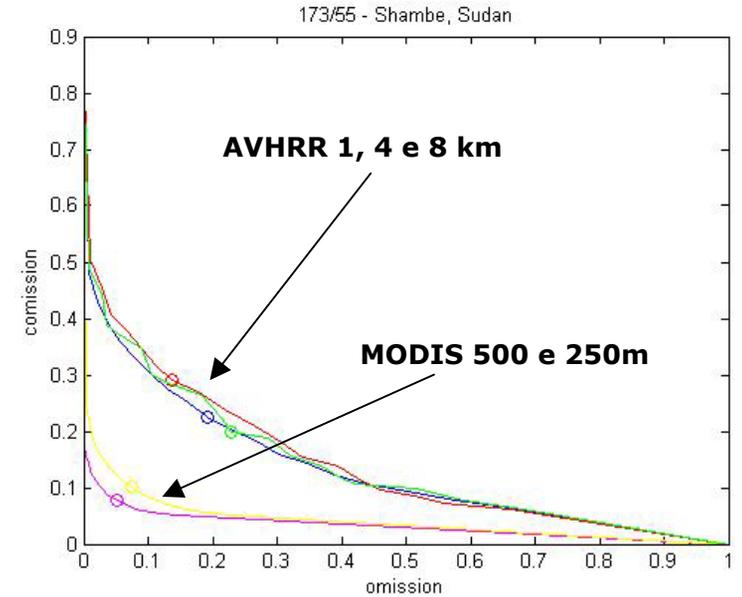
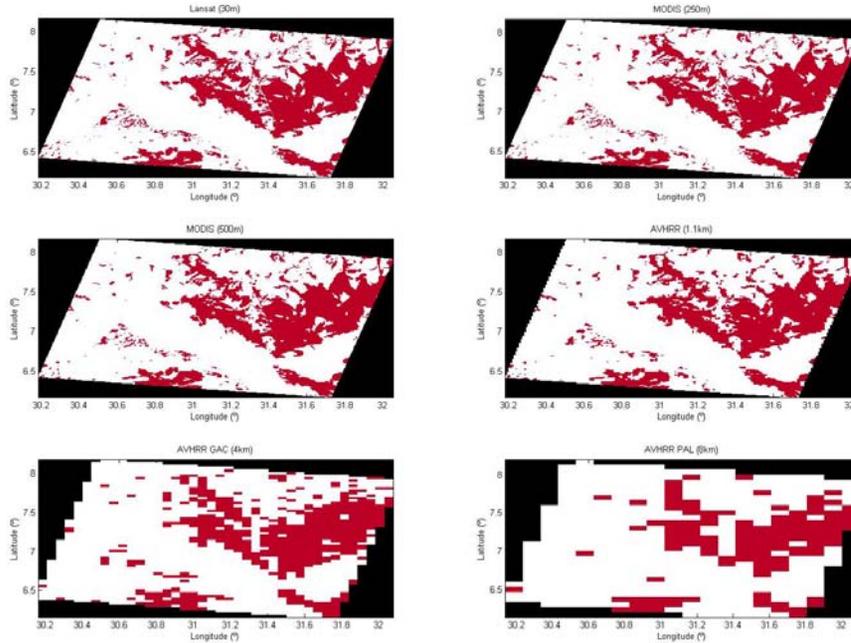
- **fronteira de Pareto:** metodologia baseada em índices estatísticos extraídos da matriz de erro clássica, para avaliar a influência da baixa resolução espacial dos dados na exactidão do produto final, obtido com abordagens de classificação *hard*.
- o uso da fronteira de Pareto pode esclarecer em que medida a exactidão limitada de um mapa de baixa resolução espacial se deve a mau desempenho do algoritmo de classificação, ou à baixa resolução das imagens classificadas.
- criámos um conjunto de cerca de 70 mapas de áreas queimadas, baseado em imagens Landsat, cuja resolução espacial foi degradada, para avaliar o **ótimo de Pareto**, ou seja, a maior exactidão de classificação possível, dado o padrão espacial das queimadas e a dimensão do pixel de baixa resolução.



padrão espacial

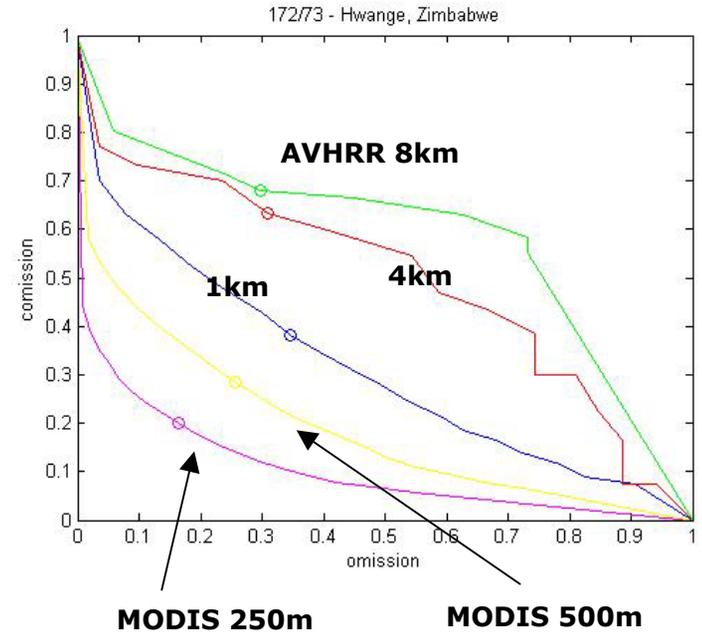
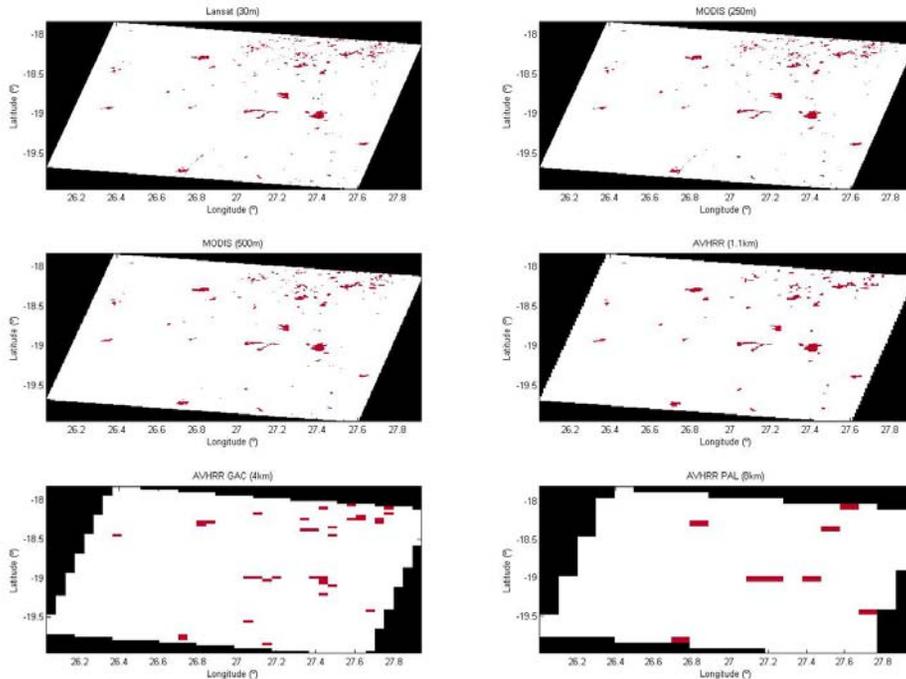


padrão espacial



- num regime de fogo com grandes áreas contíguas queimadas, pode, em princípio, obter-se resultados bastante exactos, se o algoritmo de classificação for adequado. É o caso da savana herbácea do Sul do Sudão.

padrão espacial



- padrão de pequenas queimadas, em região agrícola do Zimbabwe. O desempenho dos sensores de resolução $\leq 1\text{km}$ conduz a erros de estimativa substanciais, mesmo assumindo um classificador perfeito.

padrão espacial

- o objectivo é avaliar os limites da exactidão que se podem esperar na classificação de áreas queimadas, com dados de sensores com resolução espacial variando entre os 250m ◀ (MODIS) e os 8km (Pathfinder AVHRR Land).
- o estudo cobre as principais ecoregiões da Terra, onde o fogo é um processo ambiental importante e iniciou-se com 70 mapas Landsat do ano 2000, obtidos sem um esquema formal de amostragem estatística.
- os mapas Landsat que constituem a base das simulações abrangem a floresta boreal Siberiana e norte-americana, regiões temperadas da Europa e EUA, estepes asiáticas, diversas zonas agrícolas, savanas tropicais e zonas áridas da América do Sul, África e Austrália.



padrão espacial

- a análise de Pareto permite:
 - estabelecer antecipadamente limites de exactidão na estimativa de área queimada, que variarão entre ecoregiões.
 - identificar regimes de fogo susceptíveis de não ser capturados, a resoluções espaciais relativamente grosseiras.
 - quantificar o compromisso entre frequência e exactidão do mapeamento de áreas queimadas.
 - distinguir as proporções do erro de classificação devidas a limitações do algoritmo e à resolução espacial usada, explicitando o potencial para aperfeiçoamento do algoritmo.



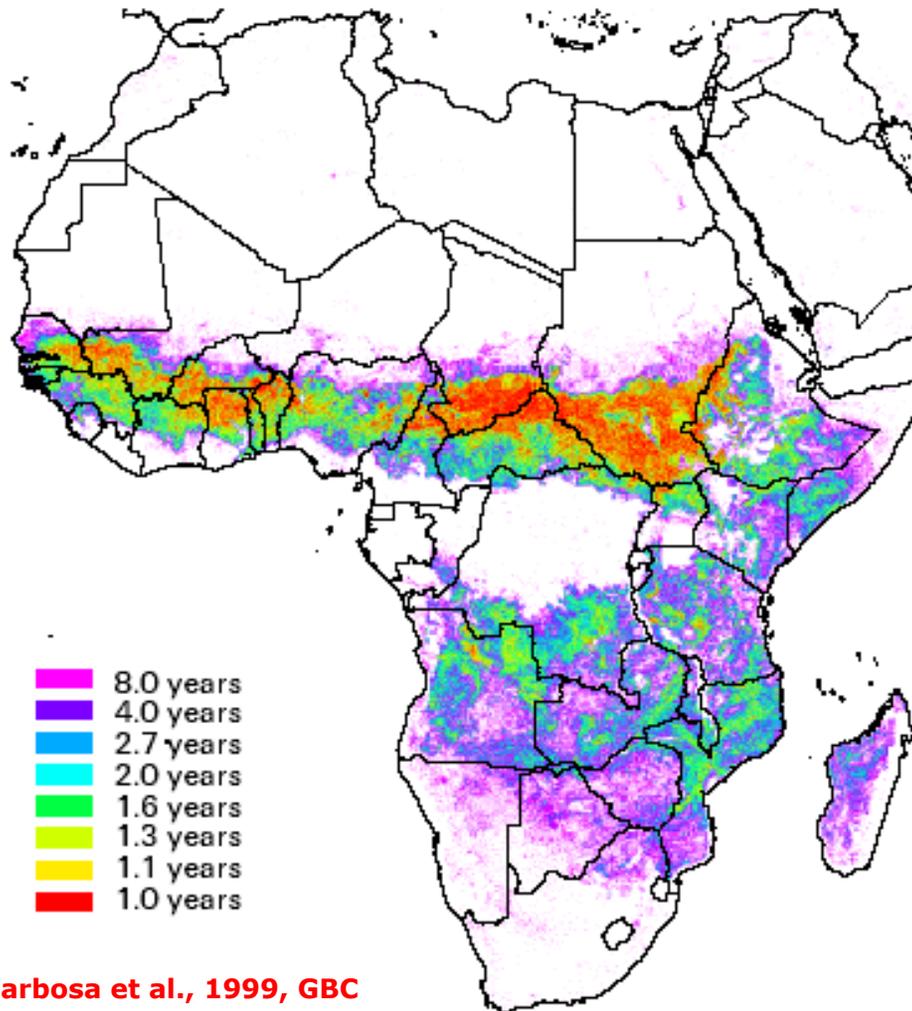
exemplos

- os conceitos expostos têm sido aplicados em vários estudos de mapeamento de áreas queimadas, de âmbito regional a global.
- a maior parte desses estudos serve de base à estimativa de valores de queima de biomassa e de emissões de aerossóis e gases com efeito de estufa daí resultantes.
- os nossos trabalhos têm recorrido sobretudo a dados dos satélites NOAA/AVHRR, SPOT-Vegetation e também Meteosat, com resolução espacial variável entre 1km e 5km.



introdução | sinal espectral | persistência | nuvens - compósitos | fumo | sub-bosque | padrão espacial
| **exemplos** |

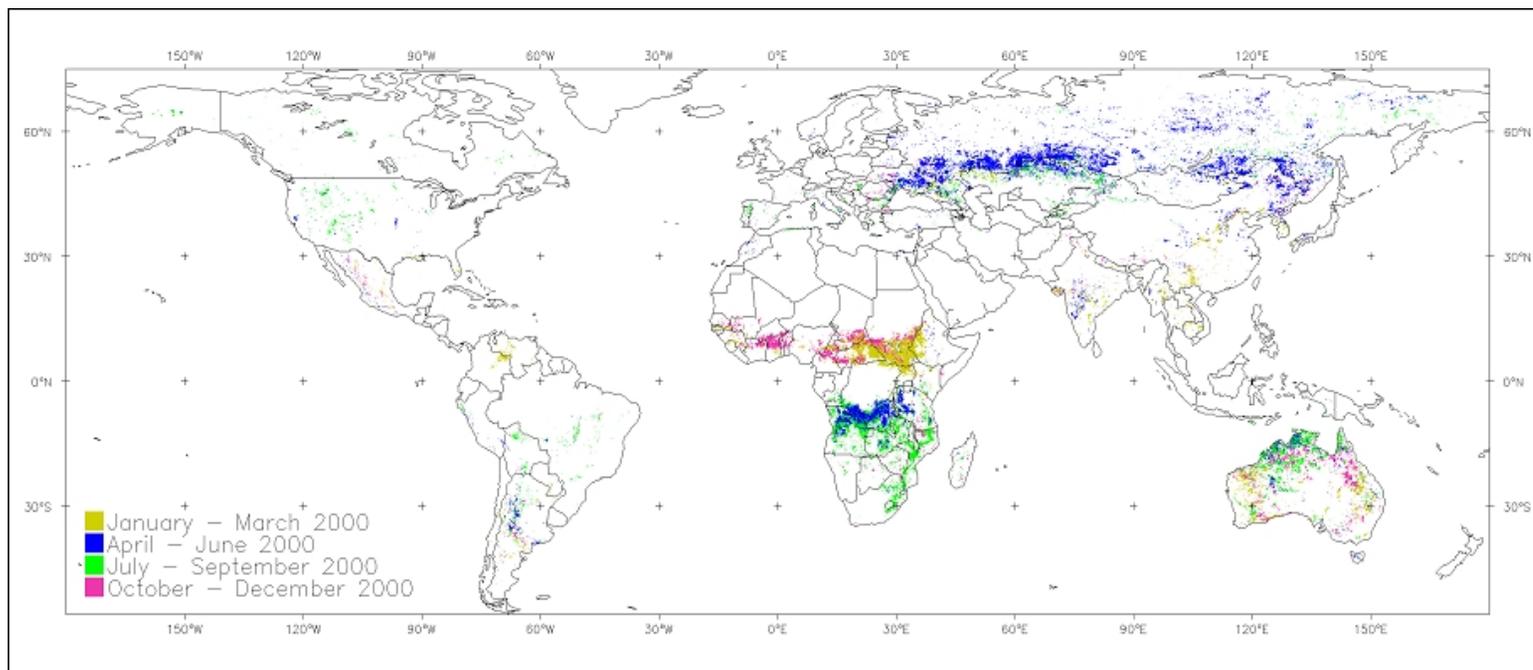
exemplos



Barbosa et al., 1999, GBC

- 1º estudo continental, multi-anual de queima de vegetação.
 - mapeamento da área queimada e estimativa de emissões pirogénicas em África, 1982 – 1991.
 - tese de doutoramento de Paulo Barbosa (JRC/ISA, 2000).
- destaque:** a revelação da maior frequência de fogo no hemisfério N de África.

exemplos

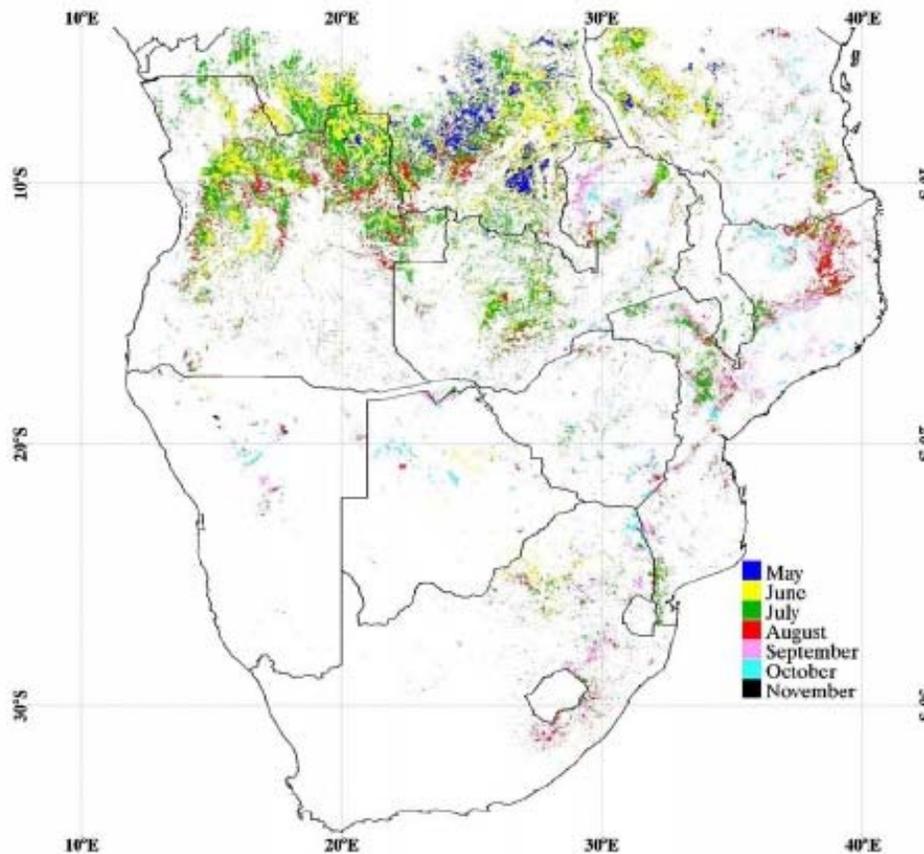


Tansey et al., 2004, JGR

- **projecto Global Burned Areas 2000. Inserido no UN Millenium Assessment e liderado pelo JRC. A equipa do DEF/ISA foi responsável por maior área geográfica do que qualquer outra: África, América do Sul tropical, Europa Ocidental e colaboração na Austrália.**
- **destaque:** a importância das queimadas agrícolas na zona fronteiriça Rússia-Cazaquistão.

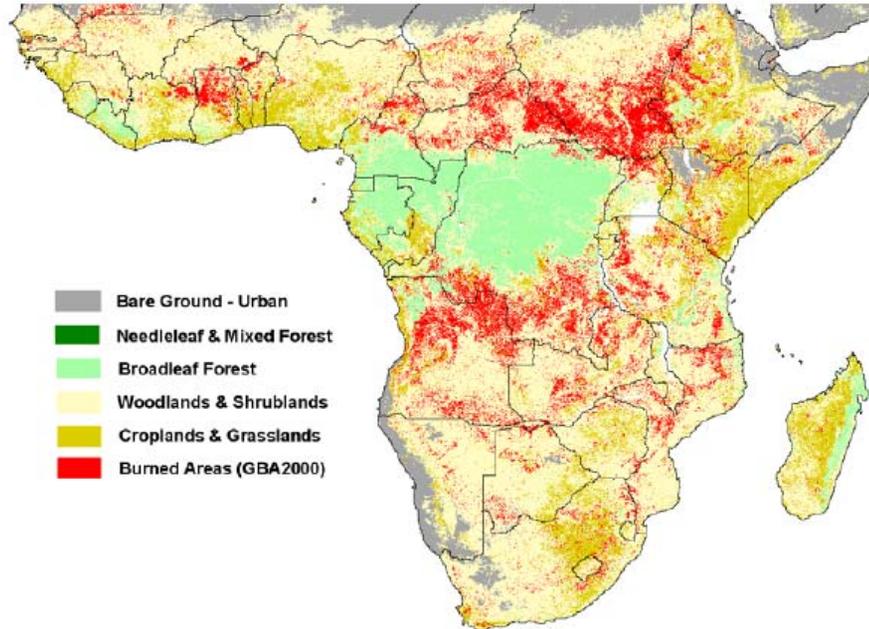
introdução | sinal espectral | persistência | nuvens - compostos | fumo | sub-bosque | padrão espacial
| **exemplos** |

exemplos



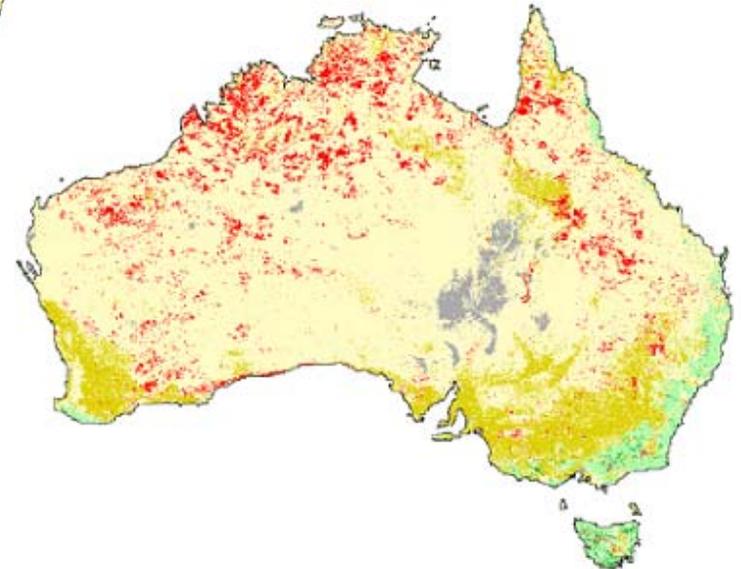
- mapeamento da área queimada mensal no hemisfério Sul de África, no ano 2000, no âmbito do SAFARI2000 e GBA2000.
- teses de doutoramento de João Silva e de Ana Sá (DEF/ISA)
- **destaque:** revelação da extensão da área queimada em Angola e RD Congo e revisão da sazonalidade do fogo na região.

exemplos



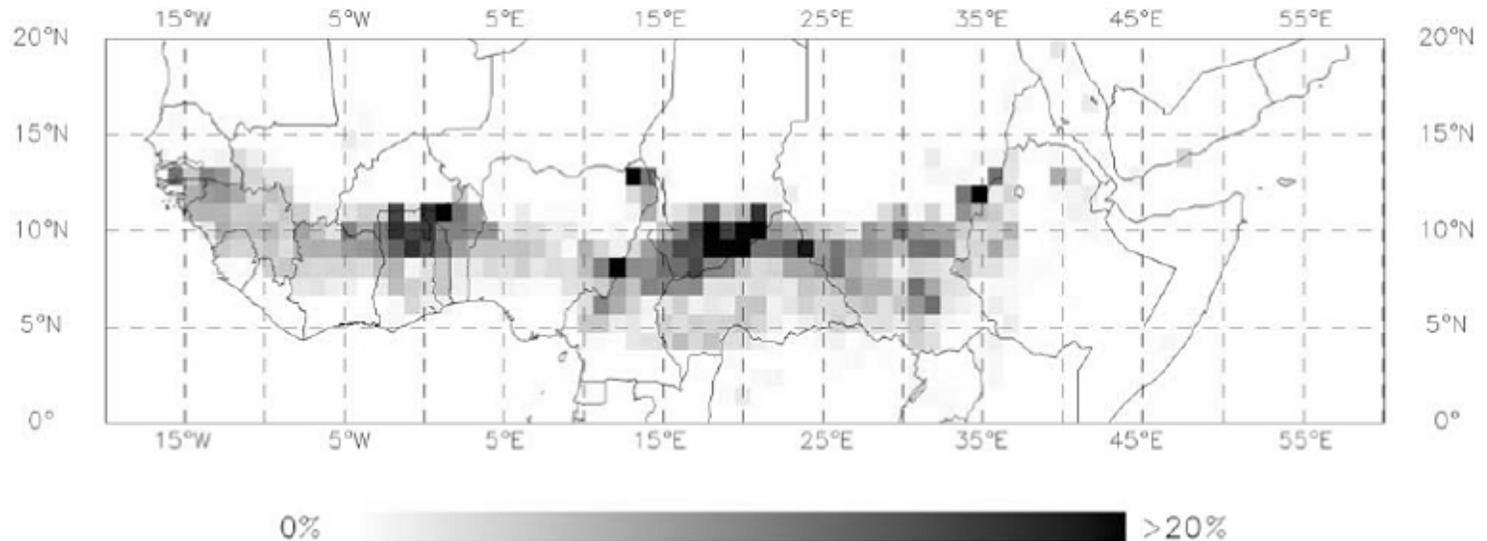
- GBA2000: Área queimada em África e Austrália. ◀

- teses de doutoramento de João Silva e Daniela Stroppiana (DEF/ISA).



destaque: confirmação quantificada da predominância dos fogos tropicais na Austrália.

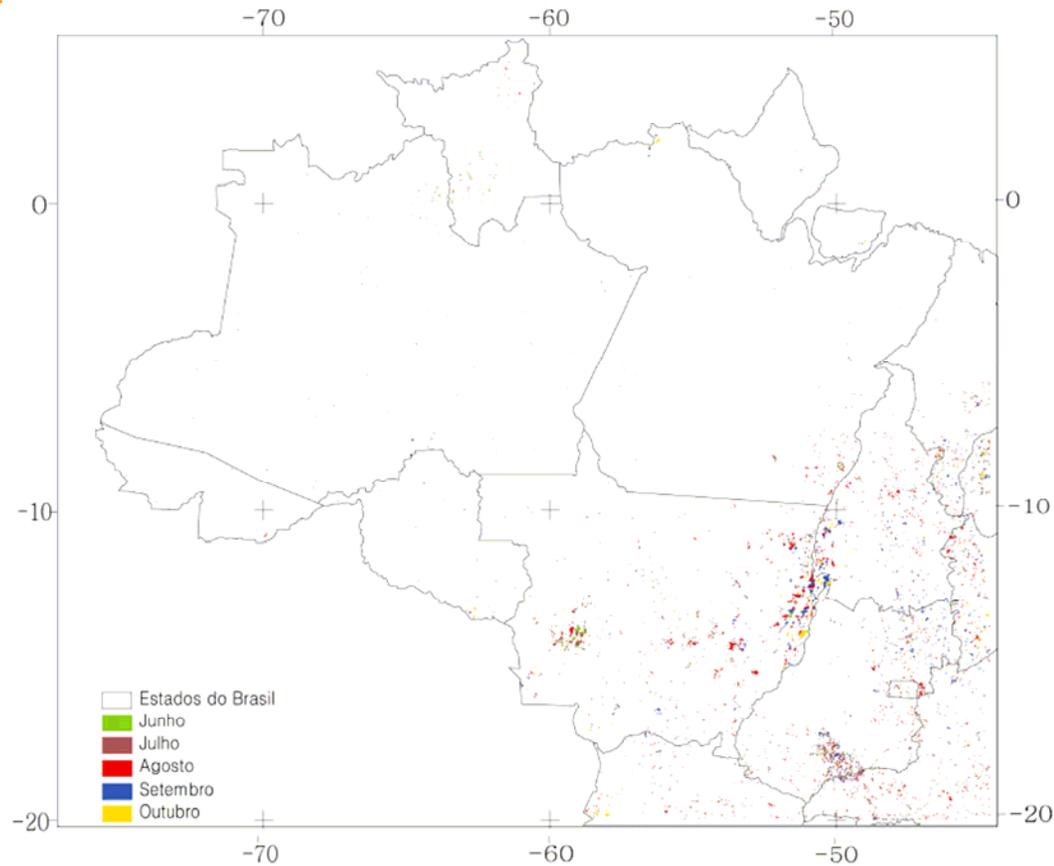
exemplos



Govaerts et al., 2002

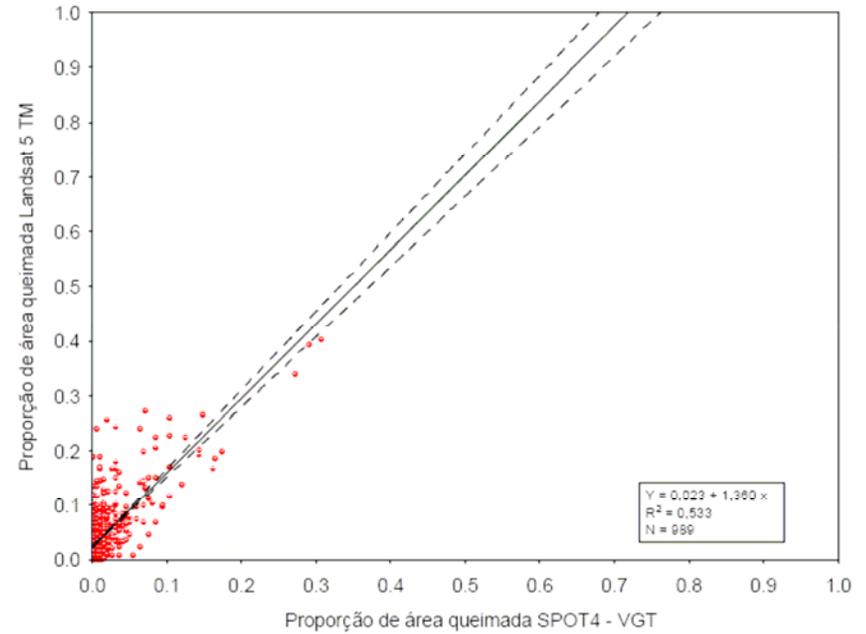
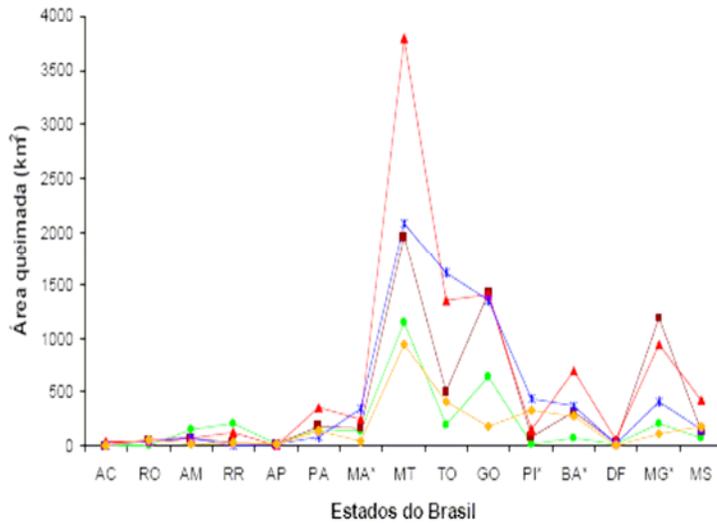
- decréscimo relativo do albedo da superfície, no hemisfério N de África, provocado pela queima de biomassa, em Janeiro e Dezembro de 1996.
- **destaque:** concentração dos valores mais elevados na savana Sudanesa, mais árida do que a savana guineense.

exemplos



- área queimada na Amazônia Legal, na época seca de 2000, cartografada com imagens SPOT-VGT. Tese doutoral de A. Sousa.

exemplos



- distribuição mensal da área queimada por estado (2000) e relação de calibração para estimativa corrigida de área queimada, entre dados SPOT-VGT e Landsat TM/ETM+. Tese doutoral de A. Sousa.

agradecimentos

- os trabalhos apresentados foram financiados por diversos organismos, entre os quais a Comissão Europeia, a Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT, Portugal), a Organização Europeia para a Exploração de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT), a Fundação Luso-Americana e o Programa de Desenvolvimento Educativo para Portugal (PRODEP).
- a todos os meus colaboradores e co-autores, especialmente àqueles cujas publicações científicas foram aqui mencionadas.

