

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ ISAAC NEWTON DO NASCIMENTO

CALIBRANDO A MICROFÍSICA DE NUVENS DO MODELO RAMS A PARTIR DOS DADOS COLETADOS PELO ALPA

FORTALEZA - CEARÁ 2009

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

ISAAC NEWTON DO NASCIMENTO

CALIBRANDO A MICROFÍSICA DE NUVENS DO MODELO RAMS A PARTIR DOS DADOS COLETADOS PELO ALPA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Físicas Aplicadas.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Santana dos Santos Co-orientador: Prof. Dr. Alexandre Araújo Costa

FORTALEZA -CEARÁ 2009

Nascimento, Isaac Newton CALIBRANDO A MICROFÍSICA DE NUVENS DO MODELO RAMS A PARTIR DOS DADOS COLETADOS PELO ALPA. 104 f.:il. Dissertação (Pós – Graduação em Ciências Físicas Aplicadas) – Curso de Mestrado. Universidade Estadual do Ceará, 2009.

ISAAC NEWTON DO NACIMENTO

CALIBRANDO A MICROFÍSICA DE NUVENS DO MODELO RAMS A PARTIR DOS DADOS COLETADOS PELO ALPA

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Físicas Aplicadas.

Defendido e aprovado com conceito:

Em / /

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio Carlos Santana dos Santos (Orientador) Universidade Estadual do Ceará

Prof. Dr. Alexandre Araújo Costa (Co-orientador) Universidade Estadual do Ceará

> Prof. Dr. Carlos Jacinto de Oliveira Universidade Estadual do Ceará

Prof. Dr. Sergio Sousa Sombra Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA

Aos meus pais e irmãos,

A minha noiva,

Aos familiares,

Aos meus amigos e a todos que de alguma forma contribuíram na geração desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Santos e Terezinha, pelo sopro da vida e por acreditarem na minha capacidade.

Agradeço à minha noiva, Emanuella, por todo amor, apoio e companheirismo.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Antônio Carlos Santana dos Santos por ter me ajudado, apesar de todas as minhas limitações e dificuldades.

Agradeço ao meu co-orientador Prof. Dr. Alexandre Araújo Costa, pelos ensinamentos que me serviram de base para o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Fernando Ramalho, Prof. Dr. Lutero, Prof^a. Dra .Mariane, Prof. Dr. Jacinto, Prof. Dr. Carioca, que junto aos meus orientadores, ministraram as disciplinas do curso.

Agradeço à FUNCEME, em especial ao Otacílio e ao Paulo Henrique, que contribuíram com orientações relevantes para o entendimento da modelagem.

Agradeço aos colegas do mestrado Ediglei, Cícero e Lourenço pelo convívio, experiências e valores assimilados.

Agradeço aos amigos Wilton, Bosco, Júnior, Stênio, Gomes e Caio, por me socorrerem em momentos difíceis.

Agradeço ao colega, Cassain, por sua relevante contribuição no que se refere aos gráficos.

Agradeço à Graça e Hermínia pela competência e carinho que por muitas vezes me nortearam.

Agradeço ao Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas pelo apoio logístico na realização desse trabalho.

Agradeço aos professores Dr. João Bosco, Dr. Gerson Paiva e meu orientador, Prof. Dr. Carlos Santana pelo uso do *Cluster* do Laboratório de Instrumentação e Modelagem Atmosférica (LIMA).

Agradeço, também, ao CNPq, à FINEP e à FUNCAP, pelo apoio financeiro aos projetos "EXPERIMENTO DE MICROFÍSICA DE NUVENS – EMFIN!" (CNPq) "A MICROFÍSICA DE NUVENS DO MODELO RAMS A PARTIR DOS DADOS COLETADOS IN SITU PELO ALPA" (CNPq, Processo 479644/2008), "CONVECÇÃO SOBRE O NORDESTE BRASILEIRO: VARIABILIDADE EM MÚLTIPLAS ESCALAS "- CONBINE (CNPq, Processo 620057/2008), "PREVISÃO DE SISTEMAS CONVECTIVOS: OBSERVAÇÕES, MODELAGEM E NOWCASTING (FINEP, Edital No. 13/2006) e CALIBRANDO A MICROFÍSICA DE NUVENS DO MODELO RAMS A PARTIR DOS DADOS COLETADOS PELO ALPA (FUNCAP, Processo 9886/06), que juntos foram fundamentais para a realização deste trabalho.

"Se fui capaz de ver mais longe é porque estava de pé sobre os ombros de gigantes"

Isaac Newton

RESUMO

Este trabalho apresenta ajustes de curva para os espectros de gotículas medidos pela sonda FSSP, assim como testes de sensibilidade para o modelo RAMS 6.0, em seu módulo de microfísica de nuvens, a fim de se obter uma melhor configuração deste modelo para o Estado do Ceará. A metodologia utilizada é baseada em comparações entre os resultados do modelo e observações coletadas através do Experimento de Microfísica de Nuvens (EMfiN!), realizado na cidade de Fortaleza-Ce no período de 01 a 12 de abril de 2002. Simulações de sensibilidade foram realizadas alterando a concentração de gotículas de nuvens e o parâmetro de forma da distribuição gama. O objetivo é encontrar uma configuração apropriada para as condições locais e consequentemente uma melhor representação para o comportamento dos sistemas convectivos sobre o estado do Ceará. Para confrontar os resultados das simulações com a realidade, foram utilizadas imagens de radar meteorológico coletados durante o EMfiN!

Palavras Chaves: Microfísica de Nuvens, Modelagem Numérica, RAMS 6.0.

ABSTRACT

This work presents curve fittings for observed cloud droplet spectra as well as sensitivity tests to cloud microphysics parameters in RAMS 6.0 model, in order to attain a better configuration of this model for use in the state of Ceará. The methodology is based on comparisons between model results and observations collected during the "Cloud Microphysics Experiment" (Experimento de Microfísica de Nuvens, (EMfiN!) held in the city of Fortaleza-CE in the period of 01 to April 12, 2002. The sensitivity simulations were conducted changing the concentration and the shape parameter of the gamma distribution. The goal is to find a more appropriate model configuration for the local conditions and therefore attain a better representation of the behaviour of convective systems over the state of Ceara. In order to compare simulation results against reality, radar images collected during EMfiN ! were used.

Key Words: Cloud Microphysics, Numerical Model, RAMS 6.0

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Forçante radiativo devido emissões naturais e antrópicas expostas23
Figura 2 - Classificação das nuvens quanto à mudança de fase
Figura 3 - Classificação das nuvens quanto ao gênero
Figura 4 - Conjunto de curvas da distribuição gama para valores inteiros do
parâmetro de forma (λ) de 1 a 10. A ordenada é o valor da função gama
dada pela equação 1043
Figura 5 - Distribuição da concentração máxima de gotas para a região: a) marítima,
b) costeira, c) continental e d) urbana, coletadas durante experimento de
campo no Ceará entre Fevereiro e Junho de 199450
Figura 6 - Avião-laboratório utilizado para pesquisas atmosféricas da UECE55
Figura 7 - Área de cobertura do radar meteorológico, instalado no Campus do
Itaperi, da UECE, no "range" de 120 km
Figura 8 - Procedimentos de voos com nuvens vistas de cima: (a) "pernas", (b)
"espiral" e (c) "gravata borboleta"57
Figura 9 - Trajetórias realizadas pelo avião durante os doze dias do experimento
Emfin
Figura 10 - Fotografia dos sensores instalados (a) na asa esquerda (sensores de
água líquida e sonda FSSP-100) e (b) na asa direita do ALPA (sondas
OAP-200X e OAP-200Y)58
Figura 11 - Imagens de radar do dia 02 de abril de 2002, com evolução temporal de
3 em 3 horas, aproximadamente, no "range" de 120 km66
Figura 12 - Imagens de radar do dia 02 de abril de 2002, com evolução temporal de
3 em 3 horas, aproximadamente, no "range" de 120 km66
Figura 13 - Frequências dos parâmetros de forma da função gama para o dia 02 de
abril de 200268
Figura 14 - Frequências dos parâmetros de forma da função gama para o dia 04 de
abril de 200268
Figura 15 - Frequências dos parâmetros de forma da função gama para o dia 05 de
abril de 200269
Figura 16 - Frequências dos parâmetros de forma da função gama para o dia 08 de
abril de 200269

Figura 17 - Frequências dos parâmetros de forma da função gama para o dia 09 de abril de 2002, realizado às 09h29min......70

Figura 18 - Frequências dos parâmetros de forma da função gama para o dia 02 de abril de 2002, realizada às 16h20min......71

Figura 19 - Frequência dos parâmetros de forma da função gama para todos os voos dos experimentos......71

Figura 21 - Histograma das concentrações para todos os voos do EMfiN!.....74

- Figura 25 perfil vertical da razão de mistura do condensado total para o dia 02 de abril de 2002......80
- Figura 26 perfil vertical da razão de mistura de gotículas de nuvens para o dia 02 de abril de 2002......80
- Figura 27 chuva média acumulada registrada para o dia 02 de abril de 2002......81
- Figura 28 Séries temporais das razões de mistura para as simulações do dia 09 de abril de 2002; sendo: a) conc.: 100 cm-3 p.f.: 2; b) conc.: 100 cm-3 p.f.: 6;
 c) conc.: 100 cm-3 p.f.: 13; Condensado total (preto), gotículas de nuvem

(vermelho), gotículas de chuva (verde), gelo leve (azul escuro), gelo pesado (azul claro)......82

- Figura 33 chuva média acumulada registrada para o dia 09 de abril de 2002......87 Figura 34 - Evolução da razão de mistura de gotículas de nuvem com a altitude para
- Figura 35 Perfis verticais da razão de mistura de granizo, neve e gelo primitivo para o dia 09 de abril de 2002......89

o dia 09 de abril de 2002......88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- categoria de destino em função do par de interação entre hidrometeoros
47
Tabela 2 - Equações para as funções-distribuição exponencial, gama, lognormal e
Weibull e expressões para seus respectivos diâmetros de escala51
Tabela 3 - configuração das simulações realizadas com modelo RAMS 672
Tabela 4- Máximo valor da média espacial para o condensado total (tempo) -
02/04/2002
Tabela 5 - Máximo valor da média espacial da razão de mistura para a água de
nuvem (tempo) - 02/04/200279
Tabela 6 - Máximo valor da média espacial da razão de mistura de água de chuva
(tempo) - 02/04/200279
Tabela 7 - Máximo valor da média espacial da razão de mistura do condensado
total (tempo) - 09/04/200285
Tabela 8- Máximo valor da média espacial da razão de mistura de água de chuva
(tempo) - 09/04/2002
Tabela 9 - Máximo valor da média espacial da razão de mistura de água de nuvem
(tempo) - 09/04/2002
Tabela 10 - Máximo valor da média espacial para o gelo pesado (tempo) -
09/04/2002:
Tabela 11 - Máximo valor da média espacial para o gelo leve (tempo) - 09/04/2002
Tabela 12 - Frequência para o parâmetro da Função Gama para o voo do dia
02/04/2002
Tabela 13 - Frequência para o parâmetro da Função Gama para o voo do dia
04/04/2002
Tabela 14 - Frequência para o parâmetro da Função Gama para o voo do dia
05/04/2002
Tabela 15 - Frequência para o parâmetro da Função Gama para o voo do dia
08/04/2002
Tabela 16 - Frequência para o parâmetro da Função Gama para o voo do dia
09/04/2002-1

Tabela 17 - Frequência	ι para o	parâmetro	da	Função	Gama	para	0	V00	do	dia
09/04/2002	<u>2</u> -2								· · · · · · [,]	104

AGRADECIMENTOS
RESUMO9
LISTA DE FIGURAS11
LISTA DE TABELAS14
1 INTRODUÇÃO
1.1JUSTIFICATIVA
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA21
 2.1 OS AEROSSÓIS E SEUS EFEITOS NA ATMOSFERA
3 METODOLOGIA
3.1 DADOS EXPERIMENTAIS DO EMfiN!54 3.2 CONFIGURAÇÕES DO MODELO ATMOSFÉRICO RAMS59
4 - RESULTADOS65
 4.1. SITUAÇÃO OBSERVADA DURANTE O EMfiN PELO RADAR METEOROLÓGICO BANDA X DA FUNCEME
5 CONCLUSÃO90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS92
APÊNDICES

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

O modelo RAMS (*Research Atmospheric Modeling System*) surgiu na década de 70 na Universidade do Estado do Colorado (*Colorado State University*, EUA), prestando-se, originalmente, à atividades de pesquisa em modelagem de mesoescala e de física de nuvens; evoluindo de tal forma que hoje é utilizado também ao serviço de previsão do tempo por centenas de instituições em todo o mundo.

Introduzido no Brasil pela Universidade de São Paulo (USP), esse modelo atmosférico baseia-se em um conjunto de equações representando princípios físicos de conservação da massa, momento, energia e água, suplementado por uma ampla variedade de parametrizações de processos (transporte turbulento, transferência radiativa, microfísica de nuvens, etc.).

No caso da parametrização da microfísica, objeto deste estudo, o usuário pode conduzir o experimento numérico dentro de certas restrições por ele estabelecidas. Para esta dissertação, serão modificadas variáveis que constarem no módulo de microfísica de nuvens, conforme observações de dados coletados pelo avião-laboratório da UECE, durante o Experimento de Microfísica de Nuvens (EMfiN!), realizado em 2002.

As principais sensibilidades exploradas serão feitas em torno do parâmetro de forma da função gama e da concentração de gotículas de nuvens, buscando cobrir, em ambos os casos, os intervalos de variabilidade desses parâmetros verificados durante o EMfiN!. Os levantamentos de dados para as simulações foram feitas com base na observação do que fora coletado através das três sondas espectrométricas (*Forward-Scattering Spectrometer Probe*, FSSP-100; *Optical Array Probe*, OAP-200X; e *Optical Array Probe*, OAP-200Y) instaladas no ALPA, com ênfase para a primeira, que conta e classifica gotículas no intervalo de tamanho de 2 a 47 μm.

Em seguida, as simulações com os valores coletados para as variáveis em questão são comparadas com imagens de radar para o período do experimento.

1.1 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de centros operacionais de previsão de tempo e clima passou a ter grande importância, pois servem de suporte à tomada de decisão por órgãos de governo, e pela sociedade em geral quando do uso de informações e pesquisas em meteorologia com aplicações em áreas diversas como recursos hídricos, agricultura, energia, saúde, etc.

É nesse cenário que a FUNCEME pode ser considerada um órgão meteorológico de referência nacional e de grande atuação no Ceará. Além dos fatores econômicos, as precipitações incidem sobre outros dois relevantes aspectos, a agricultura familiar e a mobilização da defesa civil; pois famílias que residem em grandes centros urbanos ou em cidades no interior do Estado esperam ansiosamente por prognósticos de quantidade de chuva.

Para os grandes centros urbanos, as precipitações podem causar tragédias junto às milhares de famílias que residem em áreas de risco, sofrendo com as inundações, os desabamentos e os deslizamentos de terra, por isso, bons resultados para a previsão de tempo podem auxiliar os órgãos públicos nos planejamentos que tenham a finalidade de evitar essas ocorrências.

Recentemente, a FUNCEME estabeleceu uma parceria estreita com a Coordenadoria de Defesa Civil do Município de Fortaleza, através do projeto PSICO (Previsão de Sistemas Convectivos: Observações, Modelagem e *Nowcasting*), que prevê o uso de informações de plataformas variadas (modelos numéricos, satélite e radar meteorológico) com a finalidade de orientar as ações da defesa civil em caso de eventos extremos.

Por outro lado, no interior do Estado, a importância da água recai sobre a agricultura; onde a lavoura, os afazeres domésticos e a alimentação de animais dependem dos níveis dos reservatórios.

Apesar de auxiliar-nos na compreensão de fenômenos como precipitações e formação de nuvens, os modelos numéricos apresentam algumas limitações como o fato de serem computacionalmente dispendiosos, especialmente para resoluções espaciais mais finas, exigindo grande poder de processamento e grandes espaços de memória dos computadores, além das aproximações para as complexas equações que, por vezes, não conseguem representar fielmente a natureza, devido ao carater caótico da atmosfera.

Portanto, é imprescindível que sejam realizadas sucessivas simulações e, posteriormente, uma análise minuciosa dos dados com o intuito de observar possíveis discrepâncias entre os resultados obtidos com as simulações e os dados coletados do fenômeno com a finalidade de proporcionar ao modelo a parametrização mais adequada, a fim de representar com a maior fidelidade possível o fenômeno estudado.

Atualmente, o modelo RAMS é funcional e operacional na Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hidricos (FUNCEME), tanto para previsão de tempo, quanto de clima; porém esse modelo não tem seu modulo de microfísica calibrado adequadamente para o estado do Ceará, daí a necessidade de serem feitos ajustes no mesmo. Isto é particularmente relevante na medida em que a referida instituição apresenta planos de utilizar versões de mais alta resolução do seu sistema operacional de previsão de tempo.

Consequentemente, ao fim deste trabalho, espera-se que o modelo apresente melhores resultados no intuito de que possa ser incorporado ao que hoje está operacional naquela instituição.

1.2 OBJETIVOS

De modo geral, podemos dizer que o objetivo deste trabalho é estudar, através da modelagem atmosférica, os fatores relacionados à microfísica de nuvens que influenciam na formação das precipitações; o objetivo específico se concentrará na realização de simulações através do RAMS 6.0 com o intuito de propiciar o melhoramento do modelo no módulo de microfísica de nuvens na representação do ciclo de vida dos sistemas precipitantes formados sobre o Ceará, particularmente, na área de realização do EMfiN!.

O referido aperfeiçoamento será buscado através de testes de sensibilidade, que consistem em ajustes nos valores de determinados parâmetros no modelo. Os principais parâmetros aqui estudados são a concentração de gotículas de nuvem e o parâmetro de forma da função gama. Os valores testados terão como referência os dados observados durante o EMfiN!.

O intuito é fazer algumas simulações e proceder com a comparação dos resultados conseguidos com a modelagem e os dados observados pelo Experimento de Microfísica de Nuvens (EMfiN!), realizado em 2002, verificando quão próximo o modelo conseguiu representar as observações expostas pelo experimento.

1.3 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica do trabalho, onde aborda-se os efeitos dos aerossóis na atmosfera, apresenta os hidrometeoros, e o modelo RAMS, focando, no entanto, os processos de microfísica totalizada além de apresentar uma revisão sobre a macroestrutura e a microestrutura das nuvens; serão ainda abordados os parâmetros de microfísica, com ênfase no parâmetro de forma da função gama.

No capítulo 3, apresentaremos a metodologia e o local do estudo, aprofunda-se a abordagem acerca do modelo RAMS, além de trazer especificações das grades utilizadas e dos dados coletados pelo EMfiN!, realizado na cidade de Fortaleza durante os primeiros 12 dias de abril de 2002.

No capítulo 4, serão abordados os resultados; através da apresentação e análise de dados e gráficos; esses procedimentos nos ajudarão a buscar a melhor parametrização de microfísica possível para o RAMS 6.0.

O capítulo 5 explora a conclusão do trabalho, deixando recomendações acerca das simulações, que possam servir de subsídio para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O referencial teórico é a base que sustenta qualquer pesquisa científica. É necessário conhecer o que já foi desenvolvido por outros pesquisadores a fim de contribuir na definição dos objetivos do trabalho, nas construções teóricas, no planejamento da pesquisa, comparações e validação.

A seguir apresenta-se material já presente na literatura sobre as nuvens e a formação da precipitação, o modelo RAMS 6.0 e suas parametrizações e o parâmetro de forma da função gama.

2.1 OS AEROSSÓIS E SEUS EFEITOS NA ATMOSFERA

Aerossóis atmosféricos são constituídos por partículas sólidas e líquidas em suspensão na atmosfera, cuja fonte pode ser de origem natural (primária), isto é, ação do vento no solo, rochas ou mar, vulcões e queimadas, emissão biogênica ou antropogênicas (secundária), o que inclui processos industriais e de queima de combustíveis, bem como queimadas, uma fonte importante sobre o território brasileiro.

Os aerossóis atmosféricos produzidos em queimadas trazem em sua composição carbono elementar e uma variedade de compostos orgânicos. O carbono elementar possui uma estrutura cristalina hexagonal de átomos de carbono, enquanto os compostos orgânicos possuem estrutura amorfa e não se organizam em uma estrutura cristalina. Essas diferenças estruturais fazem com que os aerossóis apresentem comportamentos distintos em processos atmosféricos (MARTINS, 2006).

A maior parte do carbono elementar é hidrofílica e reflete quase toda a radiação, exceto para alguma absorção no ultravioleta e no visível, enquanto os compostos orgânicos geram aerossóis altamente eficientes em absorver radiação na região do visível e ultravioleta, devido essas características, os aerossóis com origem na queima de biomassa podem afetar a precipitação e a circulação atmosférica tanto globalmente quanto regionalmente através de processos radiativos, termodinâmicos e microfísicos (MARTINS 2006).

O tipo de aerossol associado à queima de biomassa é determinante no número de partículas e, por consequência no número de núcleos que têm propriedades de se tornarem gotículas de nuvem, ou seja, núcleos de condensação de nuvens (CCN) ou núcleos de gelo (IN) (MARTINS, 2006).

Os aerossóis são componentes básicos no balanço energético terrestre, devido à sua ação direta, através do espalhamento e da absorção da radiação solar que chega à atmosfera, e indiretamente, atuando como núcleos de condensação de nuvens que, juntamente com o vapor de água constituem as gotículas de nuvens, influenciando o ciclo hidrológico da Terra (COSTA e PAULIQUEVIS, 2009).

Nesse contexto, as condições ambientais do planeta vêm sofrendo mudanças significativas devido às atividades humanas, sobretudo quando ligadas ao período pós revoluções industriais, período em que a forte emissão de poluentes alterou, inclusive, a composição química da atmosfera do planeta (VITOUSEK *et al.*1997 *apud* COSTA E PAULIQUEVIS, 2009).

O efeito líquido global das atividades humanas, em média, desde 1750, foi de aquecimento da superfície. Somente no último século, a temperatura da Terra aumentou em 0,7° C; O cenário mais otimista prevê um aquecimento médio global de 1,1 a 2,9 graus ao final do século XXI. O cenário mais pessimista tem uma previsão de um aquecimento de 2,4 a 5,4 graus; gerando a redução das geleiras e o aumento do nível do mar (COSTA, 2003).

A alteração do equilíbrio da energia sofre influência de diversos fatores antropogênicos, incluindo os aerossóis emitidos nas atividades humanas. As mudanças provocadas pelo homem no balanço energia de que sai e que entra do sistema climático podem ser estimadas através do "forçante" ou "forçamento radiativo" (FR); conforme exposto na Figura 1 a seguir; quando este for positivo, tende a aquecer a superfície, e quando for negativo tende a esfriá-la (COSTA, 2003). Esta figura, presente no quarto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernamental Painel on Climate Change*) mostra que a única modificação no FR comparável ao aquecimento promovido pelas emissões de gases de efeito estufa (GEEs) é o resfriamento total (direto mais indireto) associado aos aerossóis antropogênicos.

As melhores estimativas do IPCC são de que a soma do FR associado aos efeitos direto e indireto resulta em um resfriamento (-1,2 W/m²) aproximadamente igual à metade do aquecimento estimado em função dos GEEs de vida longa.

É importante ressaltar, ainda na figura 1, que os aerossóis atmosféricos respondem pelas maiores incertezas no FR e, portanto, nos cenários de mudanças climáticas produzidos pelo IPCC, sendo o nível de compreensão científica sobre este tópico ainda considerado de médio-baixo a baixo.



Figura 1- Forçante radiativo devido emissões naturais e antrópicas expostas. Fonte: IPCC *apud* Costa, 2003, apostila de meteorologia básica.

Os principais parâmetros para a determinação dos forçantes radiativos diretos são as propriedades ópticas de aerossóis que variam em função do comprimento de onda, da umidade relativa e da distribuição geográfica dos aerossóis na horizontal e vertical que variam em função do tempo (HAYWOOD e BOUCHER, 2000; PENNER *et al.*,2001; RAMASWAMY *et al.*,2001 apud FORSTER *et al.*, 2007).

A concentração de aerossóis na atmosfera provoca alterações nas propriedades microfísicas, haja vista que um aumento na concentração de partículas

implica em um aumento na concentração de gotículas de nuvens e uma redução no diâmetro médio de gotas de nuvens, interferindo, inclusive, no ciclo de vida da nuvem (COSTA e PAULIQUEVIS, 2009).

Quando aerossóis são compostos por partículas higroscópicas, geram mais gotículas de nuvens; podendo ocorrer então, maior refletividade média das nuvens (TWOMEY, 1974) e redução na produção de precipitação, aumentando a cobertura e o ciclo de vida da nuvem e, consequentemente, aumenta-se também a quantidade de radiação refletida (ALBRECHT, 1989).

Um incremento no número de aerossóis pode alterar as propriedades ópticas das nuvens e consequentemente gerar aumento de refletividade e do albedo das nuvens individuais (LOHMANN e FEICHTER, 2005 *apud* COSTA e PAULIQUEVIS, 2009); as atividades humanas podem responder por até 5% na nebulosidade (KAUFMANN e KOREN, 2006; BREÓN, 2006 *apud* COSTA e PAULIQUEVIS, 2009) e até 6% no albedo do campo de nuvens (WIELICKI ET AL.. 2005 *apud* COSTA e PAULIQUEVIS, 2009).

Os aerossóis atmosféricos agem, também, sobre a microestrutura das nuvens, através de núcleos de condensação de nuvens (CCN - *Cloud Condensation Nuclei*) e núcleos de gelo (IN - *Ice Nuclei*). Os CCN podem modificar a concentração e a distribuição de tamanho das gotículas de nuvens, daí a importância de identificar os processos de produção desses núcleos e a influência dos mesmos na formação de precipitação nas regiões de ocorrência dos mesmos.

Assim, as características microfísicas das nuvens têm estreita relação com a quantidade de CCN e a velocidade vertical do ar no local de sua formação. Segundo estudos de Física de Nuvens (GOTZ *et al.*, 1991), em partes superiores da troposfera, esses núcleos apresentam concentrações uniformes, enquanto que as concentrações médias de CCN sobre o continente decrescem com o aumento da altitude e sobre os oceanos permanecem praticamente constantes (COSTA, 2004).

Segundo Squires (1958), nuvens marítimas rasas precipitam mais facilmente que nuvens continentais; isso se deve a diferença na concentração de CCN, que é extremamente baixa nos oceanos. Segundo Albrecht (1989), o aumento de CCN em regiões oceânicas acarretaria decréscimo no tamanho médio das gotículas, reduzindo a produção de chuvisco, aumentando o conteúdo de água líquida e a fração de cobertura das nuvens. O chuvisco reduziria, ainda, a concentração de CCN e favoreceria a formação de precipitação.

Por outro lado, quando temos ambientes com alta concentração de aerossóis, a formação de chuva começa em níveis de maior altitude (ROSENFELD e WOODLEY, 2000 *apud* MARTINS, 2006; ANDREAE *et al.*, 2004). Mudanças na estrutura de desenvolvimento da precipitação geram mudanças na distribuição vertical de liberação de calor latente durante o processo de condensação, alterando a estrutura dinâmica da atmosfera, pelo menos em escala regional.

Rosenfeld (2000) encontrou evidências diretas de que a poluição urbana e industrial pode inibir completamente a formação de precipitação, prejudicando processo de colisão e coalescência e formação de gelo em nuvens contaminadas pela poluição.

Portanto, fontes de CCN são mais abundantemente encontradas sobre os continentes, sendo que um dos fatores de tal ocorrência deve, certamente, estar ligada às ações humanas. Reforçando o fato de que esses núcleos têm forte influência nas características climáticas do planeta.

No entanto, não se pode afirmar que os aerossóis, seja direta, seja indiretamente, atuam sempre no sentido de resfriar o planeta. Fazendo uma análise radiativo-climática, pode haver resfriamento da Terra devido à redução da quantidade de luz solar que atinge a superfície, resfriando-a, mas, ao mesmo tempo, há um aumento da temperatura do ar em relação à superfície devido ao aumento das concentrações, na camada limite, de partículas de carbono ou com propriedades ópticas similares. Esta condição mais estável (superfície mais fria e atmosfera mais quente) levaria à inibição a formação de nuvens e aceleraria o processo de evaporação das mesmas (HANSEN *et al.,* 1997; ACKERMAN *et al.,* 2000 *apud* MARTINS, 2006).

Quanto ao papel do efeito dos aerossóis na distribuição espacial do aquecimento, Hobbs *et al.* (1974) afirma que em condições de pouca ou nenhuma influência das atividades humanas, a concentração de 10 µgm⁻³ causa um aquecimento de 0,5 °C em um período de 12 h, enquanto que em áreas poluídas

essa taxa de aquecimento pode facilmente exceder a 1°C por hora. Essas taxas de aquecimento influenciam o perfil vertical da temperatura, modificando as condições de instabilidade e alterando o fluxo de umidade necessário para a formação de novas nuvens. Quando mudanças ocorrem no padrão de nuvens, pode-se esperar modificação no balaço de energia do sistema Terra-Atmosfera (MARTINS, 2006).

Quanto à sensibilidade das nuvens devido à presença de aerossóis, Koren *et al.* (2004) afirma que a redução da cobertura de nuvens devido à presença de fumaça significa menos radiação sendo refletida para o espaço e mais radiação sendo absorvida pela superfície, resultando em aquecimento, ou seja, apesar de resfriarem a superfície do planeta via efeito direto e efeito indireto, os aerossóis também contribuem para o seu aquecimento via efeito semidireto.

Estudos em regiões tropicais, como a Amazônia, mostram que altos índices de emissões antrópicas ocasionam o aumento das concentrações de CCN (KAUFMAN *et al.,* 1998, ARTAXO *et al.,* 1998 E ARTAXO *et al.,* 2002 *apud* COSTA e PAULIQUEVIS, 2009).

Ambientes com intensa queima de biomassa apresentaram efeitos semelhantes aos ambientes urbanos industrializados. Segundo Warney e Twomey (1967), nas áreas sobre o oceano, a concentração máxima de gotículas foi de 780 cm⁻³ (média de 140 cm⁻³) enquanto sobre o continente, influenciado pelas queimadas, a concentração foi de 2580 cm⁻³ (média de 510 cm⁻³).

Na estação chuvosa, a redução de queimadas e as precipitações constantes reduzem a concentração de material particulado (PAULIQUEVIS *et al.*, 2007; ARTAXO *et al.*, 1988, 1990, 2002 *apud* COSTA E PAULIQUEVIS, 2009); enquanto que, na estação seca, as diferenças regionais se ampliam significativamente (PAULIQUEVIS *et al.*, 2007 *apud* COSTA E PAULIQUEVIS, 2009). Devido ao transporte em larga escala, regiões livres de emissões antrópicas registram aumento de particulado atmosférico, enquanto o particulado associado a emissões locais permanece constante.

É importante salientar, ainda, a importância das nuvens quanto à influência de suas propriedades microfísicas e ópticas nas alterações climáticas terrestres, haja vista que elas regulam o balanço de energia e influenciam no ciclo

energético global, com especial atenção nos casos de movimentação atmosférica para os polos, que têm como um dos agentes principais, a energia liberada ao nível de processos microfísicos em nuvens convectivas tropicais (COSTA, 2003).

Do ponto de vista médio, a superfície está sempre ganhando energia radiativa enquanto que a atmosfera está sempre perdendo. Essencialmente o vapor d'água e as nuvens absorvem a maior parte da radiação infravermelha emitida pela superfície de maneira que essa radiação raramente atinge o espaço diretamente, sendo assim, pode-se dizer que o processo de precipitação intermedeia as trocas de energia no âmbito da atmosfera, ou seja, entre a superfície e o espaço exterior (MARTINS, 2006).

Segundo Liepert *et al.* (2002) de 1961 a 1990, ocorreu declínio na quantidade de radiação solar incidente à superfície, isso se deve à quantidade de partículas antropogênicas, com destaque para a queima de combustíveis fósseis. Partículas formadas a partir de Sulfato interagem diretamente com a radiação solar, apresentando alta refletividade.

De acordo com Ramanathan *et al.* (2001), o aumento na concentração de aerossóis reduz o fluxo de calor latente e a quantidade de água precipitável, enfraquecendo o ciclo hidrológico, deixando a atmosfera mais seca.

2.2 AS NUVENS

Segundo o Atlas Internacional de Nuvens da Organização Meteorológica Mundial, as nuvens são um conjunto visível de partículas minúsculas de água líquida ou de gelo, ou ambas ao mesmo tempo, em suspensão na atmosfera. Este conjunto também pode conter estas partículas em maiores dimensões, assim como outros tipos de partículas, como as procedentes, por exemplo, de vapores industriais, fumaça e poeiras; as nuvens são manifestações visíveis da condensação e deposição de vapor de água na atmosfera, oriundo de rios, lagos, mares e oceanos.

Para que haja formação de nuvens duas condições básicas devem ser obedecidas: o ar deve estar saturado, retendo o máximo de umidade possível da atmosfera, e deve haver uma superfície onde esse vapor possa condensar; daí salientarmos a importância dos aerossóis, que são partículas em suspensão na atmosfera onde haverá a condensação ou sublimação do vapor d'água.

Apesar da constante evolução das nuvens, que mudam sempre, é possível definir formas características que permitem classificá-las em diferentes grupos. Estabeleceu-se como critério de classificação a subdivisão gênero, espécie e variedade.

Existem 10 gêneros de nuvens: Cirrus, Cirrocumulus, Cirrostratus, Altocumulus, Altostratus, Nimbostratus, Stratocumulus, Stratus, Cumulus e Cumulonimbus. As espécies e variedades são determinadas pelas características particulares que as nuvens apresentam como podem ser observadas a olho nu. Tais características referem-se à disposição dos elementos das nuvens (em forma de ondas, por exemplo), ao maior ou menor grau de transparência etc. Uma determinada variedade pode aparecer em vários gêneros.

Conforme pode ser visto na figura 2, as nuvens podem ser classificadas como líquidas (constituídas por gotículas de água), sólidas (constituídas por cristais de gelo) e mistas (constituídas por gotículas de água e cristais de gelo).

7600 m	somente gelo
_ 25 000 pés	(-40°C)
5500m	mistura de água e gelo
18 000 pés	(-20°C)
nivel de congelamento 0°C	somente água líquida
1000 m 3 000 pés	

Figura 2 - Classificação das nuvens quanto à mudança de fase. Fonte: Apresentação de Fundamentos de Meteorologia, IRN/UNIFEI, (CORRÊA, 2008).

De acordo com o Atlas Internacional de Nuvens da OMM (Organização Meteorológica Mundial), convencionalmente, existem três estágios de nuvens: As nuvens altas, onde encontramos Cirrus, Cirrocumulus e Cirrostratus; As nuvens médias, apresentando Altocumulus e altostratos e as nuvens baixas, onde aparecem Stratocumulus, Nimbostratus, cumulus e Stratus, detalhes podem ser vistos na figura 3.



Figura 3 - Classificação das nuvens quanto ao gênero. Fonte: notas de aula (GRIMM, 1999).

A classificação da figura 3 refere-se à altura das bases das nuvens e varia para diferentes regiões. As bases das nuvens altas variam de 6 km a 18 km em regiões tropicais; de 5 km a 13 km em latitudes médias e de 3 km a 8 km em regiões polares. Já as nuvens médias têm base variando de 2 km a 8 km em regiões tropicais, 2 km a 7 km em latitudes médias, e 2 km a 4 km em regiões polares; enquanto, as nuvens baixas, apresentam sua base variando de 0 km a 2 km de altura em regiões tropicais, médias ou polares (VIANELLO, R. L., ALVES, A. R., 1991).

Dentre as principais características dos gêneros, podemos destacar as seguintes:

Cirrus, nuvens isoladas com a forma de filamentos brancos e delicados, ou de bancos, ou de faixas estreitas, brancas ou em sua maioria brancas. Estas nuvens têm um aspecto fibroso (cabeludo) ou um brilho sedoso, ou ambas as caracateristicas.

Cirrocumulus é uma camada fina de nuvens brancas, sem sombra própria, composta de pequeníssimos elementos em forma de grãos e rugas, dispostos mais ou menos regularmente; São cirrus com algum desenvolvimento vertical, e indicam base de corrente de jato e turbulência, é o tipo de nuvem menos comum.

A Cirrostratus apresenta um véu de nuvens transparente e esbranquiçado, de aspecto fibroso (cabeludo) ou liso, cobrindo inteiramente ou parcialmente o céu, e dando geralmente lugar a fenômenos de halo, que é um anel de luz que se forma na troposfera superior, entre 5 e 10 quilômetros de altitude, devido a refração e refratação da luz pelos cristais de gelo, podendo dividir-se em cores semelhante ao arco-íris.

Altocumulus é uma camada de nuvens brancas ou cinzentas, ou simultaneamente brancas e cinzentas, apresentando geralmente sombras próprias, compostos de pequenas lâminas, seixos, rolos, etc., de aspecto muitas vezes parcialmente fibroso ou difuso.

Altostratus apresenta camada de nuvens acinzentado ou azulado, de aspecto estriado, fibroso ou uniforme, cobrindo inteiramente ou parcialmente o céu, e podendo apresentar partes suficientemente finas que deixam ver o sol, embora vagamente, como se fosse através de um vidro despolido. Os Altostratus não apresentam fenômenos de halo.

Nimbostratus é constituída por uma camada de nuvens cinzenta, muitas vezes sombria, cujo aspecto torna-se velado em conseqüência das pancadas mais ou menos contínuas de chuva ou de neve que, na maioria dos casos, atingem o solo. A espessura desta camada é, em toda a sua extensão, suficiente para esconder completamente o Sol. Existem freqüentemente abaixo desta camada nuvens esfarrapadas.

Stratocumulus aparecem como uma camada de nuvens cinzentas ou esbranquiçadas, ou mesmo cinzentas e esbranquiçadas, tendo quase sempre partes sombrias, compostas de mosaicos, seixos, rolos, etc., de aspecto não fibroso.

Stratus é uma camada de nuvens geralmente cinzenta, com base uniforme, podendo dar lugar a chuviscos, prismas de gelo ou grãos de neve. Quando o sol é visível através da camada, seu contorno torna-se nitidamente visível.Os stratus não dão lugar a fenômenos de halo, salvo, eventualmente, a temperaturas muito baixas. Às vezes, Os stratus se apresentam sob a forma de bancos esfarrapados.

Cumulus são nuvens isoladas, geralmente densas e de contorno bem delineado, desenvolvendo-se verticalmente, e cuja região superior, apresenta várias intumescências, assemelhando-se, muitas vezes, a uma couve-flor. As partes destas nuvens iluminadas pelo Sol são, muitas vezes, de um branco ofuscante; sua base, relativamente sombria, é sensivelmente horizontal.Os cumulus são às vezes dilacerados.

Cumulonimbus é uma nuvem densa, de considerável dimensão vertical, em forma de montanha ou de enormes torres. Uma parte pelo menos de sua região superior é geralmente lisa, fibrosa ou estriada, e quase sempre achatado; esta parte se expande muitas vezes em forma de bigorna ou de um grande penacho.

Em baixo da base desta nuvem, comumente muito escura, existem muitas vezes, nuvens baixas esfarrapadas, ligadas ou não a ela, e precipitações, comumente sob a forma de "virga", que é a chuva que se evapora, quando ainda está em queda.

2.3 FORMAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO

Durante o processo da precipitação, podem-se classificar as nuvens como quentes, com temperaturas acima de 0° C, ou frias, com temperatura abaixo de 0° C. Nas nuvens quentes a água aparece apenas em estado líquido, enquanto nas nuvens frias, a água apresenta diferentes formas, dependo da temperatura em que se encontre; a água pura suspensa no ar não congela até atingir uma temperatura em torno de –40°C. Assim, nuvens com temperatura entre 0°C e -10° C são tipicamente compostas de gotículas de água superesfriada. Entre -10° C e -20° C gotículas líquidas coexistem com cristais de gelo. Abaixo de -20° C, a temperatura de ativação de muitos núcleos de deposição, as nuvens usualmente consistem inteiramente de cristais de gelo (GRIMM, 1999).

A pressão de vapor de saturação sobre cristais de gelo (sólidos) é muito menor que sobre gotículas de água superesfriada. Nos sólidos as moléculas são mantidas juntas mais firmemente e, portanto, é mais fácil para as moléculas de água escapar de gotículas líquidas superesfriadas. Por isso, as pressões de vapor de saturação são maiores sobre as gotículas líquidas superesfriadas que sobre os cristais de gelo (GRIMM, 1999).

No caso desses cristais, durante a descida, podem interceptar gotículas superesfriadas de nuvem que congelam sobre eles, formando granizo, num processo conhecido como acreação; por outro lado, pode haver colisão entre cristais de gelo e consequente crescimento destes formando flocos de neve, tal processo é conhecido como agregação (GRIMM, 1999).

É razoável considerar que a forma da gota de chuva é esférica, exceto para chuvas fortes onde a ação da força gravitacional, aliada ao efeito do vento, faz com que grandes gotas assumam a forma de esferoide oblato, inclinado em relação à direção de queda (SOUZA, 2006).

A distribuição do tamanho de gota de chuva depende da taxa de precipitação, normalmente fornecida em mm/h, variando entre 0,01mm e 6mm, tendo uma dependência com a velocidade e diâmetro da gota. Conhecida a distribuição do tamanho das gotas e sua velocidade terminal de queda, a taxa de precipitação pode ser calculada por:

$$p = 3600 \frac{4}{3}\pi \int_0^\infty v(a) N(p,a) a^3 da = 1,51 \times 10^7 \int_0^\infty v(a) N(p,a) a^3 da$$
(01)

Onde v(a) é a velocidade final da gota de chuva, em m/s; N(p, a), a distribuição do tamanho de gotas, em m³; a é o raio da gota de chuva, em m (SOUZA, 2006).

Gotas de chuva produzidas em nuvens quentes são geralmente menores que aquelas de nuvens frias. De fato, raramente as gotas de chuva de nuvens quentes excedem 2 mm de diâmetro; no entanto, tais gotas podem crescer até 6 mm de diâmetro, quando sua velocidade terminal chega a, aproximadamente, 30km/h. Neste tamanho e velocidade, a tensão superficial da água, que a mantém inteira, é superada pela resistência imposta pelo ar, que acaba "quebrando" a gota. As pequenas gotas resultantes recomeçam a tarefa de anexar gotículas de nuvem. Gotas menores de 0,5 mm que ao atingir o solo, são denominadas chuvisco e requerem em torno de dez minutos para cair de uma nuvem com base em 1000 m (GRIMM, 1999).

Próximo à superfície, o vapor d'água pode condensar-se sobre o solo e os objetos, temperaturas abaixo de zero podem formar geada, temperaturas acima da citada, podem formar orvalho, é importante salientar que tais fenômenos não são caracterizados como formas de precipitação.

Na formação da chuva em nuvens quentes, pode-se dizer que as gotículas passam, principalmente, por dois importantes processos: colisão e coalescência. Essas nuvens são inteiramente compostas de gotículas de água líquida e precisam conter gotículas com diâmetros maiores que $20\mu m$ para que se forme precipitação (GRIMM, 1999).

Estas gotículas maiores se formam quando núcleos de condensação "gigantes" estão presentes e quando partículas higroscópicas, como sal marinho, existem. Estas partículas higroscópicas começam a remover vapor d'água do ar em umidades relativas abaixo de 100% e podem crescer muito. Como essas gotículas gigantes caem rapidamente, elas colidem com as gotículas menores e mais lentas e coalescem (combinam) com elas, tornando-se cada vez maiores. Desta forma, elas caem mais rapidamente e aumentam suas chances de colisão e crescimento. Após um milhão de colisões, elas estão suficientemente grandes para cair até a superfície sem se evaporar totalmente. Gotículas em nuvens com grande profundidade e umidade abundante têm mais chance de atingir o tamanho necessário (GRIMM, 1999).

Correntes ascendentes também ajudam nesse processo, porque permitem que as gotículas atravessem a nuvem várias vezes. As gotas de chuva podem crescer até 6 mm de diâmetro, quando sua velocidade terminal chega a 30km/h. Neste tamanho e velocidade, a tensão superficial da água, que a mantém inteira, é superada pela resistência imposta pelo ar, que acaba "quebrando" a gota. As pequenas gotas resultantes recomeçam a tarefa de anexar gotículas de nuvem (GRIMM, 1999). É preciso considerar ainda a concentração de CCN e IN para a formação de precipitação, pois, dependendo do ambiente estar poluído ou limpo, alterações nestas concentrações podem ser significativas no processo de formação de chuva.

A produção de chuva quente via colisão/coalescência é inteiramente distinto para ambientes limpos ou poluídos. Em ambientes limpos, ocorre nucleação e rápido crescimento por condensação de vapor de um pequeno número de gotículas e da abundância de vapor d'água disponível para o crescimento individual de cada hidrometeoro (COSTA e PAULIQUEVIS, 2009).

Um aumento nas concentrações de CCN provoca maior competição entre as gotas por vapor de água, por isso, em ambientes poluídos ocorre inibição de desenvolvimento de precipitação na fase quente, pois o vapor d'água se distribui sobre grande número de gotículas diminutas (COSTA e PAULIQUEVIS, 2009).

Em ambientes com maiores concentrações de aerossóis, a presença de aerossóis gigantes desfavorece o processo de formação de chuva por colisãocoalescência devido à diferença de tamanho entre as gotas coletora/coletada, pois a gota menor segue o fluxo de ar ao redor da partícula maior em queda (um efeito de turbulência). Assim, a coleta dessas pequenas gotículas pelas gotas maiores é insignificante (COSTA e PAULIQUEVIS, 2009).

Segundo Costa e Sherwood (2005), em ambientes poluídos, a altitude de formação de chuva quente não é governada pelo crescimento geral do diâmetro médio das gotículas, como em ambientes limpos, mas, ao invés disso, é fortemente influenciada pela largura do espectro; o crescimento das partículas maiores via coleta, aparentemente domina o crescimento condensacional na produção de embriões de gotas de chuva no ambiente poluído (COSTA e PAULIQUEVIS, 2009).

Segundo Rosenfeld (1999), processo de chuva quente em nuvens contaminada pela fumaça de queimadas na região da Indonésia é praticamente inexistente. O efeito da fumaça incide no menor tamanho das gotículas e consequente redução da eficiência de coalescência.

Martins (2006) conclui, ainda, que em média, chove mais e de forma mais dispersa quando baixa concentração de CCN é considerada; em contrapartida, os maiores picos de precipitação foram encontrados para altas concentrações de CCN.

O processo de precipitação em condições poluídas, além de ser menos disperso no espaço, também é menos disperso no tempo, justificando o fato de se ter menor quantidade média de precipitação em condições poluídas (MARTINS, 2006).

Observou-se também, forte impacto dos aerossóis na estrutura dinâmica do processo de precipitação, foram observadas velocidades ascendentes de 4 a 6 vezes maiores para os cenários poluídos, com menor intensidade quando o efeito radiativo foi considerado (MARTINS, 2006).

Com a menor eficiência do processo de precipitação quando em condições de alta concentração de partículas, um maior número de ciclos é necessário para que o vapor retorne à superfície na forma de chuva, acarretando maior tempo de residência e menor eficiência de remoção das partículas. Portanto, o tempo de residência das partículas na troposfera é inversamente relacionada à eficiência do processo de precipitação (MARTINS, 2006).

Quanto à nucleação do gelo, a diminuição no tamanho médio das gotículas devido o aumento no número de CCN, pode tornar o processo de nucleação de gelo menos eficiente em nuvens super-resfriadas, já que gotículas menores congelam-se a temperaturas mais baixas do que as gotículas maiores (PRUPPACHER E KLETT, 1997 *apud* MARTINS, 2006). Por outro lado, de acordo com Lohmann (2002), esse efeito pode ser probabilisticamente anulado pelo aumento na concentração de gotículas.

O aumento dos aerossóis antropogênicos reduz a taxa de acréscimo de gotículas de cristais de neve; no entanto, essa redução não se estende à taxa de precipitação pelo fato de que a diminuição no tamanho médio das gotículas reduz a quantidade de radiação solar que atinge a superfície.

O consequente resfriamento da atmosfera faz com que o crescimento por deposição e agregação de cristais de gelo e neve seja favorecido, aumentando levemente a taxa de precipitação de neve para os dias atuais em relação aos tempos pré-industriais (LOHMANN, 2004 *apud* MARTINS, 2006).

A distribuição de tamanho de gotículas de nuvens pode ser determinante na estrutura de desenvolvimento da precipitação, principalmente em processos
intrinsecamente dependentes das características do espectro, como o mecanismo de colisão e coalescência, por exemplo (MARTINS, 2006).

A conversão da gotícula de nuvem em gota precipitante é função da concentração e do tamanho das gotículas que são eles próprios, determinados pelas características dos núcleos de condensação (OLIVEIRA e VALI, 1995; BRENGUIER e GRABOWSKI, 1993).

É importante salientar que as distribuições de gotículas de nuvens apresentam diferenças para condições poluídas e não poluídas. As condições limpas foram caracterizadas por baixa concentração de gotículas com diâmetro médio e conteúdo de água líquida aumentando sensivelmente com a altura. Por outro lado, as condições poluídas apresentaram alta concentração de gotículas com diâmetro médio e conteúdo de água líquida variando pouco com a altura (MARTINS, 2006).

Desta forma, nos experimentos de Martins (2006), as distribuições estreitas se mostraram correlacionadas com o ambiente influenciado pela queima de biomassa, enquanto que distribuições mais largas se mostraram correlacionadas com o ambiente limpo. Na função gama, quanto maior for o parâmetro de forma, mais estreita é a distribuição que ela representa, sendo assim, os menores parâmetros de forma ofereceram os melhores ajustes para condições limpas enquanto os maiores parâmetros ofereceram os melhores ajustes para condições poluídas.

Funções de distribuição de gotículas de nuvem sobre o continente, na região próxima a cidade de Fortaleza (CE) mostram um crescimento rápido do diâmetro modal, denotando que as partículas com dimensões de gotas de chuva crescem de maneira eficiente devido a condensação de vapor, efeito amplificado pela baixa concentração de partículas, caracterizando o ambiente como limpo (COSTA e PAULIQUEVIS, 2009).

Daí, uma correta representação dos processos físicos envolvendo nuvens e aerossóis, bem como a interação destes com a circulação atmosférica é condição essencial para que modelos numéricos possam oferecer bons resultados em previsão climática e simulações de mudança climática global (COSTA, 2003).

2.4 REPRESENTAÇÃO DOS HIDROMETEOROS E PARAMETRIZAÇÃO DE MICROFÍSICA TOTALIZADA NO MODELO RAMS

Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, os hidrometeoros são constituídos por um conjunto de partículas de água na fase líquida ou sólida, em queda livre ou em suspensão na atmosfera, ou levantada da superfície terrestre pelo vento, ou depositadas sobre objetos, no solo ou na atmosfera livre.

A parametrização da precipitação presente no modelo RAMS simula todas as mudanças de fase que ocorre com a água (sólido \leftrightarrow líquido \leftrightarrow vapor \leftrightarrow sólido), incluindo as trocas de calor envolvidas nas mudanças (MARTINS, 2006).

A presença de água na atmosfera é descrita através das três fases, nas seguintes categorias: vapor d'água (fase gasosa), gotículas de nuvem e gotas de chuva (fase líquida), gelo primário, neve e agregados (fase sólida), granizos e pequenos granizos (fase mista de líquido e sólido) (MARTINS, 2006). Mais didaticamente falando, podemos encontrar a água em oito formas, que aparecem quando pretendemos ajustar os dados no modelo, são elas: vapor, gotícula de nuvem, gota de chuva, "*pristine*" (gelo primitivo), "*snow*" (neve), agregados, "*graupel*", "*hail*" (granizo) (WALKO *et al.,* 1995).

As gotículas de nuvem e gotas de chuva podem estar super-resfriadas e os granizos podem estar totalmente solidificados. De todas as categorias apenas a gotícula de nuvem não se precipita, pois são consideradas muito pequenas (WALKO *et al.*, 1995).

De todas as categorias apenas a gotícula de nuvem não se precipita, pois são consideradas muito pequenas (WALKO *et al.*, 1995). Enquanto a categoria neve (*snow*), que são cristais de gelo relativamente grandes podem crescer por deposição de vapor e encrostamento ou acreção. É importante salientar que gelo primitivo e neve formam juntos uma representação bimodal dos cristais de gelo (WALKO, 1995).

Os agregados são partículas de gelo que se formam por colisão e coalescência (coleta) de gelo primitivo, neve e/ ou outros agregados (WALKO, 1995).

Gelo primário, neve e agregados possuem baixa densidade e pequena velocidade de queda, enquanto que pequenos granizos possuem densidade intermediária e forma aproximadamente esférica (MARTINS, 2006).

O graupel é formado por moderado acrostamento e /ou derretimento parcial dos cristais de menor densidade, apresentam formato esférico, baixa porcentagem de líquido e densidade intermediária; enquanto o granizo é um hidrometeoro de alta densidade. Vale lembrar, que para o modelo, o granizo é formado por derretimento parcial de *graupel* e congelamento de gotas de chuva (WALKO, 1995).

Note que estas definições de *graupel* e granizo enfatizam sua composição e densidade mais do que o seu método de formação. Um dos propósitos dessa abordagem é analisar a velocidade de queda dos hidrometeoros e as taxas de ventilação e consequente colisão entre eles, uma vez que esta origina novos hidrometeoros de diferentes densidades (WALKO, 1995).

A velocidade de queda é uma função do diâmetro da categoria de hidrometeoro, alterar as categorias é o meio para alterar a velocidade de uma partícula de determinado diâmetro (WALKO, 1995).

A forma geométrica dos cristais de gelo tem um papel importante no desenvolvimento da fase fria da nuvem. Segundo Zikmunda e Vali (1972) a velocidade de queda para cristais acrescidos de gotículas é em média o dobro em relação a cristais não acrescidos. Segundo os autores, a densidade tende a diminuir com o aumento no tamanho do *graupel*, novamente causando impacto na velocidade de queda.

Além de variações na forma, diferenças na rugosidade da superfície podem causar variações na velocidade terminal dos cristais. Para levar em conta a variabilidade dos cristais de gelo em diferentes condições do ambiente, a formulação do modelo RAMS permite que cristais de gelo e neve sofram variações. O tipo de cristal é identificado a partir das condições de temperatura e umidade encontrada em cada ponto de grade (MARTINS, 2006).

A maior parte dos experimentos a temperaturas entre 0 e -20 °C confirmam as formas geométricas básicas dos cristais de gelo, com uma

dependência primária na temperatura e secundária na supersaturação. Por exemplo, placas se formam com a temperatura variando no intervalo de 0 a –4 °C, colunas de -4 a –8 °C, passando a placas novamente de -8 a –20 °C, finalmente retornando a colunas para temperaturas abaixo de –40 °C (MARTINS, 2006).

Entretanto podem-se esperar algumas variações entre diferentes medidas. Por exemplo, com base em resultados experimentais, Bailey e Hallett (2004) observaram que próximo ao valor de saturação em relação à água líquida as formas mudam de placas (0 a -4 °C) para colunas e agulhas (-4 a -8 °C), para placas e estrelas (-12 a -18 °C) e para placas e policristais na forma de placas (-18 a -40 °C).

Para temperaturas mais baixas as formas são dominadas por policristais com a complexidade das formas fortemente dependente da supersaturação, mas com uma forte tendência à formar coluna. Observou-se ainda que para temperaturas abaixo dos –40°C a complexidade do comportamento dos cristais aumenta dependendo não apenas da temperatura e da supersaturação em relação ao gelo mas também da difusividade do vapor d'água e dos processos iniciais de nucleação (MARTINS, 2006).

Essencialmente a parametrização da microfísica descreve a evolução das categorias de hidrometeoros no tempo, os mecanismos de interação entre as mesmas, e a permanente troca de vapor e calor com a fase gasosa (MARTINS, 2006).

As categorias inicialmente ativadas são as gotículas de nuvem e os cristais de gelo. Ambos são computados a partir da concentração de CCN e IN, respectivamente diagnosticados no ambiente de formação das nuvens, além de outras variáveis físicas como velocidade vertical, temperatura e umidade (MARTINS, 2006).

O modelo atmosférico RAMS foi construído em torno de um conjunto de equações tridimensionais e não hidrostáticas que descrevem a dinâmica, a termodinâmica e a conservação da água em suas três fases. Este conjunto de equações é suplementado por uma ampla seleção de parametrizações de processos como a difusão turbulenta, radiação solar e terrestre, formação de nuvens e

precipitação, efeitos do terreno (solo-vegetação), convecção e troca de calor sensível e latente entre a superfície e a atmosfera (MARTINS, 2006).

As opções disponíveis para a iniciação do modelo compreendem a inicialização homogênea e heterogênea. Na inicialização horizontalmente homogênea, apenas uma sondagem é utilizada como dado de entrada para o modelo (os valores das variáveis são constantes na horizontal). No caso heterogêneo, os dados podem ser assimilados em cada ponto de grade (dados provenientes de estações, sondagens ou análises fornecidas por modelos) (MARTINS, 2006).

As parametrizações de microfísica totalizada se caracterizam por utilizar como variáveis prognósticas, um número limitado de propriedades globais dos hidrometeoros. Em geral, estes são separados em classes como "conteúdo de água de nuvem" (gotículas menores do que um dado raio, cuja velocidade terminal pode ser considerada desprezível), "conteúdo de água de chuva" (gotas precipitantes) e diferentes classes de gelo, dependendo da complexidade do modelo (e.g., cristais, agregados, saraiva e granizo).

Quando somente uma variável for prognosticada, qual seja a razão de mistura, o esquema é dito de "um momento" (WALKO *et al.,* 1995); se, além da razão de mistura, outra variável for prognosticada, como por exemplo, a concentração, o esquema é dito de "dois momentos" (MEYERS *et al.,* 1997).

Nas versões mais recentes do modelo, incluindo-se a versão usada neste trabalho, é possível considerar que a concentração de hidrometeoros seja uma variável prognostica tal como a razão de mistura. Adicionalmente o usuário pode controlar a forma da distribuição de hidrometeoros, optando por uma distribuição mais estreita ou mais larga, conforme a conveniência do experimento em questão.

No modelo, conforme Walko *et al.* (1995), cada categoria é descrita conforme uma distribuição gama generalizada proposta por Flatal *et al.* (1989) e Verlinde (1990).

$$f_{gam}(D) = \frac{1}{\Gamma(\nu)} (D/D_n)^{\nu-1} \frac{1}{D_n} \exp(-D/D_n)$$
(02)

Onde D representa o diâmetro dos hidrometeoros variando de zero ao infinito; $1/\Gamma(v)$ é uma constante de normatização que faz o quando for integrado em D de zero ao infinito, seja igual a 1; e D₀ representa o diâmetro característico da distribuição, e serve para normalizar o diâmetro do hidrometeoro.

O parâmetro de forma v pode assumir qualquer número real maior ou igual a 1. Ele controla a quantidade relativa entre hidrometeoros pequenos e grandes. Quando v = 1, a distribuição gama se reduz à distribuição de Marshall-Palmer, na qual o diâmetro modal é zero.

$$f_{gam} = \frac{1}{D_n} \exp\left(-D/D_n\right) \tag{03}$$

Desse modo, a relação entre o diâmetro modal e o diâmetro característico

$$D_{mode} = (\nu - 1)D_n \tag{04}$$

Sendo o diâmetro médio igual a:

é:

$$D_{msan} = \int_0^\alpha D f_{gam}(D) dD = \frac{\Gamma(\nu-1)}{\Gamma(\nu)} D_n = \nu D_n$$
(05)

Todo momento I da distribuição é dado por:

$$\int_0^\alpha D^I f_{gam}(D) dD = D_n^I \frac{\Gamma(\nu+I)}{\Gamma(\nu)} \tag{06}$$

Utilizando a equação acima, pode-se calcular a massa média e a velocidade terminal média de um hidrometeoro. Para encontrar a massa média da categoria de água líquida, faz-se:

$$m = \rho_a V \tag{07}$$

42

Sabendo que o volume é:

$$V = \frac{\pi}{6} D^3 \tag{08}$$

Substituindo 08 em 07, temos:

$$m = \frac{\pi \rho D^3}{6} \tag{09}$$

Na descrição de Walko (1995), ele considera a equação acima como:

$$m = \alpha_m D^{\beta_m} \tag{10}$$

Sendo α e β coeficientes para cada categoria. Uma análise similar pode ser feita para a velocidade terminal. Aplicando a equação 06 na equação 10, temos:

$$\overline{m} = \alpha_m D_n^{\beta_m} \frac{\Gamma(\nu + \beta_m)}{\Gamma(\nu)} \tag{11}$$

Também,

$$\overline{vt} = \alpha_{vt} D_n^{\beta_{vt}} \frac{\Gamma(v + \beta_{vt})}{\Gamma(v)}$$
(12)

А

figura 4 mostra o gráfico de uma família de distribuições gama, onde o está de acordo com a equação. A ordenada é o valor da função gama dada pela equação 03.



Diâmetro do hidrometeoro / diâmetro médio da partícula

Figura 4 - Conjunto de curvas da distribuição gama para valores inteiros do parâmetro de forma (λ) de 1 a 10. A ordenada é o valor da função gama dada pela equação 10.
 Fonte: (WALKO *et al.*, 1995).

Na

figura 4 a abscissa é a razão entre o diâmetro do hidrometeoro dividido pelo diâmetro médio da partícula de massa. Observa-se que os máximos das curvas tendem a se mover progressivamente para a direita, quando o aumenta. Dessa forma, ocorre uma diminuição na largura do espectro, quando os diâmetros modais aumentam.

Quanto maior o valor do parâmetro de forma, maior será o valor do diâmetro associado à concentração máxima de hidrometeoros. Ao mesmo tempo mais estreita será a distribuição. Quando o parâmetro de forma for igual a um, a distribuição reduz-se ao caso exponencial, com a concentração decrescendo monotonicamente com o diâmetro (MARTINS, 2006). A parametrização microfísica garante certa versatilidade ao usuário ao permitir que o experimento numérico seja conduzido dentro de certas restrições por ele estabelecidas. Por exemplo, o conjunto de categorias de hidrometeoros no qual a água será particionada é uma escolha do usuário. Da mesma forma podem ser controlados os meios pelos quais uma categoria é determinada. É possível, por exemplo, que o diâmetro médio de uma dada categoria seja determinado a partir de um valor padrão encontrado no código do modelo ou sugerido pelo usuário (MARTINS, 2006).

Com o diâmetro médio e com o valor da razão de mistura, a concentração de uma categoria pode ser diagnosticada. O contrário também é possível, ou seja, o usuário pode escolher o valor que deseja para a concentração e o diâmetro médio é diagnosticado (MARTINS, 2006).

A não disponibilidade de dados para identificar o parâmetro mais adequado a cada tipo de sistema precipitante constitui-se em um fator limitante. Todavia, os dados analisados e discutidos neste trabalho permitem uma melhor compreensão das condições em que determinados valores desses parâmetros são mais adequados (MARTINS, 2006).

O RAMS faz uso de uma concentração constante de CCN para a nucleação das gotículas de nuvem. Esta concentração é definida pelo usuário do modelo antes do início da simulação. Se o usuário optar por deixar ao modelo estabelecer a concentração, este valor será 300 cm⁻³ (MARTINS, 2006), e quanto ao parâmetro de forma assumido o valor 2.

Uma vez nucleadas, o crescimento das gotículas é governado pela difusão de vapor e calor. O crescimento das gotículas maiores passa a ser descrito pelos processos de colisão e coalescência, onde uma categoria de água cresce pela coleção de outra categoria (MARTINS, 2006).

Na concepção do modelo RAMS a formação do gelo nas nuvens está diretamente associada às condições minimamente necessárias à sua ocorrência, tais como supersaturação em relação ao gelo e temperatura. Esta é a razão pela qual o usuário do modelo não tem controle sobre o número de cristais que deseja na

categoria de gelo primário, embora possa controlar a forma da distribuição (MARTINS, 2006).

A variação temporal da quantidade de água é descrita pela equação da continuidade, através da razão de mistura de cada categoria presente, com exceção do vapor e das gotículas de nuvem (WALKO, 1995).

$$\partial r/\partial t = ADV(r) + TURB(r) + SOURCE(r) + SEDIM(r)$$
 (13)

Onde $r = [r_r, r_p, r_s, r_a, r_g, r_h, r_t]$ representa, respectivamente, as razões de mistura de chuva, gelo, neve, agregados, *graupel* e granizo, além de uma água adicional total, que consiste da soma das razões de mistura de todas as categorias, excluindo a água de nuvem e o vapor (WALKO, 1995).

ADV (r) e TURB (r) representam o transporte advectivo e turbulento. SOURCE (r) representa a fonte e sumidouro, mostrando todos os tipos de conversão de conteúdo de água de uma categoria para outra. SEDIM (r) representa perda e ganho de razão de mistura devido à sedimentação (WALKO, 1995).

A equação 13 é utilizada para o prognóstico da razão de mistura de cada categoria para cada célula da grade do modelo, exceto para vapor e água de nuvem. Dessa forma, são prognosticadas as razões de mistura para a quantidade total de água, água na forma de chuva, cristais de gelo, neve, agregados e granizos. A diferença entre a água total e a que está nas demais categorias define a quantidade de água que está na forma de vapor e água de nuvem. O particionamento entre o que é vapor e o que é água de nuvem é feito após o cálculo da razão de mistura de água de nuvem que compreende todo o excesso de vapor em relação a saturação (MARTINS, 2006).

Multiplicando-se a equação 11 por N_t dividindo pela densidade do ar, temos a expressão que mostra a razão de mistura para uma dada categoria de hidrometeoro:

$$r = \frac{N_t}{\rho_a} \alpha_m D_n^{\beta_m} \frac{\Gamma(\nu + \beta_m)}{\Gamma(\nu)}$$
(14)

No RAMS, podem-se selecionar o parâmetro de forma, os coeficientes de massa, e os coeficientes de velocidade terminal, para cada categoria, com base em

dados empíricos, muitas vezes por se conhecer o tipo de sistema que está sendo simulado (WALKO, 1995).

O RAMS tem as opções de (1) especificar a concentração de hidrometeoros para determinada categoria N_t , (2) especificar o diâmetro característico D_n , (3) prognosticar N_t , (embora não para água de nuvem), ou (4) no caso específico de uma categoria com parâmetro de forma igual a 1, ou seja, a distribuição de Marshall-Palmer (KESSLER, 1969), especificar o valor de N_0 , onde $N_t = N_0 D_n$ (WALKO, 1995).

Quanto à troca e armazenamento de calor nos hidrometeoros, podemos dizer que a temperatura de um hidrometeoros muitas vezes difere substancialmente daquela do ar devido a liberação ou absorção de calor latente no hidrometeoros e aquecimento sensível por colisões com outros hidrometeoros. A temperatura, por sua vez, controla as taxas de difusão de calor e vapor, e o montante da transferência de calor sensível, que ocorre em coalescência de hidrometeoros (WALKO, 1995).

A variável Q é mais geral do que temperatura, pois representa a energia associada não apenas à temperatura, mas também ao calor latente de fusão. A equação da energia para cada um para cada categoria descrita pode ser escrita em termos de Q como (WALKO, 1995):

$$dQ/dt = Q_{vd} + Q_{hd} + Q_{conv}$$
(15)

Os termos à direita representam fontes ou sumidouros de calor associados à difusão de vapor, difusão de calor e transferência de calor sensível na conversão de massa entre categorias. A quantidade de vapor difundida por uma categoria em uma iteração é avaliada diretamente pela equação a seguir (WALKO, 1995):

$$r_{vsh} = r_{vs0} + (dr_{vs0} / dT)_0 (T_c - T_0)$$
(16)

Onde o índice zero representa um valor de referência para a razão de mistura de saturação na superfície de um dado hidrometeoro.

Quando ocorre mudança de categoria, tanto a massa quanto a energia envolvida são subtraídas da antiga categoria e adicionadas à nova categoria (MARTINS, 2006). Os processos de difusão de vapor e calor tratados no RAMS seguem soluções numéricas das equações que descrevem os processos, podendo ser encontradas em Pruppacher e Klett (1978).

Quanto ao processo de colisão-coalescência, nota-se que diferenças entre as velocidades de queda de hidrometeoros individuais de categorias iguais ou diferentes fazem com que alguns deles colidam e sofram coalescência (WALKO, 1995).

Após a colisão, ocorre transferência de massa entre os hidrometeoros, cujas características dependem das categorias, massas e temperaturas dos dois hidrometeoros (WALKO, 1995).

No modelo RAMS este processo de troca entre as categorias é baseado no trabalho de Verlinde *et al.*(1990) que mostra ser possível obter soluções da equação estocástica de coleção, desde que a eficiência de coleção seja assumida constante (MARTINS, 2006).

Walko *et al.* (1995) descreve a implementação deste processo no modelo RAMS. Basicamente a parametrização assume que a água é categorizada em espécies que podem interagir entre si por colisão e coalescência e que sejam representadas por funções contínuas do tipo gama ou lognormal.

Quando a interação ocorre entre diferentes fases (exceto a interação entre cristais de gelo e gotículas de nuvem que não é considerada), a categoria de destino é pré-determinada em função do par de interação das categorias. Neste caso, a categoria de destino será definida em função da troca de energia envolvida e o equilíbrio térmico estabelecido, diferentemente do que ocorre quando fases idênticas interagem entre si, veja na tabela 1(MARTINS, 2006).

Tabela 1- categoria de destino em função do par de interação entre hidrometeoros.

	nuvem	chuva	gelo	neve	agregado	graupel	granizo
Nuvem							
Chuva	chuva	chuva	variável	variável	variável	variável	variável
Gelo	variável	variável	Agregado	agregado	agregado	graupel	granizo
Neve	variável	variável	agregado	agregado	agregado	agregado	granizo
Agregado	variável	variável	agregado	agregado	agregado	agregado	granizo
Graupel	variável	variável	graupel	graupel	graupel	graupel	granizo

granizo	variável	variável	granizo	granizo	granizo	granizo	granizo

Evidências observacionais mostram que cristais de gelo geralmente seguem um padrão bimodal de distribuição com alta concentração de cristais menores e menor concentração de cristais mais massivos e maiores. Heymsfield (1975), por exemplo, encontra evidências da bi-modalidade em nuvens cirrus (MARTINS, 2006).

Outro aspecto observacional relevante diz respeito à não ocorrência de riming em pequenos cristais de gelo, como mostra Schlamp and Pruppacher (1977). Com base nessas informações, Harrington (1995) desenvolveu uma parametrização que divide os cristais de gelo em duas categorias: cristais de gelo primário e cristais de neve (MARTINS, 2006).

Ao longo do tempo o crescimento dos cristais primários por deposição leva à necessidade de transferência dessa categoria para a categoria de neve. Transferência em sentido contrário também ocorre quando cristais de neve estão evaporando (MARTINS, 2006).

Com base em medidas de campo, Harrington (1995) define um limiar de 125 µm para a transferência entre as duas categorias. Como as categorias são representadas por funções gama (significa que pode haver hidrometeoros de todos os diâmetros), à parte de cada categoria que se encontra além desse limiar é que estará sendo convertida (os menores cristais de neve e os maiores cristais de gelo) (MARTINS, 2006).

Portanto, gelo primário e neve definem uma distribuição bi-modal, tal como se observa na natureza, mas cada um descrito pela sua própria função de distribuição gama (MARTINS, 2006).

No modelo RAMS, a conversão de gotícula de nuvem para chuva segue a parametrização proposta por Berry and Reinhardt (1974). Nesta parametrização, a distribuição de gotículas é discretizada em uma parte precipitante e outra não precipitante, separadas por um diâmetro de corte de 82 µm (MARTINS, 2006).

2.5 OBSERVAÇÕES DE DISTRIBUIÇÕES DE HIDROMETEOROS

A distribuição de tamanho de hidrometeoros é um importante fator a ser analisado para a implementação do mesmo em um modelo numérico, haja vista que tal parâmetro é muito útil para determinar as características das nuvens, incluindo a sua eficiência de precipitação e suas propriedades ópticas (COSTA *et al.,* 2000).

A partir dos dados fornecidos pela sonda FSSP-100, por exemplo, água líquida, diâmetro médio e concentração de gotículas, torna-se possível construir uma distribuição representativa dos espectros de gotículas, ficando apenas o parâmetro de forma como um termo livre para variar dentro de um domínio definido de valores (MARTINS, 2006).

É, ainda, imprescindível testar a sensibilidade do modelo para verificar se as hipóteses de representação de funções-distribuição de hidrometeoros para certa função analítica é apropriada ou não para representar distribuições de gotas observadas (COSTA *et al.*, 2000).

Entre Fevereiro e Junho de 1994, uma experiência de campo foi realizada no Nordeste brasileiro, mais especificamente no estado do Ceará, com o intuito de estudar cúmulos rasos e estabelecer nova classificação para categorias de nuvens conforme o grau de concentrações de CCN e investigar os ajustes dos parâmetros de forma e a largura dos espectros observados para algumas funções-distribuição de base.

Segundo Oliveira *et al.* (1996), as nuvens dividem-se em duas categorias, de acordo com sua localização: costeiras e continentais. A maioria das nuvens costeiras apresentou uma concentração de número de gotas de menos de 300 cm⁻³. Por outro lado, a maioria das nuvens continentais excedeu este valor, ultrapassando 700 cm⁻³.

Esses valores são, provavelmente, superestimados devido à inclusão de algumas nuvens poluídas, haja vista que, Coelho *et al.* (1998), verificou que a contagem de CCN perto de Fortaleza é, muitas vezes, maior do que em qualquer outra região do Ceará.

Por esta razão, Costa *et al.* (2000), propõe-se uma melhor classificação das nuvens, a fim de se considerar os efeitos urbanos, e também para avaliar a importância das nuvens que se formaram ao longo da região metropolitana de Fortaleza ou em alguma região em que houve indício da influência de aerossóis poluídos; quatro categorias de nuvens são consideradas: marítimas, costeiras, continentais e urbanas.



Figura 5 - Distribuição da concentração máxima de gotas para a região: a) marítima, b) costeira, c) continental e d) urbana, coletadas durante experimento de campo no Ceará entre Fevereiro e Junho de 1994.
 Fonte: Costa *et al.*, (2000).

A microfísica característica de cada grupo de nuvens mostra, conforme a figura 5, que nuvens marítimas apresentam concentrações máximas entre 100 e 300 cm⁻³, já as nuvens costeiras apresentam um comportamento semelhante ao das nuvens marítimas, em relação ao número de concentração, cerca de 87,3% das nuvens em zonas costeiras tem concentrações máximas entre 100 e 400 cm⁻³; as nuvens continentais tendem a apresentar maior concentração de gotas, 72,6% desse tipo de nuvem apresentou concentrações entre 200 e 500 cm⁻³.

Algumas das maiores concentrações, 800 cm⁻³ são observados na categoria urbana, o que presumivelmente inclui alguns exemplos típicos de nuvens poluídas; 71,0% das nuvens urbanas apresentaram concentrações máximas de

gotículas entre 300 e 600 cm⁻³, sendo 12,9%, com mais de 600 cm⁻³ (COSTA *et al.,* 2000).

Atribui-se alguma função de distribuição de tamanho para os hidrometeoros em cada classe; na maior parte dos casos, esquemas simplificados se utilizaram de distribuições monodispersas (função delta) ou do tipo Marshall-Palmer (i.e, exponenciais) (COSTA e PAULIQUEVIS, 2009). Segundo analise de dados do experimento realizado por Costa *et al.* em 1994, o uso da distribuição de Marshall-Palmer para ajustar espectros de gotículas de nuvens tem uma desvantagem: a maioria dos espectros não é dominada por gotículas muito pequenas, enquanto a função exponencial tem o seu máximo em D = 0.

A consequência é que essa distribuição fornece ajustes aceitáveis para apenas 17% dos espectros observados em cúmulos rasos durante o experimento no Ceará (COSTA *et al.,* 2005).

Recentemente, os modelos começaram a representar funçõesdistribuição que melhor representam espectros dos hidrometeoros observados, como as distribuições gama (FERRIER 1994, WALKO *et al.,* 1995, MEYERS *et al.,* 1997), lognormal (FEINGOLD *et al.,* 1998) e de Weibull (COSTA *et al.,* 2000).

Tabela 2 - Equações para as funções-distribuição exponencial, gama, lognormal e Weibull e expressões para seus respectivos diâmetros de escala. Fonte: Costa *et al.* (2000).

Função- Distribuição	Expressão Matemática	Diâmetro de Escala (Declividade)
Exponencial	$N(D) = \frac{N_t}{D_0} \exp\left(-\frac{D}{D_0}\right)$	$D_0 = \left(\frac{q_l}{\pi \rho_{w} N_t}\right)^{1/3}$
Gama	$N(D) = \frac{N_t}{\Gamma(\mathbf{v})} \left(\frac{D}{D_0}\right)^{\mathbf{v}-1} \frac{1}{D_0} \exp\left(-\frac{D}{D_0}\right)$	$D_0 = \left[6 \frac{\Gamma(\mathbf{v})}{\Gamma(\mathbf{v}+3)} \frac{q_l}{\pi \rho_w N_t} \right]^{1/3}$
Lognormal	$N(D) = \frac{N_t}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma} \frac{1}{D} exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(D/D_0)}{\ln \sigma} \right]^2 \right\}$	$D_{0} = \left\{ 6 \frac{q_{l}}{\pi \rho_{w} N_{t}} \exp\left[-4.5(m\sigma)^{2}\right] \right\}^{1/3}$
Weibull	$N(D) = N_t \mu \left(\frac{D}{D_0}\right)^{\mu-1} \frac{1}{D_0} exp\left[-\left(\frac{D}{D_0}\right)^{\mu}\right]$	$D_0 = \left[\frac{6}{\Gamma(1+3/\mu)}\frac{q_l}{\pi\rho_w N_t}\right]^{1/3}$

A tabela 2 mostra as expressões matemáticas para as funçõesdistribuição citadas (incluindo a exponencial) e as equações para o "diâmetro de escala" ou "declividade" da distribuição. Nas equações mostradas, Γ representa a

função gama (ou função fatorial), Nt representa a concentração total de gotículas, ql o conteúdo de água líquida, ρ w a densidade da água líquida, ν o parâmetro de forma

da função gama, σ o parâmetro de largura do espectro para a distribuição lognormal e μ o parâmetro de forma da distribuição de Weibull (COSTA e PAULIQUEVIS, 2009).

De acordo com os resultados obtidos no experimento de Costa *et al.* no Ceará em 1994, para o ajuste exponencial, a ocorrência entre 0 e 2 é muito mais comum em nuvens marítimas, 10,6% e nuvens costeiras, 13,2%; do que no continente, 1,8%, e em nuvens urbanas, 2,9%. Deve-se notar, no entanto, que a ocorrência de parâmetros de forma maiores (> 40) foi mais prevalente nas nuvens marítimas, 8,2% do que em nuvens continentais, 1,8% (COSTA *et al.*, 2000).

O ajuste gama se mostrou eficaz em representar 83,9% dos espectros marítimos, 90,2% dos costeiros, 95,5% dos continentais e 90,4% dos espectros urbanos. O maior número de ocorrências do parâmetro de forma em nuvens marítimas e costeiras aparece entre 2 e 3. No conjunto de nuvens continentais e urbanas, os valores mais frequentes do parâmetro de forma ocorrem entre 3 e 7 (COSTA *et al.*, 2000).

O ajuste lognormal foi menos adequado do que o ajuste gama para todas as categorias de nuvens. Bons ajustes foram alcançados por 71,8% das nuvens marítimas, 80,8% das nuvens costeiras, 89,0% das nuvens continentais, e 85,5% das nuvens urbanas. Espectros de nuvens marítimas e costeiras tendem a ser mais largos do que os espectros continentais e urbanos.

O ajuste de Weibull foi eficaz em representar 91,4% do espectro marítimo, 93,9% do espectro no litoral, 98,7% dos espectros continentais e 94,7% dos espectros urbanos, proporcionando a melhor representação de espectros de nuvem para todas as categorias de nuvens (COSTA *et al.,* 2000).

Do que foi exposto, pode-se concluir que o uso de funções analíticas como a Weibull, gamma e lognormal como base para parametrizações de microfísica totalizada é capaz de proporcionar uma melhor representação dos espectros reais de gotículas de nuvens em cúmulos rasas. Provavelmente, isto também é verdade para outros tipos de hidrometeoros e diferentes espécies de nuvens.

Verifica-se, também, uma dependência do parâmetro de forma sobre o tipo de regime de nuvens; nesse sentido, o ajuste para Weibull tem suas vantagens, já que é mais adequado para todos os tipos de nuvens e ajusta mais espectros do que qualquer outra função testada para o experimento em questão; os melhores resultados foram encontrados para Weibull, segundo previsto por Liu *et al.*(1995) foi o valor 3,0.

Nos trabalhos de Costa *et al.* (2000) e Martins (2006) sobre, respectivamente, o Nordeste setentrional e a Amazônia, os autores reconheceram que há uma clara tendência de nuvens com maiores concentrações de gotículas apresentarem também espectros mais estreitos, e vice-versa. Uma questão que permanece em aberto, porém, é que não há um mecanismo trivial pelo qual se possam prognosticar as modificações nesse parâmetro associadas a processos de mistura, crescimento condensacional, coalescência, etc.(COSTA *et al.,* 2000).

Para este trabalho, usou-se a função mais difundida nos meios científicos, no caso, a função gama, como utilizado por Walko *et al.* (1995), cuja dificuldade incide na escolha do parâmetro de forma, devido a grande variedade de formas do espectro, o que dificulta uma representação adequada de todo o espectro usando um valor único para os parâmetros, comumente especificados pelo usuário.

Ajustes de espectros observados para distribuições gama mostram que esse parâmetro varia tipicamente de valores próximos de 1,0 (para os quais a distribuição gama praticamente se reduz à exponencial) até valores muito elevados, de várias dezenas, conforme exposto anteriormente.

3 METODOLOGIA

3.1 DADOS EXPERIMENTAIS DO EMfiN!

Os dados utilizados nesta pesquisa foram coletados durante o Experimento de Microfísica de Nuvens (EMfiN!), projeto que visa a investigação das propriedades de microfísica de nuvens e aerossóis sobre o território brasileiro. Figuravam como objetivos do experimento, a coleta de dados referentes às propriedades microfísicas de nuvens e determinar funções-distribuição de hidrometeoros (particularmente gotículas de nuvem e gotas de chuva) características, como base para o desenvolvimento e/ou calibração de parametrizações físicas em modelos atmosféricos, estas duas metas justificam o uso de tais dados na realização desta pesquisa.O primeiro experimento no âmbito desse projeto foi realizado na cidade de Fortaleza-CE no período de 01 a 12 de abril de 2002.

O local de estudo é o Estado do Ceará, Brasil, mais especificamente, a região em torno da cidade de Fortaleza, que inclui a área de cobertura do radar meteorlógico banda X da Funceme e onde foram realizados seis vôos pelo aviãolaboratório da UECE (figura 6) e foram lançadas 28 radiossondas durante todo o experimento. Foram cobertas áreas sob forte influência de núcleos de condensação de nuvens (CCN) de origem marítima, dentre estas, boa parte da região costeira e continental, com ênfase para a região metropolitana de Fortaleza onde a poluição urbana e industrial têm forte influência no processo de modificação da microestrutura das nuvens.

O radar meteorológico *doppler* banda X com um alcance máximo de 120 km de raio, foi instalado, pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), no Campus do Itaperi, a partir de um convênio de cooperação técnico-científico com a Universidade Estadual do Ceará (UECE). O mesmo foi muito utilizado no estudo de física de nuvens durante o EMfiN!-CE e sua área de cobertura é mostrada na figura 7. O radar usa ondas eletromagnéticas (microondas)

que, em conjunto com técnicas computacionais, é capaz de fazer sensoriamento remoto e detecção de fenômenos de tempo.



Figura 6 - Avião-laboratório utilizado para pesquisas atmosféricas da UECE. Fonte: EMfiN!, (2002).



Figura 7 - Área de cobertura do radar meteorológico, instalado no Campus do Itaperi, da UECE, no "range" de 120 km.

Fonte: EMfiN!, (2002).

A abertura dos trabalhos experimentais para o EMfiN aconteceu no dia 02 de abril de 2002, iniciando-se às 12h28min culminando com voos e radio sondagens entre 15h51min e 17h01min entre as radias de 180º e 230º. Apesar de não haver voo no dia seguinte, fora realizada uma radio sondagem às 14h42min. Na quintafeira dia 04 de abril de 2002, fora realizado um novo vôo iniciado às 13h46min, além de duas radio sondagens entre 09h22min e 15h07min.

Na sexta-feira, dia 05 de abril de 2002 foram realizadas novas radio sondagens entre 09h34min e 15h01min, constando ainda para este dia um voo iniciado às 12h21min. No sábado dia 06 de abril de 2002, não ocorreu voo, mas foram realizadas cinco radio sondagens entre 07h17min e 15h29min. Na segundafeira, dia 08 de abril de 2002 foram realizados quatro radio sondagens no período de 08h09min e 15h49min; verificou-se também a realização de um voo com GPS extra às 09h53min (COSTA, 2002).

Na terça-feira, dia 09 de abril de 2002, foram realizados dois voos, um às 09h39min e outro às 16h20min; sendo que nos dias seguintes, não aconteceu nenhum voo, sendo realizadas apenas radio sondagens, principalmente durante a manhã (COSTA, 2002).

Os procedimentos de vôos, conforme mostrado na figura 8, foram: "pernas" em altitudes diferentes, usada para amostrar formações em linha; espiral, adequada para amostrar células isoladas e "gravata borboleta", útil quando se trata de acompanhar a evolução temporal de nuvens ou sistemas de nuvens. Os municípios e trajetórias dos vôos são mostrados na figura 9, sendo que cada vôo é evidenciado no mapa, através de cores diferentes.



Figura 8 - Procedimentos de voos com nuvens vistas de cima: (a) "pernas", (b) "espiral" e (c) "gravata borboleta".Fonte: EMfiN!, (2002).



Figura 9 - Trajetórias realizadas pelo avião durante os doze dias do experimento EMfiN!. Fonte: EMfiN!, (2002).

A coleta de dados foi realizada através de sensores de pressão estática e dinâmica, temperatura, temperatura do ponto de orvalho e água líquida, um contador de núcleos de condensação de nuvens (*Cloud Condensation Nucleous Counter*, CCNC), e três sondas espectrométricas (*Forward-Scattering Spectrometer Probe*, FSSP-100; *Optical Array Probe*, OAP-200X; e *Optical Array Probe*, OAP-200Y). (COSTA, 2002), alguns desses equipamentos podem ser visualizados na figura 10.

A diferença básica entre as sondas ópticas 200X e 200Y e a FSSP reside na classificação das gotas captadas em categorias pelo sistema óptico. A sonda FSSP classifica as gotículas em 15 categorias, no intervalo de 2 µm a 47 µm; enquanto a sonda 200X mede e classifica gotas no intervalo de 30 µm a 450 µm de diâmetro, a sonda 200Y mede e classifica as gotículas no intervalo de 300 µm a 4,5 mm de diâmetro; percebe-se que cada sonda tem uma faixa de captação de gotículas, elencadas, aqui de forma crescente quanto ao tamanho dos seus diâmetros.

Os parâmetros microfísicos obtidos pelas sondas 200X e 200Y são calculados usando as mesmas expressões matemáticas para os parâmetros obtidos pela sonda FSSP (COSTA, 2002).



Figura 10 - Fotografia dos sensores instalados (a) na asa esquerda (sensores de água líquida e sonda FSSP-100) e (b) na asa direita do ALPA (sondas OAP-200X e OAP-200Y). Fonte: Costa,(2002).

3.2 CONFIGURAÇÕES DO MODELO ATMOSFÉRICO RAMS

Fica cada vez mais evidente a necessidade de a sociedade atual encontrar mecanismos que atuem na previsão de tempo e clima, seja para evitar grande número de vítimas em catástrofes climáticas ou em aplicações de cunho socioeconômico ou científico.

Atualmente, existem diversos centros de pesquisa pelo mundo. No Brasil, têm destaques centros como o CPTEC/INPE, o INMET e a FUNCEME; esta realiza previsões de tempo e clima com base em modelagem numérica da atmosfera utilizando o modelo atmosférico regional RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*), para realizar a previsão de tempo do Nordeste brasileiro, com ênfase no estado do Ceará.

Utiliza-se aqui, também, o modelo RAMS, versão 6.0 que, por sua capacidade de reproduzir os mais diversos fenômenos atmosféricos em mesoescala (2 km a 40 km), é bem aceito pelos diversos órgãos de previsão de tempo e pela comunidade científica (COTTON *et al.,* 2003; PIELKE *et al.,* 1992).

A representação da dinâmica e termodinâmica do ambiente, em modelagem atmosférica, é realizada através da resolução de um conjunto de equações que visam entender os processos físicos que ocorrem em determinado fenômeno atmosférico.

As equações utilizadas no modelo RAMS compreendem: equação da conservação de energia, equação da conservação de massa (equação da continuidade), equação da conservação do momento (equação de Navier-Stokes), conservação da água e equação de estado do gás ideal (WALKO; TREMBACK, 2001).

O código do modelo é construído com base nestas equações, que são complementadas com esquema de parametrizações para fenômenos não resolvíveis na mesoescala, como a difusão turbulenta, radiação solar e terrestre, troca de calor sensível e latente entre a atmosfera e a superfície, convecção profunda e processos microfísicos em nuvens.

As equações que representam a conservação do momentum, em coordenadas cartesianas são:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f v - \hat{f} w - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x'}$$
(17)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fu - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y'}$$
(18)

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\hat{f}u - g - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}$$
(19)

Desprezando os termos da força viscosa e a força centrífuga, temos o parâmetro de coriolís: $f = 2\Omega \sin \phi$, $\hat{f} = 2\Omega \cos \phi$.

A conservação da massa é representada segundo a equação da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . (\rho V) = 0 \implies \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0$$
(20)

A conservação de energia, expressa em termos da conservação da temperatura potencial é dada por:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} + V.\,\nabla\theta = 0,\tag{21}$$

Onde:

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p}\right)^k \tag{22}$$

Com $p_0 = 1000 \text{ hPa}$.

Como a água aparece sob várias formas e é subdividida em categorias, a conservação da água será apresentada segundo a taxa de variação da razão de mistura de determinada categoria, da seguinte forma:

O método das diferenças finitas é utilizado nos esquemas de diferenciação disponibilizados no modelo para resolver a todas as equações. Para o modelo não hidrostático, o esquema *Leapfrog* (centrado no espaço e no tempo) padrão é utilizado para todas as variáveis usando a opção de diferenciação no tempo, e para componentes de velocidade, com uma diferenciação no tempo híbrida, o qual consiste de diferenciação avançada no tempo para variáveis termodinâmicas, e a *Leapfrog* para as demais (WALKO; TREMBACK, 2001).

Os esquemas de advecção são ajustados na forma de fluxo com a finalidade de conservar a massa e o momento. Em todos os esquemas é empregada a diferenciação no tempo *time-split*, que consiste na divisão do passo de tempo do modelo, a fim de resolver os termos da equação que são responsáveis pela propagação mais rápida dos modos das ondas, inibindo, assim, a difusão numérica (WALKO; TREMBACK, 2001).

A organização do espaço no modelo atmosférico é feita através de grades subdivididas em pontos discretos, onde são resolvidas as equações; dois termos comumente utilizados em modelagem atmosférica são espaçamento e aninhamento. O espaçamento de grade é a distância adjacente entre dois pontos de uma grade. O aninhamento da grade trata da resolução do modelo, já que o aninhamento consiste em colocar uma grade de maior resolução e menor área dentro de uma grade de maior área.

A discretização do tempo corresponde a uma interação, ou passo de tempo, onde os modelos recalculam as variáveis. No entanto, a escolha do espaçamento de grade está fortemente relacionada com a do passo de tempo, de forma a manter a estabilidade numérica do modelo. Essa escolha leva em consideração a condição de Courant-Frederich-Lewy, ou simplesmente CFL, ela implica que o número de Courant, C, seja menor ou igual a 1 para que o modelo seja considerado estável. O número de Courant é definido como:

$$C = v \frac{\Delta t}{\Delta x} , \qquad (24)$$

(23)

onde v é a maior velocidade característica do problema simulado, Δt representa o passo de tempo do modelo, e Δx o espaçamento de grade do modelo (CAMELO, 2007).

Quanto à estrutura de grade, o RAMS usa grade do tipo C de Arakawa (MESINGER; ARAKAWA, 1976), com possibilidade de aninhamento vertical ou horizontal, que consiste em refinar o espaçamento da grade em determinadas regiões de um domínio inicialmente configurado, segundo Clark e Farley (1984), onde as variáveis termodinâmicas, inclusive umidade, são definidas em pontos de grade e as componentes u, v e w do vetor velocidade são definidas em pontos médios de cada caixa de grade.

Os níveis de aninhamento são especificados após a configuração da grade mais grossa e mais externa, que por sua vez, define as demais. Informamos o número de grades e as quantidades de pontos nas direções meridionais e longitudinais; como a troca de informações entre as grades é bidirecional, ou seja, a grade externa alimenta a interna com valores referenciais e vice-versa, os níveis de aninhamento decrescem em razões no sentido da grade mais externa para a mais interna.

O modelo configurado apresenta três grades com projeção estereográfica polar, sendo a primeira composta de 50 pontos no eixo horizontal e 50 pontos no eixo vertical, tendo um espaçamento de grade de 32km em ambas as direções.

A segunda grade apresenta 98 pontos, com espaçamento de grade de 8km, e a terceira grade com 202 pontos e espaçamento de 2km. As três grades apresentam 48 níveis verticais; sendo o espaçamento de grade vertical inicial de 20m com uma razão de expansão de 1,133 até o espaçamento vertical máximo de 1100m, estando as 3 grades aninhadas no mesmo ponto , sendo este: latitude -3.794554 e longitude -38.55755.

O nudging ou relaxamento newtoniano é utilizado quando se deseja que os resultados das equações do modelo sejam forçadas a tender a um outro resultado já conhecido, fazendo uma previsão tender aos resultados coletados por estações de superfície ou fazer com que os cálculos do modelo regional não se distanciem muito dos produzidos por um modelo global (SANTIAGO DE MARIA, 2007). No caso do modelo em questão, o *nudging* lateral encontra-se ligado com 5 pontos de grade com uma escala de tempo de 1 dia (86.400s) com o *nudging* desligado no topo do modelo.

O RAMS, na versão utilizada, apresenta três opções para a parametrização da radiação para onda longa e onda curta: Chen e Cotton (1983), que considera o efeito das nuvens, o proposto por Mahrer e Pielke (1977) que não considera tais efeitos e; e o proposto por Harrington (1977), que considera a água em todas as suas formas: vapor, água de nuvem, água de chuva, pristine, agregados graupel e granizo.

As três grades apresentam para a parametrização de radiação, a proposta por Chen e Cotton (1983), tanto para onda curta quanto para onda longa, com uma frequência de atualização de 700s; já para a turbulência, foi utilizada a de Mellor-Yamada (1974). A parametrização de convecção foi desligada para as três grades, assim, a convecção será resolvida explicitamente pelo modelo nessas grades (SANTIAGO DE MARIA, 2007).

A parametrização de microfísica utilizada é a de nível 3 do modelo; o que significa que a água é considerada em termos de advecção, difusão e fluxo superficial, em todas as suas formas.

Para que a simulação com o RAMS seja iniciada, tipicamente são necessários dados de entrada de algum modelo global (inicialização variável). As variáveis de entrada necessárias para inicialização da simulação são fornecidas em diferentes níveis da atmosfera e em diferentes intervalos de tempo que podem ser escolhidas de acordo com a região de interesse e objetivo da simulação. Estas variáveis são: as componentes zonal e meridional do vento, umidade relativa, altura geopotencial e temperatura.

Os dados de entrada (temperatura do ar, geopotencial, umidade do ar e vento em diferentes níveis da atmosfera) utilizados na incialização do modelo foram obtidos do NCEP/NCAR (*Reanalyse National Center for Enveronmental Prediction/National Center for Atmospheric Research*) junto ao projeto reanalysis. São dados retirados de observações reais, através de estações meteorológicas de continente e mar, imagens de satélites, radiossondagens, etc.

Os dados de topografia, temperatura da superfície do mar, índice normalizado de vegetação (NDVI) e uso do solo foram coletados no sítio de apoio ao modelo RAMS (ATMET, 2009).

A execução do modelo na fase de pré-processamento pode ser dividida em três partes. Na primeira, é necessário converter os dados oriundos do modelo Global do CPTEC/INPE em um formato de arquivo que o RAMS aceite. O CPTEC/INPE disponibiliza arquivos do modelo Global no formato *grib*, contendo o estado da atmosfera em uma grade Gaussiana que cobre a América do Sul. O RAMS não trabalha com este formato de arquivo, e espera um arquivo no formato *American Standard Code for Information Interchange* ASCII, texto puro, que contenha o estado da atmosfera em uma grade regular (SANTIN, 2006).

A conversão do arquivo é executada pelo programa FORTRAM gribT126_to_dp.x, e gera arquivos com extensão .dp. Na segunda, a variável RUNTYPE contida no arquivo de configuração do modelo (RAMSIN) está ajustada para MAKESFC. Com esta opção são geradas as informações do terreno (solo, vegetação e temperatura da superfície do mar (tsm)). E na terceira, a variável RUNTYPE está ajustada para MAKEVFILE, quando o modelo é rodado com esta opção, o pacote ISAN (ISentropic ANalysis) é executado com o objetivo de analisar o conjunto de dados e criar os arquivos de inicialização de variáveis (variable initialization files ou varfiles) (SANTIN, 2006).

A partir das informações contidas nos arquivos com extensão .dp são gerados os arquivos de extensão .iv para o processamento. Na fase de processamento, o módulo iw-PAD faz o processamento propriamente dito do modelo e utiliza o arquivo de configuração RAMSIN-initial cuja variável RUNTYPE está configurada com a opção INITIAL, o que configura a execução do modelo para ter como dado de saída às análises (SANTIN, 2006).

O modelo gerou os dados de análise, os quais serão manipulados na fase de pós-processamento. Este módulo é responsável pela geração de um arquivo *netcdf (Network Common Data Form)* que será utilizado pelo visualizador gráfico *FERRET* o mesmo é gerado pelo programa *ramspost* (SANTIN, 2006).

4 - RESULTADOS

Este trabalho estuda a influência do parâmetro de forma e, por conseguinte, da concentração de gotículas de nuvem, no processo de formação das precipitações, e assim promover o desenvolvimento de conhecimentos que permitam fazer os melhores ajustes possíveis para as previsões meteorológicas.

Para contextualizar as medidas microfísicas de acordo com condições de mesoescala, no entanto, são apresentadas inicialmente as formações de nuvens precipitantes mostradas nas imagens de radar para os casos a serem estudados. Em seguida, apresenta-se uma análise dos histogramas para a concentração e o parâmetro de forma da função gama com base nas sondas FSSP e, finalmente, serão mostrados os resultados de simulações numéricas com o modelo RAMS para dois casos do EMfiN!, durante o período em questão.

4.1. SITUAÇÃO OBSERVADA DURANTE O EMFIN PELO RADAR METEOROLÓGICO BANDA X DA FUNCEME.

A figura 11 mostra imagens de radar para o dia 02 de abril, de três em três horas, aproximadamente, iniciando às 12h 28min até às 23h e 58min. É possível verificar uma maior quantidade de precipitação a partir das 18h; nesse horário é possível observar chuva nas divisas entre Ocara, Uruburetama e Russas.

Observa-se aqui que a taxa de precipitação só aumenta fim do dia, vê-se também a concentração dessas taxas estão localizadas sobre o oceano Atlântico.

Observa-se também que na figura 11(e), chuva sobre o oceano Atlântico, por volta das 23:58 h, para esse momento, uma quantidade bem maior que a que acontece no continente.



Figura 11 - Imagens de radar do dia 02 de abril de 2002, com evolução temporal de 3 em 3 horas, aproximadamente, no "range" de 120 km. Fonte: EMfiN!, (2002).

As próximas imagens de radar retratam o dia 09 de abril de 2002 (Figura 12), nas quais se pode observar maior formação de nuvens e precipitação do que no dia 02 de abril do referido ano. Sendo a evolução horária de três em três horas, verificam-se maiores valores de refletividade (e, portanto, de taxa de precipitação) às 06h,12h,15h e 23h 50min.



Figura 12 - Imagens de radar do dia 09 de abril de 2002, com evolução temporal de 3 em 3 horas, aproximadamente, no "range" de 120 km. Fonte: EMfiN!, (2002).

4.2 CONCENTRAÇÕES DE GOTÍCULAS E PARÂMETROS DE FORMA DA FUNÇÃO GAMA.

O avião laboratório da UECE realizou 6 voos durante o experimento, adentrando nas nuvens para coleta de gotículas através da sonda FSSP (*Forward Scattering Spectrometer Probe*) modelo 100, que a partir do espalhamento de um feixe de laser, mede a distribuição do tamanho das gotículas de nuvens, classificando-as por tamanho, em 15 categorias, no intervalo de 2 a 47 µm.

Os dados coletados foram submetidos ao teste *Kolmogorov-Smirnov,* em um programa de linguagem Fortran (*Formula Translation*), para verificar o quão bom é o ajuste da função gama para cada distribuição.

Depois da realização desse teste estatístico, a análise de dados coletados durante o EMfiN! permitiu a construção de histogramas a fim de identificar os parâmetros que apresentaram maiores frequências. Os referidos dados encontram-se no apêndice deste trabalho.

As concentrações máximas encontradas por voo, segundo consta em dados coletados durante o experimento em questão, são: para o dia 02, 201,3 cm⁻³; para o dia 04, 320,7 cm⁻³; para o dia 05, 392,5 cm⁻³; para o dia 08, 176,4 cm⁻³; para o dia 09, durante a manhã, 214,3 cm⁻³; para o dia 09, durante a tarde, 165,1 cm⁻³.

O histograma da Figura 13 corresponde às frequências dos parâmetros de forma da função gama para o voo realizado no dia 02 de abril de 2002. Verificase que para este dia a maior frequência é registrada entre as classes 4 e 6; destacaram-se também os parâmetros de forma entre 14 e 15.





No dia 04 de abril de 2002 foi realizado novo voo e, conforme mostrado na figura 14, os parâmetros de forma da função gama que mais se destacaram para este dia foram 5,6 e 7.





A figura 15 apresenta um histograma com frequência bimodal para o voo do dia 05 de abril de 2002, onde os valores que merecem destaque para o parâmetro de forma da função gama são 6 e 13.

Histograma - Vôo 20020405-1





No dia 08 de abril de 2002 consta um voo realizado às 09h53min. Para este dia destacou-se o parâmetro de forma da função gama com valor 6, conforme mostrado na Figura 16.





A Figura 17 e a Figura 18 correspondem a dados coletados durante o dia 09 de abril de 2002, dia no qual foram realizados dois voos; para o primeiro voo realizado durante a manhã, os parâmetros de forma de 6 a 13 apareceram com destaque em relação aos demais, sendo a maior frequência registrada para a classe de 10 a 11, conforme mostrado na figura 17.



Figura 17 - Frequências dos parâmetros de forma da função gama para o dia 09 de abril de 2002, realizado às 09h29min.

A Figura 18 apresenta a frequência para os dados coletados com relação ao parâmetro de forma da função gama, sendo que este voo foi realizado, durante o período da tarde.

As frequências apresentam três picos com valores relativamente distantes uns dos outros; sendo estes registrados entre as classes 5,1 e 7,1; 12,2 e 13,3; 19,4 e 20,4. As porcentagens das frequências para os valores dos parâmetros de forma apresentados nos histogramas podem ser consultadas no apêndice desta dissertação.



Figura 18 - Frequências dos parâmetros de forma da função gama para o dia 02 de abril de 2002, realizada às 16h20min.

A Figura 19 mostra o histograma para o parâmetro de forma para todos os voos do experimento, é possível observar três modas, porém grande parte dos parâmetros de forma aparecem entre os valores 1 e 15.



Figura 19 - Frequência dos parâmetros de forma da função gama para todos os voos dos experimentos.
A região simulada pelo modelo RAMS 6.0 de maior resolução corresponde basicamente a região do experimento EMfiN!, a mesma vai de 39,65W a 37.5W e de 4.9S a 2.7S. Para essa região foram realizados 9 experimentos, conforme Tabela 3.

Experimentos	Concentração	Parâmetro de forma
1	100 cm ⁻³	2
2	100 cm ⁻³	6
3	100 cm ⁻³	13
4	200 cm ⁻³	2
5	200 cm ⁻³	6
6	200 cm ⁻³	13
7	300 cm ⁻³	2
8	300 cm ⁻³	6
9	300 cm ⁻³	13

Tabela 3 - configuração das simulações realizadas com modelo RAMS 6.

A justificativa para a utilização dos valores no intervalo de 100 cm⁻³ a 300 cm⁻³ para a concentração de gotículas de nuvem, tem como base as observações dos dados relativos ao EMfiN!, para os quais foram construídos histogramas, conforme a Figura 20, onde pode-se constatar que esta amplitude de valores retrata bem o observado através da coleta realizada pelas sondas espectrométricas.

Os valores elencados para representar o parâmetro de forma da função gama foram 2, 6 e 13, cujos histogramas foram apresentados na seção anterior, são justificados pelo fato de o parâmetro 2 tratar-se do valor padrão apresentado pelo modelo e que geralmente os usuários que trabalham com o RAMS o mantêm. Em nosso caso, ao serem utilizados os dados do EMfiN!, foram testados os valores das modas dos histogramas das figuras 13 a 18 que, em grande parte, estão compreendidos entre 6 e 13. É importante salientar, ainda, que o valor 13, corresponde à um valor muito próximo ao encontrado para a mediana do conjunto das séries temporais, cujo valor encontrado registrou 13,5.



Figura 20 - Histogramas para a concentração de gotículas de nuvem para os dias: a) 02/04/2002, b)04/04/2002, c)05/04/2002, d)08/04/2002, e)09/04/2002 pela manhã e f)09/04/2002 pela tarde.

Segundo dados observados durante o EMfiN! em abril de 2002, pode-se verificar que predominaram o aparecimento de concentrações na faixa entre 50 cm⁻³ e 150 cm⁻³, levando-se em consideração a Figura 21, que mostra o histograma das concentrações de gotículas para todos os dias em que ocorreram voos.





4.4 RAZÕES DE MISTURA OBSERVADAS NOS EXPERIMENTOS (02/04/2002)

Uma importante grandeza que exprime o estado higrométrico do ar é a razão de mistura, que é definida como o quociente entre a massa do vapor de água, em suas várias categorias, e a massa de ar seco num dado volume de ar; usualmente esse valor é expresso em gramas por quilograma. Os gráficos das figuras 21, 22 e 23, representam a evolução temporal da média espacial das razões de mistura para as nove simulações do dia 02/04, com ênfase nas seguintes categorias de hidrometeoros: o condensado total, água de nuvem, água de chuva, gelo leve (*pristine* e neve) e gelo pesado (*graupel* e granizo).

Nas primeiras horas, em todas as simulações, o modelo mostra apenas gelo leve como parte do condensado total; registrando 0,0028 g/kg sendo que, a partir das 03h, o gelo leve começa a desaparecer e surgem gotículas de nuvem, por condensação. Na simulação, esses hidrometeoros passam a se transformar em gotas de chuva por volta das 08h por autoconversão.

À medida que evolui o desenvolvimento da precipitação, a massa de água de nuvem e do condensado total estabilizam-se, depois voltam a crescer; até que, em torno de 12h, a precipitação atinge o ápice, quando mostra razões de mistura de água de nuvem médias em todo o domínio em torno de 0,005 g/kg e 0,006 g/kg. A partir desse ponto, ocorre redução na quantidade de água de chuva e um aumento na taxa de gotículas de nuvem, fato que eleva o total do condensado na atmosfera.



Figura 22 - Séries temporais das razões de mistura para as simulações do dia 02 de abril de 2002; sendo: a) conc.: 100 cm⁻³ p.f.: 2; b) conc.: 100 cm⁻³ p.f.: 6; c) conc.: 100 cm⁻³ p.f.: 13; Condensado total (preto), gotículas de nuvem (vermelho), gotículas de chuva (verde), gelo leve (azul escuro), gelo pesado (azul claro).



Figura 23 - Séries temporais das razões de mistura para as simulações do dia 02 de abril de 2002; sendo: a) conc.: 200 cm⁻³ p.f.: 2; b) conc.: 200 cm⁻³ p.f.: 6; c) conc.: 200 cm⁻³ p.f.: 13; Condensado total (preto), gotículas de nuvem (vermelho), gotículas de chuva (verde), gelo leve (azul escuro), gelo pesado (azul claro).



Figura 24- Séries temporais das razões de mistura para as simulações do dia 02 de abril de 2002; sendo: a) conc.: 300 cm⁻³ p.f.: 2; b) conc.: 300 cm⁻³ p.f.: 6; c) conc.: 300 cm⁻³ p.f.: 13; Condensado total (preto), gotículas de nuvem (vermelho), gotículas de chuva (verde), gelo leve (azul escuro), gelo pesado (azul claro).

Diferentes valores de concentração e parâmetro de forma levam a evoluções diferentes dos sistemas de nuvem. Quando a concentração aumenta, a auto-conversão se torna menos eficiente e se verifica claramente um aumento no valor máximo da media da razão de mistura de água de nuvem (e do condensado total) quando se compara a Figura 24 com a Figura 22. O mesmo processo, de redução na eficiência de conversão de água de nuvem para água de chuva, se verifica quando o parâmetro de forma aumenta. Isto pode ser percebido, comparando-se os painéis 22c, 23c e 24c com os painéis 22a, 23a e 24a.

Assim, é possível observar através das séries temporais para o dia 02 de abril de 2002, que tanto o aumento do parâmetro de forma, mantendo-se as mesmas concentrações, quanto o aumento da concentração, mantendo-se o parâmetro de forma, ocasionam aumento do condensado total, sendo os máximos observados segundo a tabela 4 a seguir:

Tabela 4- Máximo valor da média	espacial para o	condensado total	(tempo) - 02/04/2002
---------------------------------	-----------------	------------------	----------------------

Concentrações	$\nu = 2$	$\nu = 6$	v = 13
100 cm ⁻³	0,011 g/kg (12h)	0,012 g/kg (16h)	0,013 g/kg (13h)
200 cm ⁻³	0,011 g/kg (13h)	0,012 g/kg (13h)	0,017 g/kg (16h)
300 cm ⁻³	0,0128 g/kg (13h)	0,0165 g/kg (14h)	0,0178 g/kg (16h)

O aumento do condensado total ocorre principalmente no período vespertino, já que o aumento do parâmetro de forma também reduz a eficiência da auto-conversão, retardando o início da precipitação e a quantidade de gotículas de chuva.

Para a razão de mistura de gotículas de nuvem, ratifica-se que o aumento do parâmetro de forma para as mesmas concentrações favorece o aumento das quantidades de gotículas de nuvem; o mesmo ocorrendo se aumentarmos as concentrações para o mesmo parâmetro de forma. Isto é mostrado na tabela 5, que mostra que a máxima razão de mistura média de água de nuvem na simulação com auto-conversão menos eficiente (experimento 9) é quase quatro vezes maior do que a máxima razão de mistura média no experimento 1.

Concentrações	$\nu = 2$	$\nu = 6$	$\nu = 13$
100 cm ⁻³	0,0042 g/kg (14h)	0,007 g/kg (16h)	0,0085 g/kg (15h)
200 cm ⁻³	0,0045 g/kg (13h)	0,008 g/kg (16h)	0,015 g/kg (16h)
300 cm ⁻³	0,006 g/kg (15h)	0,010 g/kg (14h)	0,0158 g/kg (16h)

Tabela 5 - Máximo valor da média espacial da razão de mistura para a água de nuvem (tempo) - 02/04/2002.

No que diz respeito, à razão de mistura de água de chuva, as simulações com menores concentrações e menores parâmetros de forma tendem a produzir um segundo pico, além daquele que aparece em todos os casos (12 horas). Em uma dessas simulações (experimento 1), o segundo pico chega, inclusive, a ser mais elevado que o primeiro.

Em contraste, nas simulações com maiores valores do parâmetro de forma, esse segundo pico é suprimido. Na Tabela 6, são mostrados os valores máximos da razão de mistura média de água de chuva nos 9 experimentos numéricos para o caso do dia 02/04.

Tabela 6 - Máximo valor da média espacial da razão de mistura de água de chuva (tempo) - 02/04/2002.

Concentrações	$\nu = 2$	v = 6	v = 13
100 cm ⁻³	0,006 g/kg (16h)	0,005 g/kg (12h)	0,0048 g/kg (12h)
200 cm ⁻³	0,0058 g/kg (12h)	0,0055 g/kg (12h)	0,0055 g/kg (12h)
300 cm ⁻³	0,0057 g/kg (12h)	0,005 g/kg (12h)	0,0052 g/kg (12h)

Observando o perfil vertical do condensado total (Figura 25), constata-se que as simulações com o parâmetro de forma igual a 13 passam a se destacar sobre os demais em altitudes próximas a 4000 m.



Figura 25 - perfil vertical da razão de mistura do condensado total para o dia 02 de abril de 2002.

O parâmetro de forma 13 também passa a registrar valores de destaque sobre as demais simulações por volta dos 4000 m, especialmente quando combinado com concentrações mais altas, como pode ser verificado na Figura 26, que registra o perfil vertical da razão de mistura de água de nuvem.



Figura 26 - perfil vertical da razão de mistura de gotículas de nuvens para o dia 02 de abril de 2002.

Na Figura 27, é possível observar a evolução temporal da chuva média acumulada para o dia 02 de abril de 2002; repare que existem diferenças significativas na taxa de precipitação e na eficiência da mesma.

Pode-se dizer que o aumento do parâmetro de forma prejudica o processo de auto-conversão, tanto que os valores que apresentam o parâmetro de forma 13, figuram entre os mais baixos valores para a taxa de precipitação; enquanto que, para um mesmo parâmetro de forma, a tendência é que as concentrações menores registrem maior eficiência no processo de auto-conversão.



Figura 27 - chuva média acumulada registrada para o dia 02 de abril de 2002.

4.5 SÉRIES TEMPORAIS PARA O DIA 09 DE ABRIL DE 2002.

As figuras 28 a 30 mostram a evolução temporal das médias espaciais das razões de mistura de condensado total, água de nuvem, água de chuva e gelo (dividido novamente em "leve" e "pesado").

No início da simulação, constatam-se apenas baixas razões de mistura, 0,001g/kg de gotículas de nuvem como parte do condensado total; a partir de 04-05h, têm início os processos de auto-conversão, sendo que, nas simulações com maiores valores de concentração e parâmetro de forma, o aparecimento de água de chuva é ligeiramente retardado.



Figura 28 - Séries temporais das razões de mistura para as simulações do dia 09 de abril de 2002; sendo: a) conc.: 100 cm⁻³ p.f.: 2; b) conc.: 100 cm⁻³ p.f.: 6; c) conc.: 100 cm⁻³ p.f.: 13; Condensado total (preto), gotículas de nuvem (vermelho), gotículas de chuva (verde), gelo leve (azul escuro), gelo pesado (azul claro).



Figura 29 - Séries temporais das razões de mistura para as simulações do dia 09 de abril de 2002; sendo: a) con:300abril de 2002; sendo: a) conc.: 200 cm⁻³ p.f.: 2; b) conc.: 200 cm⁻³ p.f.: 6; c) conc.: 200 cm⁻³ p.f.: 13; Condensado total (preto), gotículas de nuvem (vermelho), gotículas de chuva (verde), gelo leve (azul escuro), gelo pesado (azul claro).



Figura 30 - Séries temporais das razões de mistura para as simulações do dia 09 de abril de 2002; sendo: a) conc.: 300 cm⁻³ p.f.: 2; b) conc.: 300 cm-3 p.f.: 6; c) conc.: 300 cm⁻³ p.f.: 13; Condensado total (preto), gotículas de nuvem (vermelho), gotículas de chuva (verde), gelo leve (azul escuro), gelo pesado (azul claro).

As gotículas de nuvem registram maiores quantidades de hidrometeoros na atmosfera, por volta de 07h e 08h, elevando os altos índices de condensado total, exceto nas simulações com parâmetro de forma 2, onde ocorrem picos entre 17h e 18h, devido ao aumento das concentrações de gelo, como podemos constatar a Tabela 7 a seguir:

Concentrações	$\nu = 2$	$\nu = 6$	$\nu = 13$
100 cm ⁻³	0,0089 g/kg (17h)	0,0122 g/kg (07h)	0,0138 g/kg (07h)
200 cm ⁻³	0,0182 g/kg (17h)	0,0128 g/kg (07h)	0,0161 g/kg (08h)
300 cm ⁻³	0,0139 g/kg (18h)	0,0153 g/kg (08h)	0,0151g/kg(08h e 13h)

Tabela 7 - Máximo valor da média espacial da razão de mistura do condensado total (tempo) - 09/04/2002.

Ratifica-se que o aumento do parâmetro de forma, mantendo-se as mesmas concentrações, ocasiona aumento do condensado total, observando o perfil vertical da razão de mistura do condensado total (Figura 31).





Se observadas as séries temporais, pode-se constatar que o aumento do parâmetro de forma reduz a razão de mistura de água de chuva (nestas simulações, para o dia 09/04, essa redução foi ainda mais sensível do que no caso anterior, do dia 02/04), fato que se reflete no registro dos valores máximos das concentrações, conforme a tabela 8 a seguir:

Concentrações	$\nu = 2$	$\nu = 6$	$\nu = 13$
100 cm ⁻³	0,0052 g/kg (15h)	0,004 g/kg (17h)	0,0012 g/kg (08h)
200 cm ⁻³	0,0059 g/kg (16h)	0,0038 g/kg (15h)	0,0023 g/kg (17h)
300 cm ⁻³	0,005 g/kg (17h)	0,0039 g/kg (17h)	0,0018 g/kg (08h)

Tabela 8- Máximo valor da média espacial da razão de mistura de água de chuva (tempo) - 09/04/2002.

A influência do parâmetro de forma na definição da concentração de gotículas de chuva fica evidenciada pelo perfil vertical da razão de mistura de água de chuva, conforme Figura 32.



Figura 32 - Perfil vertical da razão de mistura de chuva para o dia 09 de abril de 2002.

Na Figura 33, é possível observar a evolução temporal da chuva média acumulada para o dia 09 de abril de 2002; repare que, da mesma forma que analisado para o dia 02 de abril, existem diferenças significativas na taxa de precipitação e na eficiência da mesma.

Neste caso, verifica-se que o parâmetro de forma 13 apresenta as mais baixas taxas de precipitação, enquanto o parâmetro 6 aparece em uma posição intermediária, e o parâmetro de forma 2 registra valores mais altos; o que reitera o fato de que o aumento do parâmetro de forma favorece o processo de autoconversão; também ratifica que para o mesmo parâmetro de forma, quanto mais alta a concentração menor é a eficiência da precipitação.





Em contrapartida à redução na quantidade de água de chuva observada nas séries temporais, à medida que crescem a concentração e o parâmetro de forma, a razão de mistura de água de nuvem se mostra favorecida pelo aumento desses valores, conforme mostrado na Figura 34 a seguir:



Figura 34 - Evolução da razão de mistura de gotículas de nuvem com a altitude para o dia 09 de abril de 2002.

Os máximos valores para a razão de mistura de água de nuvem e os horários registrados para os mesmos são dados na tabela 9, na qual se observa crescimento dos valores das razões de mistura conforme aumentam os valores dos parâmetros de forma para as mesmas concentrações consideradas. Via de regra, as razões de mistura também crescem com o aumento das concentrações.

Concentrações $\nu = 2$ v = 6v = 13100 cm⁻³ 0,0057 g/kg (06h) 0,0109 g/kg (07h) 0,0125 g/kg (07h) 200 cm⁻³ 0,0075 g/kg (07h) 0,0118 g/kg (07h) 0,014 g/kg (09h) 300 cm⁻³ 0,0082 g/kg (06h) 0,0127 g/kg (07h) 0,0123 g/kg (07h)

Tabela 9 - Máximo valor da média espacial da razão de mistura de água de nuvem (tempo) - 09/04/2002.

As concentrações de gelo mostram, quase sempre, baixos valores, sendo que o parâmetro de forma igual a 2 registra os valores mais significativos, apresentando maiores quantidades destes hidrometeoros entre 17h e 20h, conforme pode ser visto nas figuras das séries temporais; o máximo valor das médias espaciais para as categorias de gelo em estudo são mostradas nas Tabela 10 e 11 a seguir.

Concentrações	$\nu = 2$	$\nu = 6$	$\nu = 13$
100 cm ⁻³	0,0009 g/kg (20h)	0,0009 g/kg (17h)	0,001 g/kg (18h)
200 cm ⁻³	0,0019 g/kg (17h)	0,0005 g/kg (16h)	0,001 g/kg (20h)
300 cm ⁻³	0,0019 g/kg (18h)	0,0013 g/kg (18h)	0,0001 g/kg (18h)

Tabela 10 - Máximo valor da média espacial para o gelo pesado (tempo) - 09/04/2002.

Tabela 11 - Máximo valor da média espacial para o gelo leve (tempo) - 09/04/2002.

Concentrações	$\nu = 2$	$\nu = 6$	$\nu = 13$
100 cm ⁻³	0,0032 g/kg (19h)	0,0009 g/kg (17h)	0,0005 g/kg (18h)
200 cm ⁻³	0,0072 g/kg (17h)	0,0001 g/kg (16h)	0,0005 g/kg (20h)
300 cm ⁻³	0,0043 g/kg (18h)	0,0038 g/kg (18h)	0,0001 g/kg (18h)

Nota-se também que o aumento do parâmetro de forma da distribuição de gotículas de nuvens, mantendo-se as suas concentrações constantes, ocasiona redução da quantidade de gelo, como pode se visto pelos perfis verticais a seguir (Figura 35):



Figura 35 - Perfis verticais da razão de mistura de granizo, neve e gelo primitivo para o dia 09 de abril de 2002.

5 CONCLUSÃO

Apesar de auxiliar-nos na compreensão de fenômenos como precipitações e formação de nuvens, o modelo RAMS 6.0 não tem seu modulo de microfísica calibrado adequadamente para o estado do Ceará, pelo menos na sua aplicação operacional para previsão de tempo e clima.

O propósito da realização desse trabalho é verificar o comportamento do modelo RAMS 6.0, quando realizadas mudanças no módulo de microfísica de nuvens, com ênfase para o parâmetro de forma da função gama e para a concentração de gotículas de nuvem, afim de representar os fenômenos naturais com a maior fidelidade possível.

A estatística de referência tem como base as observações de dados coletados através das sondas espectométricas pelo avião-laboratório da UECE, durante o EMfiN, realizado em 2002.

As simulações realizadas mostraram que, de fato, quando ajustado com valores diferentes para o parâmetro de forma da função gama e para a concentração de gotículas de nuvem, o modelo apresenta resultados com diferenças significativas.

O parâmetro de forma parece ter maior relevância que as concentrações dentro do processo de auto-conversão, já que os valores das concentrações são muito pequenos e razoavelmente próximos, para todas as simulações.

No entanto, analisando a auto-conversão entre as simulações realizadas, pode-se dizer que o aumento das concentrações parece torná-la menos eficiente, ou seja, o início do processo de auto-conversão se torna mais demorado.

Verifica-se também que o aumento do parâmetro de forma da função gama desfavorece a auto-conversão; quanto maior o parâmetro de forma, mais tarde se inicia o processo de auto-conversão, ocasionando, em contrapartida, o crescimento do condensado total.

Em outras palavras, podemos dizer que a redução do parâmetro de forma da função gama aumenta o tamanho das gotas e provoca o crescimento de água líquida registrado nos gráficos, fator que favorece a auto-conversão. Conclui-se também que os melhores valores a serem usados para configurar o RAMS 6.0, em termos de concentração e parâmetro da forma da função gama da distribuição de gotículas de nuvens, seriam suas respectivas medianas.

Bons resultados para a previsão de tempo podem auxiliar os órgãos públicos e as empresas quando do uso de informações e pesquisas para o desenvolvimento de aspectos econômicos e sociais, tais como, geração de energia, agricultura familiar e mobilização da defesa civil contra enchentes, dentre outras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMAN, A. S., O. B. TOON, J. P. TAYLOR, D. W. JOHNSON, P. V. HOBBS, R. J. FEREK, 2000: Effects of aerosols on cloud albedo: Evaluation of Twomey's parametrization of cloud susceptibility using measurements of ship tracks. J. Atmos. Sci., 57, 2684 – 2695.

ALBRECHT, B., 1989: Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness, Science, 245, 1227 – 1230.

ALKEZWEENY, A. J., D. A. BURROWS, C. A. GRAINGER, 1992: *Measurements of cloud-droplet-size distributions in polluted and unpolluted stratiform clouds. J. Appl. Meteor.*, 32, 106-115.

ARTAXO, P., STORMS, H., BRUYNSEELS, F., VANGRIEKEN, R., AND MAENHAUT, W.: Composition and sources of aerosols from the Amazon Basin, Journal of Geophysical Research (Atmospheres), v. 93 (D2), p. 1605–1615, 1988.

ARTAXO, P., MAENHAUT, W., STORMS, H., AND VANGRIEKEN, R.: Aerosol characteristics and sources for the Amazon Basin during the wet season, Journal of Geophysical Research (Atmospheres), v. 95 (D10), p. 16 971– 16 985, 1990.

ARTAXO, P., MARTINS, J. V., YAMASOE, M. A., PROCOPIO, A. S., PAULIQUEVIS, T. M., ANDREAE, M. O., GUYON, P., GATTI, L. V., AND LEAL, A. M. C.: *Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry seasons in Rondonia, Amazonia, Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, v. 107, 8081, doi: 10.1029/2001JD000666, 2002.

BERRY, E.X. and REINHARDT, R.L., 1974. An analysis of cloud drop growth by collection: Part IV. A New Parametrization. J. Atmos. Sci., 31: 2127-2135.

BREÓN, F.-M.: *How Do Aerosols Affect Cloudiness and Climate? Science*, v. 313. p. 623 – 624, 2006.

CAMELO, H. N. Estudo Numérico do Vento Aracati para Caracterização de seu Potencial Eólico, Ceará, Fortaleza, 2007.

CHEN, C.; COTTON, W. R. A one-dimensional simulation of the stratocumuluscapped mixed layer. Boundary-Layer Meteorology, v.25, n.3, p. 289-321, 1983. COELHO, A.A., de OLIVEIRA, C.J., BRENGUIER, J.L., SAMPAIO, A.J.C., de OLIVEIRA, J.C.P., 1998. A preliminary analysis of the effects of Northeast Brazilian CCN on clouds microstructure. In: Proceedings of the MAS Conference on Cloud Physics.

COSTA, A. A., C. J. DE OLIVEIRA, J.C.P. DE OLIVEIRA, A. J. C. SAMPAIO: *Microphysical Observations of Warm Cumulus Clouds in Ceará, Brazil. Atmospheric Research*, v. 54, 167-199, 2000.

COSTA, A. A., OLIVEIRA, J. C. P., OLIVEIRA, C. J., MACHADO, L. A. T., PINHEIRO, F. G. M., SILVA, E. M., MONCUNILL, D. F., TEIXEIRA, R. F. B. Experimento de Microfísica de Nuvens, Ceará, Fortaleza, 2004.

COSTA, A. A.; Apostila de Modelagem Atmosférica. Fortaleza: Edição independente, 2003.

COSTA, A. A.; Relatório do Experimento de Microfísica de Nuvens. Fortaleza, 2004.

COTTON, W. et al., RAMS 2001: Current status and future directions. *Meteorology and Atmospheric Physics, Springer*, 2003.

FLATAU, P.J., TRIPOLI, G.J., VERLINDE, J. and COTTON, W.R., 1989. The CSU-RAMS *Cloud Microphysical Module: General Theory and Code Documentation. Colorado State Univ., Dep. Atmos. Sci., Fort Collins*, Colorado 80523. Atmos. Sci. Pap., 451,88 pp.

FEINGOLD, G., R. L. WALKO, B. STEVENS, W. R. COTTON: Simulations of marine stratocumulus using a new microphysical parameterization scheme. *Atmospheric Research*, v. 47-48, p. 505-528, 1998.

FERRIER, B. S.: A double-moment multiple-phase fourclass bulk ice scheme. Part I: Description. Journal of the Atmospheric Sciences, v.51, p. 249-280, 1994.

FORSTER, P., V. RAMASWAMY, P. ARTAXO, T. BERNTSEN, R. BETTS, D.W. FAHEY, J. HAYWOOD, J. LEAN, D.C. LOWE, G. MYHRE, J. NGANGA, R. PRINN,G. RAGA, M. SCHULZ and R. VAN DORLAND, 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007:The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [SOLOMONS, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M.TIGNOR and H.L. MILLER (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. GOTZ, G.; MÉSZAROS E. ; VALI G. Atmospheric Particles and Nuclei, Akademiai Kiado, Budapest, 1991.

GRIMM A. M. Meteorologia Básica – notas de aula – 1999 [on line]. 1999. < http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/index.html> Acesso em 15/10/2008.

HANSEN, J. E., M. SATO, R. RUEDY, 1997: *Radiative forcing and climate response. J. Geophys.* Res., 102, 6831 – 6864.

HARRINGTON, J.L., COTTON, W.R., MEYERS, M.P. and Walko, R.L., 1995. Parameterization of ice crystal conversion processes due to vapor deposition for mesoscale models using double moment basis functions. Basic formulation and parcel model results. J. Atmos. Sci., accepted.

HARRINGTON, J. Y. The effects of radiative and microphysical processes on simulated warm and transition season arctic stratus. (Tese). Colorado States University, Fort Collins, EUA, 1997. 289 p.

HOBBS, P. V., H. HARRISON, E. ROBINSON, 1974: Atmospheric effects of pollutants. Science, 183, 909 – 915.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. .<HTTP://www.inmet.gov.br/html/informacoes/glossario/glossario.html. Acesso em 01/10/2008

KALNAY, E., M. KANAMITSU, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bulletin of the American Meteorological Society, v.77, n.3, 1996.

KAUFMAN, Y. J., P. V. HOBBS, V. W. J. H. KIRCHOFF, P. ARTAXO, L. A. REMER, B. N HOLBEN, M. D. KING, D. E. WARD, E. M. PRINCE, K. M. LONGO, L. F. MATTOS, C. A. NOBRE, J. D. SPINHIRNE, Q. JI, A. M. THOMPSON, J. F. GLASON, S. A. CHRISTOPHER, S. C. TSAY: *Smoke, clouds and radiation – Brazil (SCAR-B) experiment. Journal of Geophysical Research*, v. 103, p. 31783-31808, 1998.

KAUFMAN, Y. J., KOREN, I.: Smoke and pollution aerosol effect on cloud cover. Science, v. 313, p. 655-658, 2006.

KOREN, I., Y. J. KAUFMAN, L. A. REMER, J. V. MARTINS, 2004: *Measurements of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation. Science*, 303, 1342-1345.

KUO, H. L. Further Studies of Parameterization of Influence of Cumulus Convection on Large-Scale Flow. Journal of the Atmospheric Sciences, v.31,

n.5, p.1232-1240. 1974.

LIU, Y., YOU, L., YANG, W., LIU, F., 1995. On the size distribution of cloud droplets. Atmos. Res. 35, 201–216.

LOHMANN, U., 2002: Possible aerosol effects on ice clouds via contact nucleation. J. Atmos. Sci., 59, 647-656.

LOHMANN, U., FEICHTER J. Global indirect aerosol effects: a review, Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 5, p. 715-737, 2005.

MAHRER, Y.; PIELKE, R. A numerical study of the airflow over irregular terrain. Beiträge zur Physik der Atmosphäre, v.50, n. 1, p 98 – 113, 1977.

MARTINS, R. C. G. Correção da Atenuação do Sinal do Radar Meteorologico DWSR-92X Devido a Coincidência de Nuvens de Chuva, 2004.

MESINGER, F.; ARAKAWA, A. Numerical methods used in atmospheric models, volume 1. Global Atmospheric Research Program World Meteorological Organization, Geneva (Switzerland). 1976.

MEYERS, M. P., R. L. WALKO, J. Y. HARRINGTON, W. R. COTTON: New RAMS cloud microphysics parameterization. Part II: The two-moment scheme. Atmospheric Research, v. 45, p. 3-39, 1997.

OLIVEIRA, C.J., COSTA, A.A., SAMPAIO, A.J.C., de OLIVEIRA, J.C.P., 1996. Climatology and microphysical characteristics of cumulus clouds of Ceará State in the Northeast region of Brazil. In: Proceedings of the 12th International Conference on Clouds and Precipitation, Zurich 2 pp. 975–977.

PAULIQUEVIS, T., L. L. LARA, M. L. ANTUNES, AND P. ARTAXO, Aerosol and precipitation chemistry in a remote site in Central Amazonia: the role of biogenic contribution, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 7, 1–45, 2007.

PIELKE, R. A. Mesoscale Meteorological Modeling. San Diego: Academic Press. 2002.

PRUPPACHER, H. R., J. D. KLETT, 1997: *Microphysics of clouds and Precipitation. Kluwer Academic Publishers*, 954 pp.

PRUPPACHER, H.R. and Klett, J.D., 1978. *Microphysics of Clouds and Precipitation. Reidel, Boston*, 714 pp.

LIEPERT, B. G., 2002: Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990. Geophys. Res. Lett., 29, 1421, 10.1029/2002GL014910.

RAMANATHAN, V., P. J. CRUTZEN, J. T. KIEHL, D. ROSENFELD, 2001: *Aerosols, climate, and the hydrological cycle. Science*, 294, 2119-2124.

ROSENFELD, D., 1999: TRMM observed first direct evidence os smoke from Forest fires inhibiting rainfall, Geophys. Res. Lett., 26, 3105-3108.

ROSENFELD, D., 2000: Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution, Science, 287, 1793-1796.

ROSENFELD, D., W. L. WOODLEY, 2000: Convective clouds with sustained highly supercooled liquid water down to -34,5°C. *Nature*, 405, 440-442.

SANTIAGO DE MARIA, P. H. Modelagem numérica em alta resolução para previsão de geração de Energia Eólica no Ceará. (Dissertação de mestrado). Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2007.

SANTIN, M. M. Operacionalização do modelo BRAMS aplicado à previsão do tempo, agricultura e pesquisa, Pelotas, Rio Grande do Sul, 2006.

SCHLAMP, R. J., H. R. PRUPPACHER, A. E. HAMIELEC, 1975: A numerical investigation of the efficiency with thich simple columnar ice crystals collide with supercooled water drops. J. Atmos. Sci., 32, 2330-2337.

SOUZA, R. M. Previsão da Atenuação por Chuvas Através de uma Modelagem Semi-Empírica Consistente para Enlaces Rádio Terrestre e Via Satélite, Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2006.

SQUIRES, K., 1958: The microstructure and coloidal stability of warm clouds. *Tellus*, 10, 256-261.

STULL, R. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. [S.I.]: KLUWER ACADEMIC PUBL, 1988.

TWOMEY, S., 1974: Pollution and planetary albedo. Atmos. Environ., 8, 1251-1256.

VERLINDE, J., P.J. Flatau, and W.R. Cotton, 1990: Analytical solutions to the collection growth equation: Comparison with approximate methods and application to cloud microphysics parameterization schemes. J. Atmos. Sci., 47, 2871-2880.

VIANELLO, R. L., Alves, A. R., Meteorologia Básica e Aplicações, Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária Viçosa- Minas Gerais, 1991. VITOUSEK, P. M., MOONEY, H.A., LUBCHENCO, J., MELILLO, J. M.: *Human domination of Earth's ecosystem. Science*, v. 277, p. 494-499, 1997.

WALKO, R. et al. New RAMS cloud microphysics parameterization Part I: the single-moment cheme. Atmospheric Research, Elsevier Science, v. 38, n. 1, p. 29–62, 1995.

WALKO, R. L.; TREMBACK, C. J. RAMS: *The Regional Atmospheric Modeling System, Technical Description.* [S.I.], 2001.

WGASF, Intercomparison and validation of ocean-atmosphere energy flux fields. Working Group on Air-Sea fluxes, 2000.

WARNER, J., S. TWOMEY, 1967: The production of cloud nuclei by cane fires the effect on cloud droplet concentration. J. Atmos. Sci., 24, 704-706.

WIELICKI, B. A., WONG, T., LOEB, N., MINNIS, P., PRIESTLEY, K., KANDEL, R.: *Changes in Earth's Albedo Measured by Satellite. Science.* v. 308, p. 825, 2005.

ZIKMUNDA, J., G. VALI, 1972: Fall patterns and fall velocities of rimed ice crystals. J. Atmos. Sci., 29, 1334-1347.

APÊNDICES

Classes	Parâmetro de forma	Frequência	Percentual	Classes	Parâmetro de forma	Frequência	Percentual
0 1	0,5	1	0,36%	26 -27	26,0	2	0,72%
1 2	1.5	0	0,00%	27 -28	27,0	7	2,52%
2 3	2.6	3	1,08%	28 29	28,1	7	2,52%
3 4	3.6	11	3,96%	29 30	29,1	5	1,80%
4 5	4,6	19	6,83%	30	30,1	3	1,08%
5 — 6	5,6	24	8,63%	31	31,1	4	1,44%
6 7	6,6	8	2,88%	32	32,1	4	1,44%
7 — 8	7,7	5	1,80%	33 34	33,2	2	0,72%
8 — 9	8,7	12	4,32%	34 35	34,2	4	1,44%
9 — 10	9,7	4	1,44%	35 -36	35,2	3	1,08%
10 — 11	10,7	10	3,60%	36 37	36,2	1	0,36%
11 — 12	11,7	9	3,24%	37	37,2	1	0,36%
12	12,8	9	3,24%	38	38,3	1	0,36%
13	13,8	14	5,04%	39 -40	39,3	0	0,00%
14 — 15	14,8	18	6,47%	40	40,3	1	0,36%
15 - 16	15,8	11	3,96%	41	41,3	1	0,36%
16 17	16,8	9	3,24%	42	42,3	2	0,72%
17	17,9	10	3,60%	43	43,4	0	0,00%
18 — 19	18,9	3	1,08%	44	44,4	2	0,72%
19 20	19,9	6	2,16%	45 -46	45,4	2	0,72%
20 -21	20,9	10	3,60%	46	46,4	2	0,72%
21 22	21,9	8	2,88%	47	47,4	0	0,00%
22 -23	23,0	10	3,60%	48	48,5	0	0,00%
23 -24	24,0	4	1,44%	49 50	49,5	2	0,72%
24 -26	25,0	2	0,72%	50 51	50,5	2	0,72%
26 - 27	26,0	2	0,72%	TOTAL		278	100%

Tabela 12 - Frequência para o parâmetro da Função Gama para o voo do dia 02/04/2002.

Classes	Parâmetro de forma	Frequência	Percentual	Classes	Parâmetro de forma	Frequência	Percentual
0 — 1	0,5	1	0,15%	26 -27	26,0	7	1,07%
1 2	1.5	2	0,31%	27 -28	27,0	8	1,23%
2 3	2.6	2	0,31%	28	28,1	4	0,61%
3 4	3.6	13	1,99%	29	29,1	8	1,23%
4 — 5	4,6	46	7,04%	30	30,1	6	0,92%
5 — 6	5,6	57	8,73%	31	31,1	7	1,07%
6 — 7	6,6	74	11,33%	32	32,1	3	0,46%
7 — 8	7,7	52	7,96%	33 34	33,2	2	0,31%
8 — 9	8,7	35	5,36%	34 35	34,2	2	0,31%
9 — 10	9,7	33	5,05%	35 -36	35,2	3	0,46%
10	10,7	28	4,29%	36 - 37	36,2	5	0,77%
11 – 12	11,7	29	4,44%	37 - 38	37,2	0	0,00%
12 — 13	12,8	33	5,05%	38	38,3	1	0,15%
13 — 14	13,8	23	3,52%	39	39,3	2	0,31%
14 — 15	14,8	15	2,30%	40	40,3	2	0,31%
15 — 16	15,8	27	4,13%	41 42	41,3	2	0,31%
16 — 17	16,8	8	1,23%	42 -43	42,3	2	0,31%
17 — 18	17,9	14	2,14%	43	43,4	0	0,00%
18 — 19	18,9	8	1,23%	44	44,4	1	0,15%
19 20	19,9	14	2,14%	45 -46	45,4	3	0,46%
20 21	20,9	13	1,99%	46 -47	46,4	0	0,00%
21 — 22	21,9	8	1,23%	47 — 48	47,4	2	0,31%
22 — 23	23,0	13	1,99%	48 — 49	48,5	0	0,00%
23 — 24	24,0	4	0,61%	49 — 50	49,5	3	0,46%
24 – 26	25,0	13	1,99%	50 - 51	50,5	15	2,30%
•				TOTAL		653	100%

Tabela 13 - Frequência para o parâmetro da Função Gama para o voo do dia 04/04/2002.

Classes	Parâmetro de forma	Frequência	Percentual	Classes	Parâmetro de forma	Frequência	Percentual
0 1	0,5	1	0,15%	29	29,1	10	1,54%
1 2	1.5	0	0,00%	30	30,1	10	1,54%
2 3	2.6	2	0,31%	31	31,1	4	0,62%
3 4	3.6	7	1,08%	32	32,1	1	0,15%
4 5	4,6	12	1,85%	33 34	33,2	2	0,31%
5 -6	5,6	36	5,55%	34 35	34,2	1	0,15%
6 7	6,6	61	9,40%	35 -36	35,2	4	0,62%
7 8	7,7	35	5,39%	36 -37	36,2	1	0,15%
8 — 9	8,7	27	4,16%	37	37,2	3	0,46%
9 10	9,7	25	3,85%	38 39	38,3	2	0,31%
10	10,7	40	6,16%	39	39,3	2	0,31%
11	11,7	24	3,70%	40	40,3	1	0,15%
12	12,8	31	4,78%	41	41,3	1	0,15%
13 14	13,8	46	7,09%	42	42,3	0	0,00%
14 — 15	14,8	38	5,86%	43	43,4	2	0,31%
15 - 16	15,8	33	5,08%	44 45	44,4	1	0,15%
16 17	16,8	33	5,08%	45 -46	45,4	0	0,00%
17 — 18	17,9	27	4,16%	46 -47	46,4	0	0,00%
18 19	18,9	23	3,54%	47	47,4	0	0,00%
19 20	19,9	18	2,77%	48	48,5	0	0,00%
20 -21	20,9	12	1,85%	49 50	49,5	0	0,00%
21 -22	21,9	15	2,31%	50 51	50,5	3	0,46%
22 -23	23,0	11	1,69%	TOTAL		649	100%
23 -24	24,0	14	2,16%				
24 26	25,0	10	1,54%				
26 -27	26,0	5	0,77%				
27 -28	27,0	8	1,23%				
28 -29	28,1	7	1,08%				

Tabela 14 - Frequência para o parâmetro da Função Gama para o voo do dia 05/04/2002.

Classes	Parâmetro de forma	Frequência	Percentual	Classes	Parâmetro de forma	Frequência	Percentual
		-					
0 1	0,5	1	0,55%	26 -27	26,5	1	0,55
1 2	1.5	12	6,56	27 28	27,5	0	0,00
2 - 3	2.5	8	4,37	28 29	28,5	0	0,00
3 – 4	3.5	7	3,83	29 30	29,5	0	0,00
4 -5	4,5	6	3,28	30 31	30,5	0	0,00
5 -6	5,5	15	8,20	31 - 32	31,5	0	0,00
6 -7	6,5	45	24,59	32 33	32,5	0	0,00
7 8	7,5	26	14,21	33 34	33,5	0	0,00
8 9	8,5	7	3,83	34	34,5	0	0,00
9	9,5	9	4,92	35 36	35,5	0	0,00
10	10,5	4	2,19	36 37	36,5	0	0,00
11 - 12	11,5	4	2,19	37 - 38	37,5	1	0,55
12	12,5	6	3,28	TOTAL		183	100%
13 - 14	13,5	1	0,55				
14 - 15	14,5	2	1,09				
15 - 16	15,5	4	2,19				
16 17	16,5	4	2,19				
17 — 18	17,5	5	2,73				
18 — 19	18,5	0	0,00				
19 20	19,5	1	0,55				
20 - 21	20,5	2	1,09				
21 22	21,5	2	1,09				
22 -23	22,5	4	2,19				
23 -24	23,5	2	1,09				
24 25	24,5	2	1,09				
25 -26	25,5	2	1,09				

Tabela 15 - Frequência para o parâmetro da Função Gama para o voo do dia 08/04/2002.

Classes	Parâmetro de forma	Frequência	Percentual	Classes	Parâmetro de forma	Frequência	Percentual
0 1	0.5	1	0.100/	261 27	20.0	10	1.200/
0 1	0,5	1	0,10%	26 -27	26,0	13	1,36%
1 — 2	1.5	3	0,31%	27 —28	27,0	19	1,99%
2 — 3	2.6	12	1,26%	28 — 29	28,1	11	1,15%
3 4	3.6	18	1,88%	29 30	29,1	8	0,84%
4 — 5	4,6	30	3,14%	30	30,1	9	0,94%
5 — 6	5,6	43	4,50%	31	31,1	5	0,52%
6 —7	6,6	63	6,60%	32	32,1	3	0,31%
7 — 8	7,7	52	5,45%	33 34	33,2	2	0,21%
8 — 9	8,7	64	6,70%	34 35	34,2	4	0,42%
9 — 10	9,7	55	5,76%	35 — 36	35,2	6	0,63%
10 — 11	10,7	69	7,23%	36 37	36,2	5	0,52%
11 — 12	11,7	56	5,86%	37 — 38	37,2	5	0,52%
12 — 13	12,8	61	6,39%	38 — 39	38,3	3	0,31%
13 — 14	13,8	50	5,24%	39 — 40	39,3	2	0,21%
14 — 15	14,8	40	4,19%	40	40,3	4	0,42%
15 — 16	15,8	32	3,35%	41 42	41,3	0	0,00%
16 — 17	16,8	42	4,40%	42	42,3	4	0,42%
17 — 18	17,9	29	3,04%	43	43,4	1	0,10%
18 — 19	18,9	20	2,09%	44 45	44,4	3	0,31%
19 — 20	19,9	11	1,15%	45 — 46	45,4	0	0,00%
20 21	20,9	21	2,20%	46 47	46,4	1	0,10%
21 22	21,9	20	2,09%	47 — 48	47,4	1	0,10%
22 23	23,0	15	1,57%	48 — 49	48,5	0	0,00%
23 24	24,0	19	1,99%	49 50	49,5	0	0,00%
24 26	25,0	16	1,68%	50 — 51	50,5	4	0,42%
				TOTAL		955	100%
							-

Tabela 16 - Frequência para o parâmetro da Função Gama para o voo do dia 09/04/2002-1.

Classes	Parâmetro de forma	Frequência	Percentual	Classes	Parâmetro de forma	Frequência	Percentual
0,0 1,0	0,5	1	0,10%	29 — 30	29,1	8	0,84%
1 2,0	1.5	3	0,31%	30 — 31	30,1	9	0,94%
2 — 3,1	2.6	12	1,26%	31 32	31,1	5	0,52%
3 4,1	3.6	18	1,88%	32	32,1	3	0,31%
4 — 5,1	4,6	30	3,14%	33 — 34	33,2	2	0,21%
5 — 6,1	5,6	43	4,50%	34 — 35	34,2	4	0,42%
6 — 7,1	6,6	63	6,60%	35 — 36	35,2	6	0,63%
7 — 8,2	7,7	52	5,45%	36 37	36,2	5	0,52%
8 — 9,2	8,7	64	6,70%	37 — 38	37,2	5	0,52%
9 — 10,2	9,7	55	5,76%	38 — 39	38,3	3	0,31%
10 — 11,2	10,7	69	7,23%	39 — 40	39,3	2	0,21%
11 — 12,2	11,7	56	5,86%	40	40,3	4	0,42%
12 — 13,3	12,8	61	6,39%	41 — 42	41,3	0	0,00%
13 — 14,3	13,8	50	5,24%	42	42,3	4	0,42%
14 — 15,3	14,8	40	4,19%	43	43,4	1	0,10%
15 — 16,3	15,8	32	3,35%	44 — 45	44,4	3	0,31%
16 — 17,3	16,8	42	4,40%	45 — 46	45,4	0	0,00%
17 — 18,4	17,9	29	3,04%	46 — 47	46,4	1	0,10%
18 — 19,4	18,9	20	2,09%	47 — 48	47,4	1	0,10%
19 — 20,4	19,9	11	1,15%	48 — 49	48,5	0	0,00%
20 -21,4	20,9	21	2,20%	49 — 50	49,5	0	0,00%
21 22,4	21,9	20	2,09%	50 — 51	50,5	4	0,42%
22 23	23,0	15	1,57%	TOTAL		955	100%
23 — 24	24,0	19	1,99%				
24 — 26	25,0	16	1,68%				
26 27	26,0	13	1,36%				
27 — 28	27,0	19	1,99%				
28 — 29	28,1	11	1,15%				

Tabela 17 - Frequência para o parâmetro da Função Gama para o voo do dia 09/04/2002-2.

Livros Grátis

(<u>http://www.livrosgratis.com.br</u>)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração Baixar livros de Agronomia Baixar livros de Arquitetura Baixar livros de Artes Baixar livros de Astronomia Baixar livros de Biologia Geral Baixar livros de Ciência da Computação Baixar livros de Ciência da Informação Baixar livros de Ciência Política Baixar livros de Ciências da Saúde Baixar livros de Comunicação Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE Baixar livros de Defesa civil Baixar livros de Direito Baixar livros de Direitos humanos Baixar livros de Economia Baixar livros de Economia Doméstica Baixar livros de Educação Baixar livros de Educação - Trânsito Baixar livros de Educação Física Baixar livros de Engenharia Aeroespacial Baixar livros de Farmácia Baixar livros de Filosofia Baixar livros de Física Baixar livros de Geociências Baixar livros de Geografia Baixar livros de História Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura Baixar livros de Literatura de Cordel Baixar livros de Literatura Infantil Baixar livros de Matemática Baixar livros de Medicina Baixar livros de Medicina Veterinária Baixar livros de Meio Ambiente Baixar livros de Meteorologia Baixar Monografias e TCC Baixar livros Multidisciplinar Baixar livros de Música Baixar livros de Psicologia Baixar livros de Química Baixar livros de Saúde Coletiva Baixar livros de Servico Social Baixar livros de Sociologia Baixar livros de Teologia Baixar livros de Trabalho Baixar livros de Turismo