



ISSN = 1980-993X – doi:10.4136/1980-993X

www.ambi-agua.net

E-mail: ambi-agua@agro.unitau.br

Tel.: (12) 3625-4212



O uso de produtos operacionais de sensoriamento remoto para a análise ambiental na América do Sul (doi:10.4136/ambi-agua.160)

Gabriel Pereira¹; Mariane Mayumi Garcia Takeda¹; Yosio Edemir Shimabukuro¹; Francielle da Silva Cardozo¹; Gustavo Bayma Siqueira da Silva^{1,2}; Elisabete Caria Moraes¹; Fabrício Brito Silva¹; Samuel Martins da Costa Coura¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Divisão de Sensoriamento Remoto - DSR

Avenida dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, São José dos Campos, SP - Brasil. CEP: 12227-010

{gabriel, takeda, yosio, cardozo, bayma, bete, fabricio, samuel}@dsr.inpe.br

²Embrapa Monitoramento por Satélites, Av. Soldado Passarinho, 303. Fazenda Chapadão

CEP: 13070-115 Campinas, SP, Brasil. E-mail: bayma@cnpm.embrapa.br

RESUMO

O uso e cobertura da terra apresentam um papel fundamental em diversos modelos biogeoquímicos que simulam os processos e conexões com os sistemas terrestres, sendo um importante componente para tomadas de decisões relacionadas com o manejo dos ecossistemas. O avanço das técnicas de obtenção de dados ambientais a partir do sensoriamento remoto (SR), em conjunto com o surgimento de novos produtos operacionais, passaram a permitir novas alternativas para o aprimoramento da análise e monitoramento ambiental. Dessa forma, o objetivo deste estudo é analisar as características ambientais da América do Sul durante os anos de 2000 a 2005, abordando questões sobre as queimadas e as fitofisionomias presentes na área de estudo, utilizando-se quatro produtos derivados de dados orbitais: o GLOBCOVER, o *Vegetation Continuous Field* (VCF), a energia radiativa do fogo (FRP) proveniente do sensor MODIS e os dados de precipitação obtidos pelo *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Inicialmente, os produtos GLOBCOVER e VCF foram analisados e, posteriormente, utilizados para uma análise quantitativa da distribuição espacial da base de dados do FRP. Os resultados mostram que o produto GLOBCOVER possui uma tendência de superestimar áreas de florestas e de subestimar áreas urbanas e de manguezais. A análise espacial dos focos de queimadas no mapa de cobertura do GLOBCOVER indica que a maior incidência de queimadas está localizada no arco do desmatamento, na borda da Floresta Amazônica, ocorrendo principalmente em áreas de Florestas Ombrófila Densa e Semi-Deciduais. A análise temporal dos dados de FRP mostra que as áreas de queimadas concentram-se em regiões de florestas tropicais e em áreas de Cerrado.

Palavras-chave: Uso e cobertura da terra; GLOBCOVER; VCF; FRP; queimadas.

The use of remote sensing products for environmental analysis in the South America

ABSTRACT

Land use and land cover play a major role in several biogeochemical models that simulate the processes and connections with terrestrial systems, being an important component for taking decisions in ecosystem management. The advance of techniques of obtaining data from remote sensing (RS), combined with the emergence of new operational products, offers alternatives to improve the environmental analysis and monitoring. In this manner, the objective of this study is to analyze the environmental characteristics of South America during 2000 to 2005 time periods, using four remote sensing databases: the

GLOBCOVER, the Vegetation Continuous Field (VCF), MODIS Fire Radiative Power (FRP) and the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Initially, GLOBCOVER and VCF products were analyzed and utilized afterwards for quantitative analysis of the spatial distribution of the FRP database. The results show that GLOBCOVER has a tendency to overestimate forest classes and to underestimate urban and mangroves areas. The analysis of hot pixels on the GLOBCOVER product indicates that the highest incidence of fires are located in the deforestation arc, in the Amazon forest border, occurring mainly over vegetation cover composed mainly of broadleaved evergreen or semi-deciduous forest. A time series analysis of FRP database indicates that biomass burning spreads over broadleaved evergreen or semi-deciduous forest and savannah areas.

Keywords: Land use and land cover; GLOBCOVER; VCF; FRP; biomass burning.

1. INTRODUÇÃO

O uso e cobertura da terra apresentam um papel fundamental em diversos modelos ambientais que simulam os processos e conexões entre a superfície terrestre e a atmosfera. As mudanças nos elementos da superfície terrestre podem alterar o balanço de energia (Kaufman et al., 1998a, 1998b; Christopher et al., 1985; Tarasova et al., 1999; Tarasova et al., 2000; Tarasova e Eck, 2000; Christopher et al., 2005; Li et al., 2000; Wagner et al., 2001), a química atmosférica (Crutzen e Andreae, 1990; Fishman et al., 1996; Reid et al., 1996, 1999), a evapotranspiração e a precipitação (Nobre et al., 1991, 1998).

Os gases traços e aerossóis liberados na queima de biomassa, compostos principalmente por materiais orgânicos oxidados, possuem propriedades moleculares que interagem com a radiação eletromagnética (REM) e ocasionam a absorção e espalhamento desta. As interações desses compostos radiativamente ativos com a REM e as alterações das propriedades da superfície terrestre provocam alterações significativas nos fluxos de calor latente e sensível, nos ciclos biogeoquímicos e na nucleação de nuvens (Kaufman et al., 1990).

Ainda, o uso e cobertura da terra são de fundamental importância para as tomadas de decisões e análise dos impactos ambientais ocasionados pelos fatores antrópicos.

A América do Sul apresenta uma dinâmica diversificada no uso e cobertura da terra, associada a diversos fatores como, por exemplo, a expansão da fronteira agrícola, a pecuária e o extrativismo florestal. Nesse mesmo contexto, as queimadas apresentam uma variabilidade temporal e espacial diretamente associada com o manejo de pastagens, controle de pragas, fixação de nutrientes em áreas agrícolas, desmatamento da Floresta Amazônica, entre outros. Anualmente, as queimadas consomem vastas áreas de pastagem e florestas ao redor do globo, liberando uma quantidade imensurável de gases traços e aerossóis para atmosfera (Crutzen e Andreae, 1990).

O avanço das técnicas de sensoriamento remoto (SR), combinado com o surgimento de novos satélites e produtos operacionais, permite a obtenção de informações físico-químicas e biológicas de grandes áreas da superfície terrestre. Podem ser citados como exemplo os dados do mapeamento do uso e cobertura da terra, denominado GLOBCOVER, desenvolvido pela *European Space Agency* (ESA) em cooperação com diversas instituições mundiais (Arino et al., 2005). Esse mapeamento foi realizado a partir da aquisição de imagens orbitais do sensor *Medium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS). Também podem ser citados os satélites ambientais da plataforma *Earth Observing System* (EOS) coordenados pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Atualmente, vários produtos derivados do SR permitem a análise temporal das características dos objetos terrestres, como, por exemplo, os dados de produtividade primária, VCF (*Vegetation Continuous Field*), refletância de superfície, albedo e temperatura medidas pelo sensor MODIS, dados de precipitação obtidos pelo TRMM, entre outros (Hansen et al., 2003).

Apesar dos esforços de cada programa em disponibilizar gratuitamente os dados, esses produtos derivados do sensoriamento remoto apresentam limitações inerentes a cada tipo de processamento, originando confusões na identificação e delimitação de diferentes usos e cobertura da terra (Herold et al., 2008). Dessa forma, o objetivo deste trabalho é verificar a compatibilidade do produto de uso e cobertura da terra gerado operacionalmente para a América do Sul denominado GLOBCOVER com o produto operacional VCF, que indica o percentual de árvores em cada pixel. Ainda, a partir da análise desses dados, verificaram-se os padrões espaciais de distribuição de energia radiativa do fogo para cada classe de uso e cobertura, relacionando-as com a precipitação, assim como, a quantidade de formações florestais presentes na América do Sul.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. GLOBCOVER

A Figura 1 mostra o produto GLOBCOVER para a América do Sul. Este continente apresenta uma distinta e importante biodiversidade, espacialmente distribuída em diversos ecossistemas naturais. Entretanto, este complexo sistema é constantemente exposto às atividades antropogênicas como, por exemplo, o desmatamento, a expansão agrícola e as intensas queimadas.

A proposta do projeto ESA-GLOBCOVER é a produção de mapas globais de uso e cobertura da terra a partir de um processamento automático dos dados temporais obtidos a partir do sensor MERIS com resolução espacial de 300 metros. Neste trabalho, o mapa de uso da terra do GLOBCOVER é baseado em uma classificação automática que é calibrada regionalmente e provém de imagens MERIS adquiridas entre dezembro de 2004 e junho de 2006. As classes de uso e cobertura da terra são definidas a partir do sistema *UN Land Cover Classification System (LCCS)* (Bicheron et al., 2008). Para a América do Sul, são encontradas 18 classes de uso e cobertura da terra, descritas na Tabela 1.

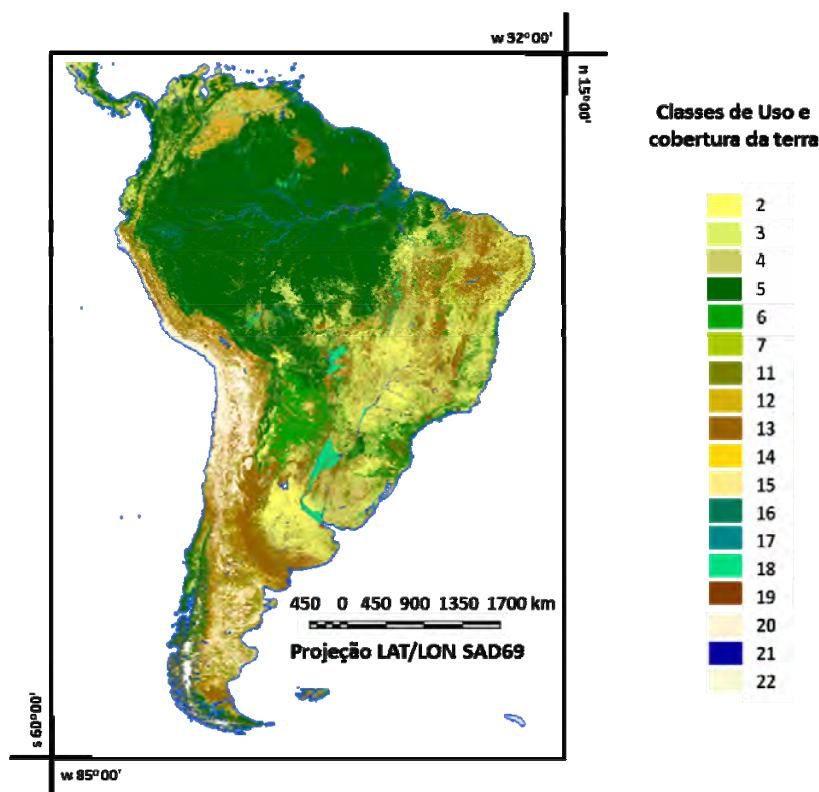


Figura 1. Mapa de uso e cobertura da terra para a América do Sul estimado a partir dos dados do MERIS.

Tabela 1. Descrição das classes de uso e cobertura da terra presentes na América do Sul.

Número	Classe de uso e cobertura da terra
2	Agricultura
3	Mosaico Agricultura (50 – 70%) / Pastagem, arbustos, floresta (20 – 50%)
4	Mosaico Pastagem, arbustos, floresta (50 – 70%) / Agricultura (20 – 50%)
5	Floresta Ombrófila Densa ou Floresta Semidecidual
6	Floresta Estacional Decidual Densa
7	Floresta Estacional Decidual Aberta
11	Mosaico de Florestas e vegetação arbustiva (50 - 70%) / Pastagem (20 - 50%)
12	Mosaico de Pastagem (50 - 70%) / Florestas e vegetação arbustiva (20 - 50%)
13	Vegetação Arbustiva Densa
14	Vegetação Herbáceo-arbustiva
15	Vegetação Esparsa
16	Floresta Ombrófila Densa regularmente alagada (semi-permanente ou temporária)
17	Floresta Ombrófila Densa permanentemente alagada
18	Pastagem ou Floresta Estacional regularmente alagada
19	Superfícies artificiais e áreas urbanas
20	Solo Exposto
21	Corpos d'água
22	Gelo e Neve permanentes

2.2. Vegetation Continuous Field (VCF)

O produto VCF representa uma estimativa global do percentual de cobertura florestal baseado em métricas obtidas a partir dos dados do sensor MODIS com resolução espacial de 500 metros (Figura 2). Os dados de VCF são utilizados para estudos de ciclos biogeoquímicos, manejo de ecossistemas, análise ambiental, entre outros. O algoritmo do VCF baseia-se em um processo automatizado que emprega um algoritmo de árvore de decisão. O percentual do dossel representa o total de radiação solar obstruída pelas árvores maiores que 5 metros (Hansen et al., 2003).

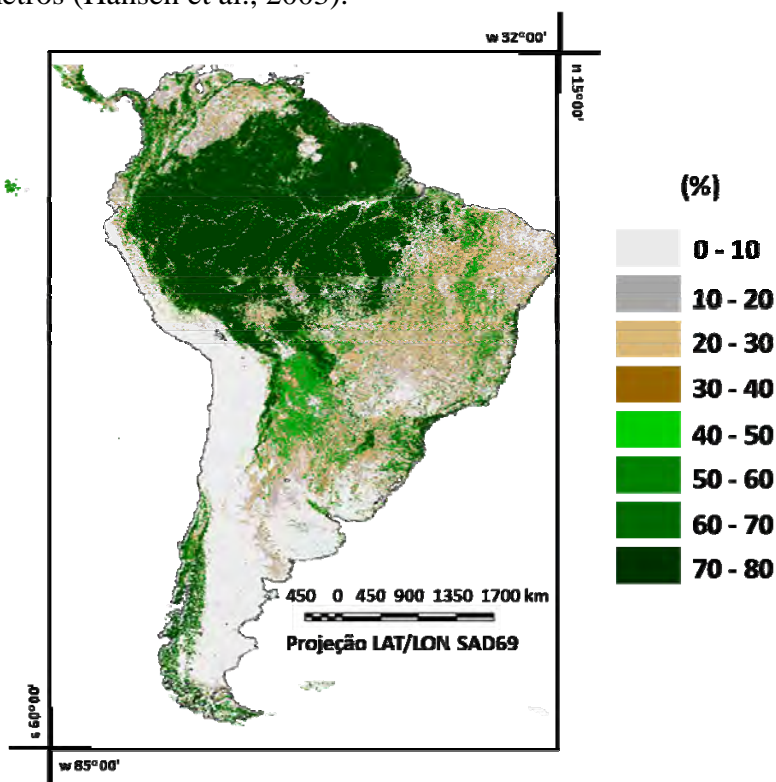


Figura 2. Produto VCF para a América do Sul estimado a partir dos dados do sensor MODIS de 2005.

2.3. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

Os dados do TRMM (Figura 3) foram utilizados neste trabalho para caracterizar o padrão sazonal da precipitação para os anos de 2000 a 2005. O satélite TRMM é uma parceria entre a NASA e a agência espacial japonesa JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*). Os dados de precipitação estimados a partir desse radar representam mais de 66% do regime hidrológico associado às chuvas. Os dados do TRMM são estimados a partir de um algoritmo que combina múltiplos sensores orbitais originando, dessa forma, os dados de precipitação global (Huffman et al., 2007). Os dados utilizados neste trabalho foram extraídos do produto 3B42 com uma resolução temporal de 3 horas, cobertura geográfica correspondente a 50°S a 50°N e resolução espacial de 0,25° x 0,25° (disponibilizado em <http://mirador.gsfc.nasa.gov/>).

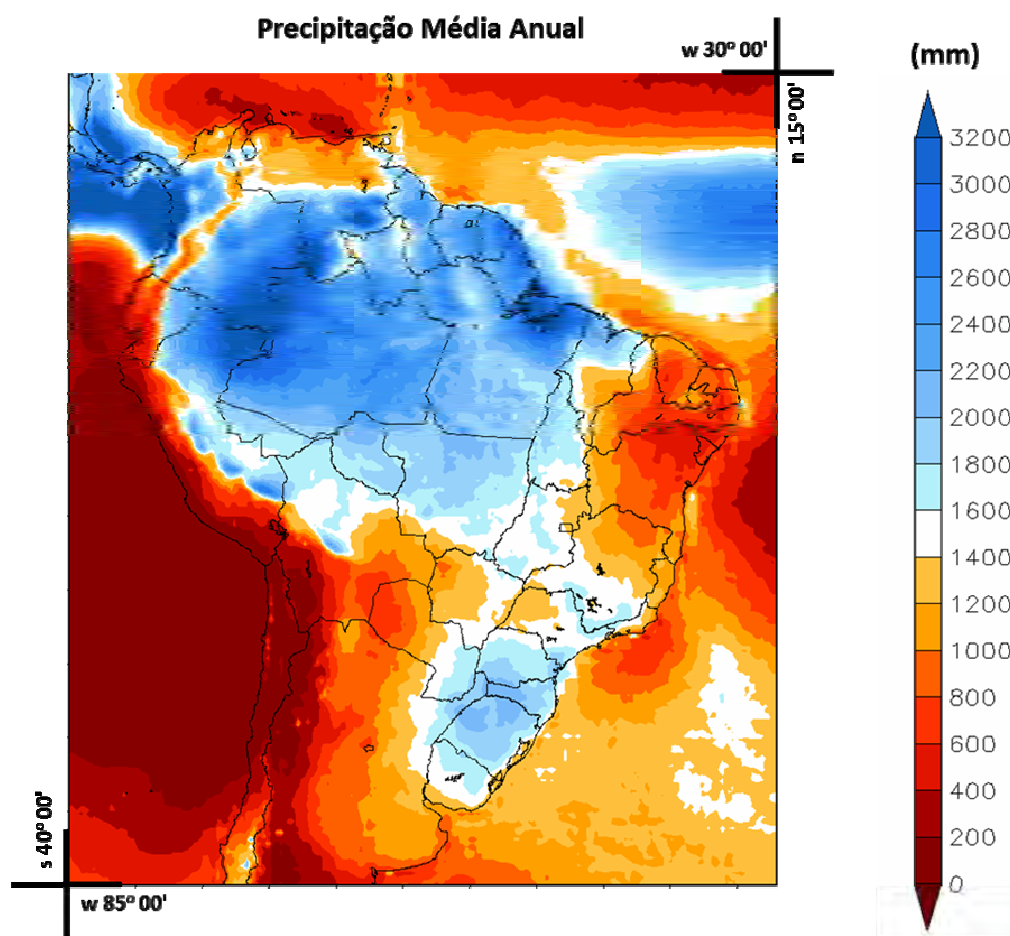


Figura 3. Precipitação média anual (1997-2009) para a porção central da América do Sul.

2.4. Energia Radiativa do Fogo (FRP)

A fração da energia química emitida no processo de combustão na forma de radiação eletromagnética pode ser definida como Energia Radiativa do Fogo (FRP). A integração no tempo da FRP é definida como FRE (do inglês, *Fire Radiative Energy*). A FRE é proporcional à quantidade de biomassa que está sendo consumida no processo e pode ser considerada um indicador da quantidade de gases traços e materiais particulados emitidos para a atmosfera (Pereira et al., 2009).

Os primeiros estudos sobre a FRP foram realizados utilizando o MAS (*MODIS Airborne Simulator*) nos experimentos SCAR-C e SCAR-B (*Smoke, Cloud and Radiation, Califórnia/Brazil*) (Kaufman et al., 1996; 1998a; 1998b; Chu et al., 1998). Kaufman et al. (1996) usaram uma relação semiempírica entre a FRP e a radiância espectral do

infravermelho, referente à banda 21 do MODIS centrada em 4 μ m, associando a FRP com a temperatura de brilho do pixel ($T_{f4\mu m}$) e com a temperatura do background ($T_{b4\mu m}$) da respectiva banda. A Equação 1 representa a FRP obtida através do sensor MODIS.

$$FRP = [4,3 \times 10^{-19} \cdot (T_{f4\mu m}^8 - T_{b4\mu m}^8)] \cdot A_{sampler} \quad [1]$$

em que $A_{sampler}$ representa o tamanho da área do pixel (km²).

A FRP (em MWatts) está disponível nos produtos MYD14 e MOD14. Esses produtos utilizam um algoritmo aplicado à temperatura de brilho dos canais em 4 μ m e 11 μ m (Justice et al., 2002; Giglio, 2005). A Figura 4 mostra a FRP acumulada para a América do Sul no ano de 2005.

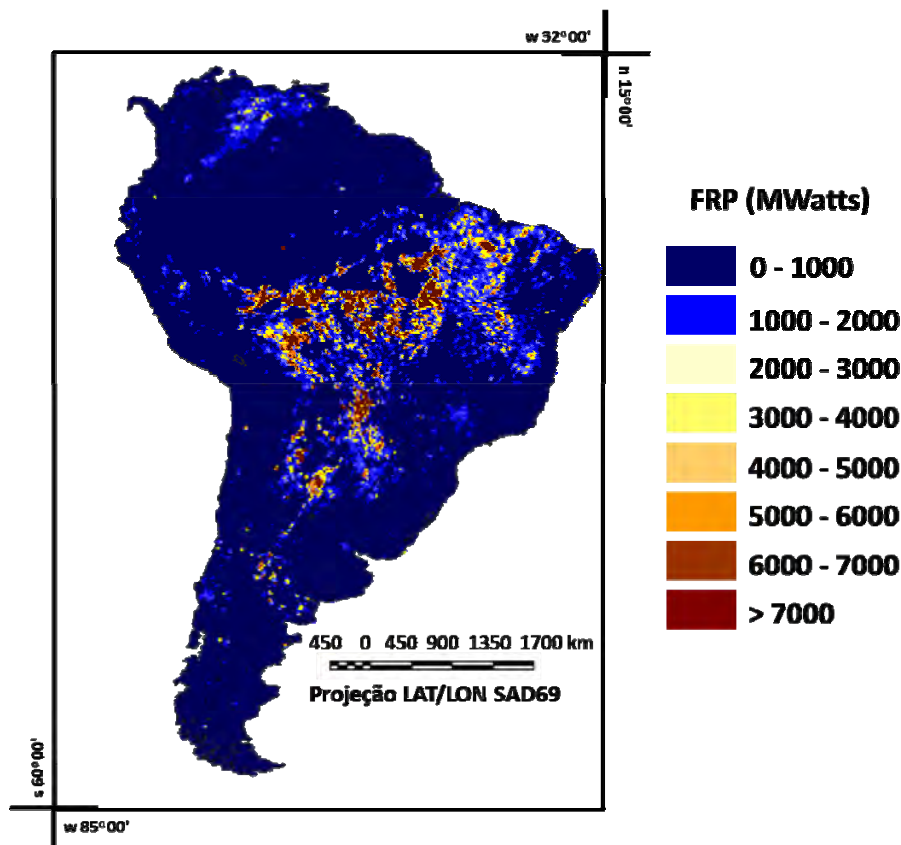


Figura 4. FRP para a América do Sul derivada do sensor MODIS para o ano de 2005.

2.5. Metodologia

Os dados dos produtos acima mencionados foram inseridos no SPRING, um programa de gerenciamento e processamento de dados geográficos desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Alguns procedimentos (transformação e compatibilização de diferentes dados, amostragem aleatória, extração de atributos, entre outros) foram realizados na linguagem LEGAL, implementada no SPRING (SPRING, 2005). Essa linguagem funciona a partir de linhas de comando e foi proposta por Câmara Neto (1995) com o objetivo de auxiliar as operações espaciais e análises estatísticas.

A Figura 5 mostra o fluxograma da metodologia adotada. O primeiro passo (I) consistiu em adquirir os produtos derivados do sensoriamento remoto; na segunda e terceira etapa (II e III) os produtos de energia radiativa do fogo e de precipitação foram introduzidos nos ambientes IDL e GRADS, respectivamente e foram transformados em ASCII (FRP) e em binário (TRMM). Após a transformação em binário dos dados de precipitação, estes foram inseridos no programa ENVI e convertidos para GEOTIFF. A etapa (IV) consistiu em

importar todos os produtos para o programa SPRING a partir da criação de um banco de dados com informações espaciais. Na etapa (V), esses dados foram comparados a partir da tabulação cruzada de planos de informação e seus resultados analisados (etapas VI e VII).

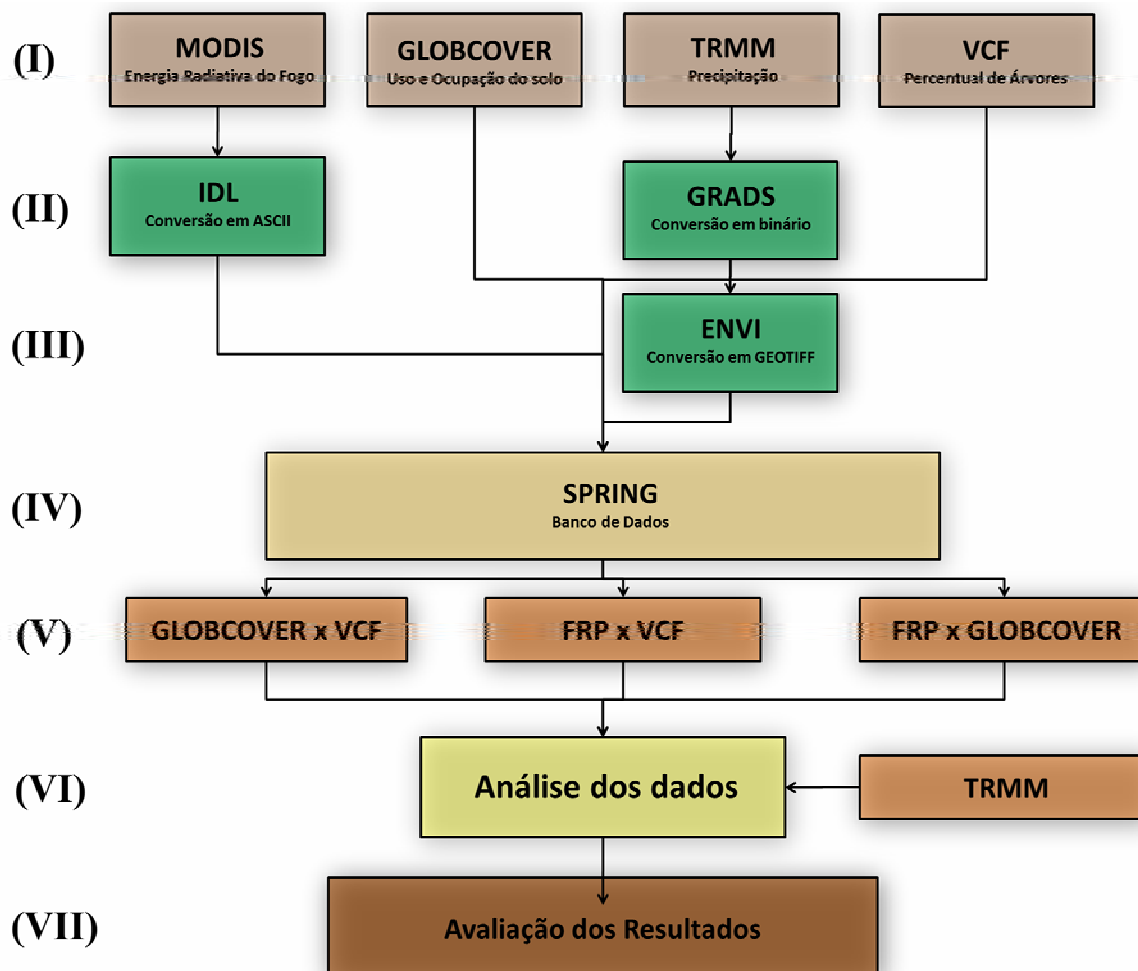


Figura 5. Fluxograma da metodologia adotada.

3. RESULTADOS

3.1. Análise dos produtos GLOBCOVER e VCF

O produto GLOBCOVER classifica a América do Sul em 18 classes de uso e cobertura da terra, na qual, aproximadamente, 40% pertencem à classe Floresta Ombrófila Densa, representada principalmente pela Floresta Amazônica e Mata Atlântica; 17% da América do Sul é formada pela mistura de agricultura com remanescentes florestais; 16%, por vegetação herbáceo-arbustiva e 6%, por agricultura. Ainda, é possível verificar classes minoritárias como, por exemplo, solo exposto (3%), vegetação esparsa (3%) e pastagens/arbustos (9%).

Metodologias operacionais de caracterização do uso e cobertura da terra (LULC) podem introduzir erros sistemáticos no processo de classificação em função das similaridades espectrais entre os diferentes objetos da superfície (Wang e Howarth, 1993). Consequentemente, produtos derivados de outros satélites, como o VCF, podem ser utilizados para a análise e verificação dos mapas de LULC. A Figura 6 mostra a tabulação cruzada entre as classes de maior predominância na América do Sul e os dados de VCF para o ano de 2005. Na comparação entre os dados de LULC e da cobertura florestal espera-se que para a classe de Floresta Ombrófila Densa, representada principalmente pela Floresta Amazônica, os valores de VCF variem de 75 a 80, pois essa formação florestal apresenta áreas extensas de vegetação homogênea.

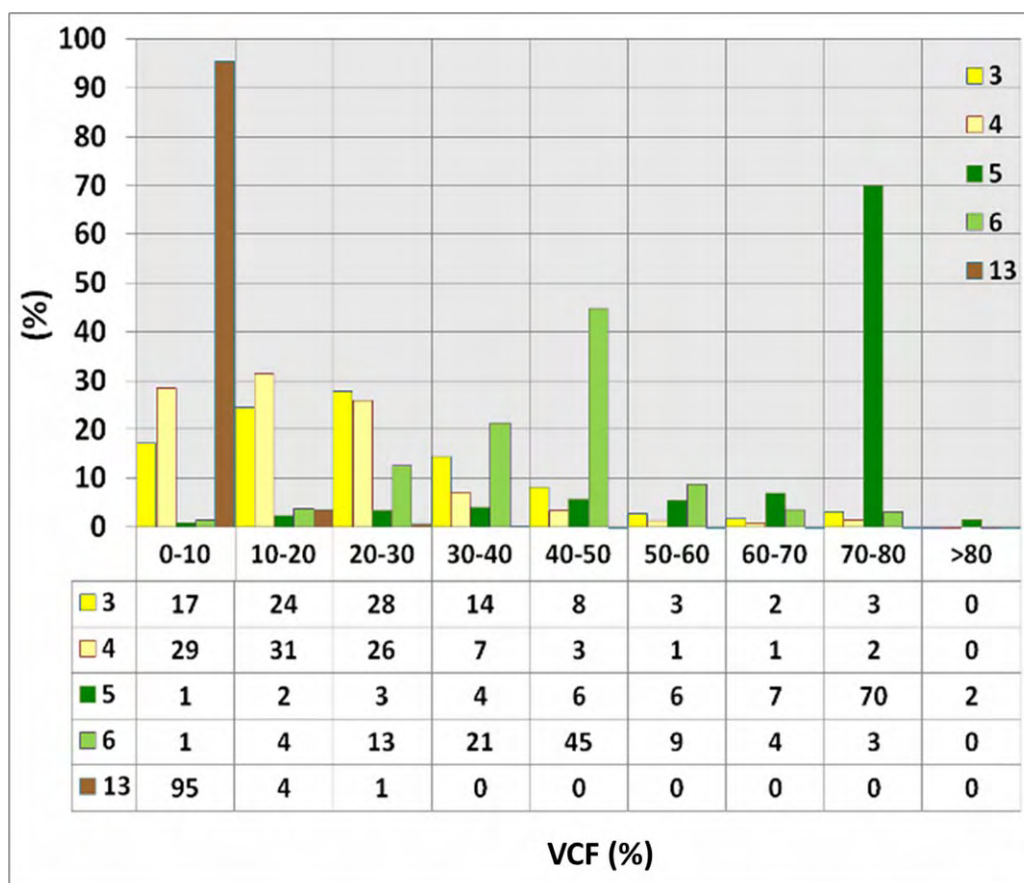


Figura 6. Gráfico da tabulação cruzada entre os dados do GLOBCOVER e VCF mostrando o percentual de vegetação presente em cada classe selecionada para a análise.

Entretanto, os resultados da tabulação cruzada indicam que apenas 72% das áreas de Floresta Ombrófila Densa apresentam valores de VCF maiores que 70, o mesmo ocorre com áreas de Floresta Estacional Decidual, localizadas principalmente no Paraguai e norte da Argentina, na qual 40% dessas classes possuem valores de VCF menores que 40. Essa discrepância pode ser em decorrência da heterogeneidade da vegetação presente em cada pixel. É comum encontrar nas regiões acima descritas variações entre áreas de pastagem, Florestas Estacionais Deciduais, gramíneas altas, Florestas Ombrófilas Densas e Abertas e uma mistura entre florestas e pastagens, que introduzem erros no processo de classificação. Todavia, LULC referentes às classes dominadas por agricultura e gramíneas apresentam uma boa correlação com os valores esperados de VCF, com poucos valores excedendo 70.

O produto GLOBCOVER mostrou uma tendência de superestimar áreas de florestas densas (Floresta Amazônica, Mata Atlântica e Florestas Estacionais Deciduais). Essa fonte de erro pode estar associada, principalmente, ao agrupamento de regiões circunvizinhas de baixa densidade de biomassa como, por exemplo, regiões arbustivas e de pastagem. Ainda, pode-se notar uma subestimativa de áreas urbanas e de manguezal. Esses erros, associados ao algoritmo de classificação, podem ser introduzidos no pré-processamento das imagens MERIS, nos procedimentos de normalização radiométrica e no processamento para retirar as nuvens das imagens. A Figura 7 mostra uma área predominantemente de Floresta Ombrófila Densa (verde escuro), os respectivos valores de VCF e o mosaico sem nuvens cor-verdadeira (3B4G1R) do MODIS em (a), (b) e (c), respectivamente.

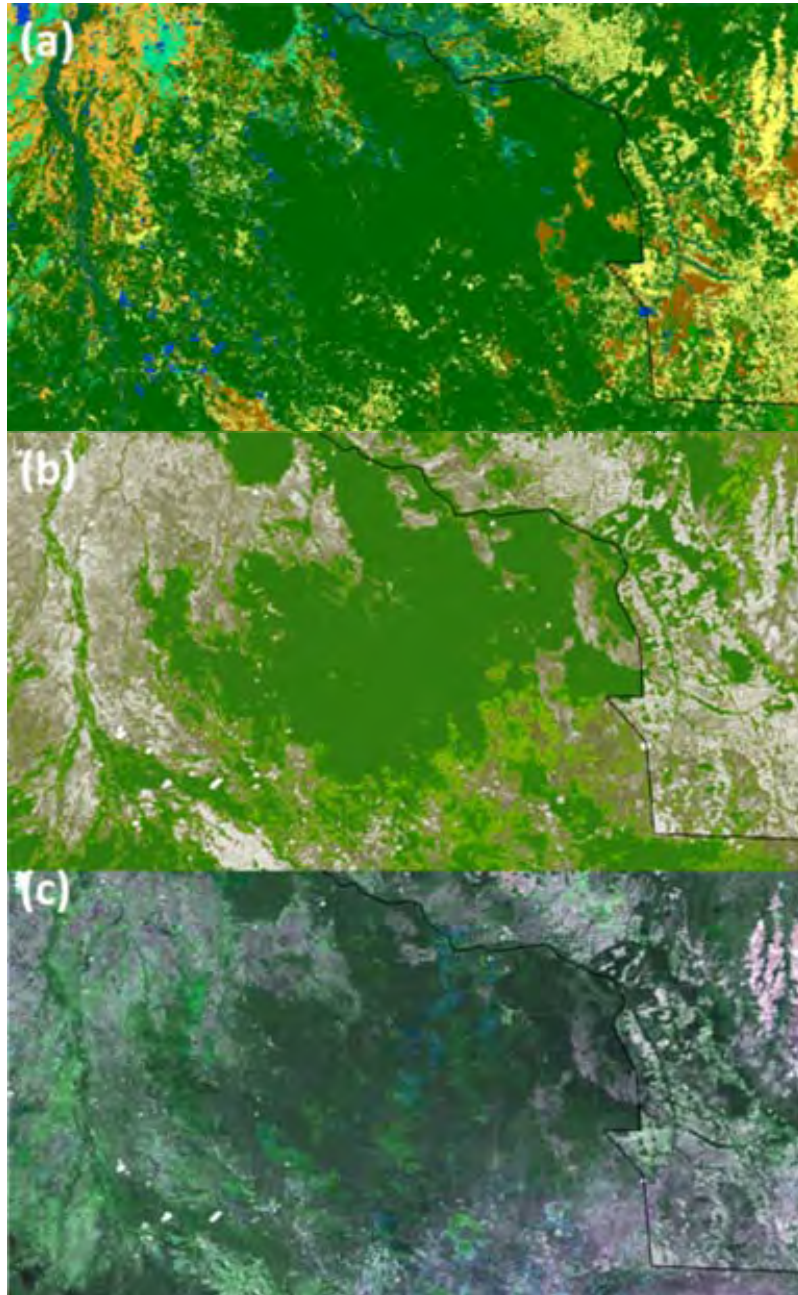


Figura 7. (a) Exemplo da superestimativa de Floresta Ombrófila Densa (em verde escuro); (b) valores de VCF (na qual o verde escuro representa valores superiores a 79); e (c) imagem MODIS na composição colorida (3B 4G 1R).

3.2. Análise da distribuição das queimadas (2000 – 2005)

Na América do Sul, as queimadas apresentam uma variabilidade intra e interanual, associada diretamente com o uso e cobertura da terra e com a expansão agrícola. A maior incidência dos focos de queimadas encontra-se no arco do desmatamento, localizado na borda da Floresta Amazônica. Consequentemente, a maior concentração de fogo pode ser encontrada em áreas de Floresta Ombrófila Densa e Floresta Estacional Decidual, seguidas por áreas de vegetação herbáceo-arbustiva (pastagens, savanas e arbustos), mosaico de agricultura (50 – 70%) com pastagem, arbustos, floresta (20 – 50%) e mosaico pastagem, arbustos, floresta (50 – 70%) com agricultura (20 – 50%). A Tabela 2 mostra as classes de uso e cobertura da terra para a América do Sul e o percentual de focos de queimadas inseridos em cada classe.

Tabela 2. Uso e cobertura da terra do GLOBCOVER e respectivo percentual de focos de queimada em cada classe.

GLOBCOVER LULC	(%)
2	6.4
3	7.8
4	9.3
5	38.9
6	3.8
7	0.5
11	3.2
12	1.5
13	16.6
14	2.0
15	3.3
16	1.6
17	0.1
18	1.4
19	0.1
20	3.1
22	0.4

A Figura 8 mostra a quantidade de focos de queimadas (2000 a 2005) que ocorre em cada classe de VCF (ressalta-se que os valores do eixo y estão em escala logaritma base 10). Percebe-se que as maiores quantidades dos focos de queimadas localizam-se principalmente nas classes com valores entre 0-10, 20-30 e 70-80. Ainda, a Figura 8 sugere um aumento da quantidade dos focos de queimadas a cada ano, sobretudo em valores de VCF superiores a 70 que representam biomas com uma quantidade significativa de biomassa. As áreas com maior incidência de focos compreendem os biomas Floresta Amazônica e Cerrado, indicando que o principal precursor das queimadas é o desmatamento para a expansão agrícola.

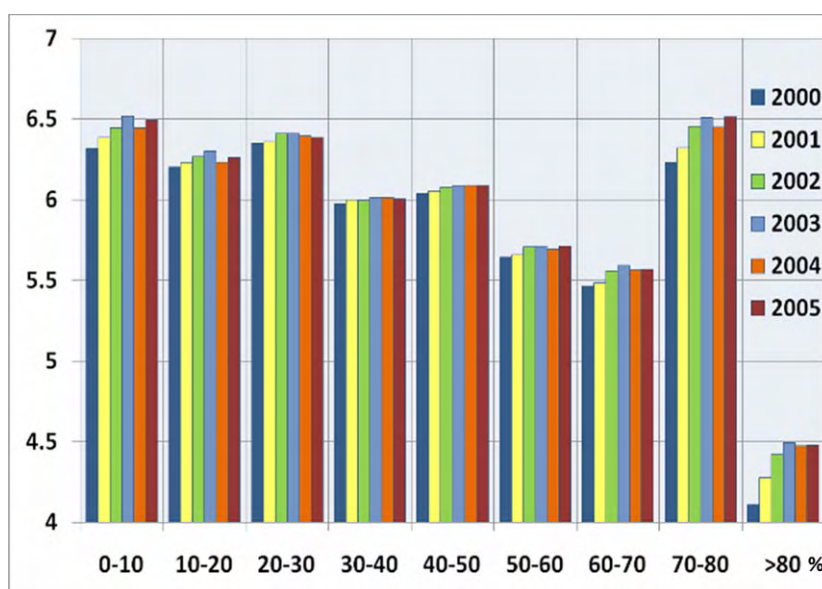


Figura 8. Gráfico da quantidade de focos de queimada inseridos em cada classe de VCF.

A Figura 9 mostra a quantidade anual de energia radiativa liberada no processo de combustão estimada a partir dos dados dos sensores MODIS, plataformas Aqua e Terra. As informações desse produto estimam a FRP de 4 a 5 vezes por dia para a mesma área. Os valores de FRP foram agrupados em células de 10 km, correspondendo à soma anual da energia liberada. Percebe-se que a maior frequência encontra-se no intervalo entre 0-1000 MW, notando-se uma baixa variação ao longo dos anos nessas observações. Pode-se dizer que quanto maior a intensidade da FRP maior a quantidade de biomassa que está sendo consumida no processo de combustão. Pode-se notar que há uma tendência de aumento na quantidade de FRP liberada no processo de combustão com o passar dos anos, com exceção de 2004 (ano com anomalia positiva de precipitação). Ainda, percebe-se um aumento de queimadas na qual a energia liberada supera 8000 MW.

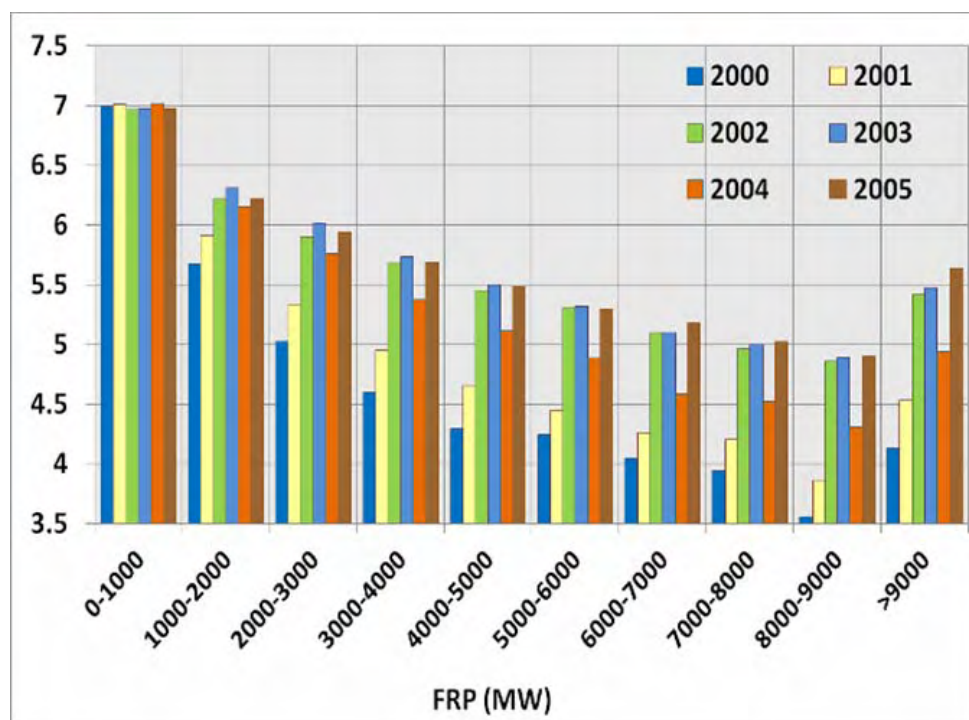


Figura 9. Gráfico anual da FRP (Megawatts) liberada no processo de combustão separada por classes de intensidade (eixo y em escala logarítmica base 10).

Algumas variações anuais nas estimativas de FRP podem ser atribuídas a anomalias de precipitação como, por exemplo, a ocorrida em 2004 (Figura 10), quando a América do Sul apresentou uma anomalia positiva na precipitação estimada a partir dos dados do TRMM. Durante o período estudado (2000 a 2005), a Região Amazônica apresentou anomalias negativas em 2002, 2003 e 2005, e anomalias positivas em 2000, 2001 e 2004. Além disso, o aumento da energia radiativa liberada na América do Sul pode ser relacionado com a ocorrência de queimadas em áreas de expansão agropecuária e desflorestamento.

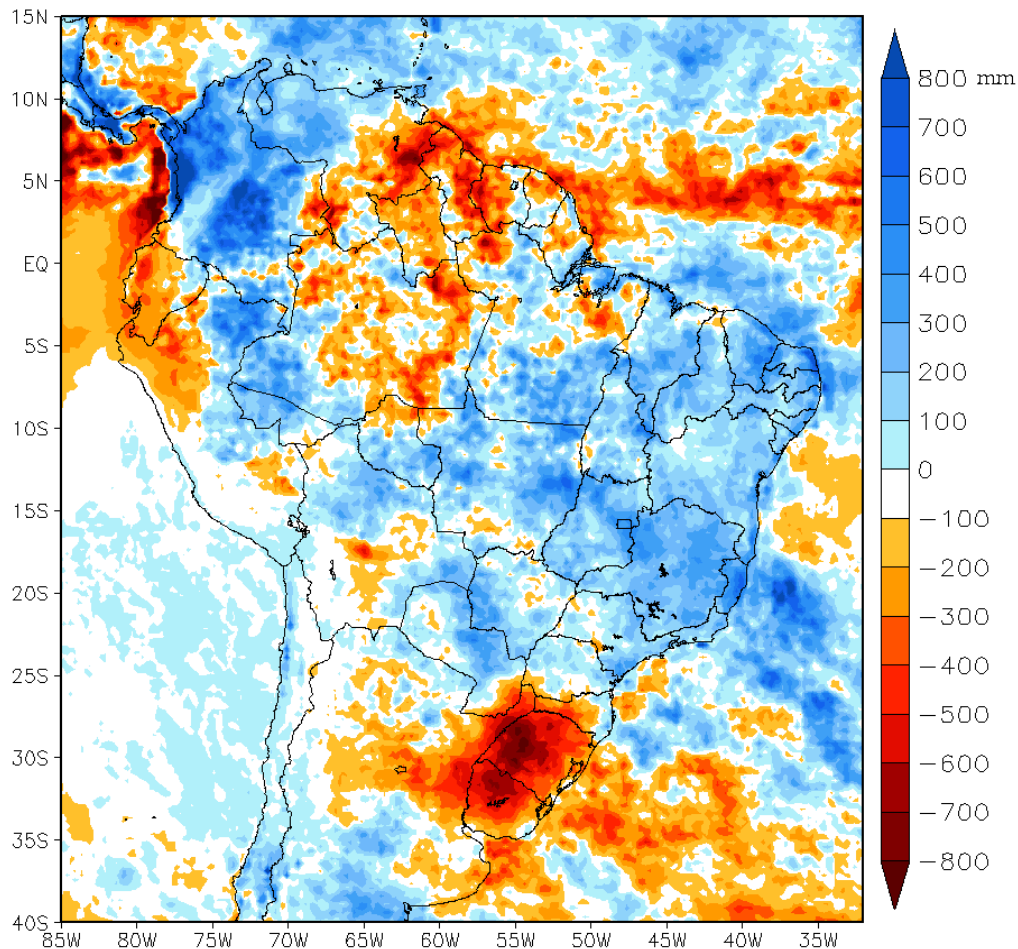


Figura 10. Mapa da anomalia de precipitação para 2004, valores azuis representam chuva acima da normal climatológica e valores vermelhos representam chuva abaixo da normal climatológica.

4. CONCLUSÕES

Embora o uso e cobertura da terra proveniente do projeto GLOBCOVER possua abrangência global, pode-se constatar uma boa representação das classes de cobertura para a América do Sul. Entretanto, devido à imprecisão de categorizações discretas da maioria dos classificadores automáticos, verificam-se alguns erros presentes no resultado como, por exemplo, superestimativas de Florestas Ombrófilas Densas, Florestas Estacionais Deciduais e áreas urbanas. Dessa forma, para melhorar o mapa de áreas florestais e áreas urbanas, sugere-se a utilização de dados auxiliares derivados de outros sensores orbitais, como as imagens de luz para o mapeamento de áreas de influência urbana. Esses dados são disponibilizados pelo DMSP (*Defence Meteorological Satellite Program*) e pode contribuir para melhor estimativa dos centros urbanos.

Pode-se concluir que a maior incidência de focos de queimadas com alta taxa de emissão de energia estão concentrados nos biomas referentes à Floresta Amazônica e ao Cerrado. Percebe-se uma tendência de crescimento do número de queimadas em áreas com grande quantidade de biomassa, resultando em maior emissão de aerossóis e gases traços para a atmosfera.

5. REFERÊNCIAS

- ARINO, O.; TREBOSSON, H.; ACHARD, F.; LEROY, M.; BROCKMAN, C.; EFOURNY, P. et al. The GLOBCOVER Initiative. *ESA SP 597*, p. 171-175, 2005.
- BICHERON, P.; DEFOURNY, P.; BROCKMANN, C.; SCHOUTEN, L.; VANCUTSEM, C.; HUC, M. et al. **GLOBCOVER: products description and validation report**. 2008. Disponível em: <http://ionia1.esrin.esa.int/docs/GLOBCOVER_Products_Description_Validation_Report_I2.1.pdf>. Acesso: 18 nov. 2009.
- CÂMARA NETO, G. **Modelos, linguagens e arquiteturas para banco de dados geográficos**. Tese (Doutorado em Computação Gráfica Aplicada - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1995.
- CHRISTOPHER, S. A.; WANG, M.; BERENDES, T. A.; WELCH, R. M. The 1985 biomass burning season in South America: satellite remote sensing of fires, smoke and regional radiative energy budget. *Journal of Applied Meteorology*, v. 37, p. 661-678, 1985.
- CHRISTOPHER, S. A.; LI, X.; WELCH, R. M.; REID, J. S.; HOBBS, P. V.; ECK, T. F.; HOLBEN, B. Estimation of downward and top-of-atmosphere shortwave irradiances in biomass burning regions during SCAR-B. *Journal of Applied Meteorology*, v. 39, n. 10, p. 1742-1753, 2005.
- CHU, D. A.; KAUFMAN, Y. J.; REMER, L. A.; HOLBEN, B. N. Remote sensing of smoke from MODIS airborne simulator during the SCAR-B experiment. *Journal of Geophysical Research*, v. 103, p. 979-987, 1998.
- CRUTZEN, P. J.; ANDREAE, M. O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science*, v. 250, p. 1669-1678, 1990.
- FISHMAN, J.; HOELL, J. M.; BENDURA, J. R.; MCNEAL, R. J.; KIRCHHOFF, V. W. J. H. NASA GTE TRACE-A experiment (September-October, 1992). *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, v. 101, n. D19, p. 23865-23880, 1996.
- GIGLIO, L. **MODIS Collection 4 Active Fire Product User's Guide**. 2005. Disponível em: <http://maps.geog.umd.edu/products/MODIS_Fire_Users_Guide_2.1.pdf>. Acesso: 01 jul. 2010.
- HANSEN, M. C.; DEFRIES, R. S.; TOWNSHEND, J. R. G.; CARROLL, M.; DIMICELI, C.; SOHLBERG, R. A. Global percent tree cover at a spatial resolution of 500 meters: first results of the MODIS vegetation continuous fields algorithm. *Earth Interactions*, v. 7, n. 10, p. 1-15, 2003.
- HEROLD, M.; MAYAUX, P.; WOODCOCK, C. E.; BACCINI, A.; SCHMULLIUS, C. Challenges in global land cover mapping: an assessment of agreement and accuracy in existing 1km datasets. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, p. 2538-2556, 2008.
- HUFFMAN, G. J.; ADLER, R. F.; BOLVIN, D. T.; GU, G.; NELKIN, E. J.; BOWMAN, K. P. et al. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scale. *Journal of Hydrometeorology*, v. 8, p. 38-55, 2007.
- JUSTICE, C. O.; GIGLIO, B.; KORONTZI, S.; OWENS, J.; MORISETTE, J. T.; ROY, D. P. et al. The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, p. 244-262, 2002.

PEREIRA, G.; TAKEDA, M. M. G.; SHIMABUKURO, Y. E.; CARDOZO, F. S.; SILVA, G. B. S.; MORAES, E. C.; SILVA, F. B.; COURA, S. M. C. O uso de produtos operacionais de sensoriamento remoto para a análise ambiental na América do Sul. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 5, n. 3, p. 157-171, 2010. ([doi:10.4136/ambi-agua.160](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.160))

KAUFMAN, Y. J.; TUCKER, C. J.; FUNG, I. Remote sensing of biomass burning in the tropics. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D7, p. 9927-9939, 1990.

KAUFMAN, Y. J.; REMER, L. A.; WARD, D. E.; KLEIDMAN, R.; FLYNN, L.; SHELTON, G. et al. Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C Experiment. In: LEVINE, J. S. (Ed.). **Global biomass burning: atmospheric, climatic and biospheric implications**. Cambridge: MIT Press, 1996. p. 685-696.

KAUFMAN, Y. J.; JUSTICE, C. O.; FLYNN, L.; KENDALL, J. D.; PRINS, E. M.; GIGLIO, L. et al. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. 32, p. 215-32, 238, 1998a.

KAUFMAN, Y. J.; KLEIDMAN, R. G.; KING, M. D. SCAR-B fires in the tropics: properties and remote sensing from EOS-MODIS. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. 31, p. 955-968, 1998b.

LI, X.; CHRISTOPHER, S. A.; CHOU, J.; WELCH, R. M. Estimation of shortwave direct radiative forcing of biomass burning aerosols using angular dependence models. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, n. 12, p. 2278-2291, 2000.

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, v. 4, p. 957-988, 1991.

NOBRE, C. A.; MATTOS, L. F.; DEREZYNSKI, C. P.; TARASOVA, T. A.; TROSNIKOV, I. V. Overview of atmospheric conditions during the smoke, clouds and Radiation-Brazil (SCAR-B) field experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D31, p. 809-820, 1998.

PEREIRA, G.; FREITAS, S. R.; MORAES, E. C.; FERREIRA, N. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; RAO, V. B. et al. Estimating trace gas and aerosol emissions over South America: Relationship between fire radiative energy released and aerosol optical depth observations. **Atmospheric Environment**, v. 43, p. 6388-6397, 2009.

REID, J. S.; HOBBS, P. V.; FERREK, R. J. Physical and chemical characteristics of biomass burning aerosol in Brasil. In: **SCAR-B Proceedings**. São José dos Campos: Transtec, 1996. p. 165-169.

REID, J. S.; ECK, T. F.; CHRISTOPHER, S. A.; HOBBS, P.; HOLBEN, B. Use of the angstrom exponent to estimate the variability of optical and physical properties of aging smoke particles in Brazil. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, v. 104, n. D22, p. 27473-27490, 1999.

SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE INFORMAÇÕES GEORREFERENCIADAS – SPRING. Versão 4.3. São José dos Campos: INPE, 2005.

TARASOVA, T. A.; NOBRE, C. A.; HOLBEN, B. N.; ECK, T. F.; SETZER, A. Assessment of smoke aerosol impact on surface solar irradiance measured in the Rondonia region of Brazil during smoke, cloud and radiation – Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. D19, p. 161-170, 1999.

TARASOVA, T. A.; NOBRE, C. A.; HOLBEN, B. N.; ECK, T. F.; SETZER, A. Modeling of gaseous, aerosol and cloudiness effects on surface solar irradiance measured in Brazil's Amazonia 1992 - 1995. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. D26, p. 961-969, 2000.

PEREIRA, G.; TAKEDA, M. M. G.; SHIMABUKURO, Y. E.; CARDOZO, F. S.; SILVA, G. B. S.; MORAES, E. C.; SILVA, F. B.; COURA, S. M. C. O uso de produtos operacionais de sensoriamento remoto para a análise ambiental na América do Sul. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 5, n. 3, p. 157-171, 2010. ([doi:10.4136/ambi-agua.160](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.160))

TARASOVA, T. A.; ECK, T. F. Improvements in the broadband radiative transfer code aimed to achieve better agreement between modeled and measures solar irradiances on the ground. In: INTERNATIONAL RADIATION SYMPOSIUM – IRS, St. Petersburg, 2000. **Proceedings...** St. Petersburg: A Deepak, 2000.

WAGNER, F.; MÜLLER, D.; ANSMANN, A. Comparison of the radiative impact of aerosols derived from vertically resolved (lidar) and vertically integrated (Sun photometer) measurements: example of an Indian aerosol plume. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, v. 106, n. D19, p. 22861-22870, 2001.

WANG, M.; HOWARTH, P. J. Modeling errors in remote sensing image classification. **Remote Sensing of Environment**, v. 45, n. 3, p. 261-271, 1993.