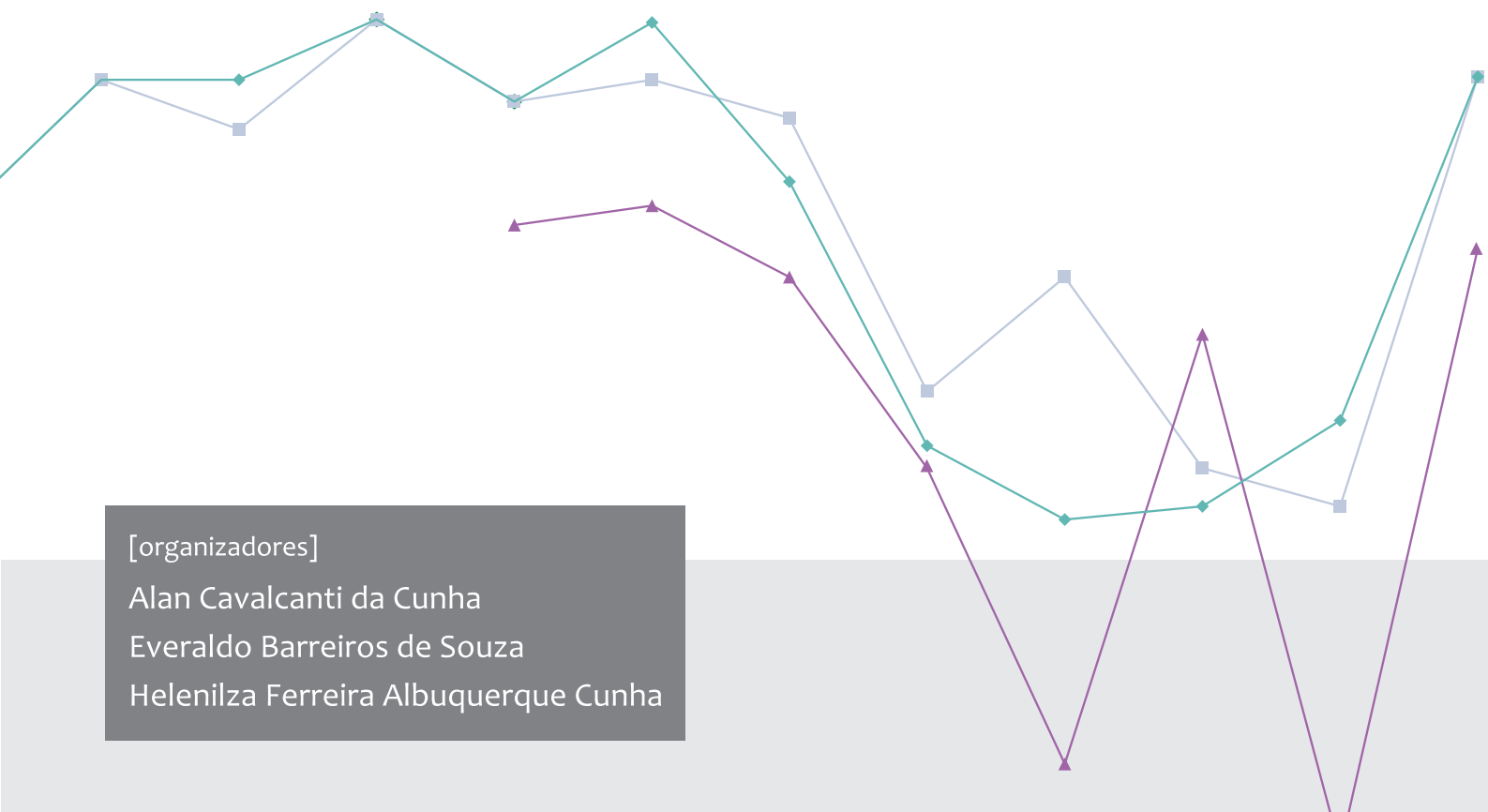


# Tempo, Clima e Recursos Hídricos

Resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá

Macapá • IEPA • 2010



[organizadores]

Alan Cavalcanti da Cunha

Everaldo Barreiros de Souza

Helenilza Ferreira Albuquerque Cunha

## Previsão Numérica Operacional no Estado do Amapá Utilizando o BRAMS

**Dr. Paulo Afonso Fischer Kuhn**

pkuhn@ufpa.br

Prof. adjunto da Faculdade de Meteorologia – Departamento de Geociências da UFPA.

**Dr. Eng. Alan Alan Cavalcanti da Cunha**

alancunha@unifap.br

Ex-coordenador do NHMET/IEPA, coordenador do Projeto REMETAP, Prof. do curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e Prof. dos Programas de Pós-Graduação do PPGBio/PPGDAPP-UNIFAP.

**Grad. Mauro de Jesus Pereira**

Mauro.pereira@iepa.ap.gov.br

Graduado em Gestão da Informação. Ex-Bolsista CNPq Desenvolvimento Tecnológico Industrial do Projeto REMETAP.

**Dr.ª Jaci Maria Bilhalva Saraiva**

jaci.saraiva@sipam.gov.br

Prof.ª Adjunta da Universidade Federal de Santa Maria – UFRGS. Coordenou o Setor de Meteorologia do SIPAM (AM). Coordenadora do Setor de Meteorologia do SIPAM (PA). Atua na Faculdade de Meteorologia – Departamento de Geociências da UFPA.

**Resumo.** O presente texto tem como objetivo apresentar as principais etapas e detalhes do processo de operacionalização de modelagem numérica aplicada à previsão do tempo em todo o Estado do Amapá. A evolução da operacionalização de modelos de previsão, contudo, é resultado de um momento especial de pleno desenvolvimento regional do setor empreendido pelo NHMET/IEPA-REMETAP auxiliado pelos seus diversos parceiros institucionais nacionais, como o CPTEC/INPE e a UFPA. A integração em rede de parceiros institucionais tornou possível a inserção do Estado do Amapá no contexto da aplicação de tecnologias modernas centradas em problemas relacionados à meteorologia e recursos hídricos, produzindo bons retornos de serviços e produtos customizados e disponibilizados à sociedade amapaense. Um dos principais resultados desse processo é a aplicação de modelos numéricos utilizados na previsão do tempo, com destaque ao Brazilian Regional Modeling System (BRAMS). No Estado do Amapá, o BRAMS tem sido executado por intermédio de duas rotinas diárias, sendo inicializada com dados oriundos do CPTEC compreendendo os horários de 0000 e 12000UTC. Nestes casos, os prognósticos gerados são de 72 e 36 horas, respectivamente. Metodologicamente, as etapas analisadas consistiram em descrição de parâmetros e detalhamento operacional do modelo BRAMS com ênfase na etapa computacional de processamento paralelo de alto desempenho. A área de abrangência de previsão escolhida para a execução do modelo atendeu às necessidades locais, a qual se estende pelas coordenadas 1,5S – 56W até 4,5N – 46W, com resolução espacial de 5 km x 4 km (domínio computacional de análise com alta resolução espacial). Como principal resultado foi avaliado o potencial da capacidade do modelo BRAMS em prever as principais variáveis meteorológicas do tempo. Para tanto, foram realizadas análises comparativas entre imagens de satélites da atmosfera e resultados de campos de variáveis meteorológicas geradas pela simulação numérica com bons resultados. Como conclusão, observa-se que o modelo BRAMS é um sistema de extraordinária relevância para estudos diversos sobre a dinâmica meteorológica local. A ênfase nas previsões de tempo é dada ao curto e curtíssimo prazos, além de possibilitar análises de eventos meteorológicos (reanálises), estudos específicos de impactos ambientais (dispersão de constituintes químicos na atmosfera – CATT), análise de efeitos térmicos causados por ilhas de calor em áreas urbanas (TEB) etc. O leque de aplicação do BRAMS no NHMET/IEPA é praticamente ilimitado e abre novas oportunidades de estudos específicos na área. Desta forma, o Estado do Amapá passa a dispor de uma ferramenta que possibilita maior capacidade de monitoramento de variáveis meteorológicas de interesse nos ambientes amazônicos.

**Palavras-Chaves:** Núcleo Estadual, Amapá, Operação de Previsão de Tempo, Modelagem, BRAMS, Computação Paralela.

## 1. INTRODUÇÃO

A região norte do Brasil em pleno século da tecnologia ainda é carente de recursos tecnológicos. Este quadro é mais agravante em regiões periféricas predestinadas ao esquecimento, muitas vezes envoltas pelo manto da preservação ambiental. Todavia, isto gera um forte isolamento das populações e dos setores produtivos que em sua gênese são dependentes destas tecnologias para que possam produzir mais e melhor causando o menor impacto ambiental possível, como ocorre por exemplo nos setores de energia, navegação (fluvial e aérea), meio ambiente, saneamento, agrícola, infraestrutura e defesa civil.

A fim de minimizar impactos negativos da atividade humana, torna-se fundamental o emprego de técnicas inovadoras que permitam aos tomadores de decisão agir de modo rápido e eficaz em termos de respostas à sociedade local. Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma contribuição significativa e abrangente ao desenvolvimento científico e tecnológico do Estado do Amapá, traduzido pela inserção do seu núcleo estadual de hidrometeorologia no contexto geopolítico nacional. O Sistema BRAMS operacional no Estado do Amapá é a consolidação desse avanço.

Mas esse objetivo apenas pode ser alcançado com ações eficientes de longo prazo e mediante disponibilização de conhecimento científico, social e ambiental que possam ser traduzidos em benefícios reais ou de desenvolvimento técnico e humano locais. A formulação de ações integradoras de atividades do setor tem sido fundamental para o desenvolvimento do Estado do Amapá, pois este se insere no contexto moderno do uso das melhores técnicas de previsão de tempo, tanto em âmbito inter quanto intrarregional. Desta forma, as novas tecnologias e ferramentas científicas tornam-se mais acessíveis aos usuários dos serviços prestados, pois estão mais próximas dos núcleos estaduais. Contudo, no contexto regional, nacional e internacional há ainda os grandes desafios estratégicos de Estado, tais como a disponibilização de ferramentas capazes de prever as condições do tempo em todo o espaço territorial do Estado do Amapá, por município ou por sub-região, disponibilizando produtos e serviços customizados sob medida a cada usuário em potencial.

Neste sentido, o NHMET vem trabalhando na adoção de técnicas e tecnologias adequadas e totalmente adaptadas à sua área de atuação. Nestas tecnologias inclui-se a modelagem numérica de alta resolução com o modelo numérico para previsão do tempo BRAMS, que é resultado de um esforço nacional para adequar um modelo numérico à realidade nacional, considerando as diferentes características climáticas de cada região do Brasil.

Este esforço teve início ainda na década passada, com financiamento da FINEP, em que contou com a participação de grande número de pesquisadores brasileiros das mais diversas instituições de ensino e pesquisa. Dotou-se desta maneira o país de massa crítica sobre o tema, que continua em pleno desenvolvimento como ocorre na operação meteorológica em vários centros operacionais brasileiros. O SIPAM é um bom exemplo.

O projeto REMETAP teve papel fundamental no desenvolvimento e apoio à operacionalização da modelagem numérica no Amapá, pois permitiu integrar diferentes instituições locais e regionais para o êxito deste sistema de previsão de tempo (CUNHA, 2007).

### **1.1. Características Físicas e Contextualização da Previsão no Estado do Amapá**

O Estado do Amapá é formado por planície litorânea, aluvial e planalto, com colinas e morros como a Serra do Tumucumaque, a Serra Lombard, a Serra da Estrela, a Serra da Agaminuara ou Uruaitu, a Serra do Noucoru, a Serra do Navio, a Serra das Mungubas, a Serra da Pancada, a Serra do Iratapuru, a Serra do Acapuzal, a Serra Culari e a Serra Arú. Cerca de 95% de seu território encontra-se abaixo de 300m de altitude e 72%, abaixo de 200m. A planície litorânea, inundável nas cheias periódicas, caracteriza-se pela presença de mangues e lagoas. Sendo que o ponto mais elevado do Estado é a Serra do Tumucumaque, no Maciço das Guianas, com 501m de altitude, situada em sua parte noroeste. Sua vegetação é densa e apresenta grandes variações de maré, dado que se encontra na região da foz do rio Amazonas. Por ser um dos Estados brasileiros mais novos, provavelmente é também uma das regiões mais preservadas do Brasil. Sendo assim, é fundamental conhecê-lo para protegê-lo. Ou seja, os setores produtivos que são caracterizados basicamente pelo extrativismo mineral, vegetal e pesqueiro, necessitam receber informações precisas quanto ao tempo e ao clima local, garantindo a produtividade sem que haja danos ao ambiente, o que geraria, certamente, prejuízos futuros (IBGE, 2009).

A fim de subsidiar políticas públicas voltadas à preservação ambiental com sustentabilidade, a REMETAP e o NHMET/IEPA objetivam o desenvolvimento tecnológico e humano na região, sendo o serviço de previsão do tempo uma das mais importantes vias para o sucesso desta missão, tanto em termos de qualificação de mão-de-obra especializada para manipular sistemas computacionais complexos de alto desempenho quanto em termos da personalização de produtos de previsão de tempo adequados às características locais, fundamentais para a implementação e operacionalização de um centro de previsão de tempo capaz de realizar estas ações (CUNHA, 2007).

A área de processamento paralelo, aplicado na elaboração das previsões numéricas de tempo, tem sido cada vez mais utilizada, especialmente devido à boa relação custo-benefício necessária para a implantação de aglomerados de computadores (*clusters*). Estes sistemas são bastante eficientes na execução dos modelos numéricos aplicados na previsão do tempo (SANTIN, 2006).

Os usuários do NHMET/IEPA requerem soluções de tecnologia da informação que possam atender demandas crescentes por serviços e produtos tecnológicos com alta confiabilidade, disponibilidade e agilidade de gerenciamento. Além disso, estes usuários desejam soluções que ofereçam a escalabilidade para desenvolvimento de pesquisas e a flexibilidade para desenvolver e implementar rapidamente novos serviços que ofereçam benefícios ao menor custo possível.

Para equipe do NHMET/IEPA, o processamento/armazenamento de informações em *cluster* é uma resposta técnica necessária bastante aguardada pelas dificuldades em implementá-las, exigindo esforço conjunto de áreas como sistemas de informação, engenharia e computação aplicadas (FAZENDA, 2008; MOREIRA, 2008).

O processamento em *cluster* é a prática de integrar vários computadores para que atuem como um único sistema. Esta tecnologia surgiu nos anos 1990 como uma proposta de utilizar microcomputadores considerados obsoletos. Porém, o sucesso da iniciativa foi tal que logo surgiram *clusters* construídos unicamente de equipamentos novos e modernos, garantindo papel de destaque no processamento de alto desempenho e com o bônus do baixo custo frente aos sistemas tradicionais formados por supercomputadores.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O Núcleo de Hidrometeorologia do Estado do Amapá conta com um sistema computacional dotado de um *cluster* com 36 processadores, 36Gb de memória distribuída e uma capacidade de armazenamento de 2Tb em expansão. Esta infraestrutura atualmente encontra-se instalada fisicamente no prédio da Divisão de Informática da UNIFAP por questões meramente de logística, visto que a universidade está conectada na rede lógica da Rede Nacional de Pesquisa (RNP), possibilitando ao NHMET um melhor rendimento e segurança na operacionalização de seus produtos de previsão do tempo.

### 2.1. Descrição do modelo BRAMS

O BRAMS é um modelo numérico criado para simular a circulação atmosférica em várias escalas, com a capacidade de resolver um sistema de equações não hidrostáticas e compressíveis, conforme Tripoli e Cottom (1982). Para tanto, o modelo permite trabalhar com múltiplas grades aninhadas em pilhas ou em mosaico, resolvendo as equações simultaneamente, permitindo a total integração entre elas e proporcionando um aumento da resolução espacial, conforme Freitas *et al.* (2009).

Sendo o estado da arte as parametrizações dos processos físicos, como os de troca entre atmosfera e superfície, processos turbulentos, convectivos, radiativos e de microfísica de nuvens são resolvidos pelo modelo. O BRAMS contempla várias outras características como um esquema de cúmulos rasos e profundos baseados em uma aproximação do fluxo de massa (GRELL e DENVENYI, 2002), bem como a utilização de umidade do solo com variação diária (GEAVERD e FREITAS, 2006).

O programa LBA (Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia – <http://lba.cptec.inpe.br>), contribuiu fortemente para o aprimoramento dos parâmetros de superfície usados pelo BRAMS, visto que os experimentos realizados no âmbito do projeto geraram uma grandiosidade de

dados que possibilitaram o aprimoramento do modelo para as condições tropicais. As parametrizações da energia cinética turbulenta na Camada Limite Planetária (CLP) e vários outros parâmetros biofísicos, como parametrizações de vegetação e solo para as regiões tropical e sub-tropical brasileiras e seus biomas foram incorporados ao modelo. Além disto, o mapa de uso da terra é oriundo do projeto PROVEG (SESTINI *et al.*, 2002), enquanto os dados relativos aos tipos de solos brasileiros são frutos do projeto RADAMBRASIL (Rossato *et al.*, 2002). Os dados de Índice de Vegetação Normalizado por Diferenças (NDVI) são derivados do Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), obtidos do período entre 2001 e 2002, processados pelo “Terrestrial Biophysics and Remote Sensing Lab” (<http://tbrs.arizona.edu>).

## 2.2. CATT-BRAMS

Incluso nas potencialidades do BRAMS encontra-se o Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian development on the Regional Modelling System (CATT-BRAMS), um modelo projetado para simular o transporte e os processos associados com a emissão resultante da queima de biomassa (FREITAS *et al.*, 2009). O CATT-BRAMS é um modelo euleriano de transporte totalmente acoplado ao BRAMS, que simula os processos atmosféricos conforme a evolução temporal do modelo, mas utilizando exatamente o mesmo passo de tempo, bem como as parametrizações físicas e dinâmicas. Este modelo é fundamentado na equação geral de conservação de massa para traçadores, como mostrado abaixo.

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} = \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{adv}}_I + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{CLP\ diff}}_II + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{CONV\ prof}}_III + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{CONV\ rasa}}_IV + \underbrace{W_{PM2.5}}_V + \underbrace{R}_{VI} + \underbrace{Q_{pr}}_VII \quad (1)$$

onde

- $\bar{s}$  = razão de mistura média do traçador em um determinado ponto de grade;
- I* = termo de transporte em 3D (advecção média do vento);
- II* = difusão turbulenta na escala de sub-grade na CLP (Camada Limite Planetária);
- III* = transporte na escala de sub-grade por convecção profunda;
- IV* = transporte na escala de sub-grade por convecção rasa;
- V* = termo de remoção de umidade aplicado às partículas finas de aerosol;
- VI* = termo genérico que se refere à deposição seca aplicada aos gases e partículas de aerosol, bem como das transformações químicas do CO;
- VII* = termo de fonte que inclui o mecanismo da pluma associado com as queimadas (FREITAS *et al.*, 2006).

O CATT-BRAMS depende de mapas de emissão de queimadas e qualidade do ar sobre a América do Sul, um produto operacional elaborado pelo CPTEC e disponibilizado diariamente na Internet (<ftp://ftp1.cptec.inpe.br/brams/data-brams/fire-map/>). Por outro lado, os produtos operacionais estão em <http://meioambiente.cptec.inpe.br/>.

### **2.3. TEB-BRAMS**

O modelo de balanço de energia para cidades (TEB – Town Energy Budget) está acoplado ao BRAMS usando uma parametrização de geometria de *canyon* generalizada, o que permite simular a circulação local no interior de cidades e ou regiões metropolitanas onde as emissões de “gases-estufa” são produzidas em grande escala. As simulações deste modelo são realizadas usando uma topografia atualizada e mapas de uso da terra. As ilhas de calor urbanas produzem forte convergência no centro destas regiões, o que acelera as brisas marítimas e terrestres em direção ao interior da cidade. Neste sentido, a utilização deste modelo acoplado ao BRAMS é ferramenta importante para o entendimento do comportamento das circulações locais sobre grandes cidades que se encontram em meio ao ecossistema amazônico.

Nas últimas décadas, houve um significativo aumento na modificação das circulações atmosféricas devido a superfícies heterogêneas. As superfícies asfaltadas das cidades afetam diretamente os fluxos de calor latente, sensível e *momentum*, a convergência em superfície, além da altura, outras características da CLP também são afetadas. Assim como provocam alterações na dispersão de poluentes, inibição de tempestades, propriedades óticas da atmosfera e vários outros processos físicos e químicos no ambiente urbano, conforme resultados observacionais obtidos por Changnon *et al.*, 1971; Oke, 1978; Balling *et al.*, 1990; Morris *et al.*, 2001; Dixon e Mote, 2003. Há também resultados obtidos por meio de modelagem por Sailor (1995); Khan e Simpson, 2001 *apud* Freitas *et al.*, 2007.

O TEB também necessita de dados atualizados das concentrações de gases-estufa, como monóxido de carbono, por exemplo. Para tanto, é necessário que estes dados sejam obtidos como valores diários, semanais e ou mensais, para então serem considerados nos parâmetros de iniciação do modelo.

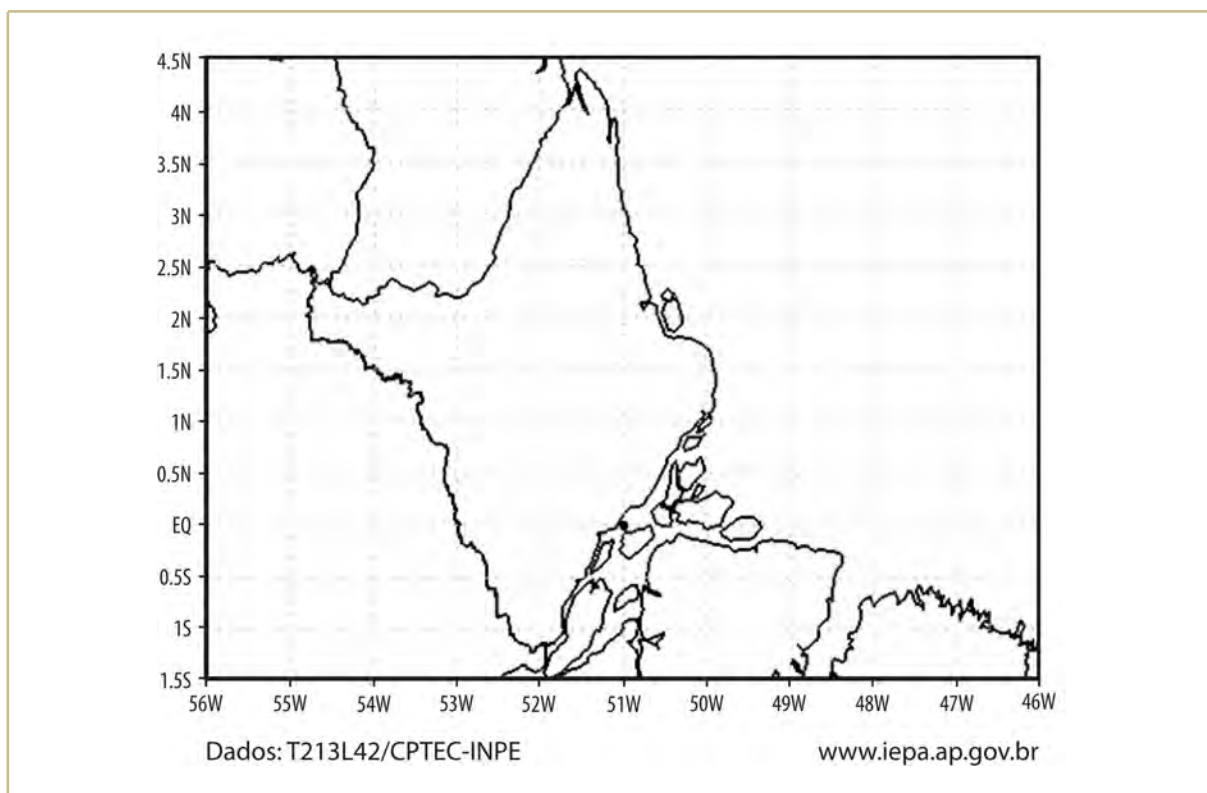
Esta sub-rotina representa uma ferramenta importante para o estudo e compreensão dos fluxos de calor sensível e latente sobre regiões urbanas com áreas razoavelmente grandes, o que apresenta forte contraste com a região em que estão inseridas.

### **2.4. Características do BRAMS/NHMET-IEPA**

O NHMET tem por objetivo providenciar prognósticos numéricos para o Estado do Amapá, e para este fim faz uso da versão 4.2 do BRAMS, a versão mais atualizada e disponível em <http://brams.cptec.inpe.br>.

Considerando as características físicas da região, ou seja, grande área urbana ladeada pela foz do rio Amazonas e pela floresta Amazônica, Macapá é uma cidade de contrastes nas condições de tempo e clima, o que favorece a investigação científica, e por outro lado oferece um desafio aos meteorologistas quanto às futuras projeções do tempo e análises das condições atmosféricas locais.

Para cobrir a totalidade espacial da região estão sendo usadas, no momento, duas rotinas operacionais assimilando dados disponibilizados pelo CPTEC. A área de abrangência do modelo compreende o retângulo com origem em 1,5S – 56W até 4,5N – 46W, correspondendo a 250 pontos de longitude e 160 de latitude com espaçamento em 5 km x 4 km, respectivamente, com 32 níveis verticais, dos quais sete são em profundidades no solo. Os parâmetros de superfície como tipo de solo, vegetação, NDVI, temperatura da superfície do mar (TSM ou SST- Sea Surface Temperature) etc. são aqueles recomendados e disponibilizados pelo sítio de Internet acima citado. O motivo de tal grade é fruto da relação custo computacional x resolução espaço-temporal, considerando que o aumento das resoluções causa um acréscimo significativo no tempo de processamento, o que não pode comprometer a geração e disponibilização dos resultados. A Figura 1 ilustra a área empregada nas rotinas operacionais dos dias atuais.



**Figura 1.** Localização da área em estudo: Estado do Amapá.

A Tabela 1 apresenta o conjunto de opções do modelo em sua versão 4.2, empregada pela REMETAP/NHMET-IEPA. Dentre as opções disponíveis no modelo, as que estão em uso foram



assinaladas com a letra X, podendo haver alterações a partir do momento em que for notada variação significativa positiva.

**Tabela 1.** Resumo de categorias e opções em uso do BRAMS – NHMET/IEPA-REMETAP.

continua

CATEGORIA	OPÇÕES	EM USO
Equações básicas	Não-hidrostática – compressível	X
Dimensão	1 D	
	2 D	
	3 D	X
Coordenadas verticais	Cartesiana	
	Seguindo o terreno $S_z$	
	Shaved ETA	X
Coordenadas horizontais	Cartesiana	
	Estereográfica tangente ao plano	X
Grade estruturada e deslocamento	Grade C de Arakawa – uma grade (fixa)	X
	Grade C de Arakawa – múltiplas grades aninhadas (fixas)	
	Grade C de Arakawa – múltiplas grades aninhadas (móveis)	
Diferenciação finita no tempo	Centrado no tempo ( <i>Leapfrog</i> ); de 2a ordem de precisão espacial	X
	Adiantado no tempo ( <i>Forward</i> ); de 2a ordem de precisão espacial.	X
Fechamento da turbulência	Deformação K de Smagorinsky para a horizontal e Mellor e Yamada na vertical	X
	O'Brien K / Blackadar K	
	Deardorff nível 2.5	
Precipitação estável	Sem condensação	
	Condensação	
Parametrização de cumulus	Desativada	
	Kuo modificado (Tremback, 1990)	X
Microfísica explícita	Desativada	
	Microfísica para nuvens quentes	X
	Microfísica de nuvens frias - Nucleação especificada	
	Microfísica de nuvens frias - Nucleação prognosticada	
Radiação	Desativada	
	Onda Curta I – Chen	

**Tabela 1.** Resumo de categorias e opções em uso do BRAMS – NHMET/IEPA-REMETAP.

		<i>conclusão</i>
CATEGORIA	OPÇÕES	EM USO
	Onda Curta II – Mahrer e Pielke	
	Onda Curta III – Harrington	
	Onda Curta IV – CARMA	X
	Onda Longa I – Chen	
	Onda Longa II – Mahrer e Pielke	
	Onda Curta III – Harrington	
	Onda Curta IV – CARMA	X
Camada superficial	Louis (1979)	X
Fronteira inferior	Especifica as diferenças de temperatura e umidade entre a superfície e o ar	
	Diagnostica os fluxos de umidade e temperatura baseado no modelo de solo	
	Parametrização da vegetação	X
Fronteira superior	Topo rígido	X
	Prognóstico da pressão à superfície	X
	Superfície material	
	Condição radiacional para onda de gravidade	
	Camada de fricção Rayleigh	X
Fronteira lateral	Condição de fronteira radiativa I - Orlanski (1976).	X
	Condição de fronteira radiativa II – Klemp e Wilhelmson (1978 a, b)	
	Condição de fronteira radiativa III – Klemp e Lilly (1978)	
	Condição de fronteira radiativa e MCR (Região de Compensação de Mesoescala)	
Iniciação	Horizontalmente homogêneo (HHI)	X
	HHI mais variações para forçar a iniciação de nuvens	
	Iniciação variável I – NMC ou ECMWF interpolado direto dos pontos de grade.	
	Iniciação variável II – Análise Isentrópica dos dados do NMC ou ECMWF	X
Difusão e transporte	Modulo de dispersão de partículas Lagrangeano.	

## 2.5. Estrutura computacional

A Figura 2 ilustra o *cluster* instalado e em uso no Estado do Amapá (NHMET/IEPA- REMETAP). Nota-se que ele conta com uma estrutura em *rack* expansível, permitindo ampliar sua capacidade computacional, o que representaria ganho de rendimento na execução do modelo, aumento nas

resoluções espacial e temporal, ampliação da área de interesse e/ou ainda execução de rotinas intermediárias para propósitos científicos e ou operacionais como previsões de curto e curtíssimo prazo em áreas críticas.



**Figura 2.** Cluster com seis nodos além de mais um nodo integrador (REMETAP).

O equipamento instalado conta com 36 processadores de 64bits e um total de 36Gb de memória RAM, correspondendo 1Gb por processador. Cada nodo deste sistema dispõe de um disco rígido do tipo Serial Attached SCSI (SAS) de 146Gb, enquanto o nodo integrador (master) possui um disco rígido SAS de 146Gb e dois serial ATA (SATA) de 500Gb de capacidade. O cluster ainda é dotado de um sistema de armazenamento em massa com capacidade bruta total de 16Tb, o que representa uma capacidade líquida de aproximadamente 4Tb, com um fator de redundância de 4:1. Ou seja, permite haver sinistro em até quatro discos sem que haja perda de dados.

A fim de operacionalizar este sistema, adotou-se o sistema operacional de código aberto openSUSE (<http://www.opensuse.org>). Essa opção deveu-se à simplicidade de instalação e gerenciamento aliados ao vasto conjunto de programas disponibilizados nos seus repositórios oficiais, garantindo o sucesso na operacionalização da modelagem numérica. Para tanto, está sendo usada a versão 11.0 do openSUSE, a qual apresenta notável estágio de maturidade minimizando a ocorrência de falhas, o que comprometeria a operação do modelo. Assim como o sistema operacional, os demais programas como compiladores das linguagens C, FORTRAN, gerenciadores de processos e demais bibliotecas necessárias no processo de compilação do modelo são também programas de código aberto sob

licença GNU/GPL (<http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>). Tais características minimizam os custos, de modo que o sistema se torna acessível aos grupos emergentes.

## 2.6. Descrição da operação

O BRAMS é constituído de um conjunto de vários módulos, cada um com suas características. É necessário que os parâmetros de entrada do modelo, bem como os dos modelos acoplados, estejam listados em um arquivo de entrada chamado de RAMSIN. Este arquivo é necessário para as fases de execução do modelo, ou seja, as primeiras estruturam as condições das fronteiras inferior, superior e laterais da área de estudo, e a última fase é quando o modelo é executado para gerar os prognósticos finais.

A Figura 3 resume de maneira bastante simples as etapas necessárias para a execução do modelo BRAMS. A partir do momento em que se dispõe de arquivos de iniciação do modelo oriundos do CPTEC no formato GRIB (dados processados como valores reticulares, expressos em forma binária), eles precisam ser convertidos para o formato de assimilação do BRAMS. Este processo é explicado e exemplificado nos documentos tutoriais encontrados em <http://brams.cptec.inpe.br>. Uma vez realizada esta conversão é necessário criar os arquivos que corresponderão às condições de superfície para o modelo como umidade do solo, topografia, vegetação, temperatura da superfície do mar, ndvi etc. Neste segundo passo é usado o valor MAKESFC para a variável RUNTYPE do arquivo RAMSIN (*namelist*). Em uma próxima etapa, a variável RUNTYPE existente no arquivo RAMSIN é alterada para o valor MAKEVFILE. Neste passo são processadas as condições de contorno de grade para cada tempo de integração e por final a variável RUNTYPE do arquivo de parâmetros recebe o valor INITIAL, que é usado para a última fase, isto é, a integração final do modelo. Este passo pode ser realizado de duas maneiras: em modo serial ou paralelo. O primeiro ocorre utilizando apenas um processador do computador em uso, enquanto o segundo utiliza vários processadores em um mesmo computador ou de vários computadores interligados, como é o caso aplicado neste trabalho por meio do *cluster* descrito anteriormente.

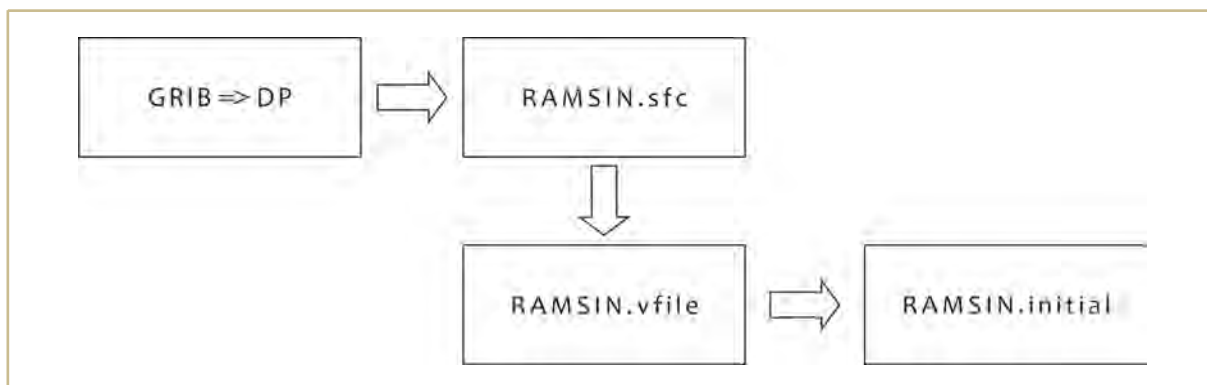


Figura 3. Modelo esquemático para execução do BRAMS.

A execução do modelo em paralelo ocorre por meio de programas de gerenciamento de processos que permitem a utilização de múltiplos processadores. Isto pode ocorrer de duas maneiras: (a) o programa a ser executado é compilado normalmente e o gerenciador de processo o distribui para os diversos processadores do *cluster*. Este procedimento permite utilizar praticamente qualquer aplicação em paralelo, porém, apresenta um custo computacional relativamente alto, uma vez que o gerenciador necessita realizar inúmeras tarefas de distribuição e reintegração a cada passo de tempo durante a execução do programa; (b) no caso do BRAMS, o código do modelo é escrito em FORTRAN 90, ou seja, é totalmente escrito em uma linguagem de programação voltada para a computação paralela, e isto o torna perfeito para a utilização em *clusters*, deixando o gerenciador de processos com menos tarefas e permitindo um baixo custo computacional. O gerenciador de processos utilizado amplamente com o BRAMS é o MPI (Message Processes Interface) e, assim como o registro acerca de sua documentação, este programa pode ser obtido em <http://www.mcs.anl.gov/mpi/mpich1>.

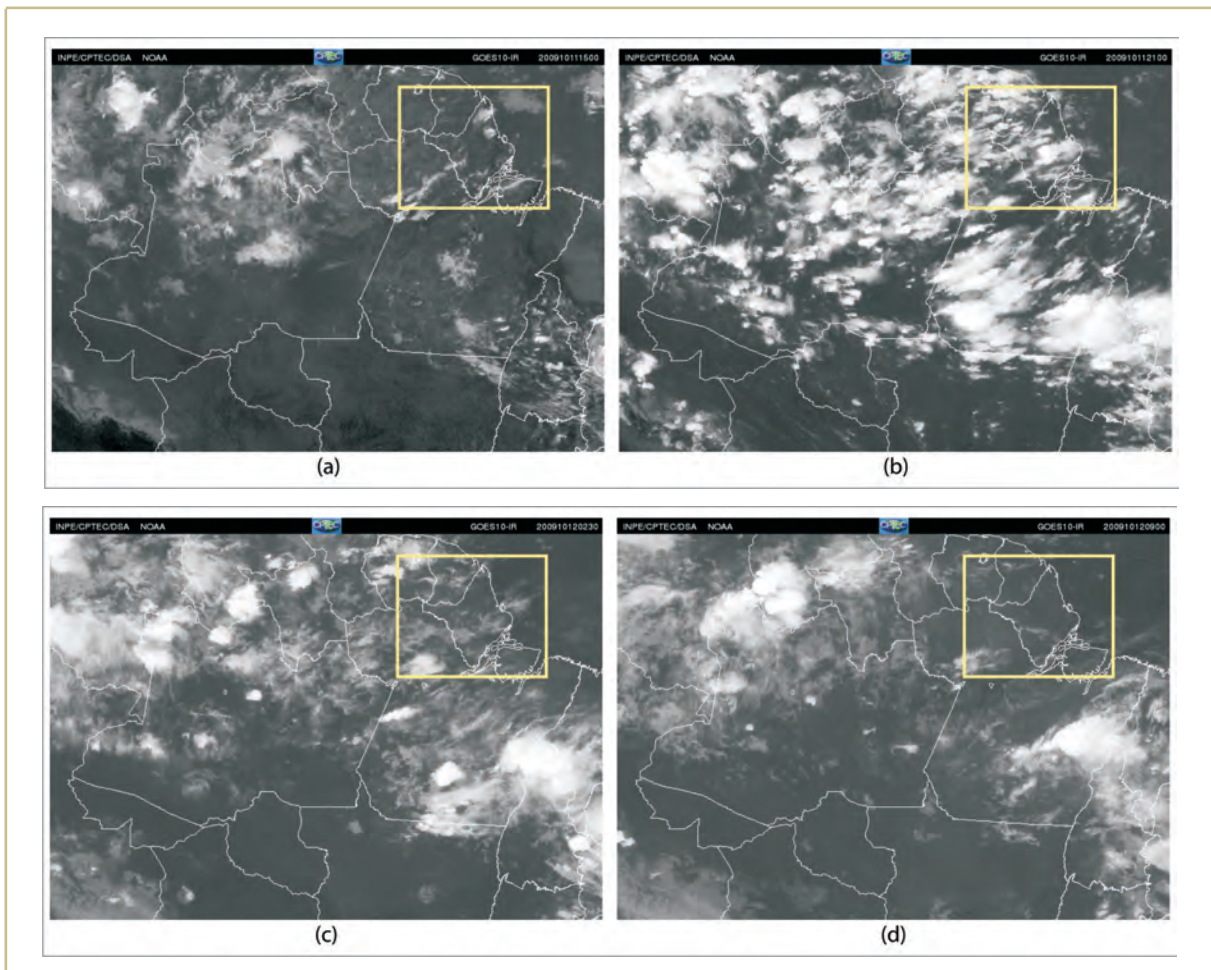
Na fase de pós-processamento, isto é, após realizadas as etapas de execução do modelo e geração dos respectivos arquivos relativos aos prognósticos, é momento de gerar os produtos finais a serem disponibilizados para a comunidade (usuários). Para a geração destes produtos em forma de campos meteorológicos é usado o programa GrADS, apropriado para trabalhar com dados científicos e amplamente empregado em pós-processamento da modelagem numérica aplicada a previsão do tempo (DOTY e KINTER, 1992). Assim como os demais aplicativos utilizados neste projeto, o GrADS também é regido pela licença GNU/GPL e pode ser obtido juntamente com sua documentação em <http://grads.iges.org>.

### 3. RESULTADOS

Neste estudo foram gerados os seguintes produtos meteorológicos apresentados de forma espacializada (campos): (a) precipitação; (b) vento em diversos níveis atmosféricos; (c) temperatura do ar em superfície; (d) umidade relativa do ar; (e) vento no nível de 925hPa associado com a precipitação. Com a ativação do modelo acoplado CATT-BRAMS, tem-se a distribuição de monóxido de carbono (CO), o CO antropogênico (COANT), aerossóis (PM<sub>25</sub>). Além dos produtos mencionados, vários outros poderão ser gerados de acordo com as necessidades operacionais e ou de investigação científica que ocorrerem, visto que há uma enorme flexibilidade no sistema implantado.

Com a finalidade de ilustrar o desempenho do modelo foram analisados campos básicos adotados na rotina operacional de previsão do tempo, isto é, precipitação associada com vento no nível de 925hPa, umidade relativa e temperatura próxima à superfície. Estes campos foram comparados com as imagens de satélite do mesmo dia (11 de outubro de 2009) com o objetivo de equiparar os resultados observados com os simulados (previsão). Deste modo, foi inicializada uma análise das imagens de satélite para o

período considerado para se obter um ponto de partida da análise de rendimento e acurácia do BRAMS. É importante observar que a data do experimento foi tomada aleatoriamente e corresponde ao período de estiagem, isto é, o “verão” amazônico.



**Figura 4.** Imagens de satélite geoestacionário GOES-W sobre a região norte no Brasil para o dia 11 de outubro de 2009: (a) 11/10/2009 -1800UTC; (b) 12/10/2009 -0000UTC; (c) 12/10/2009 -0600UTC; 12/10/2009 -1200UTC.

A Figura 4 ilustra quatro imagens de satélite oriundas do DSA/CPTEC (Divisão de Satélites Ambientais). O satélite é o GOES 10 (Geostationary Orbital Environmental Satellite). A área de abrangência do modelo é demarcada por um retângulo. Nesta área foi realizada a análise comparativa. Na primeira imagem, Figura 4a, que corresponde ao horário das 1800UTC, percebe-se a formação das primeiras nuvens formadas pelo transporte de umidade oriunda do oceano adjacente que, ao encontrar uma superfície mais aquecida, se eleva e condensa. Este fenômeno é bastante típico na região norte do Brasil, isto é, formação de linhas de instabilidade paralelas à costa, conforme é descrito nos trabalhos de Cohen (1989) e Cohen *et al.* (1995). Esta situação é iniciada nas primeiras horas da manhã e nas regiões próximas da costa provê precipitação nos horários em torno do meio-dia, podendo haver atrasos inerentes às

condições sazonais, como o deslocamento da ZCIT (Zona de Convergência Inter-Tropical). Deste modo, a sequência das imagens mostra esta situação. Ou seja, um aumento da nebulosidade ao longo do dia indicando condições de precipitação sobre grande parte do Estado do Amapá.

A seguir é mostrado um conjunto de campos meteorológicos que ilustram o prognóstico gerado pelo modelo com iniciação às 1200UTC do dia 11 de outubro de 2009. Este prognóstico foi gerado para um período de 36 horas a partir do horário de iniciação.

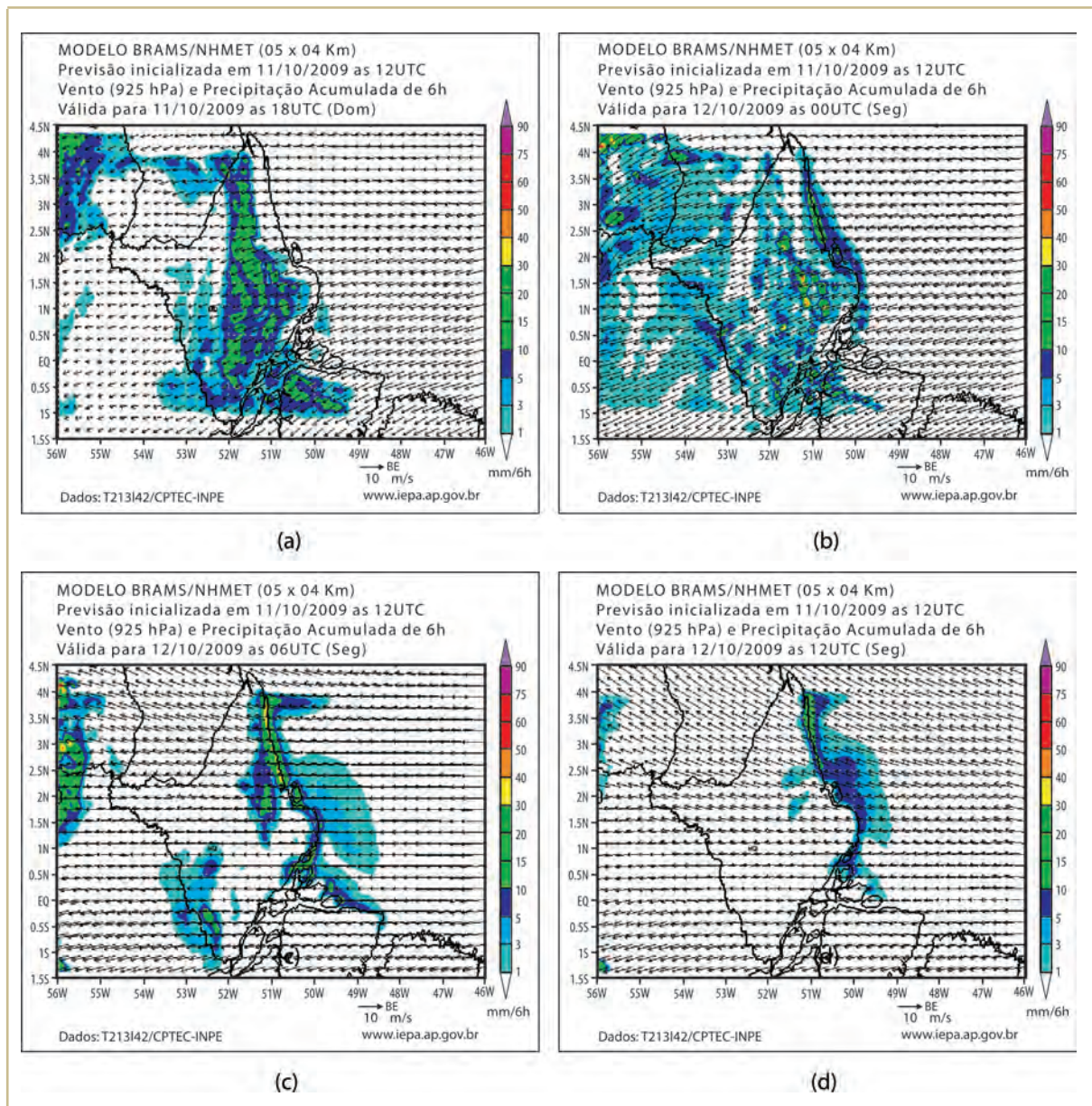
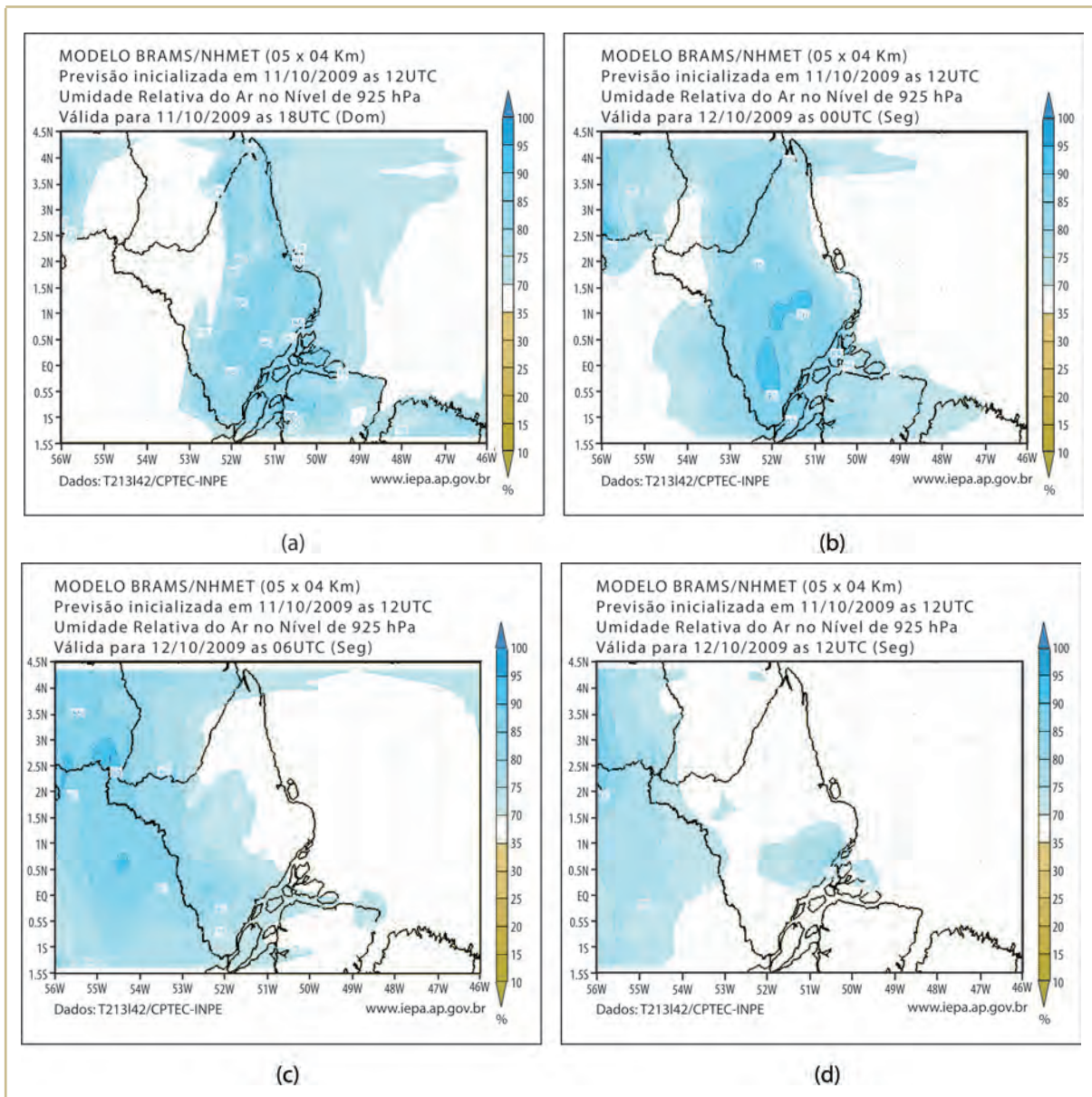


Figura 5. Campos meteorológicos de precipitação e vento no nível de 925hpa.

Na Figura 5 são mostrados os campos de precipitação acumulada de seis horas associados com vento em 925hPa, nos quais se verifica que o modelo é bastante capaz de representar o comportamento típico do regime de ventos da região. Ou seja, ventos controlados basicamente pela influência dos contrastes térmicos entre continente e a região oceânica adjacente, o que configura as situações de brisas marítima e terrestre. A Figura 5a mostra o campo de precipitação acumulado para o período entre o início da integração e às 1800UTC, o que representa 14 horas no horário local. Nesta situação se observa que o modelo prevê condições de ocorrência de chuva sobre a região central do Amapá, enquanto o campo de vento mostra a forte descontinuidade provocada pelo forte contraste térmico existente na região. A Figura 4c, relativa ao período seguinte, apresenta condições de precipitação bastante generalizada sobre o Estado, conforme pode ser observado na imagem de satélite para o mesmo período mostrado anteriormente na Figura 4d. No decorrer do período, conforme é ilustrado nas Figuras 5c e 5d, o modelo continua representando com acurácia as condições de tempo ocorridas naquele dia.

As condições de superfície na grade utilizada são bastante balanceadas, de modo que a proporcionalidade entre as áreas continentais e oceânicas foi mantida, o que permite que os processos físicos que ocorrem na atmosfera possam ser bem representados pelo modelo.





**Figura 6.** Campo meteorológico de umidade relativa.

Com a finalidade de verificar as condições favoráveis à formação de nuvens é importante analisar vários campos simultaneamente, como o de umidade relativa associado aos demais. A seguir, é realizada uma análise no campo da umidade relativa a fim de mostrar esta situação.

A importância de ter o campo de umidade relativa deve-se à compreensão de que o meteorologista tem da condição de tempo no instante em que está interessado. Sendo assim, caso a atmosfera se encontre muito seca, a probabilidade de chover será menor uma vez que existe menos vapor d'água disponível para condensar e formar nuvens.

A Figura 6 ilustra este campo meteorológico no qual se pode verificar novamente a variação da umidade relativa sobre o continente ao longo do dia e que reflete a situação ocorrida. A umidade existente em baixos níveis atmosféricos, por estar mais quente que o ar adjacente, tende a elevar-se até atingir altitudes em que o ar está mais frio, fazendo com que este ar úmido condense e forme nuvens. A situação encontrada na sequência mostrada na Figura 6a e 6d ilustra bem esta situação: conforme o aumento da umidade relativa do ar, as primeiras nuvens começam a se formar.

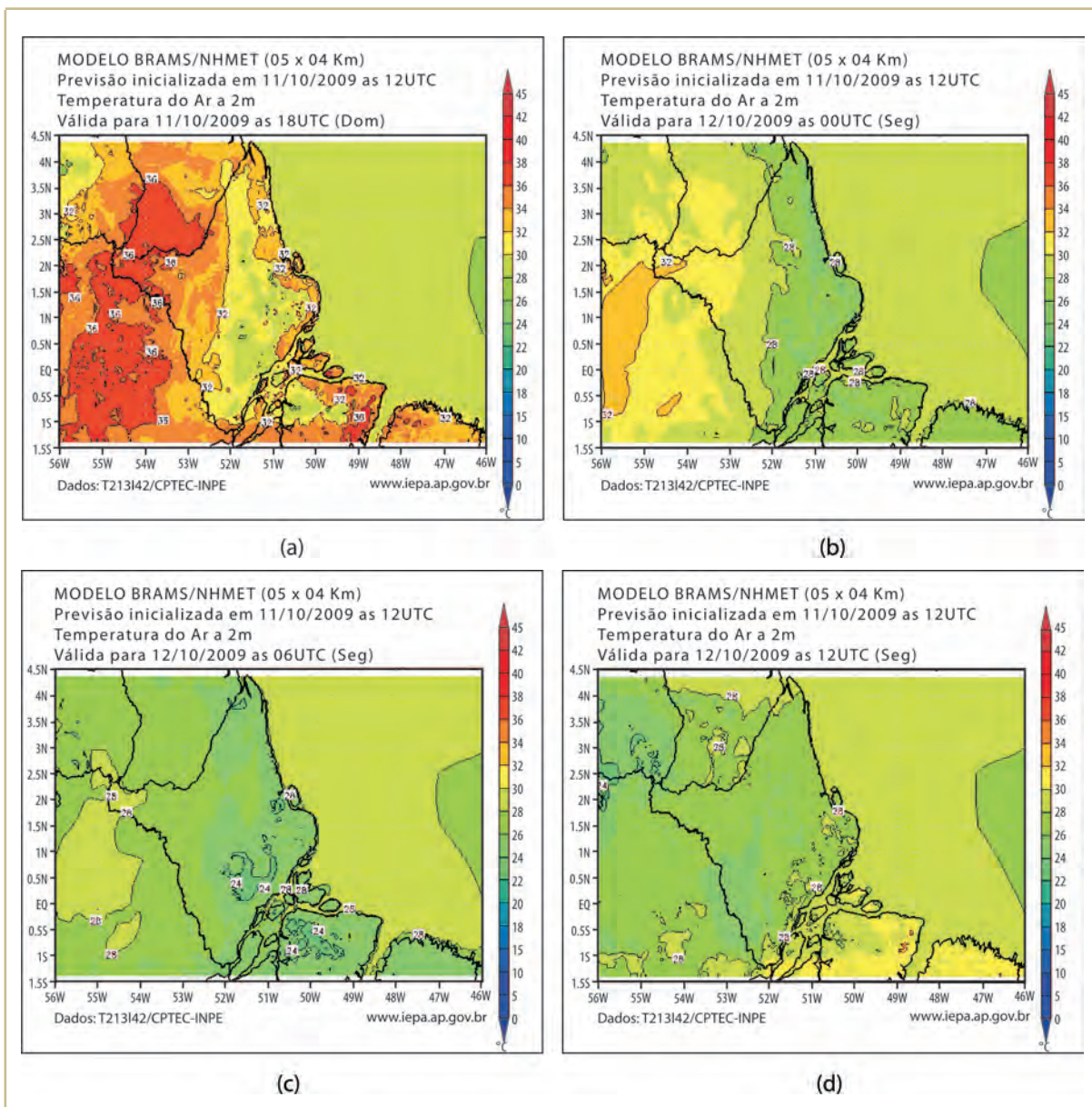


Figura 7. Campo meteorológico de temperatura do ar.

A região compreendida pela grade adotada apresenta fortes contrastes de umidade, dado que se encontra próxima de grandes rios e parte banhada pelo Oceano Atlântico. Estas características fazem com que a região seja influenciada pela oscilação da maré, que causa, em alguns casos, um fluxo contrário em alguns rios da região provocando alagamentos na várzea. Este comportamento resulta em aumento da área alagada, que ao longo do dia causa uma sensível elevação da umidade do ar. Este fato favorece o aumento das taxas de evaporação e evapotranspiração e, por consequência, o aumento de nebulosidade e respectiva precipitação.

O vapor d'água é um dos constituintes atmosféricos mais eficientes na retenção da radiação de onda longa, ou seja, calor (LIOU, K. -N, 1980; GOODY e YUNG, 1989). Baseado nesta informação e com o que foi exposto anteriormente em relação à Figura 6, é possível entender melhor o que é ilustrado na Figura 7. Ou seja, com este aumento de umidade próximo à superfície é esperado que haja também o aumento de temperatura, pois ela é dependente da concentração de umidade, tendo em vista que a região está sobre a linha do equador, recebendo um máximo de insolação e elevando a temperatura da superfície. Sendo assim, nota-se que há forte influência da umidade, que por sua vez é influenciada pelo regime de ventos da região, como pode ser observado na Figura 5.

Na Figura 7 percebe-se nitidamente um gradiente de temperatura bastante zonal, evidenciado pelo contraste térmico entre as áreas continental e marítima adjacente. Este gradiente se mantém num ciclo que varia desde as primeiras horas da manhã estendendo-se até a noite, quando ocorre a inversão da brisa – o que permite perda radiativa do continente e, portanto, diminuição da temperatura à superfície, retornando no dia seguinte. Esta característica faz com que o período do dia em que ocorrerá chuva seja conhecido, ou pelo menos seja bastante aproximado quando comparado de um dia para o outro no período de estiagem.

As características regionais oferecem desafios e benefícios simultâneos. No caso citado pode ser um benefício conhecer com relativa acurácia a ocorrência ou não de chuva. Porém, ao mesmo tempo isto pode ser um desafio, pois mecanismos de grande escala, como a ZCIT, influenciam significativamente as condições de tempo e clima na região, de modo que as chuvas deixam de ocorrer em períodos “conhecidos” passando a ocorrer a qualquer momento. E isto ainda é fonte de investigação futura.

#### 4. CONCLUSÕES

O presente texto trata da descrição técnica, passo a passo, do processo de sistematização operacional de previsão de tempo no NHMET/IEPA-REMETAP. Assim, percebe-se que o modelo BRAMS representa com relativa precisão as principais condições meteorológicas regionais, embora se tenha usado apenas um único dia para exemplificar a análise dos campos de precipitação, umidade relativa, temperatura e vento. Esta fase inicial de operação é condição fundamental para a fase seguinte de testes e de seu funcionamento operacional definitivo.

Deste ponto de partida, todavia, é possível agregar gradativamente conhecimentos adicionais com o objetivo de melhorar o desempenho do modelo, principalmente reduzindo o custo computacional. Nestes casos, quando o custo computacional é otimizado, é possível reverter o processo em direção do aumento de resolução espacial e(ou) temporal, o que definitivamente representa um ganho na capacidade de análise de variáveis meteorológicas relacionadas à previsão do tempo.

A resolução espacial utilizada na grade operacional pode ser considerada alta levando-se em conta a região referente ao projeto. Porém, deve-se ressaltar que alguns processos físicos que ocorrem na atmosfera apresentam características físicas que se ajustam bem nesta resolução, possibilitando a inclusão de sub-grades nas rotinas adotadas.

Em termos de rendimento computacional do *cluster*, foram obtidos valores otimizados bastante significativos quanto ao tempo de processamento. Foi observado que desde o momento inicial do processo de execução da rotina operacional, cujo intervalo de tempo de integração padrão é de 96 horas, o tempo total de execução foi de seis horas, 23 minutos e 52 segundos. A fase de execução de pós-processamento custou em torno de um minuto e 30 segundos. Estes períodos de tempo foram considerados ótimos, levado em conta o tipo de equipamento que se dispõe, isto é, um *cluster* com 36 processadores. A ampliação da capacidade de processamento refletiria possivelmente na redução do custo computacional.

Por fim, pode-se afirmar que a estrutura operacional instalada pela REMETAP/NHMET-IEPA pode contribuir fortemente com a sistemática de previsão do tempo com qualidade no Estado do Amapá, resultado do esforço conjunto das redes interinstitucionais regionais e nacionais, dotadas de equipes técnicas multidisciplinares envolvidas em toda a cadeia do conhecimento da previsão numérica. Estas, por sua vez, possibilitaram um avanço fantástico no estado da arte da previsão regional amapaense, principalmente porque está voltada para as condições físicas e operacionais específicas do Estado do Amapá, com foco no usuário de serviços e produtos customizados e preparados sob medida para atender amplas demandas por serviços especializados do setor.

## 5. AGRADECIMENTOS

Deve-se um especial agradecimento aos órgãos de fomento CNPq e FINEP, que possibilitam os investimentos de apoio à pesquisa no Estado do Amapá e que contribuem continuamente para o desenvolvimento científico e tecnológico no país. Ao Dr. Jairo Panetta e sua equipe pelo contínuo esforço no desenvolvimento do BRAMS que hoje é o estado da arte em computação paralela e como ferramenta operacional, ao Dr. Saulo Freitas responsável pelo desenvolvimento do CATT-BRAMS e inerentes valorosas contribuições, além dos vários pesquisadores da Rede REMETAP, RPCH, REMAM, que desde o início não mediram esforços para o melhoramento do sistema de previsão de tempo e clima na Amazônia.

## 6. REFERÊNCIAS

- BALLING, R. C., J. A. Skindlov, D. H. Philips: *The impact of increasing summer mean temperature on extreme maximum and minimum temperatures in Phoenix, Arizona*. *J. Climate*, 3, 1491-1494, 1990.
- BRAMS/CPTEC: *Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos*. Disponível em: <<http://brams.cptec.inpe.br/>>. Acessado em: 04 Set. 2009, 10:30:00.
- CHANGNON, S. A., F. A. Huff, R. G. Semonin: *METROPEX: an investigation of inadvertent weather modification*. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 52, 958-968, 1971.
- COHEN, J. C. P. *Um Estudo observacional de linhas de instabilidade na Amazônia*. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1989.
- COHEN, J. C. P., M. A. F. SILVA DIAS e C. NOBRE, 1995: *Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: A case study*. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 3163-3174.
- CUNHA, A. C.: *Rede Amapaense de Meteorologia e Recursos Hídricos (REMETAP) e a consolidação do Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis (NHMET/IEPA)*. *A Meteorologia na Amazônia se Organiza*. São Paulo – SP. Boletim SBMET. V. 14, N. 2, p. 14-19. 2007.
- DIAS, Maria Assunção F. Silva: *Modelagem numérica da atmosfera: O papel das parametrizações*. Disponível em: <<http://www7.cptec.inpe.br/brams>>. Acessado em: 28 Set. 2008, 15:20:42.
- DIXON, P. G., e T. Mote: *Patterns and causes of Atlanta's urban heat island – initiated precipitation*. *J. Appl. Meteorol.*, 2, 1273-1284, 2003.
- DOTY, B. and J.L. Kinter III, 1992: *The Grid Analysis and Display System (GrADS): A practical tool for each science visualization*. *Eighth International Conference on Interactive Information and Procession Systems*, Atlanta, Georgia, 5-10 January, 1992.
- FAZENDA, Álvaro L. Moreira, Demerval S. Enari, Eduardo H. Panetta, Jairo. Rodrigues, Luiz F.: *First Time User's Guide (BRAMS Version 4.0)* Disponível em: <<http://www7.cptec.inpe.br/brams>> Acesso em: 28 Set. 2008, 15:30:18.
- FREITAS, S. R., K. M. Longo, M. O. Andreae: *Impact of including the plume rise of vegetations fires in numerical simulations of associated atmospheric pollutants*. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L17808, doi: 1029/2006GL026608, 2006.
- FREITAS, E., C. M. Rozoff, W. R. Cotton, e P. L. Silva Dias: *Interactions of an urban island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of São Paulo*. *Boundary-Layer Meteorol.*, 122, 43-65, doi: 101007/S10546-006-9091-3, 2007.
- FREITAS, S. R., K. M. Longo, M.A. F. Silva Dias, R. Chafield, P. Silva Dias, P. Artaxo, M. O. Andreae, G. Grell, L. F. Rodrigues, A. Fazenda, and J. Panetta: *The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System) CATT-TRAMS – Part 1: Model description and evaluation*. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 2843-2861, 2009.
- GEAVERD, R. and S. R. Freitas: *Estimativa operacional da umidade do solo para iniciação de modelos de previsão numérica da atmosfera. Parte 1: Descrição da metodologia e validação*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21, 3, 1-15, 2006.

- GOODY, R. M. and Y. L. Yung: *Atmospheric Radiation: Theoretical Basis*. 2.ed. Oxford University Press, New York, 1989.
- GRELL, G. and D. Deveany: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, 29(14), doi: 10.1029/2002GL015311, 2002.
- IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> Acessado em: 11 de outubro de 2009, 16:00.
- KHAN, S. M., e R. W. Simpson: *Effect of the heat island on the meteorology of complex urban airshed*. *Boundary-Layer Meteorol.*, 100, 487-506, 2001.
- LIOU, Kuo-Nan: *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press, New York, 1980.
- MORRIS, C. J. G., I. Simpson, e N. Plummer: Quantification of the influences of Wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *J. Appl. Meteorol.*, 40, 169-182, 2001.
- OKE, T. R.: *Boundary layer climates*. 2ed. Rutledge, London e New York, 435p, 1978.
- ROSSATO, L. R. Alavalá, e J. Tomasella: Climatologia da umidade do solo no Brasil. *Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia*. 1910-1915, 2002.
- SANTIN, M M: *Operacionalização do Modelo BRAMS Aplicado à Previsão do Tempo, Agricultura e Pesquisa*. 2006. 55f. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.
- SAILOR, D. J. Simulated urban climate response to modifications in surface albedo and vegetative cover. *J. Appl. Meteorol.*, 34, 1694-1704, 1995.
- SESTINI, M., E. Reimer, D. Valeriano, R. Alvalá, E. Mello, C. Chan, e C. Nobre: Mapa de cobertura da terra da Amazônia legal para uso em modelos meteorológicos. *Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2901-2906, 2003;
- TRIPOLI, G. and W. Cotton: The Colorado State University three-dimensional cloud-mesoscale model. Part I: General theoretical framework and sensitivity experiments. *J. Res. Atmos.*, 16, 185-219, 1982.