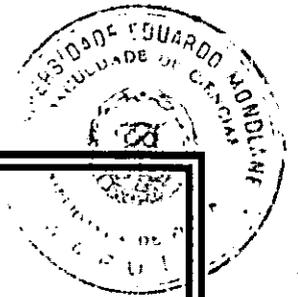


F28 64



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

Trabalho de Licenciatura

**APLICAÇÃO DO MODELO REGIONAL DE MESOSCALA  
MM5 NO ESTUDO DO CICLONE TROPICAL HUDAH DE  
ABRIL DE 2000**

**Autor: Romualdo José Romão Brito**

**Supervisor: Manuel S. V. F. Pondeca, Ph. D.**

**Maputo, Outubro de 2003**

APLICAÇÃO DO MODELO REGIONAL  
DE MESOSCALA MM5 NO ESTUDO DO  
CICLONE TROPICAL HUDAH DE ABRIL  
DE 2000

ROMUALDO JOSÉ ROMÃO BRITO

7 de Outubro de 2003

# Declaração de Honra

Declaro que o presente trabalho foi realizado com base no material a que ao longo do mesmo se faz referência. E que não foi submetido para outro grau que não seja o indicado - **Licenciatura em Meteorologia**, da Universidade Eduardo Mondlane.

As ideias originais nele expressas, são da inteira responsabilidade do autor.

Maputo, 7 de Outubro de 2003

O Autor

.....  
(Romualdo José Romão Brito)

À memória do meu pai António  
À minha mãe Luísa  
e aos meus filhos Gizela e António

# Agradecimentos

- Agradeço em primeiro lugar a Deus, pela minha vida e oportunidade de realizar esta licenciatura.
- Agradeço ao meu supervisor Professor Manuel Pondeca pela orientação científica, a dedicação, apoio e empenho incansáveis em todo o trabalho realizado.
- Agradeço a todo o corpo docente do Departamento de Física em especial ao dr. Genito, dr. A. Queface, dr. Hermínio Tembe, Dr. Chernych, Dr. Burdeyn, Dr. Mapossa, Dr. Akil, Dr. Rakov, dr. Ibraimo, Dr. Utui, dr. Mavume, dr. Saíde, pelos conhecimentos adquiridos ao longo do curso.
- Agradeço a todos os funcionários do Departamento por toda gentileza e amabilidade prestada ao longo destes anos.
- Agradeço aos colegas Rego, Duvane, Sawanguane, C. Paulo, C. Jamal, Queba, Anela, Quissico, Mazuze, Buchir, Basílio pelo companherismo e amizade que nos norteou ao longo deste curso.
- Agradeço ao colega e amigo H. Cardoso pela colaboração incansável prestada na realização deste trabalho.
- Agradeço a toda minha família em especial a minha mãe Luísa, aos meus irmãos Gilberta, Leonel (postumamente) e António pelo apoio moral dado ao longo deste curso.

- Agradeço a minha esposa Haúa e filhos Gizela e António e ao meu sobrinho Leonelito, aos quais espero retribuir o tempo dedicado a este trabalho.
- Agradeço ao Dr. Filipe Lúcio, director do INAM e por seu intermédio a todos os funcionários desta instituição pelas facilidades prestadas ao longo do curso.
- Agradeço ao professor Macia, e por seu intermédio a todos os funcionários da EICMW de Tete, pelo apoio moral e material prestados ao longo destes anos.
- Agradeço a todos que directa e indirectamente me apoiaram quer moral ou materialmente de forma que este trabalho hoje seja uma realidade.

Muito obrigado!

## Resumo

A previsão numérica do tempo centra-se na descrição de fenómenos físicos da atmosfera com base em equações matemáticas, resolvendo-as de modo a prognosticar o estado futuro da atmosfera.

Os modelos de previsão numérica do tempo, podem ser divididos, de acordo com a sua área de abrangência, em modelos regionais e globais.

Os modelos globais são utilizados não somente para previsão atmosférica, mas também para estudos climáticos de escala global. Como exemplos destes modelos, temos o modelo global do NCEP e do ECMWF. Por sua vez, os modelos regionais trabalham sobre uma área geográfica menor, podem trabalhar com uma resolução maior, o que permite levar em conta factores locais como a topografia e a hidrografia. Existem vários modelos regionais (limited area models), sendo os mais usados o MM5, ETA, WRF, HIRLAM e o RAMS.

Neste trabalho é feita a simulação do ciclone Hudah (à posterior) usando o modelo MM5. Faz-se uma abordagem sobre as partes que compõe o modelo, as suas opções físicas e resolução horizontal e dá-se uma particular atenção ao estudo da sensibilidade do modelo às parametrizações físicas. As parametrizações são escolhidas de acordo com os resultados apresentados nos diferentes estudos analisados.

Faz uma análise comparativa dos resultados do modelo MM5 e os dados observados pelo INAM durante os cinco dias de integração. Os resultados produzidos estão em concordância com as observações, o que valida o modelo MM5 na previsão de ciclones.

## Lista de símbolos

$c_p$  - capacidade molar a pressão constante

$D_u, D_v, D_w$  - termos de velocidade turbulentos

$D_\theta$  - fluxo de calor turbulento

$e$  - parâmetro horizontal de coriolis ( $\equiv 2\Omega \cos \lambda$ )

$f$  - parâmetro vertical de coriolis ( $\equiv 2\Omega \sin \lambda$ )

$g$  - aceleração de gravidade

$m$  - factor de escala da rede

$P$  - pressão total

$P_0$  - pressão no estado de referência

$P'$  - perturbação da pressão

$P^* \equiv p_s - p_t$ , diferença entre as pressões na superfície e no topo da atmosfera

$\dot{Q} \equiv \frac{dq}{dt}$ , taxa de aquecimento devido aos processos diabáticos como o calor radiativo e latente

$R_d$  - Constante dos gases para 1kg de ar seco.

$r_t$  - raio da terra

$t$  - tempo

$T$  - temperatura

$T_0$  - temperatura no estado de referência

$T'$  - perturbação da temperatura

$u$  - componente zonal da velocidade

$v$  - componente meridional da velocidade

$\mathbf{V}$  - vector da velocidade horizontal

$w$  - componente vertical da velocidade

---

$\alpha \equiv \Phi - \Phi_c$ , diferença entre a longitude local e longitude central

$\gamma \equiv \frac{c_p}{c_v}$ , razão entre a capacidade molar a pressão constante e a capacidade molar a volume constante

$\Theta_0$  - temperatura potencial no estado de referência

$\lambda$  - latitude do lugar

$\rho$  - densidade do ar

$\rho_0$  - densidade no estado de referência

$\rho'$  - perturbação da densidade do ar

$\sigma \equiv \frac{p}{p_s}$ , coordenada vertical no sistema  $\sigma$

$\dot{\sigma} \equiv \frac{d\sigma}{dt}$ , velocidade vertical em coordenada  $\sigma$

$\Phi$  - longitude local

$\Phi_c$  - longitude central

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação e Contexto . . . . .	1
1.2	Objectivos . . . . .	2
1.3	Metodologia . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Ciclones tropicais</b>	<b>4</b>
2.1	Descrição dos ciclones tropicais . . . . .	4
2.2	Condições para a formação de ciclones tropicais . . . . .	6
2.3	Ciclone Tropical Hudah . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Breve descrição do MM5</b>	<b>9</b>
3.1	O programa TERRAIN . . . . .	10
3.2	O programa REGRID . . . . .	11
3.3	O programa LITTLE-R . . . . .	11
3.4	O programa INTERPF . . . . .	12
3.5	O programa MM5 . . . . .	13
3.6	As equações do modelo MM5 . . . . .	13
3.6.1	A coordenada vertical sigma . . . . .	13
3.7	Parametrizações físicas do modelo . . . . .	17

## CONTEÚDO

ix

3.7.1	Parametrização de Cumulus . . . . .	17
3.7.2	Modelos explícitos . . . . .	20
3.7.3	Superfície e Camada Limite . . . . .	21
3.7.4	Radiação . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Discussão dos Resultados</b>	<b>27</b>
4.1	Análise da configuração usada nas simulações . . . . .	27
4.1.1	Simulação de controlo. Evolução do ciclone Hudah no Canal de Moçambique . . . . .	28
4.1.2	Análise da configuração I . . . . .	29
4.1.3	Análise do desempenho da configuração I . . . . .	29
4.1.4	Análise da configuração II . . . . .	34
4.1.5	Análise do desempenho da configuração II . . . . .	34
4.1.6	Comparação dos campos de diferença entre as configurações I (de controlo) e a configuração II (em estudo) . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Conclusões e Recomendações</b>	<b>40</b>
5.1	Conclusões . . . . .	40
5.2	Recomendações . . . . .	41
<b>A</b>	<b>Cálculo de erros</b>	<b>i</b>
<b>B</b>	<b>Mapas de pressão ao nível do mar</b>	<b>ii</b>
<b>C</b>	<b>Mapas de temperatura superficial</b>	<b>viii</b>
<b>D</b>	<b>Mapas diários de precipitação e ventos à 925 hPa</b>	<b>x</b>

## CONTEÚDO

---

x

- E Mapas de campos de diferença da pressão ao nível médio do mar xiii
- F Mapas de campos de diferença da temperatura superficial xv
- G Mapas de campos de diferença da humidade relativa xvii
- H Mapas de campos de diferença da precipitação acumulada xix

## Lista de Figuras

2.1	Constituição de um ciclone tropical . . . . .	5
2.2	Trajectória do ciclone Hudah do dia 23 de Março à 8 de Abril . . . . .	8
3.1	Esquema representativo do modelo MM5 . . . . .	9
3.2	Esquema representativo da estrutura vertical do modelo . . . . .	14
B.1	Pressão no dia 4 de Abril de 2000 . . . . .	iii
B.2	Pressão no dia 5 de Abril de 2000 . . . . .	iv
B.3	Pressão no dia 6 de Abril de 2000 . . . . .	v
B.4	Pressão no dia 7 de Abril de 2000 . . . . .	vi
B.5	Pressão no dia 8 de Abril de 2000 . . . . .	vii
C.1	Temperatura superficial no dia 3 de Abril de 2000 . . . . .	ix
D.1	Precipitação e ventos no dia 7 de Abril de 2000 . . . . .	xi
D.2	Precipitação e ventos no dia 8 de Abril de 2000 . . . . .	xii
E.1	Campos de diferença da Pressão . . . . .	xiv
F.1	Campos de diferença da Temperatura superficial . . . . .	xvi
G.1	Campos de diferença da Humidade relativa . . . . .	xviii

H.1 Campos de diferença da Precipitação acumulada . . . . . xx

## Lista de Tabelas

4.1	Definição da configuração I usada nas simulações. . . . .	29
4.2	Pressão diária registada para configuração I e INAM (em <i>hPa</i> )	30
4.3	Temperatura diária registada para configuração I e INAM (em °C) . . . . .	31
4.4	Humidade Relativa à 925 hPa para a configuração I e INAM (em %) . . . . .	32
4.5	Magnitude do Vento à 925 hPa para a configuração I e INAM (em <i>m/s</i> ) . . . . .	33
4.6	Precipitação acumulada para a configuração I e INAM (em <i>mm</i> )	33
4.7	Definição da configuração II usada nas simulações. . . . .	34
4.8	Pressão diária registada para configuração II e INAM (em <i>hPa</i> )	35
4.9	Temperatura diária registada para a configuração II e INAM (em °C) . . . . .	36
4.10	Humidade Relativa à 925 hPa para a configuração II e INAM (em %) . . . . .	37
4.11	Magnitude de Vento à 925 hPa para a configuração II e INAM (em <i>m/s</i> ) . . . . .	37
4.12	Precipitação acumulada para a configuração II e INAM (em <i>mm</i> ) . . . . .	38

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação e Contexto

Devido a sua localização, Moçambique é um país vulnerável à ciclones tropicais.

Os ciclones tropicais podem atingir ou até formar-se no Canal de Moçambique, dependendo das condições atmosféricas. Os ciclones formados no Canal de Moçambique são menos intensos que os de origem a Este do Oceano Índico, pois estes transportam mais humidade (Mussa Mustafa, 2000, comunicação pessoal).

As regiões que mais sofrem os efeitos devastadores dos ciclones no nosso país são as zonas costeiras. Ciclones tropicais como o Demoína em Janeiro de 1984, ciclone Nádia em 1994, ciclone Eline em 2000 e Hudah em 2000 no Norte do país, são inesquecíveis devido ao rasto de destruição.

Para além da destruição de infra-estruturas, os ciclones estão associados à enorme precipitação que pode causar cheias. Por outro lado, a água por eles trazida pode ser benéfica para as reservas hidrológicas e a agricultura.

Para a melhoria da previsão de ciclones tropicais que afectam o nosso país é desejável o uso operacional e investigativo de um modelo de mesoscala. Com o avanço da tecnologia de computação e o advento da Internet, tal já é

possível.

A adopção do modelo MM5, para a previsão em tempo real cumpriria outros objectivos tais como: a previsão de eventos meteorológicos relevantes para a agricultura e a previsão de situações de risco, tais como fogos e cheias.

## 1.2 Objectivos

Com este trabalho pretendemos atingir o objectivo de simular o ciclone Hudah usando o modelo operacional e de investigação MM5, conseqüentemente a visualização dos resultados, sua interpretação e em seguida fazer-se uma validação do modelo numérico usando observações das estações de superfícies fornecidas pelo INAM.

A ênfase do trabalho está no estudo da sensibilidade do modelo em relação à parametrização dos vários processos físicos do modelo.

O modelo de previsão meteorológica usado é o MM5 desenvolvido em conjunto pela Pennsylvania State University e pelo National Center for Atmospheric Research (NCAR) no fim dos anos 70 e está totalmente disponível na Internet. Este modelo é melhorado continuamente desde os anos 70 tem sido validado com bons resultados em diferentes situações (Dudhia, 1993; Cox *et al.*, 1998; Mass *et al.*, 2002; White *et al.*, 1998). Actualmente é usado para a investigação e previsão meteorológica no NCAR e para investigação em muitas universidades como por exemplo a Universidade de Washington, a Universidade do Utah e a Universidade da Pennsylvania. O modelo é também usado na previsão operacional em Taiwan.

## 1.3 Metodologia

Foi feita uma consulta bibliográfica sobre a teoria geral da previsão numérica do tempo, sobre o modelo MM5 e as várias opções de parametrizações físicas das nuvens, da precipitação, da camada limite e da radiação.

As condições iniciais e de fronteira foram fornecidas pelo supervisor.

O computador usado nas simulações feitas neste trabalho foi um Pentium 4.

O sistema operativo usado foi o Red Hat Linux 7.1.

O modelo MM5 correu com três domínios em configuração de "two-way nest", tendo as resoluções horizontais sido de 180, 60 e 20 km. Para este trabalho, os dados foram extraídos da resolução de 20 km e a visualização dos resultados foi feita usando o pacote GrADS.

## Capítulo 2

# Ciclones tropicais

### 2.1 Descrição dos ciclones tropicais

Os ciclones tropicais integram o grupo dos desastres naturais de origem meteorológica. Fazem parte das chamadas tempestades tropicais. Destes, uma em cada dez atinge a velocidade de vento superior a  $118 \text{ km/h}$ , adquirindo o status de ciclone tropical.

Ciclone tropical é o nome genérico para o centro de baixa pressão não-frontal de escala sinóptica sobre as águas tropicais ou sub-tropicais com convecção organizada (por exemplo, tempestades) e intensa circulação ciclônica à superfície.

Em geral, os ciclones movem-se para o Oeste, acompanhando os ventos alísios, porém, frequentemente, rumam para o Norte e se deslocam para Leste nas latitudes médias. Além de ventos, podem causar chuvas fortes, com inundações severas associadas às mesmas.

Um aspecto curioso dos ciclones tropicais é o chamado “olho” (figura 2.1) que se forma quando o ar que se eleva na faixa de tempestades acaba descendo no centro do sistema. O ar descendente cria uma condição de céu claro no centro. Ao redor do “olho” se forma um anel de nuvem tipo cúmulo-nimbo, que deixa uma faixa de 16 a 80 km de ar calmo e céu claro. Durante a passa-

gem de um ciclone, quando o “olho” atinge uma dada região, pela condição de calmaria, fica a impressão de que o pior já passou. Puro engano, apenas a metade da tempestade passou, a outra metade chegará algumas horas depois. O diâmetro de “olho” varia de 8 a 200 *km*, mas em média temos ciclones com diâmetro de olho em torno de 30 a 60 *km*.

O “olho” é circundado pela “parede de olho” (área aproximadamente circular de convecção profunda) correspondendo à área de ventos de superfície mais intensos. O olho é composto de ar que apresenta movimento levemente descendente enquanto que a parede tem um fluxo resultante ascendente de moderado a fortes correntes ascendentes e descendentes.

A convecção da parede do olho é fundamental na formação e manutenção do ciclone tropical. Convecção em ciclones tropicais é organizada e alongada na mesma orientação do vento horizontal sendo chamadas de bandas espirais, pela típica formação em espiral. Ao longo dessas bandas, a convergência em baixos níveis é máxima e, assim, a divergência é bem pronunciada nos altos níveis.



Figura 2.1: Constituição de um ciclone tropical: olho, parede de olho e as bandas de chuva (reproduzido de [www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/All.html](http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/All.html))

## 2.2 Condições para a formação de ciclones tropicais

Para ocorrer ciclogênese tropical deve existir uma série de condições ambientais precursoras favoráveis como:

1. Águas oceânicas quentes (pelo menos  $26,5^{\circ}\text{C}$ ) em uma camada suficientemente profunda (na ordem de  $50\text{ m}$ ). Essas águas quentes alimentarão a engrenagem térmica do ciclone tropical.
2. Uma atmosfera que se resfrie rapidamente com a altura para que seja potencialmente instável à convecção húmida, sendo essa actividade convectiva responsável pela libertação do calor armazenado nas águas para o interior do ciclone.
3. Camadas relativamente húmidas na troposfera média ( $5\text{ km}$ ). Níveis médios secos não conduzem ao contínuo desenvolvimento de actividade convectiva em uma vasta área.
4. Uma distância mínima de, pelo menos  $500\text{ km}$  da linha do Equador. Para ocorrer ciclogênese tropical, há o requisito de uma força de coriolis não desprezável para que o centro de baixa do distúrbio seja mantido.
5. Um distúrbio pré-existente próximo à superfície com vorticidade e convergência suficientes. Ciclones tropicais não podem desenvolver-se espontaneamente, pois, necessitam de um sistema organizado com rotação considerável e influxos nos baixos níveis.
6. Valores baixos de cisalhamento vertical de vento entre a superfície e alta troposfera. Valores altos de cisalhamento desfavorecem ciclones tropicais incipientes e podem prevenir a sua gênese ou, no caso de um ciclone já formado pode enfraquecê-lo ou até mesmo destruí-lo dada a sua interferência com a organização convectiva em torno do centro do ciclone.

Quase todos os ciclones tropicais ocorrem, entre o fim do Verão e o início do Outono.

Em Moçambique, a época dos ciclones é de Novembro à Abril, sendo os meses de Janeiro e Fevereiro os de maior ocorrência.

Os ciclones são classificados em 5 categorias, de acordo com a força dos ventos. Na categoria 1 - intensidade mínima, os ventos estão entre 118 *km/h* e 152 *km/h* (na prática, até 130 *km/h* o fenómeno é chamado de tempestade tropical, e a partir daí de ciclone). Na categoria 2 - intensidade moderada, os ventos variam de 153 *km/h* a 176 *km/h*. Na categoria 3 - intensidade forte, os ventos ficam entre 177 *km/h* e 208 *km/h*. Na categoria 4 - intensidade extrema, os ventos situam-se entre 209 *km/h* e 248 *km/h*. Na categoria 5 - intensidade catastrófica, os ventos passam de 249 *km/h*.

Os ventos dos ciclones não são "rectos" mas de forma "curva", sendo que no Hemisfério Norte os ventos tenham sentido anti-horário e no Hemisfério Sul o movimento seja no sentido horário.

Os ciclones tropicais possuem nomes diversos, dependendo do local onde ocorrem. São conhecidos no Atlântico Norte e Caribe como Furacões; no Mar da China e Pacífico Norte como Tufões, no Oceano Índico e na Baía de Bengala como Ciclones.

A definição da lista de nomes de ciclones é feita pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) a partir de sugestões de países afectados. Para um ciclo de 6 anos, todos os ciclones que ocorrem estão previamente baptizados.

## 2.3 Ciclone Tropical Hudah

Cinco anos depois do ciclone Nádia, a região norte de Moçambique na época de 99/2000, concretamente os distritos costeiros de Pebane e Maganja da Costa na província da Zambézia foram fustigados por chuvas intensas e ventos fortes. Esta ocorrência atingiu o seu auge no dia 8 de abril quando o ciclone tropical Hudah atingiu o continente e posteriormente veio a dissipar-se no interior do distrito de Gilé. A sua influência fez-se sentir também nos

distritos costeiros do sul da província de Nampula.

O ciclone tropical HUDAH formou-se no sudoeste do Oceano Índico, entre as longitudes 95°E e 105°E no dia 24 de Março de 2000 (figura 2.2). A sua trajectória prosseguiu com sucessivas atenuações e intensificações e no dia 3 de Abril, após atravessar a região montanhosa do norte de Madagascar, entra no Canal de Moçambique onde encontra condições ambientais para a sua intensificação. Na sequência deste fenómeno, registou-se no distrito de Pebane, um óbito, nove feridos, destruição de infra-estruturas sociais e económicas, devastação de áreas de cultivo para além da queda de coqueiros, cajueiros e outras árvores. A rede eléctrica e telefónica ficou afectada. Cerca de 3000 casas de construção precária foram destruídas e 11000 pessoas foram evacuadas (Mussa Mustafa, INAM<sup>1</sup>, 2002, comunicação pessoal).

No distrito de Maganja da Costa registaram-se 3 óbitos, 13 feridos, destruição de 4 escolas, 1 posto de saúde e 1200 casas de construção precária.

Note-se, que a enorme precipitação originada por este ciclone provocou quebras nalgumas culturas, nomeadamente da mandioca, mas foi benéfica para outras, como é o caso do arroz.

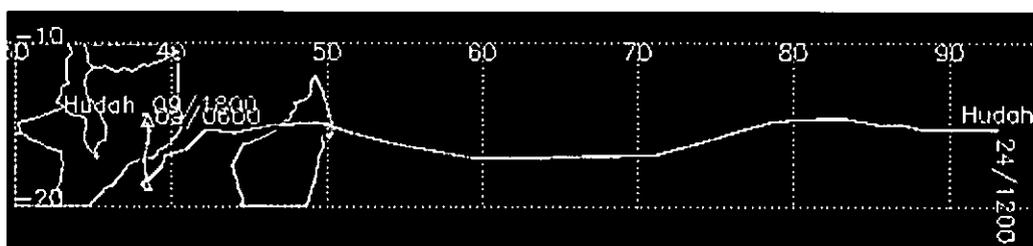


Figura 2.2: Trajectória do ciclone Hudah desde do dia 23.03 a 8.04 (fonte: <http://www.solar.ifa.hawaii.edu>).

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Meteorologia (de Moçambique)

## Capítulo 3

### Breve descrição do MM5

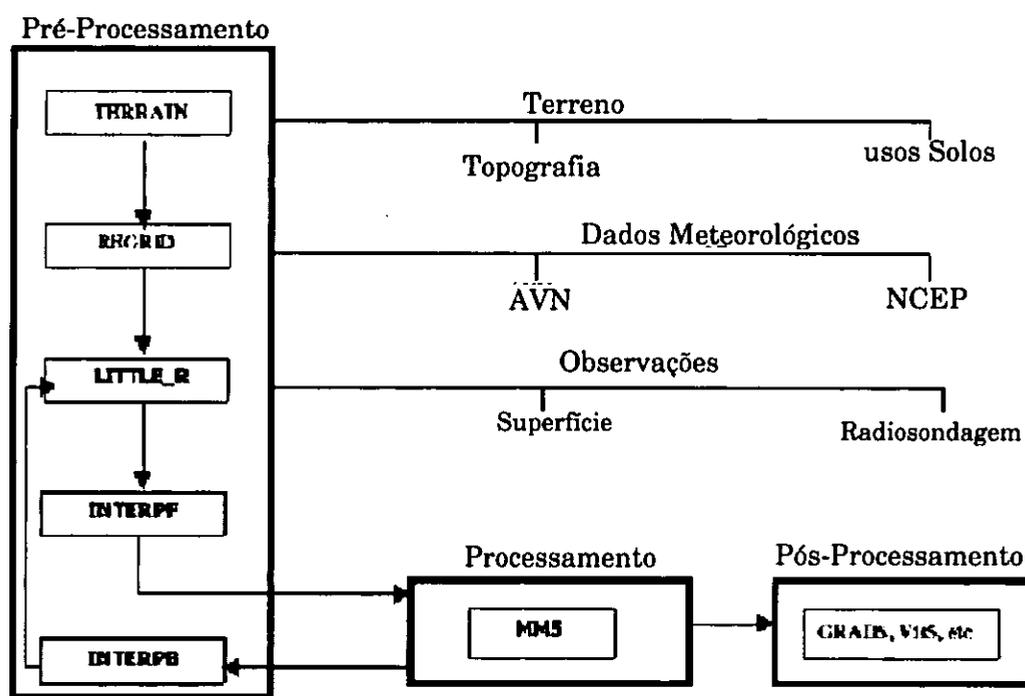


Figura 3.1: Esquema representativo do MM5 (adaptação de Dudhia *et al.*, 2000).

O sistema de modelação MM5 compreende, para além do modelo de mesoscala MM5, vários programas de pré-processamento: o TERRAIN, o REGRID,

o LITTLE-R, o INTERPF e o INTERPB. Estes programas de processamento dos dados destinam-se à criação das condições iniciais e de fronteira do modelo. O pós-processamento ou seja a visualização dos resultados obtidos pode ser feita por vários programas, entre os quais, NCAR-Graphics e o GrADS, que foi o usado neste trabalho.

### 3.1 O programa TERRAIN

O programa TERRAIN define todos os domínios geográficos que serão usados e a relação geométrica entre eles.

Para cada domínio define a sua extensão e número de pontos da malha. Para o domínio maior, o utilizador define a latitude e longitude do ponto central, o número de pontos da malha e a distância entre os pontos consecutivos da malha.

A relação entre os vários domínios pode ser unidireccional, em que, durante a integração do modelo, a informação é transmitida do domínio maior (domínio- mãe) para o mais pequeno (domínio- filho) só através das condições de fronteira, ou bidireccional ("two way nesting"), em que adicionalmente os resultados do domínio mais pequeno substituem os do domínio maior na zona comum.

O programa TERRAIN processa para todos os domínios a informação relativa a topografia do terreno. A informação é recebida numa malha regular de latitude/longitude e interpolada horizontalmente para os domínio escolhidos. A interpolação pode ser feita segundo o método de Cressman ou o método bi-parabólico. No método de Cressman, estipula-se um raio de influência e a importância dos valores dos pontos dentro dessa área para o ponto que se está a estimar é inversamente proporcional à distância. O método bi-parabólico, por seu turno, faz um ajuste bidimensional de duas parábolas e considera que o valor para o ponto desejado é uma média pesada dos valores dados pelas duas parábolas. Neste trabalho foi usado o método bi-parabólico. A escolha optimal dos domínios deve ter em consideração o tempo de com-

putação que é especialmente importante para a previsão meteorológica. O tempo é proporcional ao produto do número de pontos no tempo pelo número de pontos no espaço.

Sendo a relação entre os domínios bidireccional, no MM5 o passo espacial tem que diminuir de 1/3 para cada domínio aninhado em relação ao seu domínio-mãe.

### **3.2 O programa REGRID**

O REGRID interpola horizontalmente dados meteorológicos em níveis de pressão ou à superfície para a malha dos diferentes domínios. Esta interpolação horizontal é feita com o método bi-parabólico. Se se acrescentarem níveis de pressão aos dados originais, a interpolação vertical para os mesmos é feita usando os níveis de pressão adjacentes, e é linear com a pressão para o vento, a humidade relativa e linear com o logaritmo da pressão para a temperatura.

O REGRID é constituído por dois subprogramas. O pregrid que põe a informação meteorológica de vários formatos diferentes GRID (Gridded Binary Data) num dado formato standard e o regridder que faz a interpolação para as malhas de todos os domínios definidos no TERRAIN a todos os níveis de pressão pré-seleccionados.

O regridder tem que receber obrigatoriamente os seguintes campos em níveis de pressão: temperatura, componentes horizontais da velocidade, humidade relativa e a altura geopotencial.

### **3.3 O programa LITTLE-R**

O LITTLE-R é o programa que permite que os dados iniciais sejam melhorados com observações de pressão ao nível do mar, de velocidade e direcção do vento, de temperatura e temperatura de orvalho. A coordenada vertical

que referencia estas observações pode ser a pressão ou a altitude. A qualidade das observações é controlada para o instante a que a observação se refere analisando a relação entre as observações e os pontos de malha mais próximos.

A alteração dos valores referentes aos pontos de malha pode ser feita de acordo com dois métodos: o esquema de Cressman e o esquema Multiquadrático. No esquema de Cressman a observação tem um raio de influência que varia conforme a velocidade do vento: circular com vento calmo (inferior a 5 m/s), elíptico com vento forte e elíptico curvado em zonas de curvatura. Este procedimento pode ser repetido várias vezes usando como campo de partida o obtido pela última análise comum. No esquema Multiquadrático cada ponto da malha é influenciado por todas as observações, sendo esta influência inversamente proporcional à distância.

### 3.4 O programa INTERPF

O INTERPF cria as condições iniciais e condições de fronteira que o MM5 vai utilizar partindo dos resultados do REGRID ou do LITTLE-R. Este programa calcula as várias superfícies sigma,  $\sigma$ , em função da altura,  $z$ , e faz a interpolação vertical dos dados de superfícies isobáricas adjacentes para superfícies a sigma constante. A interpolação vertical é linear com a pressão hidrostática para todas as variáveis excepto com a temperatura que é linear com o logaritmo da pressão. Calcula também as variáveis adicionais que são precisas para o modelo não hidrostático nomeadamente a velocidade vertical e a perturbação da pressão. A velocidade vertical é obtida integrando a divergência da velocidade horizontal.

Este programa faz uma análise de diagnóstico aos dados de velocidade horizontal e remove a divergência horizontal média.

### 3.5 O programa MM5

O MM5 é o programa que faz a previsão numérica do tempo resolvendo as equações de Navier-Stokes em três dimensões, a equação termodinâmica e a equação de conservação da água no sistema de coordenadas sigma. A parametrização dos processos físicos, nuvens, precipitação, camada limite e radiação são definidos neste programa.

### 3.6 As equações do modelo MM5

No MM5 (Dudhia, 1993) define-se um estado de referência para a pressão,  $P_0$ , e temperatura,  $T_0$ , e perturbações a esse estado,  $P'$  e  $T'$ , que são as variáveis que são prognostigadas:

$$P(x, y, z, t) = P_0(z) + P'(x, y, z, t) \quad (3.1)$$

$$T(x, y, z, t) = T_0(z) + T'(x, y, z, t) \quad (3.2)$$

$$\rho(x, y, z, t) = \rho_0(z) + \rho'(x, y, z, t) \quad (3.3)$$

Onde  $P, T$  e  $\rho$  são a pressão total, temperatura total e densidade total, respectivamente.

#### 3.6.1 A coordenada vertical sigma

A coordenada vertical usada no MM5 é a coordenada,  $\sigma$ , dada por:

$$\sigma = \frac{P_0 - P_t}{P_s - P_t} \equiv \frac{P_0 - P_t}{P^*} \quad (3.4)$$

Onde:

$P_0(z)$  - pressão do estado de referência é independente do tempo.

$P_t$  – pressão no topo da atmosfera no estado de referência é constante.

$P_s$  – a pressão de superfície no estado de referência, é função de posição e independente do tempo.

A pressão total  $P$  é dada pela equação:

$$P = \sigma P^* + P_t + P' \quad (3.5)$$

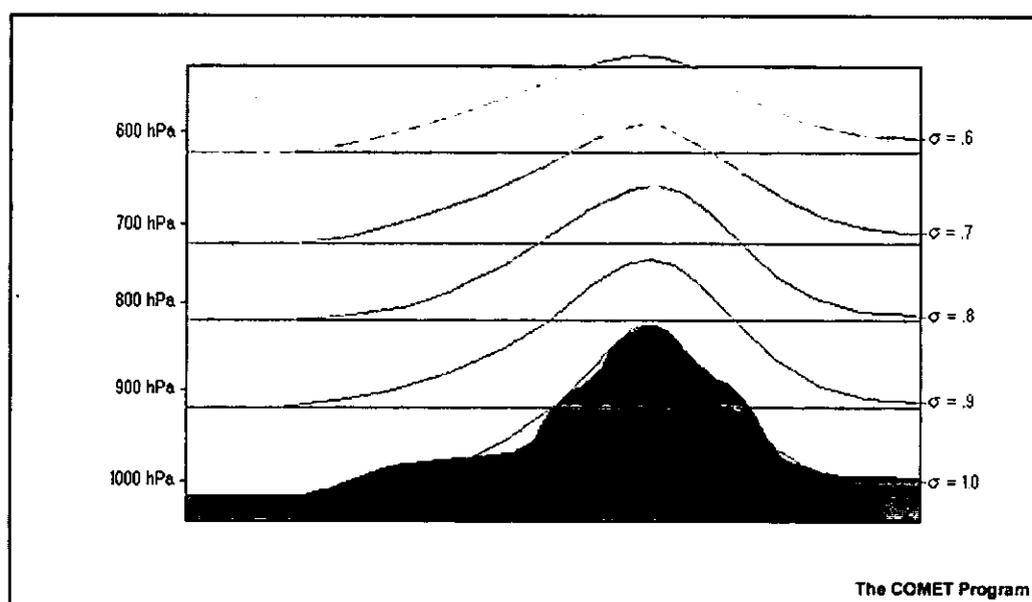


Figura 3.2: Esquema representativo da estrutura vertical do modelo.(NWP course, 1999)

Os níveis de  $\sigma$  constante são fixos no espaço e no tempo e apresentam valores entre 0, no topo da atmosfera, e 1 no solo, figura 3.2; seguem aproximadamente o terreno junto ao solo e aproximam-se das superfícies isobáricas à medida que ascende na atmosfera (Dudhia *et al.*, 1995).

### Equações de Momento

O MM5 usa as seguintes equações de momento:

Componente zonal  $x$  do vento:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left( \frac{\partial P'}{\partial x} - \frac{\sigma}{P^*} \frac{\partial P^*}{\partial x} \frac{\partial P'}{\partial \sigma} \right) = -\mathbf{V} \cdot \nabla u + v \left( f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) - ew \cos \alpha - \frac{uw}{r_t} + D_u \quad (3.6)$$

Componente meridional  $y$  do vento:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left( \frac{\partial P'}{\partial y} - \frac{\sigma}{P^*} \frac{\partial P^*}{\partial y} \frac{\partial P'}{\partial \sigma} \right) = -\mathbf{V} \cdot \nabla v - u \left( f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) + ew \sin \alpha - \frac{vw}{r_t} + D_v \quad (3.7)$$

Componente vertical  $z$  do vento:

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\rho_0}{\rho} \frac{g}{P^*} \frac{\partial P'}{\partial \sigma} + \frac{gP'}{\gamma P} = -\mathbf{V} \cdot \nabla w + g \frac{P_0 T'}{P T_0} - \frac{g R_d}{c_p} \frac{P'}{P} + e(u \cos \alpha - v \sin \alpha) + \frac{u^2 + v^2}{r_t} + D_w \quad (3.8)$$

Onde:

$f$  - é o parâmetro (vertical) de Coriolis.

$\sigma$  - a velocidade vertical em coordenada  $\sigma$

$D_u, D_v$  e  $D_w$  - são termos de sub-escala da rede.

$m$  - factor de escala da rede.

### Equação de prognóstico da Pressão

O MM5, ao invés da pressão, usa a perturbação da pressão como variável de predição:

$$\frac{\partial P'}{\partial t} + \rho_0 g w + \gamma P \nabla \cdot \mathbf{V} = -\mathbf{V} \cdot \nabla P' + \frac{\gamma P}{T} \left( \frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \right) \quad (3.9)$$

Que é a equação apresentada em (Dudhia, 1993). No MM5 os dois últimos termos da equação acima, que representam a variação de pressão devido aos fluxos de calor radiativo, latente e turbulento, são desprezados. Portanto, a variação da tendência da pressão num dado ponto resulta da advecção de ar com uma pressão diferente e da expansão ou compressão de ar que resulta numa divergência da velocidade não nula.

### Equação de prognóstico da Termodinâmica Atmosférica

A variação da temperatura é dada pela seguinte equação termodinâmica:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla T + \frac{1}{\rho c_p} \left( \frac{\partial P'}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla P' - \rho_0 g w \right) + \frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \quad (3.10)$$

Apresentada em (Dudhia, 1993). Esta equação calcula a variação da temperatura num dado ponto como sendo o resultado das seguintes contribuições: advecção de ar com temperatura diferente, variação da pressão, fluxos de calor radiativo e latente e um termo associado a fluxos de calor turbulentos,  $D_\theta$ . O fluxo de calor turbulento é proporcional à razão entre a temperatura e a temperatura potencial no estado de referência. Quanto mais perto da superfície maior o fluxo turbulento de calor.

Termos de Advecção podem ser expandidos como:

$$\mathbf{V} \cdot \nabla A \equiv mu \frac{\partial A}{\partial x} + mv \frac{\partial A}{\partial y} + \dot{\sigma} \frac{\partial A}{\partial \sigma} \quad (3.11)$$

Onde A é uma função arbitrária e  $\dot{\sigma}$ , velocidade vertical, é dada por:

$$\dot{\sigma} = -\frac{\rho_0 g}{P^*} w - \frac{m\sigma}{P^*} \frac{\partial P^*}{\partial x} u - \frac{m\sigma}{P^*} \frac{\partial P^*}{\partial y} v \quad (3.12)$$

A divergência da velocidade pode ser escrita de modo:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{V} = & m^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u}{m} \right) - \frac{m\sigma}{P^*} \frac{\partial P^*}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + m^2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v}{m} \right) - \frac{m\sigma}{P^*} \frac{\partial P^*}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \\ & - \frac{\rho_0 g}{P^*} \frac{\partial w}{\partial \sigma} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Equação apresentada em (Dudhia, 1993). Analisando esta equação verifica-se que a divergência da velocidade é proporcional à variação de densidade. Para uma dada camada da atmosfera a variação da densidade é praticamente nula o que significa que a divergência da velocidade, soma da divergência horizontal com a divergência vertical também é nula.

### 3.7 Parametrizações físicas do modelo

No MM5 os processos parametrizados são: a formação e microfísica das nuvens, a camada limite, a radiação e os processos de superfície. A parametrização da camada limite permite o cálculo dos fluxos de calor sensível e calor latente que depois são usados pela parametrização de superfície para o cálculo da temperatura à superfície. O modelo de camada limite permite adicionalmente parametrizar os efeitos da difusão turbulenta de calor, quantidade de movimento e vapor de água que irão determinar os perfis verticais de temperatura, vento e humidade na camada limite.

A parametrização das nuvens permite determinar se um dado ponto da malha pertence ou não a uma nuvem, se pertencer, ou seja se a humidade for de 100%, a parametrização da microfísica das nuvens é activada, senão é desactivada. A estrutura microfísica das nuvens influencia fortemente o balanço radiativo da nuvem: a reflexão da radiação solar incidente no topo da nuvem é função da concentração e tamanho das gotas de água e da concentração, tamanho e forma dos cristais de gelo.

#### 3.7.1 Parametrização de Cumulus

##### O modelo 'Anthes-Kuo'

Este modelo foi desenvolvido por Kuo (1965, 1974) e por Anthes (1974) e é o modelo mais antigo presente no MM5.

No esquema de Anthes-Kuo, o controlo dinâmico é feito relacionando a convecção com propriedades advectivas de larga escala. A variável de larga escala que se usa como indicador é a convergência de humidade.

De acordo com Anthes (1977) este esquema é activado quando a atmosfera é condicionalmente instável e quando a convergência horizontal de humidade ultrapassa um certo valor.

Este esquema tende a sobrestimar a precipitação convectiva sendo portanto de acordo com Dudhia et al. (2000) mais adequado para escalas superiores a 30 *km*.

#### O modelo 'Grell'

No esquema de Grell (1993) o controlo dinâmico é feito relacionando a convecção com desestabilização imposta pela larga escala considerando que as nuvens estabilizam o ambiente à mesma taxa que o ambiente de larga escala o desestabiliza.

Dudhia et al. (2000) consideram que este esquema é útil para escala que variam entre os 10 e os 30 *km*. Grell (1993) afirma que os resultados obtidos com este esquema permite simular de maneira realista a evolução de um sistema convectivo de mesoscala e é um esquema muito eficiente computacionalmente devido à sua simplicidade.

#### O modelo 'Arakawa-Schubert'

Este modelo foi desenvolvido por Arakawa-Schubert (1973) e modificado por Grell (1993). No esquema de Arakawa-Schubert o controlo dinâmico é feito relacionando a convecção com a desestabilização imposta pela larga escala, considerando que as nuvens respondem às alterações de larga escala, mantendo o nível de instabilidade condicional.

Este modelo pressupõe um conjunto de estados sucessivos de equilíbrio em que o sistema convectivo se ajusta rapidamente às alterações lentas do ambiente de larga escala.

Grell (1991) afirma que este esquema corrigido permite obter boas distribuições verticais de temperatura e de humidade e ainda permite simular bem os sistemas convectivos de mesoscala.

Este esquema é apropriado para larga escala, ou seja, escalas maiores que 30 *km*.

#### O modelo 'Fritsch-Chappell'

No esquema de Fritsch-Chappell, o controlo dinâmico é feito relacionando a convecção com a energia de implusão disponível: se o movimento vertical é suficiente para levar uma parcela até ao nível de livre convecção este esquema é activado. A precipitação convectiva actua de modo a transformar uma atmosfera instável numa atmosfera em estado de equilíbrio (estável ou neutra) a uma determinada taxa.

O fluxo convectivo de massa remove 50% da energia convectiva disponível num tempo especificado que corresponde ao tempo que uma nuvem demoraria a passar nesta célula da malha. A taxa de mistura com o ar é fixa. De acordo com Dudhia (2000), o modelo de Fritsch e Chappell é adequado para escalas de 20 a 30 *km*. Este esquema considera os efeitos de atrito na precipitação:

#### O modelo de 'Kain-Fritsch'

O esquema de Kain-Fritsch (1993) corresponde a uma melhoria do esquema de Fritsch-Chappell e é adequado para escalas de 10 a 30 *km*.

Considera que toda a energia de mistura disponível é removida no tempo especificado e usa um esquema de mistura ar-nuvem para calcular as taxas de misturas.

De acordo com Pielke (2002), o modelo de Kain-Fritsch não é adequado para ambientes tropicais porque pode simular a convecção com excessivo vigor.

### O modelo de 'Betts-Miller'

Este modelo foi desenvolvido por Betts (1986) e Betts e Miller (1986) e melhorado por Janjic (1994). O controlo dinâmico é exercido considerando a hipótese dos estados sucessivos de equilíbrio entre a larga escala e as nuvens. Este esquema pode não funcionar em situações de convecção intensa em que existe uma camada de ar seco por cima de ar húmido.

Este esquema não considera movimentos verticais descendentes e portanto só é adequado para escalas superiores a 30 km (Dudhia et al., 2000).

### 3.7.2 Modelos explícitos

Nos modelos explícitos as propriedades das nuvens são as mesmas que as do nó da malha, e portanto sempre que existe saturação num determinado ponto estes modelos são activados. Estes modelos simulam a escalas grandes a precipitação de origem estratiforme e a escalas mais reduzidas a precipitação de origem convectiva.

No MM5 os esquemas de modelação explícita são activados quando a saturação é atingida.

#### Modelo 'Warm Rain'

Campos de nuvens e água das chuvas são preditos explicitamente com os processos microfísicos. Neste esquema não se introduz processos associados à fase do gelo.

#### Modelo 'Simple Ice'

Neste modelo se introduz o gelo. Dudhia (1989) refere que os processos associados à fase do gelo são mais importantes numa camada entre os 0°C e os -20°C, onde os movimentos verticais de ascensão são forçados pela libertação do calor latente que resulta da deposição do vapor de água na

neve. Os movimentos verticais de subsidência resultam da liquefacção e da evaporação do gelo e aparecem atrás das zonas convectivas.

#### Modelos 'Mixed-Phase' e 'Reisner-Graupel'

O modelo 'Mixed-Phase' de modo a permitir a existência de água sobre-arrefecida introduz a coexistência nas nuvens de água líquida e gelo e na precipitação da chuva e neve.

O modelo 'Reisner-Graupel' introduz duas novas equações de previsão uma para o graupel e outra para a concentração de cristais de gelo (Grell, 1995).

#### O modelo 'Goddard Microphysics'

Este esquema inclui graupel tal como o modelo de 'Reisner-Graupel' e inclui adicionalmente hail.

### 3.7.3 Superfície e Camada Limite

#### Camada Limite

A Camada Limite Atmosférica é uma camada de ar adjacente ao solo com uma espessura que é em média cerca de 2 *km*, mas pode variar entre 200 *m* a 4 *km*. Os últimos 200 a 20 *metros* são a camada superficial onde os fluxos turbulentos são uniformes e constantes em altura. A atmosfera que está por cima é designada por Atmosfera Livre e é habitualmente estável. A zona de transição entre a Atmosfera Livre e a Camada Limite é uma zona estável de inversão de temperatura. Esta zona de transição existe sempre e é responsável pelo isolamento da Camada Limite do resto da troposfera.

A camada limite é a zona da atmosfera que está sob o efeito dos fluxos de calor latente e sensível trocados entre o solo e ar e, a água e o ar, e que por isso está sujeita aos ciclos diários de temperatura, humidade e solo. A

camada limite tem habitualmente um comportamento cíclico diário devido à radiação: apresentando-se instável e portanto bem misturada durante o dia e estável com grandes gradientes de temperatura, velocidade do vento e humidade durante à noite. Estes ciclos diários podem ser alterados pela passagem de frentes e ciclones porque as massas de ar são advectados para a região.

A camada limite é modelada pelos fenómenos da escala sinóptica nomeadamente os centros de alta e baixa pressão. Nos centros de alta pressão o ar diverge junto ao solo e desce verticalmente para o substituir. A subsidência de ar torna a camada limite menos espessa. Nos centros de baixa pressão o ar converge e ascende eliminando por vezes a separação entre a camada limite e a atmosfera livre permitindo uma renovação do ar da camada limite (Stull, 2000).

#### **O modelo Blackadar de Alta Resolução**

Este modelo foi desenvolvido por Blackadar e revisto por Zhang e Anthes (1982). A parametrização da camada limite neste modelo tem como objectivo o cálculo da mistura vertical das seguintes variáveis: vento horizontal, temperatura potencial, razão da mistura e gelo e água líquida das nuvens (Grell et al., 1995).

De acordo com Grell (1995) a velocidade de atrito neste modelo é calculada em função da turbulência definida para quatro casos: convecção livre, convecção forçada, turbulência mecânica e estável.

Este modelo é bastante sensível às condições sinópticas nomeadamente o vento geostrófico.

Este modelo é de acordo com Dudhia (2000) pouco eficiente computacionalmente.

### O modelo de Burk-Thomson

Este modelo foi desenvolvido por Burk e Thomson (1988) baseado nas fórmulas de Mellor e Yamada (1974). Tem uma ordem de fecho ("closure order") de turbulência de 1.5, considerando equações de previsão para a energia cinética turbulenta e para a temperatura.

De acordo com os resultados apresentados por Burk e Thomson (1988), a camada limite simulada por este modelo apresenta um comportamento bastante realista em diferentes situações nomeadamente num deserto de Norte de África durante a passagem duma frente quente.

### O modelo MRF

Este esquema usado actualmente no modelo de previsão AVN/MRF do NCEP, e foi desenvolvido por Hong e Pan (1996).

Este modelo determina a altura da Camada Limite calculando o número global de Richardson e em seguida especifica o perfil do coeficiente de difusão em função da altura da Camada Limite e determina os valores dos coeficientes em função dos fluxos à superfície.

Neste esquema existe uma parametrização dos fluxos contrários ao gradiente que dependem da velocidade convectiva e dos fluxos à superfície. De acordo com Dudhia (2000) é um esquema muito eficiente computacionalmente.

### Superfície

Testes realizados por Zhang e Anthes (1982) permitiram constatar que a parametrização do solo é o aspecto mais importante na determinação do comportamento da Camada Limite Atmosférica.

No MM5 a temperatura à superfície em terra é calculada através do balanço da energia considerando que em cada passo no tempo o balanço de energia à superfície se anula. Na superfície da água a temperatura é considerada fixa durante o tempo de simulação (Grell et al., 1995).

### Modelo de duas camadas de Blackadar

Este modelo descrito por Zhang e Anthes (1982) assume que a camada superficial da atmosfera tem 10 metros e que o solo tem duas camadas, uma camada de solo e uma camada de substrato. A camada de substrato tem temperatura média diária fixa e a camada de solo tem uma temperatura variável com um ciclo diário que resulta do balanço de energia aplicado à camada, da espessura da camada e da capacidade térmica.

Neste modelo é calculada a temperatura da superfície do solo usando uma equação do balanço de energia em que a variação de energia dessa camada de solo é dada pela soma do fluxo de calor difusivo para o substrato, do fluxo de calor sensível (convectivo e difusivo) e latente para a atmosfera e do fluxo de calor radiativo.

Dudhia (1996) afirma que este modelo tem apresentado deficiências na previsão de temperatura do ar à superfície subestimando as temperaturas máximas e provocando um erro de fase entre as temperaturas modeladas e as observadas. As possíveis razões que apresenta são: excesso de disponibilidade de água e consequente excesso de fluxo de calor latente, a radiação de curto comprimento de onda pode estar a ser fixada num valor demasiado baixo. Após reavaliar os pressupostos do modelo, Dudhia propôs um novo modelo apresentado de seguida. Outra possível fonte de erros também referida por Dudhia (1996) é o facto de o modelo estar afinado para ciclos de 24 horas o que significa que o modelo pode não responder às alterações mais bruscas como por exemplo a passagem dum frente fria.

### Modelo de cinco camadas

Dudhia (1996) justifica a necessidade de um modelo com mais camadas que o modelo de Blackadar.

No solo a propagação do fluxo de calor é feita através de uma onda que se atenua de modo que quanto maior é a profundidade mais pequena é a onda e que devido à velocidade finita de propagação, tipicamente, 3 *cm/hora*,

quanto mais profunda é a camada mais tempo a onda demora a atingir essa camada. De modo que a temperatura média e o tempo de resposta de uma camada única que represente o solo é muito diferente da temperatura média da camada mais superficial do solo. O ar da camada superficial da atmosfera responde à camada superficial, de modo que o cálculo correcto dos fluxos de calor na superfície, exige uma resolução vertical maior.

Este modelo usa cinco camadas com a espessura de 1, 2, 4, 8 e 16 *cm* e um substrato que tem uma espessura de 31 *cm*, e que é mantido a temperatura constante. De acordo com Dudhia (1996) esta discretização foi comparada com um modelo de 100 camadas com 1 *cm* e os resultados foram semelhantes. As equações usadas neste modelo são semelhantes às do modelo de Blackadar.

A inicialização da temperatura no solo é feita considerando que as temperatura obtidas do MM5 para o solo e o subsolo estão respectivamente a 1 *cm* e a 47 *cm* (a metade da camada de subsolo) e que a variação entre elas é linear.

#### 3.7.4 Radiação

A parametrização da radiação no MM5 pode ser feita de acordo com diferentes esquemas. Aqui vamos descrever os esquemas Cloud-Radiation e o CCM2 Radiation.

A parametrização da radiação tem como objectivo calcular o fluxo radiativo total na superfície para o balanço energético de superfície e a divergência dos fluxos radiativos num volume de ar limpo ou de nuvem necessários ao cálculo do aquecimento/arrefecimento.

##### Esquema Cloud-Radiation

Este modelo é muito sofisticado e capaz de fazer a contagem da radiação de longo comprimento de onda e de curto comprimento de onda para nuvens

explícitas e céu limpo. Em relação as tendências da temperatura atmosférica, este esquema também proporciona o cálculo do fluxo radiativo superficial. Este esquema é muito dispendioso computacionalmente, mas requer pouca memória (Dudhia, 2000).

#### **Esquema CCM2 Radiation**

Este esquema é baseado em múltiplas bandas espectrais de longo comprimento de onda e de curto comprimento de onda, mas trata a nuvem baseando simplesmente na humidade relativa.

O modelo CCM2 Radiation é apropriado para escala larga e provavelmente mais acurado para integrações de longa duração. Também produz fluxo radiativo à superfície (Dudhia, 2000).

## Capítulo 4

### Discussão dos Resultados

#### 4.1 Análise da configuração usada nas simulações

No presente trabalho a simulação do ciclone foi realizada com 15 níveis verticais (half sigma levels). O facto de optarmos por usar two-way nesting, obriga a que a razão de resolução seja 1/3 e levou-nos a optar por trabalharmos com três domínios com as resoluções de 180 *km*, 60 *km* e 20 *km*.

O domínio de maior resolução inclui a parte norte de Moçambique, que é a parte que nos interessa, pois o ciclone Hudah assolou esta área do país.

Os dados usados nesta tese foram extraídos do terceiro domínio (resolução de 20 *km*), pois permite fazer uma análise precisa do ciclone e as regiões atingidas.

O passo temporal de integração para o domínio externo foi de 6 minutos. O tempo total de integração foi de cinco dias, de 00Z 3 de Abril de 2000 à 00Z 9 de Abril de 2000, com um “output” de 12 em 12 horas.

As condições de fronteira usadas para o domínio maior (domínio-mãe) e as condições iniciais para todos os domínios foram geradas com base no “output” do modelo global do NCEP<sup>1</sup> e para melhorar as condições iniciais foi feita

---

<sup>1</sup>National Centers for Environmental Prediction

uma análise objectiva das observações existentes, tendo se usado o método de Cressman.

É adoptado nesta tese, duas configurações que a seguir designaremos por configuração I e configuração II, respectivamente. A única diferença entre elas está nas parametrizações físicas escolhidas para cada uma.

A análise dos resultados será feita em duas partes, sendo a primeira dedicada à comparação dos resultados obtidos pelo modelo MM5 nas duas configurações e os valores observados pelo INAM. A seguir, é feita uma comparação entre as duas configurações adoptadas.

As variáveis que foram comparadas são a temperatura superficial, a humidade relativa à 925 *hPa*, a pressão ao nível médio do mar, a precipitação e a magnitude do vento à 925 *hPa*.

As comparações foram feitas para três estações de superfície - Pebane, Quelimane e Nampula, pois só possuímos dados de observações apenas para estas estações, cedidos pelo INAM.

#### 4.1.1 Simulação de controlo. Evolução do ciclone Hudah no Canal de Moçambique

O ciclone Hudah entra no Canal de Moçambique no dia 3 de Abril, após ter fustigado a região montanhosa do Norte de Madagascar, onde a temperatura da água do mar favorece à sua intensificação (figura C.1).

No dia 6 de Abril, o ciclone já se fazia sentir nos distritos de Angoche, Moma, Pebane e Maganja da Costa, com ventos fortes a fustigar essas localidades (figura ??). A pressão no centro do ciclone era de 1010 *hPa* (figura B.3).

Em menos de 48 horas, o ciclone atingi a costa (figura B.3), dando início a sua dissipação, facto que ocorreu no dia 8 de Abril no distrito de Gilé (figura B.5). Mas as chuvas continuaram a fustigar os distritos de Pebane, Maganja da Costa e Gilé causando enormes estragos (figura D.2).

No distrito de Pebane, a precipitação acumulada máxima para 24 horas foi de 68 *mm* no dia 7 de Abril (figura D.1).

### 4.1.2 Análise da configuração I

Para a parametrização de Cumulus optou-se pelo esquema de 'Kuo-Anthes' para os domínios de 180 km e 60 km e o modelo de 'Grell' para o de 20 km, pois o esquema de Kuo-Anthes é eficiente para escalas superiores a 30 km e o de Grell é apropriado para escalas entre 10 a 30 km, veja em Dudhia (1993). Para a parametrização da camada limite planetária optou-se pelo modelo de Blackadar.

Para a humidade explícita foi activado o modelo 'gelo simples', para a radiação usamos o modelo Simple Cooling e finalmente para a temperatura do solo optou-se pelo modelo de 5 camadas (tabela 4.1).

Tabela 4.1: Definição da configuração I usada nas simulações.

Config do domínio com três malhas com 15 níveis verticais			
Malhas	1	2	3
Números de pontos	38 X 31	61 X 52	100 X 64
Espaçamento da Malha (km)	180	60	20
Passo no Tempo (s)	360	120	40
Aninhamento	two way	two way	two way
Parametrização Cumulus	Anthes-Kuo	Anthes-Kuo	Grell
Camada Limite (PBL)	Blackadar	Blackadar	Blackadar
Humidade Explícita	gelo simples	gelo simples	gelo simples
Radiação	Simple	Simple	Simple
Temperatura no Solo	5 camadas	5 camadas	5 camadas

### 4.1.3 Análise do desempenho da configuração I

Nesta parte é feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos usando a configuração I e os valores observados.

### Análise da pressão ao longo do tempo de simulação

De acordo com os valores da tabela 4.2, o modelo fornece a pressão mínima de 1012.7 *hPa* no dia 5 de Abril na estação de Pebane e a pressão máxima de 1017.5 *hPa* no dia 7 de Abril em Quelimane.

Por sua vez, os dados observados dão conta de que a pressão máxima foi registada em Nampula no dia 3 de Abril, tendo sido de 1012.9 *hPa* e a mínima foi de 1006.3 *hPa*, ocorrida em Pebane no dia 6 de Abril.

A diferença entre as magnitudes e locais de ocorrência dos extremos da pressão, revela a inevitabilidade dos erros com que os modelos de previsão numérica se debatem. Infelizmente, como dispomos de poucos dados de observação, torna-se difícil quantificar o erro de fase espacial e temporal da pressão no centro do ciclone.

Nesta configuração, o modelo prevê pressões superiores às observadas. O erro médio absoluto da pressão é de 6.4 *hPa*, 6.0 *hPa* e 5.2 *hPa* para as estações de Pebane, Quelimane e Nampula, respectivamente (ver apêndice A).

Tabela 4.2: Pressão diária registada para configuração I e INAM (em *hPa*)

Dias		03.04	04.04	05.04	06.04	07.04	08.04
Pebane	MM5	1013.0	1015.2	1012.7	1016.0	1017.0	1017.4
	INAM	1010.6	1009.8	1007.1	1006.3	1008.1	-
	ERRO	2.4	5.4	5.6	9.7	8.9	-
Quelimane	MM5	1013.7	1015.4	1015.5	1016.9	1017.5	1017.3
	INAM	1011.4	1010.0	1009.6	1009.3	1009.8	1010.3
	ERRO	2.3	5.4	5.9	7.6	7.7	7.0
Nampula	MM5	1012.9	1015.3	1015.0	1015.7	1017.4	1017.3
	INAM	1012.0	1011.0	1010.9	1009.8	1009.6	1009.0
	ERRO	0.9	4.3	4.1	5.9	7.8	8.3

### Análise da Temperatura superficial ao longo do tempo da simulação

De acordo com os resultados da tabela 4.3, podemos verificar que as temperaturas registadas tanto pelo modelo como as observadas tendem a diminuir, isto é, no primeiro dia em que o ciclone entra no canal de Moçambique registavam-se valores altos mas nos restantes dias esses valores foram diminuindo significativamente. O modelo prevê uma máxima de 26.0°C no dia 4 de Abril em Pebane e a mínima de 18.6°C na estação de Quelimane no dia 8 do mesmo mês. Por sua vez, os dados de observação revelam uma temperatura máxima de 30.5°C no dia 3 de Abril em Pebane e uma temperatura mínima de 21.6°C no dia 8 de Abril em Nampula.

O erro médio absoluto assume um comportamento variável, sendo de 2.9°C, 5.7°C e 3.7°C para Pebane, Quelimane e Nampula, respectivamente.

Tabela 4.3: Temperatura diária registada para configuração I e INAM (em °C)

Dias		03.04	04.04	05.04	06.04	07.04	08.04
Pebane	MM5	25.9	26.0	25.9	25.9	25.9	25.9
	INAM	30.5	28.5	29.7	24.7	23.5	-
	ERRO	4.6	2.5	3.8	1.2	2.4	-
Quelimane	MM5	22.5	20.9	19.5	19.3	19.3	18.6
	INAM	28.1	27.6	27.8	23.6	23.2	24.2
	ERRO	5.6	6.7	8.3	4.3	3.9	5.6
Nampula	MM5	25.6	21.4	21.8	20.8	20.2	19.8
	INAM	27.0	26.0	24.3	25.9	24.6	21.6
	ERRO	1.4	4.6	2.5	5.1	4.4	4.2

### Análise da Humidade Relativa ao longo do tempo de simulação

De acordo com os resultados da tabela 4.4, o modelo fornece para a humidade relativa um máximo de 99.6% nas estações de Pebane e Nampula dia 5 de

Abril e por sua vez os dados do INAM dão o valor da máxima de 98% em Pebane no dia 6 de Abril.

O erro médio absoluto da humidade relativa para Pebane, Quelimane e Nampula varia entre 5.4% e 7.5%.

Tabela 4.4: Humidade Relativa à 925 hPa para a configuração I e INAM (em %)

Dias		03.04	04.04	05.04	06.04	07.04	08.04
Pebane	MM5	75.3	98.1	99.6	95.2	96.3	78.5
	INAM	80.0	89.0	81.0	98.0	95.0	-
	ERRO	4.7	9.1	18.6	2.8	1.3	-
Quelimane	MM5	83.9	99.2	92.4	89.8	98.2	99.5
	INAM	86.0	86.0	88.0	95.0	95.0	95.0
	ERRO	2.1	13.2	4.4	5.2	3.0	4.5
Nampula	MM5	77.6	75.4	99.6	98.1	90.3	94.0
	INAM	83.0	83.0	88.0	84.0	86.0	92.0
	ERRO	5.4	7.6	11.6	14.1	4.3	2.0

#### Análise da Magnitude do Vento

Os dados do INAM dão conta de que o vento atingiu o seu máximo no dia 7 de Abril em Quelimane que foi de 17.5 *m/s*. O que contradiz com o modelo que fornece o máximo de 12.2 *m/s* no dia 5 na mesma estação (tabela 4.5). Os erros médios absolutos da magnitude do vento para as estações de Quelimane e Nampula são de 4.2 *m/s* e 4.3 *m/s*, respectivamente. Para Pebane, não é possível fazer comparações, pois não há dados da observação.

#### Análise da Precipitação acumulada ao longo do tempo de simulação

A precipitação máxima acumulada para 24 horas registada pelo modelo foi de 74.3 *mm* e verificou-se em Nampula no dia 8, porém, dados observados

Tabela 4.5: Magnitude do Vento à 925 hPa para a configuração I e INAM (em  $m/s$ )

Dias		03.04	04.04	05.04	06.04	07.04	08.04
Pebane	MM5	2.4	5.9	6.2	6.0	4.5	4.1
	INAM	-	-	-	-	-	-
	ERRO	-	-	-	-	-	-
Quelimane	MM5	2.4	7.5	12.2	12.0	6.0	7.0
	INAM	9.0	11.7	10.2	11.7	17.5	7.5
	ERRO	6.6	4.2	2.0	0.3	11.5	7.5
Nampula	MM5	2.3	9.0	10.1	11.3	4.7	4.0
	INAM	10.3	14.0	13.7	12.0	8.3	8.7
	ERRO	8.0	5.0	3.6	0.7	3.6	4.7

indicam a ocorrência desta precipitação no dia 7 também em Nampula, tendo sido de  $124.2\text{ mm}$  (tabela 4.6).

Os erros médios absolutos para a precipitação são de  $5.8\text{ mm}$ ,  $11.4\text{ mm}$  e  $14.8\text{ mm}$ , respectivamente.

Tabela 4.6: Precipitação acumulada para a configuração I e INAM (em  $mm$ )

Dias		03.04	04.04	05.04	06.04	07.04	08.04
Pebane	MM5	0.0	0.0	33.8	38.3	38.6	40.3
	INAM	0.0	0.8	49.0	32.0	32.0	-
	ERRO	-	0.8	15.2	6.3	6.6	-
Quelimane	MM5	0.0	1.0	30.2	50.0	68.0	55.2
	INAM	0.3	0.0	0.0	30.0	81.6	58.6
	ERRO	-	1.0	30.2	20.0	13.6	3.4
Nampula	MM5	0.0	0.0	6.1	57.7	59.7	74.3
	INAM	0.0	0.0	0.0	45.0	124.2	69.0
	ERRO	-	0.0	6.1	12.7	64.5	5.3

#### 4.1.4 Análise da configuração II

As opções físicas usadas nesta configuração são:

Para a parametrização de nuvens optou-se pelo esquema de 'Kuo-Anthes' para os domínios de 180 km e 60 km e o modelo de 'Grell' para o de 20 km. Para a parametrização da camada limite planetária optou-se pelo modelo de MRF.

Para a humidade explícita foi activado o modelo 'warm rain', para a radiação usamos o modelo cloud-radiation e finalmente para a temperatura do solo também optou-se pelo modelo de 5 camadas, como mostra a tabela 4.7.

Tabela 4.7: Definição da configuração II usada nas simulações.

Config do domínio com três malhas com 15 níveis verticais			
Malhas	1	2	3
Números de pontos	38 X 31	61 X 52	100 X 64
Tamanho da Malha (km)	180	60	20
Passo no Tempo (s)	360	120	40
Aninhamento	two way	two way	two way
Parametrização Cumulus	Anthes-Kuo	Anthes-Kuo	Grell
Camada Limite (PBL)	MRF	MRF	MRF
Humidade Explícita	Warm rain	Warm rain	Warm rain
Radiação	nuvens	nuvens	nuvens
Temperatura no Solo	5 camadas	5 camadas	5 camadas

#### 4.1.5 Análise do desempenho da configuração II

Nesta parte é feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos usando a configuração II e os valores observados.

### Análise da pressão ao longo do tempo de simulação

De acordo com a tabela 4.8, o modelo prevê a pressão máxima de 1016.2 *hPa* em Quelimane no dia 4 de Abril e a pressão mínima de 1008.0 *hPa* pra Nampula no dia 6 de Abril.

O erro médio absoluto da pressão para Pebane e Quelimane é de 5.2 *hPa* e 5.0 *hPa*, respectivamente. Para Nampula, o erro é de 2.5 *hPa*.

Nesta configuração, também o modelo prevê pressões superiores às observadas.

Tabela 4.8: Pressão diária registada para configuração II e INAM (em *hPa*)

Dias		03.04	04.04	05.04	06.04	07.04	08.04
Pebane	MM5	1013.0	1015.4	1011.9	1013.8	1014.0	1014.2
	INAM	1010.6	1009.8	1007.1	1006.3	1008.1	-
	ERRO	2.4	5.6	4.8	7.5	5.9	-
Quelimane	MM5	1013.7	1016.2	1015.1	1015.6	1015.4	1014.8
	INAM	1011.4	1010.0	1009.6	1009.3	1009.8	1010.3
	ERRO	2.3	6.2	5.5	6.3	5.6	4.5
Nampula	MM5	1012.9	1015.5	1012.7	1008.0	1010.8	1013.5
	INAM	1012.0	1011.0	1010.9	1009.8	1009.6	1009.0
	ERRO	0.9	4.5	1.8	1.8	1.2	4.5

### Análise da Temperatura superficial ao longo do tempo da simulação

O modelo prevê para Pebane, nesta configuração, o mesmo valor de temperatura máxima ao longo de toda simulação, sendo este valor de 25.9°C e o valor da temperatura mínima prevista é de 22.3°C no dia 8 de Abril para Quelimane (tabela 4.9).

Os erros quadráticos médios em Pebane, Quelimane e Nampula são de 3.1°C, 3.4°C e 1.6°C, respectivamente.

O erro médio absoluto é o mesmo para Pebane e Quelimane sendo de 2.8°C e para Nampula é de 1.6°C.

Tabela 4.9: Temperatura diária registada para a configuração II e INAM (em °C)

Dias		03.04	04.04	05.04	06.04	07.04	08.04
Pebane	MM5	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9
	INAM	30.5	28.5	29.7	24.7	23.5	-
	ERRO	4.6	2.6	3.8	1.2	2.4	-
Quelimane	MM5	22.5	23.4	23.7	23.1	22.5	22.3
	INAM	28.1	27.6	27.8	23.6	23.2	24.2
	ERRO	5.6	4.2	4.1	0.5	0.7	1.9
Nampula	MM5	25.6	25.8	24.8	23.0	22.5	23.5
	INAM	27.0	26.0	24.3	25.9	24.6	24.0
	ERRO	1.4	0.2	0.5	2.9	2.1	0.5

#### Análise da Humidade Relativa ao longo do tempo de simulação

De acordo com os resultados da tabela 4.10, o modelo fornece para a humidade relativa um máximo de 99.9% na estação de Pebane dia 5 de Abril e Nampula nos dias 6 e 7 e por sua vez os dados do INAM dão o valor da máxima de 98% em Pebane no dia 6 de Abril.

Ao longo do tempo de simulação, os erros médios da humidade variam entre 2% a 15.9% para Pebane, Quelimane e Nampula.

#### Análise da Magnitude do Vento

Para esta variável, como mostra a tabela 4.11, não foi possível fazer análise para Pebane, pois não há dados do INAM. E para as outras estações, o modelo prevê um máximo de 19.3 m/s no dia 6 na estação de Nampula e por sua vez, a magnitude máxima do vento observada foi de 17.5 m/s no dia

Tabela 4.10: Humidade Relativa à 925 hPa para a configuração II e INAM (em %)

Dias		03.04	04.04	05.04	06.04	07.04	08.04
Pebane	MM5	75.3	91.5	99.9	95.7	90.5	92.7
	INAM	80.0	89.0	81.0	98.0	95.0	-
	ERRO	4.7	2.5	18.9	2.3	4.5	-
Quelimane	MM5	84.0	93.1	99.1	97.3	80.1	90.0
	INAM	86.0	86.0	88.0	95.0	95.0	95.0
	ERRO	2.0	7.1	11.1	2.3	14.9	5.0
Nampula	MM5	77.6	76.1	95.2	99.9	99.9	89.8
	INAM	83.0	83.0	88.0	84.0	86.0	92.0
	ERRO	5.4	6.9	7.2	15.9	13.9	2.2

7 de Abril em Quelimane.

O erro médio absoluto da magnitude do vento para as duas cidades, não difere muito, sendo de 6.2 *m/s* pra Quelimane e 6.4 *m/s* para Nampula.

Tabela 4.11: Magnitude de Vento à 925 hPa para a configuração II e INAM (em *m/s*)

Dias		03.04	04.04	05.04	06.04	07.04	08.04
Pebane	MM5	2.4	4.7	9.7	10.6	10.9	9.6
	INAM	-	-	-	-	-	-
	ERRO	-	-	-	-	-	-
Quelimane	MM5	2.4	5.0	5.2	5.6	5.7	6.8
	INAM	9.0	11.7	10.2	11.7	17.5	7.5
	ERRO	6.6	6.7	5.0	6.1	11.8	0.7
Nampula	MM5	2.3	3.2	12.1	19.3	14.5	13.2
	INAM	10.3	14.0	13.7	12.0	8.3	8.7
	ERRO	8.0	10.8	1.6	7.3	6.2	4.5

### Análise da Precipitação acumulada ao longo do tempo de simulação

Conforme a tabela 4.12, a precipitação máxima acumulada registada pelo modelo foi de 142.6 *mm* e verificou-se em Nampula no dia 8. Os dados observados indicam a ocorrência desta precipitação no dia 7 em Nampula, tendo sido de 124.2 *mm* (tabela 4.12).

O erro absoluto médio para Pebane, Quelimane e Nampula é de 4.3 *mm*, 7.5 *mm* e 18.9 *mm*, respectivamente.

Tabela 4.12: Precipitação acumulada para a configuração II e INAM (em *mm*)

Dias		03.04	04.04	05.04	06.04	07.04	08.04
Pebane	MM5	0.0	0.0	45.0	25.4	26.2	26.2
	INAM	0.0	0.8	49.0	32.0	32.0	-
	ERRO	-	0.8	4.0	6.6	5.8	-
Quelimane	MM5	0.0	2.0	2.2	55.0	75.0	60.2
	INAM	0.3	0.0	0.0	30.0	81.6	58.6
	ERRO	-	2.0	2.2	25.0	6.6	1.6
Nampula	MM5	0.0	0.0	4.4	75.6	118.9	142.6
	INAM	0.0	0.0	0.0	45.0	124.2	69.0
	ERRO	-	0.0	4.4	30.6	5.3	73.6

#### 4.1.6 Comparação dos campos de diferença entre as configurações I (de controlo) e a configuração II (em estudo)

Da análise feita aos campos de diferença da pressão ao nível médio do mar, constata-se que o ciclone é mais intenso na configuração II, pois a diferença é negativa ao longo do período de simulação, como ilustra a figura E.1.

A pressão é a variável que melhor mostra a trajectória dum ciclone, pois um

ciclone é um centro de baixas pressões.

Para a temperatura superficial, como mostra a figura F.1, a diferença não é muito acentuada o que significa que a configuração em estudo tem valores semelhantes que às de controlo.

No que diz respeito à humidade relativa, os campos de diferença mostram que a configuração de controlo é mais seca que a configuração em estudo, como mostra a figura G.1.

No que se refere à precipitação acumulada, os campos de diferença mostram que a diferença é negativa, o que significa que a configuração em estudo simula maior precipitação em relação à de controlo, principalmente nas áreas afectadas pelo ciclone, como é ilustrado na figura H.1.

# Capítulo 5

## Conclusões e Recomendações

### 5.1 Conclusões

O objectivo a que nos propusemos foi atingido, pois durante a elaboração da presente tese fez-se várias simulações com o propósito de se estudar a sensibilidade do modelo quanto à parametrização dos processos físicos e podemos comprovar que o modelo é bastante rico de alternativas que podem ser adoptadas para a nossa região.

Os dados produzidos pelo modelo referem-se ao domínio com uma resolução de 20 km, pois no caso foi o de maior resolução.

Constatou-se no estudo que os valores obtidos pelo modelo são fiáveis, pois, tanto a configuração I como a configuração II, simulam bem a trajectória do ciclone em estudo.

A pressão é a variável mais controlada pelos fenómenos de escala sinóptica e é portanto a variável mais sensível ao tempo de simulação. A humidade relativa e a temperatura são também controladas por esta escala. O vento é uma variável controlada pelas condições locais.

A configuração I é melhor em todas as variáveis excepto na previsão da precipitação acumulada onde análise não é conclusiva.

## 5.2 Recomendações

Apesar do modelo ter produzido resultados aceitáveis, torna-se imperiosa a continuação de mais estudos de sensibilidade quanto às opções físicas e a resolução horizontal para uma melhor calibração do modelo.

Recomenda-se a utilização deste modelo no estudo de mais casos históricos com vista a validação do mesmo e posterior uso na previsão numérica em tempo real pelo INAM.

## Bibliografia

- [1] Anthes, R., Warner, T., 1977: A Cumulus Parametrization Scheme utilizing a one-dimensional Cloud Model. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 270-286.
- [2] Arakawa, A., Schubert, W., 1973: Interaction of a Cumulus Cloud Ensemble with the Large-Scale Environment, *Part I. Journal of the Atmospheric Science*, Vol. 31, 674-701.
- [3] Betts, A., Miller, M., 1986: A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 112, pp 693-709.
- [4] Betts, A., 1986: A new convective adjustment scheme. Part I: Observational and theoretical basis. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 112, pp 677-691.
- [5] Blackadar, A., 1996: *Turbulence and Diffusion in the Atmosphere*. Springer, 185 pp.
- [6] Burk, S., Thompson, T., 1988: A vertically nested regional numerical weather prediction model with second-order closure physics. *Monthly Weather Review*, 117, 2305-2324.
- [7] Cotton, W., Anthes, R., 1989: *Storm and Cloud Dynamics*. Academic Press.
- [8] Cox, R., Bauer, B., Smith, T., 1998: A Mesoscale Model Intercomparison. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 79, No. 2, 265-283.

- [9] Doty, B., 1995: GrADS, the Grid Analysis and Display System.
- [10] Dudhia, J., 1993: A Nonhydrostatic Version of the Penn State-NCAR Mesoscale Model: Validation Test and Simulation of an Atlantic Cyclone and Cold Front. *Monthly Weather Review*, 121, 1493-1513.
- [11] Dudhia, J., Gill, D., Guo, Y., Manning, K., Wang, W., Chiszar, J., 2000: Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3, PSU/NCAR.
- [12] Grell, G., Kuo, Y., 1991: Semiprognostic Tests of Cumulus Parametrizations Schemes in the Middle Latitudes. *Mon. Wea. Rev.*, 119, 5-31.
- [13] Grell, G., 1993: Semi-prognostic tests of cumulus parametrizations schemes in the middle latitudes. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 764-787.
- [14] Grell, G., Dudhia, J., Stauffer, D., 1995: A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR TECHNICAL NOTE.
- [15] Holton J., 1992: An Introduction to Dynamic Meteorology. Academic Press.
- [16] Hong, S., Pan, H., 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2322-2339.
- [17] Janjic, Z., 1994: The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Clousure Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927-945.
- [18] Kain, J., Fritsch, J., 1993: Convective parameterizations for mesoscale models: The Kain.Fritsch Scheme. The representation of cumulus convection in numerical models. K. Emanuel and D. Raymond. Eds., Amer. Meteor. Soc., 246 pp.

- [19] Mass, F., Ovens, D., Westrik, K, Colle, B., 2002: Does Increasing Horizontal Resolution Produce more Skillful Forecasts? *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 83, No.3, pp. 407-430.
- [20] Mellor, G., Yamada, T., 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31, 1791-1806.
- [21] Oetiker, T., Partl, H., Hyna, I., Schlegl, E., 2001: The Not So Short Introduction to  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ , Version 3.20.
- [22] Pielke, R., 2002: *Mesoscale Meteorological Modeling*. Academic Press.
- [23] Stull, R., 2000: *Meteorology for Scientists and Engineers*. 2nd Edition Brooks/Cole.
- [24] White, B, Paegle, J., Steenburgh, W., Horel, J., Swanson, R., Cook, L., Onton, D., Miles, J., 1998: Short-Term Forecast Validation of Six Models. *Weather and Forecasting*: Vol. 14, No. 1, pp. 84-108.
- [25] <http://www.ems.psu.edu/bryan/mm5/grads>: *GrADS Utilities For MM5*
- [26] *NWP Course-Numerical Weather Prediction*  
(<http://meted.ucar.edu/nwp/course>)
- [27] <http://www.solar.ifa.hawaii.edu>
- [28] <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/All.html>

# Apêndice A

## Cálculo de erros

Os cálculos de erros foram feitos com base nas seguintes fórmulas:

- O erro médio (modelo - observado) ( $\delta x_i$ ) usando a fórmula:

$$\delta x_i = |x_i - x_{oi}| \quad (\text{A.1})$$

- O erro médio absoluto (MAE) ( $\delta x$ ), durante os cinco dias de simulação:

$$\delta x = \frac{\sum_{k=i}^N (x_i - x_{oi})}{N} \quad (\text{A.2})$$

- O raiz do erro quadrático médio (RMSE) ( $\sigma$ ), cuja fórmula a seguir se apresenta:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=i}^N (x_i - x_{oi})^2}{N}} \quad (\text{A.3})$$

Onde:

$x_{oi}$  é o valor diário observado do INAM.

$x_i$  é o valor diário previsto pelo modelo.

$N$  é o número de medições feitas.

## Apêndice B

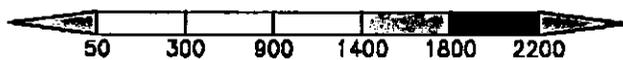
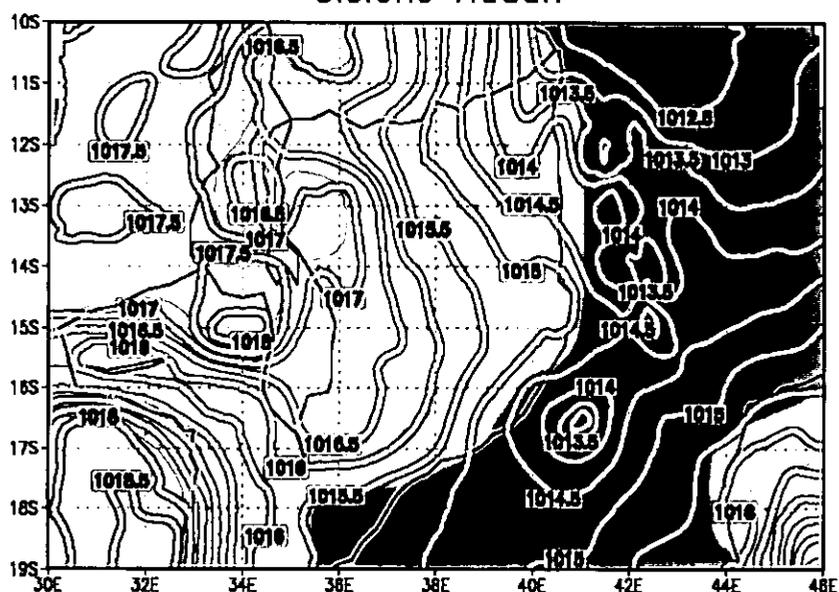
Mapas de pressão ao nível do  
mar

VALIDO 00Z 04 Abril 00

24H-Previsao

Pressao ao nivel do mar (hPa) e config. do terreno (metros)

### Ciclone Hudah



GRADS: COLA/IGES

Figura B.1: Entrada do ciclone no Canal de Moçambique.

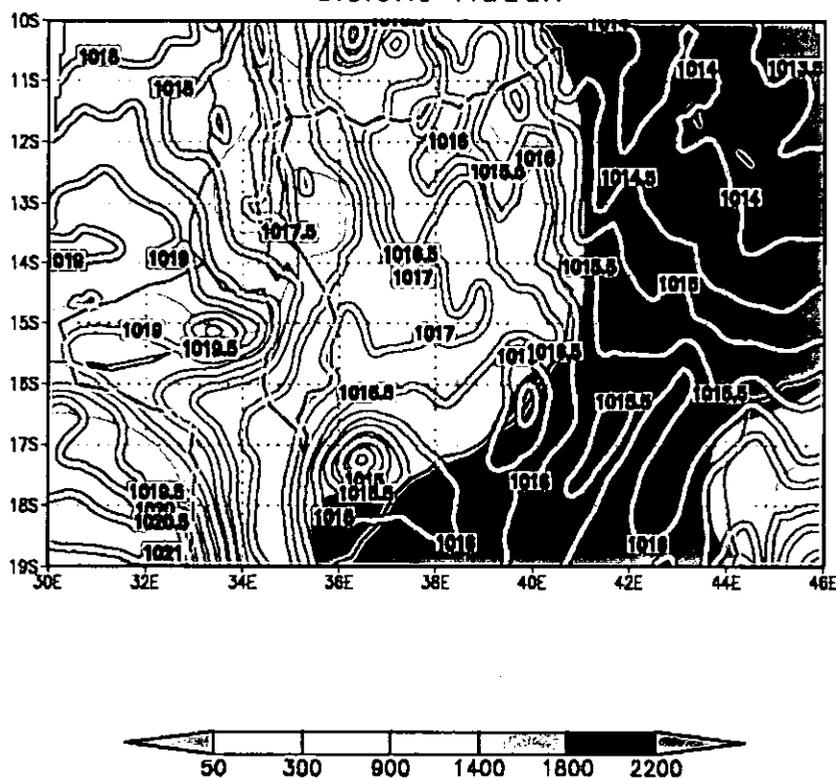


VALIDO 00Z 06 Abril 00

72H-Previsao

Pressao ao nivel do mar (hPa) e config. do terreno (metros)

## Ciclone Hudah



GRADS: COLA/IGES

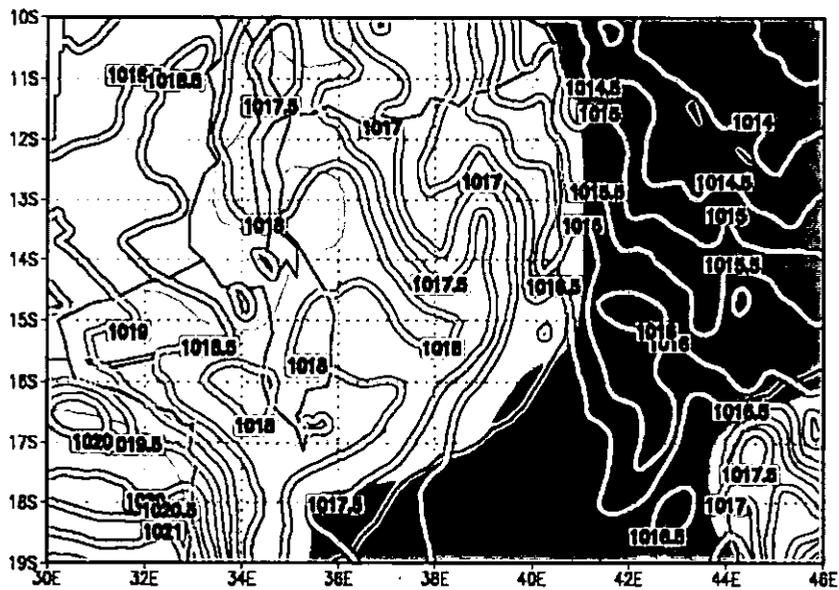
Figura B.3: "Landfall" do ciclone no distrito de Maganja da Costa e Gilé. A acção do ciclone Hudah no interior de Moçambique durou menos de 48 horas.

VALIDO 00Z 07 Abril 00

96H-Previsao

Pressao ao nivel do mar (hPa) e config. do terreno (metros)

## Ciclone Hudah



GRADS: COLA/IGES

Figura B.4: Enfraquecimento do ciclone devido ao atrito com as regiões montanhosas do interior e a falta de humidade.



Apêndice C

Mapas de temperatura  
superficial

VALIDO 00Z 03 Abril 00

OH-Previsao

Temperatura superficial(C) e config. do terreno (metros)

## Ciclone Hudah

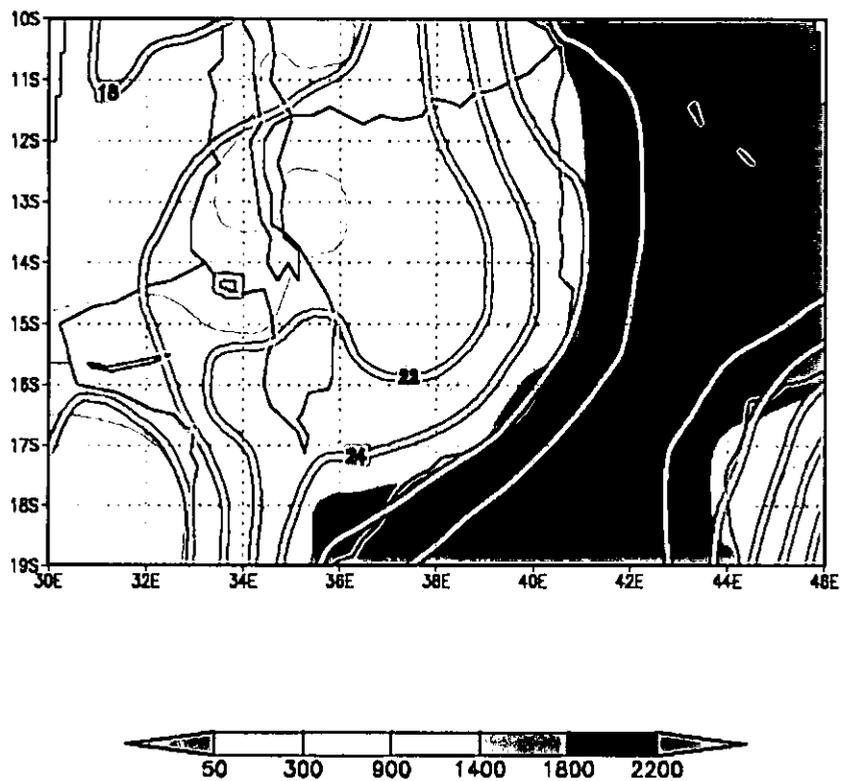


Figura C.1: Os 28 °C no Canal de Moçambique favorecem à intensificação do ciclone

## Apêndice D

Mapas diários de precipitação e  
ventos à 925 hPa

VALIDO 00Z 07 Abril 00

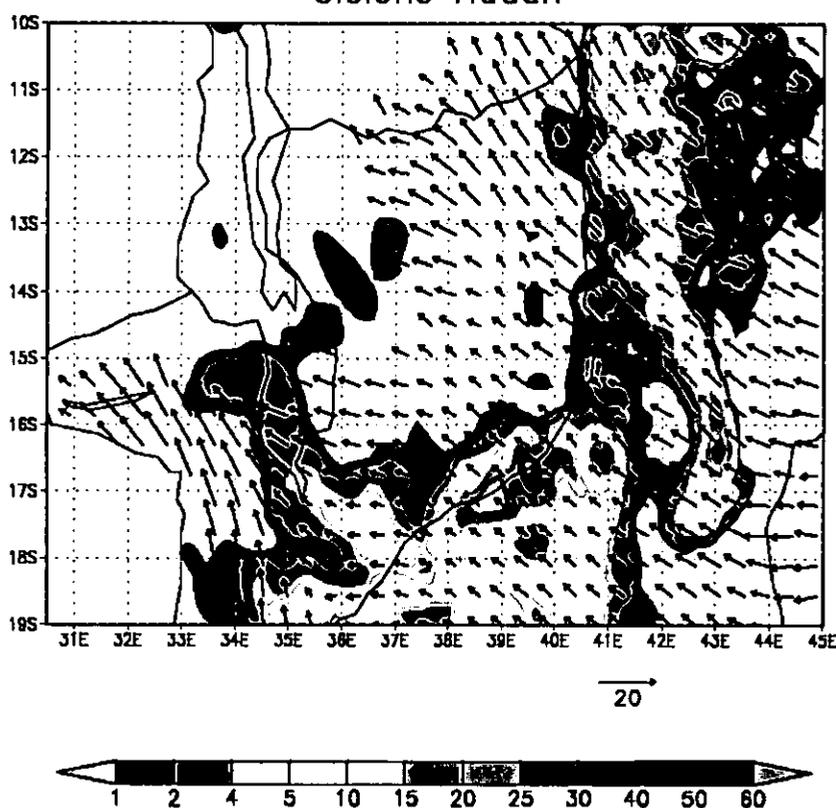
96h - Previsao

Precipitacao total(cm)

e

Ventos(m/s)

## Ciclone Hudah



GRADS: CGLA/IGES

Figura D.1: A acção do ciclone Hudah no interior do país durou menos de 48 horas, mas as chuvas e ventos fortes persistem por mais alguns dias causando enormes estragos.

VALIDO 00Z 08 Abril 00

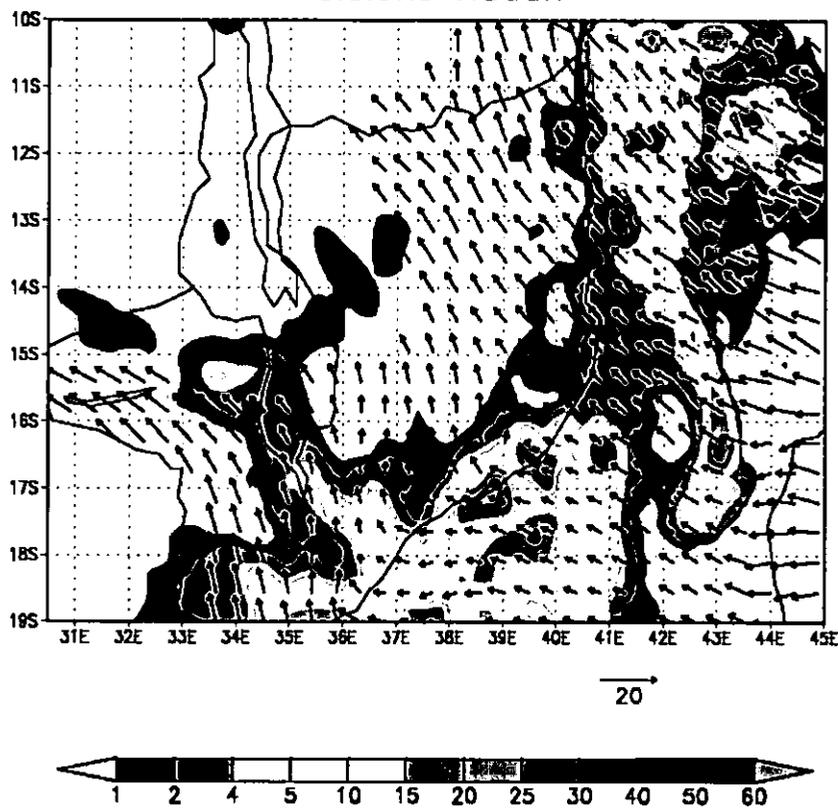
120h - Previsao

Precipitacao total(cm)

e

Ventos(m/s)

### Ciclone Hudah



GRADS: COLA/IGES

Figura D.2: Precipitação e ventos no dia 8 de Abril de 2000

## Apêndice E

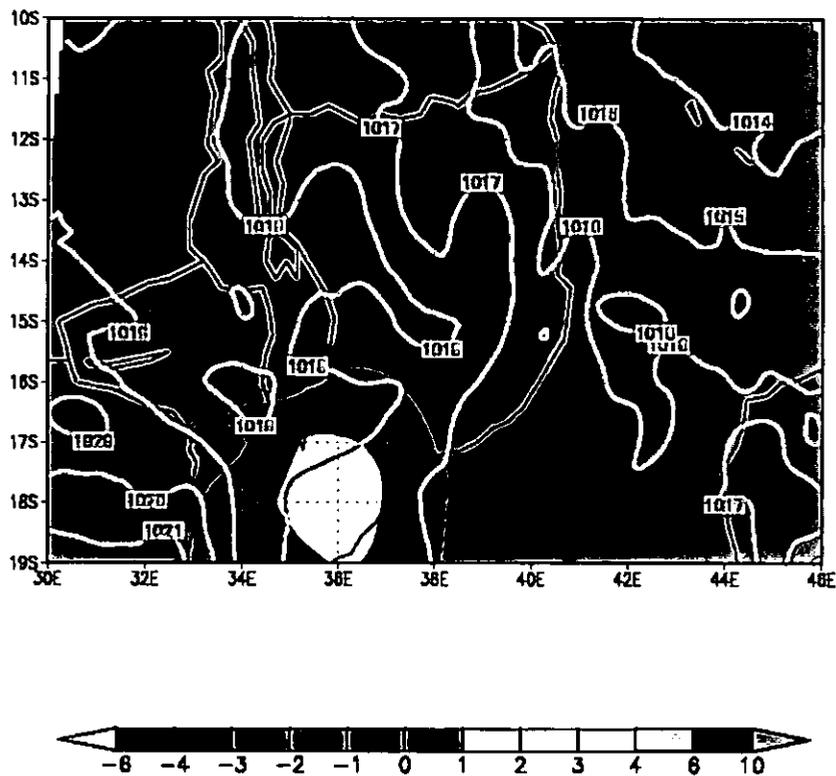
Mapas de campos de diferença  
da pressão ao nível médio do  
mar

VALIDO 00Z 07 ABRIL 00

96H-Previsao

Campos de diferenca entre a config. I e config.II  
Pressao ao nivel do mar (hPa)

## Ciclone Hudah



GRADS: COLA/IGES

Figura E.1: Ciclone Hudah: diferenca entre a configuracao de controlo (configuracao I) e configuracao II.

## Apêndice F

Mapas de campos de diferença  
da temperatura superficial

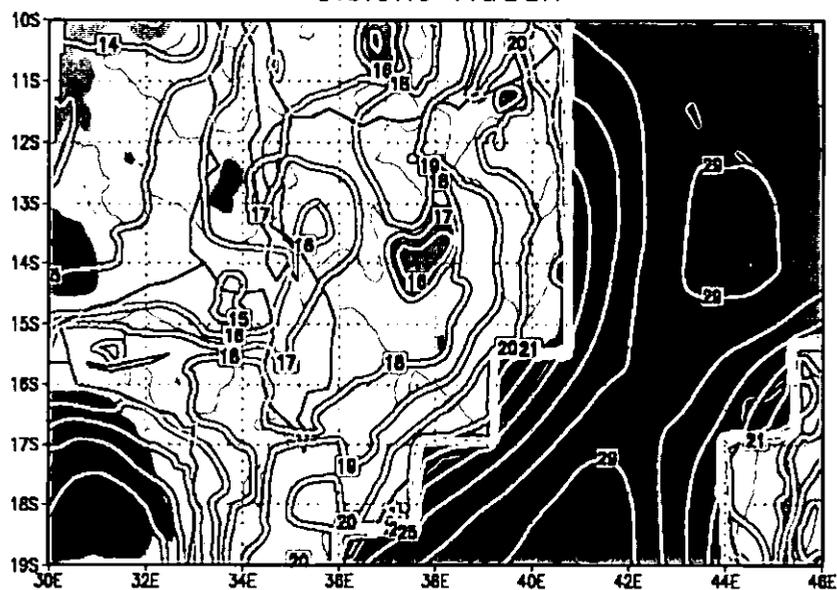
VALIDO 00Z 07 ABRIL 00

96H-Previsao

Campos de diferenca entre a config. I e config.II

Temperatura superficial (°C)

## Ciclone Hudah



GRADS: COLA/IGES

Figura F.1: Ciclone Hudah: diferenca entre a configuracao de controlo (configuracao I) e configuracao II.

## Apêndice G

Mapas de campos de diferença  
da humidade relativa

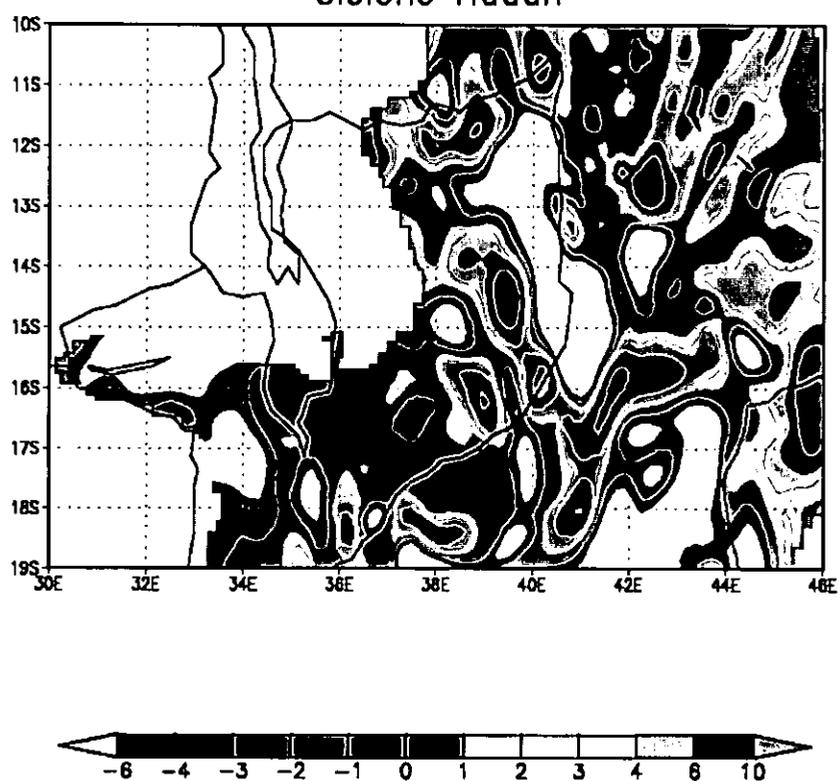
VALIDO 00Z 05 ABRIL 00

48H-Previsao

Campos de diferenca entre a config. I e config.II

Humidade relativa a 925 hPa (em %)

## Ciclone Hudah



GRADS: COLA/IGES

Figura G.1: Ciclone Hudah: diferenca entre a configuracao de controlo (configuracao I) e configuracao II.

## Apêndice H

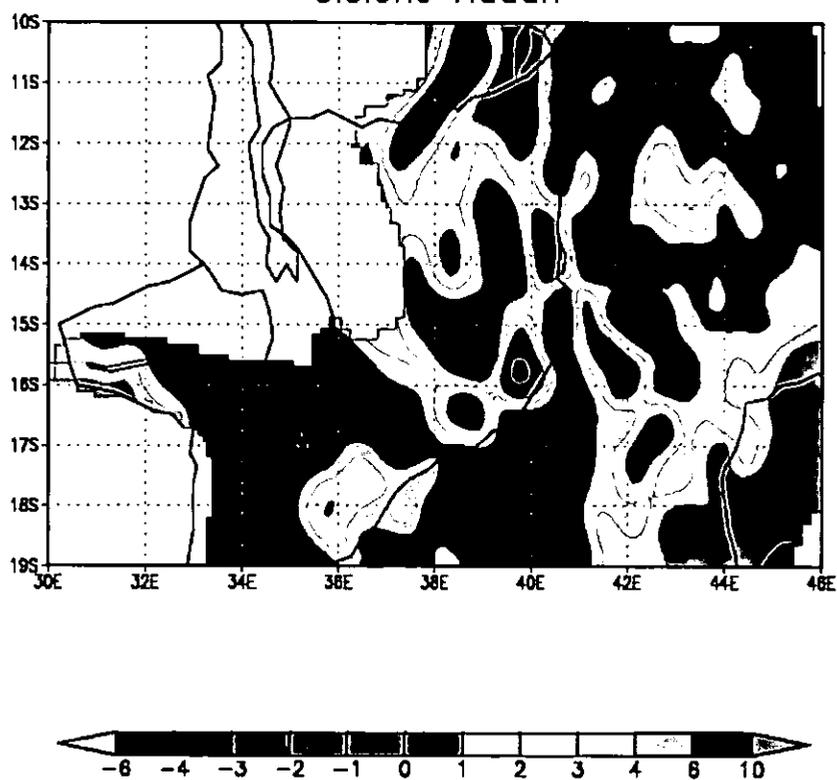
Mapas de campos de diferença da precipitação acumulada

VALIDO 00Z 07 ABRIL 00

96H-Previsao

Campos de diferenca entre a config. I e config.II  
Precipitacao acumulada (em cm)

## Ciclone Hudah



GRADS: COLA/IGES

Figura H.1: Diferença entre a configuração de controlo (configuração I) e configuração II.