



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

LÚCIA CARDOSO DA PAIXÃO

**UTILIZAÇÃO DO CATT-BRAMS PARA ANÁLISE DO TRANSPORTE E
DISPERSÃO DE MATERIAL PARTICULADO E MONÓXIDO DE CARBONO
PROVENIENTE DA QUEIMA DA BIOMASSA VEGETAL E DA ATIVIDADE
INDUSTRIAL NO ESTADO DO PARÁ**

BELÉM - PA

2015

LÚCIA CARDOSO DA PAIXÃO

**UTILIZAÇÃO DO CATT-BRAMS PARA ANÁLISE DO TRANSPORTE E
DISPERSÃO DE MATERIAL PARTICULADO E MONÓXIDO DE CARBONO
PROVENIENTE DA QUEIMA DA BIOMASSA VEGETAL E DA ATIVIDADE
INDUSTRIAL NO ESTADO DO PARÁ**

Dissertação apresentada para obtenção do grau de mestre em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências, dentro do convênio entre Universidade Federal do Pará, EMBRAPA Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi.

Orientador: Prof. Dr. José Henrique Cattanio

BELÉM-PA

2015

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
(Biblioteca do Instituto de Geociências/UFPA)

Paixão, Lúcia Cardoso da, 1958-

Utilização do CATT-BRAMS para análise do transporte e dispersão de material particulado e monóxido de carbono proveniente da queima da biomassa e da atividade industrial no estado do Pará / Lúcia Cardoso da Paixão. – 2015.

160 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: José Henrique Cattanio

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2015.

1. Monóxido de Carbono - Pará. 2. Ar - Poluição – Pará. I. Título.

CDD 22. ed. 546.6812098115

LÚCIA CARDOSO DA PAIXÃO

**UTILIZAÇÃO DO CATT-BRAMS PARA ANÁLISE DO TRANSPORTE E
DISPERSÃO DE MATERIAL PARTICULADO E MONÓXIDO DE CARBONO
PROVENIENTE DA QUEIMA DA BIOMASSA VEGETAL E DA ATIVIDADE
INDUSTRIAL NO ESTADO DO PARÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em convênio com o Museu Paraense Emílio Goeldi e a EMBRAPA Amazônia oriental.

Área de concentração: Ecossistemas Amazônicos e Dinâmicas Socioambientais.

Data da Defesa:

Conceito:

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Henrique Cattanio - Orientador
Doutor em Agronomia Tropical
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Breno C. de O. Imbiriba – Membro Avaliador
Interno
Doutor em Física
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Steel Silva Vasconcelos - Membro Avaliador
Interno
Doutor em Recursos de Conservação Florestais
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária –
EMBRAPA

Profa. Dra. Simone de Fátima Pinheiro Pereira
Doutora em Química
Universidade Federal do Pará

AGRADECIMENTOS

Sinceramente não sei por onde começar os meus agradecimentos, pois, neste tempo todo, inúmeras pessoas cruzaram o meu caminho e contribuíram com o desenvolvimento deste estudo. Muitas das vezes o citar nomes gera uma grande possibilidade de ocorrer esquecimentos que podem provocar sentimentos inadequados de ingratidão e de não valorização e importância. Por isso, peço aqui, de antemão, minhas sinceras desculpas, se algum nome não figurar nestes agradecimentos.

Vou começar desde o início e em ordem dos acontecimentos:

À coordenadora do PPGCA, à época que iniciei o mestrado, professora Dra. Maria Aurora, obrigada pelo apoio inicial e necessário a todos os alunos.

À Gladys e funcionários do PPGCA, por terem recebido e orientado a todos nós nas questões burocráticas do curso.

Aos professores: Dr. Everaldo Souza, Sérgio Rivero, Peter Toledo, Edna Castro, Joaquim Queiroz, Steel Vasconcelos, Voyner Ravena, Maria Aurora e Henrique Cattanio, os meus sinceros agradecimentos pela transmissão de seus conhecimentos e o resultado obtido, que foi o nosso aprendizado e o crescimento como pessoas e como profissionais.

A todos os meus amigos de turma, cada um com as suas características, mas todos batalhando por um progresso e o galgar etapas de vida e cujas trocas de conhecimento e apoio foram muito importantes para encarar as disciplinas do curso, agradeço e desejo a todos muitos sucessos.

A todos os monitores do LAMAZ, quando iniciei as simulações necessárias ao desenvolvimento desta dissertação, o meu muito obrigado pela paciência e presteza no atendimento.

Aos professores Mário Jardim, Júlia Cohen e Edson Paulino por terem colaborado na etapa inicial do mestrado, à ocasião da elaboração e apresentação do Plano de Qualificação e, aos professores Breno C. de O. Imbiriba, Steel Silva Vasconcelos e Simone de Fátima Pinheiro Pereira, que formam, atualmente, a banca examinadora deste estudo, obrigada pela disponibilidade de tempo para ler o que escrevi, ouvir-me nas apresentações, e avaliar-me.

À minha mentora inicial, que me introduziu na elaboração desta dissertação, mas depois foi transferida para outro Estado, Dra. Jaci Saraiva, obrigada por ter-me dado a oportunidade de conhecê-la e pelo “pontapé” inicial. Ao Prof. Paulo Kuhn, cuja orientação, conhecimento e habilidades forneceram-me as informações técnicas básicas para o desenvolvimento deste estudo, mas infelizmente, por uma questão de vida, também foi transferido para outro Estado. Agradeço imensamente as orientações fornecidas.

Agora, há duas pessoas e duas entidades cujos agradecimentos são mais que especiais: são preciosos. São eles:

Ao meu respeitado e admirado orientador Prof. Dr. José Henrique Cattanio: obrigada por ter-me acolhido no momento mais difícil da minha trajetória no curso, pela paciência, bondade e, sobretudo, pela transmissão de seus conhecimentos, tanto enquanto professor, quanto orientador.

À minha “tutora” especial, Leticia Rodrigues, graduada em Meteorologia pela Faculdade de Meteorologia da UFPA, obrigada por tudo: pelo companheirismo, confiança, paciência, força, transmissão de conhecimentos técnicos e pela sua amizade. Confesso que o seu apoio foi fundamental para o prosseguimento e finalização deste trabalho.

À minha família: meus filhos, Gabriela e Henrique Paixão, netinho Gustavo Paixão, meu marido Eustáquio e à minha auxiliar e braço direito Esmeralda: a única coisa que agradeço é a existência de vocês em minha vida, porque a partir daí, tendo esta base, o resto eu dou conta.

À minha mãe Irlanny, meu pai Naôr (*in memoriam*) minhas irmãs e irmãos, Gláucia, Márcia, Lúcio e Luiz Paixão, que embora longe, torceram e me incentivaram muito durante a realização do curso de mestrado.

E, dando base a tudo isto, se encontra O Pai, Todo Poderoso.

OBRIGADA.

*“Todo caminho da gente é resvaloso.
Mas também, cair não prejudica demais.
A gente levanta, a gente sobe, a gente volta!...
O correr da vida embrulha tudo, a vida é assim:
Esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa,
Sossega e depois desinquieta.
O que ela quer da gente é coragem!”
Guimarães Rosa*

RESUMO

O ano de 2010 caracterizou-se como um ano mais seco, com um evento de el niño fraco, porém com uma característica interessante: foi precedido de dois anos chuvosos. Além disso, havia, no Laboratório de Modelagem da Amazônia (LAMAZ) da Universidade Federal do Pará (UFPA), dados disponíveis para a modelagem do comportamento das plumas de duas substâncias consideradas poluentes atmosféricos e originadas por atividades antropogênicas no Pará, deste ano de 2010. Com base nesses aspectos, aliados ao interesse de avaliar a qualidade do ar atmosférico deste Estado, durante períodos de estiagem, desenvolveu-se esta dissertação, cujo objetivo geral foi analisar as fontes de origem, o transporte e a dispersão das emissões atmosféricas, compostas por material particulado ($MP_{(2,5)}$) e monóxido de carbono (CO), provenientes da queima da biomassa vegetal e das atividades industriais existentes e em operação no Pará, durante o período seco de 2010. Para isto, utilizou-se a sub-rotina *Coupled Atmospheric Tracer Transport Model (CATT)* no modelo de previsão de tempo e clima de mesoescala *Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Systems (BRAMS)*, com duas grades aninhadas, e realizou-se um levantamento dos focos de fogo ocorridos no período de estudo, tendo como base os dados disponibilizados pelo INPE/CPTEC, e das atividades industriais implantadas e em operação no Estado, através do Sistema Integrado de Monitoramento e Licenciamento Ambiental da Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SIMLAM-SEMA/PA). Os dados de precipitação foram obtidos, através da base de dados da Rede Estadual de Previsão Climática e Hidrometeorológica do Pará (RPCH) e as características orográficas do Pará, simuladas pelo modelo BRAMS, também foram utilizadas. O desenvolvimento e a análise dos estudos realizados evidenciaram a influência das chuvas sobre a quantidade de focos de fogo gerados e a concentração à superfície das emissões de CO e de $MP_{(2,5)}$, isto é, na medida em que o período se tornava mais seco, maior a quantidade de focos de fogo e maior a concentração, à superfície, dos poluentes atmosféricos estudados. Os resultados gerados pelas simulações forneceram base para analisar a influência da topografia do Estado na movimentação destes poluentes atmosféricos vindos de outros Estados, demonstrando a participação da planície central amazônica na movimentação de massa de ar do oceano para o continente. Evidenciaram os efeitos dos ventos que advectaram estes poluentes gerados na superfície do Pará e nas regiões circunvizinhas, para oeste, em direção ao estado do Amazonas. Evidenciaram, também, os efeitos da

convecção local, que dispersaram e transportaram as emissões estudadas para elevadas altitudes, podendo atingir grandes distâncias, com potencial de causar impactos regionais e até mesmo globais.

Palavras-chaves: Monóxido de Carbono (CO). Material Particulado (MP_(2,5)). Transporte. Dispersão. Modelo Numérico *CATT-BRAMS*.

ABSTRACT

The year of 2010 was characterized as a drier year with an weak el niño event, but with an interesting twist: it was preceded by two wet years, and in addition to these aspects, there were available data at Amazon Modeling Laboratory (LAMAZ), of the Federal University of Pará (UFPA), for modeling the behavior, in the atmosphere, of two substances considered pollutants, caused by anthropogenic activities, in the state of Pará, during dry season of the year of 2010. These aspects, together with the interest to evaluate the influence of the this dry season period, in the air atmosphere quality of the Para, motivated the developing of this dissertation, whose main objective was to analyze the sources, transport and dispersion of air emissions, composed by particulate matter ($PM_{2.5}$) and carbon monoxide (CO), from biomass burning and industrial activities, in the state of Pará, during the dry season of 2010. For this purpose, was used the subroutine *CATT (Coupled Atmospheric Tracer Transport Model)*, in weather forecasting and climate model of mesoscale *BRAMS (Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Systems)*, with two nested grids. Besides that, was carried out a survey of fire during the period of study, based on the data, available by INPE/CPTEC, and of industrial operating activities in the State, whose data were obtained from Integrated Environmental Monitoring and Licensing of the State Department of Environment (SIMLAM - SEMA / PA). The rainfall data, were obtained through the Para State Network Database for Climate Prediction and Hydrometeorological – RPCH, and orographic characteristics of the study area, simulated by the BRAMS, were also performed. The development and analysis of studies evidenced the influence of rain on the amount of heat generated , i.e. in that the period became drier, the greater the amount of fire outbreaks and the higher the surface concentration of emissions CO and $PM_{(2.5)}$. The results generated by the simulations provided the basis to analyze the influence of the state's topography in the movement of these air pollutants coming from other states, showing the participation of the Amazonian central plain in the ocean air mass moving to the continent. It Showed the effects of winds that led these atmospheric pollutants generated on the surface of the Pará state, and in the surrounding regions, to the west, towards the Amazon state. Also showed the effects of the local convection, that dispersed and transported CO and $PM_{(2.5)}$ atmospheric emissions at high altitudes, that can reach great distances, with the potential to cause impacts in a regional and even global scale.

Keywords: Carbon Monoxide (CO). Particulate Matter ($MP_{(2,5)}$). Transport. Dispersion.
Numerical Model *CATT-BRAMS*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Camadas da atmosfera em função da altitude e a correlação com a temperatura (°C)	25
Figura 2- Ciclo de vida de um poluente atmosférico.	29
Figura 3- Perfil de temperatura atmosférica relacionando à variação da taxa de declínio com a estabilidade atmosférica.....	40
Figura 4- Mapa do estado do Pará com destaque para a sua posição geográfica na América do Sul, Brasil e região Norte brasileira.	47
Figura 5- Macrodivisão do estado do Pará em seis mesorregiões.....	48
Figura 6- Localização dos pólos madeireiros existentes no estado do Pará.....	50
Figura 7- Domínios geomorfológicos do estado do Pará.	54
Figura 8- Localização geográfica das estações Climatológicas do INMET e das estações Pluviométricas da ANEEL..	56
Figura 9- Variação anual da precipitação no estado do Pará.....	57
Figura 10- Sistema de Coordenadas Euleriana.....	72
Figura 11- Representação gráfica, utilizada pelo CPTEC, de determinados processos subgrades envolvidos no transporte de gases e de aerossóis e simulados pelo modelo CATT-BRAMS..	77
Figura 12- Grades Aninhadas	81
Figura 13- Fluxograma da metodologia utilizada para a avaliação do campo de concentração e da evolução das emissões simuladas, de suas origens e efeitos sobre o meio ambiente e à saúde humana, a partir do modelo CATT-BRAMS.....	85
Figura 14- Morfologia do estado do Pará simulado pelo modelo BRAMS, evidenciado o domínio de terrenos de cotas modestas inferiores a 250 m. A região em branco representa o domínio da planície amazônica.....	89
Figura 15- Climatologia do acumulado da precipitação mensal, nos meses de junho (A), julho (B), agosto (C), setembro (D), outubro (E) e novembro (F) do ano de 2010, para o Estado do Pará.	91
Figura 16- Focos de fogo acumulados mensais registrados pelo satélite de referência AQUA_M-T, na região do Pará. A figura (A) refere-se ao número de focos de fogo para o mês de junho, (B) para julho, (C) agosto, (D) setembro, (E) outubro e, a (F) para novembro do ano de 2010	94

Figura 17- Focos de queimadas acumulados mensais, para o ano de 2010, registrados pelo banco de dados de queimadas (BDQUEIMADAS), no estado do Pará.	99
Figura 18- Distribuição das atividades econômicas potencialmente poluidoras distribuídas no estado do Pará.	100
Figura 19- Acumulados mensais de monóxido de carbono (CO) simulados no CATT-BRAMS, nas alturas de 1000, 925, 850, 500 e 200 hPa.....	104
Figura 20- Acumulados mensais de material particulado (MP _(2,5)) simulados no CATT-BRAMS.	116
Figura 21- Resultados das simulações horárias do monóxido de carbono(CO) para o dia 08 de setembro de 2010, em todas as altitudes analisadas..	131
Figura 22 - Resultados das Simulações horárias de material particulado (MP _(2,5)) para o dia 08 de setembro de 2010, em todas as altitudes analisadas.....	133

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1– Distribuição percentual da composição básica dos gases da atmosfera terrestre	23
Tabela 2– Constituintes minoritários da atmosfera não poluída ⁽¹⁾	24
Tabela 3– Padrões nacionais de qualidade do ar de acordo com a resolução CONAMA 03/1990.	35
Tabela 4– Relação das carvoarias licenciadas existentes no estado do Pará.....	51
Tabela 5– Principais compostos emitidos no processo de queimada da biomassa vegetal nos estágios flaming e smoldering.....	61
Tabela 6– Principais informações que foram definidas no RAMSIN para a execução da simulação. Os dados entre parêntesis são referentes à segunda grade utilizada na simulação.	80
Tabela 7– Principais variáveis que foram definidas no ramspost.inp para a execução do pós processamento e a geração dos arquivos .ctl de entrada no GrAD'S.	84
Tabela 8– Focos de calor ocorridos no estado do Pará, em 2010. Banco de Dados de Queimadas (BDQUEIMADAS) do INPE/CPTEC, registrados pelos satélites polares NOAA 15, NOAA 16 e NOAA 17, as imagens dos satélites geoestacionários GOES-12 e MSG-2.	98
Tabela 9– Síntese das concentrações mensais de CO em ppb por nível de pressão (hPa) estudado.....	112
Tabela 10– Síntese das concentrações mensais de MP _(2,5) em µg.m ⁻³ por nível de pressão (hPa)	123

LISTA DE SIGLAS

BRAMS – Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System

CATT – Coupled Aerosol and Tracer Transport

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo

CLP – Camada Limite Planetária

CO – Monóxido de Oxigênio

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COV – Compostos Orgânicos Voláteis

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

DETER – Programa para Detecção do Desmatamento em Tempo Real

FMC – Fumaça Preta

GMAI – Grupo de Modelagem Atmosfera e Interface

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IMAZON – Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC – Sigla em Inglês para Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

MMA – Ministério do Meio Ambiente

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

OMS – Organização Mundial da Saúde

PRODES – Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia

RPCH – Rede Estadual de Previsão Climática e Hidrometeorológica do Pará

SFB – Serviço Florestal Brasileiro

S – Sul

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

Z – Zulu

Tgano⁻¹ –Teragrama por ano

LISTA DE SÍMBOLOS

Ca – Cálcio

Mg – Magnésio

Mo – Molibdênio

Fe – Ferro

Zn – Zinco

Cu – Cobre

Cr – Cromo

Al – Alumínio

Cd – Cádmio

Pb – Chumbo

μ – Símbolo do Sistema Internacional de Medidas (SI) que significa micro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 JUSTIFICATIVA	20
1.2 PROBLEMÁTICA DA PESQUISA	21
1.3 HIPÓTESES	21
1.4 OBJETIVOS	22
1.4.1 Objetivo geral	22
1.4.2 Objetivos específicos	22
2 REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1 A ATMOSFERA TERRESTRE E A SUA IMPORTÂNCIA	23
2.2 O FENÔMENO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	27
2.2.1 Definição	27
2.2.2 Classificação dos poluentes atmosféricos	30
2.2.3 Classificação das fontes de emissões de poluentes atmosféricos	31
2.3 QUALIDADE DO AR ATMOSFÉRICO	33
2.3.1 Níveis ou padrões de qualidade do ar atmosférico	34
2.4 CONDIÇÕES AMBIENTAIS E A INFLUÊNCIA NA QUALIDADE DO AR ATMOSFÉRICO	36
2.4.1 Importância das Condições Ambientais na Poluição do Ar	36
2.4.2 A física do transporte e da dispersão de poluentes na atmosfera	37
2.4.2.1 Direção e velocidade do vento	37
2.4.2.2 Turbulência	38
2.4.2.3 Estabilidade atmosférica	39
2.4.2.4 Radiação solar	41
2.4.2.5 Precipitação pluviométrica e umidade relativa do ar	42
2.4.2.6 Efeitos de terreno e da topografia local	42
2.4.3 Os processos de remoção dos poluentes da atmosfera	42
2.5 OS POLUENTES ATMOSFÉRICOS ESTUDADOS	43
2.5.1 Monóxido de Carbono (CO)	43
2.5.2 Material particulado (MP)	45
2.6 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	47
2.6.1 Aspectos socioeconômicos	48
2.6.2 Aspectos físicos	52
2.6.3 Aspectos biológicos	55
2.6.4 Aspectos climatológicos	56
2.7 PRINCIPAIS ATIVIDADES POLUIDORAS	58
2.7.1 O desmatamento e as queimadas na região de estudo	59
2.7.2 Descrição das Principais Atividades Poluidoras	59
2.7.2.1 Agronegócio	59
2.7.2.2 Indústria florestal – Madeiras	62
2.7.2.3 Carvoarias	63
2.7.2.4 Indústrias	64
2.8 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA, MEIO AMBIENTE E SAÚDE HUMANA	67
2.8.1 Principais efeitos do material particulado (MP)	67
2.8.2 Principais Efeitos do Monóxido de Carbono (CO)	70
2.9 MODELOS NUMÉRICOS DE TRANSPORTE E DISPERSÃO DE POLUENTES NA ATMOSFERA	71

3 MATERIAIS E MÉTODOS	75
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	75
3.2 DESCRIÇÃO DO MODELO CATT-BRAMS.....	75
3.3 DETALHAMENTO DAS ETAPAS PARA A PRODUÇÃO DO CATT-BRAMS.....	77
3.3.1 Preparação da Estrutura Padrão dos Diretórios do CATT-BRAMS	77
3.3.2 Configuração para a Simulação	79
3.4 EXECUÇÃO DO MODELO CATT-BRAMS.....	82
3.4.1 Etapa de Pré-Processamento	82
3.4.2 Produção do CATT-BRAMS	82
3.5 PÓS-PROCESSAMENTO.....	83
3.6 LEVANTAMENTO DAS FONTES POTENCIAIS DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS	86
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	88
4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO.....	88
4.2 VOLUME PLUVIOMÉTRICO.....	90
4.3 FOCOS DE INCÊNDIO OCORRIDOS NO PERÍODO DE ESTUDO.....	93
4.4 MAPEAMENTO DAS INDÚSTRIAS NO PARÁ.....	100
4.5 RESULTADOS DAS CONCENTRAÇÕES DE CO E DE MP _(2,5) SIMULADOS PELO MODELO CATT-BRAMS.....	101
4.5.1 Análise da variação espacial e temporal das concentrações de CO e de MP_(2,5) simuladas	102
4.5.1.1 Variação Espacial das Concentrações de CO.....	102
4.5.1.2 Variação Temporal das Concentrações de (CO).....	111
4.5.1.3 Variação Espacial das Concentrações de MP _(2,5)	114
4.5.1.4 Variação Temporal das Concentrações de MP _(2,5)	122
4.5.2 Análise Geral do Comportamento das Emissões Atmosféricas Simuladas	125
4.6 DESCRIÇÃO DO TRANSPORTE E DISPERSÃO DAS EMISSÕES SIMULADAS.....	127
5 CONCLUSÃO	135
REFERÊNCIAS	140
ANEXO	150

1 INTRODUÇÃO

As perturbações antrópicas no sistema terrestre decorrentes de um modelo de desenvolvimento econômico centrado no comprometimento, muitas vezes irreversível, do patrimônio natural, têm sido inequivocamente associadas à ocorrência de diversos tipos de danos ambientais. Dentre esses danos merece destaque as mudanças climáticas, as quais lançam fundamentada preocupação quanto à sustentabilidade e vulnerabilidade deste sistema para o futuro da sociedade humana (FREITAS et al., 2009). Cada vez em maior escala, essas perturbações contribuem para a degradação da qualidade ambiental, destacando-se a qualidade do ar atmosférico, cujos episódios críticos de poluição, ocuparam a maior atenção de pesquisadores nacionais e internacionais, principalmente a partir da década de 70, com o desenvolvimento econômico dos países ditos “emergentes”.

Conceitualmente, a poluição atmosférica é definida como a contaminação do ar por meio de desperdícios gasosos, líquidos, sólidos ou por quaisquer outros produtos que podem vir (direta ou indiretamente) a ameaçar a saúde humana, animal ou vegetal, ou atacar materiais, reduzir a visibilidade ou produzir odores indesejáveis, e interferir na vida e no uso da propriedade (LORA, 2002; SCHNELLE, 2002). É um problema complexo, devido, não somente às dificuldades de se identificar os reais efeitos dos contaminantes sobre o meio ambiente e à saúde humana, mas também à grande variedade de fontes emissoras existentes, à natureza dos poluentes emitidos, às condições meteorológicas predominantes durante as emissões atmosféricas, e aos efeitos sinérgicos aos quais esses poluentes estão submetidos na atmosfera (CCOYLLO, 1998).

Devido a essa característica complexa e à ocorrência, cada vez mais frequente, de episódios críticos de poluição do ar, acarretando, como consequência, o aumento do número de vítimas e de danos ambientais, a poluição do ar foi caracterizada como um problema de saúde pública, o que resultou na criação de órgãos de controle e de fiscalização ambiental. Importantes no contexto da poluição atmosférica, esses órgãos definem diretrizes e padrões de qualidade do ar que objetivam, dentre outros, controlar a poluição do ar proveniente de atividades antropogênicas. Os episódios críticos e a complexidade da poluição do ar atmosférico provocou, também, a mobilização de cientistas para desenvolver estudos e mecanismos de rastreamento do comportamento de poluentes (CETESB, 2005), principalmente os aerossóis, o ozônio e seus

precursores, que afetam a qualidade do ar atmosférico e, conseqüentemente, a saúde ambiental e humana (FREITAS et al., 2005).

Como principais fontes antropogênicas emissoras de poluentes atmosféricos, Schirmer e Lisboa (2008) responsabilizaram as queimas da biomassa vegetal praticadas nas atividades agropecuárias e da produção florestal, o excessivo uso de veículos automotores, a mineração, os processos industriais (de base, de transformação e geração de energia por usinas termoeletricas) e a incineração de materiais. Identificaram, ainda, que as fontes naturais emissoras de gases e de material particulado à atmosfera, relacionam-se aos vulcões em erupção, relâmpagos, florestas, oceanos e processos biológicos envolvendo o metabolismo de microrganismos, decomposição biológica anaeróbica, polinização, dentre outras.

Dentre as citadas fontes de origem de poluentes atmosféricos, o setor industrial (devido à natureza de seu processo produtivo), a agropecuária e a produção florestal (devido às ações degradadoras que antecedem essa atividade, como a queima da biomassa vegetal), são considerados os grandes causadores de impactos ambientais adversos à saúde humana e ao meio ambiente, tais como: a intensificação do efeito estufa, a alteração no balanço radioativo do planeta e, conforme descrito em Freitas et al. (2007) e Marengo (2007), o conseqüente descontrole climático em uma dimensão local, regional e global, os distúrbios respiratórios e alérgicos e as lesões degenerativas no sistema nervoso e em outros órgãos vitais do ser humano.

O Estado do Pará tem ocupado um lugar de destaque no tocante à prática dessas atividades. O modelo tradicional de desenvolvimento econômico, meramente extrator, adotado no Estado, focado, principalmente, na agricultura familiar, nos grandes projetos agropecuários, na exploração madeireira e na extração mineral, tem induzido a um aumento significativo do desmatamento e da degradação de sua área florestada. Como o desmatamento precede a fase da queimada, a região tem sido submetida a um processo intenso de queima da sua biomassa vegetal, com grandes emissões de material particulado e de gases à atmosfera. Este cenário específico de poluição atmosférica no Estado do Pará, embora de grande importância, tem sido pouco estudado e explorado. Grande atenção vem sendo dada para a Região Amazônica, pela sua importância em relação à extensão territorial (ARTAXO et al., 2009). Observou-se ainda, crescentes índices de degradação do meio ambiente, devido aos eventos agudos de queima da biomassa vegetal, além de seus efeitos sobre a saúde humana (FREITAS, 1999; SALDIVA et al., 2001; FREITAS et al., 2005; BELTRÃO, 2008; FREITAS et al., 2009

e 2010; ARTAXO et al., 2009; LONGO et al., 2010; SANJUAN et al., 2012; HACON et al., 2006, 2009 e 2010).

Na busca de contribuir com o fornecimento de subsídios técnicos/científicos para futuros processos de tomada de decisões, seja por instituições governamentais de controle, fiscalização ambiental e de defesa civil, ou por organizações privadas, esta dissertação estudou o transporte e a dispersão das emissões atmosféricas compostas por material particulado e monóxido de carbono, provenientes da queima da biomassa vegetal e das atividades industriais existentes no Estado no Pará. Para isso, foi utilizado como ferramenta para as simulações necessárias, um modelo atmosférico adaptado para utilização em áreas tropicais.

Está dividida em 05 (cinco) capítulos: o Capítulo 1 contempla a introdução, os objetivos geral e específicos e as justificativas do estudo; o Capítulo 2, a revisão da literatura, abordando o fenômeno da poluição atmosférica, as principais características e fontes de origem dos poluentes atmosféricos estudados, bem como os fatores meteorológicos e de superfície que influenciam este fenômeno. O Capítulo 3 descreve os dados e a metodologia utilizada para a elaboração deste estudo; o Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos de concentração, transporte e dispersão das emissões de monóxido de carbono e de material particulado analisadas e, finalmente o Capítulo 5, as conclusões do trabalho e sugestões pertinentes ao desenvolvimento de trabalhos futuros.

1.1 JUSTIFICATIVA

O estado do Pará, cuja extensão territorial é de 1.248.042 km², representa 26% de toda a região Amazônica e 14,7% do território brasileiro (IBGE, 2010), e detém uma rica diversidade de ecossistemas e uma das maiores riquezas biológicas do Brasil. Possui grande potencial mineral e agrossilvipastoril, desempenhando um papel fundamental e complexo no contexto do desenvolvimento econômico da região e do País. Porém, semelhantemente a outras regiões da Amazônia Legal, este Estado encontra-se sob forte pressão humana, devido, principalmente, ao modelo tradicional de ocupação e de desenvolvimento predominantemente extrativista adotado, levando-o a ocupar a liderança no tocante à degradação ambiental de seu território, cuja natureza e grau de impacto ainda continuam desconhecidos. Dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2010) apontam o Pará como o que mais contribui para o desmatamento na Amazônia, com 22% do seu território já desflorestados.

A degradação ambiental, cada vez mais crescente, do território paraense se contrapõe à necessidade de preservação do seu patrimônio natural e à importância e potencialidade do Estado no contexto do desenvolvimento econômico do país. Esta condição tem chamado a atenção e alertado a comunidade científica sobre a necessidade de se priorizar a realização de maiores estudos sobre o Pará, para a promoção do tão necessário *desenvolvimento regional/local sustentável*. Esta é a razão segundo a qual se propôs o desenvolvimento desta dissertação: o de analisar uma das resultantes deste modelo de desenvolvimento adotado, que é a poluição atmosférica, com foco no transporte e dispersão das emissões de monóxido de carbono (CO) e material particulado (MP_(2,5)). Neste contexto, este estudo é de fundamental importância, uma vez que nesta região, ainda não existe uma rede de monitoramento oficial que proceda, continuamente, a medição da qualidade do ar de tal forma, que subsidie processos de tomada de decisão e a definição de políticas públicas necessárias à gestão ambiental do Pará.

1.2 PROBLEMÁTICA DA PESQUISA

Esta dissertação tem como principal pergunta: qual o comportamento, na atmosfera, das emissões de material particulado (MP_(2,5)) e monóxido de carbono (CO), provenientes das atividades antropogênicas existentes no estado do Pará, durante período seco do ano de 2010, que foi submetido a um processo de *El Niño* de baixa intensidade.

1.3 HIPÓTESES

- i. As emissões atmosféricas provenientes das atividades antropogênicas (queima da biomassa vegetal e atividades industriais) existentes no Pará, ao serem lançadas à atmosfera se dispersam e são transportadas, devido aos efeitos do escoamento atmosférico, atingindo várias regiões do Estado e de outras regiões circunvizinhas.
- ii. O transporte e dispersão da pluma das emissões atmosféricas provenientes das atividades antropogênicas, existentes no Pará, depende da intensidade das emissões, regime das chuvas, direção e velocidade do vento e das condições topográficas da região de estudo.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste estudo consiste em, utilizando a modelagem numérica, analisar o transporte e a dispersão das emissões compostas por material particulado ($MP_{(2,5)}$) e monóxido de carbono (CO), provenientes da queima da biomassa vegetal e das atividades industriais, no estado do Pará, durante o período seco de 2010.

1.4.2 Objetivos específicos

- a. Identificar as atividades potencialmente poluidoras existentes no Pará, emissoras de CO e de $MP_{(2,5)}$ à atmosfera, destacando as regiões do Estado onde ocorrem as maiores concentrações destas atividades.
- b. Fazer o levantamento dos principais focos de queima de biomassa vegetal ocorridos durante os meses de junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro do ano de 2010 no Pará, identificando as regiões do Estado com maior incidência destes focos.
- c. Simular e analisar os campos de concentração, o transporte e a dispersão das emissões de CO e de $MP_{(2,5)}$, provenientes da queima da biomassa vegetal e atividades industriais existentes no Pará, identificando as áreas do Estado que apresentam as maiores concentrações destas emissões.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A ATMOSFERA TERRESTRE E A SUA IMPORTÂNCIA

A atmosfera é um tênue, reativo, invisível e inodoro envelope de ar que envolve a Terra com uma espessura de 1% do raio do Planeta, o que representa $5,13 \times 10^{18}$ kg de massa seca de ar, ou seja, 0,0001% de sua massa total (RAVEN et al., 1995). Com sua base repousada sobre a terra e a superfície do oceano, é um sistema macroscópico e de baixa velocidade (FREITAS et al., 2009), sendo um recurso natural sem fronteiras definidas (sistema aberto, não isolado). Constitui-se por um complexo sistema de compensações e inter-relações de temperatura, pressão e umidade, que mantém um equilíbrio dinâmico entre os fenômenos climáticos das diferentes regiões da Terra (DAMILANO, 2006) e que, juntamente com a água e o solo, é responsável pela sustentabilidade da vida no Planeta.

Segundo Kemp (1994) e Ribeiro et al. (2000) a atmosfera como uma camada de gases que envolve completamente a Terra, forma assim um sistema ambiental integrado onde, nos primeiros 30 km de altitude concentra-se, aproximadamente, 99,9% de toda a sua massa seca, e tem como composição básica, o grupo de gases com concentração praticamente constante, apresentado na Tabela 1, juntamente com as suas principais características.

Tabela 1– Distribuição Percentual da Composição Básica dos Gases da Atmosfera Terrestre

Gases	Percentual %	Concentração (ppm) ⁽¹⁾	μgm^{-3}	Características
Nitrogênio	78,11	780.900	$8,67 \times 10^8$	Elevada dissociação fotoquímica na ionosfera, bem misturado para baixos níveis.
Oxigênio	20,95	209.400	$2,65 \times 10^8$	Dissociação fotoquímica acima de 90 km, misturado nos baixos níveis.
Argônio	0,934	9.300	$1,47 \times 10^7$	Bem misturado acima de 110 km.
Neônio	$1,818 \times 10^{-3}$	17,4	$1,49 \times 10^4$	Mistura principalmente na média atmosfera
Hélio	$5,24 \times 10^{-4}$	5,2	$8,50 \times 10^2$	
Criptônio	$1,14 \times 10^{-4}$	1,0	$3,43 \times 10^3$	
Xenônio	$8,7 \times 10^{-6}$	0,08	$4,29 \times 10^2$	

¹Concentração em partes por milhão (ppm) é a razão entre o volume do elemento atmosférico e o volume do ar.

Fonte: Adaptado de Ribeiro et al. (2000)

A fração restante é composta, principalmente, pelas seguintes substâncias químicas: óxidos inorgânicos (CO , CO_2 , NO_2 , SO_2), oxidantes (O_3 , H_2O_2 , OH^- , O_2H^- e NO_3), redutores (CO , SO_2 , H_2S), orgânicos (destacando-se os alcanos, sendo o metano o mais abundante entre as espécies orgânicas), espécies fotoquimicamente ativas (NO_2 e

formaldeído), ácidos (H_2SO_4), bases (NH_3), sais (NH_4HSO_4), espécies reativas (como os radicais livres) e materiais particulados (ALMEIDA, 1999). Os materiais particulados constituem-se de matérias líquidas (vapor d'água) e sólidos em suspensão (aerossóis), de composição química e concentrações variáveis, que engloba também matéria viva, como pólen e micro-organismos (ALMEIDA, 1999; SOKOLIK, 2008 e MANTEGAZZA, 2009).

A concentração de vapor d'água gira em torno de 0,02% a 1,00% nas regiões áridas, sobre o deserto e regiões polares, e até 4,00% do volume da baixa atmosfera, nas regiões tropicais; portanto, esta substância é bastante variável, ou seja, altera de acordo com a altitude, temperatura, localidade e época do ano (ALMEIDA, 1999; SOKOLIK, 2008; MANTEGAZZA, 2009). Esta quantidade de vapor de água contribui significativamente para os processos químicos atmosféricos, pois é fonte dos radicais hidroxila (HO^*) e hidroperóxido (HO_2^*), representando um papel importante no ciclo hidrológico e no sistema terrestre como um todo (SEINFELD e PANDIS, 1998).

A Tabela 2 apresenta os constituintes restantes (gases traços), com os principais gases da atmosfera, juntamente com os seus percentuais em volume. Embora presentes em concentrações significativamente menores, esses constituintes minoritários podem gerar vários outros compostos e desempenhar papel fundamental em diversos processos químicos e biológicos e em mecanismos, tais como a regulação da temperatura do Planeta (LISBOA et al., 2008).

Tabela 2– Constituintes minoritários da atmosfera não poluída ⁽¹⁾

Composto Químico	Percentual % (em Volume)	Concentração (ppm) ⁽²⁾	μgm^{-3}	Características
Dióxido de Carbono (CO_2)	0,036	305	$5,67 \times 10^5$	Pouco variável à superfície; bem misturado acima de 100 km.
Metano (CH_4)	$1,6 \times 10^{-4}$	0,97-1,16	$6,56-7,87 \times 10^2$	Misturado na troposfera e dissociado na estratosfera.
Óxido Nitroso (N_2O)	$3,0 \times 10^{-5}$	0,5	$9,00 \times 10^2$	Pouco variável à superfície, dissociado na estratosfera e mesosfera.
Monóxido de Carbono (CO)	$1,2 \times 10^{-5}$	0,1	$1,15 \times 10^2$	Variável
Amônia (NH_3)	$10^{-8} - 10^{-7}$	0,001-0,006	0,695-4,17	-----
Vapor d'água	$\approx 0,02$ a 4	31.200	$2,30 \times 10^7$	Altamente variável: fotodissociado acima de 80 km.
Hidrogênio (H_2)	0,000005	0,5	$4,13 \times 10^1$	Produção de reações fotoquímicas.
Ozônio (O_3)	0,000007	0,020-0,080	39,2 – 156,8	Altamente variável: de origem fotoquímica

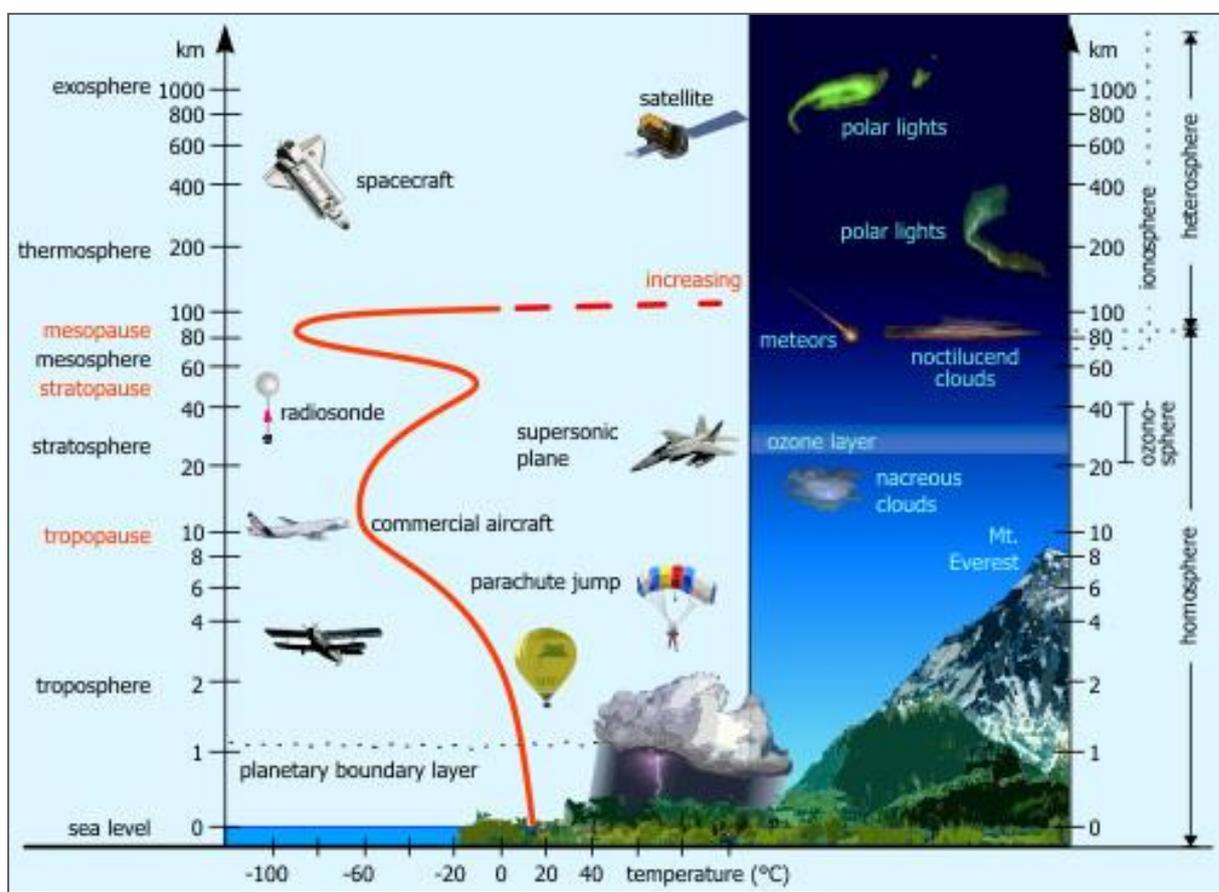
⁽¹⁾ – Outras espécies também estão presentes, em concentrações inferiores a $10^{-7}\%$, em volume.

⁽²⁾ – Concentração em ppm é a razão entre o volume do elemento atmosférico o volume do ar.

Fonte: Lisboa et al., (2008); Sokolik, (2008).

A atmosfera divide-se em diferentes camadas concêntricas, que podem ser classificadas de acordo com critérios de temperatura (estratificação térmica), densidade e/ou composição química (DÍEZ et al., 1999; ALMEIDA, 1999). Com relação ao fenômeno do transporte e dispersão de contaminantes atmosféricos, a classificação mais importante é feita de acordo com a variação de temperatura em relação à altura. Seguindo esse critério, a atmosfera se divide nas regiões denominadas de troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera (Figura 1), sendo que cada uma dessas camadas com suas características específicas exercem papéis importantes no comportamento da atmosfera (MAIOLI e NASCIMENTO, 2005).

Figura 1- Camadas da atmosfera em função da altitude e a correlação com a temperatura (°C).



Fonte: Zambrano (2010) apud NOAA (2005).

A troposfera, camada de interesse para este estudo, é a primeira da atmosfera, que se estende da superfície do solo até a segunda camada, a tropopausa. Caracteriza-se por possuir altitude que varia de acordo com a latitude e com o tempo, ou seja, nos polos as espessuras da troposfera variam de 6 a 8 km, em latitudes médias, aproximadamente de 12 km, e, em latitudes de 45° e na linha do Equador, chega a atingir 18 km. Outra característica importante desta camada é o progressivo decréscimo

da temperatura com o aumento da altitude, à taxa de variação vertical média de $6,5\text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$ e da pressão atmosférica que diminui quando a altitude aumenta (MARTINS et al., 2003). Ao nível do mar, a pressão média é de 1.103 milibares, sendo que nas primeiras centenas de metros acima desse nível a pressão cai à razão de 1 milibar a cada 8 metros. A taxa de variação da temperatura com a altitude de $6,5\text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$, na realidade, é bastante variável, podendo ocorrer em camadas estreitas dessa região inversões de temperatura (situação nas quais pequenas camadas da troposfera experimentam aumento de temperatura com a altitude) (ALMEIDA, 1999).

Devido ao intenso movimento de energia térmica e das significativas diferenças de temperatura, a troposfera, principal domínio de estudo dos meteorologistas, é a camada mais instável e dinâmica da atmosfera (FREITAS, 2003; PIRES, 2005). É dividida em duas partes: a Camada Limite Planetária (CLP ou PBL, sigla em inglês para *Planetary Boundary Layer*), que é a região que vai desde a superfície até aproximadamente 3,0 km, e o restante denominada de Atmosfera Livre.

Na troposfera originam-se todas as massas de ar responsáveis pelas mudanças climáticas do planeta. É o local onde ocorre a maior parte das reações químicas presentes na atmosfera e importantes processos climáticos e meteorológicos. Caracteriza-se, também, por residir os principais mecanismos reguladores da temperatura e umidade da superfície terrestre e de remoção de substâncias (MARTINS et al., 2003). Além dessa importância, nesta camada, entre 0 e 2,0 km de altitude, atuam os principais fenômenos que influenciam a dispersão dos poluentes do ar (SALES, 1979). Segundo Branco (1995) a troposfera é elemento básico para a sobrevivência dos organismos aeróbios que utilizam oxigênio livre em sua respiração. Esta camada serve como fonte de nitrogênio e umidade, indispensáveis a todos os seres vivos e, salvo condições muito específicas como a camada de ozônio na estratosfera, todos os estudos sobre poluição do ar e os fenômenos relacionados à dispersão dos poluentes se referem às regiões da troposfera, onde a complexidade dos fluxos de matéria e energia funde-se às atividades antrópicas, transformando toda esta camada em objeto de constantes estudos e análises (GRIMM, 1999).

Uma propriedade particular da troposfera é que as maiores partes dos compostos nela presentes estão em constante troca, incluindo os gases mais abundantes, como N_2 e O_2 , sendo consumidos e regenerados constantemente por processos biológicos, como, por exemplo, atividade microbiológica do solo, fotossíntese, respiração e emissões foliares (WUEBBLES et al., 2003). Além dos constituintes considerados naturais

(Tabela 1 e Tabela 2), diversos compostos ou partículas capazes de modificar a composição natural da atmosfera são lançados no ar por fontes biogênicas e antrópicas (processos não naturais, resultantes da ação do ser humano), sendo classificados como poluentes. Neste caso, se incluem óxidos de enxofre, carbono elementar, óxidos de carbono, alcanos, hidrocarbonetos não metânicos, vários oxidantes, aerossóis de metais, partículas sólidas e substâncias radioativas (MARTINS et al., 2003).

Segundo Crutzen (1990) a maioria das substâncias químicas que tem a propriedade de modificar a composição natural da atmosfera e que se associa a ideia de poluição, como os citados acima, incluindo compostos de nitrogênio e também os de chumbo, já existem na atmosfera de forma não tóxica ou não poluente. A poluição e a toxicidade surgem com o aumento das concentrações destas substâncias e/ou com as interações entre elas. Exemplifica descrevendo que, em atmosferas poluídas os processos de oxidação predominantes envolvem o ozônio e o peróxido de hidrogênio, que são resultantes das reações induzidas pela radiação solar (“*smog*”¹ fotoquímico), a foto-oxidação dos compostos orgânicos voláteis (COV), com formação de ozônio e transformação NO/NO₂, a formação do ozônio, a partir da reação de foto-dissociação do dióxido de nitrogênio na presença de compostos de carbono. Estas combinações de compostos atmosféricos geram outros compostos que se tornam tóxicos, os quais são objetos de intensos estudos citados em inúmeras literaturas científicas.

2.2 O FENÔMENO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

2.2.1 Definição

A deterioração da qualidade do ar é considerada, atualmente, um dos maiores problemas das populações humanas tornando-se, assim, uma das maiores ameaças à qualidade de vida da sociedade atual e futura. Tudo isso como consequência das emissões da frota de veículos das grandes cidades, das áreas industriais, da alteração do uso do solo, do desenvolvimento das atividades agropecuárias e das queimadas, que ocorrem, principalmente, nas regiões tropicais. Desta forma, o desafio é conservar um padrão de qualidade do ar que não afete ou coloque em risco a saúde e o bem estar das pessoas e do ambiente (FREITAS, 2003).

¹*Smog* designa, em termos genéricos, nevoeiro contaminado por fumaças.

A poluição atmosférica é definida como a contaminação do ar por meio de desperdícios gasosos, líquidos, sólidos ou por quaisquer outros produtos que podem vir (direta ou indiretamente) a ameaçar a saúde humana, animal ou vegetal, ou atacar materiais, reduzir a visibilidade ou produzir odores indesejáveis e interferir no gozo da vida e no uso da propriedade (LORA, 2002; SCHNELLE 2002). Da mesma forma, a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) conceitua poluição atmosférica como sendo a introdução pelo homem, direta ou indiretamente, na atmosfera, de substâncias ou energias que ocasionem consequências prejudiciais capazes de causar perigos à saúde humana, causar danos aos recursos biológicos e aos sistemas ecológicos ou perturbar as outras utilizações legítimas do meio ambiente. Segundo Freitas (2003) poluir não é, necessariamente, a produção e a introdução de substâncias estranhas e nocivas à atmosfera (apesar de algumas vezes isto acontecer): é lançar, na atmosfera, substâncias em volume acima do que o meio ambiente natural pode remover.

Estas substâncias denominam-se “poluentes”, que são definidos pela Resolução 03/1990, do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 1990) como:

Qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ambiente: impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; inconveniente ao bem-estar público; danoso aos materiais, à fauna e flora; prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e as atividades normais da comunidade. (CONAMA, 1990).

O fenômeno da poluição atmosférica ocorre de acordo com a trilogia: existência de fontes de emissão, que são de conhecimento relativamente amplo e comum, existência de um meio de transporte, que é o ar, e da existência de receptores finais (imissão), que incluem seres humanos, animais, plantas, materiais e equipamentos. Todos esses fatores constituem o ciclo de vida de um poluente atmosférico (Figura 2) e devem ocorrer simultaneamente (ZAMBRANO, 2010).

Figura 2– Ciclo de vida de um poluente atmosférico.



Fonte: Kauwano (2003) apud Zambrano(2010).

Os poluentes, uma vez emitidos pelas fontes de poluição promovem o início da poluição atmosférica e passam a estar submetidos a complexos processos de dispersão, transporte, mistura e transformações químicas e físicas, que dão origem a uma distribuição espacial e temporal de suas concentrações na atmosfera. Basicamente, as distribuições das concentrações de poluentes na atmosfera dependem dos fatores: taxa de emissão, condições meteorológicas e topografia local. Com relação à influência desses fatores, alguns poluentes podem ser transportados a grandes distâncias antes de atingirem os receptores, sendo que cada poluente apresenta características próprias de dispersão na atmosfera, e à medida que o receptor distancia-se da fonte emissora, menor será a sua concentração (ELSOM, 1989).

A poluição do ar é um problema complexo, em função das dificuldades de se identificar os reais efeitos dos contaminantes sobre o meio ambiente e à saúde humana, da grande variedade de fontes emissoras existentes, da natureza dos poluentes emitidos, das condições meteorológicas predominantes durante as emissões atmosféricas e, finalmente dos efeitos sinérgicos aos quais esses poluentes estão submetidos na atmosfera (CUNHA, 2002).

A Camada Limite Planetária (CLP), que pode ser definida como “a região na qual a atmosfera está sujeita aos efeitos oriundos da superfície, através de trocas verticais de quantidade de movimento, calor e mistura de massas de ar” é o local onde grande parte dos fenômenos da poluição atmosférica ocorre. Nesta camada, o grau de

estabilidade e a altura de mistura têm efeito significativo sobre os níveis de concentração dos poluentes (ZANETTI, 1990).

2.2.2 Classificação dos poluentes atmosféricos

A classificação dos poluentes atmosféricos segundo a sua origem, composição química e estado físico é extremamente útil no contexto desta dissertação, uma vez que subsidia o conhecimento de suas fontes de poluição, bem como o processo de avaliar a concentração, o transporte e os efeitos de determinados poluentes sobre a saúde humana e os ambientes naturais.

O nível de poluição atmosférica, ou melhor, a qualidade do ar atmosférico, é medida pela quantidade de substâncias poluentes presentes no ar. A variedade das substâncias que podem ser encontradas na atmosfera é muito grande, o que torna difícil a tarefa de estabelecer uma classificação. Para facilitar esta classificação, os poluentes são divididos em duas categorias: poluentes primários e secundários (CETESB, 2014). Os poluentes primários são emitidos diretamente pelas suas fontes de origem, destacando o CO e o CO₂, dióxido de enxofre (SO₂), os compostos orgânicos voláteis (COV), o material particulado, os óxidos de nitrogênio (NO_x) e os hidrocarbonetos. Os poluentes secundários são formados na presença de radiação solar, por reações fotoquímicas envolvendo poluentes primários e os constituintes naturais da atmosfera (CETESB, 2005). Os efeitos na atmosfera de qualquer um dos dois tipos de poluentes podem ser igualmente nocivos para o meio ambiente e à saúde humana, porém as repercussões dos poluentes secundários são mais difíceis de obter um conhecimento científico com um grau menor de incertezas (SCHNELLE et al., 2002).

A formação dos poluentes secundários necessita de certo tempo e ocorre à medida que as massas de ar se deslocam. Com isso, é normal que concentrações elevadas desses poluentes atinjam áreas mais afastadas das fontes de emissão, em comparação com a distância atingida pelos poluentes primários (LYONS, 1990; SEINFELD, 1986).

De acordo com a sua origem, os poluentes atmosféricos se classificam em: naturais, os quais se originam por ações naturais devido aos diversos fenômenos biológicos ou geoquímicos da Terra (fotossíntese, cadeias de vulcões ativos, radiação solar, polinização, incêndios naturais, erosão eólica, dentre outros) ou antropogênicos, que são elementos intensificados ou criados por ações humanas (ZAMBRANO, 2010).

Segundo o seu estado físico, os poluentes atmosféricos são classificados em gases ou vapores dissolvidos na atmosfera. Também se apresentam nos estados líquido e sólido, finamente divididos, de tal modo que permanecem suspensos na atmosfera por determinados e consideráveis períodos de tempo, de onde se formam aerossóis em que o ar é a fase contínua e as partículas líquidas ou sólidas a fase dispersa (MELLO, 1997).

Mello (1997) descreve também que, a classificação quanto à composição química dos poluentes atmosféricos varia de acordo com a origem em termos primários, isto é da fonte que os originou. Eles podem ser classificados em compostos nitrogenados (dióxido de nitrogênio - NO_2 , ácido nítrico - HNO_3 , amônia - NH_3 e nitratos - NO_x), sulfurosos (óxidos - SO_2 , SO_3 , gás sulfídrico - H_2S e sulfatos - SO_4^{-2}), orgânicos (hidrocarbonetos - HC, aldeídos - HCHO: metanol ou formaldeído, ácidos orgânicos, nitratos orgânicos e partículas orgânicas), inorgânicos (monóxido de carbono - CO, dióxido de carbono - CO_2 , cloro, SO_2 , NO_x , poeira mineral, névoas ácidas e alcalinas), compostos de carbono (monóxido de carbono - CO, dióxido de carbono - CO_2), oxidantes fotoquímicos e material particulado (poeiras, fumos, fumaça, névoas - mistura de compostos no estado líquido e sólido).

Os poluentes atmosféricos podem ser genericamente classificados em três grupos básicos: sólidos, líquidos e gasosos; porém, na prática, esses três grupos podem passar por combinações entre si, sendo possível restringi-los, apenas nos grupos dos gases e dos particulados (ALMEIDA, 1999).

O material particulado é denominado por Branco (1995) como toda emissão atmosférica não gasosa, orgânica ou inorgânica, composta por uma mistura de partículas sólidas e líquidas em suspensão no ar atmosférico, em função do seu tamanho reduzido, que pode ser originado de uma variada gama de fontes, que confere as suas características químicas e físicas.

Os gases e vapores são poluentes na forma molecular, quer como os que se mantêm como gases permanentemente na atmosfera, como o dióxido de enxofre, o monóxido de carbono, quer como na forma transitória de vapor, como os vapores orgânicos em geral e o vapor d'água (CETESB, 2005).

2.2.3 Classificação das fontes de emissões de poluentes atmosféricos

A discussão quanto à origem da poluição atmosférica deve ter uma distinção e ser feita com relação aos processos envolvidos na formação dos poluentes, uma vez que

são resultados de processos naturais ou de processos antropogênicos. Assim, as fontes de poluição atmosférica são entendidas como qualquer processo natural ou antropogênico que possa liberar ou emitir matéria ou energia para a atmosfera, tornando-a poluída ou contaminada, isto é alterando a sua qualidade ambiental (RESENDE, 2007).

As fontes de poluição do ar são classificadas em estacionárias ou fixas e móveis, as quais podem ser naturais e antropogênicas (ZURITA e TOLFO, 2000; SILVA, 2010). As fontes estacionárias antropogênicas são inúmeras e bastante diversificadas, ocupam posições fixas no espaço, emitindo cargas pontuais de poluentes, sendo que, em escala global as principais são a queima da biomassa vegetal, agropecuária, indústrias extrativas, processos industriais de base, de transformação, de geração de energia (usinas termoelétricas), calcinação e de incineração de materiais, equipamentos de refrigeração, ar condicionado, dentre outros (GODISH, 1991; BOTKIN e KELLER, 1995; ASSUNÇÃO, 1998).

As fontes estacionárias naturais (geralmente assimiladas pela natureza através de seus mecanismos físicos, químicos e biológicos) são originadas por fenômenos biológicos ou geoquímicos, como os vulcões, o sol, a polinização, os oceanos (aerossóis marinhos), a formação de gases metano pelos pântanos, as descargas elétricas na atmosfera (formação de nitrogênio – óxidos de nitrogênio – e de ozônio), os incêndios naturais em florestas tropicais, as tempestades de areia, processos biológicos envolvendo o metabolismo de micro-organismos, decomposição biológica anaeróbica e a decomposição biológica de animais e vegetais (NEFFUSI, 1976; SCHIRMER e LISBOA, 2008).

As fontes móveis antropogênicas relacionam-se a movimentos e ocupam posições variáveis no espaço, emitindo cargas difusas de poluentes. Abrangem os veículos automotores, locomotivas, aviões, dentre outros (CCOYLLO, 1998). Há autores e pesquisadores que consideram a criação de gado bovino e a atividade de respiração dos seres humanos como fontes naturais móveis de emissão do gás metano e do dióxido de carbono, respectivamente.

As fontes de emissão de poluentes atmosféricos podem ser classificadas também como fontes específicas e múltiplas (CCOYLLO, 1998). As fontes específicas são fixas em determinado território, ocupam área relativamente limitada e permitem uma avaliação individual. As indústrias são exemplos de fontes específicas de poluição. As fontes múltiplas podem ser fixas ou móveis, geralmente se dispersam por uma

determinada região, oferecendo grande dificuldade de serem avaliadas uma a uma. Um exemplo de fontes múltiplas móveis são os veículos automotores, e de fixas são as casas e conjuntos residenciais.

Dentre as citadas fontes de origem de poluentes atmosféricos o setor industrial, devido à natureza de seu processo produtivo, a agropecuária, devido às ações degradadoras que antecedem esta atividade e a queima da biomassa vegetal são considerados os grandes causadores de impactos ambientais adversos ao meio ambiente natural e antrópico. Estes poluentes têm potencial de induzir consideráveis distúrbios respiratórios, alergias, lesões degenerativas no sistema nervoso e em outros órgãos vitais do ser humano, a intensificação do efeito estufa e a sua consequente modificação no balanço radioativo do Planeta, acarretando o descontrole climático em uma dimensão global (FREITAS et al., 2007; MARENGO, 2007).

Nascimento et al. (2000) destaca as áreas rurais como significativas fontes antropogênicas fixas ou estacionárias de emissões de poluentes para a atmosfera. Segundo esse autor, nessas áreas o desmatamento e as consequentes queimadas em florestas tropicais brasileiras estão ligados à maneira como a ocupação humana ocorre. Grande parte do desmatamento ocorre ao longo do chamado arco do desmatamento, que se estende do nordeste do estado do Pará ao leste do estado do Acre, e abriga a maior fronteira agrícola em expansão no mundo (MORTON et al., 2006).

Segundo o Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC AR4, 2007), o desmatamento, considerado como a etapa que antecede à queima da biomassa vegetal, é a terceira maior causa de emissão de gases de efeito estufa à atmosfera, ficando atrás somente da produção de energia e da indústria e à frente do setor de transportes. Essas atividades resultam na injeção de grandes volumes de gases de efeito estufa e aerossóis na atmosfera e podem exacerbar as mudanças já produzidas pela variação climática natural.

2.3 QUALIDADE DO AR ATMOSFÉRICO

O nível de poluição ou a qualidade do ar de uma determinada região é medido não somente pela quantificação das substâncias poluentes presentes neste compartimento ambiental, mas também, por um conjunto de fatores relacionados às fontes de emissão, como a intensidade do lançamento das emissões, ao estado do ambiente, topografia local e à interação entre o poluente e a atmosfera. Esses fatores determinam o transporte, dispersão, e transformação químicas e físicas dos poluentes na

atmosfera, o tempo de exposição e as suas respectivas concentrações (CERQUEIRA, 2001), como também, a distância que serão transportados, antes de alcançarem a superfície do solo (BRAGA et al., 2002).

Assim, a avaliação da qualidade do ar e de seus efeitos (adversos ou não) sobre as pessoas, animais, plantas e materiais, é realizada a partir do conhecimento das concentrações dos poluentes atmosféricos em relação aos níveis de qualidade do ar existentes. Esses níveis, denominados Padrões de Qualidade do Ar, são definidos legalmente e estabelecem o limite máximo para a concentração, no ar atmosférico, de um componente ou substância que, a princípio, possa garantir a saúde e o bem-estar da população e do meio ambiente em geral (DERISIO, 2000).

Entende-se por concentração atmosférica a fração que determinado poluente representa do volume total de ar analisado. O nível de concentração do ar é medido pela quantificação das substâncias poluidoras presentes no ar que por sua vez é indicada em função do número de partículas por milhão (ppm), ou por bilhão de partes de mistura (ppb) ou do peso das partículas por unidade de volume de ar, por exemplo, em micrograma por metro cúbico ($\mu\text{g.m}^{-3}$). Quando o nível de concentração é determinado, obtém-se o grau de exposição dos receptores (ser humano, outros animais, plantas e materiais) como resultado final do processo de lançamento de poluentes na atmosfera (DAMILANO, 2006).

Dentre as diversas condições meteorológicas, as mais importantes e que podem prognosticar os níveis de poluição do ar são: altura da Camada Limite Planetária, estabilidade atmosférica, intensidade e direção do vento, inversão térmica e umidade relativa do ar, além de movimentos verticais originados devido aos sistemas de alta e baixa pressão (BRAGA et al., 2002). Com isso, afirma-se que mesmo mantidas as fontes de emissão, a qualidade do ar pode mudar em função das condições meteorológicas, determinando uma maior ou menor diluição dos poluentes (TOLEDO, TORRES e MARTINS, 2003).

2.3.1 Níveis ou padrões de qualidade do ar atmosférico

Com a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981 (Lei da Política Nacional do Meio Ambiente), criou-se o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), órgão consultivo e deliberativo, com competências para definir padrões de qualidade do ar. Nesse sentido, estabeleceu-se, em 1990, a resolução do CONAMA nº 03, que definiu padrões nacionais de qualidade do ar para particulado total em suspensão, particulado

inalável e fino e gases (dióxidos de enxofre, dióxido de nitrogênio, monóxido de carbono e ozônio), as substâncias classificadas e selecionadas como indicadores da qualidade do ar (Tabela 3), classificando-as em:

- Padrão Primário, que estabelece o limite máximo tolerável para a saúde da população. Esse padrão não leva em consideração as necessidades da fauna e flora, e sim o nível máximo tolerável de concentração de poluentes em metas de curto e médio prazo. As metas de curto prazo têm o objetivo de controlar os efeitos agudos produzidos durante períodos de alta concentração de poluentes, que podem ser de 1, 8 e/ou 24 horas de concentração (CETESB, 2004);
- Padrão Secundário, mais rigoroso, que prevê um mínimo de efeitos à população e ao meio ambiente. É o nível de concentração de poluentes desejado de longo prazo.

Todos os valores dos padrões primários e secundários definidos pela resolução do CONAMA nº 03/90, constam da Tabela 3. Esses valores devem ser atingidos, apresentando margem de segurança para a proteção da saúde pública e proteção ao bem-estar social (CETESB, 2004).

Tabela 3– Padrões nacionais de qualidade do ar de acordo com a resolução CONAMA 03/1990.

POLUENTES	TEMPO DE AMOSTRAGEM	PADRÕES DE QUALIDADE DO AR ($\mu\text{g.m}^{-3}$) ⁽¹⁾	
		PADRÃO PRIMÁRIO	PADRÃO SECUNDÁRIO
Partículas Totais em Suspensão – PTS	24 horas	240 ⁽³⁾	150 ⁽³⁾
	1 ano ⁽²⁾	80	60
Fumaça	24 horas	150 ⁽³⁾	100 ⁽³⁾
	1 ano ⁽⁴⁾	60	40
Partículas Inaláveis – PI	24 horas ⁽³⁾	150 ⁽³⁾	150 ⁽³⁾
	1 ano ⁽⁴⁾	50	50
Dióxido de Enxofre –SO ₂	24 horas ⁽³⁾	365 ⁽³⁾	100 ⁽³⁾
	1 ano ⁽⁴⁾	80	40
Monóxido de Carbono – CO	1 hora	40.000 ⁽⁵⁾ (35 ppm)	40.000 ⁽⁵⁾
	8 horas	10.000 ⁽⁶⁾ (9 ppm)	10.000 ⁽⁶⁾
O ₃	1 hora	160 ⁽³⁾	160 ⁽³⁾
Dióxido de Nitrogênio – NO ₂	1 hora	320	190 ⁽⁴⁾
	1 ano ⁽⁴⁾	100	100

⁽¹⁾ Definidas como condições de referência a temperatura de 25 °C e a pressão de 101,32 Pa;

⁽²⁾ Média geométrica para PTS;

⁽³⁾ Não pode ser excedida mais de uma vez ao ano;

⁽⁴⁾ Média aritmética;

⁽⁵⁾ Concentração máxima em 1 hora;

⁽⁶⁾ Concentração máxima em 8 horas.

Fonte: Resolução CONAMA nº. 03/1990.

Além desses, existem outros poluentes atmosféricos classificados como perigosos, em razão de seu elevado potencial toxicológico, tais como: chumbo, benzeno, tolueno, xileno, materiais orgânicos policíclicos², cromo, cádmio, dentre outros (CCOYLLO, 1998).

2.4 CONDIÇÕES AMBIENTAIS E A INFLUÊNCIA NA QUALIDADE DO AR ATMOSFÉRICO

2.4.1 Importância das condições ambientais na poluição do ar

As emissões de poluentes atmosféricos, as condições meteorológicas, topografia local, uso e ocupação do solo, efeito da brisa, dentre outros efeitos ambientais locais exercem papel fundamental na dinâmica da poluição do ar, pois influenciam a interação entre atmosfera e os poluentes atmosféricos, determinam a dispersão e, conseqüentemente, a concentração destes poluentes em uma determinada área (DANI-OLIVEIRA, 1999; DERÍSIO, 2000 e 2007). Portanto, esses fatores possibilitam estabelecer um elo entre a fonte de poluição e o receptor, tendo como referência o transporte e a dispersão de poluentes (DERÍSIO, 2000 e 2007).

Segundo Cavalcanti (2010) as principais condições meteorológicas que exercem uma grande influência no transporte e dispersão dos poluentes são: regime dos ventos, umidade relativa do ar, radiação solar, temperatura ambiente, opacidade, estabilidade atmosférica, altura da camada de mistura e ocorrência de chuvas. Estas condições acarretam concentrações atmosféricas diferentes nos receptores, mesmo em cenários de emissões com valores e condições de lançamento similares. Na mesma direção, Crutzen (1997) acrescenta que, a circulação geral da atmosfera também interfere na dispersão dos poluentes atmosféricos, uma vez que a movimentação das grandes massas de ar afeta a circulação local. Segundo ele, neste contexto, a brisa marítima exerce forte influência, em função da possibilidade de provocar aumento da turbulência e o transporte dos poluentes para áreas distantes das fontes, ou mesmo prejudicar a dispersão por apresentar uma circulação parcialmente fechada, ocasionando o aprisionamento de ar poluído próximo às cidades.

²Classe de compostos orgânicos contendo dois ou mais anéis benzênicos condensados, podendo também apresentar anéis com menos de seis carbonos.

2.4.2 A física do transporte e da dispersão de poluentes na atmosfera

A dispersão vertical atmosférica ocorre devido à combinação entre os processos de transporte e difusão dos poluentes atmosféricos, que ocorrem simultaneamente na atmosfera. Refere-se ao espalhamento de poluentes na atmosfera devido aos efeitos convectivos e turbulentos do escoamento atmosférico. Esses poluentes são transportados pelo vento e, simultaneamente se misturam na atmosfera turbulenta, podendo passar por reações químicas que os transformam de poluentes primários (procedentes diretamente das fontes de emissão) em secundários (originados por reações químicas entre os contaminantes primários e os componentes normais presentes na atmosfera), ou podem ser depositados no solo por via seca ou úmida (PRETTO, 2005).

A dispersão horizontal ocorre porque o ar obedece às leis da dinâmica dos fluídos, de tal forma que, áreas contínuas com diferentes pressões estabelecem um gradiente horizontal favorável ao deslocamento do ar mais denso, no sentido da área de menor pressão, até que se estabeleça um equilíbrio barométrico. A esse processo de deslocamento de ar favorável ao gradiente de pressão, dá-se o nome de advecção, processo este que resulta na geração do vento (AHRENS, 2005; MENDONÇA; DANI-OLIVEIRA, 2007).

Assim, segundo Zannetti (1990), Ayode, (1996) e Martins (2003), os principais fatores meteorológicos que influenciam o fenômeno da dispersão atmosférica e que podem prognosticar níveis críticos de poluição do ar são: vento horizontal (direção e velocidade), estabilidade atmosférica, intensidade da inversão de altitude, movimento vertical devido aos sistemas da alta/baixa pressão, precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, bem como, os efeitos de paisagem e da topografia local.

2.4.2.1 Direção e velocidade do vento

O vento é uma grandeza vetorial com as componentes x , y e z , sendo que a resultante determina a direção desta grandeza em cada instante e, no local da fonte, a direção inicial do transporte dos poluentes originados por fontes emissoras e a concentração destes poluentes na atmosfera (DANI OLIVEIRA, 2007). Dentre todos os componentes do vento, a vertical z é o responsável pela sua turbulência, enquanto que as outras duas (x e y) determinam, essencialmente, o transporte horizontal e a diluição das plumas de poluição, isto é determinam o arrastar horizontalmente (movimento advectivo) dos poluentes emitidos de uma fonte (BOUBEL et al.; 1994, apud MORAES, 2004).

O vento interage com outros parâmetros atmosféricos e é alterado pela rugosidade da superfície (uso e ocupação do solo), o que confere a esta grandeza um perfil vertical de velocidade do vento crescente em relação à altitude (DANI OLIVEIRA, 2007).

Neste contexto, as brisas marítimas e terrestres, que são induzidas pelos gradientes térmicos associados com o tipo de superfície (FREITAS, 2003), têm grande importância para a caracterização das condições de dispersão de poluentes, devido aos efeitos de recirculação que estão associados (DAMILANO, 2006).

2.4.2.2 Turbulência

Turbulência é uma propriedade de fácil identificação, mas de difícil definição, composta de movimentos irregulares e caóticos que estão presentes em todos os escoamentos de aplicações práticas. De fato, a maioria dos problemas meteorológicos relacionados com regiões industriais e populosas está governada pela difusão turbulenta (SEINFELD, 1998).

Exerce um papel importante na difusão e na dispersão dos poluentes atmosféricos, sendo constituída por dois processos específicos: a turbulência térmica e a mecânica que, de modo geral, é determinada pela velocidade dos ventos e pelo perfil da temperatura. A movimentação na direção vertical pode ser atribuída à turbulência térmica resultante de parcelas de ar aquecido que acendem da superfície terrestre, sendo substituídas pelo ar mais frio em sentido descendente. A movimentação dos poluentes na direção horizontal é determinada pela turbulência mecânica provocada pelo vento na sua instabilidade direcional e de velocidade, associadas às características topográficas da região (SEINFELD, 1998). O efeito da turbulência, tanto mecânica quanto térmica, aumenta a mistura atmosférica e conseqüentemente, a dispersão e difusão dos poluentes, resultando em uma concentração menor na fonte (GODISH, 2003).

De grande importância é o papel dos sistemas convectivos, no transporte de poluentes da baixa para a alta troposfera. Segundo Freitas et al. (2005), esse transporte é feito através da convecção profunda e depende de como está a estrutura atmosférica envolvendo a turbulência na CLP e o campo de vento no qual os poluentes podem ser dispersos e advectados. Esses mesmos autores descrevem que a ocorrência de convecção profunda perto de regiões poluídas é um importante mecanismo na redistribuição vertical de gases traços, pois transporta, dentro das massas de ar ascendentes, altas concentrações de poluentes.

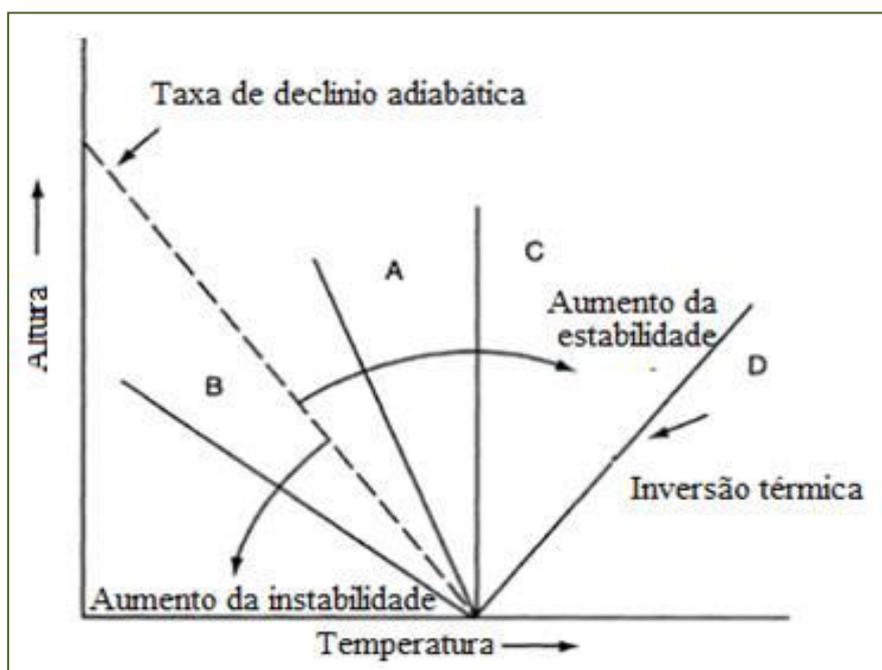
Como exemplo deste fenômeno destacam-se estudos e pesquisas desenvolvidas por Artaxo et al. (1992) e Dalia (2002). Esses pesquisadores identificaram a presença de poluentes em regiões remotas do Planeta, como a Antártida, onde foram observadas partículas contendo Cr, Ni, Cu, Zn e Pb, na fração fina do aerossol em suspensão na atmosfera. Planchon et al. (2002) e Cunha et al. (2004) identificaram esses elementos depositados em amostras de gelo, dessa mesma região. Tais constatações foram e estão sendo objeto de inúmeros estudos e experimentos, para análise das fontes de origem, dos fenômenos de transporte destes poluentes e dos prováveis impactos sobre este sistema ecológico.

2.4.2.3 Estabilidade atmosférica

O grau de estabilidade atmosférica é determinado pela diferença de temperatura entre a parcela de ar e o ar da vizinhança. Essa diferença pode causar movimentos verticais (ascendentes ou descendentes) e está relacionada com o grau de equilíbrio dessa parcela de ar, cujos movimentos verticais dependem de sua temperatura, pressão e densidade (LYRA, 2008). O gradiente de temperatura da atmosfera é responsável pelo gradiente de densidades entre as massas de ar, o qual por sua vez, gera um movimento vertical na atmosfera denominado convecção (BARBON, 2008). A taxa de mudança da temperatura em função da altitude denomina-se taxa de declínio (*lapse rate*) (Figura 3), cujo valor médio de $6,5 \text{ }^\circ\text{C.km}^{-1}$ corresponde à taxa na qual a temperatura decai com o aumento da altura na troposfera. Esta taxa média é designada taxa de declínio ambiental e atinge valores de $10 \text{ }^\circ\text{C.km}^{-1}$, para parcelas de ar seco expandindo-se adiabaticamente (sem troca de calor com a vizinhança) (WALLACE e HOBBS, 2006).

As taxas de declínio são usadas como indicadores da estabilidade atmosférica e do potencial de dispersão de poluentes (GODISH, 2003). A estabilidade atmosférica refere-se à capacidade da atmosfera de resistir ou intensificar os movimentos verticais. Quando ela resiste aos movimentos verticais (convecção e turbulência) é chamada de atmosfera estável. Quando intensifica os movimentos verticais é dita atmosfera instável ou convectiva, e quando é indiferente a qualquer tipo de movimento vertical é chamada atmosfera neutra. A instabilidade influencia, diretamente, a taxa de mistura dos poluentes com o ar atmosférico, pois à medida que a instabilidade aumenta, maior é a mistura de uma determinada quantidade de poluente. Por outro lado, ao contrário da instabilidade atmosférica, a estabilidade inibe o transporte de poluentes no ar (LEMES e MOURA, 1998).

Figura 3– Perfil de temperatura atmosférica relacionando à variação da taxa de declínio com a estabilidade atmosférica.



Fonte: Godish (2003).

Segundo Vaz (2008), a profundidade da camada de mistura é a distância vertical entre a superfície da terra e a altitude das correntes de convecção. Quando a mistura em profundidade é grande (muitos quilômetros), observa-se uma grande quantidade de ar limpo misturado com pouca quantidade de poluentes. Condições instáveis ou convectivas ocorrem durante o dia, com forte entrada de radiação (dias bastante ensolarados) e sob vento fraco. Estas condições proporcionam uma forte mistura vertical dos poluentes, provocada por movimentos convectivos organizados, gerados pelo aquecimento solar da superfície (CARVALHO, 1999).

Já as condições estáveis são caracterizadas por um perfil sub-adiabático (aumento da temperatura com a altura). Quando a parcela de ar ao elevar-se na atmosfera encontrar ar circundante mais quente, sua tendência é descer, sendo que em situações estáveis qualquer movimento vertical é inibido. Neste caso, a turbulência causada por efeitos convectivos não está presente, e a única turbulência presente é a mecânica, causada pelos efeitos mecânicos do vento escoando sobre uma superfície ou outra camada de fluido. Sob estas condições, com vento fraco, o poluente pode viajar a grandes distâncias mantendo altas concentrações (CARVALHO, 1999).

As condições neutras de estabilidade atmosféricas são caracterizadas pela ocorrência de um perfil vertical de temperatura adiabático (aproximadamente constante

com a altura). Essas condições ocorrem geralmente durante as transições do dia para noite e vice-versa, em dias nublados ou com vento forte (com velocidades maiores que 6 m.s^{-1}). Nesses casos a turbulência pode ser considerada homogênea, com vórtices (*eddies*), aproximadamente, de mesmo tamanho, atuando em todas as direções (EPSTEIN, 1996).

A pressão atmosférica, em função do decréscimo com a altura, provocam a expansão e o conseqüente resfriamento das parcelas de ar que se encontra em altitudes maiores, onde há menor pressão. Esse processo de resfriamento com a ascensão, e aquecimento com a descida, é chamado de “curva adiabática seca” (DUCHIADE, 1992).

Outro fenômeno de extrema importância na dispersão dos poluentes atmosféricos é a inversão térmica: a situação normal na troposfera, que é o decréscimo da temperatura com o aumento da altitude, se reverte, isto é o ar em contato com o solo, se resfria rapidamente, e se torna mais denso do que a camada de ar imediatamente acima, mais quente. Os poluentes, por sua vez, ficam “presos” na interface dessas duas camadas: a fria e a quente, impossibilitando a sua dispersão. Esse fenômeno acontece geralmente nos meses de inverno, sob condições de calmaria (ausência de ventos), céu claro, perda de calor, durante a noite, sendo acompanhado de denso nevoeiro à baixa altitude (HOLLAND et al., 1979, apud DUCHIADE, 1992).

2.4.2.4 Radiação solar

As implicações diretas da radiação solar na qualidade do ar dizem respeito à indução na formação de oxidantes atmosféricos, como poluentes secundários, como o ozônio troposférico, por exemplo. Esse fenômeno, por ter uma variação ao longo do ano, faz com que esses poluentes secundários apresentem uma distribuição totalmente distinta dos poluentes primários.

Outro fenômeno importante acontece quando parte da energia solar recebida pela superfície da terra é absorvida e uma parcela é refletida, sendo que a parcela refletida denomina-se albedo. Há diferentes albedos para diferentes superfícies, logo, a quantidade de energia solar refletida é variável, promovendo diferentes gradientes de temperatura, que influenciam na estabilidade atmosférica e, conseqüentemente, na dispersão de poluentes (BARBON, 2008).

2.4.2.5 Precipitação pluviométrica e umidade relativa do ar

As chuvas provocam a deposição úmida do poluente atmosférico sobre o solo, provocando uma “limpeza na atmosfera”, liberando-a de grande quantidade de contaminantes atmosféricos. A combinação da estabilidade atmosférica com ausência de chuvas torna-se profundamente desfavorável à dispersão de poluentes.

A umidade relativa do ar é um parâmetro meteorológico que caracteriza o tipo de massa de ar que está atuando sobre a região. A ocorrência de baixa umidade relativa causa desconforto.

2.4.2.6 Efeitos de terreno e da topografia local

Segundo Carvalho (1999), a dispersão de poluentes depende também das condições da topografia local e da complexidade do terreno, as quais ocasionam grandes mudanças na direção/velocidade do vento e nos fluxos turbulentos. Os terrenos planos são aqueles sem nenhum tipo de elevação, ou com elevações que não influenciam significativamente o escoamento ao seu redor, não gerando recirculações. Já os terrenos complexos são aqueles onde as elevações são significativas a ponto de influenciar o escoamento atmosférico ao seu redor, gerando recirculações. As principais situações que podem aumentar as concentrações em terreno complexo são: encontro da pluma com montanhas, acúmulo de poluentes em vales e arrasto dos poluentes para centros urbanos devido ao fenômeno da canalização do vento pelos vales. Esse mesmo pesquisador ressalta ainda que regiões com vegetação, corpos d'água, cidades, ou outro tipo de cobertura do solo influenciam diretamente nas condições da atmosfera e conseqüentemente na dispersão dos poluentes.

2.4.3 Os processos de remoção dos poluentes da atmosfera

O tempo de permanência dos gases e aerossóis na atmosfera varia de minutos a séculos, dependendo do número e da efetividade dos processos de remoção. A maioria das espécies emitidas para a troposfera possui um tempo de vida curto e são destruídas na própria troposfera (SCHROEDER, LANE, 1988). Segundo Bideman (1988), Odum et al. (1996), Forstner et al. (1997) e Hofmann et al. (1997), a fase na qual o composto se encontra na atmosfera pode influenciar significativamente o seu processo de remoção e o seu tempo de residência.

Os contaminantes do ar podem ser removidos da atmosfera por três mecanismos, a saber:

- Deposição úmida: Para as partículas, o processo de deposição úmida se resume na colisão e posterior adesão das partículas com as gotas da precipitação pluviométrica. No caso dos gases, a taxa de transferência de moléculas do gás à superfície de uma gota deve ser estimada conhecendo-se a pressão de vapor do gás e a composição química do gás e da gota.
- Deposição seca: Para partículas, a deposição do contaminante ocorre devido à aceleração da gravidade, assim como para gases com massa específica superior a do ar.
- Reação química de partículas ou gases: É o mecanismo por meio do qual ocorre a transformação das substâncias inicialmente presentes (reagentes da reação), em novas substâncias (produtos da reação).

Vários pesquisadores estudam os processos de remoção dos gases e aerossóis na atmosfera: Schwartz (1989) e Gorham (1993), seguindo a cadeia da poluição atmosférica, descrevem que os gases, depois de emitidos, interagem com a atmosfera e podem ser removidos por reações químicas, por atividade biológica ou por processos físicos, que muitas vezes resultam em deposição ácida. Já Bidieman (1988) e Odum et al. (1996, 1997) se concentram no processo de formação de material particulado secundário. Bonn e Moorgat (2002) e Penkett et al. (2003) estudaram a formação de ozônio e Seinfeld e Pandis (1998) a contribuição dos processos de remoção química na capacidade oxidante da atmosfera (formação de radicais livres).

2.5 OS POLUENTES ATMOSFÉRICOS ESTUDADOS

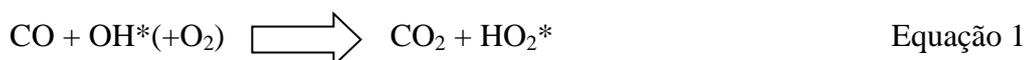
Para o desenvolvimento deste estudo, os indicadores de interesse são o monóxido de carbono (CO) e material particulado, com diâmetro das partículas, menores do que $2,5\mu\text{MP}_{(2,5)}$, e sobre eles apresentam-se, a seguir, a descrição de suas características, fontes de origem, efeitos e potencial de impacto sobre a saúde humana e meio ambiente.

2.5.1 Monóxido de Carbono (CO)

O monóxido de carbono (CO) é um óxido gasoso, inodoro, incolor, insípido, um pouco menos denso do que o ar, que não causa irritação e não é percebido pelos

sentidos humanos. É, ainda, um gás estufa, embora de efeitos menos severos do que o CO₂ (GIODA, 2006). Comumente classificado como um poluente inorgânico de origem primária e, em algumas condições, de origem secundária. Neste caso, por ação do ozônio (O₃), o metano ao ser oxidado, dá lugar à formação do formaldeído. Por sua vez, ao ser decomposto por ação da luz, o formaldeído origina o CO (BRANCO, 1995).

O CO exerce um importante papel na química da troposfera, isto é em sua capacidade oxidante, especialmente através da reação com o radical OH* (Equação 1, abaixo) (SEINFELD e PANDIS, 1998; JACOB, 2000), sendo um dos controladores da concentração desse radical no ar, em diversos locais (MARTINS et al., 2003).



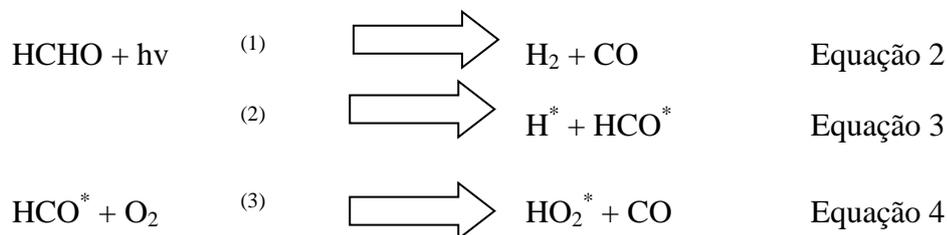
Dependendo das concentrações de NO_x, o CO também está relacionado com a produção e a destruição de O₃ na troposfera. Estima-se que a reação de CO com o radical OH seja responsável pela produção de 40 a 60% do radical HO₂* na troposfera (BRÜHL e CRUTZEN, 1999). A fração do radical HO₂* que reage com NO para formar O₃, contribui em 20 a 40% para a produção do O₃ troposférico global. Por outro lado, devido à reação deste radical HO₂* com O₃, a oxidação de CO também pode ser responsável pela perda química de 10 a 30% do O₃ (COLLINS et al., 1997). Destaca-se ainda que o CO é um intermediário na oxidação do CH₄ e a maior parte desse gás presente em uma atmosfera limpa é proveniente desta fonte (BAIRD, 2002, SEINFELD e PANDIS, 1998).

Então, como se pode observar, o sumidouro dominante de CO se dá pela reação com o radical OH* e vice-versa, e, em função dessa característica, a concentração e distribuição de OH* são, frequentemente, determinadas pela concentração de CO no ambiente, embora o CH₄, NO_x, H₂O, etc, podem, também, ser fatores determinantes. Outra importante característica do CO, em latitudes extratropicais, é o seu ciclo sazonal: acumula-se na atmosfera durante o período de inverno, quando as concentrações de OH* são baixas, e diminuem rapidamente na primavera, devido à reação com o radical OH*, abundante nesta época (SEINFELD e PANDIS, 1998).

A incerteza no inventário de emissões de CO para a troposfera é grande. As fontes são predominantemente de origem antrópica, provenientes da queima e combustão incompleta de combustíveis fósseis (350±550 Tg CO.ano⁻¹) e de biomassa (300±700 Tg CO ano⁻¹), como também na oxidação atmosférica do metano e de HCNM (hidrocarbonetos não metanos) (KANAKIDOU, CRUTZEN, 1999).

As fontes naturais de CO são as emissões oceânicas (20 ± 200 Tg CO.ano⁻¹), provenientes do processo da foto-oxidação da matéria orgânica dissolvida nestes ambientes, as emissões biogênicas da vegetação (60 ± 160 Tg CO.ano⁻¹) e dos microrganismos (SEINFELD e PANDIS, 1998).

Outra fonte de origem do CO na troposfera se dá através da fotólise do formaldeído, que se dissocia com a energia resultante da luz de comprimentos de onda entre 301 a 356 nm (Equações 2 e 3). Nos comprimentos de onda menores predomina o caminho (1) que resulta na formação de CO e de H₂. Nos comprimentos de onda maiores predomina o caminho (2), onde outros dois radicais são formados e posteriormente tem a formação do radical HO₂* e novamente do CO, caminho (3) (Equação 4) (SEINFELD e PANDIS, 1998).



2.5.2 Material particulado (MP)

Denomina-se material particulado (MP) toda emissão atmosférica não gasosa, orgânica ou inorgânica, composta por uma mistura de partículas sólidas e líquidas em suspensão no ar atmosférico, que pode ser originado de uma variada gama de fontes, sejam elas primárias ou secundárias. Tal aspecto confere a esse tipo de poluente, características químicas e físicas também variadas (BRANCO, 1995). Vasconcelos (1996) define o material particulado em suspensão como sendo qualquer substância, exceto água pura, que existe no estado sólido ou líquido da atmosfera, que sob condições normais, possui dimensões microscópicas a submicroscópicas, maiores do que as dimensões moleculares. De acordo com Schnelle (2002), o tamanho das partículas classifica o material particulado em:

- Partículas Totais em Suspensão (PTS), com diâmetro aerodinâmico menor que 50 µm;
- Partículas Inaláveis (MP10), com diâmetro aerodinâmico menor do que 10 µm que podem, ainda, ser classificadas como partículas inaláveis finas – MP_(2,5) (<2,5 µm) e partículas inaláveis grossas (2,5 a 10 µm). É a fração em massa das partículas totais

em suspensão, que podem ser inaladas através da boca e do nariz, podendo chegar até os alvéolos pulmonares e, finalmente,

- Fumaça (FMC) que se encontra associada ao material particulado suspenso na atmosfera, originado em processos de combustão. Em resumo, é o teor de fuligem da atmosfera.

De uma maneira geral, as partículas são classificadas pelas suas propriedades aerodinâmicas, uma vez que essas propriedades são determinantes nos processos de transporte e remoção do ar, penetração e deposição no trato respiratório. O diâmetro aerodinâmico de uma partícula é definido como o diâmetro de uma esfera de densidade unitária que possui a mesma velocidade de sedimentação da partícula de interesse (CETESB, 2008).

O tamanho das partículas é um dos parâmetros mais importante no estudo da poluição atmosférica, pois exerce influência sob vários fenômenos associados aos aerossóis (material particulado que se encontram em suspensão no ar) ou, tais como, o transporte, a deposição atmosférica e a migração através do ambiente, além de efeitos nocivos. Partículas comportam-se distintamente em diferentes faixas de tamanho, sendo também regidas por diferentes leis físicas (WILLEKE e BARON, 1993).

As partículas inaláveis finas são extremamente importantes sob o ponto de vista de sua deposição no trato respiratório humano, bem como por serem responsáveis pelo maior espalhamento de luz, isto é pela redução da visibilidade. Além disto, partículas menores podem conter mais substâncias tóxicas do que as partículas maiores. Tal característica confere às partículas finas uma capacidade de aumentar os efeitos fisiológicos dos gases presentes no ar. Como exemplo, citam-se os efeitos de uma mistura de material particulado e de dióxido de enxofre, que são mais acentuados do que os provocados na presença individualizada de cada um deles; além disso, pequenas partículas podem absorver o dióxido de enxofre do ar e, com água (umidade do ar) formam partículas contendo ácido (CUNHA, 2002). Baird (2011) descreve que essas faixas de partículas finas permanecem em suspensão no ar atmosférico por dias ou semanas e podem ser transportadas por correntes de ar favoráveis, afetando a atmosfera, não somente em escala local, mas também em escala regional e até global.

O material particulado é emitido no ar diretamente por fábricas, usinas de geração de energia, queima a céu aberto, por veículos automotores, atividades agrícolas (aração, cultivo etc.), construções, mineração e incêndios florestais (VALLERO, 2008).

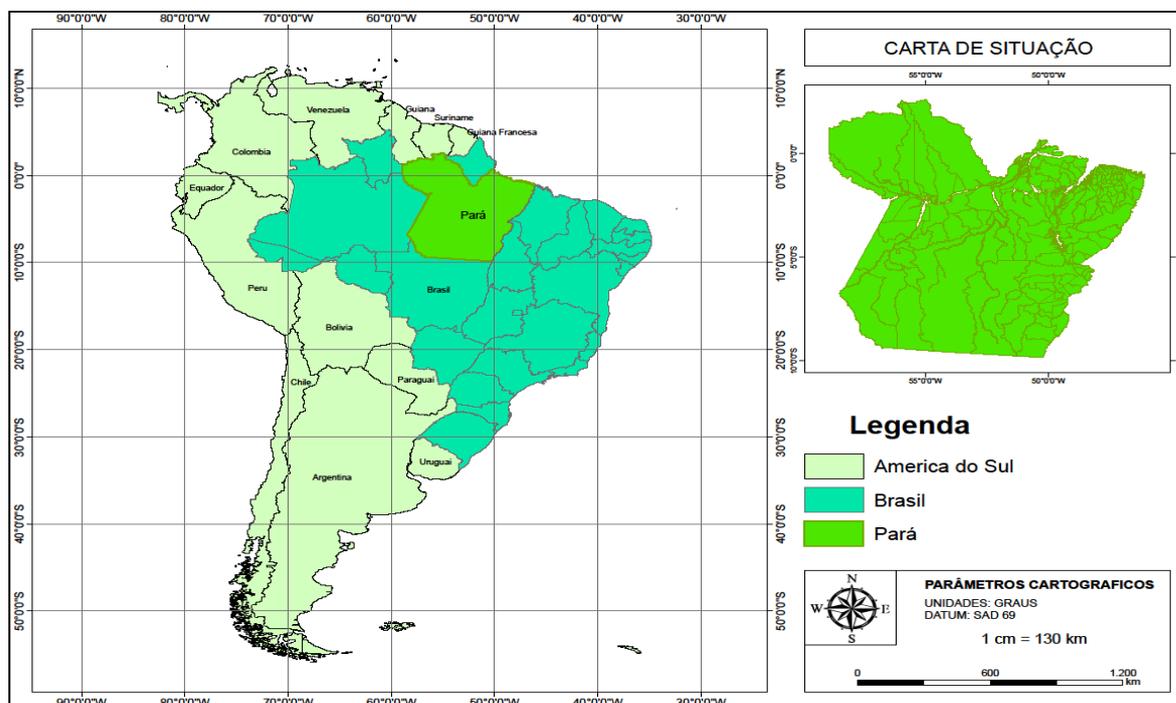
A fração grosseira (com diâmetro acima de 2,5 μm) é gerada por variada gama de processos de atrito mecânico. Não estão sujeitas ao movimento browniano e são mais suscetíveis à força gravitacional, como ação dos ventos sobre o solo causando a re-suspensão de poeira e dispersão de partículas na forma de sprays d'água. A sua composição química é muito diversificada, sendo constituída por vários tipos de partículas, tais como, cinzas, fuligem e partículas de origem mineral (sílica, alumínio, potássio, ferro, cálcio, dentre outros). Em quantidades substanciais podem, também, ser encontrados os carbonatos e os compostos orgânicos (ALMEIDA, 1999).

2.6 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Situado no centro leste da região Norte do Brasil, o estado do Pará é o segundo do País em superfície (o maior é o Estado do Amazonas), com 1.247.689,515 km² de área, o que corresponde a 14,7% do território nacional, e está compreendido entre os paralelos 2°N e 5°S e entre os meridianos 56 e 48°W.

Possui, como limites geográficos, a República do Suriname e o estado do Amapá ao norte, o oceano Atlântico à nordeste, o estado do Maranhão à leste, Tocantins à sudeste, Mato Grosso ao sul, os estados do Amazonas e Roraima à oeste e, a Guiana Francesa à noroeste (Figura 4).

Figura 4– Mapa do estado do Pará com destaque para a sua posição geográfica na América do Sul, Brasil e região Norte brasileira.



Fonte: IBGE/Portal de Mapas.

É dividido em 144 municípios, distribuídos em seis mesorregiões geográficas: Baixo Amazonas, composta por 15 municípios; Marajó, com 16 municípios; Região Metropolitana de Belém, 11 municípios; Nordeste Paraense, formado por 49 municípios; Sudeste Paraense, 39 municípios; e, por último, Sudoeste Paraense, com 14 municípios (Figura 5).

Figura 5– Macrodivisão do estado do Pará em seis mesorregiões.



Fonte: Cartografia digital – www.baixarmapas.com.br

2.6.1 Aspectos socioeconômicos

O Pará é o mais rico e mais populoso Estado da região Norte, contando com uma população de 7.321.493 habitantes. Sua capital é o município de Belém que reúne, em sua região metropolitana, cerca de 2,1 milhões habitantes (IBGE, 2010). Em termos gerais o estado do Pará possui a principal reserva mineral do País, investimentos vultosos na exploração e beneficiamento de importantes produtos oriundos do setor mineral, expressivo rebanho bovino regional (2º no ranking brasileiro, perdendo para o Mato Grosso), intensa exploração madeireira, agropecuária desenvolvida, exportador de energia elétrica e um grande potencial capaz de duplicar o valor agregado da produção estadual (IBGE, 2010).

A produção agrícola do Estado, no que concerne às culturas de arroz, feijão, milho, mandioca e soja, é pouco representativa: corresponde a 0,8% da produção nacional. Em termos gerais, com relação à produção de cereais, leguminosas e oleaginosas, a região Norte do Brasil possui a menor representatividade em comparação com os demais Estados: corresponde a 3,00% do total da produção brasileira. Tendo como base comparativa, somente a região Norte, o Pará se destaca na lavoura temporária (arroz, feijão, milho e soja), ocupando a 2ª posição, o que equivale a 30,6% do total produzido, e na lavoura permanente (principalmente banana, coco da Bahia e cacau). Merece destaque especial na produção de pimenta do reino e maracujá, em que ocupa a 1ª e a 2ª posição brasileira, respectivamente. Na mesorregião Sudeste e em parte da Sudoeste do Pará, entre as rodovias BR-158 e 150; BR-222, BR-010 e também BR-150, o pólo de soja já ocupa uma área superior a 1.000.000 de ha.

A pecuária é mais presente no sudeste do Estado – mesorregião Sudeste do Pará, que possui um rebanho calculado em mais de 14 milhões de cabeças de bovinos. Um cenário atual preocupante é a expansão da cultura da soja pela falta de áreas livres a se expandir nas regiões sul, sudeste e até mesmo no centro-oeste brasileiras, nas quais a soja se faz mais presente, tornando as mesorregiões Sudeste e Sudoeste do Pará mais atrativas para a criação de uma nova área para essa atividade agrícola (IBGE, 2010).

Atualmente, a indústria florestal é uma das principais atividades econômicas na Amazônia, com o estado do Pará se destacando como o maior produtor de madeira (40% da produção regional). Este tipo de atividade encontra-se concentrada em 33 pólos madeireiros localizados, principalmente, na mesorregião Nordeste Paraense, conforme demonstrado pela Figura 6, abaixo apresentada. Abriga um total de 1.592 empresas, contribuindo com 15 a 20% do Produto Interno Bruto (PIB) do estado do Pará. Entretanto, a maioria da exploração madeireira ocorre de forma não manejada, afetando extensas áreas de floresta em toda a região (VERÍSSIMO et al.; 2000).

Neto et al. (2010) descreve que, de acordo com o IBGE 2010, o Pará é o estado brasileiro que possui a maior produção de madeira em toras, atingindo a produção de 5.763.823 m³ de madeiras. Dados da Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Pará (SEMA/PA, 2010) revelaram que 70,31% de todas as indústrias presentes no Estado são do setor madeireiro, incluindo as carvoarias.

Figura 6– Localização dos pólos madeireiros existentes no estado do Pará.



Fonte: IBGE/Portal de Mapas.

As carvoarias, num total de 90, já ambientalmente licenciadas e palco de constantes fiscalizações e investidas dos órgãos ambientais estaduais e federais, localizam-se, em 22 municípios, a maioria delas inseridas na mesorregião Nordeste (46 carvoarias) seguida da mesorregião Sudeste paraense (41 carvoarias), cuja relação e quantidade, por município, encontram-se detalhadas na Tabela 4.

Tabela 4– Relação das carvoarias licenciadas existentes no estado do Pará

Mesorregião Paraense	Município	Número Carvoarias Licenciadas
Metropolitana de Belém	Ananindeua	01
	Belém	01
Nordeste	Tailândia	21
	Tomé Açu	11
	Moju	09
	Ipixuna do Pará	02
	Novo Repartimento	02
Sudeste	Dom Eliseo	06
	Jacundá	06
	Goianésia do Pará	05
	Paragominas	05
	Rondon do Pará	05
	Breu Branco	04
	Marabá	03
	Ipixuna	02
	Ulianópolis (SE),	02
	São Domingos do Araguaia	01
	Itupiranga	01
Tucuruí	01	
Sudoeste	Anapu	01
	Pacajá	01
Marajó	Portel	01
Baixo Amazonas	Santarém	01

Fonte: SIMLAM – Sistema Integrado de Monitoramento e Licenciamento Ambiental – Módulo Público – www.monitoramento.sema.pa.gov.br/simlam/

A mineração é atividade preponderante na região. As reservas de ferro, de bauxita e de caulim merecem destaques, pois possibilitaram e ainda possibilitam a implantação de grandes projetos mineiros e de indústrias extrativas: a exploração mineral das jazidas de grande porte de bauxita, pela Mineração Rio do Norte (MRN), em Oriximiná, localizado na mesorregião do Baixo Amazonas, noroeste do Pará e pela NORKS HYDRO em Paragominas, mesorregião Sudeste Paraense, deu origem ao Complexo ALBRAS/ALNORTE, implantado para a produção de alumínio primário/alumina, no município de Barcarena, mesorregião Nordeste Paraense; as reservas minerais de caulim da Imerys S/A, no município de Ipixuna do Pará, deram origem a duas Plantas de Beneficiamento, sendo uma localizada no próprio município

de Ipixuna do Pará e a outra, em Barcarena; já as reservas de ferro da Província Mineral de Carajás, em Parauapebas e em Canaã dos Carajás, mesorregião Sudeste do Pará, abastecem empresas siderúrgicas de produção de aço localizadas no município de Marabá, também localizado na mesorregião Sudeste Paraense e no estado do Maranhão.

Merecem destaques também a exploração de cobre e de níquel para a fabricação da liga níquel/ferro (Ourilândia do Norte) ambas, também, na mesorregião Sudeste Paraense e a exploração de bauxita para a produção de alumina, em Juruti, mesorregião do Baixo Amazonas, no noroeste do Estado. Nesse contexto, o estado do Pará surge como importante região por hospedar as maiores minas de bauxita do mundo, respondendo por cerca de 95% do total nacional.

Na região metropolitana de Belém há uma grande concentração de indústrias de transformação, com forte presença do setor de Construção, nos distritos industriais de Icoaraci e Ananindeua (Guia Industrial do Pará, 2013; CPRM, 2013).

2.6.2 Aspectos físicos

Na geografia física do estado do Pará predomina vasto domínio de terrenos de costas modestas, inferiores a 250 m, que, segundo Ab'Saber (1967 e 1969) encontram-se inseridos no Domínio Morfoclimático das Terras Baixas Equatoriais da Amazônia (CPRM, 2013). Porém, ao norte e sul do Estado encontram-se terrenos mais elevados com cotas que atingem 600 a 800 m de altitude e, paralelamente à calha do rio Amazonas, assenta-se a Bacia Sedimentar do Amazonas, em uma direção aproximadamente longitudinal (E-W), com planaltos e baixos platôs, ligeiramente mais elevados do que as superfícies de aplainamento circundantes (CPRM, 2012).

No Estado do Pará destacam-se 18 paisagens geomorfológicas, conforme pode ser visualizado através da Figura 7; porém para efeito deste estudo, destacam-se as unidades formadas por relevo de altitudes mais elevadas, no sentido de se verificar a sua influência no transporte e dispersão dos poluentes atmosféricos em estudo e por possuírem características indutoras do desenvolvimento econômico, que contribuem com a emissão de gases e de material particulado à atmosfera (CPRM, 2013). Importante esclarecer que o número entre parêntesis corresponde à localização, na Figura 7, de cada unidade geomorfológica descrita:

- i. Depressão do Baixo Tocantins-Araguaia, (7), por estar integrada à franja do denominado “Arco do Desflorestamento”, em função do seu condicionamento ao

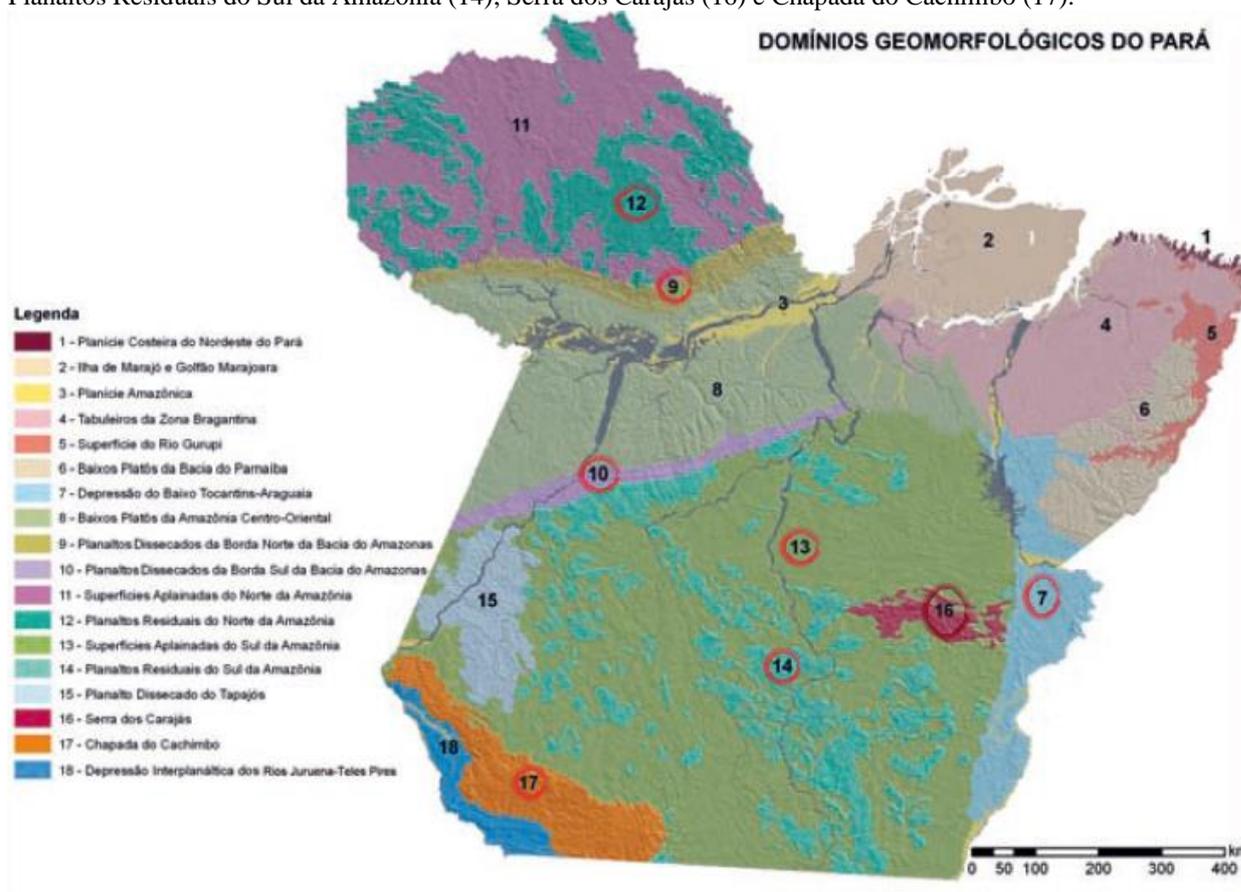
vetor de povoamento recente, representado pelo eixo rodoviário norte-sul, da rodovia BR-158. Este aspecto acarretou o avanço da fronteira agrícola fortemente para esta região do leste-sudeste do Pará.

- ii. Os Baixos Platôs da Amazônia Centro-Oriental (8), por apresentarem, na borda norte da Bacia Sedimentar do Amazonas, uma estrutura dômica, conhecida como Domo de Monte Alegre, que se destaca da topografia regional por alcançar, em certas porções, cotas em torno de 400 m. Além desse aspecto, essa unidade apresenta grande potencial mineral para exploração de bauxita nos perfis lateríticos e as principais cidades que se situam adjacentes a essa unidade são portuárias, representadas pelos portos fluviais do rio Amazonas, rio Xingu e rio Tapajós.
- iii. Os Planaltos Dissecados da Borda Sul da Bacia do Amazonas (10) que se destacam pelo fato de ter sido, e ainda é, palco do avanço da fronteira agrícola desde as primeiras agrovilas implantadas a partir da década de 1970, impulsionadas pelo vetor de penetração representado pela Rodovia BR-230 (Transamazônica), que a atravessa longitudinalmente;
- iv. Os Planaltos Residuais do Norte da Amazônia (12) representam um relevo acidentado, modelado em morros e serras, com presença de formas de relevo colinosas. Ressaltam-se, nesse contexto, vários conjuntos de topografias mais elevadas, em cotas que variam entre 400 e 600 m, com picos que atingem mais de 800 m de altitude.
- v. As Superfícies Aplainadas do Sul da Amazônia (13) por favorecer, o avanço iminente da fronteira agrícola (principalmente no sudeste do estado) e a consolidação de novos vetores de penetração, como as rodovias BR-163 (Cuiabá-Santarém) e PA-279 (Xinguara-São Félix do Xingu). Destacam-se, ainda, os impactos ambientais decorrentes do avanço da fronteira mineral na província aurífera do Tapajós.
- vi. Os Planaltos Residuais do Sul da Amazônia (14) exibem um diversificado conjunto de padrões de relevo, com topografia mais elevada, em cotas que variam entre 350 e 750 m.
- vii. A Serra dos Carajás (16) se notabiliza em função de sua grande extensão, sua natureza geológica e porque consiste em uma das maiores províncias minerais polimetálicas do Planeta, com jazidas de ferro, manganês, cobre e ouro, dentre outros. Caracteriza-se por um relevo movimentado de um conjunto de morros

elevados, por vezes apresentando aspecto montanhoso, com cotas variando de 600 a 750 m. Está submetida a um tríplice impacto econômico: 1. Expansão da fronteira agrícola; 2. Implantação de grande empreendimento de extrativismo mineral (Complexo Grande Carajás) e, 3. Implantação de um conjunto de guseiras ao longo da Estrada de Ferro Carajás.

viii. A Chapada do Cachimbo (17) configura-se como um vasto planalto muito dissecado, cujas altitudes decrescem ligeiramente de norte para sul. Destaca-se, nessa Unidade, uma superfície cimeira não dissecada de topos planos, alçada em cotas entre 500 e 650 m. Logo abaixo da superfície cimeira espraia-se um extenso planalto posicionado em cotas que variam entre 300 e 550 m.

Figura 7- Domínios geomorfológicos do estado do Pará. A indicação em círculos vermelhos das unidades geomorfológicas de interesse deste estudo. Destacam-se as unidades: Baixo Tocantins Araguaia (7); Baixos Platôs da Amazônia Centro-Oriental (8); Planaltos Dissecados da Borda Sul da Bacia Amazônica (10); Planaltos Residuais do Norte da Amazônia (12); Superfícies Aplainadas do Sul da Amazônia (13); Planaltos Residuais do Sul da Amazônia (14); Serra dos Carajás (16) e Chapada do Cachimbo (17).



Fonte: Adaptado de CPRM (2013).

A rede hidrográfica do Pará é formada por mais de 20 mil quilômetros de rios extensos e perenes, como o Amazonas, que corta o Estado no sentido oeste/leste e deságua em um grande delta estuário com inúmeras ilhas, entre elas a de Marajó, ou os rios Tocantins e Guamá, que formam bacias independentes. Esta rede abrange uma área de 1.253.164,5 km², sendo 1.049.903,5 km² pertencentes à Bacia Amazônica e 169.003,5 km² à Bacia do Tocantins. Além de ser o principal rio do Estado, o Amazonas é também a grande via hidroviária regional. Próximo à foz do Amazonas encontra-se o rio Pará e nos limites com o estado do Maranhão destaca-se o rio Gurupi (CPRM, 2013).

2.6.3 Aspectos biológicos

O Pará é amplamente coberto por vegetação arbórea incluindo as florestas ombrófilas abertas (compostas por árvores mais espaçadas e estrato arbustivo pouco denso, além de palmeiras, cipós, bambus e sororocas), florestas ombrófilas densas (compostas por árvores de grande e médio portes, além de lianas e epífitas em abundância), florestas decíduais e semi-decíduais e os ecótonos, destacando-se as florestas de palmeiras e florestas de cipós, concentradas em regiões de transição, entre as áreas florestadas e não florestadas; cerrados e campos naturais ao sul ocupam cerca de 7% do seu território, enquanto as áreas desmatadas somam aproximadamente 14%. A maior parte das áreas desmatadas está concentrada no nordeste, leste e sul do Estado, onde as principais rodovias estão localizadas (IMAZON, 2010). Merece destaque também a presença dos mangues no litoral, e os campos na Ilha do Marajó.

Este Estado possui 56% do seu território ocupado por áreas protegidas como unidades de conservação e terras indígenas, no entanto, a baixa governança desses territórios tem possibilitado que boa parte desta parcela seja incorporada no processo de avanço da fronteira econômica, tornando-a suscetível à conversão para outros usos, acarretando o desmatamento de grandes áreas (INPE/DETER, 2010).

A fauna típica do Pará é muito abundante e também rica e variada, incluindo felinos, roedores, aves, quelônios e primatas. Algumas espécies encontram-se em perigo de extinção e passam a ser protegidas pelos órgãos especializados do Governo, para terem garantida a sua sobrevivência.

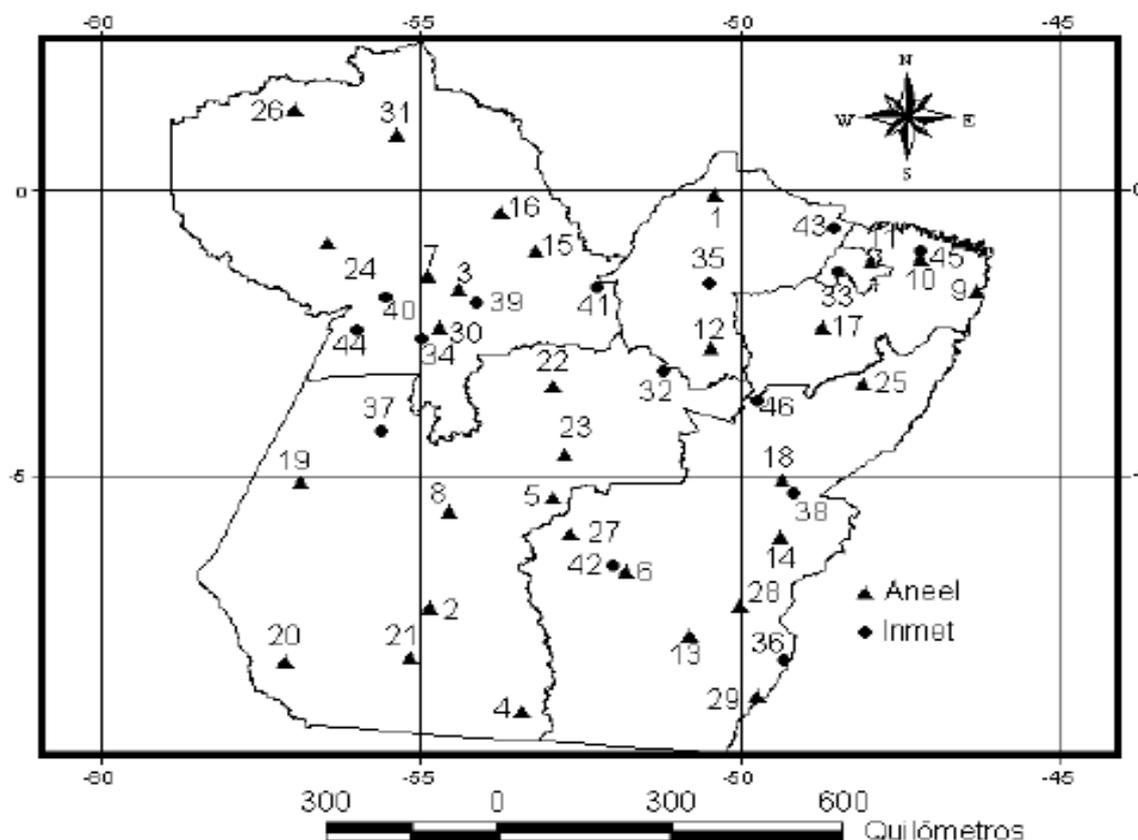
2.6.4 Aspectos climatológicos

O estado do Pará situa-se na região equatorial e possui um clima quente e úmido. Em função da sua dimensão e posição geográfica apresenta características climáticas diversificadas, decorrentes da combinação de vários fatores, destacando-se, dentre eles, a disponibilidade de energia solar, através do balanço de energia.

Segundo Marengo (1992), a precipitação é a variável meteorológica mais estudada na região tropical, pois melhor caracteriza a variabilidade climática nesta região.

Moraes (2002), tendo como base as séries históricas de 23 anos (1976-1998) de dados diários de chuva, em 31 localidades do estado do Pará, fornecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), juntamente com as normais climatológicas publicadas pelo Instituto Nacional de meteorologia (INMET, 1982), referentes a 15 estações climatológicas (Figura 8), analisou a variação das precipitações anual, sazonal e mensal, e representou os resultados em mapas com a utilização de técnicas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

Figura 8– Localização geográfica das estações Climatológicas do INMET e das estações Pluviométricas da ANEEL.

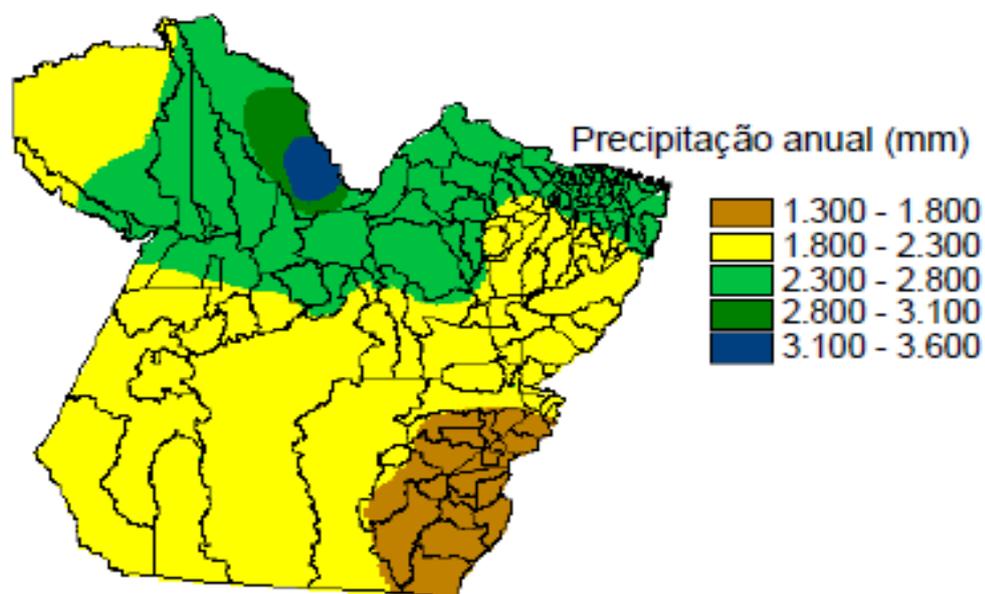


Fonte: Adaptado de Moraes (2002).

De acordo com a análise dos dados, os resultados indicaram que os maiores índices pluviométricos encontram-se concentrados no norte do Estado, nas mesorregiões do Marajó, Metropolitana e Nordeste Paraense, apresentando valores médios anuais que podem atingir níveis superiores a 3.000 mm, em uma área de, aproximadamente 10% do Estado, que corresponde a parte do litoral do Pará. Ainda segundo Moraes (2002), os menores valores do índice anual de precipitação pluviométrica encontram-se nas mesorregiões Sudeste, Baixo Amazonas, Sudoeste Paraense e parte da mesorregião Nordeste, apresentando valores médios que variaram de 1.900 a 2.400 mm anuais (Figura 9), destacando-se, dentre essas regiões, uma parte da mesorregião Sudeste do Pará, cujos totais médios anuais giraram em torno de 1.350 a 1.900 mm.

A variabilidade dos índices médios anuais da precipitação no estado do Pará se deve à influência de sistemas de grande escala como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), forte convecção local, aglomerados de cumulonimbus e pela localização de algumas mesorregiões próximas a áreas litorâneas, que provocam a formação de linhas de instabilidade durante o período da tarde e que são forçadas pela brisa marítima (MARENGO & NOBRE, 2001).

Figura 9– Variação anual da precipitação no estado do Pará.



Fonte: Moraes (2002).

Estudos realizados sobre a climatologia do Pará mostraram também a influência da marcha da ZCIT sobre o ciclo anual da precipitação no Estado, causando os trimestres mais chuvosos de março, abril, maio (MAM) e de dezembro, janeiro

fevereiro (DJF), respectivamente, e os menos chuvosos de setembro, outubro, novembro (SON) e junho, julho, agosto (JJA), respectivamente (BERGSON et al., 2004; ALBUQUERQUE et al., 2010).

Segundo Moraes (2002) e Bergson et al (2004), os elevados valores de energia que incidem na superfície influenciam o comportamento da temperatura do ar no Pará, que apresenta pequena variação sazonal, com temperaturas médias acima de 25°C, em todos os meses do ano. Esses mesmos pesquisadores descreveram que, as menores médias das temperaturas do ar ocorrem em fevereiro, sendo um mês típico da estação chuvosa, com elevada nebulosidade, e os valores mais elevados de temperatura média do ar ocorrem em outubro. A temperatura máxima do ar aumenta continuamente de fevereiro a outubro, decrescendo em novembro devido ao aumento da nebulosidade e início da estação chuvosa, propriamente dita.

Esses pesquisadores concluíram também que a umidade relativa do ar no Estado é elevada, com valores médios acima de 80% em todos os meses do ano, com destaque para o trimestre mais chuvoso cuja umidade relativa atinge valores, aproximadamente, de 89%, em consequência das menores temperaturas no período. E, finalmente, concluíram também que aduração média de hora de brilho solar apresenta uma variação sazonal bem definida, com valores máximos em julho (menor nebulosidade) e valores mínimos em fevereiro (maior nebulosidade).

2.7 PRINCIPAIS ATIVIDADES POLUIDORAS

O estado do Pará abriga inúmeras e diversificadas atividades antropogênicas, cuja natureza, material prima utilizada e produtos resultantes definem o potencial poluidor de cada uma delas.

O desmatamento e a prática das queimadas na região e seus principais indutores, segundo Araújo et al. (1999), Nepstad (1999) e Lemos et al. (2011), preocupa todos os centros de pesquisa da qualidade do ar, como, por exemplo, o Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (o Quarto Relatório de Avaliação - AR4, 2007- que confirma o aquecimento global) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Estas atividades são apontadas como a terceira maior causa de emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, ficando atrás somente da produção de energia e da indústria, e à frente do setor de transportes, e resultam na injeção de grandes volumes de

gases de efeito estufa e aerossóis na atmosfera, podendo exacerbar as mudanças já produzidas pela variação climática natural.

2.7.1 O desmatamento e as queimadas na região de estudo

O estado do Pará é o segundo estado com maior taxa de desmatamento na Amazônia, com 75.099 km² (PRODES, 2000-2014). Apesar da taxa de desmatamento do Estado registrar baixas sucessivas, nos últimos cinco anos, o desmatamento continua em grande escala. As principais situações que colaboram para esse cenário são as questões fundiárias, a pecuária extensiva, a agricultura relacionada principalmente com a cultura da soja, e a produção madeireira. Os dados do PRODES revelam um desmatamento anual médio em torno de 0,82%, até o ano de 2009, no Estado do Pará. Esse resultado indica uma perda média de bioma na Amazônia na faixa de 17,66%, percentual esse considerado bastante alto, visto que ultrapassa a porcentagem relativa de desmatamento do Bioma Amazônia.

De acordo com a sua natureza, são praticadas, na região de estudo, as ‘queimadas para desmatamento’, consideradas intencionais e associadas à derrubada e à queima da floresta; os “incêndios florestais rasteiros” provenientes de queimadas que escapam ao controle e invadem florestas primárias, ou áreas previamente exploradas para madeira, e as “queimadas e os incêndios em áreas já desmatadas” resultantes do fogo intencional ou acidental em pastagens, lavouras e capoeiras (NEPSTAD, 1999).

Merece destaque também nesse contexto a queima normalmente usada como prática comum de manejo entre os agropecuários e os agricultores da região de estudo. Essa prática promove a limpeza do solo antes do plantio da lavoura ou das pastagens e ocorre nos meses de agosto e setembro, isto é na metade do período seco. Outra justificativa se deve à necessidade de permitir que a produtividade agrícola seja duplicada e que duas safras ao ano sejam viáveis (LOMBARDI, 2005).

2.7.2 Descrição das principais atividades poluidoras

2.7.2.1 Agronegócio

As atividades da agropecuária são grandes responsáveis pelo desmatamento e pelas conseqüentes queimadas nas florestas existentes na região. Destacam-se, nessa atividade, a lavoura temporária, composta por arroz, feijão, milho e soja e a lavoura permanente, onde se cultiva, principalmente, banana, coco da Bahia e cacau. A pimenta do reino e a pecuária com rebanho expressivo, calculado em mais de 14 milhões de

cabeças de bovinos, representam posições de destaque no contexto da agricultura do estado do Pará. Atualmente, a área agrícola, com a predominância do cultivo de grãos, principalmente soja, e de pastagens, na região já denominada de “arco do desflorestamento”, encontra-se em crescente expansão, e palco para grandes preocupações, com relação ao seu potencial de causar impactos sobre o meio ambiente e à saúde humana.

Na agropecuária a prática da queima é o sistema de mais baixo custo, utilizado para limpar e preparar o solo para o plantio, controlar as pragas, renovar pastagens e facilitar, posteriormente, a atividade de colheita. Trata-se de uma ferramenta de grande utilização pelos agricultores, principalmente pela agricultura familiar, com grande variabilidade espacial e interanual.

A evolução de uma queimada compõe-se de cinco estágios: ignição, chamas (*flaming*), incandescente (*glowing*), brasas (*smoldering*), e extinção. A “ignição” depende do tipo e da umidade da biomassa, e de fatores ambientais, como temperatura, umidade relativa e vento. O estágio “chamas”, mais quente que o anterior, produz o carvão e libera o vapor d’água, monóxido (CO) e dióxido de carbono (CO₂). O estágio mais frio é denominado “brasas”, no qual a produção de CO₂ é reduzida, drasticamente, juntamente com um acréscimo significativo na liberação de compostos incompletamente oxidados, como o CO, além de uma rápida formação de partículas e acreção de partículas orgânicas de carbono. Esse estágio é o responsável pela emissão da maior parte do material particulado. A “extinção” pode ser alcançada, devido, por exemplo, ao resfriamento convectivo em função do entranhamento de ar mais frio, ao resfriamento radiativo e ao baixo suprimento de oxigênio em relação à densidade e tamanho da biomassa, além da diminuição da quantidade de biomassa disponível (FREITAS, 1999, apud WARD et al., 1992).

A quantidade de água pode determinar qual fase de chamas ou brasas, será mais significativa, definindo, por exemplo, às proporções de CO e CO₂ emitidas. A quantidade de biomassa disponível para a queima é determinada pelo clima local e o tempo local, através da temperatura, precipitação, umidade e o vento, que determinam as condições necessárias para a ocorrência do fogo e seu comportamento, no que se refere à razão entre a combustão da fase de chamas para a fase de brasas (FREITAS, 1999). Pela Tabela 5 observa-se que o estágio *flaming* apresenta maiores quantidades de material emitido, enquanto o *smoldering*, maiores números de diferentes compostos emitidos (FREITAS, 1999).

Tabela 5– Principais compostos emitidos no processo de queimada da biomassa vegetal nos estágios flaming e smoldering.

Estágio 'flaming'	Ambas os Estágios	Estágio 'smoldering'
-----	C ₂ H ₂ , NCCN	CO
-----		CH ₄ – Metano
CO ₂		Hidrocarbonetos não Metanos (NMHC ³ , PAH) ⁴
NO, N ₂ O, N ₂		NH ₃ (Amônia)
SO ₂		HCN Ácido Cianídrico ou Cianeto de Hidrogênio
Material Particulado (elevada concentração de carbono elementar – 'black carbon' ⁵)		CH ₃ Cl (Cloro de Metila), H ₂ S (Ácido Sulfúrico), COS ⁶ e DMS

Fonte: Freitas (1999); Warnatz (1993).

A queima de biomassa emite uma mistura complexa de gases e particulados na atmosfera. Pauliquevis et al.(2008) descreveram que as queimadas são responsáveis por 75% das emissões brasileiras de carbono e de aerossóis na atmosfera. Seus estudos indicaram que as concentrações de material particulado encontradas nas regiões do “arco do desflorestamento” chegam a atingir valores da ordem de 400 a 600 µgm⁻³. São também fontes significativas de gases de efeito estufa, como o CO₂ e CH₄ e dos gases precursores do ozônio, como o CO. Esses mesmos pesquisadores estudaram a abrangência da pluma dos gases e das partículas de aerossóis emitidas pelas queimadas antropogênicas da biomassa vegetal, e concluíram que a pluma chega a atingir amplas áreas do continente sul-americano, podendo ser transportada, em larga escala, por milhares de quilômetros devido à elevada predominância de partículas finas em sua composição granulométrica. Em suas pesquisas, Andreae (1991), Artaxo et al. (2002) e Andreae et al. (2004); também descreveram que as queimadas antropogênicas que ocorrem, majoritariamente, em áreas tropicais do Planeta, são fontes importantes de gases de efeito estufa, diversos tipos de aerossóis, gases primários tóxicos e/ou precursores de gases secundários nocivos à saúde.

Em 2006, através do componente de química atmosférica do projeto LBA (sigla em inglês para Experimento de Grande Escala da Biosfera e Atmosfera da Amazônia)

³ Hidrocarbonetos não metano, compreendem os HC totais (THC) menos a parcela de metano (CH₄).

⁴ Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (HAPs) - constituem uma família de compostos caracterizada por possuírem 2 ou mais anéis aromáticos condensados

⁵ O carbono elementar ou *black carbon* é um aerossol proveniente da queima incompleta de combustíveis fósseis e de biomassa. A determinação de sua concentração pode ser utilizada como traçador de fontes poluidoras.

⁶ COS - Sulfeto de Carbonila. DMS - Dimetilsulfeto (CH₃SCH₃ ou DMS). São compostos reduzidos de Enxofre.Fonte: Atmospheric Chemistry and Global Change – G.P. Brasseur, J.J. Orlando, G.S., Tyndall, Oxford University Press, 1999)

observou-se que o intenso processo de alteração no padrão de uso e ocupação do solo, através do elevado e acelerado processo de ocupação humana da região amazônica (NOBRE et al., 1991), tem provocado significativas emissões de gases traço e de partículas de aerossóis para a atmosfera, decorrentes das queimadas, tanto das áreas de pastagens, quanto de florestas primárias (ARTAXO et al., 2006).

Mais especificamente, Freitas et al. (2009) descreveram que na América do Sul, durante os meses de inverno, ocorreram centenas e milhares de focos de incêndio, principalmente em ecossistemas de cerrado e de florestas, estando em sua grande maioria associados a práticas agrícolas. Essas queimadas, segundo eles, ocorrem primariamente nas regiões amazônica e do Brasil Central, porém através do transporte atmosférico de suas emissões, produzem uma distribuição espacial de fumaça sobre uma extensa área, aproximadamente, ao redor de 4-5 milhões de Km², em muito superior às áreas onde estão concentradas. Continuando, esses mesmos pesquisadores descrevem que durante a combustão de biomassa são emitidos, para a atmosfera, gases, incluindo alguns de efeito estufa e precursores do ozônio troposférico, e cerca de 3.940 Tg.ano⁻¹ (ANDREAE, 1991) de partículas de aerossóis, com elevado potencial de interação com a radiação solar. Adicionalmente, às partículas de aerossóis, as queimadas produzem vapor d'água e CO₂, sendo a maior fonte de outros componentes, tais como CO, compostos orgânicos voláteis, óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos halogenados (ANDREAE e MERLET, 2001).

Com relação à substituição de áreas florestadas, com sistema radicular profundo por pastagens, Freitas et al. (2009) descreveram que com solos mais expostos e ventos mais intensos (o que se espera com a diminuição da rugosidade do terreno, ao trocar florestas por pastagens) ocorre um aumento significativo na produção e levantamento de poeira de solo, também com potencial de impactos significativos.

2.7.2.2 Indústria florestal – madeireiras

O setor madeireiro é uma das principais atividades de uso da terra na região de estudo, o que confere a este Estado o título de maior produtor de madeira da Amazônia (40% da produção regional). Porém, com uma exploração realizada de forma predatória, causando impactos severos ao ecossistema florestal (VERÍSSIMO, 2002). Segundo esse pesquisador, o processo começa quando os madeireiros penetram na floresta para remover apenas as espécies de alto valor, removendo apenas uma ou duas árvores por hectare. Se fossem deixadas em “repouso”, essas florestas exploradas poderiam

recuperar a cobertura do dossel e o estoque de madeira, entretanto, os madeireiros entram seguidamente nas mesmas áreas, em intervalos curtos de tempo, para remover espécies de menor valor econômico, ou para retirar indivíduos ainda jovens das espécies mais valiosas. O resultado disso é uma floresta com grandes clareiras, repleta de resíduos e com grande parte das árvores remanescentes danificadas. Essas condições facilitam a entrada e a propagação do fogo e impedem que as áreas exploradas retornem ao estágio de floresta original – produtora de madeira. Dessa forma, as florestas exploradas acabam sendo derrubadas e/ou queimadas, ou são vendidas para produção de carvão vegetal.

Levantamento realizado em 2009 pelo Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (IMAZON), indicou que dos 14,2 milhões de m³ de madeira em tora nativa extraídas na Amazônia Legal (o equivalente a 3,5 milhões de árvores), das quais 47% no estado do Pará, 8,3 milhões foram categorizados como resíduos do processamento e destinados à:

- Produção de carvão (1,6 milhão de metros cúbicos),
- Geração de energia (2,7 milhões de m³),
- Utilização diversa (2 milhões de m³)
- E o restante (2,1 milhões de m³) foram considerados resíduos sem nenhum aproveitamento, os quais foram queimados ou abandonados como entulho.

Portanto, a utilização ou abandono como entulhos, dos resíduos provenientes do processo de madeira constituem-se de fontes potenciais de emissão de MP_(2,5) e de CO para a atmosfera (IMAZON, 2010).

2.7.2.3 Carvoarias

O uso energético da biomassa vem sendo valorizado como forma alternativa ao uso de combustíveis fósseis, principalmente por ser uma fonte renovável. A madeira é composta basicamente de carbono, oxigênio, água, hidrogênio, nitrogênio e sais minerais (OLIVEIRA et al., 1980), constituindo-se num dos componentes da biomassa de maior uso energético, por possuir características atraentes, tais como produtividade, qualidade e massa específica adequada, além do seu baixo custo (PINHEIRO et al., 2006). Segundo Pinheiro et al. (2006), a carbonização é um processo em que a madeira é submetida a aquecimento entre 450 °C e 550 °C em ambiente fechado, com pequena quantidade ou exclusão total de ar e durante o qual são libertados gases, vapores de água

e líquidos orgânicos, permanecendo como resíduos, principalmente, o alcatrão e as cinzas e como produto, o carvão vegetal.

Todos os processos práticos de produção de carvão vegetal estão baseados nesse princípio e as variações que porventura possam existir ficam por conta dos aspectos técnicos do processo, tais como tamanho e capacidade dos equipamentos e instalações, dos níveis de controle do processo e origem do calor (BRITO, 1990). Segundo Pimenta (2007), na prática, independentemente dos equipamentos utilizados para a obtenção do carvão vegetal, faz-se necessário o controle dos parâmetros da carbonização, tais como o tempo, a temperatura final de carbonização e a taxa de aquecimento. Estes fatores atuam sobre o rendimento do processo de carbonização podendo influenciar, de forma significativa, na produtividade, nas características físicas e químicas do carvão obtido e na geração dos resíduos sólidos, líquidos e atmosféricos do processo.

A produção do carvão vegetal no cenário amazônico é utilizada, principalmente, para atender a indústria siderúrgica localizada no Projeto Grande Carajás, que consiste em várias siderúrgicas localizadas nos estados do Pará e Maranhão, utilizando o carvão para produção de ferro gusa e outros recursos naturais, por exemplo, minérios, que são abundantes na região (MONTEIRO, 1998).

Em sua quase totalidade, a carbonização parcial da madeira para a produção do carvão vegetal, desenvolvida na região, é realizada em fornos rudimentares de alvenaria, tipo “rabo quente”, que não recuperam os gases voláteis produzidos. A utilização desses sistemas convencionais de carbonização resulta na baixa conversão em rendimento energético e gravimétrico, normalmente por volta de 50 a 30%, respectivamente, em função das perdas para o meio ambiente, sob a forma de gases e de material particulado, causando diversos impactos sobre o meio ambiente. As emissões atmosféricas geradas pelo processo da carbonização da madeira são formadas por compostos orgânicos condensáveis e não condensáveis e material particulado. Estes últimos contêm, principalmente, as substâncias: CO, CO₂, H₂ e CH₄, que são emitidos diretamente para a atmosfera, sem quaisquer tipos de controle ou reaproveitamentos.

2.7.2.4 Indústrias

A) Indústrias Siderúrgicas

A metalurgia do ferro ou indústria siderúrgica foi e continua sendo uma indústria essencial no contexto da economia brasileira, na medida em que é o alicerce de várias cadeias produtivas, tais como a automotiva, a da construção civil,

a de bens de capital, dentre outras. A sua modalidade de produção, utilizando carvão vegetal, denominada de siderurgia independente, como combustível sólido, é uma peculiaridade da indústria siderúrgica brasileira. Os altos-fornos a carvão vegetal representam apenas 1% da produção mundial de ferro-gusa e 25% a 30% da produção brasileira (IBS, 2008). A situação das guseiras no norte do Brasil é representada, principalmente, pelo Polo de Carajás, que compreende o município de Marabá, no Pará (região nordeste do Estado), e Açailândia, no Maranhão, que possuíam, no período estudado por esta dissertação, aproximadamente, 26 altos-fornos, produzindo, em média, 10 mil toneladas de gusa/mês, perfazendo 260 mil toneladas. Tais números não consideraram a grande parcela de guseiros que produzem em pequena escala, sendo, por isso, de difícil mapeamento (MELLO et al., 2007).

Importante definir que o ferro gusa é uma liga ferro-carbono, produzida a partir de uma fonte de combustível baseado no carvão vegetal ou mineral, que fornece o calor necessário para a fusão do minério de ferro, que ocorre na etapa da redução no interior do alto forno. Durante esta etapa, o oxigênio do minério de ferro se desprende na alta temperatura, deixando livre o ferro, que se liquefaz e passa a ser denominado de ferro gusa ou ferro de primeira fusão. Esse produto é encaminhado para a etapa de refino e produção do aço em aciarias. (FUGIHARA, 2008; IBS, 2008).

A indústria siderúrgica é conhecida por ser uma das mais energo-intensivas e também poluentes, principalmente no que se refere à poluição atmosférica. (MILLER JR, 2007). No refino do minério de ferro, o uso do carvão vegetal, como combustível, há emissões processuais de gases de combustão, compostos, dentre outros, principalmente por CO₂, CO, CH₄ e SO_x. Além disso, as etapas de preparação, manuseio e transporte das matérias primas, dos insumos e aditivos de processo emite, para a atmosfera, quantidades significativas de material particulado, de granulometria e composição química, variadas. Estudos realizados em siderúrgicas em processo de licenciamento, demonstraram a presença dos elementos Ca, Mg, Mo, Fe, Zn, Cu, Cr, Al, Cd e Pb nas emissões de material particulado destas atividades (SOUZA, 2013).

B) Metalurgia do Alumínio⁷

A obtenção do alumínio primário é feita a partir da bauxita, cujo processo divide-se em três etapas: mineração, refinaria e redução.

Na redução, procede-se à transformação da alumina em alumínio metálico, em cubas eletrolíticas, que possuem aquecedores que elevam a temperatura da alumina até o ponto de fusão, pelo processo de refinamento da alumina denominado de “eletrólise em banho de sais fundidos”, “eletrólise ígnea” ou “processo Hall-Héroult”. Para isso, são necessárias, principalmente, três matérias-primas básicas: óxido de alumínio (alumina), eletricidade e carbono. No interior da cuba há os anodos (polo positivo) e os catodos (polo negativo) de carbono, que são estruturas por onde passa o circuito elétrico. O anodo reage com o oxigênio da alumina e forma gás carbônico (CO₂), liberando o alumínio líquido que se deposita no fundo da cuba eletrolítica; no catodo. O metal líquido (já alumínio primário) é transferido para a refusão, através de cadinhos; São produzidos os lingotes, as placas e os tarugos (alumínio primário).

O processamento do alumínio primário é a fase mais poluente da cadeia de produção do alumínio, resultando em emissões atmosféricas, resíduos do processo, e outros resíduos da fase sólida. As emissões dos processos de redução do alumínio incluem o fluoreto de hidrogênio gasoso e fluoretos particulados, alumina, monóxido de carbono, elementos orgânicos voláteis, e dióxido de enxofre das células de redução; e fluoretos, elementos orgânicos vaporizados e dióxido de enxofre dos fornos de cozimento de ânodo. A queima de combustíveis fósseis nas caldeiras de produção de vapor d'água liberam gases de combustão CO, CO₂, CH₄ e outros, bem como gases com elevado teor de enxofre.

C) Cimenteiras

A indústria do cimento tem elevado potencial poluidor. Encontram-se entre as maiores fontes de emissão de poluentes atmosféricos perigosos e não inertes à atmosfera. Há fontes de poluição em todas as etapas do processo: moagem e homogeneização das matérias-primas; clínquerização, no forno rotativo; resfriamento e moagem do clínquer; adições e mistura para a produção do cimento propriamente dita; ensacamento e, finalmente a expedição final. Os pontos de transferência de matérias primas também merecem destaque.

⁷ As informações constantes desta descrição foram disponibilizadas em agosto de 2014 pelo setor de comunicação da empresa Norsk Hydros, cuja unidade industrial de fabricação de alumina e alumínio primário localiza-se no município de Barcarena, na mesorregião Metropolitana de Belém.

Dentre os poluentes atmosféricos emitidos se destacam as dioxinas, metais tóxicos, como mercúrio, chumbo, cádmio, arsênio, antimônio e cromo; produtos de combustão incompleta, como o monóxido e o dióxido de carbono, e os ácidos halogenados.

Os metais pesados contidos nas matérias-primas e combustíveis, mesmo em concentrações muito pequenas, devido à sua volatilidade e ao comportamento físico-químico de seus compostos, podem ser emitidos na forma de particulado ou de vapor, pelas chaminés das fábricas (PERRY e SLATER, 1981).

2.8 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA, MEIO AMBIENTE E SAÚDE HUMANA

Os efeitos da poluição do ar se caracterizam tanto pela alteração de condições consideradas normais como pelo aumento de problemas já existentes. Podem ocorrer em nível local, regional e global, pois de uma forma geral, origina desequilíbrios em todos os ecossistemas e, conseqüentemente à saúde humana. Para melhor compreensão, os principais efeitos à saúde humana e ao meio ambiente, foram descritos para cada um dos poluentes estudados.

2.8.1 Principais efeitos do material particulado (MP)

Dentre os inúmeros poluentes encontrados na atmosfera, os aerossóis, ou material particulado fino em suspensão no ar atmosférico, possuem a forma mais visível de emissões que provocam a poluição do ar. As emissões se associam às já existentes na atmosfera por processos naturais e, além de alterarem a composição química da atmosfera, são transportadas a elevadas altitudes e a longas distâncias, pela ação das correntes atmosféricas de uma determinada região (ANDREAE et al., 2001), fazendo com que saiam do continente sul-americano por duas vias principais: o Oceano Pacífico Tropical e o Oceano Atlântico Sul (FREITAS et al., 1997).

Especificamente, os aerossóis troposféricos, quando provenientes da queima da biomassa vegetal, modificam as características da superfície terrestre e afetam o clima (MORAES et al., 2004), pela alteração do albedo da superfície (ICHOKU e KAUFMAN, 2005), modificação do balanço radioativo da atmosfera e dos ciclos hidrológicos (ANDREAE et al., 2004), além de provocar graves problemas na saúde das populações próximas às áreas onde há a queima da biomassa vegetal. Yamasoe et al. (2000) descreveram este fenômeno explicando que, a alteração dos mecanismos de

formação de nuvens e do albedo é devido à interferência significativa dos aerossóis sobre o processo de formação de núcleos de condensação de nuvens (NCN's).

Segundo Pauliquevis et al. (2008), os aerossóis de queimadas interagem diretamente com a radiação solar e, sendo assim, as queimadas alteram severamente a quantidade de radiação solar que chega à superfície. Citaram, em suas pesquisas, Procópio et al., 2004, que demonstraram que sob certas circunstâncias, os aerossóis originados da queima da biomassa vegetal chegam a reduzir em 50% a radiação fotossinteticamente ativa, isto é, a parcela da radiação mais adequada para as plantas realizarem a fotossíntese.

Freitas et al. 2009, em seus estudos, comprovaram que os aerossóis provenientes de queimadas interagem eficientemente com a radiação solar, e afetam a qualidade do ar e os processos de microfísica e dinâmica de formação de nuvens. Impactam regionalmente a composição e propriedades físicas e químicas da atmosfera na América do Sul e áreas oceânicas vizinhas, podendo atingir escala global. As emissões de gases traço e partículas de aerossóis provenientes das queimadas ocorrem de forma significativa e podem afetar o inventário das emissões globais (GUENTHER et al., 1995; ANDREAE e CRUTZEN, 1997; KAUFMAN et al., 1998; ANDREAE et al., 2002).

Em termos gerais, além destes efeitos, os aerossóis na atmosfera desencadeiam a drástica redução da visibilidade, fechamento de aeroportos e escolas, aumento de acidentes de tráfego, destruição da diversidade vegetal pela atuação nos poros dos tecidos vegetais, restrição das atividades de lazer e de trabalho e custos econômicos (RIBEIRO et al., 2002). Em relação à saúde, os efeitos vão desde o desconforto, intoxicação, doenças respiratórias, efeitos psicológicos até a morte, passando pelo aumento da procura pelo sistema de saúde (centros de saúde, hospitais, pronto socorro), aumento da taxa de morbidade (doenças), e mortalidade associada ao agravamento das doenças. O efeito agudo à saúde da população em geral, fica restrito àquelas pessoas mais próximas às áreas industriais e às áreas em processo de queima (ASSUNÇÃO et al., 2002).

O sistema respiratório humano, principalmente, crianças e idosos, é um dos mais afetados em situações de poluição atmosférica por aerossóis. Segundo Radojevic (1998) Francisco et al.(2004), e Damilano (2006), a poluição atmosférica afeta o sistema respiratório podendo agravar ou mesmo provocar diversas doenças crônicas; danos ao sistema nervoso central; alterações genéticas e câncer. Podem provocar, também,

problemas oftálmicos, doenças dermatológicas, gastrointestinais, conjuntivite, irritação dos olhos e garganta, tosse, falta de ar, nariz entupido, vermelhidão, alergia na pele e distúrbios cardiovasculares (ASSUNÇÃO et al., 2002).

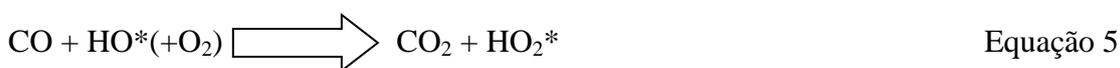
Harrison e Yin (2000) e Xiu (2004) descreveram que os efeitos na saúde devido à inalação de aerossóis dependem, não somente da sua concentração total no meio ambiente, mas também da sua distribuição, tamanho e composição. Exposições a elevados níveis de $PM_{(10)}/PM_{(2,5)}$, podem ocasionar o desenvolvimento de vários tipos de doenças respiratórias incluindo asma, bronquite, pneumonia e enfisema. A Organização Mundial da Saúde (OMS) confirmou que $PM_{(10)}/PM_{(2,5)}$ pode agravar sintomas de asmáticos, aumentar admissões hospitalares por problemas respiratórios e aumentar as taxas de mortalidade.

Delafino (2005) e Harrison et al. (2008) desenvolveram estudos relacionados aos efeitos à saúde humana provocados pela poluição proveniente das queimadas antropogênicas na região Amazônica e evidenciaram correlações entre a exposição ao material particulado fino com mortes prematuras, doenças mutagênicas e problemas respiratórios, pois é esta a fração que penetra mais facilmente no trato respiratório humano (nível alveolar), onde os mecanismos de expulsão destes poluentes não são eficientes. Esses mesmos pesquisadores evidenciaram, que o material particulado grosso pode acumular-se, principalmente, nas vias respiratórias superiores, agravando problemas respiratórios como o da asma, e concluíram que o perigo causado pela inalação de partículas depende, não só da forma e tamanho das mesmas, como também da composição química e do lugar no qual elas foram depositadas no sistema respiratório.

Eignotti et al. (2009) analisou o impacto sobre a saúde humana das partículas emitidas por queimadas na Amazônia brasileira. Desenvolveram um estudo ecológico utilizando um indicador de exposição ambiental, como percentagem anual de horas ($\Delta H\%$) de $MP_{(2,5)}$, acima de $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, que provoca taxas de hospitalizações por doenças respiratórias em crianças, idosos e grupos etários intermediários tendo, como base, dados disponibilizados pelas principais agências de saúde governamentais. Os estudos demonstraram que há uma associação entre o indicador de poluição atmosférica com a ocorrência de doenças respiratórias, em especial nos grupos etários mais vulneráveis da Amazônia brasileira.

2.8.2 Principais efeitos do monóxido de carbono (CO)

Um aspecto muito importante deste composto, unânime entre os pesquisadores estudados, é o fato ter um papel importante na capacidade oxidante da atmosfera, em virtude da sua reação com o radical HO*, através da equação 5:



É precursor na formação do ozônio troposférico, uma vez que a principal fonte de O₃ na troposfera é a interação entre seus gases precursores NO_x, COVs e CO, em presença de radiação ultravioleta (X < 335nm) (SEINFELD e PANDIS, 1998; JACOB, 2000). Assim, por ser um precursor da poluição secundária, o CO está relacionado com a produção e a destruição do O₃ na troposfera, o que depende das concentrações de NO_x.

Numerosos esforços têm sido feitos para reduzir as emissões antrópicas de CO. Os resultados desta diminuição poderão provocar um aumento do radical HO* e assim aumentar a taxa de remoção de CH₄, alterando a capacidade oxidante da atmosfera (BRASSEUR et al., 1999, apud ASSUNÇÃO, 2002). É estimado que uma redução das emissões de CO de 500 a 250 Tg CO.ano⁻¹ causaria um aumento de 3,5% na concentração de radical HO* na troposfera com uma diminuição na concentração de CH₄ (KANAKIDOU e CRUTZEN, 1999).

Para a saúde humana o CO é perigoso e tóxico respiratório, sendo um dos poluentes gasosos mais comumente encontrados nas grandes cidades, em áreas industrializadas e em processos de queima de biomassa vegetal (GIODA, 2006). Segundo Artaxo (1991) o monóxido de carbono (CO) combina-se facilmente com a hemoglobina, favorecendo a formação do complexo CO/hemoglobina e interferindo na capacidade do sangue de oxigenar os tecidos. Por esta razão, é classificado como um asfixiante sistêmico, prejudicando a acuidade visual, a atividade mental e retarda os reflexos, podendo causar a morte quando em exposição prolongada, mesmo em baixas concentrações.

Quanto maior a concentração de CO no ar inspirado, maior a quantidade de hemoglobina desativada e mais graves os danos causados à saúde. A periculosidade do CO resulta da estabilidade do complexo CO + hemoglobina (carboxihemoglobina), de modo que o mecanismo de troca fica prejudicado: a hemoglobina não se consegue livrar do CO, não pode trocá-lo por O₂ e, conseqüentemente, oxigenar o organismo. É por isso que o CO é um asfixiante sistêmico (SOUZA, 2006; SOUZA, 2010; TADANO, 2012).

Estudos indicaram que uma concentração de 50 ppm de CO desativa 7% de hemoglobina e ocasiona problemas visuais. No entanto, as tabelas não permitem saber quanto de hemoglobina é desativada quando há no ar, por exemplo, 70 ppm de CO. Sabe-se que se 20% a 30% da hemoglobina ficarem saturados com CO, aparecem os sintomas e sinais de hipóxia (falta de oxigenação do organismo), sendo que acima de 60% de saturação ocorre perda da consciência e morte.

2.9 MODELOS NUMÉRICOS DE TRANSPORTE E DISPERSÃO DE POLUENTES NA ATMOSFERA

De uma maneira geral o controle da poluição atmosférica local, e até mesmo regional, é realizado através de redes de monitoramento da qualidade do ar, cuja distribuição espacial é determinada através de estudos criteriosos que consideram os dados das fontes de emissão de poluentes e as condições atmosféricas locais. Porém, em função de aspectos como: i) econômicos, relacionados com o elevado custo de manutenção das redes implantadas; ii) administrativos, devido à incipiente infraestrutura física das áreas a serem monitoradas; iii) técnicos, pela falta de profissional treinado para a operação dos equipamentos instalados; iv) complexidade de algumas regiões e, finalmente v) as fortes interações entre os fenômenos de transporte e dispersão de poluentes com as condições meteorológicas e topográficas regionais, as redes de monitoramento da qualidade do ar, ou deixam de ser instaladas, ou não se tornam representativas, devido também ao limitado número de pontos de medida, à falta de manutenção e a erros em seu posicionamento e amostragens.

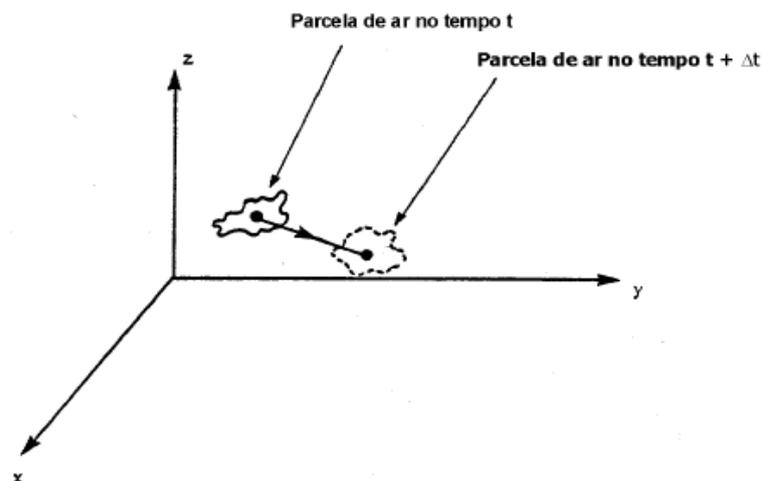
Por esses motivos, os modelos numéricos que simulam a concentração, transporte e difusão dos poluentes na atmosfera constituem ferramentas importantes para auxiliar na análise do comportamento das emissões atmosféricas e endereçar ações de controle e de mitigação das concentrações emitidas (TIRABASSI, 2004). Sendo assim, cientistas brasileiros integrantes do Grupo de Modelagem Atmosfera e Interface (GMAI), do Instituto de Pesquisas Espaciais e do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), realizam estudos e geram produtos relacionados com a atmosfera e sua interação com os demais componentes do sistema terrestre.

Em 2003, esses cientistas desenvolveram modelos numéricos avançados para estudos relacionados à previsão numérica de tempo e clima, de qualidade do ar e composição química da atmosfera e armazenamento de água no solo. Em especial, o GMAI liderou o desenvolvimento do sistema numérico *Coupled Chemistry Aerosol and*

Tracer Transport model to the Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System (CATT-BRAMS), com novas funcionalidades e parametrizações especializadas para trópicos e sub-trópicos, considerando as especificidades de cada região brasileira, acoplado ao Modelo de Circulação Regional (MCR's) BRAMS (*Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System*). É um modelo de transporte *on line*, em 3D, euleriano, que contempla nova rotina para assimilação de dados de queimadas, e onde a atmosfera é dividida em camadas verticais, enquanto que a superfície é dividida em malha horizontal, ou grade, com diversos nós, nos quais as equações são calculadas formando, dessa forma, uma malha tridimensional (LONGO et al., 2007).

A abordagem euleriana (Figura 10) empregada para a descrição do transporte de uma propriedade escalar no modelo CATT-BRAMS é baseada no balanço de conservação da propriedade, no caso a massa de dispersão de uma espécie química, sobre um volume infinitesimal fixo no espaço. Apresenta dificuldades matemáticas que não permitem uma solução exata para a concentração média (de material particulado ou gases) no escoamento turbulento (SEINFELD, 1986).

Figura 10– Sistema de coordenadas Euleriana



Fonte: Adaptado de Moraes (2001).

Atualmente esse modelo é bastante utilizado pelos meteorologistas, gestores ambientais e pesquisadores em estudos e em operações meteorológicas diárias, em vários centros operacionais brasileiros, conforme pode ser confirmado através dos exemplos abaixo apresentados.

Dr. Saulo Freitas, principal autor desta nova parametrização e também um dos responsáveis pelo CATT-BRAMS de previsão da poluição atmosférica⁸, afirmou que a metodologia oferece maior precisão sobre o deslocamento da nuvem de fumaça de queimadas na atmosfera, tanto no transporte horizontal de seus componentes (gases e partículas de aerossóis), quanto na sua distribuição vertical. Esse mesmo pesquisador, juntamente com a pesquisadora Dra. Karla Longo, validaram o CATT-BRAMS através da comparação dos seus resultados com produtos de sensoriamento remoto de aerossol e gases traços, resultando em evidências que demonstraram as boas habilidades de previsão deste modelo.

Gevaerd et al. (2006) analisaram o transporte atmosférico de CO liberado pela queima de biomassa em Roraima, durante os três primeiros meses de 1998, enfatizando o papel dos sistemas convectivos profundos na redistribuição tridimensional da pluma de gás, utilizando o modelo CATT-BRAMS para as simulações numéricas. Os pesquisadores concluíram que o modelo numérico foi capaz de prognosticar a concentração de poluentes na área de estudo com razoável acurácia, em comparação com os resultados obtidos durante a campanha *Large Scale Biosphere-Atmosphere/Cooperative LBA Airborne Regional Experiment – 1998* (LBA-CLAIRE-98).

Freitas et al. (2006) utilizaram o CATT-BRAMS para simular a estação seca de 2002, ocorrida na América do Sul, durante as campanhas de campo do *Smoke, Aerosols, Clouds, Rainfall* (SMOCC) e *Climate and Radiation, Cloud, and Climate Interactions in the Amazonia* (RaCCI), projetos do LBA realizados na fase de transição da estação seca para a chuvosa. Concluíram sobre a utilidade desse modelo na compreensão e previsão dos controles típicos de sistemas sinóticos sobre o transporte e dispersão dos poluentes provenientes da queima da biomassa, bem como demonstraram a grande capacidade deste modelo em reproduzir, de forma realista, a distribuição horizontal de traçadores passivos e de partículas de aerossóis em escala regional e uma acurada habilidade na previsão da distribuição vertical dos gases.

Através do modelo CATT-BRAMS, Ramos et al. (2009), diagnosticaram os campos de concentração e o transporte dos poluentes provenientes do incêndio florestal na região amazônica, ocorrido nas áreas do avanço da fronteira agrícola e em terreno de topografia variável. Os resultados desse estudo permitiram caracterizar o ambiente

⁸(http://www.cptec.inpe.br/meio_ambiente)

atmosférico da região estudada, durante o período analisado. O CATT-BRAMS foi utilizado para a análise do transporte atmosférico e da evolução do monóxido de carbono (CO) e do material particulado ($PM_{(2,5)}$) emitido pelos incêndios que ocorreram durante a onda de calor que afetou Portugal Continental, em agosto de 2003, incluindo aí estudos dos padrões sinóticos associados ao início e ao desenvolvimento das queimadas. Nesse estudo, uma das conclusões obtidas foi a abrangência da pluma das emissões atmosféricas estudadas, que, além de ter atingido regiões distintas dos locais de ocorrência dos incêndios, adicionou-se à poluição antropogênica associada à ocupação urbana e atividades industriais. Mantovani et al. (2014) em seus estudos sobre o modelo CATT-BRAMS, como auxílio às pesquisas de dados de poluentes ambientais, comprovou a adequabilidade das simulações do modelo para o desenvolvimento de pesquisas em locais em que não haja possibilidade técnica e de infraestrutura para a instalação de rede de monitoramento da qualidade ambiental e de variáveis.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A região selecionada para a realização desta dissertação foi o estado do Pará, segundo maior estado do Brasil, que se localiza na região Norte brasileira. O Estado foi dividido, em 06 mesorregiões e, a formação dessas mesorregiões leva em conta, principalmente, as semelhanças econômicas, sociais e políticas.

Para efeito desta dissertação as referências feitas ao Estado terão como base esta macrodivisão geográfica, isto é as mesorregiões Sudeste, Sudoeste, Nordeste, Baixo Amazonas, Marajó e Metropolitana de Belém.

3.2 DESCRIÇÃO DO MODELO CATT-BRAMS

Para visualizar o campo de concentração, o transporte atmosférico e a evolução (abrangência) da pluma de emissões de monóxido de carbono (CO) e material particulado, com diâmetro das partículas abaixo de 2,5 micrômetros (PM_(2,5)), provenientes da queima da biomassa vegetal e das atividades industriais no estado do Pará, utilizou-se o modelo numérico CATT-BRAMS (*Coupled Aerosol and Tracers Transport Model to the Brazilian Regional Atmospheric Modelling System*) (FREITAS et al., 2007).

O CATT-BRAMS é um modelo de transporte *on line*, em 3D, estabilizado e acoplado ao modelo de transporte atmosférico BRAMS, que prognostica a concentração de contaminantes atmosféricos de forma simultânea e completamente consistente com a dinâmica atmosférica simulada pelos modelos RAMS/BRAMS em suas versões 6 (RAMS) e 4.2 (BRAMS), com novas funcionalidades e parametrizações especializadas para trópicos e sub-trópicos. Deste modo, obtém-se o prognóstico simultâneo do estado atmosférico, do ponto de vista meteorológico e da qualidade do ar e o estudo da interação ou da retroalimentação entre o contaminante e a própria atmosfera (como no caso dos aerossóis liberados em incêndios e de seu forçamento radiativo) (FREITAS et al., 2007).

O BRAMS é baseado no *Regional Atmospheric Modeling Systems* (RAMS) versão 6 que, por sua vez é um modelo para simulação de fenômenos de mesoescala que apresenta muita versatilidade no que se refere às opções das parametrizações físicas e com relação à escolha da resolução vertical e horizontal da grade (WALKO et al., 2000).

O CATT-BRAMS é equipado com um esquema de aninhamento⁹ múltiplo, que permite que as suas equações sejam solucionadas simultaneamente em qualquer número de grades computacionais, com resoluções espaciais diferentes, que interagem entre si num complexo conjunto de módulos para simular processos, tais como: transferência radiativa, troca de água, calor e momento entre a superfície e a atmosfera, transporte turbulento na camada limite planetária e microfísica das nuvens. As condições iniciais podem ser definidas a partir de vários conjuntos de dados observacionais que podem ser combinados e processados com um pacote isentrópico de mesoescala de análise de dados (INPE/CPTEC, 2012).

Explora a capacidade de transporte de traçadores do BRAMS de usar espaços reservados para grandezas escalares. O transporte on-line do modelo segue a técnica euleriana¹⁰, solucionando a equação de conservação de massa para o CO e MP_(2.5), em que a razão de mistura, ($s = \rho/pair$), é calculada, conforme apresentado pela equação 6.

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} = \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{adv}}_{1^\circ} + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{PBL_{turb}}}_{2^\circ} + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{deep_{conv}}}_{3^\circ} + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{shallow_{conv}}}_{4^\circ} + W_{PM_{2.5}} + R + Q_{plume\ rise}$$

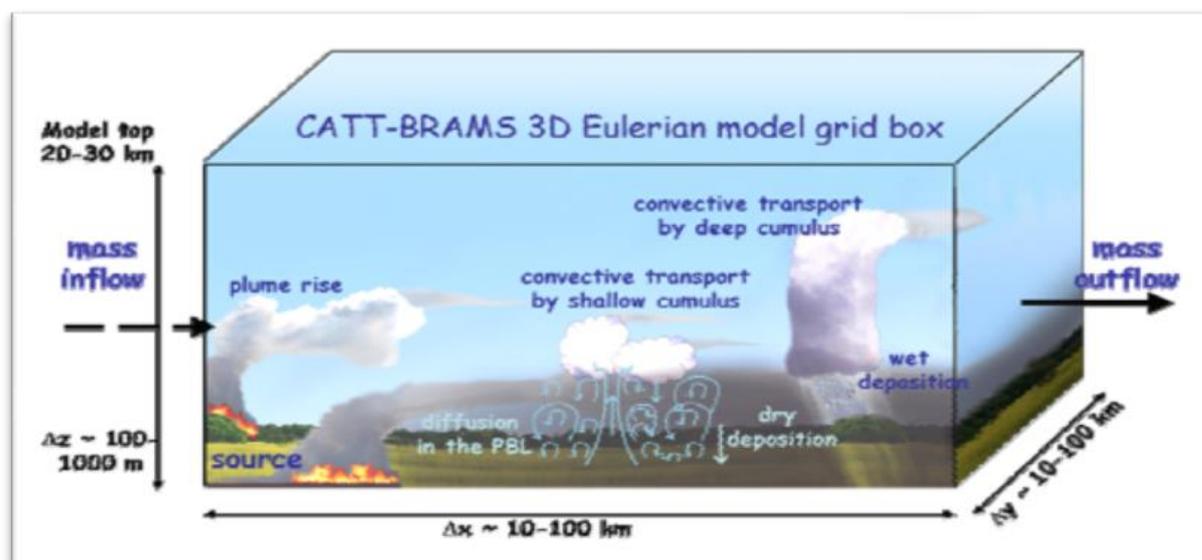
Equação 6

Nesta equação S significa a razão de mistura dos traçadores, em escala de grade, com o ar da atmosfera, o 1º (primeiro) termo representa o processo de advecção pela média do vento; o 2º (segundo), o transporte em escala de subgrade na camada limite planetária (processo de difusão); o 3º (terceiro) e 4º (quarto) representam o transporte, também em escala de subgrade, associado à convecção profunda e superficial, respectivamente. W representa a deposição úmida das partículas de aerossóis finas associadas ao esquema de convecção *cumulus*, R a deposição seca e a sedimentação associada aos gases e às partículas de aerossóis finas, bem como à transformação química do CO. Finalmente, $q_{plume\ rise}$ refere-se à emissão associada ao processo de queima de biomassa, incluindo os mecanismos de subida da pluma (Figura 11), (FREITAS et al., 2006b).

⁹ Aninhamento múltiplo de grades constitui-se na utilização de várias grades nas simulações dos modelos numéricos, com diferentes resoluções espaciais.

¹⁰ Modelos eulerianos descrevem a variação local da concentração medida de um contaminante atmosférico, em um sistema de coordenadas fixo em relação à superfície da Terra. Para o sistema de coordenadas Euleriano, a dispersão é estudada com a equação de difusão-advecção.

Figura 11– Representação gráfica, utilizada pelo CPTEC, de determinados processos subgrades envolvidos no transporte de gases e de aerossóis e simulados pelo modelo CATT-BRAMS.



Fonte: Adaptado de Freitas et al. (2006b).

3.3 DETALHAMENTO DAS ETAPAS PARA A PRODUÇÃO DO CATT-BRAMS

3.3.1 Preparação da estrutura padrão dos diretórios do CATT-BRAMS

A estrutura de diretórios utilizada para a produção do CATT-BRAMS envolve as seguintes etapas:

- Criação de um diretório exclusivo para execução do CATT-BRAMS. Para este estudo foi criado o Diretório luciacc no cluster do LAMAZ;
- Download do arquivo executável do BRAMS (brams-4.2-opt), do site BRAMS (<http://brams.cptec.inpe.br/user/first>);
- Configuração do arquivo de controle do CATT-BRAMS, isto é do *namelist*¹¹ denominado RAMSIN, anexo. Neste arquivo, encontram-se armazenadas todas as informações de configuração e de parametrização do modelo.
- Download dos dados essenciais para a inicialização e execução da simulação e dos resultados e a criação de diretórios para armazenamento desses dados, no ambiente de trabalho. Compreendeu o download dos dados das condições iniciais e de contorno (condições de superfície), conforme descrito a seguir:
 - Umidade do Solo: Os dados de umidade do solo para a região de estudo foram considerados homogêneos¹².

¹¹ Namelist - Ramsin é o arquivo de entrada que especifica uma execução de BRAMS. É um arquivo de controle do modelo, através do qual diversos parâmetros podem ser ajustados.

- SST: Os dados de Temperatura da Superfície do Mar, observados semanalmente (7 dias), foram transferidos do site do BRAMS (http://brams.cptec.inpe.br/input_data.shtml), para o diretório denominado SST. Os dados originais foram baixados do site especificado, com a execução do script `gera_sst.sh`, que converte os arquivos baixados no formato oisst para o formato de entendimento do modelo, através do programa `sst2RAMS.x`.
- NDVI: Os dados mensais do Índice de Vegetação Diferencial Normalizada (NDVI, sigla do inglês), que representa o estágio de desenvolvimento da vegetação na área de estudo, foram baixados também do site do BRAMS para o diretório criado, denominado ndvi. O arquivo `NHEADER` também foi baixado para este diretório, pois através dele, foi possível modificar o mês específico de cada simulação;
- GAMRAMS: essenciais para que a rodada aconteça, os dados do modelo global, disponibilizados de 6 (seis) em 6 (seis) ou de 12 (doze) em (doze) horas, foram baixados do site <ftp://ftp1.cptec.inpe.br/modelos/io/tempo/global/T213L42/> para o diretório criado, denominado dprep. Eles foram convertidos para o formato de entendimento do BRAMS, através dos arquivos de configuração: `PREP_IN`, `grib2dp.T213` e `grbconv.T213` e execução do comando `./grib2dp`;
- FIRE_MAP: os dados das fontes de emissões de gases e partículas de aerossóis provenientes da queima de biomassa vegetal e das atividades industriais existentes na região de estudo, foram obtidos também do site do BRAMS e armazenados no diretório fire_map. Esses dados, disponibilizados diariamente, são essenciais para as estimativas das emissões de $MP_{(2,5)}$ e CO estudadas.

O modelo utilizado pode ser executado assimilando dados de superfície para determinadas condições (chamado de heterogêneo) ou sem assimilação de dados (chamado homogêneo). Essas informações foram determinadas no arquivo de configuração do CATT-BRAMS, o RAMSIN. Nesta pesquisa a simulação foi executada com a configuração homogênea (sem variações) para a umidade do solo e heterogênea para as demais condições de superfície (topografia, com resolução de 10 e 1 km, temperatura da superfície do mar, uso do solo ou classes de vegetação e dados de vegetação).

¹² Dados de uma determinada variável são considerados homogêneos, quando se atribui horizontalmente a grade do modelo, as informações da observação feita em um ponto.

- Criação dos diretórios para armazenamento dos arquivos resultantes do pré-processamento do CATT-BRAMS:
 - Diretório *data* para armazenamento dos arquivos (SST, Topografia e ndvi) gerados na etapa de pré-processamento.
 - Diretório *ivar* para armazenamento das variáveis de inicialização do modelo configuradas para a área de interesse.
 - Diretórios *A* e *H* para armazenamento dos arquivos de análise, isto é, dos resultados da simulação e do histórico (HISTORY) do processamento, de acordo com a frequência determinada. Estes diretórios armazenaram as saídas intermediárias do BRAMS.
 - Diretório micro para armazenamento dos dados da microfísica da região.

Os dados anteriormente descritos necessários à inicialização da simulação, além de serem encontrados nos sites já mencionados, encontram-se também armazenados no banco de dados do Laboratório de Modelagem da Amazônia (LAMAZ) (laboratório pertencente ao Instituto de Geociências da Faculdade de Meteorologia da Universidade Federal do Pará).

Para a descrição deste subitem, foram utilizados dois guias básicos de execução do Modelo BRAMS e um guia do CATT-BRAMS, como documentos orientadores: Guia Básico de Execução do Modelo BRAMS produzido pelos participantes do Projeto SegHidro da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em conjunto com alunos da Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro; Guia para Operacionalização do BRAMS em Produção, produzido pelos participantes do Projeto SegHidro2, também da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG); *First time User's Guide for the Coupled Aerosol and Tracer Transport Module (CATT) – (BRAMS Version 4.2)* produzido por Alvaro Luiz Fazenda, Demerval Soares Moreira, Eduardo Hidenori Erari, Jairo Panetta, Luíz Flávio Rodrigues e Saulo Ribeiro Freitas, CPTEC, Versão 1 de Março de 2007.

3.3.2 Configuração para a simulação

O modelo numérico CATT-BRAMS foi inicializado e ajustado com as análises (condições iniciais e de contorno) do modelo global AVN/NCEP (*Aviation run of the National Centers for Environmental Prediction Global Spectral Model*), com assimilação dos dados de fogo (focos de queimadas e emissões antropogênicas) derivados por sensoriamento remoto (*MODIS - Moderate-Resolution Imaging*

Spectroradiometer) e AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) à bordo dos satélites polares AQUA e TERRA, juntamente com imagens dos satélites geoestacionários GOES e MSG, à bordo da série de satélites de órbita polar NOAA, disponibilizados pelo CPTEC/INPE, para o estado do Pará.

A simulação foi inicializada às 00:00 UTC do dia 01 de junho até às 00:00 UTC de 01 de dezembro do ano de 2010, isto é para os meses que correspondem ao período seco, ou menos chuvoso do Estado, onde acontecem, normalmente, os maiores números de focos de queima da biomassa vegetal. As simulações totalizaram 183 dias, correspondendo à 4.393 horas, com saídas de dados das análises a cada hora, de forma a representar as características observadas durante o período estudado. O modelo foi configurado para duas grades tridimensionais aninhadas: a primeira com 72 km de resolução, centrada em 2,5 S e 51,5 W e a segunda grade com 24 km de resolução, centrada em 3,5 S e 51,3 W. A última grade abrange particularmente o estado do Pará, local que se pretende analisar o comportamento da pluma das emissões atmosféricas estudadas (Figura 12a e b – Grades aninhadas utilizadas 1 e 2). As principais configurações para a simulação encontram-se resumidas na Tabela 6.

Tabela 6– Principais informações que foram definidas no RAMSIN para a execução da simulação. Os dados entre parêntesis são referentes à segunda grade utilizada na simulação.

PARÂMETROS	CONFIGURAÇÕES
Unidade de tempo	h
Instante inicial	00 UTC 01/Jun/2010
Instante final	00 UTC 01/Dez/2010
Passo de tempo	1 hora
Número de grades	2
Pontos de grade em x	48(86)
Pontos de grade em y	40(71)
Pontos de grade em z	32(32)
Centro da grade (lat/lon)	2,5 S / 51,5 W (3,5 S / 51,3 W)
Resolução da grade (km)	72(24)

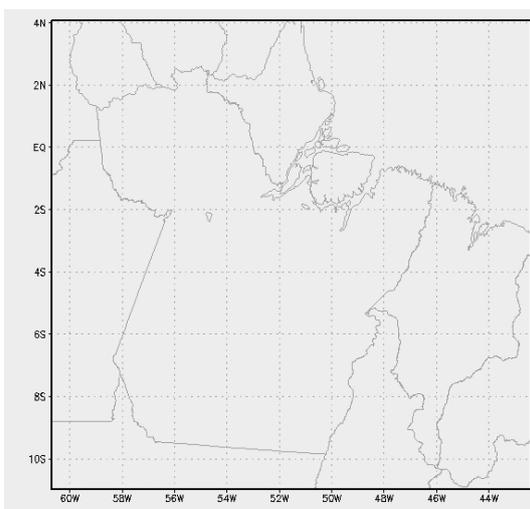
Fonte: Elaborado pela autora.

A utilização do aninhamento de grades se justifica dada a resolução pretendida. Como os dados de entrada encontram-se em um espaçamento de grade maior do que 60 km, se faz necessário reduzir as grades em ‘degraus’ para que não ocorra problemas decorrentes de descontinuidade e/ou interferências que causam perturbações indesejadas nas fronteiras da grade. Optou-se por simulações de sete em sete dias, de acordo com a frequência dos dados de SST obtidos pelo site do BRAMS

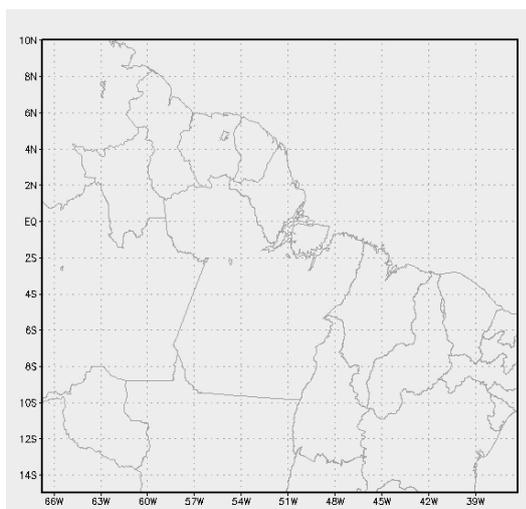
(http://brams.cptec.inpe.br/input_data.shtml). A cada rodada foram realizadas alterações no RAMSIN, nos dados de TIMMAX (tempo total da simulação) e HFILIN, que corresponde ao caminho relativo ou absoluto no qual se encontra o último arquivo gerado como histórico da simulação anterior. Desta forma, garante-se a integração de todas as análises realizadas (observar, Anexo, o RAMSIN com as configurações que correspondem à simulação realizada para este Estudo).

Figura 12– Grades aninhadas

(a)– Grade 1 Resolução de 72 km



(b) Grade 2 – Resolução de 24 km



Fonte: GrADS:Cola/IGES – 2014/08/10

3.4 EXECUÇÃO DO MODELO CATT-BRAMS

3.4.1 Etapa de pré-processamento

Nesta etapa os arquivos de grande escala e de superfície foram ajustados para a configuração especificada no *namelist* RAMSIN, gerando arquivos necessários à execução do CATT-BRAMS, conforme a seguir descrito.

A) Geração dos *dprep's*

Envolveu a conversão dos arquivos GAMRAMS em arquivos *dprep's* relacionados aos períodos especificados no RAMSIN, no formato de entrada do modelo.

B) Geração dos *data's*

Os *data's* foram gerados na primeira etapa do pré-processamento utilizando-se os dados das condições de contorno da região de estudo com o atributo RUNTYPE (modo de execução da simulação) configurado como MAKESFC, no RAMSIN. A realização desta etapa foi feita através do executável *brams-4.2-opt*, previamente compilado.

C) Geração dos *ivar's*

Os *ivar's*, arquivos de inicialização de variáveis, foram gerados com o atributo RUNTYPE configurado como MAKEVFILE, no RAMSIN. A realização desta etapa também foi feita através do executável *brams-4.2-opt*, previamente compilado.

3.4.2 Produção do CATT-BRAMS

A simulação foi feita definindo-se para o atributo RUNTYPE, constante do RAMSIN, a opção INITIAL. Os resultados e o histórico da simulação foram armazenados no diretório “A” (Análise) e “H” (*History*), respectivamente. À medida que os dados de análise foram gerados, o pós-processamento foi realizado. Essa fase é executada em paralelo, pois dentre todas as etapas envolvidas na produção do CATT-BRAMS, esta é a que requer maior capacidade de processamento. Sendo assim, para a execução desse paralelismo requerido, utilizou-se o programa MPI, no cluster do LAMAZ, através do comando: `mpirun-np17-machinefilemaquinas./brams-4.2-opt`. A opção `-np 17` significa que foram utilizados simultaneamente 17 processadores.

Esta fase exigiu um poder computacional e um intervalo de tempo considerável, em função do tamanho, número e refinamento da grade, período a ser analisado, dentre outros aspectos das simulações processadas.

3.5 PÓS-PROCESSAMENTO

O pós processamento das variáveis simuladas foi realizado através do programa RAMSPOST (*RAMS POST processing*) (DOTY et al., 1995), que gerou arquivos no formato do programa GrADS' (*Grid Analysis Display Systems*), para posterior manipulação e visualização. O RAMSPOST é um pacote para reformatação dos arquivos de saídas de modelos atmosféricos, disponível, para download, em: http://brams.cptec.inpe.br/utilities_ramspost.shtml.

O GrADS' é uma ferramenta interativa para acesso, manipulação e visualização de dados de ciências da terra que lê dados com 4 dimensões, sendo geralmente: latitude, longitude, altitude e tempo. O GrADS' possui um pacote de funções e scripts embutidos estando disponível na internet em: <http://www.iges.org/grads/downloads.html>.

Assim, após execução da última etapa do pré-processamento, isto é após a finalização da simulação, executou-se o script *ramspost.catt.x*, gerando, a partir dos arquivos de análises, arquivos que, posteriormente, foram visualizados no software GrADS'. O arquivo de configuração do *ramspost.catt.x*, isto é o *namelist* que governa este script é o *ramspost.inp*. Neste *namelist* foram definidas as principais características para o pós-processamento dos arquivos de análises e geração dos arquivos de entrada do GrADS'. Ele contém o local onde se encontram os arquivos de análises (saídas do CATT-BRAMS armazenados no diretório 'A'), o número de variáveis e quais foram as variáveis visualizadas, juntamente com o prefixo dos arquivos de saída (resultados), quantos e quais níveis verticais foram estudados.

As variáveis que podem ser visualizadas nesta etapa do pós-processamento, e que subsidiarão a análise da influência das condições atmosféricas (índice pluviométrico, direção e velocidade dos ventos, advecção e turbulência – movimentos do ar, inversão térmica – perfil vertical de temperatura, estabilidade atmosférica e intensidade da radiação solar) e das condições da superfície (topografia, textura do solo e tipo de vegetação), para o período e região estudada, no transporte e dispersão da pluma das emissões atmosféricas analisadas, ou seja, no alcance e na taxa com que as concentrações dos poluentes são modificadas na atmosfera, encontram-se relacionadas e definidas pela Tabela 7, abaixo apresentada:

Tabela 7– Principais variáveis que foram definidas no ramspost.inp para a execução do pós processamento e a geração dos arquivos .ctl de entrada no GrAD'S.

VARIAVEIS	UNIDADE DE MEDIDA	DESCRIÇÃO
totpcp	mm liq	Precipitação Total Resolvida
pcprate	mm/h	Taxa Resolvida da Precipitação
acccon	mm	Precipitação Convectiva Acumulada
tempc	°C	Temperatura
theta	°C	Temperatura Potencial
sst	°C	Temperatura da Superfície do Mar
topo	m	Topografia da área de estudo
Vtype 1, 2 e 3	----	Classe de Vegetação 1, 2 e 3
stext	----	Textura do Solo
s moist	m ³ /m ³	Umidade do Solo
w	m/s	Componente Vertical da Velocidade do Vento
u	m/s	Componente Zonal da Velocidade do Vento
v	m/s	Componente Meridional da Velocidade do Vento
rh	%	Umidade Relativa
rv	g/kg	Razão de mistura do vapor de água
h	w/m ²	Fluxo de Calor Sensível
le	w/m ²	Fluxo de Calor Latente
r long	w/m ²	Radiação de Ondas Longas
r short	w/m ²	Radiação de Ondas Curtas
CO	ppb	Concentração de Monóxido de Carbono
Coant	ppb	Concentração de Monóxido de Carbono Antropogênico
PM25	µg/m ³	Concentração de Material Particulado com diâmetro de partícula <2,5 microm
src1, src2, src3	kg/m ² /dia	Emissões 1, 2 e 3 – focos de incêndio

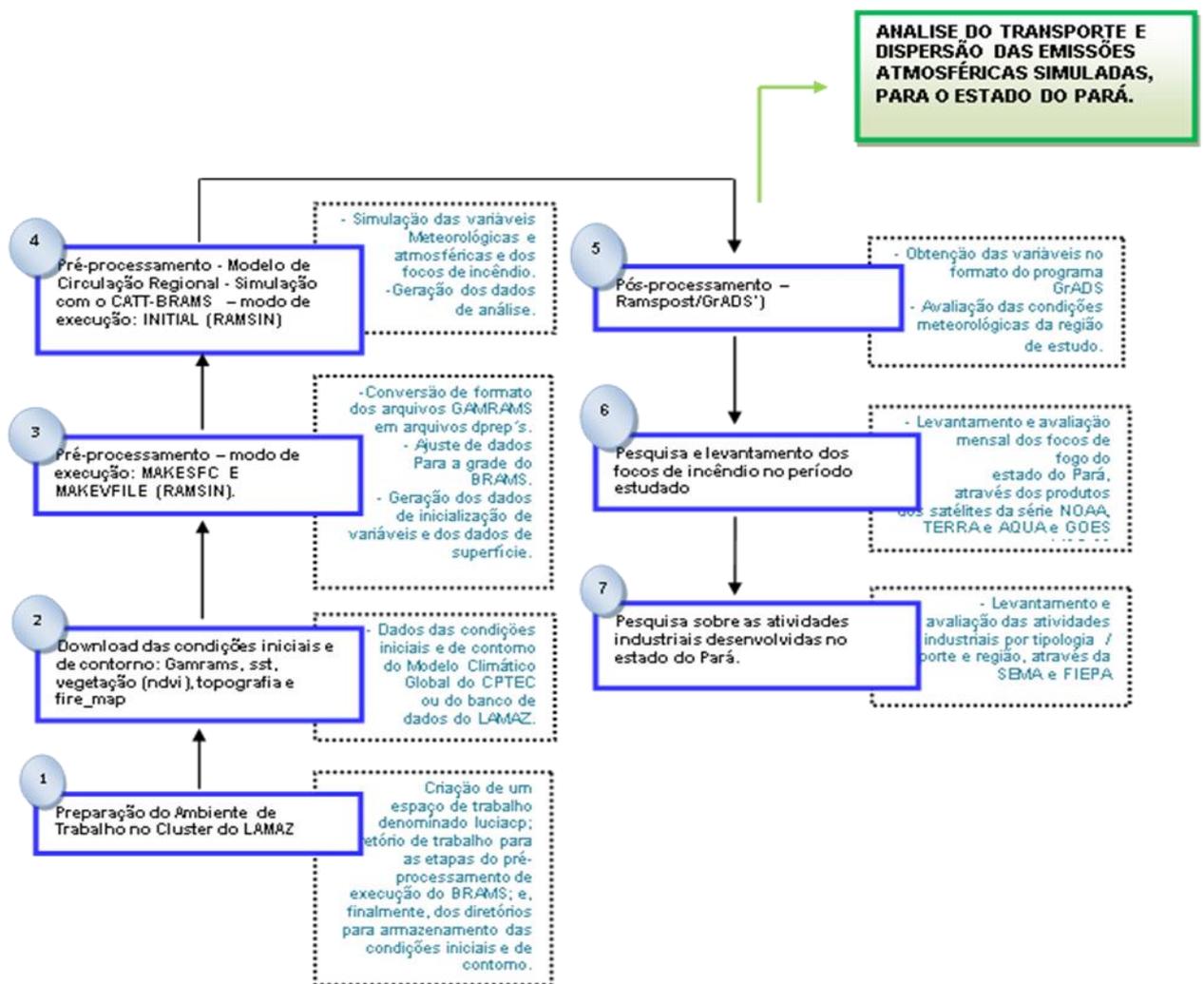
Fonte: First Time User's Guide for the Coupled Aerosol and Tracer Transport Module (CATT) –
BRAMS Version 4.0

Os níveis padrões estudados cobriram a superfície do solo, abrangendo as altitudes correspondentes aos níveis de pressão de 1000, 925, 850, e 500 hPa, com o topo do modelo em 200 hPa, para análise das concentrações das emissões atmosféricas de CO e MP_(2,5) em altitudes mais elevadas. Esses níveis verticais de pressão, que correspondem a altitudes de 120, 720, 1.457, 5.574 e 11.784 m, respectivamente, foram utilizados pelo fato de que os fenômenos atmosféricos de conhecimento mais abrangente ocorrem na troposfera, e essa camada é dividida, meteorologicamente, em

níveis padrões de pressão. Ao final da execução do *ramspost.catt.x*, foram obtidos os arquivos CTL e GRA, utilizados pelo GrADS' para gerar as imagens e obter informações sobre as variáveis estudadas, especificadas no *ramspost.inp*.

Os produtos ou os resultados obtidos são de fundamental importância para as análises do comportamento das emissões atmosféricas na região do estado do Pará. Isto é, essas imagens permitiram estudar possíveis fatores que influenciaram o transporte e a dispersão do monóxido de carbono e do material particulado (MP_(2,5)), provenientes da queima da biomassa vegetal e das atividades industriais existentes no Estado, durante o período de estudo especificado. A metodologia utilizada segue o fluxograma constante da Figura 13 e a infraestrutura computacional para a realização das simulações foi, também, fornecida pelo LAMAZ.

Figura 13– Fluxograma da metodologia utilizada para a avaliação do campo de concentração e da evolução das emissões simuladas, de suas origens e efeitos sobre o meio ambiente e à saúde humana, a partir do modelo CATT-BRAMS.



Fonte: adaptado de Fernandes (2009).

3.6 LEVANTAMENTO DAS FONTES POTENCIAIS DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Para dar subsídios à análise do comportamento das emissões de CO e MP_(2,5) na região do estado do Pará, foi realizado o levantamento do número de focos de calor, tendo como base os dados obtidos através do banco de dados do monitoramento de queimadas disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através dos sites: <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/> e www.inpe.br/queimadas/anima_filmes.php, que monitoram os focos detectados pelos satélites NOAA, TERRA E AQUA, GOES, e MSG-02. Os focos de incêndio levantados foram espacializados por região do estado do Pará, permitindo analisar as fontes de origem das emissões de CO e de MP_(2,5), provenientes da queima da biomassa vegetal.

As carvoarias e atividades constantes dos processos industriais, agropecuária, agricultura, madeireiras e florestas, consideradas como fontes potenciais de emissão de poluentes atmosféricos, existentes e em operação na região de estudo, foram obtidas por tipologia e também espacializadas por região do Pará, utilizando-se, como fonte de informações e de dados, o Sistema Integrado de Monitoramento e Licenciamento Ambiental – Módulo Público (SIMLAM Público), cujo objetivo principal é o de disponibilizar, para o público em geral, um acompanhamento dos processos e das atividades licenciadas pela Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade do estado do Pará (SEMAS-PA). Também foram levantados dados junto à Federação das Indústrias do Estado do Pará (FIEPA), através do Anuário das Indústrias, lançado recentemente.

As carvoarias são atividades constantes dos processos industriais, agropecuária, agricultura, madeireiras e florestas, consideradas como fontes potenciais de emissão de poluentes atmosféricos, existentes e em operação na região de estudo, foram obtidas por tipologia e também espacializadas por região do Pará, utilizando-se, como fonte de informações e de dados, o Sistema Integrado de Monitoramento e Licenciamento Ambiental – Módulo Público (SIMLAM Público). O objetivo principal é o de disponibilizar, para o público em geral, um acompanhamento dos processos e das atividades licenciadas pela Secretaria de Meio Ambiente do estado do Pará (SEMA-PA). Também foram levantados dados junto à Federação das Indústrias do Estado do Pará (FIEPA), através do Anuário das Indústrias, lançado recentemente.

No setor de energia, destacaram-se as carvoarias implantadas no Estado, devido à queima de biomassa vegetal; no de processos industriais, as atividades de produção de ferro e aço, alumínio, as indústrias madeireiras e a indústria química. De grande importância no contexto de emissões de gases e de material particulado para a atmosfera, encontra-se o setor de agropecuária e de agricultura, de uma maneira geral, por embutir práticas de incineração de resíduos e de queima de biomassa vegetal, no manejo da área. A mudança de uso da terra e florestas destaca-se como importante emissor de gases e de material particulado para a atmosfera, devido à emissão de poeiras e fuligem para a atmosfera. Dominado pelo bioma amazônico, esse setor envolve atividades de desmatamento seguido da prática de queima da biomassa vegetal. Merece destaque também nesse setor a ocorrência dos incêndios florestais, provocados ou não.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

O estado do Pará, cuja população é de 7,3 milhões de habitantes distribuída em 1.247.689,52 km² de área, apresenta uma densidade demográfica de 5,85 hab.Km⁻², caracterizando-se como um Estado, ainda pouco povoado, contendo, em seu território, grandes áreas disponíveis. A sua divisão em mesorregiões, tendo como base as suas semelhanças econômicas, sociais e políticas, define os diversos polos de desenvolvimento, os quais são espaçados geograficamente.

A indústria florestal e a agropecuária extensiva constituem-se como as principais atividades econômicas do Estado, com as mesorregiões Sudeste e Nordeste se destacando como as mais dinâmicas e produtivas. As atividades agrícolas baseadas, essencialmente, na agricultura familiar, (atividade que se constitui de um sistema de mais baixo custo e de grande utilização pelos agricultores, e com grande variabilidade espacial e interanual), também merece destaque (PENA, MOREIRA e CHAVES, 2014).

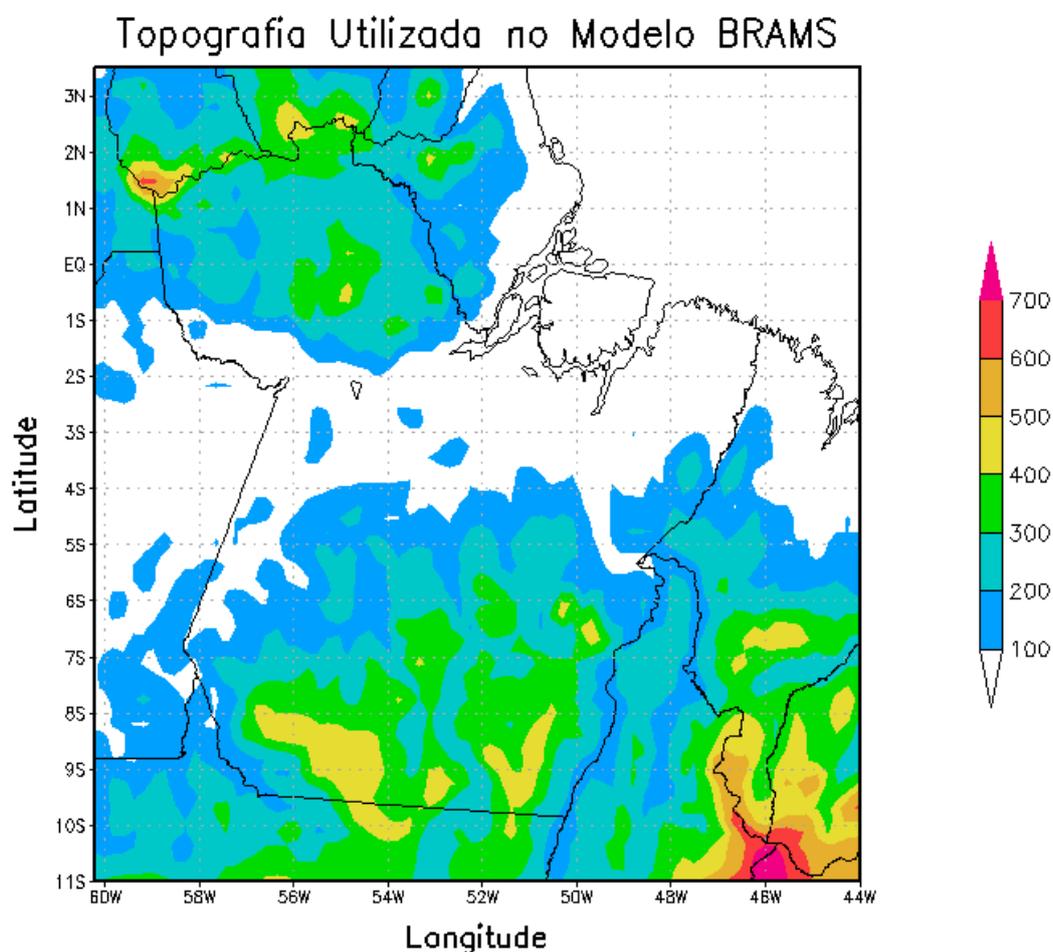
A cultura da soja, cuja produção já ocupa uma área significativa no Estado, encontra-se, atualmente, com a sua estrutura produtiva em grande expansão, principalmente nas mesorregiões Sudeste e Sudoeste Paraense (PENA, MOREIRA e CHAVES, 2014).

Grande parte destas atividades econômicas, ainda é manejada de forma inadequada, e estão fortemente associadas com o desmatamento no Pará, sendo sua causa imediata mais importante. As queimadas das áreas já desmatadas é prática comum de manejo entre os agropecuários e os agricultores do Estado, que muitas das vezes, devido à falta de controle do processo de queima, se tornam “incêndios florestais rasteiros”, degradando extensas áreas e fazendo do Pará um dos Estados com maior índice de desmatamento e com maior ocorrência de focos de queimadas (VERÍSSIMO et al., 2000).

Possuidor das principais reservas minerais do País, o Pará abriga, nas mesorregiões do Baixo Amazonas, Nordeste, Sudeste e Sudoeste, importantes e grandes empreendimentos que atuam na mineração, como na metalurgia extrativa e siderurgia, destacando-se a cadeia da verticalização do alumínio. Entretanto, este setor ainda encontra-se em menor destaque no contexto do desenvolvimento econômico do Estado, o que demonstra que economia da região não é tão intensiva em capital (BECKER, 2005).

Observa-se pela Figura 14 que na geografia física do Pará predomina terrenos de cotas modestas, inferiores a 250 m, porém ressaltam-se terrenos mais elevados ao norte e ao sul do Estado, como as serras de Acari e de Tumucumaque ao norte (mesorregião do Baixo Amazonas), ao sul a Serra dos Carajás (mesorregião Sudeste Paraense), que se notabiliza em função de sua grande extensão e natureza geológica, e a Chapada do Cachimbo, (mesorregião Sudoeste do Pará). Trata-se de um relevo relativamente suave, sem a presença de morros que possam ser desfavoráveis à dispersão de poluentes atmosféricos.

Figura 14– Morfologia do estado do Pará simulado pelo modelo BRAMS, evidenciando o domínio de terrenos de cotas modestas inferiores a 250 m. A região em branco representa o domínio da planície amazônica.



Fonte: Resultado da topografia do estado do Pará simulada pelo modelo de previsão de tempo e clima - BRAMS

Por estar localizado na região tropical brasileira, o comportamento da temperatura do ar no Pará apresenta pequena variação sazonal, com temperaturas médias acima de 25 °C em todos os meses do ano, o que implica em uma contínua e intensa amplitude térmica diária. As maiores temperaturas foram registradas em outubro,

que representa o mês de transição entre o fim do período menos chuvoso e o início do período mais chuvoso e, com elevada nebulosidade e menores temperaturas, o mês de fevereiro (MORAES, 2012; BERGSON et al., 2004).

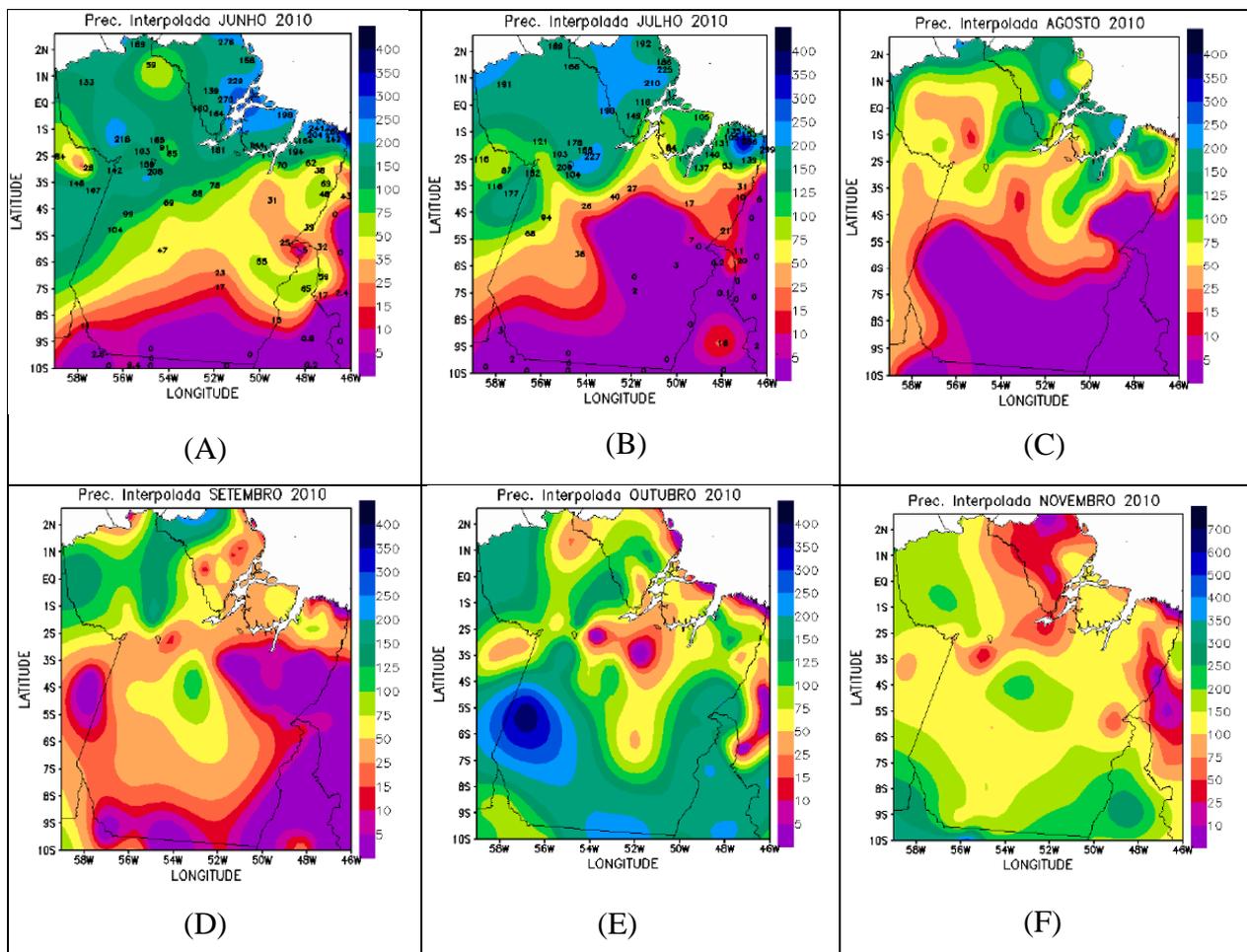
A umidade relativa do Estado é elevada, com valores acima de 80% em todos os meses do ano, com destaque para o trimestre mais chuvoso cuja umidade relativa atinge valores, aproximadamente, de 89%, em consequência das menores temperaturas no período, que significa maior saturação do ar (MORAES, 2012; BERGSON et al., 2004).

4.2 VOLUME PLUVIOMÉTRICO

A série histórica de 23 anos do índice pluviométrico do estado do Pará disponibilizada pelas estações climatológicas do INMET e das estações Pluviométricas da ANEEL registraram os maiores índices na parte do norte do Estado, isto é nas mesorregiões do Marajó, Metropolitana e Nordeste Paraense, com valores médios anuais superiores a 2.300 mm, podendo atingir 3.000 mm. Ao sul, nas mesorregiões Sudeste e Sudoeste Paraense, os menores índices pluviométricos, com valores médios que variaram entre 1.900 mm e 2.030 mm. Nesta mesma faixa de valores médios anuais de precipitação pluviométrica encontra-se a mesorregião do Baixo Amazonas. Normalmente, as estações variam entre meses com muita chuva e outros com menor índice pluviométrico. Os trimestres mais chuvosos no Estado são dezembro, janeiro fevereiro (DJF) e março, abril, maio (MAM), e os menos chuvosos são junho, julho, agosto (JJA), e setembro, outubro, novembro (SON).

Considerando-se o ano de 2010, observa-se que a distribuição espacial e temporal das chuvas, durante a estação seca do estado do Pará, corresponde aos meses de JJA e SON, no qual o trimestre mais seco depende da localização da região (Figura 15). Iniciando pelo mês de junho, percebe-se que o volume pluviométrico foi maior na mesorregião do Marajó (150 a 250 mm), seguido da mesorregião do Baixo Amazonas, no noroeste do Estado e faixa litorânea, com índices que variaram de 100 a 250 mm (Figura 18). As chuvas que ocorreram no nordeste do Estado (mesorregião Nordeste e Metropolitana de Belém), nos meses de junho a agosto foram influenciadas pela ação da ZCIT, convecção local no nordeste paraense e nas demais localidades a chuva foi ocasionada pela elevada concentração de umidade e pelo aquecimento diurno (BERGSON et al., 2004).

Figura 15– Climatologia do acumulado da precipitação mensal, nos meses de junho (A), julho (B), agosto (C), setembro (D), outubro (E) e novembro (F) do ano de 2010, para o estado do Pará. Os dados de precipitação acumulada foram gerados pelas estações meteorológicas do INMET e processados pela Rede Estadual de Previsão Climática e Hidrometeorológica do Pará (RPCH).



Fonte: Rede Estadual de Previsão Climática e Hidrometeorológica do Pará (RPCH).

No mês de julho é possível observar um cenário mais seco do que o do mês anterior nas mesorregiões Sudoeste e Sudeste do Estado, onde houve uma redução do volume da precipitação, com uma grande área em que o total não ultrapassou 5 mm (Figura 15). Entretanto, em pequena parte da Nordeste Paraense e na mesorregião do Baixo Amazonas (noroeste) houve uma elevação no volume total de chuvas que chegaram a atingir valores aproximados de 350 e 200 mm, respectivamente (Figura 15). Assim como no mês anterior, as chuvas foram associadas a pulsos da ZCIT, convecção local e circulação de brisas provocadas pelo aquecimento e pela elevada umidade na região (RPCH, 2010).

Em agosto, ocorreu uma diminuição do total pluviométrico em todo o Estado, com o Baixo Amazonas, Marajó e parte da mesorregião Nordeste ainda apresentando os maiores volumes (de 10 a 250 mm) e o Sudeste e Sudoeste do Pará novamente mais

seco, tendo um acumulado variando de 0 a 25 mm (Figura 15). De acordo com INMET (2010), mesmo com a migração da ZCIT para o hemisfério norte, alguns pulsos e nuvens com atividades convectivas e a grande umidade da região foram os responsáveis pelo volume de chuva observado no Estado, neste período.

Interessante observar que no mês de setembro as mesorregiões do Baixo Amazonas e Marajó se tornaram mais secas, com volumes pluviométricos de 25 a 150 mm, porém com a porção Noroeste ainda apresentando os maiores índices (Figura 15). O mesmo ocorreu com a mesorregião Nordeste paraense com baixos volumes pluviométricos variando de 3 a 50 mm (Figura 15). A mesorregião Sudoeste e parte da Sudeste se destacaram, apresentando os maiores índices pluviométricos do mês, porém ainda baixos, com uma variação de 0 a 100 mm (Figura 15). O posicionamento mais ao sul da ZCIT provocou aquecimento diurno e elevada concentração de umidade (INMET, 2010).

O volume de chuvas no mês de outubro em todo o Estado aumentou, variando de 60 a 350 mm (Figura 15), observando que, como no mês anterior, os maiores valores foram registrados nas mesorregiões Sudeste e Sudoeste (orientação noroeste-sudeste). Nenhum registro pluviométrico foi observado na região litorânea, para este mesmo mês (Figura 15). Conforme o boletim de análise e previsão climatológica do RPCH (2010), a ZCIT foi a responsável pelo acumulado de chuvas e, nas citadas mesorregiões do Estado, duas frentes frias contribuíram para o acumulado deste mês.

Em novembro, os índices pluviométricos foram menores, variando de 6 a 20 mm, na região litorânea do Nordeste Paraense (Figura 15). Os maiores índices volumétricos, para este mês, ocorreram nas mesorregiões Sudeste e Sudoeste, apresentando acumulados de chuva, que variaram de 100 a 250 mm, principalmente na fronteira com o estado do Mato Grosso, onde foi registrado um acumulado de até 250 mm (Figura 15). As chuvas, neste mês, foram ocasionadas pela proximidade da ZCIT ao hemisfério sul, sendo responsável pelo índice pluviométrico na região norte do Estado (mesorregiões Nordeste, Marajó e Baixo Amazonas). Nas mesorregiões Sudeste e Sudoeste do Pará a instabilidade e as frentes frias (sistemas frontais) contribuíram para o volume total registrado.

Considerando todo o período analisado observou-se que no trimestre de JJA os máximos de chuvas se deslocaram para noroeste (mesorregiões do Baixo Amazonas e Marajó) e parte da Nordeste, e os mínimos para o sul (mesorregião Sudeste e Sudoeste). No trimestre de SON ocorreu o estabelecimento dos máximos de chuva orientados no

sentido de noroeste-sudeste, aumentando gradativamente o volume pluviométrico no sul, nas mesorregiões Sudeste e Sudoeste do Pará.

Resumidamente, nos meses de junho e julho (Figuras 15 A e B) houve diminuição na concentração das chuvas, ficando as regiões ao sul da planície amazônica mais secas do que as regiões ao norte. Desta forma, a planície amazônica é uma espécie de divisor de águas entre o norte e o sul do Estado.

Já no mês de agosto a diminuição das chuvas atingiu o Noroeste ficando, apenas, parte da Nordeste e Noroeste do Estado com índices de precipitação acima de 125 mm (Figura 15 C).

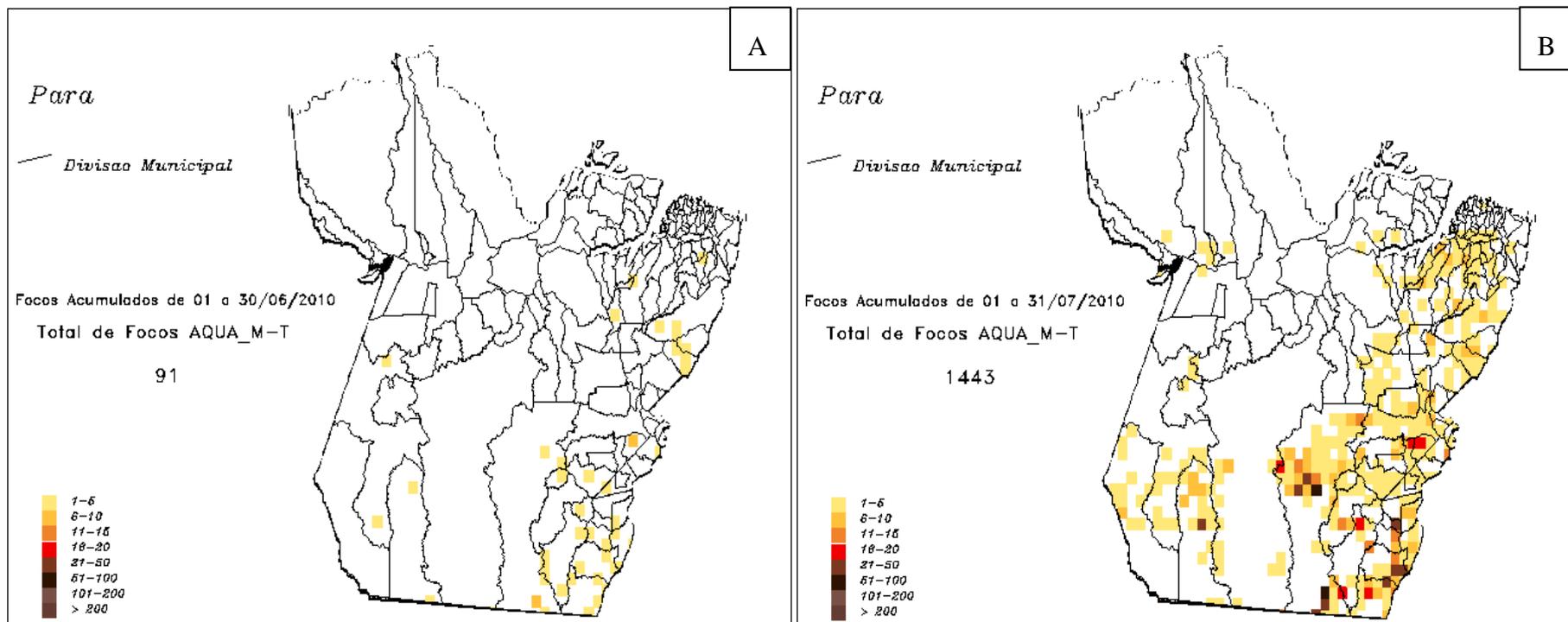
Em setembro (Figura 15 D) a chuva se concentra apenas na parte Norte do Estado, sendo que em outubro (Figura 15 E) volta a chover em grande parte do Estado, ficando apenas parte da planície amazônica e os vales do rio Tapajós e Xingu com índices abaixo de 50 mm. No final do período estudado, no mês de novembro (Figura 15 F), quase todo o Estado está sobre um regime de menor índice pluviométrico, com índices abaixo de 100 mm.

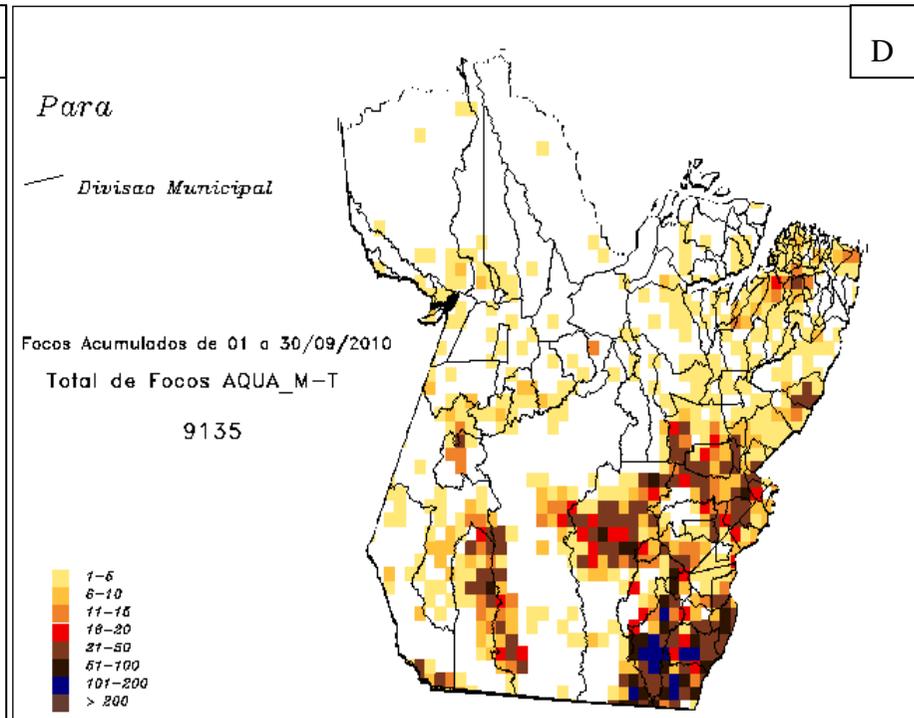
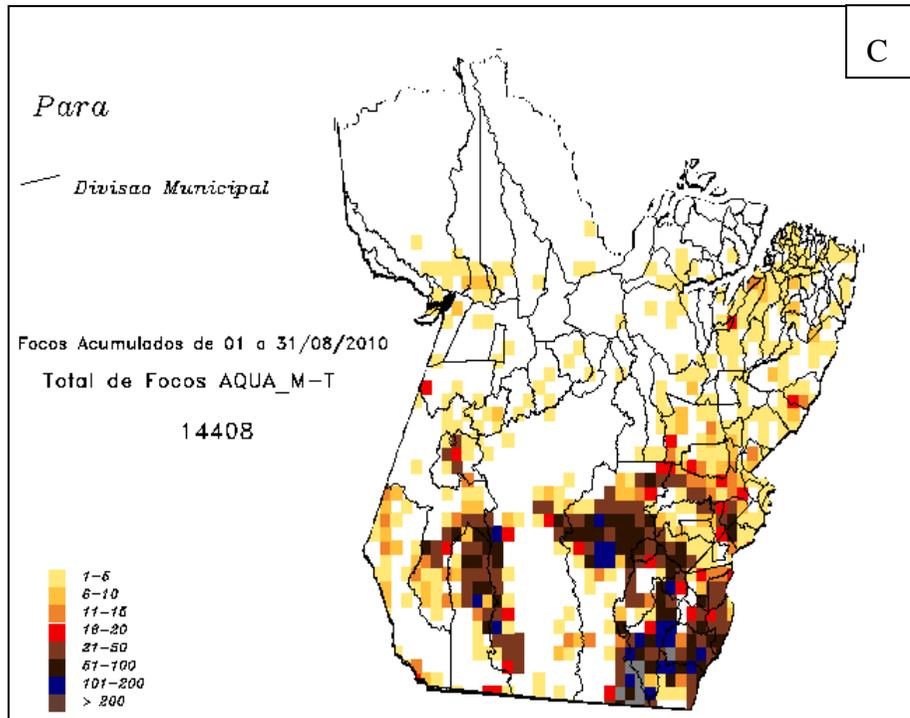
4.3 FOCOS DE INCÊNDIO OCORRIDOS NO PERÍODO DE ESTUDO

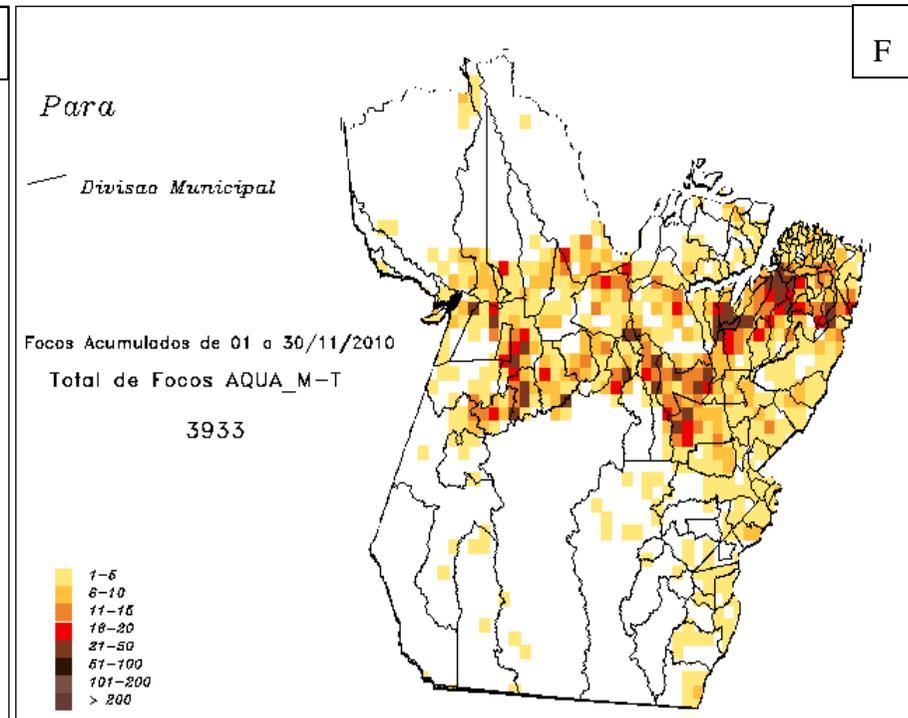
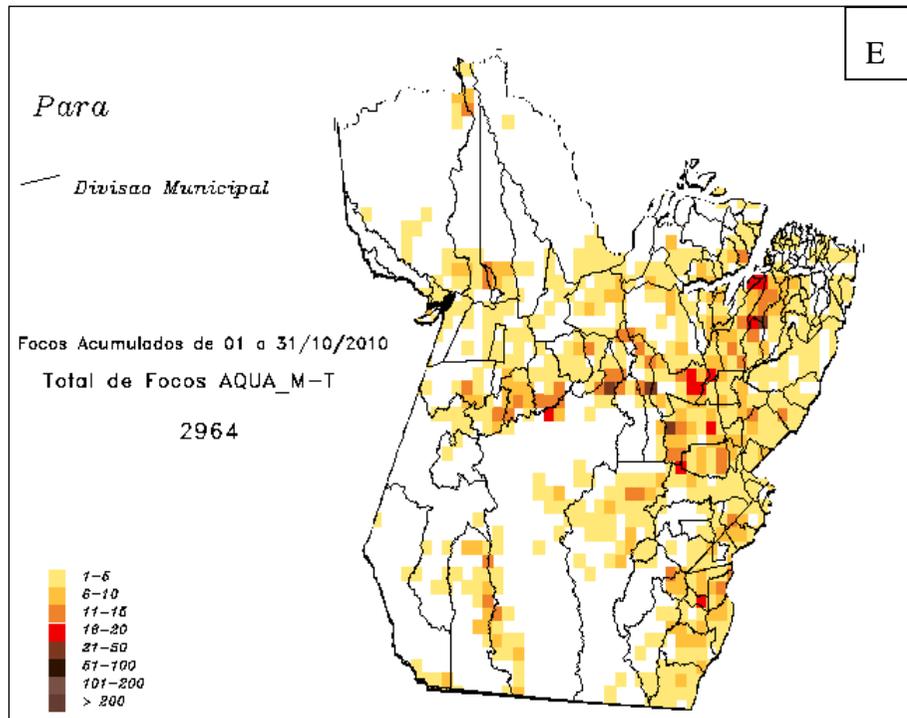
Os números de focos de incêndio variam de acordo com as mesorregiões e os meses observados. Para as regiões Sudeste e Sudoeste as maiores incidências de focos de incêndios aconteceram nos meses de agosto e setembro, respectivamente (Figura 16), justamente no período mais seco para esta região e quando se inicia as chuvas (Figura 15 B e C). Já nas mesorregiões Baixo Amazonas, Marajó e Nordeste as maiores incidências de focos de incêndios observadas foram nos meses de outubro e novembro para o mesmo ano, sendo que nos meses de junho e julho apenas na Nordeste e Sudeste foram observadas focos de incêndio, principalmente no mês de julho (Figura 16), indo de encontro com os períodos de menor precipitação nestas regiões (Figura 15).

Para fins de monitoramento de queimadas e incêndios florestais, os órgãos ambientais utilizam os denominados “satélites de referência”, ou seja, satélite cujos dados diários de focos detectados são usados para compor a série temporal ao longo dos anos e, assim, permitir a análise de tendências nos números de focos, para mesmas regiões em períodos de interesse. Mesmo indicando uma fração do número real de focos (de queimadas e incêndios florestais), por usarem o mesmo método e o mesmo horário de imageamento ao longo dos anos, os resultados do “satélite de referência” permitem analisar as tendências espaciais e temporais dos focos (INPE/CPTEC, 2014).

Figura 16– Focos de fogo acumulados mensais registrados pelo satélite de referência AQUA_M-T, na região do Pará. A figura (A) refere-se ao número de focos de fogo para o mês de junho, (B) para julho, (C) agosto, (D) setembro, (E) outubro e, a (F) para novembro do ano de 2010. A legenda refere-se ao número de focos existentes em cada frente de fogo detectada.







Fonte: INPE/CPTEC (2015).

A distribuição espacial e temporal (mensal) dos focos de queima da biomassa vegetal no estado do Pará, detectados pelo satélite de referência AQUA_MT, e demonstrada pela Figura 16, indicou aumentos progressivos no número e na extensão de queimadas do mês de junho até o mês de setembro, quando em agosto atingiu o máximo de focos. No mês de setembro houve uma significativa queda no número de queimadas, em relação a agosto e, em outubro em relação a setembro, devido à diminuição das práticas de queimadas na região do estado do Pará, mais intensas durante os meses de agosto e setembro (INPE, 2010¹³) e ao aumento no índice pluviométrico nessas regiões à exceção do mês de outubro, no qual apresentou a região central do Estado com baixos índices pluviométricos (Figura 15E).

As mesorregiões Nordeste, Sudeste e Sudoeste do Estado destacaram-se como as mais afetadas pela queima da biomassa vegetal, no período analisado, sendo que estas regiões caracterizaram-se por apresentar, pelo menos três meses de índice pluviométrico abaixo de 150 mm.mês⁻¹(Figura 15).

Curioso observar que, mesmo com a chegada das chuvas no mês de novembro, houve um aumento no número de queimadas, em relação a outubro, porém com um perfil diferenciado dos demais meses anteriores, ocorrendo maiores números de focos de calor ao norte das mesorregiões Sudeste e Sudoeste e parte inferior da Marajó Paraense (região denominada Xingu). Estes focos de incêndio são devidos ao uso das queimadas na agricultura e agropecuária para limpeza, plantio e recuperação da área de pasto, as quais são mais intensas, nestas regiões, no final do período seco, ou seja, no período de transição entre o período seco e o chuvoso.

As queimadas são fontes de origem de emissões atmosféricas classificadas como antropogênicas, estacionárias e múltiplas e, dentre as concentrações de gases traço e de material particulado emitidas por estas fontes, o CO e o material particulado com diâmetro aerodinâmico menor do que 2,5 µm, são objetos deste estudo.

A título de comparação com a Figura 16A até F, apresenta-se na Tabela 8, o número de focos de calor e as imagens destes focos constantes do Banco de Dados de Queimadas (BDQUEIMADAS¹⁴) do INPE/CPTEC que considerou a base de dados registrados pelos satélites polares NOAA 15, NOAA 16 e NOAA 17, as imagens dos

¹³ Entrevista concedida pelo meteorologista do INPE, Raffi Agop, para o globo.g1 notícias, em 14/08/2010, disponível em <http://g1.globo.com/brasil/noticia/2010/08/inpe-aponta-novas-areas-de-queimadas-no-brasil.html>.

¹⁴BDQUEIMADAS (INPE) disponível em <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas>

satélites geoestacionários GOES-12 e MSG-2 (INPE, 2010) e as imagens, MODIS dos satélites polares NASA, TERRA e, inclusive do AQUA.

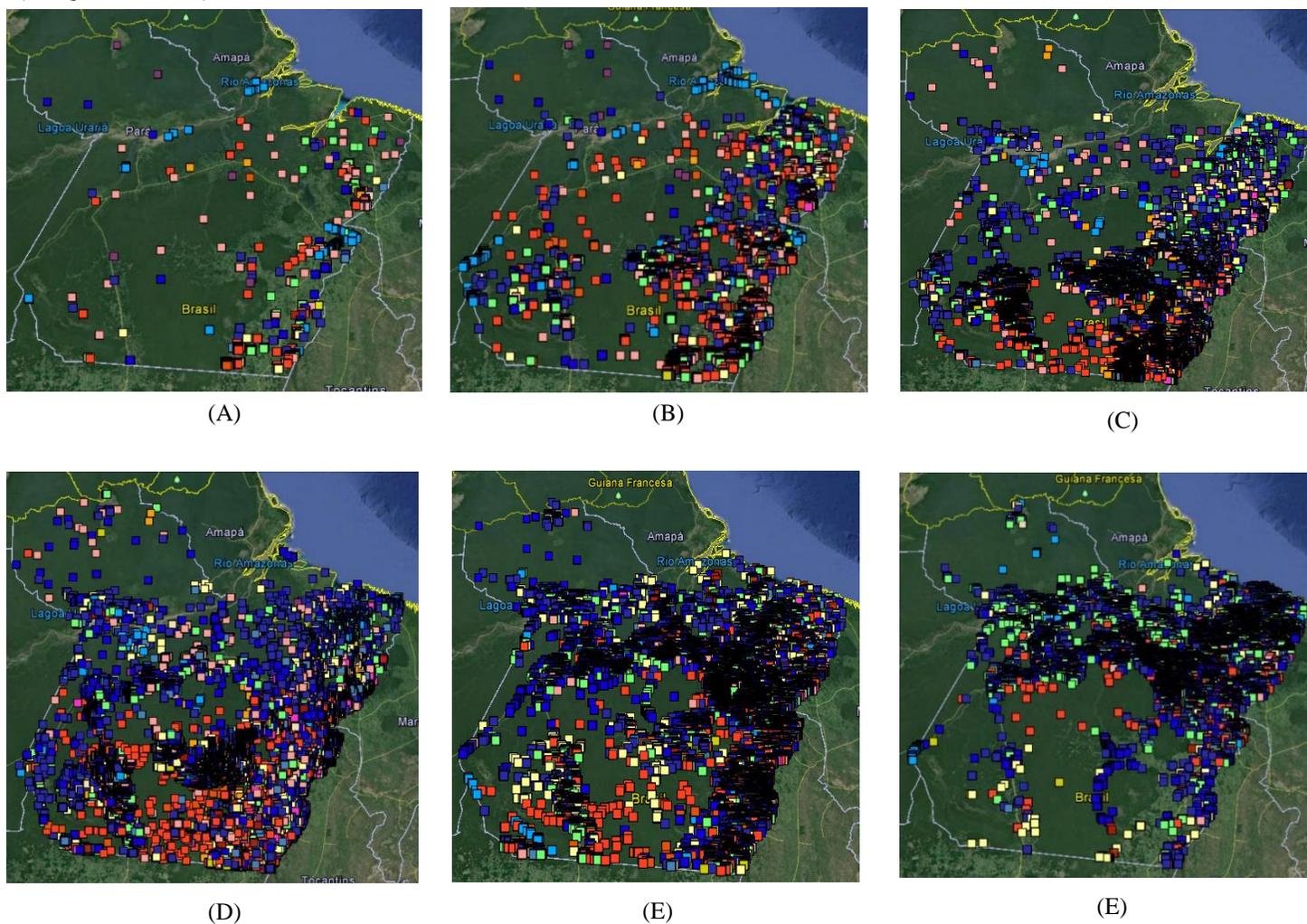
Tabela 8– Focos de calor ocorridos no estado do Pará, em 2010. Banco de Dados de Queimadas (BDQUEIMADAS) do INPE/CPTEC, registrados pelos satélites polares NOAA 15, NOAA 16 e NOAA 17, as imagens dos satélites geoestacionários GOES-12 e MSG-2.

Meses	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
Focos de Calor	615	5.338	70.648	58.109	21.406	16.281

Fonte: Elaborado pela autora.

Similarmente aos dados detectados, somente pelo satélite AQUA_MT (Figura 16), observou-se que as maiores incidências de focos de queimadas ocorreram no período de agosto a setembro, merecendo destaque o mês de agosto com o máximo detectado pelo sensoriamento remoto (70.648 focos de queimadas). Este período é considerado crítico em termos de intensificação da prática de queima nas áreas agrícolas e de pastagens, existentes no Estado. É importante esclarecer que a diferença nos números de focos de calor apresentados pela Figura 16, em relação à Tabela 8 e Figura 17, se deve ao banco de dados utilizados para obtenção dos dados: a primeira tem como base os focos de calor detectados pelo satélite de referência e, a segunda, satélites polares, geoestacionários e imagens MODIS de satélites polares. De acordo com o INPE (2010), tal metodologia confere uma grande diferença na quantidade de focos de calor, uma vez que os focos detectados por todos os satélites podem apresentar muitas repetições para o mesmo evento.

Figura 17– Focos de queimadas acumulados mensais, para o ano de 2010, registrados pelo Banco de Dados de Queimadas (BDQUEIMADAS), no estado do Pará.



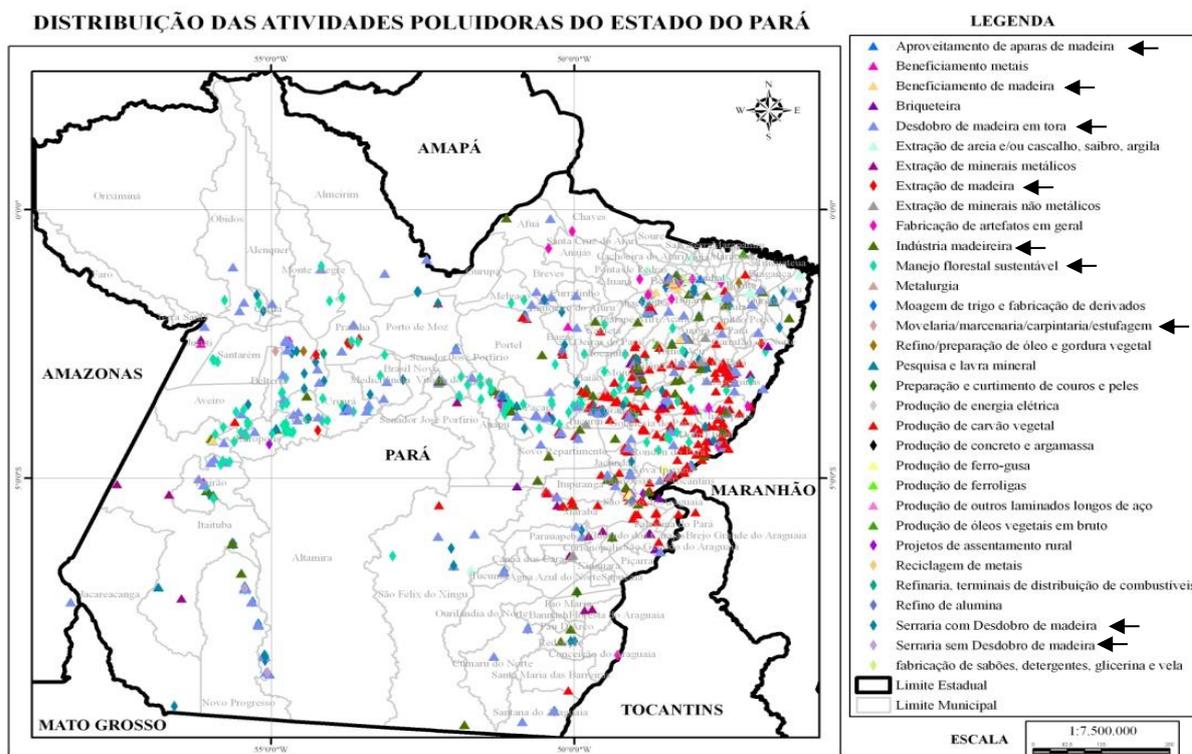
Fonte: INPE (2010).

OBS: A figura (A) refere-se ao número de focos para o mês de junho, a (B) para julho, a (C) agosto, a (D) setembro, a (E) outubro e, finalmente, a (F) para novembro do ano de 2010. As cores dos símbolos constantes das imagens referem-se aos diferentes satélites utilizados para detecção dos focos de fogo e o tom mais escuro, em preto, a um aglomerado de dados, formado em função do tamanho da figura. Fonte: INPE, 2010, imagens transformadas em arquivos Kmz para Google Earth.

4.4 MAPEAMENTO DAS INDÚSTRIAS NO PARÁ

A Figura 18 revela a distribuição de 1.400 estabelecimentos referentes a 32 atividades econômicas, existentes no estado do Pará até o ano de 2010, sendo consideradas fontes potenciais poluidoras, emissoras de CO e de MP à atmosfera. Esse mapeamento é parte integrante do projeto *Rede de Monitoramento de Eventos Extremos da Amazônia* (REMAM), e foi elaborado tendo como base o Sistema Integrado de Monitoramento e Licenciamento Ambiental da Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SIMLAM-SEMA/PA). Todas as tipologias de interesse, abrangidas por esta dissertação, foram contempladas nesse levantamento. Pela análise do mapa visualiza-se a existência de atividades industriais em todas as mesorregiões do Estado, com concentração significativa nas mesorregiões Metropolitana de Belém, Nordeste e Sudeste do Pará (Figura 18). A parte central do Sudoeste do Pará desponta também como uma região de significativa concentração de atividades econômicas. Evidencia também a predominância das atividades de produção de carvão vegetal, nas mesorregiões Nordeste e Sudeste paraense (triângulos em vermelho) e indústrias florestais que abrangem a de produção madeireira (triângulos em vários tons de azul, verde, laranja, losangos azul e marrom claro).

Figura 18– Distribuição das atividades econômicas potencialmente poluidoras distribuídas no estado do Pará.



Fonte: Estudos elaborados pela Rede de Monitoramento de Eventos Extremos da Amazônia (REMAM).

Merecem destaques também as atividades extrativas, que englobam as minerações de ferro, cobre, níquel, bauxita e caulim, existentes e em operação no Estado. Inclui, também, as extrações de materiais utilizados na construção civil ou em obras de infraestrutura, tais como areia, seixo e brita, que são também importantes dentro do contexto de emissões de material particulado para a atmosfera e que se localizam, predominantemente, nas mesorregiões Sudeste, com maior concentração, e Nordeste paraense (Figura 18). A mesorregião Sudoeste paraense destaca-se com a mineração garimpeira de ouro.

De acordo com o Guia Industrial do Pará, editado pela Federação das Indústrias do Estado do Pará (FIEPA, 2013), as atividades extrativas, ou seja, atividades relacionadas à mineração de minerais metálicos e não metálicos, estão localizadas na mesorregião Sudeste paraense totalizam 48% do total das atividades em operação no Estado, seguida da mesorregião Nordeste, com 18,6%. As indústrias florestais encontram-se concentradas, predominantemente, nas mesorregiões Nordeste (38,5%) e Sudeste (21,6%), (Guia Industrial do Pará, 2013) e dados do IBGE 2010 mostram que desde 1988 a maioria (cerca de 87%) da produção de madeira em tora na região Norte ocorre no estado do Pará, o que representa 45% do total produzido, nesta região. Todas estas tipologias industriais são classificadas como fontes antropogênicas, estacionárias e específicas, responsáveis por emissões atmosféricas, compostas, dentre outras substâncias, por $MP_{(2,5)}$ e CO, que se constituem em focos desta pesquisa, devido ao seu potencial de contaminação do ar e de provocar efeitos adversos à saúde humana e ao meio ambiente.

4.5 RESULTADOS DAS CONCENTRAÇÕES DE CO E DE $MP_{(2,5)}$ SIMULADAS PELO MODELO CATT-BRAMS

As emissões de CO e $MP_{(2,5)}$ provenientes de fontes antropogênicas (industriais e de queimadas da biomassa vegetal), foram simuladas através do modelo CATT-BRAMS, onde foram inseridos os dados de fogo ocorridos no estado do Pará, derivados por sensoriamento remoto e disponibilizados pelo CPTEC/INPE. O período selecionado para a integração dos resultados destes dois compostos atmosféricos abrangeu os meses de junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro do ano de 2010, (Figuras 19 e 20) com campos de concentração acumulado mensal das emissões de material particulado, com diâmetro aerodinâmico abaixo de $2,5\mu m$, e de CO, em cinco níveis

verticais de pressão (1000, 925, 850, 500 e 200 hPa), expressos em unidades de $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ para $\text{MP}_{(2,5)}$ e ppb para o CO.

A análise destes resultados passou, para efeito desta dissertação, por uma abordagem geral das concentrações simuladas, na tentativa de se montar um cenário mais sintético e criar uma base mais consolidada e necessária para o desenvolvimento e discussões dos resultados e fechamento em conclusões e recomendações.

4.5.1 Análise da variação espacial e temporal das concentrações de CO e de $\text{MP}_{(2,5)}$ simuladas

4.5.1.1 Variação espacial das concentrações de CO

No mês de junho (Figura 19A), as concentrações de CO variaram de 500 a 30.000 ppb, do extremo norte da mesorregião do Baixo Amazonas à região Sudoeste do Pará, no nível de 1000 hPa (próximo à superfície, aproximadamente a 120 m de altitude), com os maiores valores de concentrações localizados em pequena parte da mesorregião Sudoeste do Estado. Esse cenário permaneceu inalterado no nível de 925 hPa (aproximadamente 700 m de altitude) (Figura 19B), enquanto que em 850 hPa (aproximadamente 1.800 m de altitude), a variação das concentrações diminuiu para menos de 1.000 ppb (pequena parte no extremo norte da mesorregião do Baixo Amazonas) à 10.000 ppb, permanecendo as mesorregiões Sudeste e Sudoeste do Pará com maiores concentrações do gás analisado para este mês (Figura 19C). Em 500 hPa (aproximadamente 5.500 m de altitude) houve diminuição do gradiente da concentração de CO (Figura 22D), cuja variação foi de 3.000 a 10.000 ppb, nas mesorregiões Sudeste e Sudoeste do Estado, porém com aumento da área de abrangência das concentrações de maiores valores (de 5.000, 7000 e 10.000 ppb). Em 200 hPa (próximo à 12.000 m de altitude) a variação foi praticamente nula, com concentração de 10.000 ppb ao longo de todo o Estado, à exceção de uma pequena parcela na parte superior esquerda da mesorregião Sudeste, onde a concentração de CO atingiu valores de até 30.000 ppb (Figura 19E).

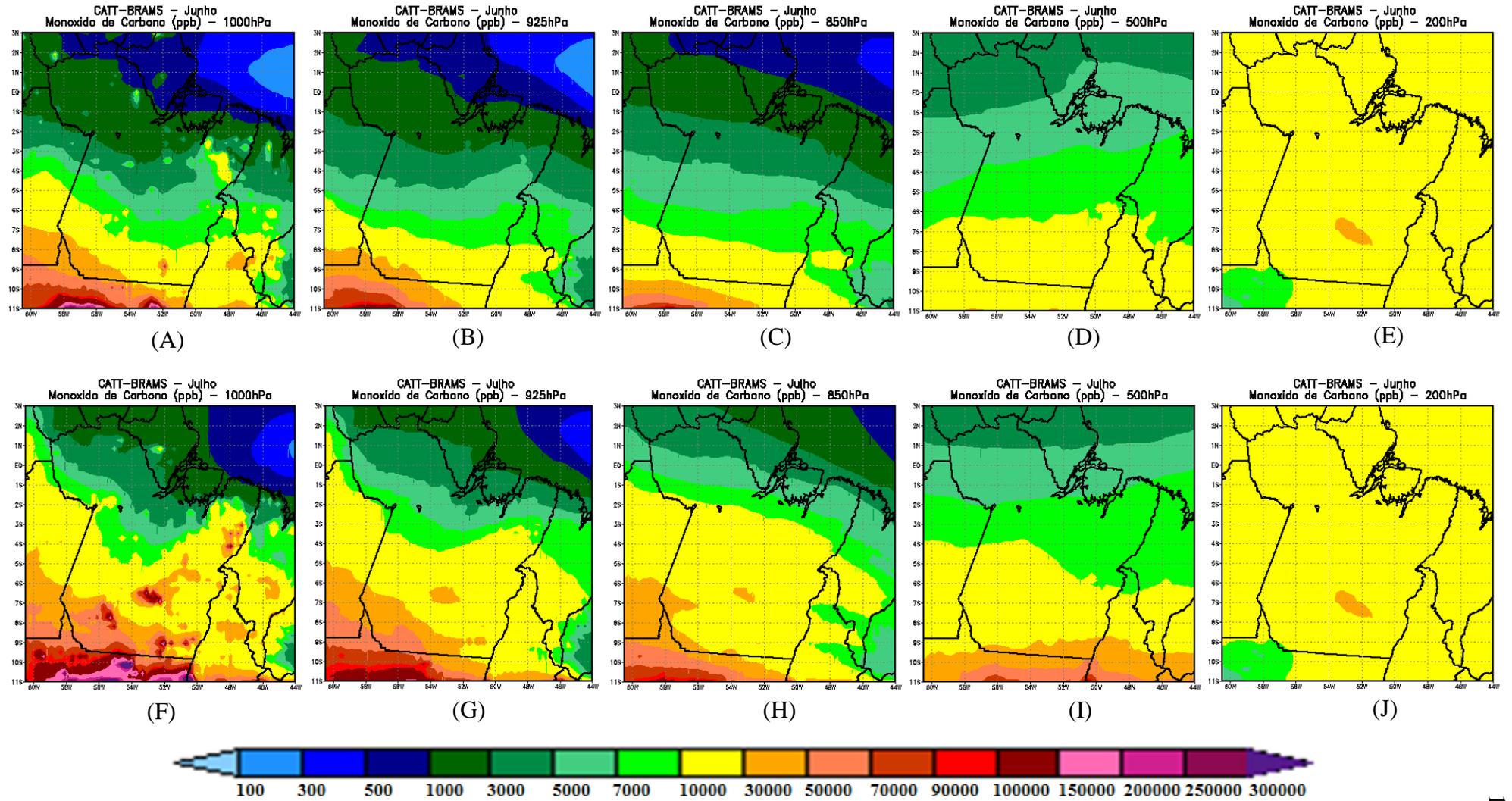
A mesorregião Sudoeste paraense destacou-se, neste mês de junho, por ter apresentado a concentração de CO, ao nível do solo, em 1000 hPa, de 30.000 ppb, (30 ppm), ultrapassando o valor máximo permitido (VMP) pela legislação ambiental que é de 9 ppm, para 8 h de exposição.

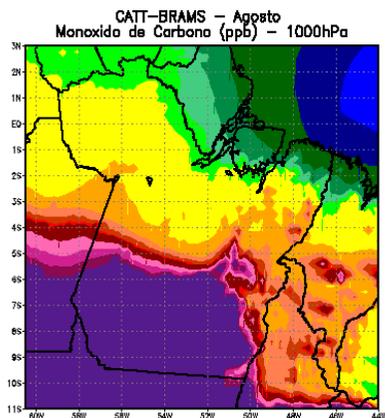
No mês de julho, no nível de pressão de 1000 hPa (Figura 19F), houve elevação das concentrações de CO, em relação ao mesmo nível do mês de junho, que variaram de

1.000 à 70.000 ppb do norte do Baixo Amazonas ao sul do Estado, abrangendo as mesorregiões Sudoeste e Sudeste. No nível de 925 hPa (Figura 19G) as concentrações de CO variaram de 3.000 até 50.000 ppb e, em 850 hPa (Figura 19H), o gradiente e as concentrações de CO diminuíram, apresentando valores mínimos de 3.000 e máximos de 30.000 ppb, permanecendo, praticamente inalteradas, até o nível de 500 hPa (Figura 19I). Em 200 hPa (Figura 19J) observou-se diminuição maior no gradiente das concentrações de CO, porém com elevação dos valores mínimos, que variaram de 10.000 a 30.000 ppb. As mesorregiões Sudeste e Sudoeste ainda predominaram apresentando as maiores concentrações de CO.

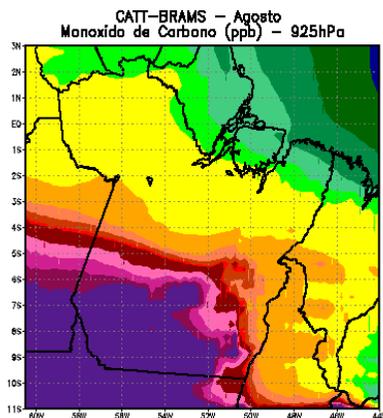
Neste mes, os VMP pela legislação ambiental de 35 e 9 ppm para 1 h e 8h de exposição, respectivamente, para concentração de CO na atmosfera, em 1000 hPa, foram ultrapassados nas mesorregiões Sudoeste e Sudeste paraense.

Figura 19– Acumulados mensais de Monóxido de carbono (CO) simulados no CATT-BRAMS, nas alturas de 1000, 925, 850, 500 e 200hPa.

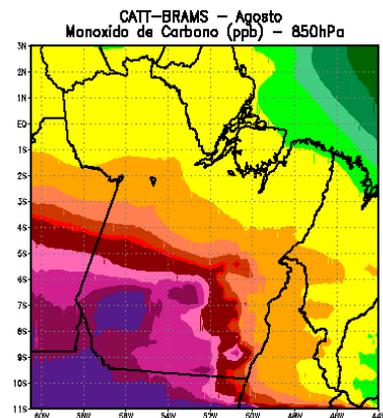




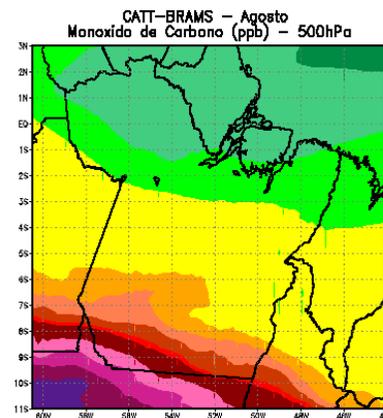
(K)



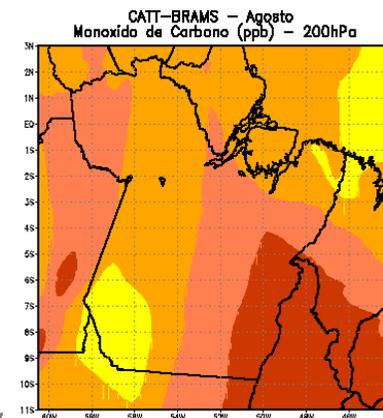
(L)



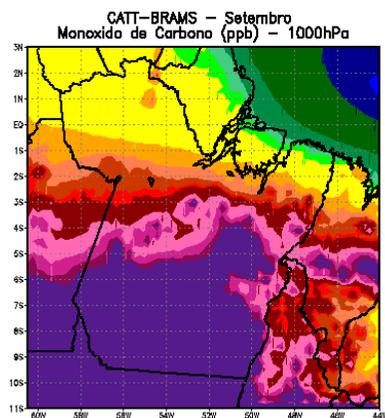
(M)



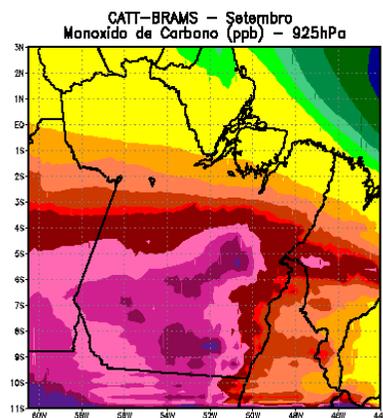
(N)



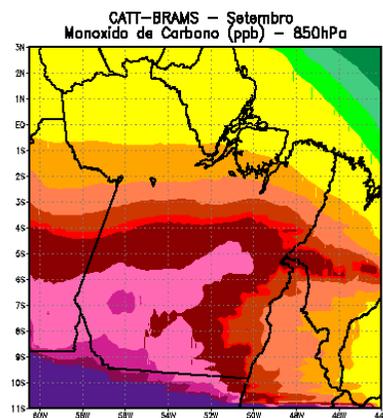
(O)



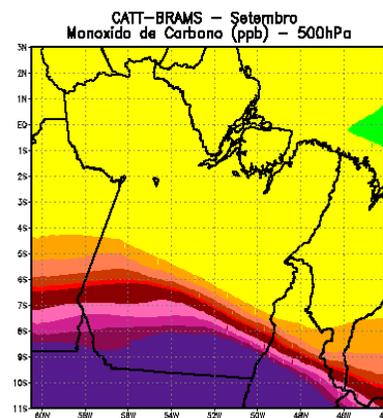
(P)



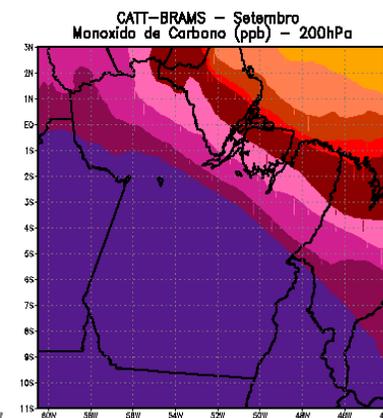
(Q)



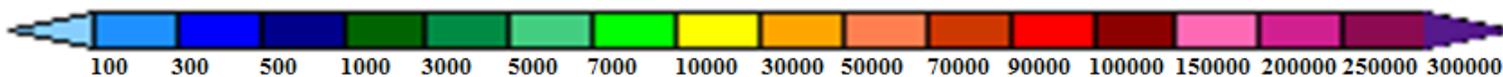
(R)

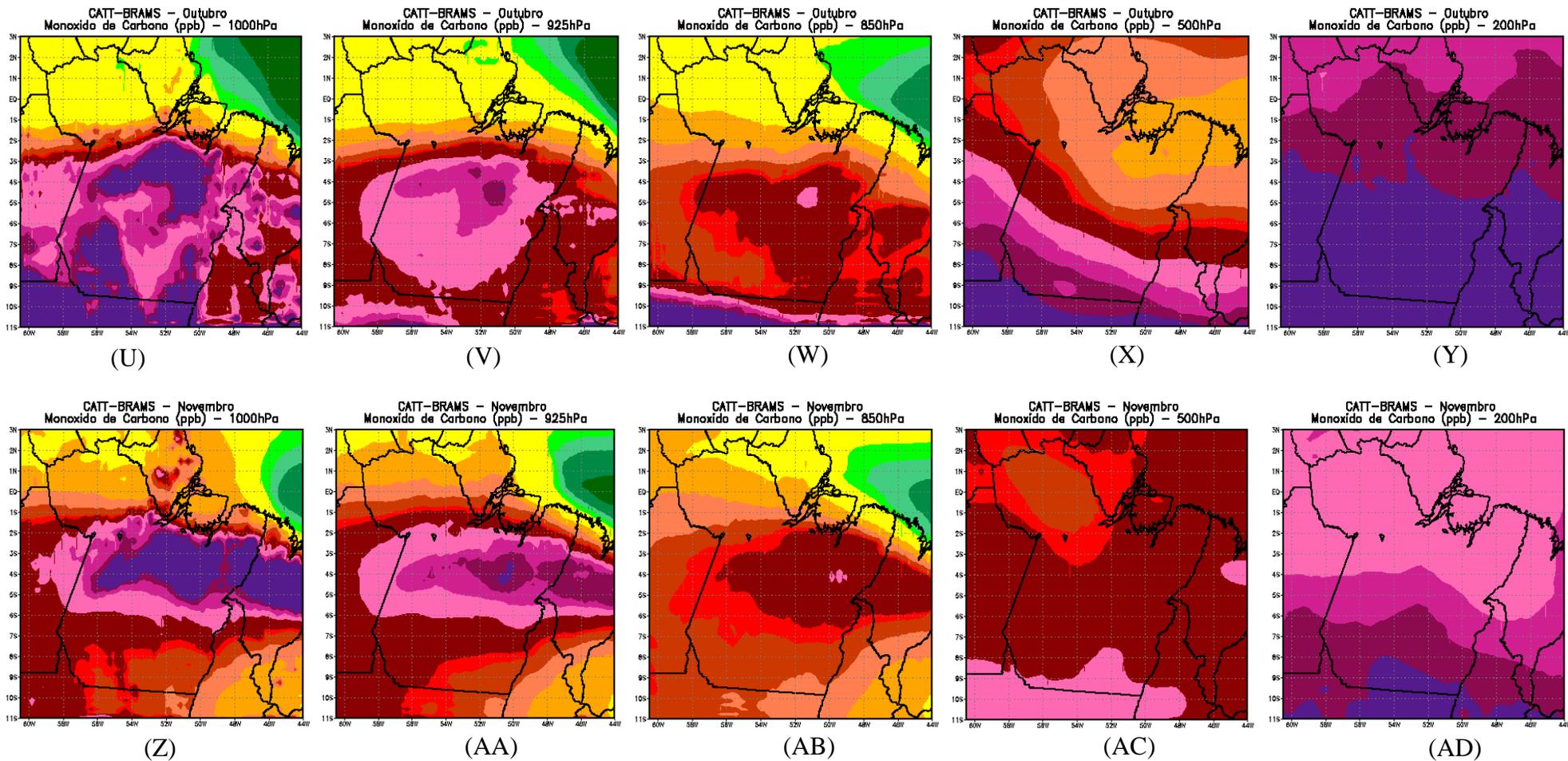


(S)



(T)





Fonte: Elaborado pela autora

Em agosto de 2010, comparativamente aos meses de junho e julho, o cenário apresentado em termos de qualidade do ar se agravou, e os resultados das simulações realizadas indicaram:

- Elevação no gradiente das concentrações médias de CO, no nível de 1000 hPa (Figura 19K), que variaram de 1.000 ppb nas mesorregiões Nordeste e do Marajó, até 300.000 ppb na Sudoeste e Sudeste do Estado;
- Em 925 hPa (Figura 19L), elevação das concentrações mínimas de CO, atingindo valores de 7.000 ppb em pequena parte da mesorregião do Baixo Amazonas, e manutenção dos valores das concentrações mais elevadas em 300.000 ppb, na parte sul das mesorregiões Sudoeste e Sudeste do Estado;
- Similarmente ao nível de 925 hPa, em 850 hPa (Figura 19M), houve elevação nos valores mínimos das concentrações de CO, que atingiram 10.000 ppb, e manutenção nos valores das concentrações mais elevadas de 300.000 ppb, juntamente com variações na área de abrangência da pluma, na região Sudoeste do Estado;
- Diminuição no gradiente das concentrações de CO, no nível de 500 hPa (Figura 19N), bem como nas concentrações de maiores valores. Estas concentrações atingiram valores de 30.000 até 150.000 ppb;
- Em 200 hPa (Figura 19O), tanto as concentrações médias de CO, quanto a área de abrangência da pluma de poluente, tiveram expressiva elevação, quando se compara com o mesmo período e altitude dos meses de junho e julho. Variaram de 10.000 ppb em pequena parcela ao sul da mesorregião Sudoeste, até 70.000 ppb, na Sudeste paraense.

Neste mês, a qualidade do ar das mesorregiões Sudeste e Sudoeste paraense, no nível de 1000 hPa, atingiu níveis críticos. As concentrações de CO ultrapassaram, aproximadamente 8 vezes o VMP de 35 ppm, para 1 hora de exposição e 33 vezes o valor de 9 ppm, para 8 h de exposição. As mesorregiões do Baixo Amazonas e parte da Nordeste paraense também se destacaram, durante este mês, com concentrações de CO acima do VMP de 9 ppm para 8 h de exposição. Com isso, pode-se observar e salientar o grave e iminente risco de haver problemas à saúde humana e ao meio ambiente, principalmente, nas mesorregiões Sudeste e Sudoeste paraense.

Em Setembro, em comparação com o mês de agosto, houve maior deterioração da qualidade do ar, com as concentrações de CO atingindo os valores de:

- 7.000 ppb em uma pequena parte da mesorregião do Marajó e Nordeste, até valores superiores a 300.000 ppb nas mesorregiões Sudoeste, Sudeste e, também em parte da Nordeste do Estado, no nível de pressão de 1000 hPa (Figura 19P). Em comparação com o mês de agosto, houve uma elevação na área de abrangência das concentrações de maiores valores.
- 10.000 ppb na parte superior das mesorregiões do Baixo Amazonas e Nordeste do Estado, à 250.000 ppb nas regiões Sudeste e Sudoeste paraense, com um pequeno fragmento, na região Sudeste, com concentração de até 300.000 ppb, no nível de 925 hPa (Figura 19Q). Curioso observar que houve diminuição em relação ao nível de 1000 hPa, tanto no gradiente quanto nos valores das concentrações de CO;
- Variação de 10.000 à 200.000 ppb, em 850 hPa (Figura 19R), com a diminuição dos gradientes e das concentrações de CO nas mesorregiões Sudeste e Sudoeste do Estado, porém mantendo-se, ainda, com as maiores concentrações.
- 10.000 até 300.000 ppb, em 500 hPa (Figura 19S), com elevação do gradiente das concentrações de CO, em comparação com o nível de 850 hPa, porém com menor área de abrangência, quando se observa as concentrações de maiores valores, na parte inferior das mesorregiões Sudeste e Sudoeste do Estado.
- 100.000 ppb até 300.000 ppb em toda região estudada, porém com maior área de abrangência da pluma de contaminantes de maiores concentrações, nas mesorregiões Baixo Amazonas, Sudoeste e Sudeste do Estado, em 200 hPa (Figura 19T). Importante salientar a expressiva elevação nos menores valores das concentrações de CO, que atingiram 100.000 ppb.

Em setembro, todas as mesorregiões apresentaram valores superiores ao VMP de 9 ppm para 8 h de exposição. As mesorregiões Sudeste, Sudoeste e parte da Nordeste paraense, no nível de 1000 hPa, continuaram apresentando valores elevados e cenários críticos de poluição atmosférica.

Em outubro, a análise dos resultados das simulações demonstrou:

- Comparativamente ao mês de setembro, no nível de 1000 hPa, as concentrações médias de CO mantiveram-se com os mesmos gradientes: variaram de 10.000 em pequena parte das mesorregiões Nordeste e Marajó e parte da região Baixo Amazonas, até 300.000 ppb, em pequena parcela da mesorregião Sudoeste do Estado (Figura 19R). Entretanto, observou-se uma variação maior na parte central

das regiões Sudoeste e Sudeste do Pará, com valores mínimos de 150.000 e máximos de 300.000 ppb;

- Em 925 hPa (Figura 19U) o cenário se manteve constante nas partes superiores das mesorregiões Nordeste e Baixo Amazonas, porém no restante do Estado, houve uma diminuição no gradiente das concentrações de CO, com valores variando de 10.000 até 250.000 ppb para esta mesma altura. Foi detectado, pelo modelo, um pequeno fragmento na parte superior à direita da região Sudeste do Estado com concentração de até 250.000 ppb (Figura 19U);
- Em 850 ppb a configuração se manteve constante nas mesorregiões Nordeste e Baixo Amazonas e, no restante do Estado, houve diminuição do gradiente das concentrações, que variaram de 30.000 a 150.000 ppb de CO (Figura 19V);
- Cenário similar foi apresentado no nível de 925 hPa, inclusive com a detecção da presença de um fragmento com concentração superior à 150.000 ppb, na parte superior à direita da mesorregião Sudeste do Estado (Figura 19V);
- Em 500 hPa (Figura 19X) as concentrações variaram de 30.000 à 250.000 ppb, aumentando o gradiente de variação. Um aspecto interessante que ocorreu neste nível chamou a atenção: elevação das concentrações de CO nas mesorregiões Nordeste e Baixo Amazonas, com valores variando de 30.000 a 50.000 ppb;
- Em 200 hPa houve uma significativa elevação das concentrações de CO que variaram de 200.000 ppb no extremo norte da mesorregião do Baixo Amazonas, até 300.000 ppb, na Sudeste do Estado (Figura 19X).

Durante este mês de outubro, houve uma alteração no cenário da qualidade do ar no Estado, no nível de 1000 hPa. Todas as mesorregiões apresentaram valores superiores ao VMP de 9 ppm para 8 h de exposição. As mesorregiões Sudeste, Sudoeste e Nordeste paraense, ainda se despontam com maiores valores das concentrações de CO.

No mês de novembro, observou-se:

- Em 1000 hPa (Figura 19Z) o gradiente das concentrações de CO manteve-se inalterado com relação ao mesmo nível do mês anterior, porém com menor abrangência espacial das concentrações, que se elevaram de 150.000 até 300.000 ppb, nas porções superiores das mesorregiões Sudeste e Sudoeste do Estado. Com

isso, estas “porções superiores” passaram a se caracterizar como as mais impactadas pelas emissões de CO, em substituição à parte inferior destas mesmas mesorregiões, que apresentaram as concentrações variando de 70.000 a 100.000 ppb. Observou-se, também, uma elevação nas concentrações de CO no extremo norte da mesorregião do Baixo Amazonas. No geral, durante este mês, as concentrações de CO variaram de 10.000 (pequena porção no extremo norte da mesorregião do Baixo Amazonas) até 300.000 ppb;

- Em 925 hPa (Figura 19AA) o cenário de qualidade do ar foi alterado pela diminuição da área de abrangência das concentrações de 300.000 ppb, na parte superior da mesorregião Sudeste e Sudoeste e aumento na de 100.000 ppb, na parte inferior da Sudoeste do Estado. Assim, as concentrações de CO, neste nível, variaram de 10.000 (pequena porção na mesorregião do Baixo Amazonas) a 300.000 ppb (pequeno fragmento na mesorregião Sudeste).
- Em 850 hPa (Figura 19AB) comparativamente ao nível de 925 hPa, o gradiente das concentrações de CO diminuiu, variando de 10.000 (pequena porção na mesorregião do Baixo Amazonas) até 150.000 ppb, em um pequeno fragmento com concentrações de 150.000 ppb na parte superior da região Sudeste do Estado;
- No nível de 500 hPa (Figura 19AC) nova configuração do Estado com relação ao comportamento das concentrações de CO, que continuaram com os seus gradientes diminuindo em relação ao nível anteriormente descrito, com o limite mínimo atingindo valores de 70.000 e máximos até 150.000 ppb;
- Observou-se também elevação das concentrações de CO nas mesorregiões do Baixo Amazonas, Marajó e parte inferior das Sudeste e Sudoeste. Em 200 hPa (Figura 19AD), comparativamente ao nível de pressão de 500 hPa, houve aumento nos valores e no gradiente das concentrações de CO, cuja variação foi de 150.000 até 300.000 ppb.

Em novembro, a qualidade do ar das partes superiores das mesorregiões Sudeste, Sudoeste e parte da Nordeste paraense, denominada de região do Xingu, no nível de 1000 hPa, atingiram níveis elevados de poluição atmosférica. As concentrações de CO ultrapassaram, aproximadamente de 4 a 8 vezes o VMP de 35 ppm, para 1 h de exposição e de 17 a 33 vezes o valor de 9 ppm, para 8 h de exposição.

Destacam-se as mesorregiões do Baixo Amazonas e Marajó paraense apresentando concentrações de CO, aproximadamente 3 vezes o VMP de 9 ppm para 8 h de exposição. Com isso, pode-se observar e salientar o grave e iminente risco de haver problemas à saúde humana e ao meio ambiente, na faixa da região do Xingu, nas mesorregiões Sudeste e Sudoeste do Estado.

Existe grande diferença na concentração de CO conforme a altitude atmosférica e principalmente em relação aos meses do ano em estudo. Quando se analisa as altitudes mais baixas (1000 a 850 hPa) observou-se a importância do estado do Mato Grosso na produção de CO, que adentra o estado do Pará, aumentando, respectivamente, do mês de junho até outubro, onde são observadas as maiores concentrações de CO (Figura 19). Contudo, no mês de novembro, para as mesmas altitudes da atmosfera, percebe-se a elevada concentração de CO advindas dos Estados localizados à leste do estado do Pará. É importante notar que setembro é o mês que marca o final da estação seca nos estados ao sul do Pará e novembro é o final da estação seca nos estados a leste do Pará (Figura 15). É também importante ressaltar a grande concentração de carvoarias de produção de carvão vegetal na região Sudeste, principalmente próximo ao limite com o estado do Maranhão (Figura 18).

4.5.1.2 Variação temporal das concentrações de (CO)

Para efeitos de comparação no nível de 1000 hPa que mais influencia o ecossistema, os resultados da Figura 19 estão apresentados na Tabela 9, onde se tem as concentrações de CO nos meses de junho a novembro, ou seja no período mais seco do ano. Observou-se que, tanto os valores, quanto a área de abrangência das concentrações de CO se elevaram progressivamente e significativamente mês a mês, em toda a região do Estado e, em todas as altitudes estudadas existe um aumento considerável na concentração de CO.

Tabela 9– Síntese das concentrações mensais de CO em ppb por nível de pressão (hPa) estudado

Meses	Níveis de Pressão – hPa				
	1000	925	850	500	200
Junho	500 – 30.000	500 – 30.000	1.000 – 10.000	3.000 – 10.000	10.000 – 30.000
Julho	1.000 – 70.000	3.000 – 50.000	3.000 – 30.000	3.000 – 30.000	10.000 – 30.000
Agosto	1.000 – 300.000	7.000 – 300.000	10.000 – 300.000	3.000 – 150.000	10.000 – 70.000
Setembro	7.000 – 300.000	10.000 – 300.000	10.000 – 200.000	10.000 – 300.000	100.000 – 300.000
Outubro	10.000 – 300.000	10.000 – 250.000	10.000 – 150.000	30.000 – 250.000	200.000 – 300.000
Novembro	10.000 – 300.000	10.000 – 300.000	10.000 – 150.000	70.000 – 150.000	150.000 – 300.000

Fonte: Elaborado pela autora

Na altitude mais baixa de 1000 hPa, ou seja próximo ao nível do solo, observou-se aumento dos valores mínimos e máximos da concentração do CO (Tabela 9), sendo que em junho (Figura 19A), primeiro mês do período seco, as concentrações variaram de 500 a 30.000 ppb, passando por 1.000 a 70.000 ppb em julho (Figuras 19F), 1.000 a 300.000 ppb em agosto (Figuras 22K), 7.000 a 300.000 ppb em setembro (Figuras 19P), 10.000 a 300.000 ppb em outubro (Figuras 19U), e 10.000 (extremo norte da mesorregião do Baixo Amazonas) a 300.000 ppb em novembro (Figuras 19Z).

Em 925 hPa os valores mínimos e máximos da concentração de CO aumentaram até o mês de setembro, sendo que após este período os valores mínimos mantiveram-se constantes e os valores máximos decaíram de 50.000 ppb entre o mês de setembro e outubro e voltaram a crescer no mês de novembro (Tabela 9). No mês de junho, (Figura 19B) o cenário das concentrações de CO atingiram valores que variaram de 500 até 30.000 ppb, passando por 3.000 a 50.000 ppb em julho (Figuras 19G), 7.000 ppb até 300.000 ppb em agosto (Figuras 19L), 10.000 a 300.000 ppb em setembro (Figuras 19Q), 10.000 ppb até valores máximos de 250.000 ppb em outubro (Figuras 19V), e, finalmente, em novembro (Figuras 19AA) as concentrações variaram de 30.000 a 250.000 ppb, com um pequeno fragmento de pluma na mesorregião Nordeste (parte superior) de concentração de 300.000 ppb.

Em 850 hPa os valores mínimos de CO aumentaram de julho até agosto, passando de 1.000 ppb para 10.000 ppb, e depois se mantiveram com este valor até novembro. Já os valores máximos de CO passaram de 10.000 ppb em junho para 300.000 ppb em agosto, voltando a diminuir em setembro e se mantendo constante em 150.000 ppb nos meses de outubro e novembro (Tabela 9). O mês de junho (Figura

19C) apresentou concentrações de CO variando de 1.000 até 10.000 ppb e, em julho (Figura 19H) de 3.000 a 30.000 ppb, atingindo valores de 10.000 até 300.000 ppb no mês de agosto (Figura 19M). Em setembro (Figura 19R) as concentrações variaram de 10.000 a 200.000 ppb, em outubro (Figura 19W), os valores variaram de 10.000 ppb e máximos de 150.000, permanecendo neste patamar no mês de novembro (Figura 19AB).

Em 500 hPa a concentração mínima de CO se manteve constante em 3.000 ppb para o período compreendido entre os meses de junho a agosto, aumentando até 70.000 ppb em novembro. Entretanto, a concentração máxima de CO aumentou de 290.000 ppb de junho até setembro, caindo para 150.000 ppb em novembro (Tabela 9). O mês de junho (Figura 19D) apresentou concentrações de CO variando de 3.000 até 10.000 ppb, atingindo, em julho (Figura 19I), a concentração máxima de 30.000 ppb e a mínima permaneceu constante em 3.000 ppb. No mês de agosto (Figura 19N) os valores das concentrações variaram de 3.000 ppb até 150.000 ppb e, em setembro (Figura 19S) de 10.000 a 300.000 ppb. Em outubro (Figura 19X) os valores mínimos da concentração de CO atingiram valores de 30.000 ppb e máximos de 250.000 ppb e, finalmente, em novembro (Figura 19AC) as concentrações variaram de 70.000 ppb até 150.000 ppb.

Em 200 hPa as mínimas concentrações de CO permaneceram relativamente elevadas entre os meses de junho a agosto, aumentando, consideravelmente, nos meses de setembro e outubro e diminuindo, um pouco, no mês de novembro. Entretanto, as máximas ficaram constantes nos meses de junho e julho, aumentando no mês de agosto e permanecendo elevada até o mês de novembro (Tabela 9). O mês de junho (Figura 19E) apresentou concentrações de CO variando de 10.000 até 30.000, permanecendo constante até o mês de julho (Figura 19J). Em agosto (Figura 19J), os valores das concentrações variaram de 10.000 ppb até 70.000 ppb e, em setembro (Figura 19T), de 100.000 a 300.000 ppb. Em outubro (Figura 19Y) as concentrações de CO atingiram valores mínimos de 200.000 ppb e máximos de 300.000 ppb e, finalmente, em novembro (19AD), as concentrações variaram de 150.000 até 300.000 ppb.

As concentrações simuladas de CO na atmosfera ultrapassaram o valor máximo permitido pela legislação ambiental brasileira, de 9 ppm, para 8 h de exposição, continuamente nas mesorregiões Sudeste e Sudoeste paraense, a partir do mês de junho de 2010, até o final do período estudado, em novembro.

O valor máximo permitido de 35 ppm para 1 h de exposição, foi ultrapassado, cada vez em maiores proporções, mês a mês, a partir do mês de julho, até novembro de 2010.

Tal cenário se deve a vários fenômenos ocorridos no Estado, neste período, dentre eles os mais importantes e que puderam ser observados pelos estudos e simulações realizadas foram: diminuição do índice pluviométrico, intensificação das queimadas que normalmente ocorrem na região de estudo e a contribuição de plumas de emissões de CO provenientes das regiões circunvizinhas ao Estado.

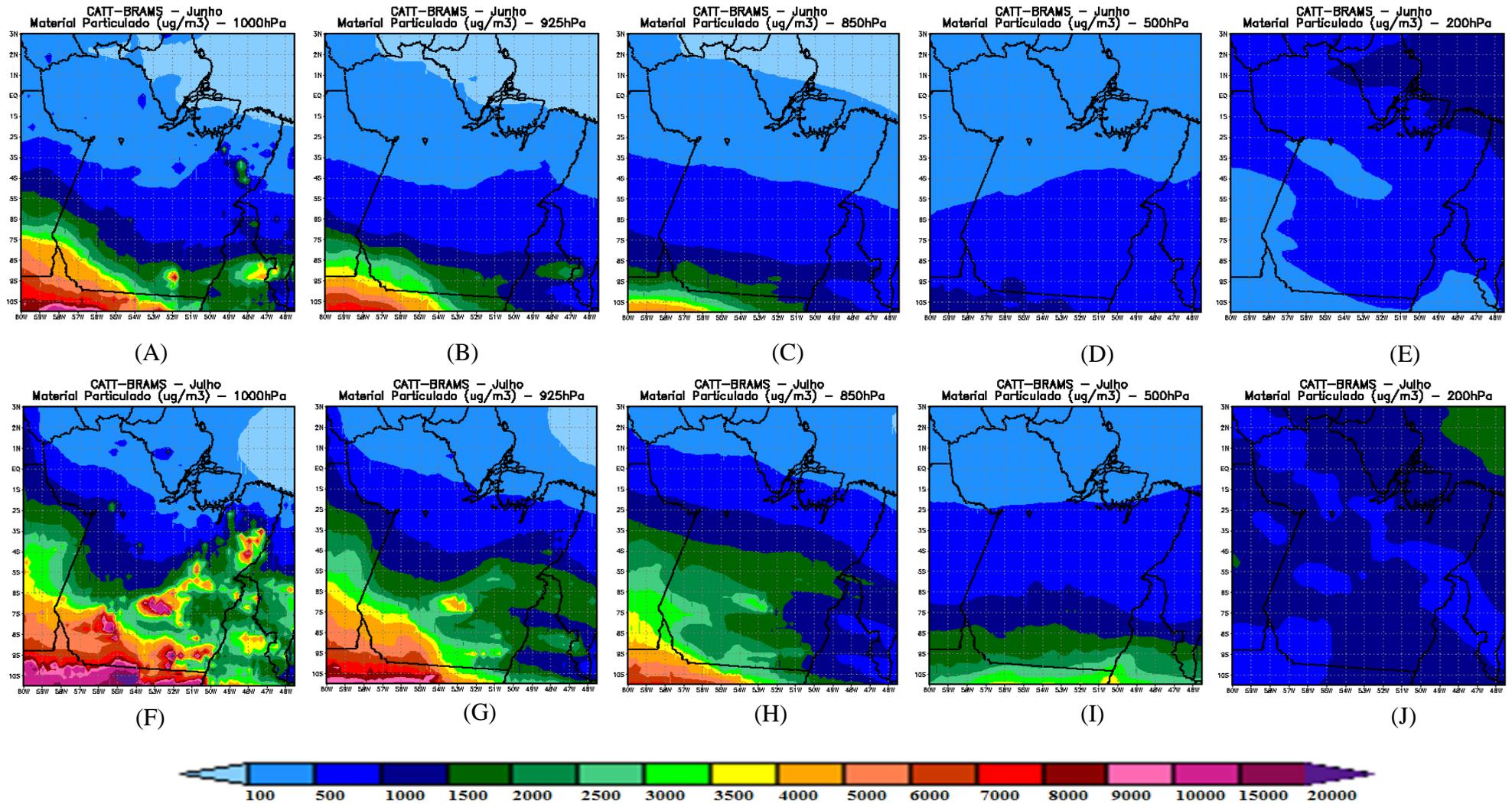
4.5.1.3 Variação espacial das concentrações de $MP_{(2,5)}$

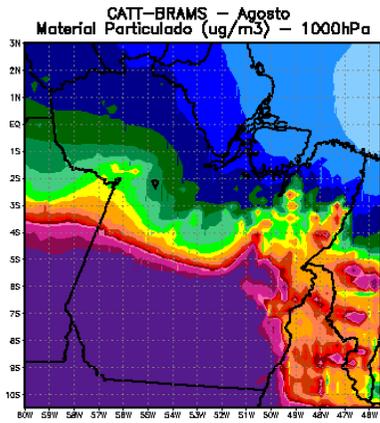
O mês de junho (Figura 20A) evidenciou variação de 100 a 4.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ nas concentrações médias simuladas de $MP_{(2,5)}$, do extremo norte da mesorregião do Baixo Amazonas e, em pequena parcela na parte superior do Marajó e Nordeste paraense, à região Sudoeste do Pará, no nível de 1000 hPa, com os maiores valores de concentrações localizados em pequena parte da mesorregião Sudoeste do Estado. No nível de 925 hPa (Figura 20B) houve diminuição no gradiente e nos valores das concentrações de $MP_{(2,5)}$, que variaram de 100, em pequena parte ao norte das mesorregiões do Baixo Amazonas e Marajó, até o valor de 3.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$, ainda na mesorregião Sudoeste do Pará. No nível de 850 hPa, (Figura 20C) a variação das concentrações continuaram a diminuir, atingindo valores de 100 (pequena parte no extremo norte da mesorregião do Baixo Amazonas) até 1.500 $\mu\text{g.m}^{-3}$ nas mesorregiões Sudoeste e parte da Sudeste. Em 500 hPa (Figura 20D) houve significativa diminuição do gradiente da concentração de $MP_{(2,5)}$, cuja variação foi de 100 a 1.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ na maior parte do Estado. Em 200 hPa (Figura 20E) o cenário se inverteu: as concentrações de $MP_{(2,5)}$ se elevaram na maior parte do Estado do Pará atingindo valores de 100 a 1.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Importante destacar a elevação das concentrações nas mesorregiões do Baixo Amazonas, Nordeste e Marajó que, normalmente, mantinham valores mais baixos de até 500 $\mu\text{g.m}^{-3}$.

Comparando-se os valores simulados das concentrações de $MP_{(2,5)}$, ao nível do solo, em 1000 hPa com o valor diário máximo permitido (VMP) pela legislação ambiental brasileira de 150 $\mu\text{g.m}^{-3}$, concluiu-se que as mesorregiões Sudeste, Sudoeste e parte da Nordeste paraense apresentaram, durante todo o mês de junho, valores acima do padrão legal estabelecido.

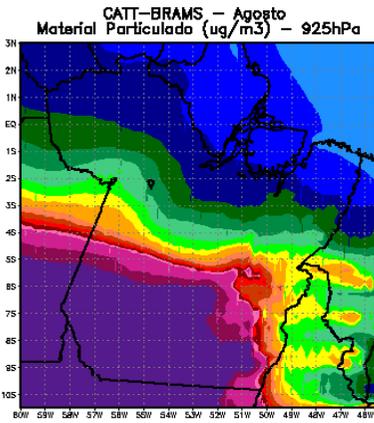
Importante destacar que a concentração de $MP_{(2,5)}$ na parte inferior da mesorregião Sudoeste paraense atingiu valores, aproximadamente 25 vezes maior do que o padrão legal diário permitido, de $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Figura 20 – Acumulados mensais de material particulado (MP(2,5) simulados no CATT-BRAMS.

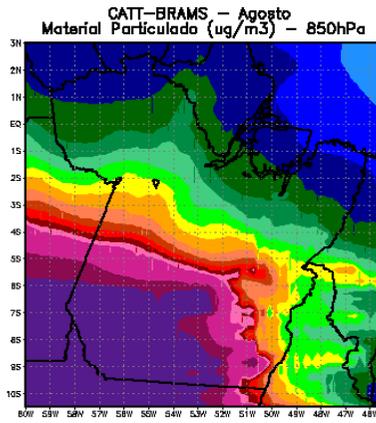




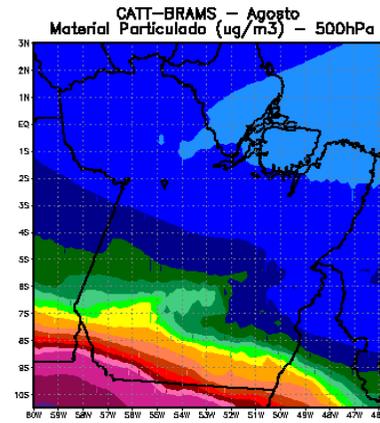
(K)



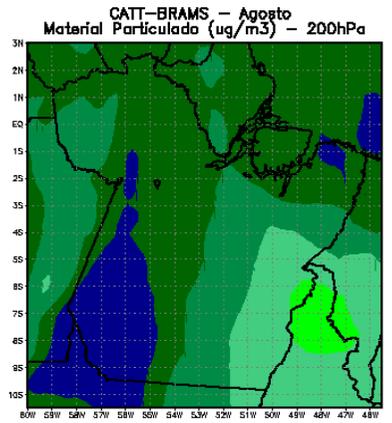
(L)



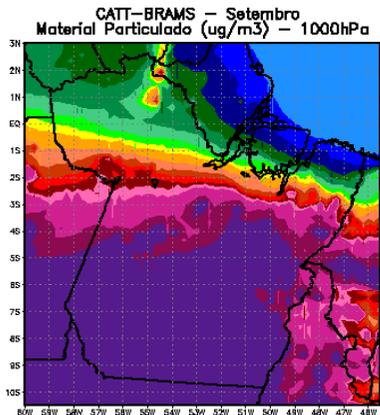
(M)



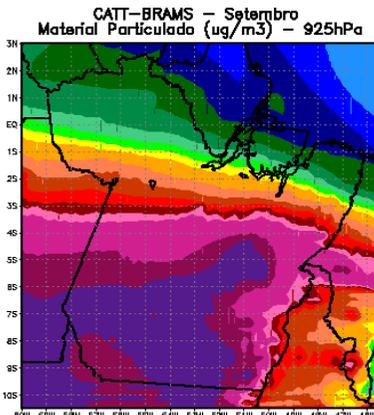
(N)



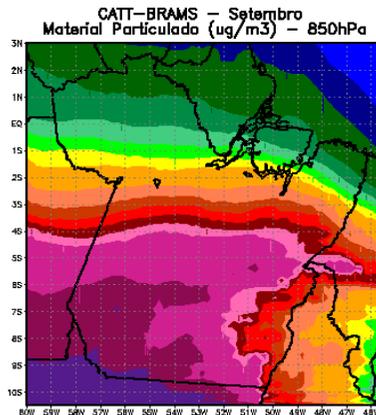
(O)



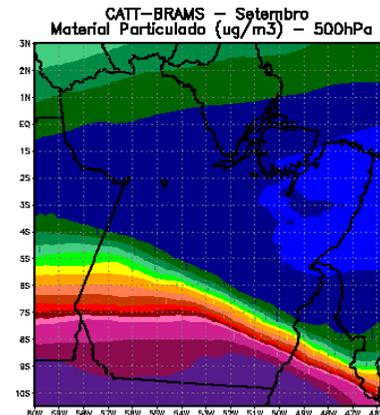
(P)



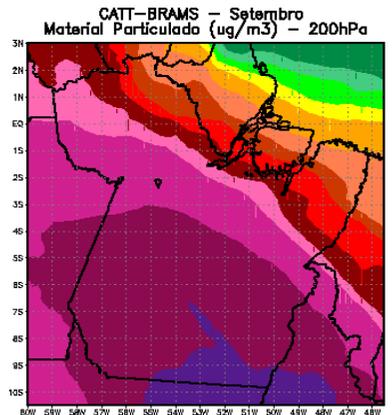
(Q)



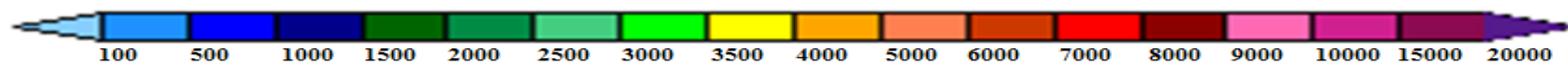
(R)

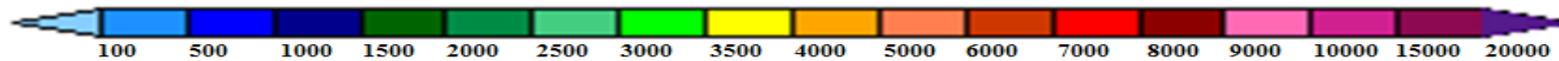
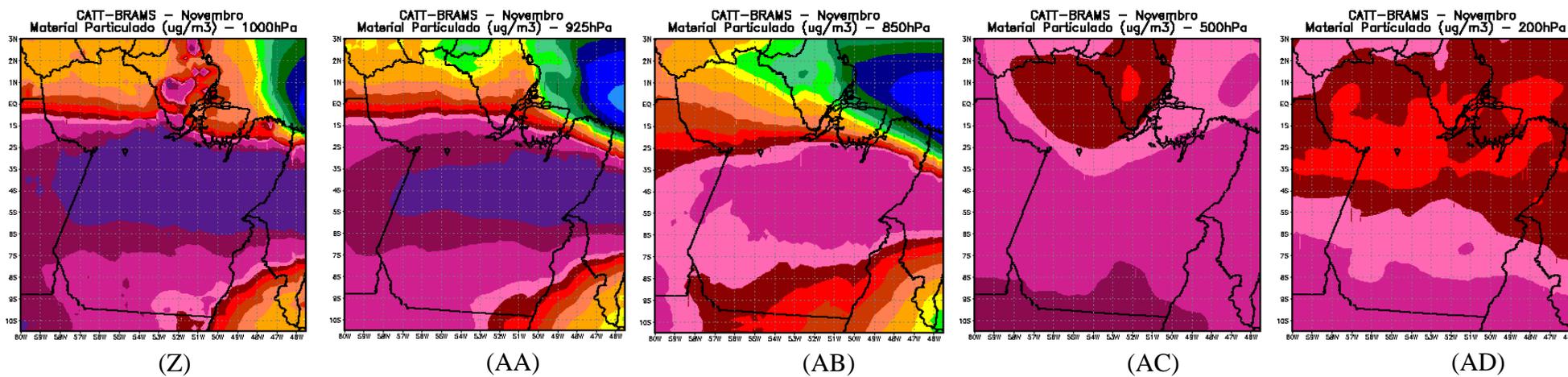
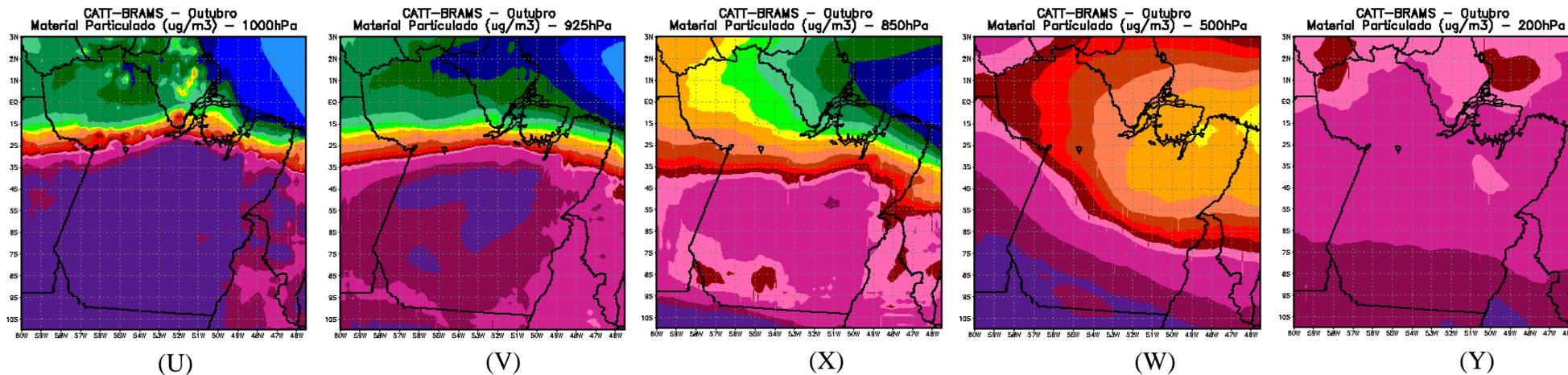


(S)



(T)





Fonte: Elaborado pela autora

No mês de julho, também no nível de pressão de 1000 hPa (Figura 20F), houve uma elevação das concentrações de $MP_{(2,5)}$, em relação ao mesmo nível do mês de junho, que variaram de 100 a 10.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ do norte do Baixo Amazonas ao sul do Estado, abrangendo as mesorregiões Sudoeste e Sudeste. Destacaram-se áreas localizadas nas mesorregiões Sudoeste, Sudeste e Nordeste do Pará com as maiores concentrações de até 10.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. No nível de 925 hPa (Figura 20G) houve diminuição nos valores máximos das concentrações de $MP_{(2,5)}$, que variaram de 100 até 6.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ e, em 850 hPa (Figura 20H), houve diminuição do gradiente das concentrações de $MP_{(2,5)}$ que continuaram a apresentar os mesmos valores mínimos de 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, porém os seus valores máximos se limitaram a 3.500 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Em 500 hPa (Figura 20I) o gradiente e os valores das concentrações de $MP_{(2,5)}$ continuaram a decrescer variando de 100 a 2.500 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, na parte inferior à esquerda da mesorregião Sudeste do Estado. Similarmente ao nível de 200 hPa no mês de junho as concentrações de $MP_{(2,5)}$ aumentaram nas mesorregiões do Baixo Amazonas, Nordeste e parte da Sudoeste e Sudeste e diminuíram na parte inferior destas duas últimas mesorregiões. A variação global neste nível foi de 100 a 10.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

As concentrações de $MP_{(2,5)}$, ao nível do solo, em 1000 hPa, nas mesorregiões Sudeste, Sudoeste e quase a totalidade da Nordeste paraense apresentaram, durante todo o mês de julho, valores acima do padrão legal estabelecido de 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Estas concentrações de $MP_{(2,5)}$, na região próxima ao limite com o Mato Grosso, nas mesorregiões Sudoeste e Sudeste paraense, chegaram a atingir valores, aproximadamente 60 vezes maiores, do que este padrão legal diário permitido, de 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Em agosto, comparativamente aos meses de junho e julho, o cenário apresentado em termos de qualidade do ar se agravou. As concentrações médias de $MP_{(2,5)}$, no nível de 1000 hPa (Figura 20K) apresentaram elevado gradiente, variando de 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ em pequenas parcelas das mesorregiões do Nordeste e Marajó, até 20.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, com uma grande abrangência na região Sudoeste e Sudeste do Estado. Em 925 (Figura 20L) e 850 hPa (Figura 20M) esta condição permaneceu praticamente inalterada, com pequena variação no gradiente das concentrações e na área de abrangência da pluma, na região Sudoeste do Estado, e elevação das concentrações ao norte da região Nordeste, Baixo Amazonas e Marajó. A variação das concentrações estudadas em 925 hPa foi de 500 a 20.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ e, em 850 hPa de 1.000 a 20.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Em 500 hPa (Figura 20N),

observou-se significativa diminuição na variação das concentrações de $MP_{(2,5)}$ de $100 \mu\text{g.m}^{-3}$, em pequena parcela no Baixo Amazonas, até $10.000 \mu\text{g.m}^{-3}$ na parte inferior da região Sudoeste do Estado. No nível de 200 hPa (Figura 20O), tanto as concentrações de $MP_{(2,5)}$, quanto a área de abrangência da pluma de poluente tiveram uma expressiva elevação, quando se compara com o mesmo período e altitude dos meses de junho e julho. Variaram de 1.000 até $3.000 \mu\text{g.m}^{-3}$, praticamente, em todas as mesorregiões do Estado, com parte das mesorregiões do Baixo Amazonas, Marajó, Sudeste e Nordeste paraense apresentando maiores concentrações.

As concentrações de $MP_{(2,5)}$, ao nível do solo, em 1000 hPa, nas mesorregiões Sudeste, Sudoeste, Baixo Amazonas e quase a totalidade da Nordeste paraense apresentaram, durante todo o mês de agosto, valores acima do padrão legal estabelecido de $150 \mu\text{g.m}^{-3}$.

Estas concentrações de $MP_{(2,5)}$ nas mesorregiões Sudoeste e Sudeste paraense, também, chegaram a atingir valores, aproximadamente 60 vezes maiores do que o já referenciado padrão legal.

O mês de setembro apresentou-se como um mês cuja qualidade do ar atingiu elevados valores em, praticamente, todo o território paraense: as concentrações de $MP_{(2,5)}$, em 1000 hPa (Figura 20P), com elevados gradientes, variaram de 500 em pequena parte das mesorregiões do Marajó e Nordeste do Estado, até valores superiores a $20.000 \mu\text{g.m}^{-3}$ nas regiões Sudoeste, Sudeste e parte da Nordeste. Em 925 hPa (Figura 20Q), as concentrações de $MP_{(2,5)}$ variaram de 1.500 a $20.000 \mu\text{g.m}^{-3}$ e, em 850 hPa (Figura 20R), a variação foi de 1.500 a $20.000 \mu\text{g.m}^{-3}$, em pequena parte da região Sudoeste do Estado. Em 500 hPa (Figura 20S), a concentração de menor valor de $MP_{(2,5)}$ diminuiu e a de maior manteve-se inalterada. A variação foi de 500 a $20.000 \mu\text{g.m}^{-3}$. As mesorregiões Sudeste e Sudoeste do Estado ainda se mantiveram na liderança, com as maiores concentrações de $MP_{(2,5)}$ simuladas. Em 200 hPa (Figura 20T) as concentrações elevaram-se em todas as mesorregiões do Estado e variaram de 5.000 a $20.000 \mu\text{g.m}^{-3}$.

Durante este mês, as concentrações de $MP_{(2,5)}$, ao nível do solo, em 1000 hPa, em todas as mesorregiões paraense apresentaram valores acima do padrão legal estabelecido de $150 \mu\text{g.m}^{-3}$, chegando a atingir, nas mesorregiões Sudoeste, Sudeste e parte da nordeste paraense valores até 60 vezes maiores do que este valor legal de referência.

Em outubro (Figura 20U), no nível de 1000 hPa, as concentrações de $MP_{(2,5)}$ variaram de 1.500 até o valor de 20.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ em, praticamente, todo o Estado. Destacou-se parte da mesorregião do Baixo Amazonas, pequena parcela do Marajó e Nordeste do Estado, que apresentaram as menores concentrações de $MP_{(2,5)}$. Em 925 hPa (Figura 20V) o cenário se manteve, praticamente, inalterado em partes das mesorregiões Nordeste e Baixo Amazonas, porém na mesorregião Sudeste, Sudoeste e Nordeste do Estado, houve diminuição na área de abrangência da maior concentração simulada de 20.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. As concentrações, neste nível, atingiram valores de 1.000 em pequena parte da mesorregião do Baixo Amazonas, até 20.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ na região central das mesorregiões Sudoeste e Sudeste. Em 850 hPa (Figura 20X) as concentrações de $MP_{(2,5)}$ variaram de 1.000 em pequena parcela da mesorregião Nordeste, até 10.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Em 500 hPa (Figura 20W) as concentrações tiveram um aumento em todas as mesorregiões do Estado, com relação ao nível anterior de 850 hPa e variaram de 3.500 a 20.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Um aspecto interessante que ocorreu neste nível chamou a atenção: significativa elevação das concentrações de $MP_{(2,5)}$ na região Nordeste e Baixo Amazonas do Estado, com valores variando de 4.000 a 8.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Em 200 hPa (Figura 20Y), houve uma significativa elevação das concentrações de $MP_{(2,5)}$, que variaram de 8.000, no extremo norte da mesorregião do Baixo Amazonas, até 15.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, na Sudeste e Sudoeste do Estado.

As concentrações de $MP_{(2,5)}$, ao nível do solo, em 1000 hPa, em todas as mesorregiões paraense apresentaram valores acima do padrão legal estabelecido de 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. As mesorregiões Sudoeste, Sudeste, parte da Nordeste e do Baixo Amazonas paraense apresentaram concentrações de $MP_{(2,5)}$ até 60 vezes maiores do que este valor legal de referência.

No mês de novembro, em 1000 hPa (Figura 20Z), o gradiente das concentrações de $MP_{(2,5)}$ variaram de 4.000 a 20.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. As porções superiores das regiões Sudeste e Sudoeste do Estado passaram a se caracterizar como as mais impactadas pelas emissões de $MP_{(2,5)}$, em substituição à parte inferior destas mesmas mesorregiões, cujas concentrações variaram de 9.000 a 15.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Observou-se, também, uma elevação nas concentrações de $MP_{(2,5)}$ no extremo norte da mesorregião do Baixo Amazonas, Marajó e Nordeste do Pará. Em 925 hPa (Figura 20AA) o cenário de qualidade do ar manteve-se praticamente inalterado com relação ao nível de 1.000 hPa, houve uma diminuição da área de abrangência das concentrações de 20.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, na parte

superior da região Sudeste e Sudoeste. Assim, as concentrações de $MP_{(2,5)}$, neste nível, variaram de 3.000 (parte da mesorregião do Baixo Amazonas, Marajó e Nordeste do Estado) a 25.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Em 850 hPa (Figura 20AB) o gradiente das concentrações de $MP_{(2,5)}$ diminuiu atingindo valores de 3.000 em parte da mesorregião do Baixo Amazonas, até 10.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$, na parte superior da região Sudeste e Sudoeste. No nível de 500 hPa (Figura 20AC) nova configuração do Estado com relação ao comportamento das concentrações de $MP_{(2,5)}$: diminuição do gradiente das concentrações que variaram de 8.000 até 15.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$, elevação das concentrações nas mesorregiões Baixo Amazonas, Marajó e Nordeste do Pará. Em 200 hPa (Figura 20AD), as concentrações de $MP_{(2,5)}$, variaram de 7.000 a 10.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Observou-se uma diminuição das concentrações de $MP_{(2,5)}$ nas mesorregiões Nordeste, como um todo, parte do Baixo Amazonas, Sudeste e Sudoeste do Estado.

Durante este mês, as concentrações de $MP_{(2,5)}$, ao nível do solo, em 1000 hPa, em todas as mesorregiões paraense, apresentaram valores acima do padrão legal estabelecido de 150 $\mu\text{g.m}^{-3}$. As maiores concentrações foram registradas nas partes superiores das mesorregiões Sudeste e Sudoeste do Estado, na região denominada de Xingu, chegando a atingir, valores até 60 vezes maiores do que este valor legal de referência.

4.5.1.4 Variação temporal das concentrações de $MP_{(2,5)}$

Avaliando-se a Tabela 10 pode-se perceber que na altura de 1000 hPa os valores máximos da concentração de $MP_{(2,5)}$ aumentaram até meados da estação seca, no mês de agosto, e mantiveram-se constantes durante os meses de setembro, outubro e novembro. Ao contrário, os valores mínimos de $MP_{(2,5)}$ mantiveram-se constantes até o mês de agosto, aumentando consideravelmente nos meses restantes. Em junho (Figuras 20A) as concentrações variaram de 100 a 4.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ (3.900 $\mu\text{g.m}^{-3}$ de incremento), passando por 100 a 10.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ em julho (Figuras 20F), 100 a 20.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ em agosto (Figuras 20K), 500 a 20.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ em setembro (Figuras 20P), 1.500 a 20.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ em outubro (Figuras 20U), e de 4.000 a 20.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ em novembro (Figuras 20Z).

Tabela 10– Síntese das concentrações mensais de $MP_{(2,5)}$ em $\mu\text{g.m}^{-3}$ por nível de pressão (hPa)

Meses	Níveis de Pressão – hPa				
	1000	925	850	500	200
Junho	100 – 4.000	100 – 4.000	100 – 1.500	100 – 1.000	100 – 1.000
Julho	100 – 10.000	100 – 6.000	100 – 3.500	100 – 2.500	500 – 1.000
Agosto	100 – 20.000	500 – 20.000	1.000 – 20.000	100 – 10.000	1.000 – 3.000
Setembro	500 – 20.000	1.500 – 20.000	1.500 – 20.000	500 – 20.000	5.000 – 20.000
Outubro	1.500 – 20.000	1.000 – 20.000	1.000 – 10.000	3.500 – 20.000	8.000 – 15.000
Novembro	4.000 – 20.000	3.000 – 20.000	3.000 – 10.000	8.000 – 15.000	7.000 – 10.000

Fonte: Elaborado pela autora

Em 925 hPa, as concentrações mínimas de $MP_{(2,5)}$ mantiveram-se constantes, com valores de $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ entre os meses de junho e julho, aumentando até $3.000 \mu\text{g.m}^{-3}$ em novembro. Similarmente à altitude de 1000 hPa, as concentrações máximas tiveram elevação significativa, de 4.000 para $20.000 \mu\text{g.m}^{-3}$ e, a partir do mês de agosto mantiveram-se constantes até o final do período, no mês de novembro (Tabela 10). No mês de junho (Figura 20B) as concentrações variaram de 100 até $4.000 \mu\text{g.m}^{-3}$. Em julho (Figura 20G) as concentrações de $MP_{(2,5)}$ variaram de 100 a $6.000 \mu\text{g.m}^{-3}$ e, no mês de agosto (Figura 20L) elevações nas concentrações levaram os valores mínimos para 500 até o máximo de $20.000 \mu\text{g.m}^{-3}$. Em setembro (Figuras 20Q) as concentrações variaram de 1.500 a $20.000 \mu\text{g.m}^{-3}$ e, em outubro (Tabela 10) apresentou concentrações de $MP_{(2,5)}$ variando de $1.000 \mu\text{g.m}^{-3}$ até valores máximos de $20.000 \mu\text{g.m}^{-3}$ e, finalmente, em novembro (Figuras 20AA) as concentrações variaram de 3.000 a $25.000 \mu\text{g.m}^{-3}$.

Como ocorreu no nível de 1000 hPa, em 850 hPa (Tabela 10) as concentrações mínimas de $MP_{(2,5)}$ mantiveram-se constantes, com valores de $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ entre os meses de junho e julho, atingindo o valor máximo de $3.000 \mu\text{g.m}^{-3}$ em novembro, último mês do período seco estudado. Os valores máximos atingiram o pico das concentrações de $MP_{(2,5)}$ nos meses de agosto e setembro (meses de maior número de focos de incêndio), atingindo valores de $20.000 \mu\text{g.m}^{-3}$, diminuindo e mantendo-se constante em $10.000 \mu\text{g.m}^{-3}$ nos meses restantes. O mês de junho (Figura 20C) apresentou concentrações de $MP_{(2,5)}$ variando de 100 até $1.500 \mu\text{g.m}^{-3}$ e, em julho (Figura 20H) de 100 a $3.500 \mu\text{g.m}^{-3}$ e, no mês de agosto (Figura 20M) elevações nas concentrações resultaram em valores de $1.000 \mu\text{g.m}^{-3}$ até $20.000 \mu\text{g.m}^{-3}$. Em setembro (Figura 20R) as concentrações

variaram de 1.500 a 20.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ e, em outubro (Figura 20W), de 1.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ e máximos de 10.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Finalmente, em novembro (Figura 20AB), as concentrações variaram de 3.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$, até 10.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$.

Em 500 hPa, as concentrações mínimas de $\text{MP}_{(2,5)}$ mantiveram-se constantes, com valores de 100 $\mu\text{g.m}^{-3}$ no período de junho até agosto, aumentando, progressivamente, e atingindo valores de 8.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$, em novembro. As concentrações máximas de CO elevaram-se significativamente, de 1.000 para 20.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ até o mês de outubro, diminuindo para 15.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$, no mês de novembro (Tabela 10). O mês de junho (Figura 20D) apresentou concentrações de CO variando de 100 até 1.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ e, em julho (Figura 20I) de 100 a 2.500 $\mu\text{g.m}^{-3}$. No mês de agosto (Figura 20N) os valores das concentrações variaram de 100 a 10.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Em setembro (Figura 20S) as concentrações de $\text{MP}_{(2,5)}$ atingiram valores de 500 a 20.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Observou-se, neste nível, a formação de um corredor de concentrações de 500 $\mu\text{g.m}^{-3}$ cercado por plumas de concentrações maiores de, até 1500 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Em outubro (Figura 20X) as concentrações de CO variaram de 3.500 a 20.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Finalmente, em novembro (Figura 20AC), as concentrações diminuíram variando de 8.000 até 15.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$.

Em 200 hPa as concentrações mínimas de $\text{MP}_{(2,5)}$ aumentaram, progressivamente, de 100 para 8.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$, durante os meses de junho até outubro, e diminuíram para 7.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$, em novembro. As concentrações máximas tiveram uma elevação significativa, de 1.000 para 20.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ até o mês de setembro e, a partir daí, diminuíram até atingir o valor de 10.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$, em novembro (Tabela 10). O mês de junho (Figura 20E) apresentou concentrações de $\text{MP}_{(2,5)}$ variando de 100 até 1.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$, passando por valores, em julho, (Figura 20J) de 500 a 1.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$. No mês de agosto (Figura 20O) os valores das concentrações variaram de 1.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ a 3.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ e, em setembro (Figura 23T), de 5.000 a 20.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Em outubro (Figura 20Y) as concentrações de $\text{MP}_{(2,5)}$ atingiram valores mínimos de 8.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ e máximos de 15.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Finalmente, em novembro (Figura 20AD), as concentrações variaram de 7.000 até 10.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$.

As concentrações simuladas de $\text{MP}_{(2,5)}$ na atmosfera ultrapassaram o valor máximo permitido pela legislação ambiental brasileira, de 150 $\mu\text{g.m}^{-3}$, para 24 h de exposição, continuamente, nas mesorregiões Sudeste e Sudoeste paraense, a partir do mês de junho de 2010, até o final do período estudado, em novembro.

Este valor máximo permitido foi ultrapassado, cada vez em maiores proporções, mês a mês, a partir do mês de julho, até novembro de 2010.

Tal cenário se deve a vários fenômenos ocorridos no Estado, neste período, dentre eles os mais importantes e que puderam ser observados pelos estudos e simulações realizadas foram: diminuição do índice pluviométrico, intensificação das queimadas que normalmente ocorrem na região de estudo e a contribuição de plumas de emissões de MP provenientes das regiões circunvizinhas ao Estado.

4.5.2 Análise geral do comportamento das emissões atmosféricas simuladas

As concentrações médias mensais simuladas de CO e de MP_(2,5) próximas à superfície do solo, isto é no nível de pressão de 1000 hPa, aumentaram progressivamente mês a mês e atingiram valores que variaram de 1.000 a 300.000 ppb, para o CO e de 100 a 20.000 µg.m⁻³ para MP_(2,5), a partir do mês de agosto, permanecendo com esta tendência de elevação até o final do período analisado, no mês de novembro.

As emissões provenientes de atividades industriais são contínuas, isto é são emitidas ao longo do ano, portanto as fontes emissoras associadas às queimas da biomassa vegetal, que ocorrem mais acentuadamente nos períodos secos (estações menos chuvosas) compreendidos, principalmente de julho a outubro em regiões tropicais, são as principais responsáveis pela elevação da concentração de material particulado inalável e de gases traços (como o CO) à atmosfera destas regiões. Além disto, os valores máximos apresentados indicam simulações sobre áreas com elevadas concentrações de focos de incêndio (FREITAS et al., 2005). De fato, esse cenário é comprovado pela ocorrência, no estado do Pará, de inúmeros focos de queima da biomassa vegetal neste período. Conforme descrito no item 4.3, o aumento da quantidade de focos de queima inicia-se em junho e tem o seu pico máximo em agosto e setembro a valores de 78.648 e 58.109 respectivamente (Tabela 8).

Ao se confrontar a distribuição espacial dos focos de queima apresentada pelas Figuras 19 e 20, com as Figuras 16 e 17, que demonstram as variações espaciais das concentrações de CO e de MP_(2,5), observou-se, claramente, que as regiões do Estado com maior incidência de focos de queimadas da biomassa vegetal são as que apresentaram maiores valores da concentração destes materiais, durante o período estudado. Assim, principalmente as mesorregiões Sudeste e Sudoeste, seguidas da Nordeste se caracterizam por maiores números de focos de incêndio e,

consequentemente, são as mais impactadas pelas emissões antropogênicas de CO e de MP_(2,5), e as mesorregiões do Baixo Amazonas e Marajó merecem também destaques como as regiões de menores incidências destas emissões.

Esses focos apresentam elevada relação com as práticas, ainda arcaicas e mais intensas no período de estiagem, aplicadas na região de estudo, no desenvolvimento das atividades da agricultura e pecuária, incluindo abertura e expansão das áreas agriculturáveis e renovação das áreas de pastagens, das atividades consideradas como predatórias no uso e ocupação do solo, com destaques para o desmatamento, queimadas propositais em regiões florestadas e exploração madeireira. Merecem destaques também, neste contexto, as emissões provenientes das atividades industriais, mais concentradas nas duas regiões anteriormente referenciadas (Figura 18).

Continuando as comparações, importante observar que tal cenário é também comprovado quando se faz referência às localizações das atividades industriais existentes no Estado, que são objeto da Figura 18. As mesorregiões Sudeste, Sudoeste e Nordeste, destacam-se como as que concentram maiores números de atividades industriais.

Nesse aspecto, ao observar o perfil vertical de CO e de MP_(2,5) no nível de 1.000 até 200 hPa, mês a mês (Figura 19 e 20), verificou-se que parte das emissões destes poluentes originadas na superfície, foi transportada do nível mais baixo para o nível imediatamente mais elevado, provocando a alteração da qualidade do ar na média e alta troposfera. A precipitação pluviométrica, que apresentou taxas decrescentes do mês de junho até outubro, influenciou na concentração de CO e de MP_(2,5), uma vez que, a sua taxa reduzida não promoveu a “limpeza da atmosfera” através da deposição úmida dos poluentes atmosféricos sob o solo (SCHWARTZ, 1989 e GORHAM, 1993). O índice pluviométrico reduzido, ou, praticamente zerado em algumas regiões do Estado, e o agravante do aumento dos focos de calor decorrentes das queimadas e incêndios florestais, associados à movimentação de massas de ar na região do Pará, que provocam ventos fortes neste período seco estudado, acabam por contribuir para manter em suspensão, na atmosfera, grande parte da concentração emitida de CO e de MP_(2,5) (FREITAS, 1999).

O CO é um óxido gasoso, inorgânico, de origem primária e, em algumas condições, de origem secundária. É inodoro, incolor, insípido, um pouco menos denso do que o ar, que não causa irritação e não é percebido pelos sentidos humanos. Exerce um papel importante na capacidade oxidante da atmosfera e é precursor na formação do

ozônio troposférico, considerado nocivo à saúde humana. É perigoso e tóxico respiratório, um asfixiante sistêmico devido a sua afinidade pela hemoglobina do sangue (BRANCO, 1995; GIODA, 2006).

O $MP_{(2,5)}$ é toda emissão atmosférica não gasosa, orgânica ou inorgânica, composta por uma mistura de partículas sólidas e líquidas em suspensão no ar atmosférico, que pode ser originado de uma variada gama de fontes, sejam elas primárias ou secundárias. Tem a capacidade de aumentar os efeitos fisiológicos dos gases presentes no ar, uma vez que as partículas menores podem conter mais substâncias tóxicas do que as partículas maiores (BRANCO, 1995; VASCONCELOS, 1996; CUNHA, 2002).

As partículas inaláveis finas são extremamente importantes sob o ponto de vista de sua deposição no trato respiratório humano, bem como por serem responsáveis pelo maior espalhamento de luz, isto é pela redução da visibilidade (WILLEKE e BARON, 1993).

Esse cenário possui elevado potencial de alterar, negativamente, a qualidade de vida da população, trazendo, como consequências, sintomas alérgicos e respiratórios, crônicos e agudos, ao organismo humano, cujos efeitos abrangem desde o desconforto até a morte, sendo as crianças e os idosos os mais suscetíveis (RADOJEVIC, 1998). Os efeitos à saúde ambiental podem ocorrer em nível local, regional e/ou global, pois de uma forma geral origina desequilíbrios em todos os ecossistemas.

4.6 DESCRIÇÃO DO TRANSPORTE E DISPERSÃO DAS EMISSÕES SIMULADAS

Retornando às descrições constantes do item 4.5.1, especificamente às Figuras 19 e 20 e Tabelas 9 e 10, observou-se que as simulações realizadas evidenciaram que, tanto as emissões de CO como as de $MP_{(2,5)}$, à superfície do solo, são transportadas para altitudes superiores, em concentrações elevadas, chegando a atingir, nos meses mais poluídos, os mesmos valores que foram emitidas.

As Figuras 21 e 22, que demonstram as concentrações simuladas de CO e de $MP_{(2,5)}$, no dia 8 de setembro, nos horários de 06, 09Z, 15Z e 21Z (ciclos diurno e noturno), nos níveis de pressão de 1000, 925, 850, 500 e 200 hPa, juntamente com os campos médios de vento, foram utilizadas para discutir este fenômeno. Essas datas se destacaram, no mês selecionado, pela incidência de maior número de focos de incêndio que, segundo registros do INPE, 2010 alcançaram valores de 19.445 focos.

Especificamente, as Figuras 21 e 22(A), 22(B) e 22(C), evidenciaram a evolução temporal nos horários de 06:00Z, 15:00Z e 21:00Z, das concentrações de CO, em ppb, e de MP_(2,5), em $\mu\text{g.m}^{-3}$, respectivamente, obtidas pelas simulações na grade 2 (24 km) e do campo médio do vento, em 1.000 hPa, (aproximadamente 120m acima da superfície). A associação entre os campos médios de ventos e das concentrações de CO e de MP_(2,5) é importante porque expressam a conexão entre os fluxos atmosféricos e o transporte e dispersão de gases e de material particulado na atmosfera (ZANNETTI, 1990; AYODE, 1996; MARTINS 2003).

Notou-se uma grande variabilidade na concentração simulada de CO, com valores de 25 até 3.000 ppb e de MP_(2,5) de 10 às concentrações superiores a 500 $\mu\text{g.m}^{-3}$, demonstrando proximidades dos focos de calor dos locais de monitoramento ou detecção dos focos de fogo, onde as plumas são mais intensas e ainda não significativamente dispersas. Porém, observou-se também o processo de dispersão/transporte em curso: áreas “poluídas” circunvizinhas ao Pará, cujas concentrações foram somadas às geradas em território paraense, foram advectadas pelos ventos alísios de leste para o oeste, em direção ao estado do Amazonas (FREITAS et al., 2009).

As concentrações simuladas de CO e de MP_(2,5), às 15UTC, (Figuras 21 e 22B), demonstraram perda de massa (veja a menor área de abrangência das maiores concentrações).

Vários podem ter sido os fatores que contribuíram para essa perda de massa: ação dos ventos alísios que transportaram massas de ar não poluídas vindas do oceano, e se misturaram às massas de ar poluídas da região de estudo; à interação com as massas de ar da atmosfera; à dispersão horizontal das emissões de CO e de MP_(2,5), segundo a orientação dos ventos, que ocorre tão logo são lançadas à atmosfera; à deposição úmida devido às chuvas que ocorreram no período e, finalmente, ao fenômeno da reatividade química entre os componentes da atmosfera que, provavelmente, resultaram na formação de outros componentes secundários, diminuindo assim, a concentração dos primários (SCHROEDER E LANE, 1988; SCHWARTZ, 1989; GORHAM, 1993).

As Figuras 21 e 22 (de D até O) demonstraram o transporte vertical das plumas de CO e de MP_(2,5), respectivamente, até o nível máximo de estudo de 200 hPa, isto é acima de 11 km de altitude. Esse transporte é devido à flutuação positiva que as emissões associadas principalmente às queimadas que ocorreram na região, adquire em função de possuírem temperaturas maiores do que às da atmosfera ambiente (FREITAS,

1999). Um fator importante identificado pelas simulações realizadas foi a similaridade dos perfis das concentrações simuladas de CO e de $MP_{(2,5)}$, desde a superfície até os níveis de 925 e 850 hPa. Tal cenário remete ao entendimento, segundo Freitas et al, (2005) e Freitas (1999), de que a mistura turbulenta da camada limite diurna se constitui de um aspecto que, também, transporta verticalmente as emissões de poluentes lançadas à atmosfera, tendendo a homogeneizá-los por toda a camada de mistura. Ainda, analisando cada nível, observou-se a advecção horizontal (AHRENS, 2005; MENDONÇA; DANI-OLIVEIRA, 2007), pelos ventos de Este, arrastando a pluma de CO e de $MP_{(2,5)}$, na direção do fluxo da atmosfera, que, conforme as Figuras, apontam para Oeste (925 hPa) e Noroeste (850 hPa). Alterações destes perfis foram identificadas nos níveis de 500 hPa e 200 hPa, o que é atribuído, principalmente, a processos convectivos úmidos que são intensos no Estado do Pará.

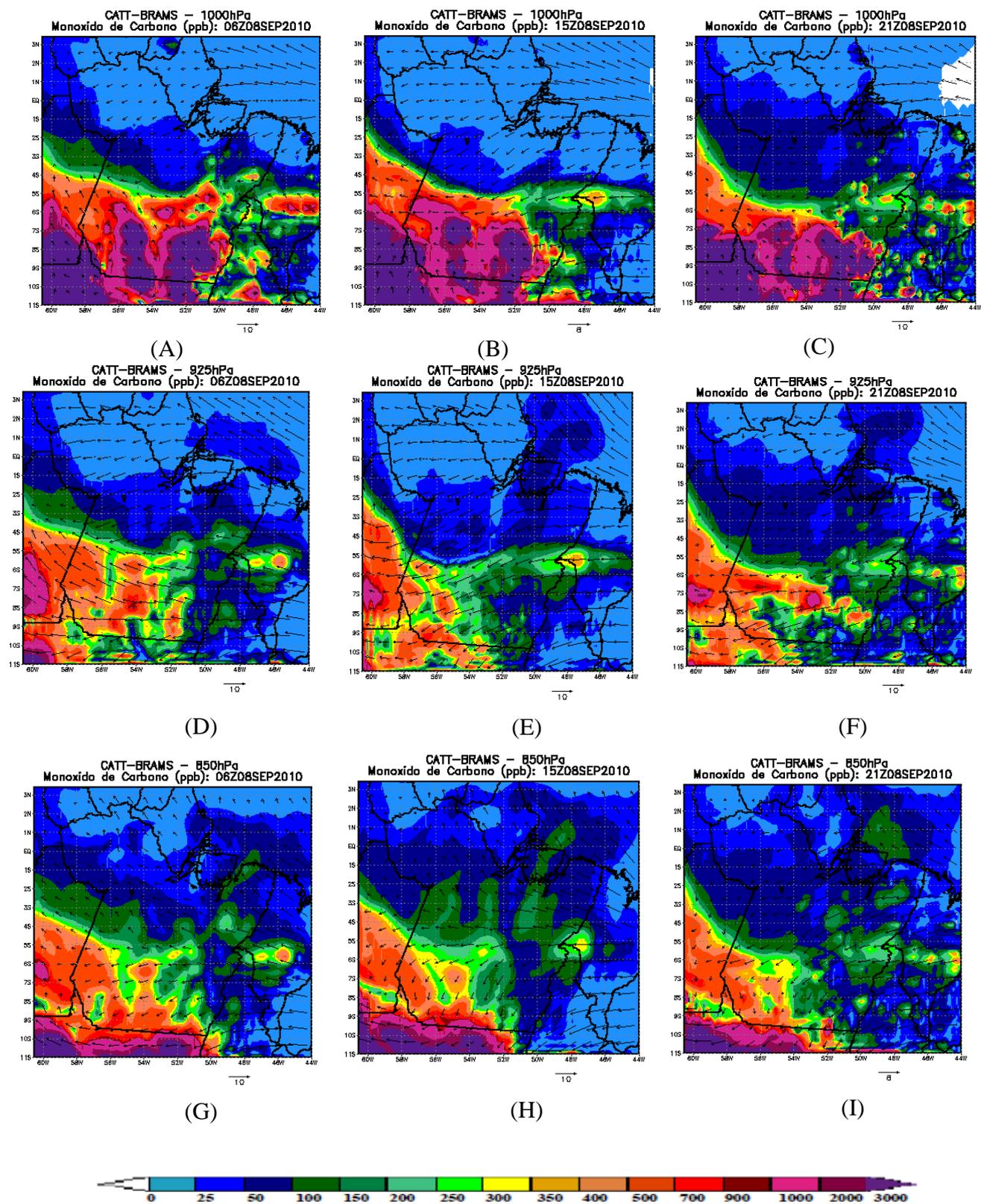
Os processos convectivos das regiões tropicais atuam no transporte da pluma de poluentes para altitudes mais elevadas na troposfera, após o rompimento da estabilidade no topo da CLP, promovendo a dispersão dos poluentes (FREITAS et al., 2000). Para este estudo, as alterações nos perfis das concentrações de CO e de $MP_{(2,5)}$ simuladas e a elevação da intensidade e direção dos ventos indicou o nível de 850 hPa, como o limite da camada planetária, durante o período estudado. Assim, essas correntes convectivas ascendentes levaram as emissões de CO e de $MP_{(2,5)}$, até o nível de 200 hPa.

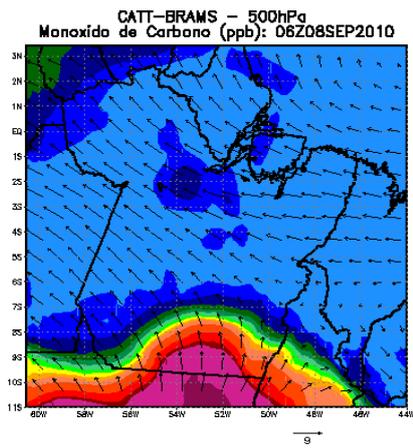
Uma vez desentranhadas e conduzidas até o nível de 500 hPa, as plumas de CO e de $MP_{(2,5)}$, na troposfera, foram submetidas ao escoamento horizontal para Oeste, pela ação de ventos mais intensos, vindos da parte central do Brasil (Figuras 21 e 22 J, K e L). Um aspecto importante ocorreu nesse nível: os ventos provenientes da parte central do Brasil, transportaram plumas do norte do Mato Grosso, até a região Sudeste e Sudoeste do Pará, com concentrações mais elevadas de 1.000 a 2.000 ppb para o CO e de 150 a 200 $\mu\text{g.m}^{-3}$, as quais juntando-se às concentrações já existentes na região, foram advectadas horizontalmente e conduzidas para Oeste.

Em 200 hPa, submetidas a velocidades do fluxos de ar bem mais intensos, as plumas de CO transportadas para este nível por processos convectivos, com concentrações bastante variadas (de 25 a 700 ppb), cuja abrangência teve uma elevação no período noturno, seguiram o escoamento do vento para Oeste. Importante observar, nesse nível, a formação do que os pesquisadores denominam de “corredores de gases traços” provenientes das queimadas, que ocorrem na região tropical. Os mesmos fenômenos aqui descritos ocorreram para as concentrações de $MP_{(2,5)}$.

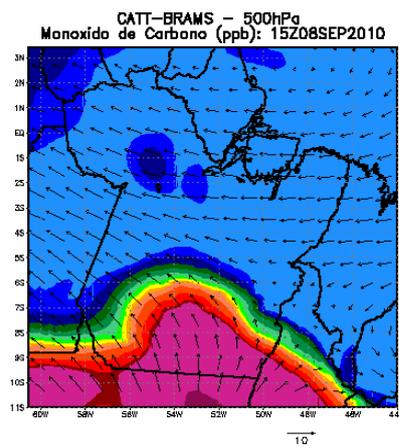
Esses corredores caracterizam-se por um fluxo de gases traços ou de material particulado entre duas camadas de concentrações de iguais valores (observar fluxo em azul de concentrações variando de 25 a 50 ppb, entre duas camadas em verde, com concentrações de 100 a 150 ppb, para o CO (Figuras 21M,N e O) e o fluxo em azul claro, entre dois fluxos de um azul mais escuro, para $MP_{(2,5)}$ (Figura 22O). A circulação de grande escala, que ocorre na troposfera, é responsável por transportar as plumas de fumaça produzidas pela queima de biomassa para regiões distantes do local onde foram emitidas, muitas vezes dispersando-as por todo o continente sul-americano e cobrindo milhares de quilômetros quadrados (FREITAS et al., 2005; ANDREAE et al., 2001).

Figura 21– Resultados das simulações horárias do monóxido de carbono(CO) para o dia 08 de setembro de 2010, em todas as altitudes analisadas.

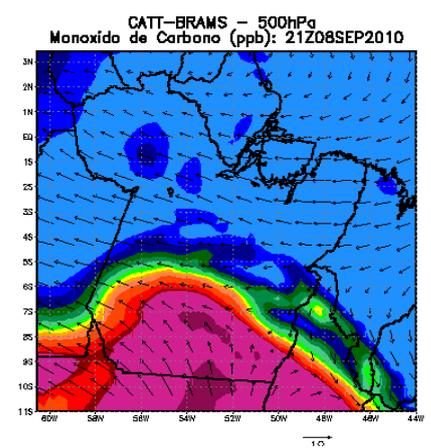




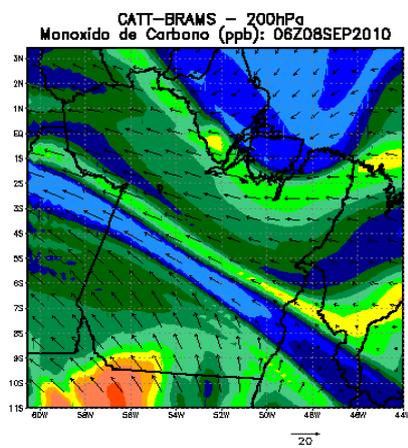
(J)



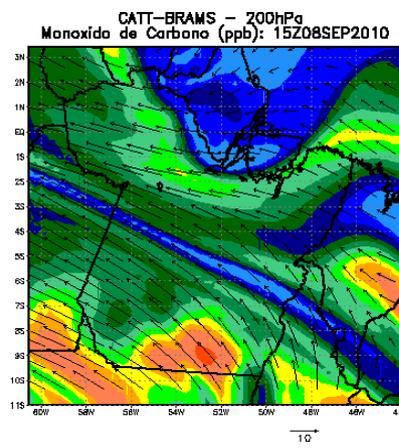
(K)



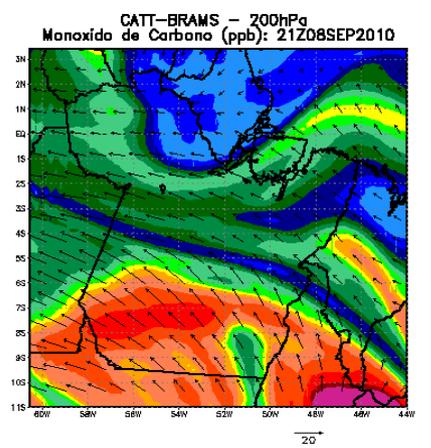
(L)



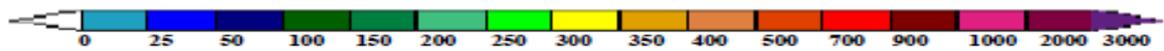
(M)



(N)

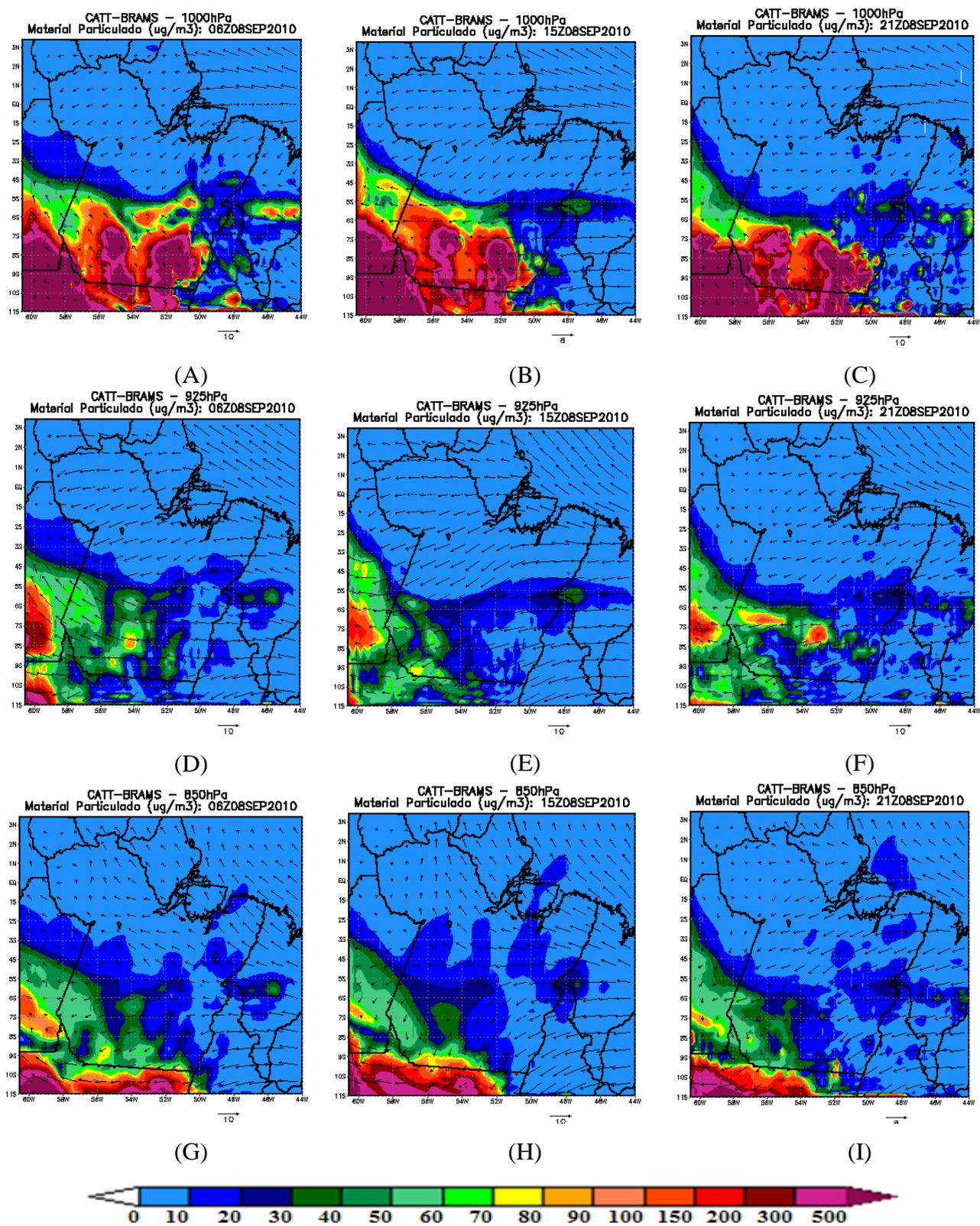


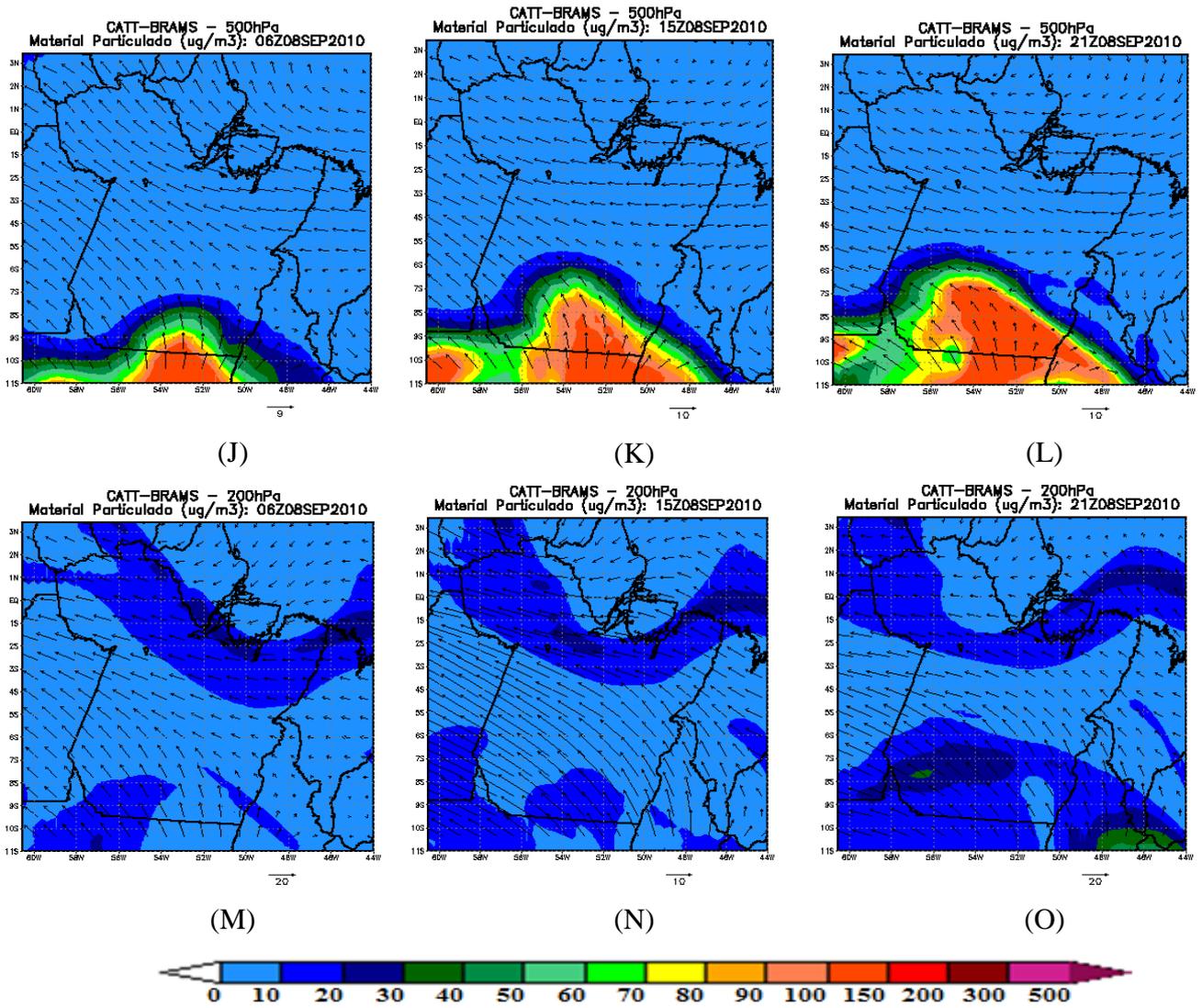
(O)



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 22 – Resultados das Simulações horárias de material particulado ($MP_{(2,5)}$) para o dia 08 de setembro de 2010, em todas as altitudes analisadas.





Fonte: Elaborado pela autora.

5 CONCLUSÃO

Neste sentido aceita-se a *Hipótese i* desta dissertação, onde afirmou-se que as emissões atmosféricas provenientes das atividades antropogênicas (queima da biomassa vegetal e atividades industriais) existentes no Pará, ao serem lançadas à atmosfera se dispersaram e foram transportadas, devido aos efeitos do escoamento atmosférico, atingindo várias regiões do Estado e de outras regiões circunvizinhas.

Também se confirma a *Hipótese ii* na qual afirmou-se que o transporte e a dispersão da pluma das emissões atmosféricas provenientes das atividades antropogênicas, existentes no Pará, depende da intensidade das emissões, regime das chuvas, direção e velocidade do vento e das condições topográficas da região de estudo.

As atividades potencialmente poluidoras, identificadas neste trabalho, foram a mudança de uso da terra, com a conversão da floresta em pasto e em atividades agrícolas, seguidas das atividades econômicas ligadas ao setor florestal, como produção de carvão e queima de resíduos e do setor industrial, em último lugar, pela, ainda, pequena representatividade no contexto geral econômico do Estado, o que demonstra que a economia da região não é tão intensiva em capital.

Como características operacionais importantes, as atividades agropecuárias e florestais são desenvolvidas mediante a prática do desmatamento e da queima da biomassa vegetal, necessárias à limpeza das áreas de pastagens (grandes proprietários), e a queima da capoeira pela agricultura familiar. As atividades industriais utilizam, em seus processos produtivos, combustíveis fósseis para geração de energia e promovem o beneficiamento, e intenso manuseio das matérias primas e dos produtos fabricados.

Estas práticas e atividades são consideradas como as fontes de origem e de lançamento de grandes concentrações de gases traço, como o CO e de material particulado à atmosfera.

Todos os estudos desenvolvidos para esta dissertação demonstraram que, dentre as seis mesorregiões do Estado, a Sudeste e Nordeste (incluindo a Metropolitana de Belém) paraense se destacaram devido ao maior dinamismo dos setores agropecuário, florestal e industrial, e a parte central da mesorregião Sudoeste com, basicamente, a indústria florestal. O restante da mesorregião Sudoeste, e as do Marajó e Baixo Amazonas apresentaram-se com menor expressividade, onde os efeitos espaciais do desenvolvimento econômico ainda são pouco significativos.

O relevo do Pará, predominantemente composto por terrenos de cotas modestas inferiores a 250 m, possui uma forte responsabilidade na movimentação de poluentes atmosféricos vindos de outros Estados (principalmente do Maranhão e Tocantins). A planície central produz uma movimentação de massa de ar do oceano para o continente, levando grande parte dos poluentes para as regiões mais a oeste.

O transporte e a dispersão das emissões de $MP_{(2,5)}$ e de gás CO, provenientes da queima da biomassa vegetal e das atividades industriais no estado do Pará, foi simulado para a estação seca, ou menos chuvosa, do ano de 2010, que abrangeu os meses de junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro.

Este período de estudo se caracterizou por baixas taxas de precipitação pluviométrica e centenas de milhares de focos de queima da biomassa vegetal, cuja quantidade elevou-se à medida que o período tornou-se mais seco.

No que diz respeito à precipitação pluviométrica, os meses de agosto e setembro (período crítico da estiagem) destacaram-se como os mais secos de todo o período estudado, apresentando índices da ordem de 5 a 100 mm, seguido dos meses de julho, junho, novembro e outubro, respectivamente.

O índice pluviométrico baixo e a ocorrência de grande número de queimadas da biomassa vegetal, bastante frequentes nessa época do ano no estado do Pará, destacou o mês de agosto por apresentar o maior número de focos de fogo registrados pelo INPE, que foi de 70.648 focos, com as maiores concentrações das fontes de origem nas mesorregiões Nordeste, Sudeste e Sudoeste do Estado, e menores nas mesorregiões do Baixo Amazonas e Marajó.

Houve uma alteração no perfil do Pará com relação às regiões de maior incidência de focos de fogo nos meses de outubro e novembro, devido à diminuição do índice pluviométrico e das atividades florestal, agrícola e agropecuária nas mesorregiões do Marajó e parte norte da mesorregião Sudoeste.

Essas atividades, juntamente com os focos de fogo ocorridos nas mesorregiões Nordeste e Sudeste, colaboraram com o aumento das concentrações de CO e de $MP_{(2,5)}$ lançadas à atmosfera e, conseqüentemente, com a deterioração da qualidade do ar, que foram transportadas e se dispersaram, atingindo outros estados brasileiros.

Os acumulados mensais de CO e de $MP_{(2,5)}$, demonstraram que próximo à superfície, no nível geopotencial de 1000 hPa, as concentrações destes poluentes se elevaram à medida que o período se tornou mais seco e os focos de fogo se intensificaram, principalmente nas mesorregiões Nordeste, Sudeste e Sudoeste. Estas

mesorregiões se destacaram como as de maiores concentrações de atividades antropogênicas, que embutem a queima de biomassa vegetal, como as carvoarias.

Ainda no nível de 1000 hPa, as concentrações mensais acumuladas de CO, bastante variáveis durante o período estudado, atingiram valores mínimos de 500 e máximos de 300.000 ppb (0,5 a 300 ppm), do início até o fim do período de estiagem.

Observando a variação temporal dessas concentrações acumuladas de CO e comparando-as com os padrões legalmente permitidos de 35 e 9 ppm, conclui-se que, a partir do mês de junho, as citadas concentrações ultrapassaram o padrão de qualidade do ar previsto para 8 horas de exposição, de 9 ppm, tendo como destaque as mesorregiões Sudoeste e Sudeste paraense. A partir deste mês, as concentrações se elevaram e ultrapassaram os padrões legais definidos para 1 hora de exposição de 35 ppm. As mesorregiões Sudeste e Sudoeste permaneceram no destaque, seguidas da Nordeste paraense.

O comportamento do $MP_{(2,5)}$ na atmosfera foi diferente do de CO. As concentrações mensais acumuladas desta substância, variaram de um valor de 100 a 20.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$, do início até o final do período seco de 2010, e ultrapassaram os padrões primários e secundários, definidos pela Resolução CONAMA 03/1990, para partículas inaláveis, de 50 $\mu\text{g.m}^{-3}$ (média aritmética anual), durante todo este período. Similarmente, o padrão de 150 $\mu\text{g.m}^{-3}$ também foi ultrapassado desde o início do período seco de estudo, no mês de junho, até o final, em novembro, nas mesorregiões Sudeste e Sudoeste. O mesmo ocorreu nas mesorregiões do Baixo Amazonas, Nordeste e Marajó, porém, somente, a partir do meio do período seco, isto é do mês de agosto até o final, em novembro.

Os resultados simulados das emissões de CO e de $MP_{(2,5)}$ evidenciaram que o modelo possui uma dinâmica consistente com o processo de advecção na escala de grade: ficou demonstrado que as áreas “poluídas” circunvizinhas ao Pará, cujas concentrações foram somadas às geradas à sudeste, extremo sul e sudoeste do Estado, foram advectadas pelos ventos alísios de leste para o oeste, em direção ao estado do Amazonas. Demonstrou também que, em território paraense, houve perda de massa das concentrações simuladas de CO e de $MP_{(2,5)}$, que pode ser atribuída à mistura com o ar não poluído, vindo do oceano e transportado pela ação dos ventos alísios, à interação com as massas de ar da atmosfera e à dispersão horizontal das emissões de CO (segundo a orientação dos ventos), à deposição úmida devido às chuvas que ocorreram no período e, finalmente, ao fenômeno da reatividade química entre os componentes da atmosfera.

Com relação ao transporte vertical das plumas dos poluentes simulados, o modelo evidenciou também que as emissões de CO e de MP_(2,5), à superfície do solo, atingiram níveis de altitudes mais elevadas, devido aos processos convectivos ascendentes que atuam nas regiões tropicais, isto é devido à ação de flutuação positiva que essas emissões, associadas às queimadas da biomassa vegetal e às atividades industriais, adquirem em função do gradiente de temperatura existente entre elas e a temperatura ambiente. Nas elevadas altitudes, o modelo demonstrou que o território paraense está submetido à ação dos ventos provenientes da parte central do Brasil, que transportaram plumas do norte da região Centro Oeste para o sul do Estado paraense, advectando-as e conduzindo-as horizontalmente para oeste do estado do Pará. Especificamente a 200 hPa, o modelo evidenciou que a pluma dos poluentes atmosféricos estudados foi submetida à velocidades dos fluxos de ar bem mais intensos, e seguiram o escoamento do vento para Oeste, podendo atingir regiões distantes do local onde foram emitidas.

Com as informações geradas por esta dissertação de mestrado, pode-se afirmar que o estado do Pará – principalmente as mesorregiões Nordeste, Sudeste e Sudoeste – teve a sua qualidade do ar, em termos das concentrações de CO e de MP_(2,5), deteriorada, chegando a ultrapassar os padrões legais permitidos, durante o período seco de 2010.

Pode-se afirmar também, que as emissões dos poluentes estudados, após lançadas à atmosfera, foram submetidas às ações dos ventos horizontais e ao processo de turbulência vertical, atingindo elevados níveis de altitude e outras regiões, podendo alcançar dimensões continentais.

Tal cenário evidencia e confirma o já referenciado desrespeito e a influência negativa da ação antrópica sobre os seus recursos naturais, com uma economia tradicionalmente calcada em atividades agropastoris e madeireiras predatórias e explorações minerais e florestais, presentes numa “escala basicamente extrativa”, todas elas, inserindo em seu contexto, práticas de desflorestamentos (desmatamentos), seguidas de queimadas de grandes áreas de florestas.

Diante deste cenário, fica evidente a necessidade de continuação dos estudos sobre a qualidade do ar no estado do Pará, avaliando-se as emissões de CO e o MP, mais detalhadamente, nos períodos seco e chuvoso, para melhor comparação da influência das atividades antropogênicas estudadas, na qualidade do ar do Estado.

Para isso, deve-se restringir a área de estudo somente para os municípios de maior número de focos de fogo da mesorregião Sudeste do Estado, por ter sido a que mais se destacou em termos de desenvolvimento econômico e nível de atenção de qualidade do ar.

Deve-se também realizar simulações das concentrações de material particulado e monóxido de carbono, para cenários futuros, por exemplo, para o ano de 2020, mantendo-se os mesmos níveis das emissões atmosféricas atuais.

De posse destes resultados propõe-se a definição de um sistema de gestão ambiental para o Pará, para as regiões com índice de qualidade do ar mais crítico, criando dispositivos de alerta e definindo ações controle, para os casos de maior criticidade em termos de qualidade do ar.

Propõe-se, também, o desenvolvimento de simulações com resoluções que permitam analisar a influência de sistemas frontais vindos da região sul/sudeste do Brasil no transporte e dispersão das emissões atmosféricas simuladas neste estudo.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. (1967) **Domínios morfoclimáticos e províncias fiteogeográficas do Brasil**. Orientação, n. 3, p. 45-48.
- AB'SABER, A. N. (1969) **Um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o Quartenário**. Instituto de Geografia USP. 23 p. (Geomorfologia, 18).
- ALENCAR, A., NEPSTAD, D., MCGRATH, D., MOUTINHO, P., PACHECO, P., DIAZ M. D. C. V., SOARES-FILHO, B. **Desmatamento na Amazônia: indo além da emergência crônica**. Belém: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, 89 p. 2004.
- ALMEIDA, I. T. **A Poluição Atmosférica por Material Particulado na Mineração à Céu Aberto**. 1999. 187 f. Dissertação de Mestrado - USP, São Paulo.
- ALESSANDRINI, S. et al. **An Application of RAMS to Power Plant Pollution Forecast in Complex Terrain**. Dipartimento di Scienze e Tecnologie Avanzate, Università del Piemonte Orientale, Alessandria, Italy, 2006.
- AMAZÔNICA BRASILEIRA POR SATÉLITE: PROJETO – PRODES. Disponível em <www.dpi.inpe.br/prodesdigital> Acesso em 15/03/2014.
- ANDREAE, M. O., ARTAXO, P., FISCHER, H., FREITAS, S. R., GRÉGOIRE, J.-M., HANSEL, A., HOOR, P., KORMANN, R., KREJCI, R., LANGE, L., LELIEVELD, J., LINDINGER, W., LONGO, K., PETERS, W., REUS, M. de, SCHEEREN, B., SILVA-DIAS, M. A. F., STRÖM, J., VAN VELTHOVEN, P. F. J., WILLIAMS, J. Transport of biomass burning smoke to the upper troposphere by deep convection in the equatorial region. **Geophysical Research Letter**, vol. 28, nº 6, p. 951. 2001.
- ARTAXO, P. et al. Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry season in Rondônia, Amazonia. **Journal of Geophysical Research**, nº 49 feb 2002.
- ARTAXO, P. **A Composição da Atmosfera Amazônica e suas Implicações Climáticas**. Folha Amazônica, LBA, Ano 6, nº 12, Julho, 2004.
- ARTAXO, P. et al. **Efeitos Climáticos de Partículas de Aerossóis Biogênicos Emitidos em Queimadas na Amazônia**, 2006.
- ASSUNÇÃO, J. V. **Poluição atmosférica**. Academia de Ciências do Estado de São Paulo. São Paulo, 1998. P. 271-308.
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.
- BAIRD, C. e CANN, M. **Química Ambiental**. 4ª ed. Editora Bookman: Porto Alegre, 2011.
- BECKER, B. K. **Geopolítica da Amazônia**. Estudos avançados 19 (53), 2005.

BECKER B. K. **C/T&I para Conhecimento e Uso do Patrimônio Natural da Amazônia**. Disponível em <www.ufpa.br/naea/> Acesso em 06/04/2013.

BIDIEMAN, T. F. Atmospheric processes. **Environ. Sei. Techn.**, v. 22, p. 361-367, 1988.

BONN, B. MOORGAT, G.K. New particle formation during a b-pinene oxidation by O₃, OH and NO₃, and the influence of water vapour: particle size distribution studies. **Atmos Chem Phys** 2 (3); 183-196. 2002.

BOTKIN, D. B. et al. **Environmental Science – Earth as a Living Planet**. New York: John Wiley & Sons, 1998.

BRAGA, A.; PEREIRA, L. A. A.; SALDIVA, P. H. N.. Poluição atmosférica e seus efeitos na saúde humana. In: SUSTENTABILIDADE NAGERAÇÃO E USO DE ENERGIA NO BRASIL: OS PRÓXIMOS VINTE ANOS (Conferência), 2002, Campinas. **Papers**. Disponível em:<http://www.cgu.rei.unicamp.br/energia2020/papers/paper_Saldiva.pdf> ou<<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=1039>> Acesso em: 14 nov. 2005.

BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável**. 2ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRAGA, C.F. **Estudo dos Compostos Inorgânicos em Partículas Atmosféricas da Região de Candiota-RS Utilizando a Técnica Pixe**. 2002. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. 2002.

BRANCO, S. M.; ROCHA, A. A. **Elementos de Ciências do Ambiente**. 2a ed. São Paulo: CETESB, 1987, p. 51 a 67.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução 03/08/90**.

BRUNER, A. G., GULLISON, R. E., RICE, R. E., e FONSECA G. A. B. d. Effectiveness of parks in protecting tropical biodiversity. **Science** 291, pp. 125-128. 2001.

CARVALHO JR. J. A.; LACAVA, P. T. **Emissões em Processos de Combustão**. UNESP: São Paulo, 2003.

CASTRO, A. L. C. 1998. **Glossário de Defesa Civil, Estudos de Riscos e Medicina de Desastres**. Brasília, Secretaria Nacional da Defesa Civil. Disponível em <www.defesacivil.gov.br/.../glossario.asp>Acesso em 08/01/2014.

CAVALCANTI, P. M. S. **Avaliação dos Impactos causados na Qualidade do Ar pela Geração Termelétrica**. 2003. Tese de Mestrado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

CAVALCANTI, P. M. S. **Modelo de Gestão da Qualidade do Ar: Abordagem Preventiva e Corretiva**. 2010. Tese de doutorado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

COELHO, N. M.; SIMONIAN L.; FENZL. **Estados e Políticas Públicas na Amazônia – Gestão de Recursos Naturais**. 1ª parte Gráfica e Editora Ltda: 2000, 290 p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Dados Gerais de Acidentes Ambientais**. São Paulo, 2013.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Qualidade do Ar**. Disponível em <www.cetesb.sp.gov.br/ar/Informacoes-Basicas/21-Poluentes>. Acesso em 15/01/2014; 18/02/2014; 15/04/2014.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 03 de 28 de junho de 1990. Estabelece padrões de qualidade do ar e amplia o número de poluentes atmosféricos passíveis de monitoramento e controle. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, 22 ago. 1990. Seção I, p. 15.937-15.939.

CRUTZEN, P.J.; ANDREAE, M.O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**, pags1669-1678, 1990.

CUNHA, R. M. P. **Transportes de Poluentes no polo Petroquímico de Triunfo**. 2002. Dissertação de Mestrado - Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade do Rio Grande do Sul, 2002.

DAMILANO, D. C. R. **Estudo da Influência da Poluição Atmosférica e das Condições Meteorológicas na Saúde em São José dos Campos**. Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica, (PIBIC/CNPq/INPE), São José dos Campos, Julho de 2006.

DANNI-OLIVEIRA Inês Moresco. **A distribuição e a variabilidade das chuvas em Curitiba/PR**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 7; FÓRUM LATINO-AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 1, 1997, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 1997. 1 CD-ROM (Eixo 5).

DERÍSIO, J. C. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. 2. ed. São Paulo: Signus, 2000.

DERÍSIO, L. C. **Introdução ao controle da poluição ambiental** – 3. ed. – São Paulo : Signus Editora, 2007.

DÍEZ, F. B. et al. Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud: una introducción. **Revista Española de Salud Pública** 1999; 73: 109-121.

DUCHIADE, M. P. **Poluição Do Ar e Doenças Respiratórias: Uma Revisão**. Cad. Saúde Pública, v.8, n.3 - Rio de Janeiro, Jul./Set, 1992.

DULLEY, R. D. **Noções de Natureza, Ambiente, Meio Ambiente, Recursos Ambientais e Recursos Naturais.** Agric. São Paulo, São Paulo, v. 51, n. 2, p. 15-26, jul./dez. 2004.

FEARNSIDE, P. M. **A floresta Amazônia nas mudanças globais.** Manaus, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Inpa), 2003, 134 p.

FERNANDES, F. T. B. **Modelagem Matemática do Escoamento e da Dispersão de Poluentes na Microescala Atmosférica.** (editora e local), 2009.

FERREIRA, L. V. **Identificação de Áreas Prioritárias para a Conservação da Biodiversidade por Meio da Representatividade das Unidades de Conservação e Tipos de Vegetação nas ecorregiões da Amazônia Brasileira.** São Paulo, Instituto Socioambiental, 2001, pp. 268-286.

FONSECA, D. D. F. et al. **Programa Geologia do Brasil – Levantamento da Geodiversidade do Estado do Pará.** Belém: CPRM, 2013.

FORSTNER, H.J.L., FLAGAN, R.C., SEINFELD, J.H. Secondary organic aerosol from the photooxidation of aromatic hydrocarbons: Molecular composition. **Environ. Sci. Tec.**, v. 31, p. 1345-1358, 1997.

FREITAS, E. D. ; SILVA DIAS, P. L. **O efeito da Ilha de calor urbana sobre os fluxos de calor através da utilização do modelo RAMS.** In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 11, Rio de Janeiro, 2000.

FREITAS, M. K. **Investigação da produção e dispersão de poluentes do ar no ambiente urbano: determinação empírica e modelagem em rede neural da concentração de CO.** Tese de Doutorado – USP, São Carlos, 2003.

FREITAS, S. R., **Modelagem Numérica do Transporte e das Emissões de Gases Traços e Aerossóis de Queimada no Cerrado e Floresta Tropical,** Tese de Doutorado, IF, USP, 1999.

FREITAS, S. R. et al. Emissões de Queimadas em Ecossistemas da América do Sul: efeitos climáticos e biogeoquímicos e distribuição regional da fumaça. **Revista de Estudos Avançados**, nº 19, fev. 2005a.

FREITAS, S. R. et al. Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America, **Enviro. Fluid. Mech.**, 5, p.135-167, 2005b.

FREITAS, S. R. et al.; **The Coupled Aerosol and Tracer Model to the Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS), Part 2: Model description and evaluation,** 2007a.

FREITAS, S. R. et al.; **CATT-BRAMS; Model Validation and Numerical System for South America Air Quality Forecast, Parts 1, 2 and 3,** 2007b.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; RODRIGUES, L. F.. Modelagem numérica da composição química da atmosfera e seus impactos no tempo, clima e qualidade do ar, **Revista Brasileira de Meteorologia**. vol.24, n^o.2, São Paulo, Junho 2009.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; IGNOTTI, E. LEON, A. P.; ARTAXO, P. Associação entre material particulado de queimadas e doenças respiratórias na Região sul da Amazônia brasileira, **Revista Panam, Salud Publica**. 2010a; 27(1):10–6.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M; TRENTMANN, J.; LATHAM, D. Technical Note: Sensitivity of 1-D smoke plume rise models to the inclusion of environmental wind drag, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 585–594, 2010b.

GIODA, A.; GIODA, F. R. **A Influência da Qualidade do Ar nas Doenças Respiratórias**. 2006.

GODISH, T. **Air quality**. 2 ed. Chelsea: Lewis, 1991.

GORHAM, E.; **Add Rain**: An Overview. In: BHUMRALKAR, C. M.; *Meteorological Aspects of Acid Rain*. 1993. p.1-13.

GRIMM, A. M. **Grupo de Pesquisas em Meteorologia**. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Física. Disponível em <<http://www.fisica.ufpr.br/grimm/>>. Acesso em 03/12/1999.

GUENTHER, A. et al. A global model of natural volatile organic compound emissions. **Journal of Geophysical Research**, v.100, p. 8873-8892, 1995.

G1. **Fogo destrói áreas do Tocantins e norte de Goiás, perto de Mato Grosso**. Disponível em <www.g1.globo.com/brasil/noticias/2010/08>. Acesso em 20/12/2014.
INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/censo2010/primeiros_dados_divulgados/index.php?uf=15> Acesso em 26/04/2014.

HOFFMANN, T., ODUM, J.R., BOWMAN, F., COLLINS, D., KLOCKOW, D., FLAGAN, R.C., SEINFELD, J.H. Formation of organic aerosols from the oxidation of biogenic hydrocarbons. **J. Atmosf. Chem.**, v. 26, p. 189-222, 1997.

HOLLAND, W. W.; BENNETT, A. E.; CAMERON, I. R.; FLOREY, C. V.; LEEDER, S. P.; SCHILLING, R. S. F.; SWAN, A. V. & WALLER, R. R., 1979. Health effects of particulate pollution: reappraising the evidence: special issue on particulate air pollution. **American Journal of Epidemiology**, 110: 525-679.

INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS; **Taxa de desmatamento na Amazônia** disponível em<<http://www.inpe.br/>>, acessado no período de 14/04/2012 à 06/02/2014.
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (Inpe). **Monitoramento da Floresta**, São José dos Campos, 2004.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Working Group II; **Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Crown: United Kingdom, 2007.

KAUFMAN, Y.J. et al. Smoke, clouds, and radiation – Brazil (SCAR-B) experiment. **Journal of Geophysical Research**, v.103, n. D24, p. 31783-31808, 1998.

KAWANO, M. **Desenvolvimento, validação e aplicação de um modelo matemático para dispersão de poluentes atmosféricos**. 2003. 121 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

KEMP, D. D. **Global Environment Issues - A Climatological Approach**. 2^a ed. USA: Routledge, 1994.

KISSEL, F. N. (2003). **Handbook for Dust Control in Mining**. Pittsburgh: U.S. Department of health and human services. National Institute for Occupational Safety and Health. Research Laboratory, 2003.

LAURANCE, W. F et al The future of the Brazilian Amazon. **Science**, 291, 2001, p. 438-439.

LAURANCE, W. F et al. Deforestation in Amazonia. **Science** 304, 2004, p. 1109-1111.
LONGO, K. et al. **Modelagem Numérica da Transformação e Transporte das Partículas de Aerossóis Atmosféricos na região Amazônica - Uma avaliação dos seus impactos climáticos**. Universidade de São Paulo (USP), Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), São Paulo, 2003.

LORA, E. E. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. 2^a ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

MANTEGAZZA, G. **Relatório Final do Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE)**, 2009.

MARTINS, C. R. et al. **Ciclos Globais de Carbono, Nitrogênio e Enxofre: A importância na química da atmosfera**, 2003, Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola, n^o 5, nov., 2003.

MARTINS, J. A. et al. **Modeling the Aerosol Impact in the Amazon Precipitation**. Department of Atmospheric Science – IAG/USP. Center for Weather Forecasting and Climate Studies – CPTEC/INPE, São Paulo, 2002.

MARGULIS, S. **Causas do Desmatamento na Amazônia Brasileira, 2003**. The World Bank, Brasília; Disponível em <<http://www.finefrint.com>> Acesso em julho de 2012.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Plano de ação para a prevenção e controle do desmatamento na Amazônia legal**, Brasília, 2004.

MORGAN, S. M. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2a. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

NEFFUSI, N.; **A Poluição do Ar no Estado de São Paulo**. São Paulo, CETESB, 1975-1976.

NOBRE et al. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, 1991.

ODUM, J.R., HOFFMANN, T., BOWMAN, F., COLLINS, D., FLAGAN, R.C, SEINFELD, J.H. Gas/particle partitioning and secondary organic aerosol yields. **Environ. Sci. Techn.**, v. 30, p. 2580-2585, 1996.

OKE, T. R. **Air pollution in the boundary layer. Boundary layer climates**. London: Mathuen & Co, 1978.

PENKETT, S.A.; LAW, K.S.; COX, T.; KASIBHATLA, P. Atmospheric Oxidants, In: BRASSEUR, G.P.; PRINN, R.G.; PSZENNY, A.P. (Ed.). **Atmospheric Chemistry in a Changing World - An Integration and Synthesis of a Decade of Tropospheric Chemistry Research**. Berlin, Germany: **Springer**, 2003. p.73-75, 86-98.

PENA, H. A; MOREIRA, M. P; CHAVES, M. S. "**Análise da estrutura produtiva do estado do Pará e dinâmica municipal**", en Observatorio de la Economía Latinoamericana, Número 194, 2014.

PEREIRA, Gislene. **A natureza (dos) nos fatos urbanos: produção do espaço e degradação ambiental. Desenvolvimento e meio ambiente: cidade e ambiente urbano**. Curitiba, Ed. UFPR, n.3, p. 33-52, jan./jun. 2001.

PERRY, R., SLATER, D.H. **Poluição do Ar**. In: BENN, F.R., MCAULIFFE, C. A. Química e poluição. Ed. USP, São Paulo, 1981.

PIELKE, R. A. **Mesoscale Meteorological Modeling**. 2nd Edition. San Diego: Academic Press, 2002.

PIRES, D.O. **Inventário de Emissões Atmosféricas de Fontes Estacionárias e sua Contribuição para a Poluição do Ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. 2005. 188 f. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

PRETTO, A. **O estudo do comportamento dos gases-traço O₃, NO_x, Co, SO₂ e de COVs na atmosfera da cidade de São Paulo - IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Autarquia Associada a Universidade de São Paulo**, 2005.

RADOJEVIC, M. Burning issues. **Chemistry in Britain**, v. 34, n. 12, p. 38-42, 1998.

RAMOS, J. et al.; 2011 – **Explicação dos focos de queimadas**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.7902.

RIBEIRO et al. **Efeito das Queimadas na Saúde Humana**, São Paulo Jan./Apr, 2002.

RIBEIRO, S. K. et al. **Transporte e Mudanças Climáticas**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Mauad Ed, 2000.

SALAME, Camil Wadih. **Análise espaço-temporal da ocorrência de queimadas e desmatamento no estado do Pará no período de 1999 a 2004**. 2008. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Pará. Instituto de Ciências Exatas e Naturais. Programa de Pós-Graduação em Matemática E Estatística, Belém, 2008.

SALDIVA, P. H. N. **Emissões veiculares e impactos na saúde em áreas urbanas no Brasil: tendências.** In: conferência sustentabilidade na geração e uso de energia no brasil: os próximos vinte anos, 2002, Campinas. Caderno de resumos. Disponível em: <<http://www.cgu.rei.unicamp.br/energia2020/caderno.pdf>> Acesso em: 14 nov. 2013.

SANCHEZ-CCOYLLO, O. R. (1998). **Interação entre poluentes atmosféricos e a circulação local na cidade de São Paulo.** Departamento de Ciências Atmosféricas. IAG/USP. Tese de mestrado.

SANTANA, E. ; DA CUNHA, K. B., FERREIRA, A. L., ZAMBONI, A. **Padrões de Qualidade do ar: Experiência comparada do Brasil, EUA e União Europeia.** São Paulo: IEMA, 2012.

SCHIRMER, W. N.; LISBOA, H. M. **Química da Atmosfera: Constituintes Naturais, Poluentes e suas Reações.** Tecnológica Revista do Departamento de Química e Física do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina 2008.

SCHNELLE et al. **Air Pollution Control Technology.** Handbook, CRC Press, S. 2002.

SCHROEDER, LANE- **The Long-Range Atmospheric Transport of Natural and Contaminant Substances,** 1988.

SCHWARTZ, S.E. Acid deposition: unraveling a regional phenomenon. **Science**, v.243, p. 753-763, 1989.

SEINFELD, J. H. **Atmos. Chem. and Phys. of Air Pollution.** New York: Ed. John Wiley & Sons, 1986.

SEINFELD, J. H. & PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change.** New York: Ed. John Wiley & Sons, 1998.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics: from air pollution to climate change.** 2nd edition. Wiley Interscience, 2006.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE. Disponível em <www.sema.pa.gov.br> Acesso em 17/04/2012, 20/04/2012, 26/04/2012, 06/05/2012, 17/05/2012 e 03/06/2012.

SOKOLIK, I. **Lectures Notes (graduate course on "Radiative Processes in Planetary Atmospheres).** Disponível em: <http://irina.eas.gatech.edu/ATOC5560_2002.htm>. Acesso em: 09 de março de 2014.

TIRABASSI, T; MOREIRA, D. **Modelo Matemático de Dispersão de Poluentes na Atmosfera: Um Instrumento Técnico para a Gestão Ambiental,** pp. 159-171, **Ambiente & Sociedade,** Jul-dez; ano/vol. 7, número 002, Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade (ANPAS), Campinas, Brasil.

TOLEDO, C. C.; TORRES, F. T. PEREIRA; MARTINS, L. A. **Análise do comportamento médio da concentração de material particulado inalável em função do vento na cidade de Juiz de Fora – MG.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 10, 2003, Rio de Janeiro. Anais eletrônicos. Disponível em: <<http://www.lead.uerj.br/xsbgfa/estrutura/eixo2/3.4/088/088.htm>> Acesso em: 14 dez. 2014.

TOMMASI, L. R.. **A degradação do meio ambiente.** São Paulo: Nobel, 1979.

TORRES, H. G. **O nordeste urbano: grave crise ambiental.** In: HOGAN, Daniel Joseph, VIEIRA, Paulo Freire (Orgs.). **Dilemas socioambientais e desenvolvimento sustentável.** 2. ed. Campinas, SP: Ed. UNICAMP, 1995. p. 171-192.

YAMASOE, M. A. et al. Chemical composition of aerosol particles from direct emissions of biomass burning in the Amazon basin: water-soluble species and trace elements. **Atmospheric Environment**, n. 34, p. 1.641-1.653, 2000.

ZAMBRANO, G. J. D. **Modelagem matemática da dispersão atmosférica de material particulado em uma cerâmica estrutural.** 2010. 122 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade do Extremo Sul Catarinense UNESC – Santa Catarina, 2010.

ANEXO

ANEXO - RAMSIN Name List que Governa as Simulações Executadas

```

!namelist

$MODEL_GRIDS

! Simulation title (64 chars)

  EXPNME   = 'BRAMS Version 4.2',

!RUNTYPE  = 'MAKESFC',! MAKESFC, INITIAL, HISTORY, MAKEVFILE, MEMORY
!RUNTYPE  = 'MAKEVFILE',!MAKESFC, INITIAL, HISTORY, MAKEVFILE, MEMORY
!RUNTYPE  = 'INITIAL', !MAKESFC, INITIAL, HISTORY, MAKEVFILE, MEMORY
  RUNTYPE  = 'HISTORY',!Type of run: MAKESFC, INITIAL, HISTORY,

TIMEUNIT  = 'h',           ! 'h','m','s' - Time units of TIMMAX, TIMSTR
TIMMAX    = 720,

LOAD_BAL  = 0,           !Dynamic load balance flag: 1=yes, 0=no

!Start of simulation or ISAN processing

  IMONTH1  = 06,
  IDATE1   = 01,
  IYEAR1   = 2010,
  ITIME1   = 0000,

!Grid specifications

  NGRIDS   = 2,           ! Number of grids to run

  NNXP     = 48,86,185,   ! Number of x gridpoints
  NNYP     = 40,71,155,   ! Number of y gridpoints
  NNZP     = 32,32,      ! Number of z gridpoints

  NZG      = 9,           ! Number of soil layers
  NZS      = 4,           ! Maximum number of snow layers

  NXTNEST  = 0,1,2,2,    ! Grid number which is the next coarser grid

!Coarse grid specifications

  IF_ADAP  = 0,

  IHTRAN   = 1,           ! 0-Cartesian, 1-Polar stereo

  DELTAX   = 72000.,
  DELTAY   = 72000.,    ! X and Y grid spacing

  DELTAZ   = 100.,      ! Z grid spacing (set to 0. to use ZZ)

  DZRAT    = 1.2,       ! Vertical grid stretch ratio

DZMAX     = 1000.,      ! Maximum delta Z for vertical stretch

! Vertical levels if DELTAZ = 0
  ZZ       = 0.0,
           20.0,        46.0,        80.0,        120.0,        165.0,

```

```

220.0,    290.0,    380.0,    480.0,    590.0,
720.0,    870.0,   1030.0,   1200.0,   1380.0,
1595.0,   1850.0,   2120.0,   2410.0,   2715.0,
3030.0,   3400.0,   3840.0,   4380.0,   5020.0,
5800.0,   6730.0,   7700.0,   8700.0,   9700.0,
10700., 11700., 12700., 13700., 14700., 15700., 16700.,
17700., 18700., 19700.,

DTLONG    = 120.,          ! Coarse grid long timestep
NACOUST   = 3,            ! Small timestep ratio
IDELTAT   = -2,          ! =0 - constant timesteps
                                ! >0 - initial computation <0 - variable

                                ! Nest ratios between this grid
                                ! and the next coarser grid.
NSTRATX   = 1,3,4,4,     ! x-direction
NSTRATY   = 1,3,4,4,     ! y-direction
NNDTRAT   = 1,3,3,2,     ! Time

NESTZ1    = 0,           ! Contort coarser grids if negative
NSTRATZ1  = 3,3,2,1,    !
NESTZ2    = 0,           ! Contort coarser grids if negative
NSTRATZ2  = 3,3,2,1,    !

POLELAT   = -2.5,        ! Latitude of pole point
POLELON   = -51.5,      ! Longitude of pole point

CENTLAT   = -2.5, -3.5, -23.2,
CENTLON   = -51.5, -51.25, -47.0,
! Grid point on the next coarser
                                ! nest where the lower southwest
                                ! corner of this nest will start.
                                ! If NINEST or NJNEST = 0, use CENTLAT/LON
NINEST    = 0,0,0,0,    ! i-point
NJNEST    = 0,0,0,0,    ! j-point
NKNEST    = 1,1,1,1,    ! k-point

NNSTTOP   = 1,1,1,1,    ! Flag (0-no or 1-yes) if this
NNSTBOT   = 1,1,1,1,    ! Nest goes the top or bottom of the
                                ! coarsest nest.

GRIDU     = 0.,0.,0.,0., ! u-component for moving grids
GRIDV     = 0.,0.,0.,0., ! v-component for moving grids
                                ! (not working again!)

$END

$CATT_INFO

CATT = 1, ! 1-CATT environmental model activated 0-off

!Fire Map file prefix
FIREMAPFN = './fire_map/BRAMS4_CATT_sources',

RECYCLE_TRACERS = 1,

PLUMERISE = 1, !0-Desativated, 1-Activated Plume Rise routine
PRFRQ = 3600.,

$END

```

```

$TEB_SPM_INFO
TEB_SPM = 0, ! 1-TEB activated 0-off
$END

```

```

$MODEL_FILE_INFO

```

```

! Variable initialization input

```

```

INITIAL = 2,          ! Initial fields - 1=horiz.homogeneous,
                    !                               2=init from varfile
                    !                               3=init from HFILIN

```

```

! ----- Analysis nudging parameters -----
NUD_TYPE = 2,        ! =1 - nudge from history files(1-way nest)
                    ! =2 - nudge from varfiles
                    ! =0 - no analysis nudging

```

```

VARFPFX = '../17-30/ivar/iv-brams',
VWAIT1  = 0.,        ! wait between each VFILE check (s)
VWAITTOT = 0.,       ! total wait before giving up on a VFILE (s)

```

```

NUD_HFILE = './H/hist-H-2010-11-30-230000-head.txt',
! Header file name for history nudging files (only prefix is used)

```

```

NUDLAT  = 5,          ! Number of points in lateral bnd region
TNUDLAT = 1800.,      ! Nudging time scale(s) at lateral boundary
TNUDCENT = 0.,! 144000.,!0.,!Nudging time scale(s)in center of domain
TNUDTOP = 10800.,     !Nudging time scale (s) at top of domain
ZNUDTOP = 16000.,     !Nudging at top of domain above height(m)

```

```

WT_NUDGE_GRID = 1.,1., 0.7, 0.5,!Relative nudging weights for active grids
                    ! =0., turns off nudging for that grid

```

```

                    ! These weights will multiply the base timescales
                    ! to determine full nudging weight.
                    ! (Timescales)/(WT_NUDGE_*)
                    ! must be larger than DTLONG

```

```

WT_NUDGE_UV = 1.,    ! Anal nudging weight for u and v
WT_NUDGE_TH = 1.,    ! Anal nudging weight for theta
WT_NUDGE_PI = 1.,    ! Anal nudging weight for pi
WT_NUDGE_RT = 1.,    ! Anal nudging weight for r_tot

```

```

!-----

```

```

!----- Condensate nudging -----

```

```

NUD_COND = 0,        ! Only nudge total water where condensate
                    ! exists (from previous history files, HFILIN)

```

```

COND_HFILE = './H/a-H-2001-07-21-000000-head.txt',
! Header file name for cond nudging history files (only prefix is
used)

```

```

TCOND_BEG=0., TCOND_END=21600., ! Model time start and end of cond nudging
(sec)

```

```

T_NUDGE_RC = 3600.,    ! Cond nudging timescale for r_total

```

```

WT_NUDGE_GRID = 1., 0.8, 0.7, 0.5, ! Relative nudging weights for active
grids

```

```

                    ! =0., turns off nudging for that grid

```

```

!-----

```

```

!----- Observation Data Assimilation (ODA) -----
  IF_ODA = 0,                ! Flag to turn on oda
  ODA_UPAPREFIX = './obs/dp-r', ! File prefix for upper air obs
  ODA_SFPCPREFIX = './obs/dt-s', ! File prefix for surface obs

  FRQODA=300.,              ! Frequency of obs analysis
  TODABEG=0., TODAEND=99999999., ! Model time start and end of oda
(sec)

  TNUDODA= 900.,            ! Nudging timescale for each grid
  WT_ODA_GRID = 1., 1., 0.7, 0.5, ! Relative nudging weights for active
grids                               ! =0., turns off nudging for that grid

  WT_ODA_UV = 1.,          ! ODA nudging weight for u and v
  WT_ODA_TH = 1.,          ! ODA nudging weight for theta
  WT_ODA_PI = 1.,          ! ODA nudging weight for pi
  WT_ODA_RT = 1.,          ! ODA nudging weight for r_tot

! Following are radii that affect the "smoothness" of the analyzed fields
!   The SFCE and UPAE are the radii where the affect falls off to e**(-2)
!   The SFC0 and UPA0 are the radii where the affect falls off to 0
!   Values are grid dependent.

  RODA_SFCE = 50000.,100.,100.,100.,
  RODA_SFCE0 = 100000.,100000.,100000.,100000.,
  RODA_UPAE = 100000.,200.,200.,200.,
  RODA_UPA0 = 200000.,2000.,2000.,2000.,

  RODA_HGT = 3000.,3000.,3000.,3000., ! Height at which transition from SFC
radii                                !   to UPA radii occurs

  RODA_ZFACT = 100.,100.,100.,100., ! Vertical factor related to dx/dz

! - Time interpolate limit (TIL)- if the future-past obs time
!   is > this limit, do not use to interpolate
!
! - Time extrapolate limit (TEL)- if past/future obs is greater than TIL,
!   but less than TEL, use the obs

  ODA_SFC_TIL=21600.,
  ODA_SFC_TEL=900.,
  ODA_UPA_TIL=43200.,
  ODA_UPA_TEL=21600.,
!-----

!----- Cumulus inversion tendency input -----
  IF_CUINV = 0,
  CU_PREFIX = './t5-C-',

  TNUDCU=900.,
  WT_CU_GRID=1., 1., .5,

  TCU_BEG=0., TCU_END=7200.,
  CU_TEL=3600.,
  CU_TIL=21600.,
!-----

! History file input

```

```

TIMSTR   = 7055.0,           ! Time of history start (see TIMEUNIT)
HFILIN   = './H/hist-H-2010-11-30-230000-head.txt',
           ! Input history file name

! Analysis file input for assimilation (currently LEAF variables)

IPASTIN   = 0,              ! Initialize various fields from analysis file?
           ! 1=yes, 0=no
PASTFN    = './A/anal-A-2010-11-30-230000-head.txt',
           ! Input analysis file name

! History/analysis file output

IOUTPUT   = 2,              ! 0=no files, 1-save ASCII, 2-save binary
HFILOUT   = './H/hist',
AFILOUT   = './A/anal',
ICLOBBER  = 1,              ! 0=stop if files exist, 1=overwrite files
IHISTDEL  = 0,              ! 0=keep all hist files, 1=delete previous
FRQHIS    = 3600.,          ! History file frequency
FRQANL    = 3600.,          ! Analysis file frequency
-----
FRQLITE   = 0.,            ! Analysis freq. for "lite" variables
           ! = 0 : no lite files
XLITE     = '/0:0/',        ! nums>0 are absolute grid indexeA
YLITE     = '/0:0/',        ! nums<0 count in from the domain edges
ZLITE     = '/0:0/',        ! nums=0 are domain edges

NLITE_VARS=4,
LITE_VARS='UP','VP','WP','swdr','THETA',
-----

AVGTIM    = 0.,            ! Averaging time for analysis variables
           ! must be abs(AVGTIM) <= FRQANL
           ! > 0 : averaging is centered at FRQANL
           ! < 0 : averaging ends at FRQANL
           ! = 0 : no averaged files
FRQMEAN   = 0.,            ! Analysis freq. for "averaged" variables
FRQBOTH   = 0.,            ! Analysis freq. for Both "averaged" and
           ! "lite" variables
KWRITE    = 0,              ! 1-write,0-don't write scalar K's to anal.

! Printed output controls

FRQPRT    = 10800.,         ! Printout frequency
INITFLD   = 1,              ! Initial field print flag 0=no prnt,1=prnt

! Input topography variables

TOPFILES  = './data/toph-brams', ! File path and prefix for topo files.
SFCFILES  = './data/sfc-brams',
SSTFPFX   = './data/sst-brams',
NDVIFPFX  = './data/ndvi-brams', ! Path and prefix for ndvi files

ITOPTFLG  = 1,1,1,1,       ! 2 - Fill data in "leaf3_init"
ISSTFLG   = 1,1,1,1,       ! 0 - Interpolate from coarser grid
IVEGTFLG  = 1,1,1,1,       ! 1 - Read from standard Lat/Lon data file
ISOILFLG  = 1,1,2,1,       !
NDVIFLG   = 1,1,2,2,       !

NOFILFLG  = 2,2,2,2,       ! 2 - Fill data in "leaf3_init"

```

```

                                ! 0 - Interpolate from coarser grid

IUPDNDVI = 0,                    ! 0 - No update of NDVI values during run
IUPDSST  = 0,                    ! 0 - No update of SST values during run
                                ! 1 - Update values during run

                                ! The following only apply for IxxxxFLG=1

ITOPTFN  = '/opt/data/topo10km/H',
          '/opt/data/topo1km/EL',

ISSTFN   = './SST/W',
          './SST/W',

IVEGTFN  = '/opt/data/GL_OGE_INPE/OGE',
          '/opt/data/GL_OGE_INPE/OGE',

ISOILFN  = '/opt/data/soil_FAO/FAO',
          '/opt/data/soil_FAO/FAO',

NDVIFN   = './ndvi/N',
          './ndvi/N',

! Topography scheme

ITOPSFLG = 0,0,0,0,              ! 0 = Average Orography
                                ! 1 = Silhouette Orography
                                ! 2 = Envelope Orography
                                ! 3 = Reflected Envelope Orography

TOPTENH  = 1.,1.,1.,0.,         ! For ITOPSFLG=1, Weighting of topo
                                ! silhouette averaging
                                ! For ITOPSFLG=2 or 3, Reflected Envelope
                                ! and Envelope Orography enhancement factor

TOPTWVL  = 3.,2.,2.,4.,         ! Topo wavelength cutoff in filter

! Surface Roughness scheme

IZOFLG   = 0,0,0,0,              ! 0 = Use veg, bare soil and water surface
                                ! 1 = Also use subgrid scale topography
ZOMAX    = 5.,5.,5.,5.,         ! Max zo for IZOFLG=1
ZOFACT   = 0.005,                ! Subgrid scale orographic roughness factor

! Microphysics collection tables

                                ! Filename to read or write

$END

$MODEL_OPTIONS

NADDSC   = 4,                    ! Number of additional scalar species
                                ! To use with CATT must be >= 4

! Numerical schemes

ICORFLG  = 1,                    ! Coriolis flag/2D v-component - 0=off, 1=on
IBND     = 1,                    ! Lateral boundary condition flags
JBND     = 1,                    ! 1-Klemp/Wilhelmson, 2-Klemp/Lilly, 3-Orlanski

```

```

! 4-cyclic
CPHAS = 20., ! Phase speed if IBND or JBND = 1
LSFLG = 0, ! Large-scale gradient flag for variables other
than
! normal velocity:
! 0 = zero gradient inflow and outflow
! 1 = zero gradient inflow, radiative b.c. outflow
! 2 = constant inflow, radiative b.c. outflow
! 3 = constant inflow and outflow
NFPT = 0, ! Rayleigh friction - number of points from the top
DISTIM = 400., ! - dissipation time scale

! Radiation parameters

ISWRTYP = 4, ! Shortwave radiation type
ILWRTYP = 4, ! Longwave radiation type
! 0-none, 2-Mahrer/Pielke, 1-Chen, 3-Harrington
! 4-CARMA
! Parameters needed by CARMA radiation scheme
RADDATFN = '/opt/data/carma/rad_param.data',

RADFRQ = 1200., ! Freq. of radiation tendency update (s)
LONRAD = 1, ! Longitudinal variation of shortwave
! (0-no, 1-yes)

! Cumulus parameterization parameters

NNQPARM = 2,2,2,2, ! Convective param. flag (0-off, 1-on,
! 1-on standard,
! 2-on Grell par.)

CLOSURE_TYPE = 'EN', ! Closure type (for Grell Param.):
! EN: ensemble (all closures)
! GR: Grell
! LO: low level omega
! MC: moisture convergence
! SC: like Fritsch Chappel or Kain Fritsch
! AS: Arakawa-Schubert

NNSHCU = 1,1,1,1, ! Shallow Cumulus Param. (0-off, 1-on)
CONFRQ = 600., ! Frequency of conv param. updates (s)
SHCUFRQ = 600., ! Frequency of Shallow param. updates (s)
WCLDBS = .0005, ! Vertical motion needed at cloud base for
! to trigger convection

! Surface layer and soil parameterization

NPATCH = 5, ! Number of patches per grid cell (min=2)

NVEGPAT = 4, ! Number of patches per grid cell to be
! filled from
! vegetation files
! (min of 1, max of NPATCH-1)

N_CO2 = 1, ! Number of CO2 tracers for use with SiB submodel

CO2_INIT = 360., 360., 360., 355., 355., 355., 350., 350., 340.,
! CO2 vertical profile for SiB submodel initialization. [ppm]

ISFCL = 1, ! Surface layer/soil/veg model
! 0-specified surface layer gradients

```

```

! 1-soil/vegetation model - LEAF
! 3- SiB submodel

NVGCON   = 6,           ! Vegetation type (see below)

! 1 -- Crop/mixed farming           2 -- Short grass
! 3 -- Evergreen needleleaf tree    4 -- Deciduous needleleaf tree
! 5 -- Deciduous broadleaf tree     6 -- Evergreen broadleaf tree
! 7 -- Tall grass                   8 -- Desert
! 9 -- Tundra                       10 -- Irrigated crop
! 11 -- Semi-desert                 12 -- Ice cap/glacier
! 13 -- Bog or marsh                14 -- Inland water
! 15 -- Ocean                       16 -- Evergreen shrub
! 17 -- Deciduous shrub             18 -- Mixed woodland

PCTLCON  = 1.,         ! Constant land % if for all domain
NSLCON   = 6,         ! Constant soil type if for all domain

! 1 -- sand                         2 -- loamy sand           3 -- sandy loam
! 4 -- silt loam                    5 -- loam                 6 -- sandy clay loam
! 7 -- silty clay loam              8 -- clay loam           9 -- sandy clay
! 10 -- silty clay                  11 -- clay                12 -- peat

ZROUGH   = .05,       ! Constant roughness if for all domain
ALBEDO   = .2,       ! Constant albedo if not running soil model
SEATMP   = 298.,     ! Constant water surface temperature

DTHCON   = 0.,       ! Constant sfc layer temp grad for no soil
DRTCONE  = 0.,       ! Constant sfc layer moist grad for no soil

SOIL_MOIST = 'n',    ! n => Homogeneous (standard)
! i,h,a => Heterogenous Soil Moist.Init.
! with file.
! i => INITIAL
! h => HISTORY
! a => INITIAL or HISTORY

SOIL_MOIST_FAIL = 'h', ! In case of Heterogenous Soil Moist. file was
! not found, what to do?
! s => STOP the program
! h => Initialize with Homogenous Soil Moist.
! l => Looking for 5 days old files, and if
! not found again then stop.

USDATA_IN = './umid/GL_SM.GPNR.', ! Soil Moisture File prefix
USMODEL_IN = './umid/us', ! File prefix with pre-calculated data by BRAMS

SLZ       = -2.0, -1.75, -1.50, -1.25, -1.00, -0.75, -0.50, -0.25, -0.05, !
soil grid levels

SLMSTR    = 0.30, 0.30, 0.30, 0.25, 0.25, 0.20, 0.20, 0.18, 0.15,
! Initial soil moisture

STGOFF= 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,
! Initial soil temperature offset
! from lowest atmospheric level
!-----

!----- Urban canopy parameterization -----

IF_URBAN_CANOPY =0,

```

```

!-----
!----- Eddy diffusion coefficient parameters -----
IDIFFK = 1,1,1,1,          ! K flag:
                          ! 1 - Horiz deform/Vert Mellor-Yamada
                          ! 2 - Anisotropic deformation
                          !   (horiz & vert differ)
                          ! 3 - Isotropic deformation
                          !   (horiz and vert same)
                          ! 4 - Deardorff TKE (horiz and vert same)
IHORGRAD = 1,            ! 1 - horiz grad frm decomposed sigma grad
                          ! 2 - true horizontal gradient.
                          !   Non-conserving, but allows small DZ
CSX      = .2,.2,.2,.2,  ! Deformation horiz. K's coefficient
CSZ      = .35,.35,.35,.2, ! Deformation vert. K's coefficient
XKHKM    = 3.,3.,3.,3.,  ! Ratio of horiz K_h to K_m for deformation
ZKHKM    = 3.,3.,3.,3.,  ! Ratio of vert K_h to K_m for deformation
AKMIN    = 1.,1.,1.,2.,  ! Ratio of minimum horizontal eddy
                          ! viscosity coefficient to typical value
                          ! from deformation K
!-----
!----- Microphysics -----
LEVEL    = 3,            ! Moisture complexity level

ICLOUD   = 4,            ! Microphysics flags
IRAIN    = 2,            !-----
IPRIS    = 5,            ! 1 - diagnostic concen.
ISNOW    = 2,            ! 2 - specified mean diameter
IAGGR    = 2,            ! 3 - specified y-intercept
IGRAUP   = 2,            ! 4 - specified concentration
IHAIL    = 2,            ! 5 - prognostic concentration

CPARM    = .1e9,         ! Microphysics parameters
RPARM    = 1e-3,         !-----
PPARM    = 0.,           ! Characteristic diameter, # concentration
SPARM    = 1e-3,         ! or y-intercept
APARM    = 1e-3,
GPARM    = 1e-3,
HPARM    = 3e-3,

GNU      = 2.,2.,2.,2.,2.,2.,2., ! Gamma shape parms for
                          ! cld rain pris snow aggr graup hail
!-----
$END

$MODEL_SOUND

!-----
! Sounding specification
!-----

! Flags for how sounding is specified

IPSFLG   = 1,            ! Specifies what is in PS array
                          ! 0-pressure (mb) 1-heights (m)
                          ! PS(1)=sfc press (mb)

```

```

ITSFLG   = 0,                ! Specifies what is in TS array
                                ! 0-temp(C) 1-temp(K) 2-pot. temp(K)

IRTSFLG  = 3,                ! Specifies what is in RTS array
                                ! 0-dew pnt.(C) 1-dew pnt.(K)
                                ! 2-mix rat(g/kg)
                                ! 3-relative humidity in %,
                                ! 4-dew pnt depression(K)

IUSFLG   = 0,                ! Specifies what is in US and VS arrays
                                ! 0-u,v component(m/s)
                                ! 1-umoms-direction, vmoms-speed

HS        = 0.,

PS = 1010.,1000.,2000.,3000.,4000.,6000.,8000.,11000.,15000.,20000.,25000.,

TS = 25., 18.5, 12., 4.5, -11., -24., -37., -56.5, -56.5, -56.5, -56.5,

RTS = 70.,70.,70.,70.,20.,20.,20.,20.,10.,10.,10.,

! US = 2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,
US = 10.,10.,10.,10.,10.,10.,10.,10.,10.,10.,10.,10.,
! US = 0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,
! US = 3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,

! VS = 3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,
! VS = 2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,
VS = 0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,

$END

$MODEL_PRINT

!-----
! Specifies the fields to be printed during the simulation
!-----

NPLT      = 0,                ! Number of fields printed at each time
                                ! for various cross-sections (limit of 50)

IPLFLD    = 'UP','THP','THETA','RT','TOTPRE',
                                ! Field names - see table below

! PLFMT(1) = '0PF7.3',        ! Format spec. if default is unacceptable

IXSCTN    = 3,3,3,3,3,3,
                                ! Cross-section type (1=XZ, 2=YZ, 3=XY)

ISBVAL    = 2,2,2,2,2,2,2,
                                ! Grid-point slab value for third direction

! The following variables can also be set in the namelist: IAA,
! IAB, JOA, JOB, NAAVG, NOAVG, PLTIT, PLCONLO, PLCONHI, and PLCONIN.

!   'UP'   - UP (M/S)         'RC'   - RC (G/KG)         'PCPT' - TOTPRE
!   'VP'   - VP (M/S)         'RR'   - RR (G/KG)         'TKE'  - TKE
!   'WP'   - WP (CM/S)        'RP'   - RP (G/KG)         'HSCL' - HL (M)
!   'PP'   - PRS (MB)         'RA'   - RA (G/KG)         'VSCL' - VL (M)

```

```

!   'THP' - THP (K)
!   'THETA'- THETA (K)   'RL' - RL (G/KG)   'TG' - TG (K)
!   'THVP' - THV' (K)   'RI' - RI (G/KG)   'SLM' - SLM (PCT)
!   'TV' - TV (K)       'RCOND'- RD (G/KG)   'CONPR'- CON RATE
!   'RT' - RT (G/KG)   'CP' - NPRIS   'CONP' - CON PCP
!   'RV' - RV (G/KG)   'RTP' - RT' (G/KG)   'CONH' - CON HEAT
!                                     'CONM' - CON MOIS
!
!   'THIL' - Theta-il (K) 'TEMP' - temperature (K)
!   'TVP' - Tv' (K)       'THV' - Theta-v (K)
!   'RELHUM'-relative humidity (%)   'SPEED'- wind speed (m/s)
!   'FTHRD'- radiative flux convergence (??)
!   'MICRO'- GASPRC
!   'Z0' - Z0 (M)         'ZI' - ZI (M)         'ZMAT' - ZMAT (M)
!   'USTARL'-USTARL (M/S) 'USTARW'-USTARW (M/S) 'TSTARL'-TSTARL (K)
!   'TSTARW'-TSTARW (K)   'RSTARL'-RSTARL (G/G) 'RSTARW'-RSTARW (G/G)
!   'UW' - UW (M*M/S*S)   'VW' - VW (M*M/S*S)
!   'WFZ' - WFZ (M*M/S*S) 'TFZ' - TFZ (K*M/S)
!   'QFZ' - QFZ (G*M/G*S) 'RLONG'- RLONG
!   'RSHORT'-RSHORT

```

\$END

\$ISAN_CONTROL

```

!-----
! Isentropic control
!-----

```

```

ISZSTAGE = 1,      ! Main switches for isentropic-sigz
IVRSTAGE = 1,      ! "varfile" processing

ISAN_INC = 0600,   ! ISAN processing increment (hhmm)
                  ! range controlled by TIMMAX,
                  ! IYEAR1,...,ITIME1

GUESS1ST = 'PRESS', ! Type of first guess input- 'PRESS', 'RAMS'

I1ST_FLG = 1,      ! What to do if first guess file should be
                  ! used but does not exist.
                  ! 1=I know it may not be there,
                  ! skip this data time
                  ! 2=I screwed up, stop the run
                  ! 3=interpolate first guess file from
                  ! nearest surrounding times, stop if unable
                  ! (not yet available)

IUPA_FLG = 3,      ! UPA-upper air, SFC-surface
ISFC_FLG = 3,      ! What to do if other data files should be
                  ! used, but does not exist.
                  ! 1 = I know it may not be there,
                  ! skip this data time
                  ! 2 = I screwed up, stop the run
                  ! 3 = Try to continue processing anyway

```

! Input data file prefixes

```

IAPR = './dprep/dp',
IARAWI = '', ! Archived rawinsonde file name
IASRFCE = '', ! Archived surface obs file name

```

! File names and dispose flags

```

VARPFX      = './ivar/iv-brams',
IOFLGISZ    = 0,                ! Isen-sigz file flag: 0 = no write, 1 = write
IOFLGVAR    = 1,                ! Var file flag: 0 = no write, 1 = write

$END

$ISAN_ISENTROPIC

!-----
! Isentropic and sigma-z processing
!-----

!-----
! Specify isentropic levels
!-----

NISN        = 43,                ! Number of isentropic levels
LEVTH       = 280,282,284,286,288,290,292,294,296,298,300,303,306,309,312,
              315,318,321,324,327,330,335,340,345,350,355,360,380,400,420,
              440,460,480,500,520,540,570,600,630,670,700,750,800,

!-----
! Analyzed grid information:
!-----

NIGRIDS     = 1,                ! Number of RAMS grids to analyze

TOPSIGZ     = 20000.,           ! Sigma-z coordinates to about this height

HYBBOT      = 4000.,           ! Bottom (m) of blended sigma-z/isentropic
                          ! layer in varfiles
HYBTOP      = 6000.,           ! Top (m) of blended sigma-z/isentropic layer

SFCINF      = 1000.,           ! Vert influence of sfc observation analysis

SIGZWT      = 1.,              ! Weight for sigma-z data in varfile:
                          ! 0.= no sigz data,
                          ! 1.=full weight from surface to HYBBOT

NFEEDVAR    = 1,                ! 1=feed back nested grid varfile, 0=don't

!-----
! Observation number limits:
!-----

MAXSTA      = 150,              ! maximum number of rawindsondes
                          ! (archived + special)
MAXSFC      = 1000,             ! maximum number of surface observations

NOTSTA      = 0,                ! Number of stations to be excluded
NOTID       = 'r76458',         ! Station ID's to be excluded
                          ! Prefix with 'r' for rawindsonde,
                          ! 's' for surface

IOBSWIN     = 1800,

STASEP      = .1,               ! Minimum sfc station separation in degrees.
                          ! Any surface obs within this distance
                          ! of another obs will be thrown out
                          ! unless it has less missing data,
                          ! in which case the other obs will be

```

```
!      thrown out.

IGRIDFL = 3,      ! Grid flag=0 if no grid point, only obs
!                ! 1 if all grid point data and obs
!                ! 2 if partial grid point and obs
!                ! 3 if only grid data
!                ! 4 all data... fast

GRIDWT   = .01,.001,  ! Relative weight for the gridded press data
!                ! compared to the observational data in
!                ! the objective analysis

GOBSEP   = 2.,      ! Grid-observation separation (degrees)
GOBRAD   = 2.,      ! Grid-obs proximity radius (degrees)

WVLNTH   = 1600.,1000.,600.,  ! Used in S. Barnes objective analysis.
!                ! Wavelength in km to be retained to the
!                ! RESPON % from the data to the upper air
!                ! grids.
SWVLNTH  = 750.,300.,750.,  ! Wavelength for surface objective analysis

RESPON   = .90,.9,.9,      ! Percentage of amplitude to be retained.

$END
```