



Universidade Federal
de São João del-Rei

PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
Graduação em Geografia Bacharelado

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DA INJEÇÃO E DISPERSÃO DAS PLUMAS DE
FUMAÇA NA ATMOSFERA ORIUNDAS DAS QUEIMADAS DA
AMÉRICA DO SUL

Gustavo Domingos Zanin

São João del-Rei, MG

Novembro de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
Graduação em Geografia Bacharelado

ANÁLISE DA INJEÇÃO E DISPERSÃO DAS PLUMAS DE
FUMAÇA NA ATMOSFERA ORIUNDAS DAS QUEIMADAS DA
AMÉRICA DO SUL

GUSTAVO DOMINGOS ZANIN

Orientador

Professor Dr. Gabriel Pereira

Coorientadora

Professora Dra. Francielle da Silva Cardozo

Trabalho de Conclusão apresentado à
Coordenadoria do Curso de Geografia da
Universidade Federal de São João del-Rei,
como requisito parcial para obtenção do
grau de **Bacharel em Geografia**.

São João del-Rei, MG
Novembro de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

GUSTAVO DOMINGOS ZANIN

Trabalho de Conclusão apresentado à Coordenadoria do Curso de Geografia da Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Geografia**.

APROVADO EM _____/_____/_____
(Data da defesa)

Prof. Dr. Gabriel Pereira
Departamento de Geociências – UFSJ
Orientador

Profa. Dra. Francielle da Silva Cardozo
Pós-doutoranda no Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Federal
de São João del-Rei
Coorientadora

M.Sc. Viviane Valéria da Silva
Mestre em Geografia

São João del-Rei, MG
Novembro de 2019

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Z982a Zanin, Gustavo Domingos .
 ANÁLISE DA INJEÇÃO E DISPERSÃO DAS PLUMAS DE
FUMAÇA NA ATMOSFERA ORIUNDAS DAS QUEIMADAS DA AMÉRICA
DO SUL / Gustavo Domingos Zanin ; orientador
Gabriel Pereira; coorientadora Francielle da Silva
Cardozo. -- São João del-Rei, 2019.
 38 p.

 Trabalho de Conclusão (Graduação - Geografia) --
Universidade Federal de São João del-Rei, 2019.

 1. Modelagem Atmosférica. 2. Aerossóis. 3.
Queimadas. 4. MISR. 5. MINX. I. Pereira, Gabriel,
orient. II. da Silva Cardozo, Francielle, co-orient.
III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha família e meus amigos, que sempre forneceram apoio, compreensão e me auxiliaram, tanto o quanto possível, nesses anos de dedicação acadêmica.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Gabriel Pereira e também a Profa. Dra. Francielle da Silva Cardozo pela dedicação, apoio, compreensão e pelo auxílio na construção de conhecimento acadêmico, profissional e pessoal.

A banca examinadora deste trabalho pela disponibilização e contribuições.

Aos meus colegas do LABSER- Laboratório de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Clima.

Aos meus colegas do Grupo de Estudos e Pesquisas em Geografia, Educação e Riscos.

A agência financiadora CNPq, pelas bolsas fornecidas durante a graduação.

Enfim, agradeço a todos, que direta, ou indiretamente, contribuirão para realização deste trabalho.

**“Eu sou a volta por cima
Uma explosão em expansão igual o Big Bang
Eu sou um moleque igual esses outros moleque
Que a única diferença é que não esquece de onde vem.”**

Gustavo Pereira Marques (Djonga)

RESUMO

ZANIN, Gustavo Domingos. Análise da Injeção e Dispersão das Plumas de Fumaça na Atmosfera Oriundas das Queimadas da América do Sul; Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia); Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ); São João del-Rei/MG; 40 p.; 2019.

As queimadas liberam gases traços e aerossóis para a atmosfera, fatores estes que modificam os ciclos biogeoquímicos, bem como o balanço de energia da mesma, levando a alterações locais e regionais do clima, decorrentes, por exemplo, do desmatamento da vegetação natural para a abertura de áreas destinadas à pecuária e agricultura. Partindo deste fato, para determinar as alturas de injeção destas fumaças de queima de biomassa sobre a América do Sul e com o objetivo de avaliar os impactos e as dinâmicas no transporte de longo alcance desses poluentes, foram analisadas imagens do sensor *Multiangl e Imaging Spectro Radiometer* (MISR) abordo do Satélite TERRA, com resolução de 275 m em nove ângulos, variando de 0° nadir a 70° fora do nadir. Com o software MISR I nteractive eXplorer (MINX) foram processadas as alturas, permitindo a criação de mosaicos multitemporais. Posteriormente, a partir de um programa originado em IDL/ENVI obteve-se os dados de interesse, como a localização, a potência radiativa do fogo e a altura de injeção de cada pluma. Após o processamento inicial, sucedeu a conversão dos dados e a inserção em Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Neste contexto, foi constatado que na região da América do Sul, a maior fonte de emissões de poluentes são as queimadas que ocorrem sazonalmente na região Amazônica.

Logo, esta capacidade de investigar a geometria e dinâmica da pluma está se tornando cada vez mais importante para os estudos de clima e qualidade do ar, visto que exigem maior conhecimento das injeções de aerossóis e a sua localização dentro da atmosfera.

Palavras-chave: Modelagem Atmosférica. Aerossóis. Queimadas. MISR. MINX.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Perfil vertical da Troposfera. Adaptado de Wallace, 2006.	4
Figura 2: Dimensão da área de estudo. América do Sul.....	6
Figura 3: Painel de trabalho do software MINX com um bloco de dados carregados..	10
Figura 4: Exemplo de processamento da altura estéreo da pluma.....	11
Figura 5: Perfis de dados produzidos no MINX para o polígono da pluma	12
Figura 6: Distribuição espacial dos locais de emissões das plumas para o ano de 2015.14	
Figura 7: Distribuição mensal por altitude das recuperações de 2015.	15
Figura 8: Registro de pluma de fumaça em 06 de setembro de 2015, na órbita MISR 83606	16
Figura 9: Perfil de altura gerado pelo MINX para a pluma digitalizada na orbita 83606.	17
Figura 10: Registro de pluma em 28 de setembro de 2015, na órbita MISR 83927.	18
Figura 11: Perfil de altura gerado pelo MINX para a pluma digitalizada na órbita 83927.	19
Figura 12: Distribuição espacial dos locais de emissões das plumas para 2016.	20
Figura 13: Distribuição mensal por altura para as recuperações de 2016.	21
Figura 14: Registro de pluma em 03 de setembro de 2016, na órbita MISR 88893.	22
Figura 15: Perfil de altura gerado pelo MINX para a pluma digitalizada na órbita 88893.	22
Figura 16: Registro de pluma em 17 de outubro de 2016, na órbita MISR 89533.....	23
Figura 17: Perfil de altura gerado pelo MINX para a pluma digitalizada na orbita 89533	24

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO GERAL	2
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1	AEROSSÓIS, FONTES DE EMISSÕES E TRANSPORTE NA ATMOSFERA	3
2.2	SENSORIAMENTO REMOTO E OS AEROSSÓIS.....	4
2.3	IMPACTOS DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS E OS EFEITOS NA RADIAÇÃO E NO CLIMA	5
3	ÁREA DE ESTUDO	6
4	MATERIAIS E MÉTODOS	8
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS	8
4.1.1	AQUISIÇÃO DOS PRODUTOS MISR.....	8
4.1.2	AQUISIÇÃO DOS PRODUTOS MODIS.....	8
4.2	METODOLOGIA.....	9
4.2.1	<i>Processamento das alturas das Plumas no software MIXN</i>	9
4.2.2	<i>Obtenção dos dados de interesse e mapas de visualização</i>	12
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	13
5.1	MAPEAMENTO E PROCESSAMENTO DAS PLUMAS PARA O ANO DE 2015 ..	13
5.1.1	<i>Caso 1: 06 de setembro de 2015 (MISR Orbit 83606; path 220; block99)</i>	15
5.1.2	<i>Caso 2: 28 de setembro de 2015 (MISR Orbit 83927, path 230, block 93)</i>	17
5.2	MAPEAMENTO E PROCESSAMENTO DAS PLUMAS PARA O ANO DE 2016 ..	19
5.2.1	<i>Caso 3: 03 de setembro de 2016 (MISR Orbit 88893; path 233; block 97)</i>	21
5.2.2	<i>Caso 4: 17 de outubro de 2016 (MISR Orbit 89533; path 221; block 97)</i>	23
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	25
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26

1 INTRODUÇÃO

O uso do fogo como ferramenta agrícola gera diversos impactos negativos sobre o meio ambiente, entre eles, a perda da biodiversidade, representando um dos maiores desafios ambientais enfrentados na atualidade. Consideradas como um dos principais mecanismos de conversão da vegetação natural em áreas antropogênicas, a técnica de queimada é muito utilizada, e vem crescendo expressivamente nas últimas décadas. Facilitados pela baixa taxa de precipitação e umidade, tais eventos podem tomar grandes proporções e resultar em impactos negativos irreversíveis em âmbito local e regional. (VAN DER VERF *et al.*, 2006; KIM *et al.*, 2016).

Vale destacar que a utilização das queimadas ocorre principalmente, em conjunto com o desmatamento da vegetação natural com o objetivo de inserção e manutenção de áreas destinadas à agropecuária, além de ser utilizada na limpeza de áreas e no controle de pestes (MARENGO *et al.*, 2010; CARDOZO *et al.*, 2014; HERRERA, 2016; PURNOMO *et al.*, 2017).

Durante a última década, há um interesse intenso em relação ao papel dos aerossóis no clima e na química atmosférica. Os efeitos climáticos destas partículas estão relacionados com suas propriedades físicas e de tamanho, albedo da superfície e altitude relativa entre as camadas de aerossóis e nuvens.

Caracterizar os aerossóis opticamente é uma forma de se conhecer seus diferentes tipos e a análise destas características é de suma importância, uma vez que estas podem auxiliar a definir o aerossol presente em um determinado local.

A capacidade de investigar a geometria e a dinâmica das plumas está se tornando cada vez mais importante para os estudos climáticos e da qualidade do ar, que exigem maior conhecimento sobre a injeção de aerossóis e a localização das nuvens na atmosfera. Sendo assim, a altura da pluma de aerossol é um insumo fundamental para modelos de transporte químico atmosférico que frequentemente requerem alturas de injeção de fumaça como insumos (WALTER *et al.*, 2016; AIKEN *et al.*, 2004; FIELD *et al.*, 2009).

A altura das plumas de aerossóis produzidas por incêndios florestais, erupções vulcânicas e tempestades de poeira tem uma grande influência sobre onde as partículas são transportadas e os impactos ambientais gerados. Estudos observacionais iniciais

mostraram que a altura da injeção de fumaça varia com a localização geográfica, tipo de vegetação e estação do ano (AIKEN *et al.*, 2004; FIELD *et al.*, 2009).

Desta forma, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) reúne os resultados e análises de pesquisas desenvolvidas entre o período de agosto de 2017 a outubro de 2019, onde foram mensuradas as alturas de injeção das plumas de fumaça oriundas de queimadas na América do Sul, estratificadas por região, bioma e estação, com base em mais de 3.000 alturas de plumas recuperadas utilizando imagens estéreis do sensor *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* (MISR).

1.1 OBJETIVO GERAL

A presente proposta tem como objetivo principal obter a altura da injeção das plumas de fumaça para a América do Sul nos anos de 2015 e 2016 a partir do uso do sensor MISR a bordo do Satélite TERRA.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Têm-se como objetivos específicos:

- (i) Obter a altura e direção das plumas de fumaça em diferentes biomas da América do Sul;
- (ii) Relacionar a altura da pluma de queimada com a potência radiativa do fogo (FRP);
- (iii) Determinar a variação sazonal e inter-anual da injeção das plumas de fumaça;
- (iv) Analisar a variabilidade das plumas em relação ao uso e cobertura da terra;
- (v) Avaliar a relação entre a injeção da pluma e a altitude da superfície.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 AEROSSÓIS, FONTES DE EMISSÕES E TRANSPORTE NA ATMOSFERA

O termo aerossóis se designa comumente para descrever pequenas partículas, líquidas ou sólidas, dispersas em um sistema gasoso, como o ar. Os diâmetros dessas pequenas partículas, medido em micrômetros (μm), são aproximadamente entre 0,002 e 100 e sua composição dependerá da sua fonte poluidora (SEINFELD, PANDIS, 2006). Em geral, os aerossóis são bastante complexos em sua estrutura, mas frequentemente são constituídos basicamente de sulfatos, nitratos, amônio, carbono orgânico, carbono negro, aerossol carbonáceo, sais marinhos, metais do solo, entre outros (BARRY, CHORLEY, 2009).

Os aerossóis entram na atmosfera por meio de uma variedade de fontes, podendo ser naturais ou antrópicas. Os naturais são os originados de emissões vulcânicas, de incêndios florestais por causas naturais (descargas elétricas, combustão espontânea e/ou atrito entre rochas), os aerossóis oceânicos, etc., emitem carbono orgânico, cinzas para a atmosfera, juntamente com dióxido de enxofre e outros gases que contêm sulfatos. Os de origem antropogênica, são os que resultam de inúmeras atividades humanas, como o uso de automóveis, incineradores, fundições e usinas de energia que emitirão comumente aerossóis na forma de sulfatos, nitratos, carbono preto e outras partículas que afetam direta e indiretamente o clima (KANAKIDOU *et al.*, 2005).

Quando emitidos, ficam concentrados próximos à superfície, na Camada Limite Atmosférica (CLA), onde ocorrem as trocas de energia, água e poluentes entre a superfície e a atmosfera livre (GARRATT, 1992). A CLA é definida por Stull (1988) como sendo a região da troposfera que é diretamente influenciada pela superfície da Terra, sendo a zona onde os fenômenos climáticos e a turbulência atmosférica são mais acentuados.

A altura da CLA, que vão de centenas de metros a alguns quilômetros (Fig. 1), é um importante parâmetro para determinação de diversos processos que ocorrem na troposfera como, por exemplo: distribuição de aerossóis, atividade convectiva, formação de nuvens, determinação do volume avaliável para dispersão de poluentes, etc. (WALLACE, 2006).

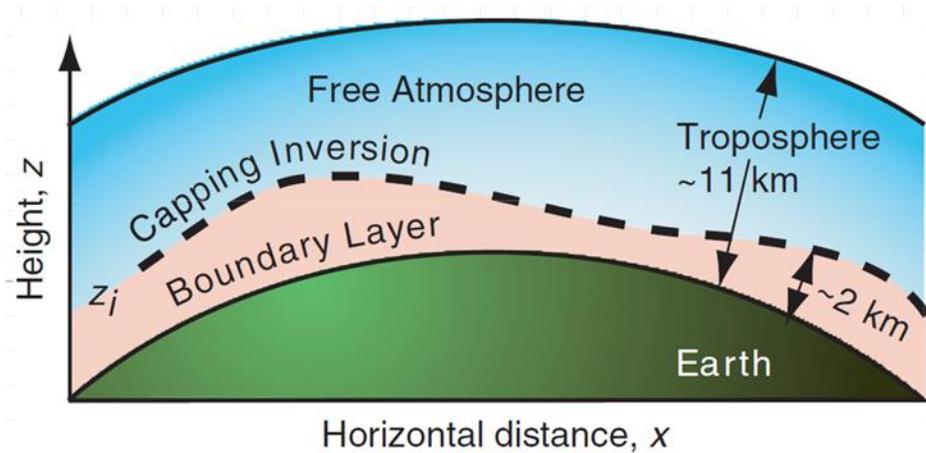


Figura 1: Perfil vertical da Troposfera. Adaptado de Wallace, 2006.

A altura das plumas de fumaça produzidas pela queima da biomassa tem uma grande influência sobre onde as partículas são transportadas e seus impactos ambientais. As circulações de grande escala que ocorrem durante o inverno no Hemisfério Sul sobre a América do Sul é um dos fatores principais que influenciam no transporte de plumas de fumaça produzidas por queima de biomassa para regiões distantes do local de emissão (RECUERO, 2003).

2.2 SENSORIAMENTO REMOTO E OS AEROSSÓIS

Dentre as diferentes formas de se analisar as características dos aerossóis na atmosfera, o sensoriamento remoto está entre as mais utilizadas. Seu uso, além de se tratar de um método economicamente viável, possibilita a obtenção de informações contínuas e sistematizadas de áreas extensas e remotas.

Desse modo, o sensoriamento remoto por satélite tornou-se parte integrante do monitoramento contínuo, e seu uso propicia um amplo monitoramento em diferentes escalas, auxiliando na obtenção de dados sobre a distribuição espacial, temporal e padrões necessários para apoio em estudos de impactos ambientais. Avanços recentes fornecem um meio para avaliar sistematicamente as alturas de injeção de fumaça e processos de transporte que misturam esses aerossóis na troposfera (WALTER *et al.*, 2016; AIKEN *et al.*, 2004; FIELD *et al.*, 2009).

Neste contexto, um grande avanço no sensoriamento remoto por satélite é a recuperação sistemática de propriedades de aerossol sobre a terra pelo MISR a bordo do Satélite TERRA. Com imagens em vários ângulos, o MISR fornece um método exclusivo de

medir a altura da fumaça, sendo o primeiro e único instrumento desse tipo a orbitar a Terra (KAHN *et al.*, 2008).

Moroney e colaboradores (2000) avaliaram a qualidade das alturas derivadas do MISR e demonstraram, através de estudos de caso, a consistência dos resultados obtidos com as recuperações, fornecendo exemplos apropriados para explicar como obter as melhores análises com os produtos fornecidos.

Ainda, modelos de transporte usados para avaliar os efeitos do aerossol na qualidade do ar regional e no clima global são inicializados com um conjunto de descrições de fontes de aerossóis ou inventários de emissões. Essas fontes geralmente são parametrizadas com tipo de aerossol, força radiativa do fogo e a altura da injeção (KAHN, GAITLEY 2015).

2.3 IMPACTOS DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS E OS EFEITOS NA RADIAÇÃO E NO CLIMA

O efeito dos aerossóis no clima é resultante de seus efeitos na radiação. Quando lançados, estes entram na atmosfera e as condições externas tais como, pressão, temperatura, umidade, direção e velocidade dos ventos, começam a afetá-los. Os aerossóis liberados pelas queimadas, alteram a radiação armazenada na atmosfera, de forma direta (espalhamento e absorção) e indireta (propriedades radiativas das nuvens), fatores que modificam os ciclos biogeoquímicos e o balanço de energia da atmosfera, levam à alterações locais e regionais do clima (BOWMAN *et al.*, 2009).

Os efeitos diretos estão relacionados com a maneira como os aerossóis absorvem e espalham a radiação solar e de ondas longas. O efeito indireto diz respeito à maneira como as partículas de aerossóis afetam as nuvens, atuando como núcleos de condensação, que depende de fatores como a composição química e o tamanho do aerossol. Ainda, as partículas transportadas pelo ar influenciam, dispersam e absorvem a radiação solar recebida, afetando no albedo, na altura e no tempo de vida das nuvens (JIMENEZ *et al.*, 2009).

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 2) compreende a América do Sul (AS), continente que se destaca pelas diferenças econômicas, culturais e pela grande biodiversidade distribuída em múltiplos ecossistemas naturais, compondo-se em terras de baixas e médias altitudes. Possui uma morfologia diversa, com presença de regiões montanhosas extensas como o caso da Cordilheira dos Andes, regiões com extrema aridez como o deserto do Atacama, além de áreas de superfícies aquáticas grandiosas e florestas com grande diversidade biológica, ambos os casos na região Amazônica, onde de julho a outubro são registrados altos índices de queimadas (REIBOTA *et al.*, 2010).

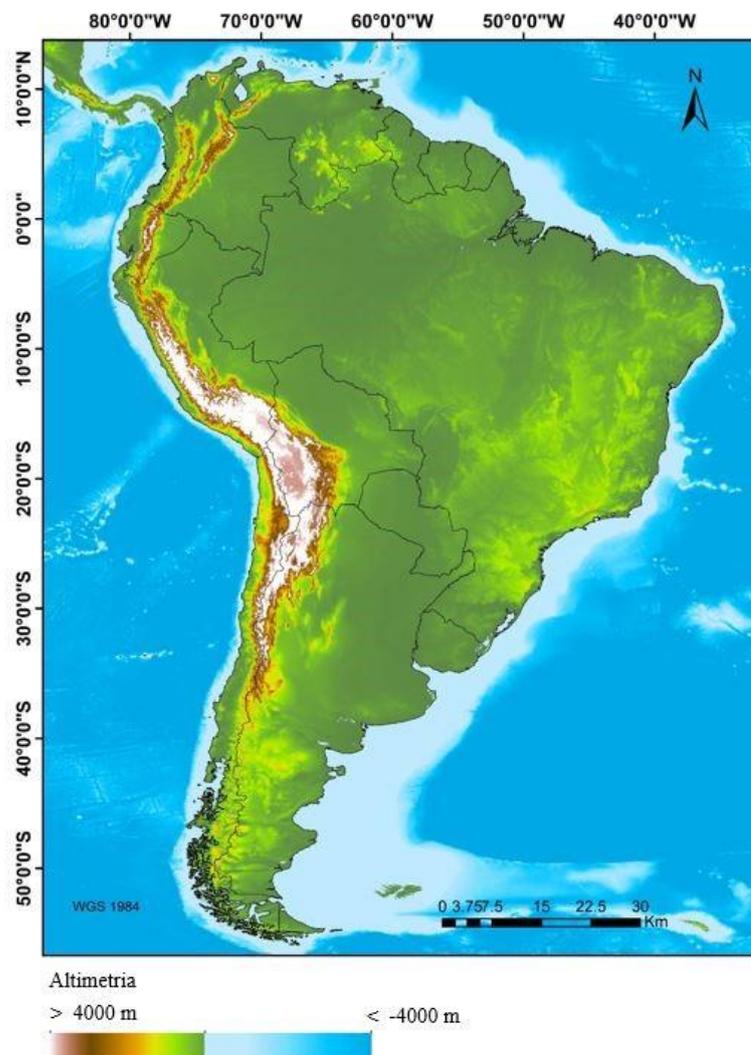


Figura 2: Dimensão da área de estudo - América do Sul.

Sua dimensão espacial, tal como a área do projeto, localiza-se entre as coordenadas geográficas com latitudes entre 12°N e 55°S e longitudes entre 90°W e 40°W. Pelo fato da parte mais extensa do continente localizar-se na zona equatorial, o clima dessa região pode ser classificado de maneira geral como tropical equatorial, de acordo com classificação de Koppen-Geiger (1928).

Os principais domínios climáticos para o continente são: Clima Tropical ou Equatorial Úmido, Clima Árido a Semiárido, Clima Tropical de Savana, Clima Polar ou Temperado e Clima Subtropical.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

4.1.1 Aquisição dos produtos MISR

Para investigar a altura de injeção das plumas de fumaça provenientes das queimadas na AS para a análise temporal proposta, foram utilizadas imagens do sensor MIRS para analisar a altitude de emissão, características de dispersão e propriedades de aerossóis emitidos. O MISR, com capacidade de observação angular, foi lançado a bordo do satélite TERRA em dezembro de 1999 e iniciou a aquisição de imagens em fevereiro de 2000 (DINER *et al.*, 1998).

O instrumento possui capacidade de aquisição de imagens em 4 bandas espectrais, a 446, 558, 672 e 867 nm (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo) em nove ângulos, no nadir (câmera An, 0 °) e 8 observações *off-nadir* (câmeras Af, Bf, Cf, Df, Ba, Ca e Da). A câmera nadir produz imagens com resolução de 275 m. em todas as quatro bandas. As 8 câmeras *off-nadir* produzem dados de resolução de 275 m. somente na banda vermelha e imagens de resolução de 1,1 km nas bandas azul, verde e infravermelho próximo.

Para a recuperação das plumas foram obtidos os seguintes produtos MISR: produto de Radiância (GRP_Terraim), o produto referente à parâmetros geométricos (MIB2GEOP), o produto contendo dados geográficos como elevação digital e máscara de tipo de superfície (MIANCAGP). Todos os produtos MISR são gravados no formato HDF e podem ser baixados gratuitamente (MAZZONI *et al.*, 2007).

4.1.2 Aquisição dos Produtos MODIS

Além dos produtos MISR, foram obtidos os dados de localização dos focos de queimadas, a partir do produto MOD14, e os dados de Uso e Cobertura da Terra, obtidos do produto MCD12Q1. Derivados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo da plataforma TERRA, lançado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) em 18 de dezembro de 1999 e 4 de maio de 2002, respectivamente, sendo uma alternativa para fazer o monitoramento da distribuição regional e global dos aerossóis. O sensor possui 36 diferentes bandas espectrais que variam de 0,4 a 14,4 μm , em três resoluções espaciais, sendo 2 bandas espectrais com 250 m., 5 bandas espectrais com 500 m. e 29 bandas espectrais com 1 km.

Os produtos de fogo MOD14 (*MODIS Thermal Anomalies*) são disponibilizados gratuitamente pela NASA e distribuídos digitalmente pelo LP DAAC¹. Com resolução espacial nominal de 1 km, contém as informações sobre os focos de queimada e a potência radiativa do fogo (do inglês *Fire Radiative Power*, FRP) liberada no processo de combustão da biomassa (JUSTICE, *et al*, 2002).

O FRP, componente radiativo da energia liberada pela queima da biomassa, pode ser medido por sensoriamento remoto. Este constitui-se como um indicador da quantidade de biomassa consumida na taxa de emissão de aerossóis e gases traços liberados para a atmosfera e no indicador da severidade do fogo. Ao se conhecer a distribuição de temperatura no interior de um pixel, a FRP integrada em todos os comprimentos de onda, pode ser calculada pela equação 1:

$$FRP = \varepsilon \sigma \sum_{i=1}^n A_n T_n^4$$

(Equação 1)

em que FRP representa a potência radiativa do fogo ($J \cdot s^{-1}$), σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$), A_n representa a área fracional (m^2) da n ésima componente termal, T_n^4 é a temperatura (em Kelvin, K) da n ésima componente e ε representa a emissividade. Ressalta-se que a integração da FRP no tempo é denominada de Energia Radiativa do Fogo (*Fire Radiative Energy*, FRE) (WOOSTER, *et al.*, 2005).

4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Processamento das alturas das Plumas no software MIXN

O processo para a geração da altura das plumas de fumaça é de forma manual e assistida por computador. Para obter as plumas de fumaça foi utilizado o programa *Misr Interactive Explorer* (MINX), software desenvolvido no *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) na NASA e distribuído através da *Open Channel Foundation*. O programa é um instrumento de uso geral para visualizar e analisar dados MISR, e opera como uma ferramenta especializada

¹ Link de acesso: <<https://lpdaac.usgs.gov/data/get-started-data/>>

para analisar propriedades de plumas de aerossol (NELSON *et al.*, 2008; NELSON *et al.*, 2013).

Neste software (Figura 3), as plumas de fumaça são digitalizadas nas imagens do sensor MISR, proporcionando recuperações com detalhes espaciais suficientes para fornecer informações valiosas para estudos da dinâmica das plumas e para estudos climatológicos em larga escala, fornecendo aos usuários a capacidade de recuperar localmente alturas e ventos para estudos detalhados de fumaça, poeira e cinzas vulcânicas, bem como nuvens, em resolução espacial mais alta e com maior precisão possível (NELSON *et al.*, 2013).

No MINX, o primeiro passo foi realizar a correção e calibração das câmeras através do produto MIANCAGP. O segundo passo foi determinar o tipo de cobertura da terra na fonte de emissão, para isso foi utilizado o produto MCD12Q1, que emprega 17 classes diferentes de cobertura da terra, definidas pelo programa *Geosphere Biosphere Programme* (SULLA-MENASHE, 2018).

O produto MOD14 foi carregado logo em seguida para indicar os focos de queimada e a potência radiativa do fogo (do inglês *Fire Radiative Power*, FRP). Ainda, antes de iniciar o processamento das plumas foi necessário carregar os produtos de Radiância (GRP_Terrain), o produto referente à parâmetros geométricos (MIB2GEOP).

O MINX exige que o usuário delinieie a área da pluma e identifique a direção do vento, a partir da qual é realizada a correspondência nos dados da banda espectral vermelha (672 nm) e azul (446 nm) (NELSON *et al.*, 2013).

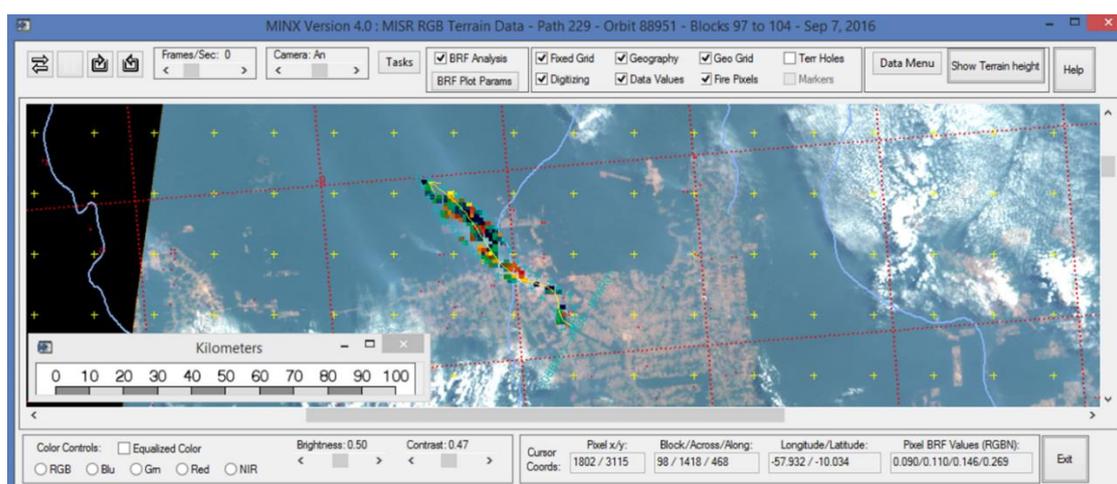


Figura 3: Painel de trabalho do software MINX com um bloco de dados carregados. Os contornos tracejados do polígono da pluma em azul e a indicação da orientação do vento em amarelo.

O processamento das bandas vermelha e azul, permite estudar uma grande variedade de plumas. Os dados da faixa vermelha do MISR são adquiridos com resolução espacial de 275 m. para todos os ângulos de visão e são mais eficazes para o estudo de plumas densas sobre o oceano, enquanto os dados da faixa azul são adquiridos em 1.1 km de resolução espacial em todas as câmeras, exceto a nadir. A faixa azul é preferida para o estudo de plumas menores e mais difusas, principalmente sobre o continente (NELSON *et al.*, 2013).

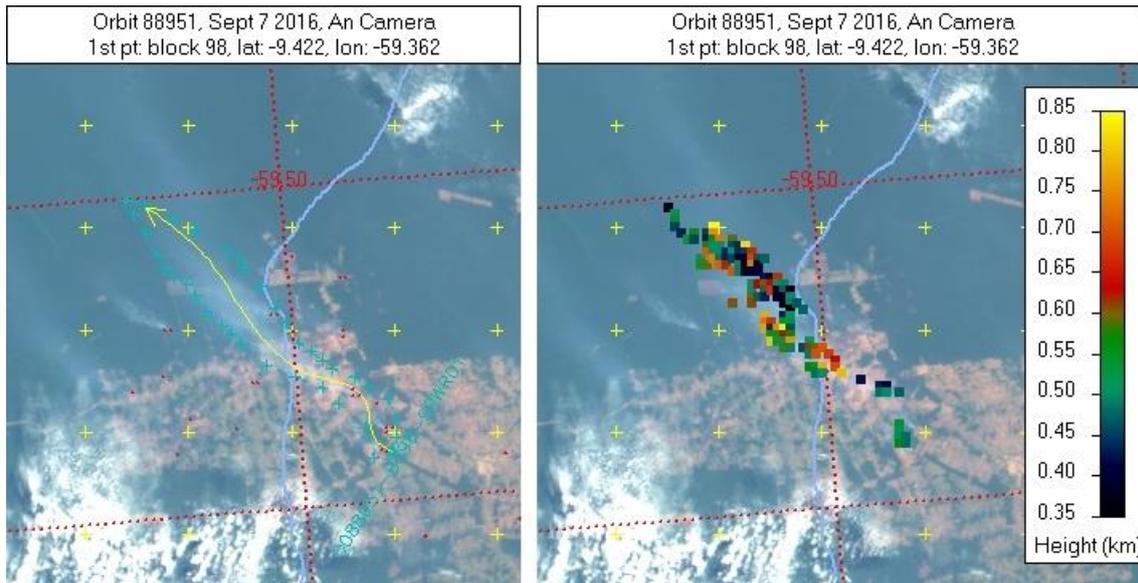


Figura 4: Exemplo de processamento da altura estéreo da pluma.

Os resultados do MINX proporcionam recuperações de altura ao longo do comprimento da pluma (Figura 4), o que permite a geração de perfis de dados (Figura 5) que auxiliam na interpretação de dispersão dinâmica da pluma e as influências externas que afetam sua dispersão. Ambos os perfis compartilham um eixo de distância definido em relação ao ponto inicial digitalizado.

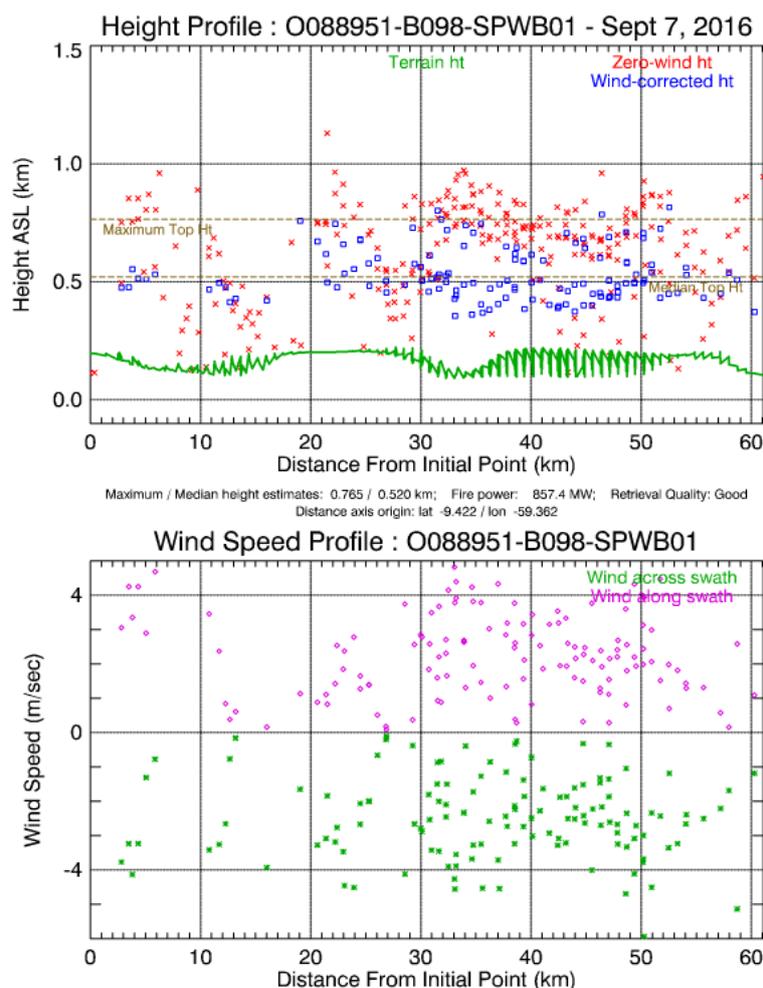


Figura 5: Perfis de dados produzidos no MINX para o polígono da pluma digitalizado na Figura 1. Perfis de altura: alturas de vento zero em km são coloridas em vermelho, as alturas corrigidas pelo vento são azuis e as alturas do terreno são verdes. Perfis de vento: a velocidade do vento em metros por segundo é representada pela cor verde claro e a velocidade do vento ao longo da faixa é magenta.

Ainda, incorpora recursos que permitem aos usuários personalizar suas recuperações em gráficos para obter resultados sob diferentes condições de aerossol e superfície subjacente e, como resultado, são obtidos dados em formato .txt contendo diversas informações onde posteriormente são filtrados e selecionados, como a localização, a FRP e a altura de injeção de cada pluma.

4.2.2 Obtenção dos dados de interesse e mapas de visualização

A partir de um programa originado em IDL/ENVI (*Interactive Data Language*) foram filtrados e selecionados os dados de interesse dos arquivos .txt obtidos para análise, como a localização, a FRP e a altura de injeção de cada pluma. Ainda, foi elaborado um *script*,

também na linguagem IDL, para geração de arquivos em *shapefile*, que possibilitou a criação de mapas permitindo a visualização espacial dos focos das plumas de queimadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o processamento e filtragem das plumas digitalizadas com o *script* elaborado, foram registradas um total de 2083 colunas de plumas na AS nos anos 2015 e 2016, entre os meses de julho a outubro. Esta seção do trabalho apresentará todos os resultados obtidos em geral, em gráficos e mapas, e também destacará algumas das plumas de fumaça maiores e que mais se destacaram para este estudo, encontradas durante a digitalização do projeto, sugerindo interpretações de alguns dos fenômenos observados.

Optou-se pela escolha de quatro casos específicos de focos em que as recuperações do MINX estão disponíveis em alta qualidade. Cada caso é identificado por data; UTC e horário local; órbita MISR; caminho e números de bloco. A qualidade de um caso é determinada pela espessura óptica do aerossol suficiente para que os recursos de contraste da pluma sejam claramente visíveis nas imagens e distintos da superfície. O critério de espessura óptica é avaliado através da inspeção visual de cada cena usando a função de animação da câmera MINX.

Os quatro casos selecionados para este estudo são: (1) Pluma de fumaça gerada em 06 de setembro de 2015 na latitude -10.157 e longitude -44.020; (02) Pluma de fumaça gerada em 28 de setembro 2015 na latitude -3.359 e longitude -59.823; (3) Pluma de fumaça gerada em 03 de setembro de 2016 na latitude -8.660 e longitude -64.871; (4) Pluma de fumaça gerada em 17 de outubro de 2016 na latitude -8.020 e longitude -45.170.

5.1 MAPEAMENTO E PROCESSAMENTO DAS PLUMAS PARA O ANO DE 2015

A Figura 6 apresenta a distribuição dos focos de origem das plumas durante a estação seca, compreendida entre os meses de julho a outubro. Foram observadas no total 968 colunas de plumas para toda a América do Sul para o ano de 2015. A escala de cores determina a altura em metros das plumas que variam de centenas de metros chegando a ultrapassar os 3000 metros acima do terreno em certas regiões.

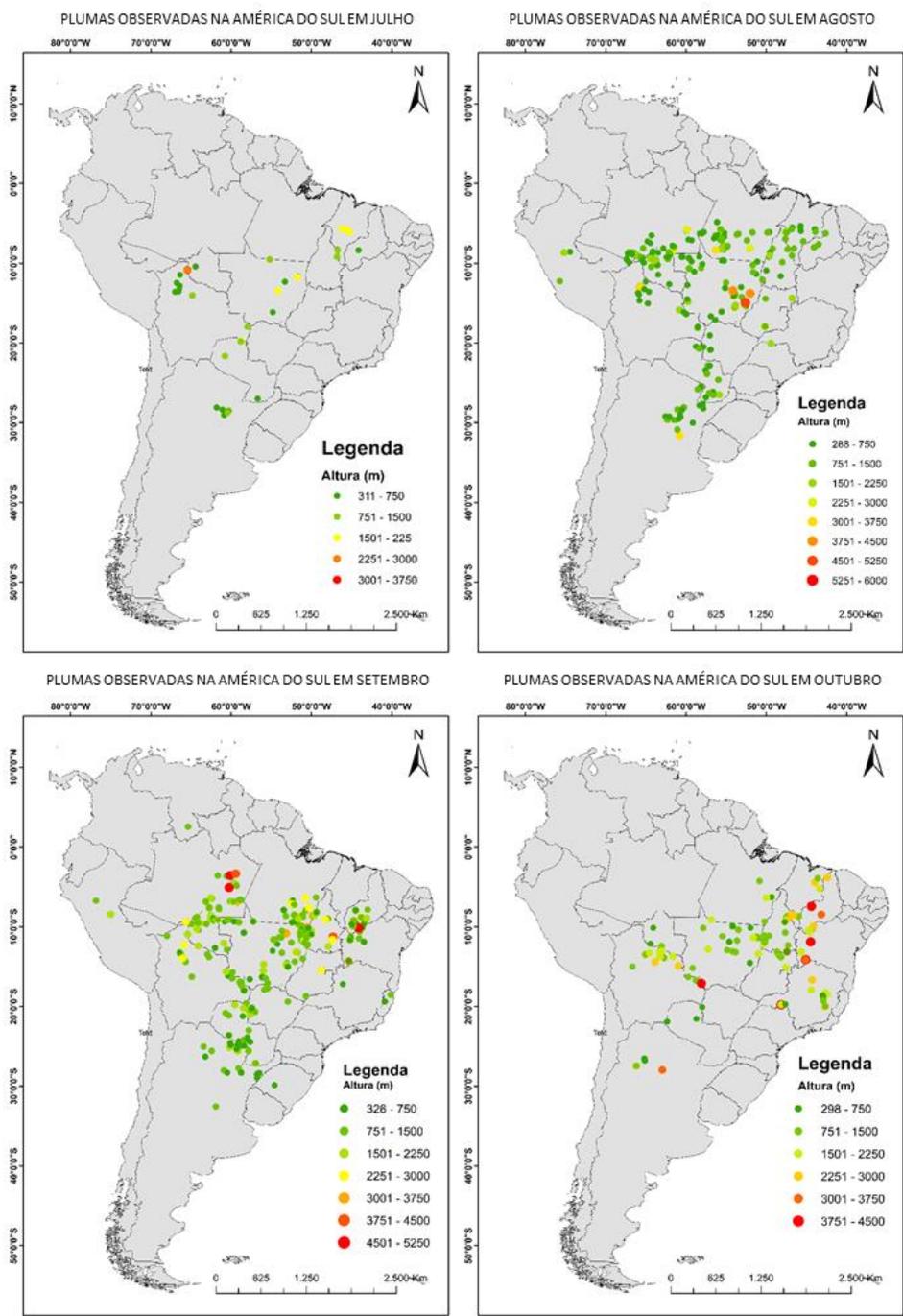


Figura 6: Distribuição espacial dos locais de emissões das plumas para o ano de 2015.

A altura média de todas as plumas registradas no continente foi de 827 metros. O Brasil foi o país que registrou um expressivo número de ocorrências, sendo a região Nordeste brasileira a área mais ativa, onde as maiores médias de alturas ocorreram durante o mês de agosto (1056 m.), enquanto que no Centro-Oeste e na borda da região Amazônica ocorreram no mês de setembro (748,5 m.). A fim de comparar a distribuição mensal das alturas das plumas, foi elaborado o gráfico *boxplot* que pode ser visualizado na Figura 7:

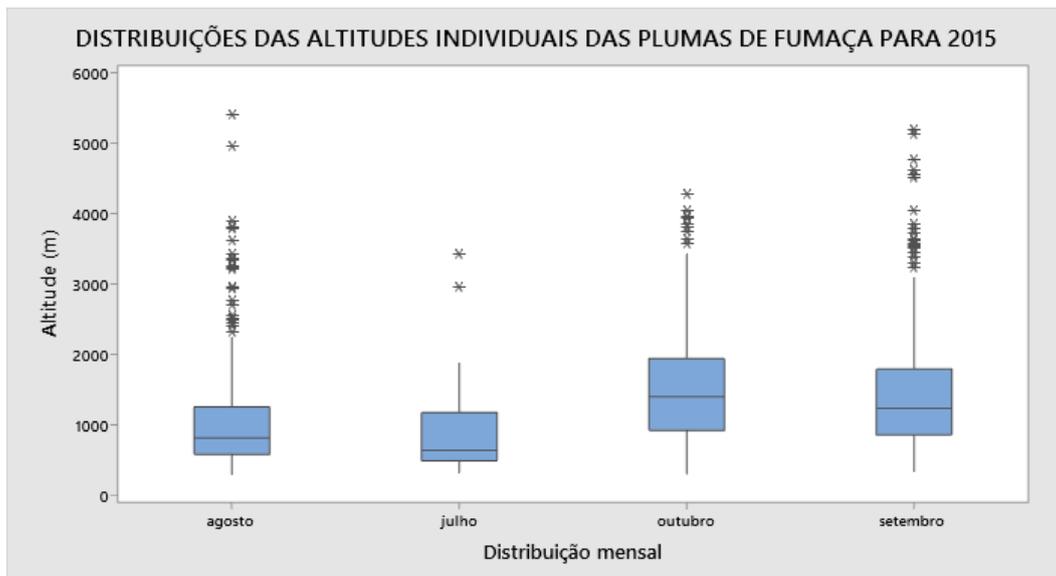


Figura 7: Distribuição mensal por altitude das recuperações de 2015.

Verifica-se que as alturas das plumas foram altamente variáveis em relação ao período analisado, onde as maiores alturas registradas foram 3400 m. para mês de julho, 5700 m. no mês de agosto, 3600 m. para setembro e 3500 m. para outubro. Analisando o número de ocorrências, os maiores registros de injeção de pluma na atmosfera aconteceram no mês de setembro (404), seguido de agosto (344), outubro (164) e julho (56) com o menor registro entre os meses analisados. As concentrações dos focos ocorreram no leste e sul do Pará, Mato Grosso, Rondônia e Acre, justificada pela grande quantidade de queimadas que ocorrem associados com a expansão agropecuária nessa região (MARENGO *et al.*, 2010; CARDOZO *et al.*, 2014).

5.1.1 Caso 1: 06 de setembro de 2015 (MISR Orbit 83606; path 220; block99)

Um dos casos de detecção de pluma de fumaça na atmosfera para o ano de 2015 é mostrado na Figura 8. A figura apresenta uma pluma gerada em 06 de setembro de 2015 na latitude -10.157, longitude -44.020, derivados do software MINX, distante 7 km do município de Avelino Lopes, na microrregião das Chapadas do Extremo Sul Piauiense, sudoeste do estado.

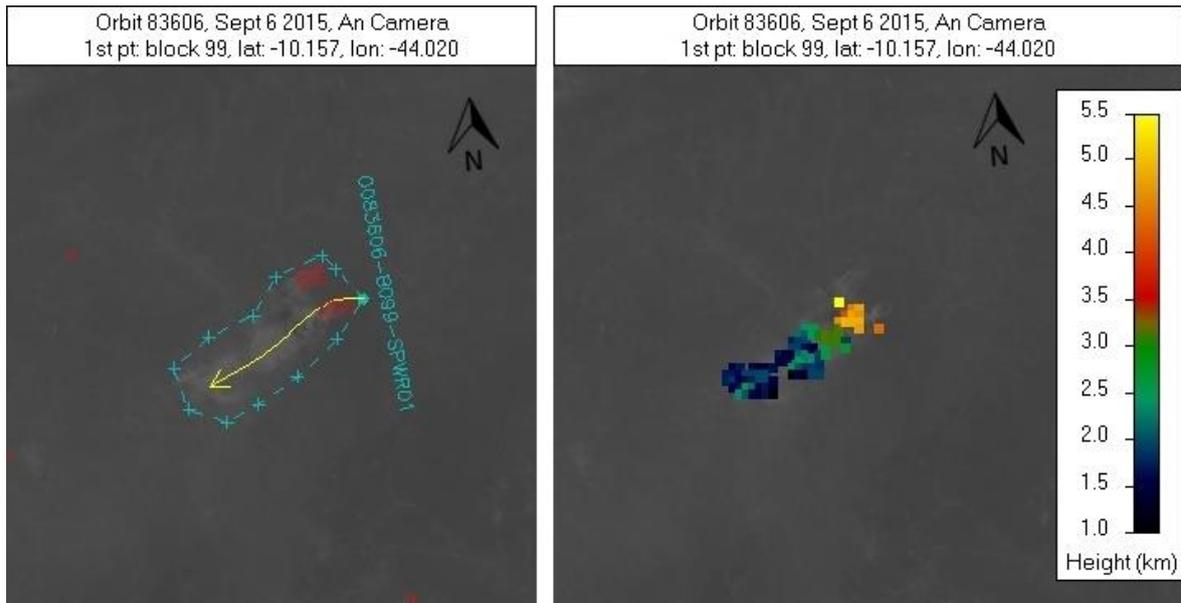


Figura 8: Registro de pluma de fumaça em 06 de setembro de 2015, na órbita MISR 83606.

Com altitudes que variam entre 1 e 5 km, este caso apresentam dois focos de emissão que avançam para a sudoeste. Na ascensão flutuante inicial da pluma percebe-se que a média da altura de registro foi de 5 mil metros. Outra informação que pode ser extraída, neste caso, é sobre a intensidade da queimada com a presença de intensos pixels indicando o tamanho e a área de abrangência da queimada, onde a potência radiativa do fogo (8401 mw) pode estar intrinsicamente relacionado à ascensão intensa da pluma próximo ao foco, que é justificada pela cobertura da terra no foco da pluma no ano de 2015 como formação savânica (MAPBIOMAS, 2017).

A Figura 9 mostra os perfis de altura corrigida após o processamento gerado pelo MINX para a pluma digitalizada na Figura 8.

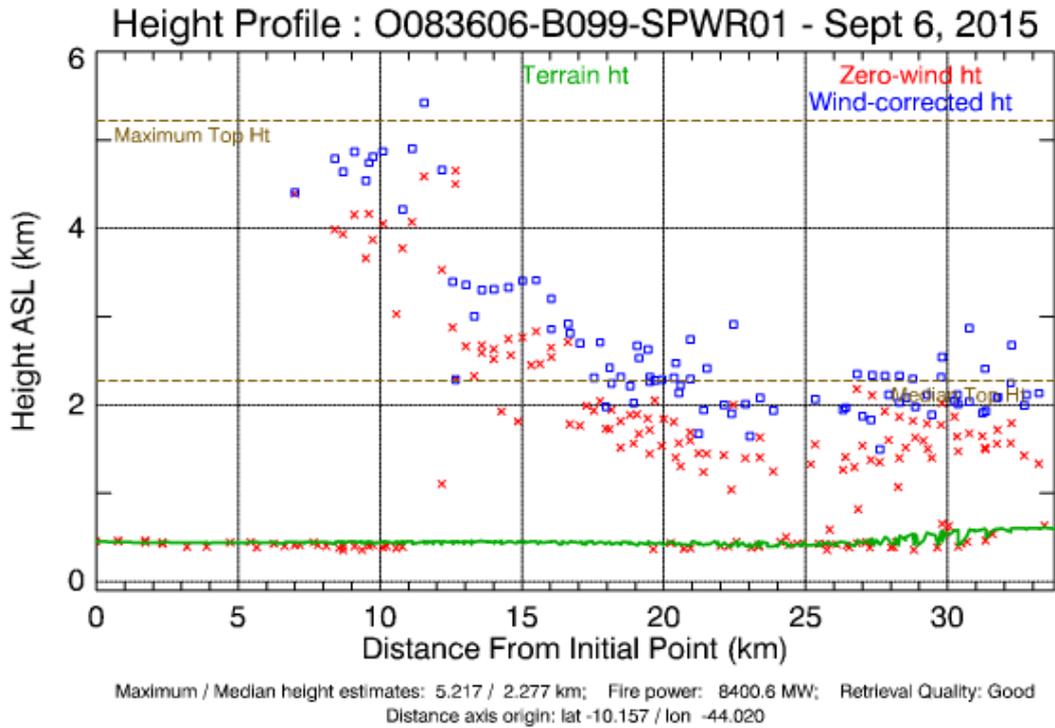


Figura 9: Perfil de altura gerado pelo MINX para a pluma digitalizada na órbita 83606.

As alturas superiores detectadas da pluma estão a cerca de 5,2 km, aproximadamente 11 km de distância da abertura. Com deslocamento horizontal, numa distância de 15 km da sua origem, a pluma registou a média de altura de 2.500 metros. A área coberta foi de 418 km² com perímetro de 87 km.

5.1.2 Caso 2: 28 de setembro de 2015 (MISR Orbit 83927, path 230, block 93)

Outro caso de detecção de pluma de fumaça é mostrado na Figura 10, que apresenta uma captação bastante densa e longa. No quadro esquerdo está visualizada a imagem da câmera MISR nadir da captação da pluma de fumaça na latitude -3.359; longitude -59.823, distante cerca de 34 km ao sul da capital do estado do Amazonas, Manaus, capturada em 28 de setembro de 2015 durante a órbita da Terra 83927.

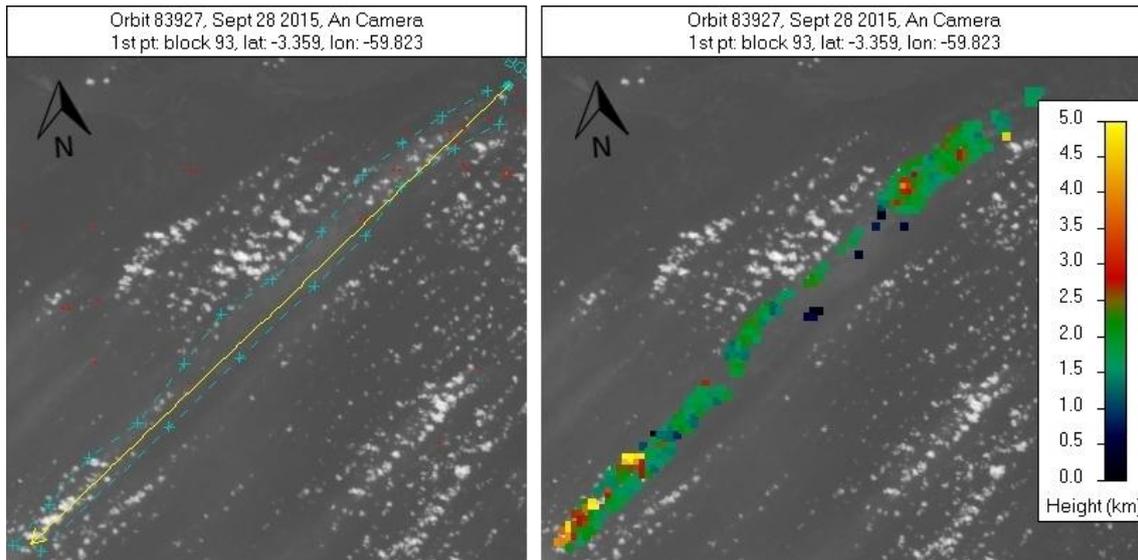


Figura 10: Registro de pluma em 28 de setembro de 2015, na órbita MISR 83927.

Numa trajetória retilínea em direção ao sudoeste do continente, percebe-se que a maioria dos pixels se concentram em torno de 2,25 km de altura. De acordo com o projeto MapBiomias (2017), o uso da terra para o ano do foco é descrito como floresta de formação florestal. As alturas estereoscópicas corrigidas pelo vento são mostradas na Figura 11 e indicam uma pluma direcionada a SW que se estende por mais de 120 km a favor do vento, cobrindo uma área de 830 km² com perímetro de 269 km.

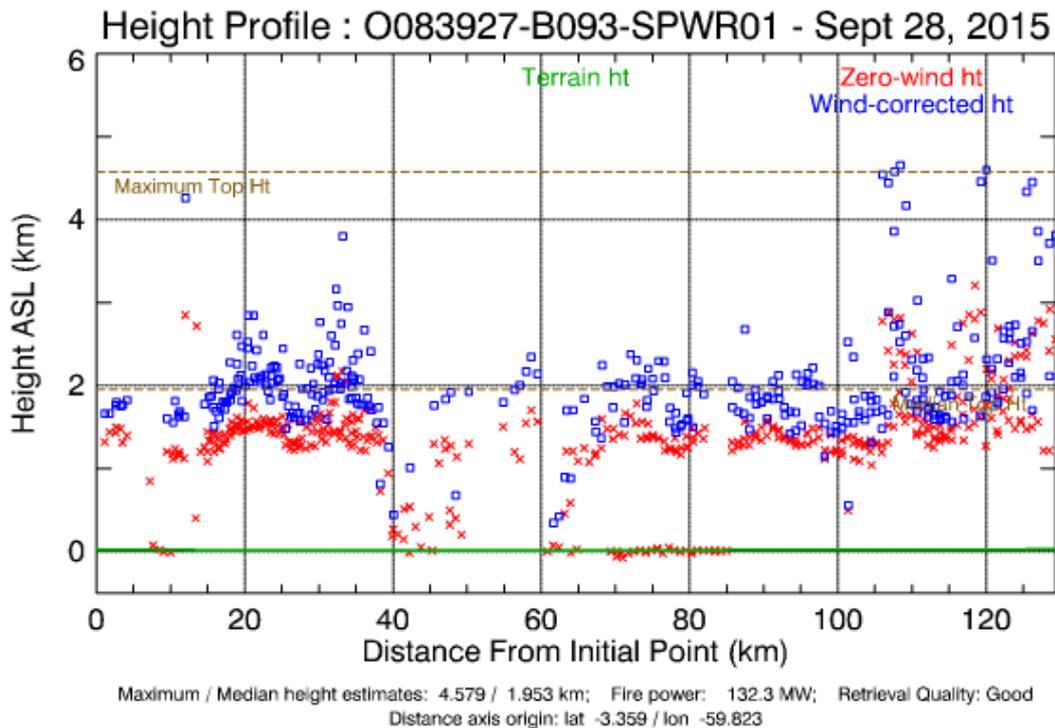


Figura 11: Perfil de altura gerado pelo MINX para a pluma digitalizada na órbita 83927.

A Figura 11 mostra os perfis de altura gerado pelo MINX para a pluma digitalizada na Figura 10. Analisando o transporte da mesma, é possível descrever que o valor máximo de altura registrado foi de 4,3 km de altura. Percebe-se que o transporte foi uniforme, desde o foco de emissão até os 120 km de distância, mantendo um média de altura de 1,9 metros.

5.2 MAPEAMENTO E PROCESSAMENTO DAS PLUMAS PARA O ANO DE 2016

A Figura 12 mostra a distribuição espacial dos focos das plumas no continente para os meses analisados no ano de 2016. Foram observadas 792 plumas de fumaça. Na figura, é notável como as concentrações dos focos ocorreram principalmente nos estados de Rondônia, Acre e Mato Grosso, e na região Norte com grandes incidências no estado do Pará, coincidindo com as áreas mapeadas para 2015. As nuvens de fumaça durante esse período de queima intensa na região dos estados citados, eram espacialmente expansivas, altamente visíveis e facilmente digitalizadas. A escala de cores determina a altura em metros das plumas que variam de algumas centenas de metros chegando a ultrapassar os 5000 metros acima do terreno em certas regiões.

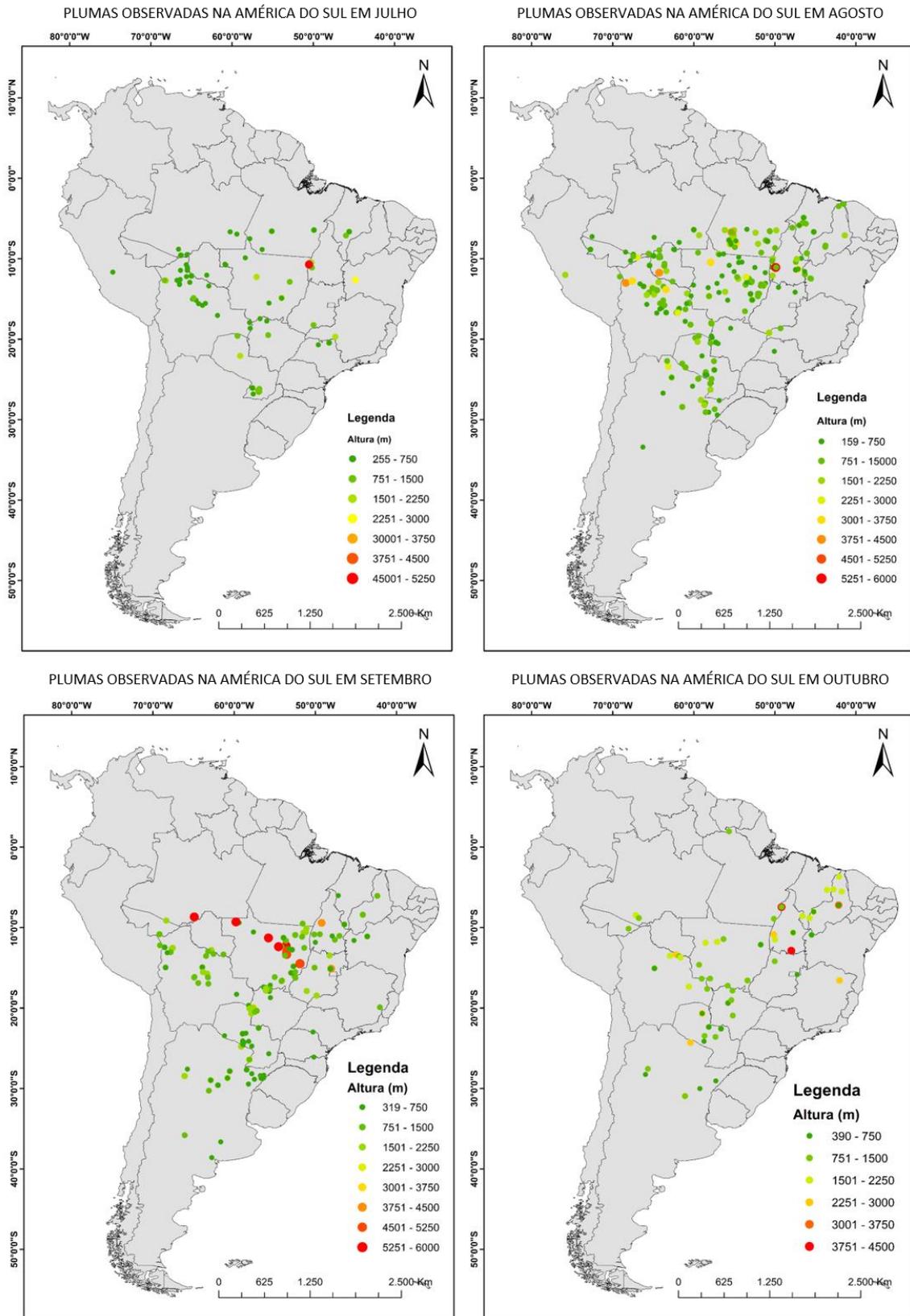


Figura 12: Distribuição espacial dos locais de emissões das plumas para 2016.

Os resultados dos processamentos das plumas de fumaça mostram que a região Centro-Oeste brasileira (Figura 12) é a área com mais focos, onde verifica-se um expressivo número de ocorrências, em contrapartida com as detecções de 2015.

A fim de comparar a distribuição mensal das alturas das plumas foi construído, no software R, o gráfico *boxplot* que pode ser visualizado na Figura 13.

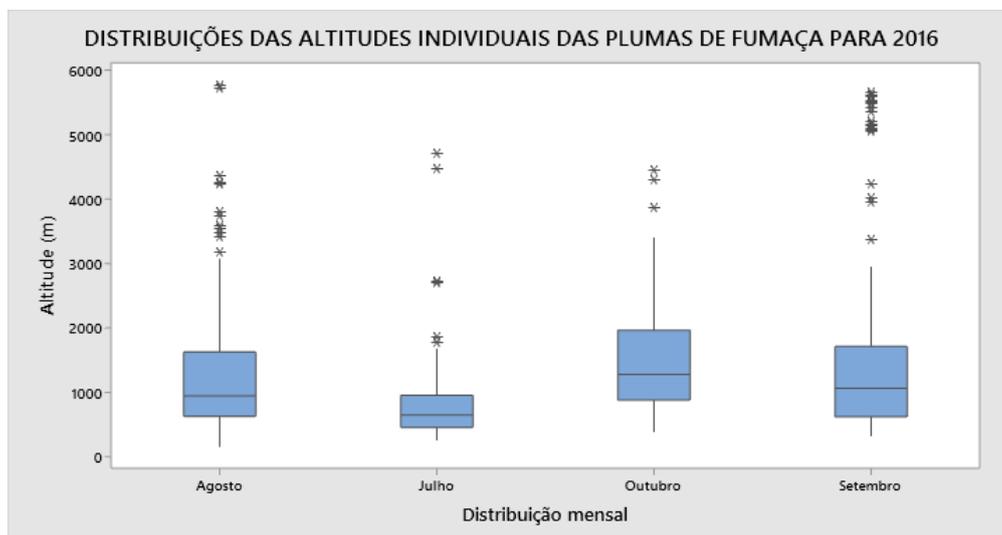


Figura 13: Distribuição mensal por altura para as recuperações de 2016.

Verifica-se que as alturas das plumas foram altamente variáveis em relação ao período analisado. Os maiores registros obtidos após a filtragem dos dados para cada mês foram: 3421 m. para julho; 5427 m. em agosto; 5205 m. para setembro e 4994 m. para outubro. Analisando o número de ocorrências, os maiores registros de injeção das plumas na atmosfera aconteceram no mês de agosto (371), seguido de setembro (220), julho (109) e outubro (92) com o menor registro entre os meses analisados.

5.2.1 Caso 3: 03 de setembro de 2016 (MISR Orbit 88893; path 233; block 97)

A Figura 14 mostra as imagens das alturas processadas na câmera nadir da pluma ativa na latitude -8.660; longitude -64.871 (Microrregião de Purus, Sul Amazonense), capturada em 03 de setembro de 2016 durante a órbita da Terra 88893. No quadro esquerdo a imagem da câmera MISR nadir da pluma processada.

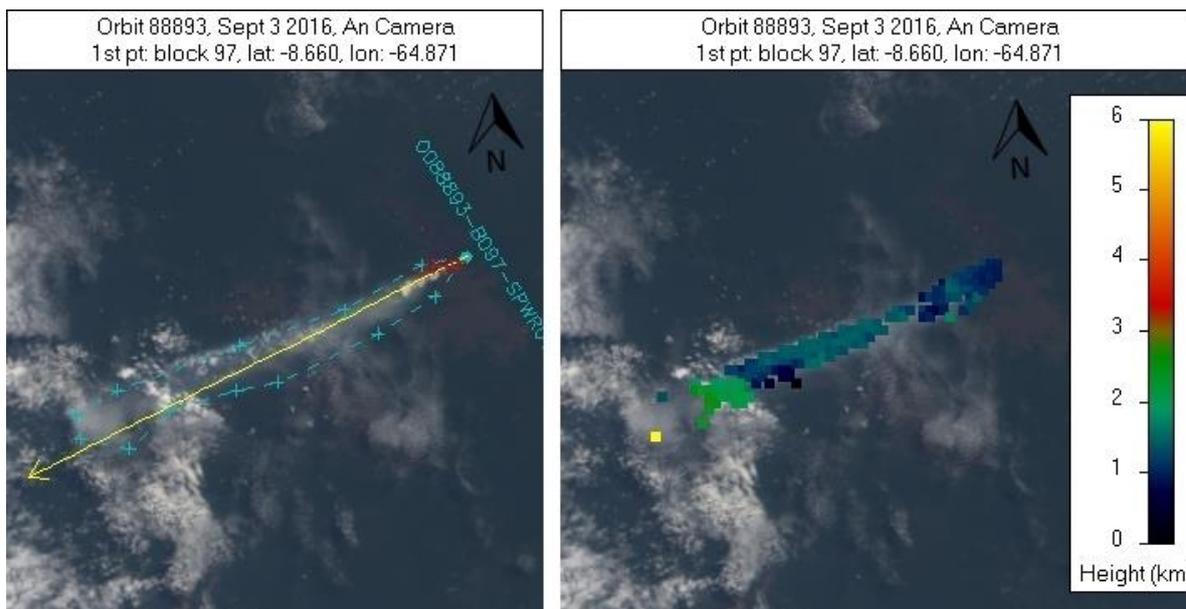


Figura 14: Registro de pluma em 03 de setembro de 2016, na órbita MISR 88893.

Percebe-se que a altura das plumas na Figura 14 concentra-se próxima à superfície, com uma altura média de 1800 metros, estendendo-se para a região sudoeste, exibindo uma direção e forma bem consistente.

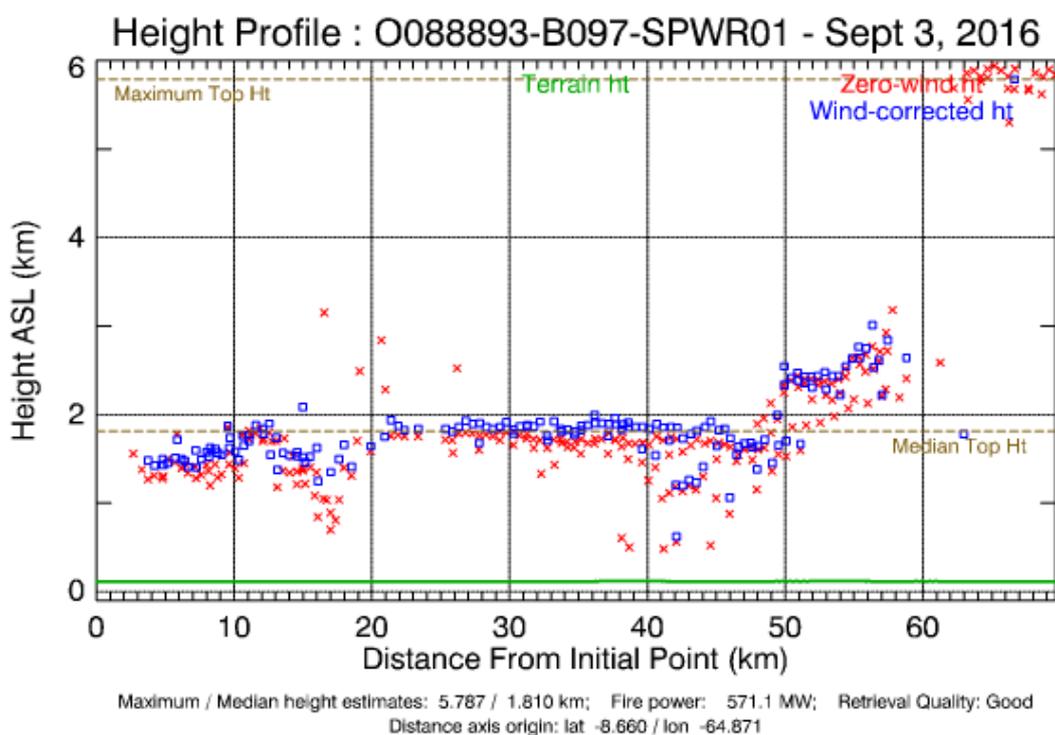


Figura 15: Perfil de altura gerado pelo MINX para a pluma digitalizada na órbita 88893.

No perfil de altura da pluma recuperada na órbita 88893, as alturas médias da fumaça manteve-se em 2000 metros desde o seu foco inicial até os 50 km de distância, a partir

deste ponto ocorreu um aumento dos valores dos pixels, atingindo 2,5 km de altitude. Cobrindo uma área de 438 km² e com perímetro de 147 km. A cobertura do solo no foco da queimada é descrita pelo MapBiomás (2017) como formação florestal e o valor da FRP detectada na queimada foi de 571 mw.

5.2.2 Caso 4: 17 de outubro de 2016 (MISR Orbit 89533; path 221; block 97)

Na figura 16 é possível observar uma coluna de fumaça processada em 17 de outubro de 2016, observada na latitude -8.020, longitude -45.170, distante cerca de 20 quilômetros do município de Baixa Grande do Ribeiro, da microrregião do Alto Parnaíba, no Sudoeste do estado do Piauí. De acordo com o projeto MapBiomás (2017), a área do foco é caracterizada como agricultura, de cultivo anual e perene, demonstrando a prática do uso do fogo como ferramenta de manejo no campo, para abertura de novas áreas agrícolas, no controle de pragas e para remoção dos remanescentes agrícolas. A potência radiativa do fogo foi de 2148 mw.

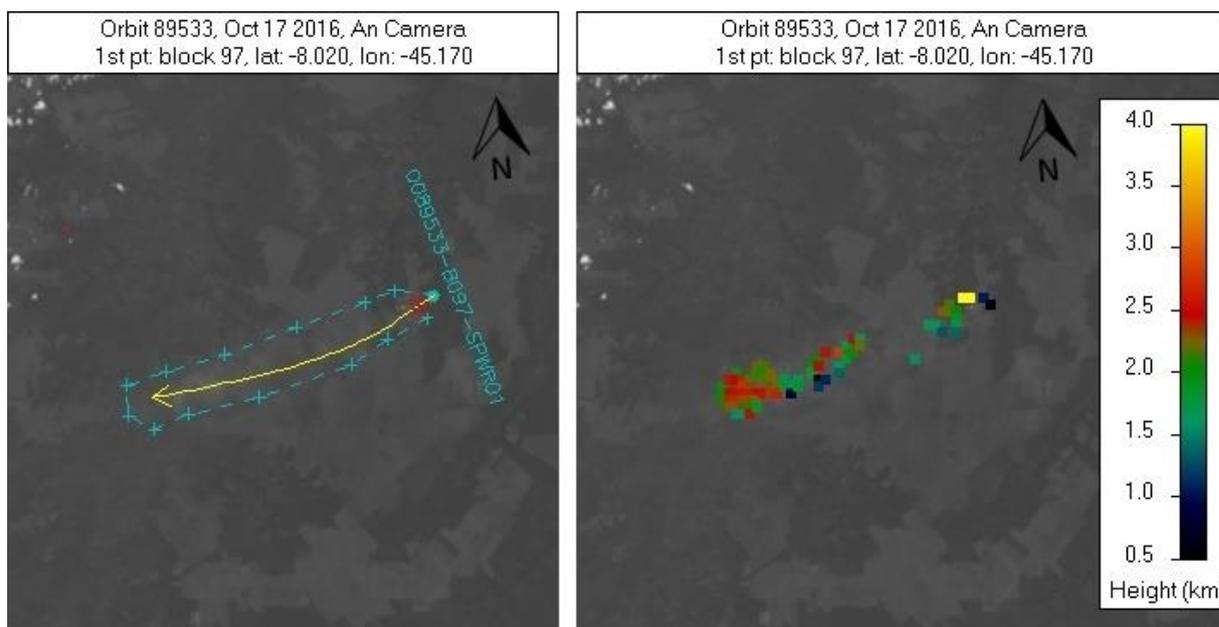


Figura 16: Registro de pluma em 17 de outubro de 2016, na órbita MISR 89533.

Este caso permite perceber que dentro de uma única pluma, há valores variados em altura, à medida que a pluma se desloca, revelando a presença de aerossóis em diferentes alturas ao longo da pluma, oscilando em altas (3 km ~ 4 km) e baixas (0,5 km ~ 1,5 km). Essas diferenças podem ser atribuídas a variações da direção do vento em função da altura. Verifica-se que a injeção foi transportada em direção SSW, onde a fumaça ficou

concentrada na área de emissão inicial, registrando 4 km de altura, e ao distanciar ocorreu o espalhamento da fumaça e redução dos valores de altura.

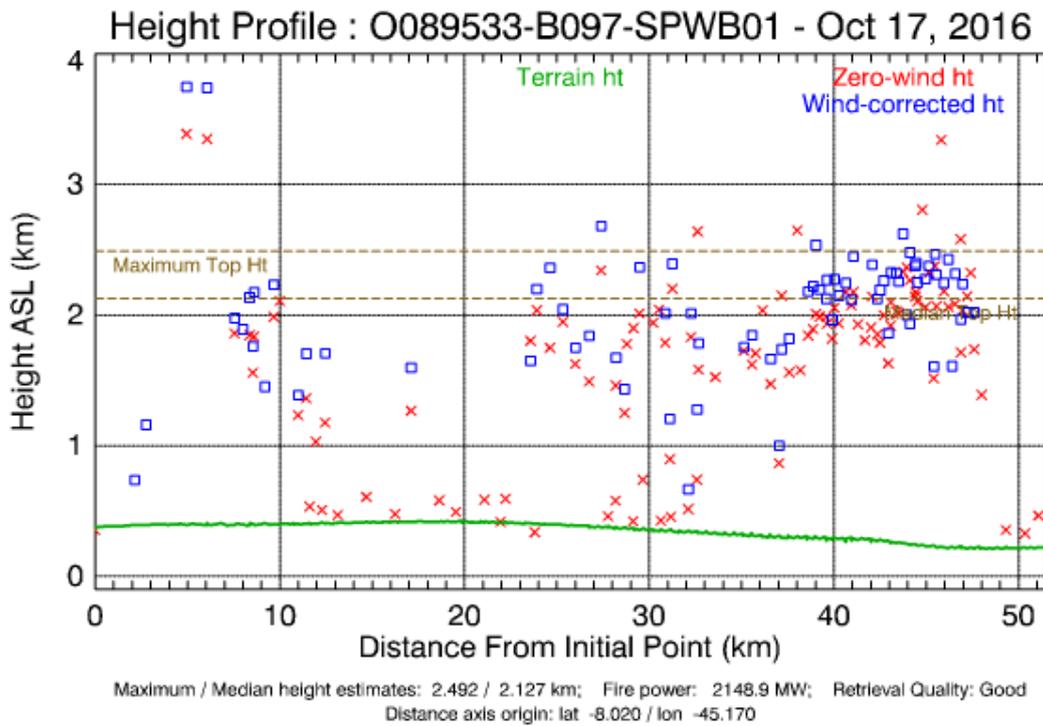


Figura 17: Perfil de altura gerado pelo MINX para a pluma digitalizada na órbita 89533.

A Figura 17 mostra os perfis de altura gerados pelo MINX para a pluma digitalizada na Figura 16. O perfil de altura corrigido pelo vento mostra a pluma mantendo-se na altura média de 2,3 km na direção do vento, permanecendo nessa altura até atingir a distância de 40 km da origem do perfil. Após essa distância, a pluma começa a se concentrar até ficar a algumas centenas de metros acima da superfície da terrestre, na altitude média de 2.127 metros. A pluma cobriu uma área de 387 km² dentro de um perímetro de 112 km.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo com esse trabalho foi de identificar o período e as principais áreas afetadas por entradas de plumas de aerossóis de queimada na atmosfera na América do Sul. Neste sentido, foram detectadas e analisadas 968 colunas de plumas para o ano de 2015 e 792 em 2016. A distribuição espacial dos focos de queimadas e sua relação com o UCT indicam que as áreas mais atingidas pelas queimadas. Verificou-se que as plumas observadas na AS exibiram uma direção e forma de transporte muito consistentes.

Compreender a dinâmica da injeção de plumas é um aspecto importante para quantificar melhor o impacto climático dos aerossóis emitidos por fogo. Vários são os estudos que destacam a necessidade de melhorar nossa capacidade de quantificar o impacto das plumas nos orçamentos de radiação atmosférica e de superfície da região.

Ressalta-se que as geotecnologias têm sido imprescindíveis, uma vez que permitem a visualização e a distribuição de fenômenos, auxiliando na tomada de decisões. Assim, a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto tem se mostrado fundamental, na medida em que os bancos de dados gerados através do uso de satélites correspondem a uma importante fonte de informações sobre os diversos fenômenos que ocorrem na superfície terrestre.

Logo, esta capacidade de investigar a geometria e dinâmica da pluma está se tornando cada vez mais importante para os estudos de clima e qualidade do ar, onde exigem maior conhecimento das injeções de aerossóis e a sua localização dentro da atmosfera. Ressalta-se que este trabalho irá complementar e ampliar nossos esforços anteriores por contabilizar a distribuição colunar das camadas de aerossol.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIKEN, S. R.; Runaway fires, smoke-haze pollution, and unnatural disasters in Indonesia. **Geographical Review**, 94, no. 1 (2004): 55-79.
- ANDREAE, M. O.; ARTAXO, P.; FISCHER, H.; FREITAS, S. R.; Transport of biomass burning smoke to the upper troposphere by deep convection in the equatorial region. **Geophysical Research Letters**, v.28, n.6, p.951-954, 2001.
- ARANTES, A. E.; FERREIRA, L. G.; COE, M. T.; The seasonal carbon and water balances of the Cerrado environment of Brazil: Past, present, and future influences of land cover and land use. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 117, p. 66-78, 2016. ISSN 0924-2716, <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.02.008>.
- ARTAXO, P.; SETZER, A.; **Emissões de material particulado de queimadas na Floresta Amazônica e no Cerrado**. Subsídio Técnico ao Documento Básico do I Seminário sobre Incêndios Florestais e Queimadas. Brasília: IBAMA, abril de 1992. 23p.
- BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J.; **Atmosphere, weather and climate**. Routledge, 2009.
- CARDOZO, F. S.; PEREIRA, G.; SHIMABUKURO, Y. E.; MORAES, E. C.; Analysis and Assessment of the Spatial and Temporal Distribution of Burned Areas in the Amazon Forest. **Remote Sensing**, v. 6, p. 8002-8025, 2014.
- COCHRANE, M. A.; Fire and fire ecology: Concepts and Principles. In: **Tropical Fire Ecology, Climate Change, Land Use and Ecosystem Dynamics**, Springer: Chichester, UK, pp. 60-97, 2009.
- COUTINHO, L. M.; *et al.*; O Bioma do Cerrado e o Fogo. **Revista do Instituto de Estudos Avançados da USP**, 50 pp., 2002.
- DINER, D. J.; *et al.*, Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) instrument description and experiment overview, in **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 36, no. 4, pp. 1072-1087, July 1998. doi: 10.1109/36.700992
- FEARNSIDE, P. M.; RIGHI, C. A.; GRAÇA, P. M. L. A.; KEIZER, E. W. H.; CERRI, C. C.; NOGUEIRA, E. M.; BARBOSA, R. I.; Biomass and greenhouse gas emissions from land-use change in Brazil's Amazonian "arc of deforestation": The states of Mato Grosso and Rondônia. **Forest Ecology and Management**, n. 258, p. 1968-1978, 2009.

FIELD, R. D.; VAN DER WERF, G. R.; SHEN, S. SP.; Human amplification of drought-induced biomass burning in Indonesia since 1960. **Nature Geoscience** 2, no. 3 (2009): 185.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **State of the World's Forests**. Rome: 2007, 2007.

FREITAS, S. R.; *et al.*; **Emissões de queimadas em ecossistemas da América do Sul**. Estudos Avançados, v. 19, n. 53, p. 167–185, 2005.

GARRATT, J. R.; The atmospheric boundary layer. **Earth-Science Reviews** 37, no. 1-2 (1994): 89-134

HERRERA, G. V.; Mexican forest fires and their decadal variations. **Advances in Space Research**, v. 58 (10), p. 2104-2115, 2016. ISSN 0273-1177, <http://doi.org/10.1016/j.asr.2016.08.030>.

ICHOKU, C.; KAUFMAN, Y. J.; A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements. **IEEE Trans. on Geosc. & Rem. Sens.**, v. 43, n. 11, p. 2636-2649, 2005.

JIMENEZ, J. L.; CANAGARATNA, M. R.; DONAHUE, N. M.; PREVOT, A. S. H.; ZHANG, Q.; KROLL, J. H.; WORSNOP, D. R.; (2009). Evolution of Organic Aerosols in the Atmosphere. **Science**, 326(5959), 1525 LP – 1529. <https://doi.org/10.1126/science.1180353>

JUSTICE, C. O. et al. The MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 244-262, 2002.

KAHN, R. A., GAITLEY, B. J.; (2015); An analysis of global aerosol type as retrieved by MISR. **J. Geophys. Res. Atmos.**, 120, 4248– 4281. doi: 10.1002/2015JD023322.

KAHN, R. A.; *et al.*; Wildfire smoke injection heights: Two perspectives from space. **Geophysical Research Letters** 35.4 (2008).

KANAKIDOU, M.; SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N.; BARNES, I.; DENTENER, F. J.; FACCHINI, M. C.; VAN DINGENEN, R; *et al.* Organic aerosol and global climate modelling: a review. **Atmospheric Chemistry and Physics**. no. 4 (2005): 1053-1123.

KAUFMAN, Y. J.; REMER, L.; OTTMAR, R.; WARD, D.; RONG-R, L.; KLEIDMAN, R.; FRASER, R.; FLYNN, L.; MCDUGAL, D.; SHELTON, G. Relationship between

remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment. In: Levine, J. (Ed.). **Global biomass burning**. Maryland: MIT Press, 1996. p. 685-696.

KIM, B. M.; SEO, J.; YOUNG KIM, J.; LEE, J.; KIM, Y.; Transported vs. local contributions from secondary and biomass burning sources to PM_{2.5}. **Atmospheric Environment**, v. 144, p. 24-36, 2016. ISSN 1352-2310, <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.072>.

LAVOUE, D.; LIOUSSE, C.; CACHIER, H.; STOCKS, B. J.; GOLDAMMER, J. G. Modeling of carbonaceous particles emitted by boreal and temperate wildfires at northern latitudes. **J. Geophys. Res.**, v. 1035, p. 26871-26890, 2000.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomass**. Disponível em:<<http://mapbiomas.org>>. Acesso em: 30 out. 2019.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C.; SALAZAR, L. F.; Regional climate change scenarios in South America in the late XXI century: Projections and expected impacts. **Nova Acta Leopold**, v. 112, p. 251–265, 2010.

MAZZONI, D.; LOGAN, J. A.; DINER, D.; KAHN, R.; TONG, L.; LI, Q.; A data-mining approach to associating MISR smoke plume heights with MODIS fire measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 107 (1-2), p. 138-148, 2007.

MORONEY, C.; DAVIES, R.; MULLER, J-P.; Operational retrieval of cloud-top heights using MISR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** 40, no. 7 (2002): 1532-1540.

OLIVEIRA, A. M.; MARIANO, G. L.; Identificação de Entrada de Plumas Queimada e Principais Áreas Afetadas na Região Sul do Brasil. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 2, p. 241–249, 2014.

PAUGAM, R.; WOOSTER, M.; FREITAS, S.; A review of approaches to estimate wildfire plume injection height within large-scale atmospheric chemical transport models. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16 (2), p. 907-925, 2016. ISSN 1680-7316.

PEREIRA, G.; FREITAS, S. R.; MORAES, E. C.; FERREIRA, N. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; RAO, V. B.; LONGO, K. M.; 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.

PRINS, E. M.; MENZEL, W. P. Geostationary satellite detection of biomass burning in South America. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 15, p. 2783-2799, 1992.

PURNOMO, H.; SHANTIKO, B.; SITORUS, S.; GUNAWAN, H.; ACHDIAWAN, R.; KARTODIHARDJO, H.; DEWAYANI, A. A.; Fire economy and actor network of forest and land fires in Indonesia. **Forest Policy and Economics**, v. 78, p. 21-31, 2017. ISSN 1389-9341, <http://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.01.001>.

RANDERSON, J. T.; VAN DER WERF, G. R.; GIGLIO, L.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. S.; **Global Fire Emissions Database**, Version 4, (GFEDv4). ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1293>, 2015.

RECUERO, F. S.; **Estudo do transporte das partículas de aerossol de queimada via sensoriamento remoto**. PhD diss., Universidade de São Paulo, 2003.

ROBERTS, G.; WOOSTER, M. J.; PERRY, G. L. W.; DRAKE, N.; REBELO, L.-M.; DIPOTSO, F.; Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: Application to southern Africa using geostationary SEVIRI imagery. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 110, n. D21, 2005.

SEINFELD J.; PANDIS, S.; **Atmospheric Chemistry and Physics**. Hoboken, New Jersey. 2ed. John Wiley & Sons, Inc., 2006, 1248p.

STULL, R. B.; An introduction to boundary layer meteorology. Vol. 13. **Springer Science & Business Media**, 2012.

SULLA-MENASHE, D.; FRIEDL, M. A.; **User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover (MCD12Q1 and MCD12C1) Product**. USGS: Reston, VA, USA (2018).

VAL MARTIN, M.; LOGAN, J. A.; KAHN, R. A.; LEUNG, F.-Y.; NELSON, D. L.; DINER, D. J.; Smoke injection heights from fires in North America: analysis of 5 years of satellite observations. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 10, p. 1491-1510, 2010.

VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. S.; ARELLANO JR., A. F.; Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. **Atmospheric Chemistry and Physics**, n. 6, p. 3423-3441, 2006.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V.; **Atmospheric science: an introductory survey**. Vol. 92. Elsevier, 2006.

WOOSTER, M. J.; ROBERTS, G.; PERRY, G. L. W.; KAUFMAN, Y. J.; (2005). Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, 110(24), 1–24. <https://doi.org/10.1029/2005JD006318>

WOOSTER, M. J.; ROBERTS, G.; PERRY, G.; KAUFMAN, Y. J.; Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. D21111, 2005.

XU, W.; WOOSTER, M.; ROBERTS, G.; FREEBORN, P.; New GOES imager algorithms for cloud and active fire detection and fire radiative power assessment across North, South and Central America. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 9, p. 1876-1895, 2010.