

Fis 58



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**Faculdade de Ciências**

**Departamento de Física**

Trabalho de Licenciatura

*Elaboração de um Atlas de Ventos para Moçambique usando o modelo Regional  
do Clima RegCM*

Autor: Izidine Pinto



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**Faculdade de Ciências  
Departamento de Física**

Trabalho de Licenciatura

*Elaboração de um Atlas de Ventos para Moçambique usando  
o modelo Regional do Clima RegCM*

**Autor:** Izidine Pinto

**Supervisor:** dr. Genito A. Maúre

**Co-supervisor:** Prof Doutor Boaventura Cuamba

Maputo, Maio de 2008

# Declaração de Honra

Declaro por minha honra que este trabalho foi realizado com base no material a que se faz referência ao longo do mesmo e que não foi submetido para nenhum outro grau que não seja o indicado, licenciatura em Meteorologia, na Universidade Eduardo Mondlane. As ideias originais nele expressas são da inteira responsabilidade do autor.

O Autor

.....

(Izidine S. de Sousa Pinto)

*Em memória à  
Gerodina Chare*

# Agradecimentos

- Especiais agradecimentos aos meus supervisores dr. Genito A. Maúre e Prof Boaventura Cumba pela proposta do tema, pelos ensinamentos e principalmente pela compreensão, paciência e aceitação das minhas limitações como estudante e como ser humano depositando em mim confiança e me despertando interesse na área de modelação numérica.
- Ao dr. Arlindo Meque que, atenciosamente dedicou muito do seu pouco tempo à implementação deste trabalho e pelos ensinamentos.
- Ao Sr. Nelson Chamba pela disponibilidade em configurar o servidor no Centro de Informática de modo a permitir que o modelo fosse instalado e corrido de forma remota.
- A todos os professores e trabalhadores do Departamento de Física pela sua contribuição directa e indirecta na minha formação.
- À minha mãe, pelo seu esforço e dedicação e principalmente por ter sabido compreender o valor da educação.
- Ao meu irmão Aires e cunhada Márcia, pelo amor, apoio, carinho e por acreditarem em mim, sempre!
- Aos meus irmãos, pelo carinho e incentivo, sempre.
- Aos meus colegas e amigos que sempre estiveram presentes e que me apoiaram em todos os momentos, em especial ao dr. António Beleza, Danilo Jumá, Ismael Ismael, Daly Aliane, Paulino Muguirrima, Sandra Zefanias, José Sequeira, Alexandre Tique.
- A todos que me ajudaram de alguma forma na realização deste trabalho e que penosamente não estão sendo citados nominalmente.
- A todos os obstáculos enfrentados ao longo deste trabalho por me terem ajudado a crescer.

## Lista de abreviaturas

BATS	-	Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme
CCM3	-	Community Climate Model 3
CLP	-	Camada Limite Planetária
GB	-	Gigabyte ( $1,024 \times 10^9$ bytes)
GLCC	-	Global Land Cover Characterization
GrADS	-	Grid Analysis and Display System
GRIB	-	Gridded Binary Data Format
HDD	-	Hard Disk Driver
HDF-SDS	-	Hierarchical Data Format - Scientific Data Set
INAM	-	Instituto Nacional de Meteorologia
MCGA	-	Modelo de Circulação Geral da Atmosfera
MCR	-	Modelo de Circulação Regional
MDL	-	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MM4	-	Mesoscale Model version 4
NCAR	-	National Center for Atmospheric Research
NCEP	-	National Center for Environment Prediction
NetCDF	-	network Common Data Form
NORMER	-	Standard Mercator
RAM	-	Random Access Memory
RegCM	-	Regional Climate Model
RegCM3	-	Regional Climate Model version 3
SAPP	-	The Southern African Power Pool
SUBEX	-	Sub-grid Explicit Moisture Scheme
TB	-	Terabyte (1024 GB)
USGS	-	United States Geological Survey
VI	-	Editor Visual
WRF	-	Weather Research and Forecasting

# Símbolos

$\phi$	-	altura geopotencial
$\text{CO}_2$	-	Dióxido de Carbono
$c_{pm}$	-	calor específico do ar a pressão constante
$f$	-	parâmetro de <i>Coriolis</i>
$F_V$ e $F_H$	-	representam o efeito da difusão vertical e horizontal do ar
$p_s$	-	pressão à superfície
$p_t$	-	pressão no topo
$Q$	-	calor diabático
$q_c$	-	razão de mistura de água líquida ou gelo em nuvens
$q_r$	-	razão de mistura de água de chuva ou neve
$q_v$	-	razão de mistura do vapor de água
$T_v$	-	temperatura virtual
$u$ e $v$	-	componentes zonal e meridional do vento
$\omega$	-	velocidade vertical no sistema de pressão

# Resumo

O projecto de Atlas de Ventos de Moçambique foi levado a cabo pelo Departamento de Física da Universidade Eduardo Mondlane com o objectivo principal de avaliar o potencial eólico do País baseado em simulação computacional da atmosfera. A metodologia baseia-se na redução dinâmica (*dynamical downscaling*) de 5 anos de dados do Projecto Reanalysis II (do NCEP/NCAR) pelo modelo climático RegCM para todo o País. Este é o método mais apropriado para o presente caso em que os dados observados nas estações meteorológicas não têm continuidade espacial e/ou temporal para todo o País. Os resultados do trabalho contém a informação fundamental acerca dos recursos eólicos de Moçambique, estabelecendo a referência mais actual para estudos, planeamento e projectos a partir desta fonte energética. Adicionalmente, espera-se que as informações aqui contidas possam subsidiar estudos de outras áreas, tais como arquitectura, agronomia, biologia e ciências ambientais.



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução e Objectivos</b>	<b>4</b>
1.1	Introdução . . . . .	4
1.2	Objectivos . . . . .	6
1.2.1	Gerais . . . . .	6
1.2.2	Específicos . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>7</b>
2.1	Circulação Geral da Atmosfera . . . . .	7
2.1.1	A camada-limite planetária . . . . .	7
2.1.2	Topografia . . . . .	9
2.2	Modelos Climáticos . . . . .	10
2.3	Processo de redução de escala . . . . .	10
2.3.1	Redução dinâmica . . . . .	11
2.3.2	Redução estatística . . . . .	11
2.4	O modelo RegCM . . . . .	11
2.4.1	Grelha Horizontal e Vertical do Modelo RegCM . . . . .	12
2.4.2	Projecções e factores de escala . . . . .	13
2.4.3	Parametrizações Físicas . . . . .	14
2.4.4	Equações do modelo na forma diferencial . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Material e Métodos</b>	<b>19</b>
3.1	Material . . . . .	19
3.1.1	Hardware e Software . . . . .	19
3.1.2	Dados . . . . .	19
3.2	Características da área de estudo . . . . .	21
3.2.1	Comportamento do vento em Moçambique . . . . .	22
3.3	Métodos . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>25</b>
4.1	Simulações Climáticas . . . . .	25
4.2	Observações . . . . .	31
<b>5</b>	<b>Conclusões e Recomendações</b>	<b>34</b>
5.1	Conclusões . . . . .	34
5.2	Recomendações . . . . .	35
<b>A</b>	<b>Médias anuais</b>	<b>39</b>

<b>B</b>	<b>Cálculo de Erros</b>	<b>41</b>
<b>C</b>	<b>Gráficos e tabelas de cálculos de erros para as estações em estudo</b>	<b>42</b>
C.1	Estação de Pemba . . . . .	42
C.2	Estação de Lichinga . . . . .	43
C.3	Estação de Quelimane . . . . .	44

# Lista de Figuras

2.1	Representação esquemática da estrutura vertical do modelo . . . . .	12
2.2	Representação esquemática da grelha horizontal do modelo . . . . .	13
3.1	Dados topográficos em metros. . . . .	20
3.2	Média da direcção do vento para um período de cinco anos . . . . .	23
3.3	Domínio usado para correr o modelo . . . . .	24
4.1	Velocidade média sazonal (m/s) a 10m Dez-Fev . . . . .	26
4.2	Velocidade média sazonal (m/s) a 10m Mar-Mai . . . . .	26
4.3	Velocidade média sazonal (m/s) a 10m Jun-Ago . . . . .	26
4.4	Velocidade média sazonal(m/s) a 10m Set-Nov . . . . .	26
4.5	Variabilidade sazonal de ventos a 10m Dez-Fev . . . . .	28
4.6	Variabilidade sazonal de ventos a 10m Mar-Mai . . . . .	28
4.7	Variabilidade sazonal de ventos a 10m Jun-Ago . . . . .	28
4.8	Variabilidade sazonal de ventos a 10m Set-Nov . . . . .	28
4.9	Velocidade média dos ventos (m/s) a 10m num período de cinco anos (1999-2003) . . . . .	30
4.10	Comparação da velocidade do vento para estação de Pemba . . . . .	31
4.11	Comparação da velocidade do vento para estação de Lichinga . . . . .	32
4.12	Comparação da velocidade do vento para estação de Quelimane . . . . .	32
A.1	Velocidade média dos ventos a 10m no ano de 1999 . . . . .	39
A.2	Velocidade média dos ventos a 10m no ano de 2000 . . . . .	39
A.3	Velocidade média dos ventos a 10m no ano de 2001 . . . . .	40
A.4	Velocidade média dos ventos a 10m no ano de 2002 . . . . .	40
A.5	Velocidade média dos ventos a 10m no ano de 2003 . . . . .	40
C.1	Recta de regressão para estação de Pemba . . . . .	43
C.2	Recta de regressão para estação de Lichinga . . . . .	44
C.3	Recta de regressão para estação de Quelimane . . . . .	45

# Capítulo 1

## Introdução e Objectivos

### 1.1 Introdução

Moçambique tem estado a verificar níveis de desenvolvimento bastante acelerados nos últimos tempos através de reformas económicas que permitem a implantação de diversas formas de indústria no país. Porém, um factor que infelizmente poderá refrear o crescimento económico é a disponibilidade de energia eléctrica para a implementação de mais projectos de investimento industrial. Exemplos desses projectos podem ser Areias Pesadas de Chibuto e Mozal III (Bucuane e Mulder, 2007).

Com a reversão da Hidroeléctrica de Cahora Bassa para Moçambique, os projectos da Barragem de Mpanda Nkua e o de Cahora Bassa Norte, tornarão Moçambique num dos maiores produtores de energia eléctrica na região, podendo assim ser a solução dos problemas resultantes do crescente consumo de energia eléctrica pela região. É preciso recordar que Moçambique faz parte do *The Southern African Power Pool* (SAPP), um organismo criado com o objectivo de prover electricidade fiável, economicamente viável e ambientalmente sã para os consumidores de cada país membro.<sup>1</sup>

Moçambique é subscritor do Protocolo de Kioto [veja-se, por exemplo, Manne e Richels (2000) ou Carraro (2000)]. Um arranjo dentro deste protocolo é o chamado *Mecanismo de Desenvolvimento Limpo* (MDL), que incentiva países industrializados com compromissos de redução de emissões de gases de efeito de estufa, invistam em tecnologias "mais limpas" em países em vias de desenvolvimento [veja-se, por exemplo, (WorldBank, 2004)]

Uma forma de energia "limpa" de que o país pode beneficiar dada a sua localização geográfica costeira é a energia eólica. Para além desta não ser nociva ao ambiente, a sua implantação em qualquer região, quer seja rural ou urbana, não requer avultados investimentos financeiros ligados ao transporte, dado ser produzida localmente. Assim, um mapa de recursos eólicos é um pré-requisito para se considerar a possibilidade de utilização deste tipo de energia (Glazer et al., 2005).

---

<sup>1</sup>São membros da SAPP Moçambique, África do Sul, Angola, Botswana, Lesotho, Swazilândia, Namíbia, República Democrática do Congo, Malawi, Zimbabwe, Zambia, Tanzania

Moçambique é um país com cerca de 799 380 km<sup>2</sup> de área cujo potencial eólico é praticamente desconhecido, como consequência de factores como a não uniformidade da distribuição espacial das estações meteorológicas existentes no país, bem como a descontinuidade temporal dos dados nas estações de observação existentes. Estes factores ditam a que o recurso à interpolação de dados colectados nestas estações meteorológicas seja rejeitado como método para a elaboração de um atlas nacional de ventos que seja utilizado pela indústria eólica de forma eficaz.

Idealmente, o estudo do potencial eólico de uma área deve ser feito através de medições *in situ*. Porém, este processo é demasiado dispendioso, considerando o número de estações necessárias para cobrir uma extensa área como Moçambique, e do longo período de tempo de colecta de dados para uma boa amostragem, que pode variar de 5 a 30 anos dependendo do nível de precisão que se pretende [veja-se Isaac e Lam (2000) ou Hua e Ghajar (1996) ou Borowy e Salameh (1996)], para além de requerer pessoal especializado para instalação e calibração dos instrumentos, colecta, processamento e análise dos dados (Feitosa et al., 1999).

Uma ferramenta que tem sido proposta nos últimos anos pela comunidade científica mundial é o uso de modelos atmosféricos de mesoescala para a predição das características dos ventos à superfície, com recurso à redução dinâmica de dados obtidos a partir de modelos de circulação geral da atmosfera (MCGA), isto é, dados de uma escala resultantes dos MCGA (entre 300 km a 110 km) que cobrem o globo terrestre são reduzidos a uma rede de resolução menor ( $\simeq$  60km a 20 km) através de um modelo regional de clima.

As grandes vantagens desta ferramenta são o custo financeiro bastante reduzido para sua implementação e o tempo necessário para a obtenção dos resultados ser bastante curto em comparação ao tempo que seria necessário para instalar, calibrar, armazenar leituras desta (Feitosa et al., 1999). Deve-se aqui acrescentar que para se mapear os ventos num país com a extensão de Moçambique com resolução de 60 km  $\times$  60 km, numa aproximação linear, seriam necessárias  $\frac{799380 \text{ km}^2}{360 \text{ km}^2} \sim 222$  estações de observação.

Visto que em Moçambique não se tem nenhum conhecimento do potencial eólico nacional, a aplicação desta ferramenta contribui para a primeira fase do mapeamento eólico do país, disponibilizando assim informação útil à comunidade técnica e científica, considerando que o vento tem o interesse multidisciplinar nas ciências ambientais, agrárias, da arquitectura e planeamento urbano, engenharia de edificações, aeronáutica e muitas outras áreas e actividades humanas.

Este atlas vai servir para dar uma ideia de âmbito nacional sobre os locais de interesse para pro-

váveis projectos de energia eólica para Moçambique.

## **1.2 Objectivos**

### **1.2.1 Gerais**

O presente trabalho visa a elaboração de um Atlas de Ventos para Moçambique com recurso ao *downscaling* dinâmico de dados globais através do uso do modelo regional de clima RegCM de modo a fazer uma avaliação do potencial energético eólico do país.

### **1.2.2 Específicos**

- Correr o modelo para o intervalo de 5 anos;
- Comparar os resultados do modelo com observações onde possível para validar o modelo regional;
- Mapear os resultados obtidos para ventos de superfície, isto é, a 10 metros de altura da superfície;
- Identificar através dos mapas as áreas de maior intensidade climatológica de ventos;
- Identificar as áreas mais promissoras para futuros estudos de viabilidade e optimização de investimentos na área de energia eólica.

## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

#### 2.1 Circulação Geral da Atmosfera

A circulação atmosférica ocorre em diferentes escalas de espaço e tempo, apresentando desde turbilhões convectivos com diâmetros da ordem de centímetros e duração de segundos até circulações de grande escala com diâmetros de milhares de quilômetros e duração de semanas.

Os ventos na atmosfera se originam basicamente pelo aquecimento desigual da superfície da terra. A radiação solar absorvida pelo solo ou água é transferida para o ar por condução, causando diferenças na temperatura do ar próximo a superfície. Este aquecimento desigual, que altera a densidade e pressão do ar, provoca o movimento ascendente do ar mais aquecido e menos denso na superfície. O ar nas camadas superiores, mais frio e denso, tende a descer para a superfície gerando uma célula de circulação.

##### 2.1.1 A camada-limite planetária

Na atmosfera não são encontrados limites físicos de qualquer espécie. Apenas determinadas camadas podem apresentar certas propriedades de uma maneira mais acentuada que outras. No entanto a variação entre elas é sempre gradual. Quando se leva em conta o efeito que a superfície terrestre provoca no movimento do ar, costuma-se dividir a atmosfera em duas regiões:

- a camada-limite planetária, justaposta à superfície terrestre, cuja rugosidade natural (provocando atrito) afeta profundamente o escoamento do ar;
- e a atmosfera livre, mais acima, onde se admite que o escoamento não sofre a influência directa da presença da superfície (escoamento sem atrito).

Essa discriminação é empírica, já que a influência da rugosidade natural da superfície da Terra sobre o ar em movimento, diminui progressivamente com a altura e, portanto, não só não pode existir uma separação nítida entre essas camadas, como, ainda, a espessura da primeira vai depender do grau de aspereza da superfície subjacente e da própria velocidade do ar que sobre ela escoar.

Além da influência do atrito, deve-se adicionar o efeito gerado pelo aquecimento do ar em contacto com a superfície, o qual desencadeia movimentos convectivos, complicando bastante o campo do escoamento do ar próximo à superfície. Nessa camada, o efeito da aceleração de Coriolis é insignificante, quando comparado àquele decorrente do atrito. A camada-limite planetária é normalmente dividida em três subcamadas: a subcamada laminar, a camada-limite superficial e a camada de Ekman (Silva, 2005).

#### **A subcamada laminar**

Quando se estuda o movimento de fluidos em contacto com superfícies planas, costuma-se admitir a existência de uma delgada camada (com, no máximo, poucos milímetros de espessura), onde o escoamento é lento e tipicamente laminar (não há turbulência alguma). Essa zona é referida como subcamada laminar e sua presença é observável sobre superfícies lisas, em condições de vento muito fraco.

#### **A camada-limite superficial**

Na camada-limite superficial o vento é fortemente influenciado pelo gradiente de pressão e pela presença da superfície terrestre.

Mesmo sob condições de vento muito forte, a espessura da camada-limite superficial não excede aos 150 m. Nela as componentes da velocidade do ar, em cada nível, apresentam intensas flutuações em todas as escalas temporais (segundos, minutos etc.) e espaciais (cm, m etc.). Tais flutuações, estão associadas à presença de turbilhões (vórtices) que caracterizam o estado de agitação (turbulência) do ar. O movimento turbulento é muito eficiente em difundir vapor d'água, calor, poluentes etc., pois denuncia um processo de constante mistura.

A turbulência que se verifica na camada-limite superficial, identificada pela acentuada oscilação da velocidade do vento em cada nível, resulta da acção combinada de duas contribuições: da agitação mecânica do ar e da convecção.

A agitação mecânica advém do atrito do ar com a superfície, aumenta com a velocidade do vento e é normalmente referida como turbulência mecânica. A convecção, consequência do aquecimento do ar em contacto com a superfície subjacente, origina correntes ascendentes (quentes) e subsidentes (frias). O efeito do aquecimento tem um ciclo diário, relacionado com o suprimento energético de



origem solar.

Próximo da superfície terrestre predomina a turbulência mecânica. Progressivamente, porém, à medida que a altura aumenta, a convecção torna-se a principal causa da turbulência. Na camada-limite superficial, por conseguinte, a estrutura do vento é condicionada pela natureza da superfície e pelo gradiente vertical de temperatura do ar (Sutton, 1953)

### **A camada de Ekman**

Situada acima da camada-limite superficial, a camada de Ekman corresponde a uma zona de transição entre a porção inferior (turbulenta) e a atmosfera livre. Seu limite superior, sobre o oceano, quase sempre, oscila entre 500 e 1000 m de altura; sobre o continente, em situações de vento muito forte e dependendo da topografia, pode alcançar 3000 m.

Na camada de Ekman, o efeito do atrito é menor e não se podem desprezar as influências da aceleração de Coriolis (exceto próximo ao equador), do gradiente de pressão e tampouco da convecção. O vento aumenta de velocidade com a altura e muda gradualmente de direção, de modo que sua projecção, eventualmente, tende a assumir o aspecto de uma espiral (espiral de Ekman).

### **2.1.2 Topografia**

O vento próximo a superfície terrestre é fortemente influenciado pela natureza da superfície do terreno, a descrição detalhada é chamada de topografia. Para os propósitos da energia eólica, com o fluxo do vento de 10 a 200 metros acima da superfície, os efeitos da topografia podem ser divididos em três categorias (Troen e Petersen, 1989)

**Rugosidade:** o efeito colectivo da superfície do terreno e de seus elementos da rugosidade, conduzem a retardamento do vento próximo a superfície, isto é, devido a rugosidade do terreno.

**Obstáculos:** Perto de um obstáculo, tal como um edifício ou do abrigo, o vento é influenciado fortemente pela presença do obstáculo que pode reduzir a velocidade de vento consideravelmente.

**Orografia:** Quando a escala típica das características do terreno se torna muito maior do que a altura do ponto do interesse, agem como elementos orográficos ao vento.

## 2.2 Modelos Climáticos

Um modelo climático, é um modelo que representa a atmosfera, oceanos, terra e cobertura gelada do planeta. Estes usam a mesma formulação para a atmosfera que os modelos de previsão numérica<sup>1</sup>, mas também têm de representar outros sistemas que são importantes para o clima, como trocas da atmosfera com o oceano, superfícies terrestres e coberturas geladas.

A idéia de se utilizar modelo de área limitada para estudos climáticos regionais foi originalmente proposta por Dickinson et al. (1993) e Giorgi (1990). Tal idéia tem como base a utilização de um MCGA(modelo de circulação geral da atmosfera) para simular a circulação geral da atmosfera e, com as saídas desse modelo, obter uma distribuição detalhada das variáveis climáticas com um MCR (modelo climático regional) capaz de descrever os efeitos locais. Durante a década de 90 diversos trabalhos foram realizados buscando o ajuste e a validação de modelos climáticos regionais. De maneira geral, os resultados mostraram que o desempenho do modelo varia conforme a estação do ano, topografia e localização da região de estudo em relação às circulações que determinam as variáveis prognósticas.

## 2.3 Processo de redução de escala

Para avaliar os impactos das alterações climáticas usam-se frequentemente modelos globais de circulação. No entanto, algumas das variáveis mais relevantes à escala regional ou local, como por exemplo, as características fisiográficas regionais encontram-se mal representadas ou mesmo ausentes nos MCGA (Moriondo, 2003).

As características fisiográficas regionais e as circulações de menor escala a elas associadas podem causar significativa influência no clima regional ou local. São exemplos as brisas marítimas e as circulações induzidas por vales e montanhas, diferença no uso do solo, forma da costa, etc (Tucci et al., 2000).

Em geral, os processos de circulações atmosféricas acima citados ocorrem em escalas espaciais que

---

<sup>1</sup>Um modelo de previsão numérica do tempo é um modelo de computador desenvolvido para simular o comportamento da atmosfera. Este resolve um sistema complexo de equações matemáticas baseadas em leis físicas de modo a prever o estado futuro da atmosfera partindo de condições iniciais específicas. As equações matemáticas são as formas mais completas e complexas das equações dinâmicas e termodinâmicas. Em adição processos físicos, como a radiação, nuvens, precipitação e trocas à superfície são representadas no modelo usando esquemas de parameterizações

não são resolvidas pela malha dos modelos globais de previsão atmosférica ou climática, de igual maneira os efeitos da topografia ficam bastante suavizados nos modelos globais. Deste modo, impõe-se o desenvolvimento de técnicas de transferência da informação gerada pelos MCGA em larga escala para as escalas menores. Essas técnicas são chamadas por técnicas de "downscaling", ou de redução de escala ou de desagregação espacial (Tucci et al., 2000).

As técnicas de redução podem ser enquadradas em duas abordagens distintas conceitualmente:

### **2.3.1 Redução dinâmica**

Aqui, os modelos dinâmicos regionais, que são modelos numéricos semelhantes aos MCGA mas com resolução mais fina e área limitada, são integrados no tempo usando como dados iniciais e condições de fronteira o resultado da simulação dos MCGA (Giorgi, 1990); e

### **2.3.2 Redução estatística**

Aqui, procura-se, com base em observações e análises meteorológicas, relações estatísticas entre parâmetros do clima local e um certo número de predictores de larga escala. Essas relações são depois aplicadas aos resultados dos modelos de circulação global com o fim de se obter o clima regional e local correspondente ao clima global e cenários de variação climática globais (Wilby et al., 1998).

## **2.4 O modelo RegCM**

A parte dinâmica do RegCM3 é a mesma do MM4 (Mesoscale Model version 4), e as principais modificações implementadas no MM4 para utilizá-lo no modo climático estão descritas em Giorgi et al. (1993a) e Giorgi et al. (1993b). Basicamente, o RegCM3 é um modelo compressível, hidrostático, com coordenada vertical sigma, e de área limitada em diferenças finitas. O sistema do modelo regional (Shields et al., 1994) é composto de cinco fases. Na primeira fase denominada TERRAIN determina-se o domínio, a topografia, a projecção e o tipo de solo; nas duas fases subsequentes denominadas INITIAL e BOUNDARY são geradas as condições iniciais e de fronteira em coordenadas sigma; o modelo é integrado na fase denominada REGCM; e finalmente na fase OUTPUT se processam os resultados (Dickinson et al., 1993).

### 2.4.1 Grelha Horizontal e Vertical do Modelo RegCM

É útil introduzir primeiro a configuração da grelha do modelo. O sistema normalmente adquire e analisa os dados em superfícies de pressão, mas estes têm que ser interpolados para um sistema de coordenadas  $\sigma$  (sigma) antes de ser introduzido no modelo. No sistema de coordenadas sigma os níveis mais baixos seguem aproximadamente o terreno enquanto a superfície superior é plana (figura 2.1).

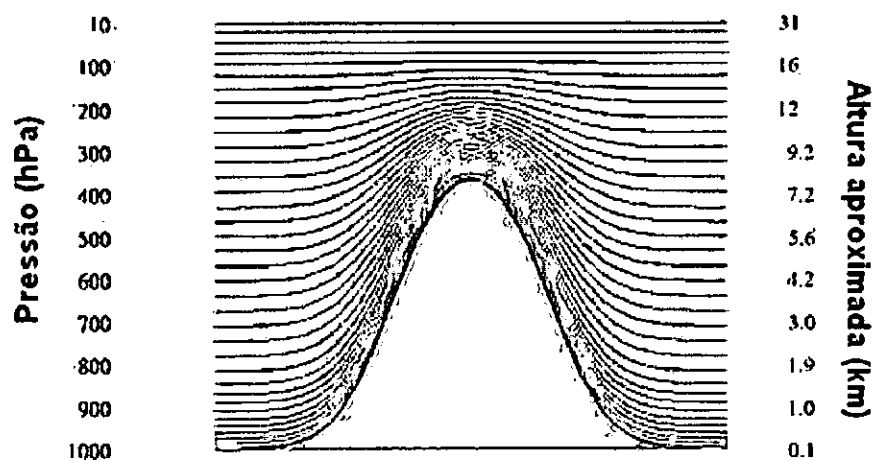


Figura 2.1: Representação esquemática da estrutura vertical do modelo.

Os níveis intermédios tendem progressivamente a ser planos a medida que a pressão tende para a pressão escolhida para o topo. Uma quantidade adimensional é usada para definir os níveis do modelo,

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t} \quad (2.1)$$

onde  $p$  é a pressão de referência,  $p_t$  é a pressão no topo, e  $p_s$  é a pressão de referência da superfície. A resolução vertical do modelo é definida por uma lista de valores entre 0 e 1 que não é necessariamente espaçada uniformemente. Normalmente a resolução na camada limite é muito melhor que a camada superior, e o nível de níveis sigma pode variar entre dez a quarenta, embora não haja nenhum limite.

A grelha horizontal tem um deslocamento Arakawa-Lamb B das componentes da velocidade em relação aos escalares. Este deslocamento é mostrado na figura 2.2 onde pode ser visto que os escalares (T, q, etc) são definidos no centro do quadrado da grelha enquanto que as componentes este-oeste

(u) e norte-sul (v) da velocidade são definidas nos cantos. Os pontos centrais dos quadrados da grelha vão ser referidos como cruces, e os pontos dos cantos como pontos.

Consequentemente a velocidade horizontal é definida nos pontos, por exemplo, e quando são introduzidos dados no modelo os pré-processadores fazem as interpolações necessárias para assegurar a consistência da grelha.

Todas as variáveis são definidas no meio de dois níveis sigma, denominados de níveis meio sigma. A

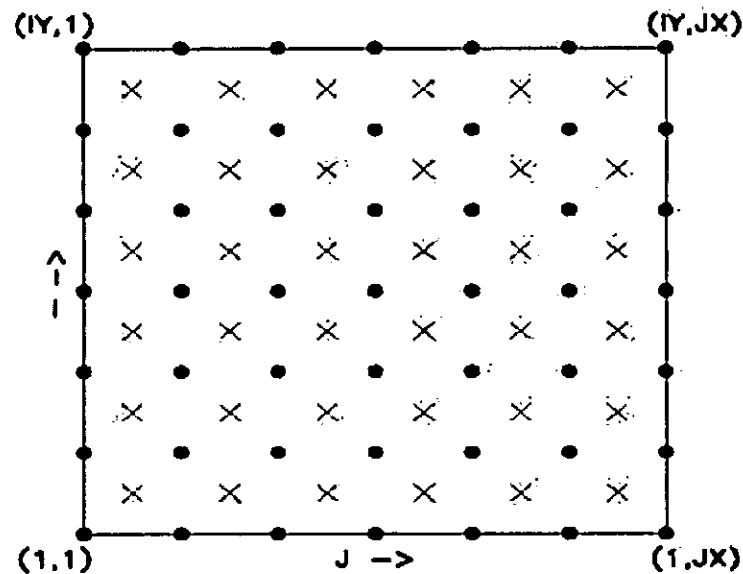


Figura 2.2: Representação esquemática da grelha horizontal do modelo

velocidade vertical é calculada nos níveis sigma. Na definição dos níveis  $\sigma$  listam-se os níveis sigma, incluindo o nível 0 e 1. O número de níveis meio sigma do modelo é, sendo assim, sempre menor em um que o número de níveis sigma. A diferenciação finita do modelo é obviamente, dependente do espaçamento da grelha sempre que seja necessário representar gradientes ou médias nas equações, mais detalhes podem ser encontrados no documento de descrição do modelo (Grell et al., 1994).

## 2.4.2 Projecções e factores de escala

O sistema de modelação tem uma opção para escolha de diferentes projecções. A projecção de Lambert é adequada para as latitudes médias, a projecção Polar para as latitudes altas e a projecção de Mercator para as baixas latitudes. As direcções I e J no modelo não correspondem às direcções oeste-este e norte-sul com excepção da projecção de Mercator, e então vento observado tem de ser rodado

para a grelha do modelo, e as componentes  $u$  e  $v$  precisam de ser giradas antes da comparação com observações. Estas transformações são tomadas em conta pelos programas de pré e pós processamento do modelo. O factor de escala do mapa  $m$ , é definido por,

$$m = \frac{(\text{distância na grelha})}{(\text{distância real no globo})} \quad (2.2)$$

o seu valor normalmente está perto da unidade e varia com a latitude. As projecções do modelo conservam a forma de áreas pequenas, de forma que  $dx=dy$  em todos os lugares, mas o comprimento da grelha varia ao longo do domínio de modo a permitir a representação esférica da superfície numa superfície plana. Os factores de mapa têm de ser contabilizados nas equações do modelo sempre que sejam usados os gradientes horizontais.

### 2.4.3 Parametrizações Físicas

#### Esquema Radiativo

O esquema de transferência radiativa do Community Climate Model 3 (CCM3), referido como NCAR CCM3 e descrito em Kiehl et al. (1996), é utilizado no RegCM3. Neste esquema, são calculadas separadamente taxas de aquecimento e fluxos na superfície de radiação solar e infravermelho sob condições de céu claro e nublado. A componente solar considera os efeitos dos gases  $O_3$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$  e  $O_2$  seguindo a aproximação de  $\delta$ -Eddington em 18 intervalos espectrais entre 0,2 a 5  $\mu m$  (Kiehl et al., 1996). A parametrização do espalhamento e absorção por nuvens considera as propriedades ópticas das gotículas de nuvens, como profundidade óptica de extinção, albedo simples de espalhamento e parâmetro de assimetria, são expressas em termos do conteúdo de água líquida e raio efectivo das gotículas. Quando nuvens cumulus são formadas, a cobertura fraccional de nuvem é tal que a cobertura total da coluna desde a base até o topo da nuvem é função do espaçamento horizontal entre os pontos de grade. O conteúdo de água de nuvem é diferente para nuvens baixas e médias, e a espessura de uma camada nublada é a mesma das camadas do modelo entre a base e o topo da nuvem. Os cálculos de transferência radiativa na banda do infravermelho incluem as contribuições dos gases  $O_3$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$  e nuvens.

#### Interacção Solo-Vegetação -Atmosfera e Camada Limite Planetária

Para os processos de superfície, o RegCM3 utiliza o esquema denominado Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) (Dickinson et al., 1993), que considera a presença de vegetação e a inte-

racção com o solo nas trocas turbulentas de momento, energia e vapor d'água entre a superfície e atmosfera. Actualmente, o BATS possui uma camada de vegetação, uma de neve, uma de solo de 10 cm de espessura, uma na zona de raiz, com 1-2 m de espessura, e uma terceira camada de 3 m de profundidade. No RegCM3, cada ponto de grade pode ser representado por apenas uma classe de vegetação e solo ou, então, através do denominado SUB-BATS. Nesta última representação, cada ponto de grade pode ser representado como um mosaico de vários tipos de vegetação no entorno da grade. Este procedimento pretende representar melhor o efeito de heterogeneidade da superfície nas simulações climáticas.

Os transportes turbulentos de calor, momento e humidade, na Camada Limite Planetária (CLP), são obtidos pelo produto entre o gradiente vertical das variáveis médias e o coeficiente de difusão vertical turbulenta. O esquema utilizado incorpora o conceito de difusão não local (Holtslag et al., 1990), que considera os fluxos contra-gradiente que resultam dos vórtices de grande escala em uma atmosfera instável e bem misturada.

#### **Parametrização da Precipitação**

Para o tratamento dos processos húmidos, o RegCM3 possui duas parametrizações para representar a convecção em cumulus profundo e um para a precipitação resolvida na escala da grade.

**Esquema na Escala da Grade:** O esquema na escala da grade usado é referido como Subgrid Explicit Moisture Scheme (SUBEX), descrito em Pal et al. (2000). Este esquema considera a água de nuvem como variável prognóstica e é inicialmente formada quando o ar atinge a saturação. Após formada, a água de nuvem pode ser advectada, misturada por turbulência, evaporada, convertida em água de chuva via processo de auto-conversão. O SUBEX considera a variabilidade de sub-grade das nuvens associando a humidade relativa na célula da grade à fracção de nuvem e água de nuvem (Sundqvist et al., 1989).

**Esquemas convectivos:** Para a convecção em cumulus profundo o RegCM3 possui as seguintes parametrizações: Kuo (Anthes, 1977) e Grell (1993).

No esquema de cumulus de Grell (1993), as nuvens são representadas por duas circulações estacionárias, que são as correntes ascendente e descendente. Estas correntes só se misturam com o ar ambiente no topo e base destas circulações. O modelo de nuvens assume que o fluxo de massa nas

correntes ascendente e descendente é constante com a altura. As correntes ascendente e descendente originam-se nos respectivos níveis de energia estática húmidas máxima e mínima na coluna vertical. O esquema é activado quando uma parcela ascendida do nível origem da corrente ascendente atinge a adiabática húmida. A condensação na corrente ascendente é calculada através da ascensão da parcela saturada sem misturar com o ambiente fora da nuvem. O fluxo de massa na corrente descendente é proporcional ao da ascendente através de um parâmetro  $\beta$ , que representa o quanto do condensado na corrente ascendente que será evaporado na descendente. O aquecimento e humedecimento resultante da aplicação do esquema são determinados a partir dos fluxos de massa de compensação e desentranhamento de massa no topo e base da nuvem. O esquema inclui ainda o efeito de resfriamento na corrente descendente.

O esquema de Kuo do RegCM3 é aquele modificado por Anthes (1977), mas será referido apenas como esquema de Kuo. Nesta parametrização, a convecção é possível quando a atmosfera é convectivamente instável e a convergência de humidade integrada na vertical excede um determinado valor. Uma parte da convergência de humidade precipita e o restante humedece a atmosfera, e esta partição é função da distribuição vertical de humidade relativa (Anthes, 1977). O calor latente de condensação é então redistribuído na vertical seguindo um perfil parabólico pré-especificado com aquecimento máximo na metade superior da nuvem. Devido à sua grande simplicidade e economia de tempo computacional, o esquema de Kuo, embora sofrendo muitas críticas nas suas idéias básicas, ainda hoje é muito utilizado em modelos numéricos de previsão que vão desde globais até os regionais.

#### 2.4.4 Equações do modelo na forma diferencial

As equações dinâmicas do modelo e a discretização numérica são descritas por Grell et al. (1994).

- Equação de Momento (componente x),

$$\frac{\partial p^* u}{\partial t} = -m^2 \left( \frac{\partial p^* uu/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vu/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial p^* u \dot{\sigma}}{\partial \sigma} - mp^* \left[ \frac{RT_v}{(p^* + p_l/\sigma)} \frac{\partial p^*}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + fp^* v + F_{Hx} + F_{Vx} \quad (2.3)$$

- Equação de Momento (componente y),

$$\frac{\partial p^* v}{\partial t} = -m^2 \left( \frac{\partial p^* uv/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vv/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial p^* v \dot{\sigma}}{\partial \sigma} - mp^* \left[ \frac{RT_v}{(p^* + p_l/\sigma)} \frac{\partial p^*}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] + fp^* u + F_{Hy} + F_{Vy} \quad (2.4)$$



Onde  $u$  e  $v$  são as componentes este e norte da velocidade,  $T_v$  é temperatura virtual,  $\phi$  é altura geopotencial,  $f$  é o parâmetro de coriolis,  $R$  é a constante dos gases para ar seco,  $m$  é o factor de escala do mapa,  $\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt}$ ,  $F_H$  e  $F_V$  representam o efeito da difusão horizontal e vertical e  $p^* = p_s - p_t$ . As equações 2.3 e 2.4 são as componente para leste e norte da equação da lei de conservação do momento.

- Equação de Continuidade,

$$\frac{\partial p^*}{\partial t} = -m^2 \left( \frac{\partial p^* u/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial p^* \dot{\sigma}}{\partial \sigma} \quad (2.5)$$

A integração da equação 2.5 é usada para calcular a variação temporal da pressão a superfície no modelo,

$$\frac{\partial p^*}{\partial t} = -m^2 \int_0^1 \left( \frac{\partial p^* u/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v/m}{\partial y} \right) d\sigma \quad (2.6)$$

A equação 2.5 representa a lei de conservação de massa.

- Equação da Termodinâmica,

$$\frac{\partial p^* T}{\partial t} = -m^2 \left( \frac{\partial p^* uT/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vT/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial p^* T \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + \frac{RT_v \omega}{c_{pm}(\sigma + P_t/p_{ast})} + \frac{p^* Q}{c_{pm}} + F_H T + F_V T \quad (2.7)$$

Onde  $c_{pm}$  é o calor específico do ar a pressão constante,  $Q$  é o calor diabático,  $F_H T$  representa o efeito da difusão horizontal,  $F_V T$  representa o efeito da mistura vertical e ajustamento convectivo seco, e  $\omega$  é

$$\omega = p^* \dot{\sigma} + \sigma \frac{dp^* T}{dt} \quad (2.8)$$

Onde,

$$\frac{dp^* T}{dt} = \frac{\partial p^* T}{\partial t} + m \left( u \frac{\partial p^* T}{\partial x} + v \frac{\partial p^* T}{\partial y} \right) \quad (2.9)$$

A expressão para  $c_{pm} = c_p (1 + 0.8q_v)$ , onde  $c_p$  é o calor específico a pressão constante para ar seco e  $q_v$  é a taxa de mistura do vapor de água.

A equação 2.7 representa a lei de conservação de energia.

- Equação Hidrostática,

A equação hidrostática é usada para calcular a altura geopotencial dada pela equação 2.10 a partir da temperatura virtual.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \ln(\sigma + p_i/p^*)} = -RT_v \left[ 1 + \frac{q_c + q_r}{1 + q_v} \right]^{-1} \quad (2.10)$$

Onde  $T_v = T(1 + 0.608q_v)$ ,  $q_v$ ,  $q_c$ , e  $q_r$  são as taxas de mistura do vapor de água, água da nuvem ou gelo, e água da chuva ou neve respectivamente.

# Capítulo 3

## Material e Métodos

### 3.1 Material

#### 3.1.1 Hardware e Software

Na realização do presente trabalho foi usado um servidor Dell PowerEdge<sup>®</sup> 2950 com as seguintes características:

- Processadores Intel QuadCore Xeon<sup>®</sup>;
- 4 GB de memória RAM;
- 1 TB de HDD;
- Plataforma OpenSuse Linux 10.3;
- Compilador Fortran Intel;
- Open Multi-Processing (OpenMP), para permitir partilha de memória pelos 4 processadores Xeon
- Pacote NetCDF e visualizador GrADS<sup>1</sup>

#### 3.1.2 Dados

Os dados atmosféricos necessários para correr o modelo e usados neste trabalho são provenientes do Projecto "Reanalysis" do NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996), e possuem pelo menos as seguintes variáveis: pressão ao nível médio do mar, vento, temperatura, humidade relativa e altura geopotencial.

---

<sup>1</sup>é uma ferramenta que é usada para acesso fácil, manipulação e visualização de dados. O formato dos dados pode ser binário, GRIB, NetCDF ou HDF-SDS. O GrADS foi implementado mundialmente numa variedade de sistemas operativos e é distribuído livremente através da internet a partir de <ftp://grads.iges.org/grads/>

Os dados topográficos e dos tipos de uso do terra (em categorias) são provenientes de United States Geological Survey (USGS) e Global Land Cover Characterization (GLCC) (Loveland et al., 2000), respectivamente, com uma resolução de 5 minutos.

A topografia tomada em conta no modelo é a de acordo com a figura 3.1.

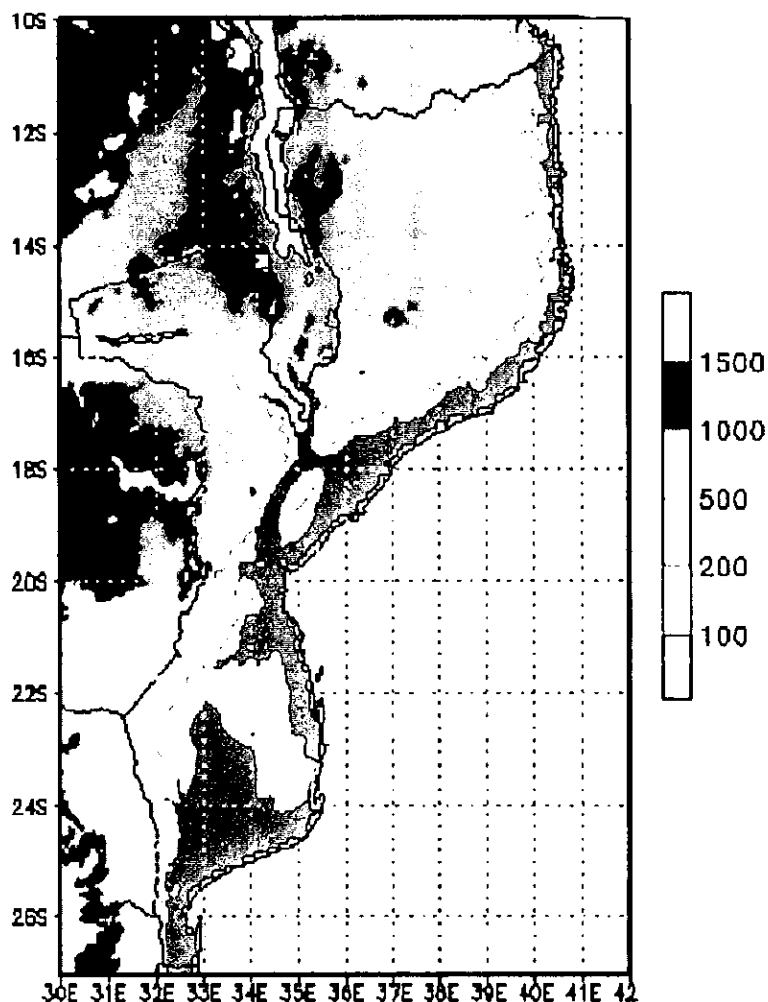


Figura 3.1: Dados topográficos em metros.

O Reanalysis é um projecto realizado pelo NCEP em colaboração com o NCAR com o objectivo de produzir análises históricas globais e melhoradas dos vários parâmetros meteorológicos abrangendo mais de 50 anos. O objectivo é a criação de um banco de dados fiável para o avanço da investigação em meteorologia e climatologia (Kalnay et al., 1996).

Os dados necessários para a validação do modelo, são médias mensais da velocidade do vento a

10 m de altura num período de 5 anos (1999-2003), provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INAM). Os dados foram medidos nas seguintes estações meteorológicas:

- Lichinga;
- Pemba e
- Quelimane

### **3.2 Características da área de estudo**

Moçambique está situado na costa leste da África Austral, entre as Latitudes 10°27' e 26°52' Sul, e Longitude 30°12' e 40°51' Este, tem uma área de cerca de 799.380Km<sup>2</sup> e uma linha de costa de 2.470Km.

A maior parte do território tem altitudes que não excedem 500 m, excepto nas regiões próximas do lago Niassa e numa faixa a norte do paralelo de 21° S.

O revestimento vegetal é constituído por florestas, savanas e estepes com abundância de *Brachystegia* e *Julbernardia* (Ferreira, 1965).

O clima de Moçambique é o que corresponde à situação do território nas zonas intertropical (quente) e subtropical (temperado-quente) do hemisfério sul, com as alterações resultantes da acção dos factores fisiográficos (proximidade do mar, relevo, etc.) e dos factores eventuais que, pela sua frequência ou intensidade, afectam apreciavelmente o clima (Ferreira, 1965).

Pelos critérios de classificação de Köppen o clima de Moçambique é da forma Aw (clima tropical chuvoso de savana; a estação seca corresponde à estação fresca do ano) no litoral ao sul do Save, na região de Manica e Sofala, a sul de 19°S nos locais de altitude inferior a 700m e a norte nos locais de altitude inferior a 1000m; da forma Cw (clima temperado húmido; a estação seca corresponde à estação fresca do ano) nas mesmas regiões quando as altitudes são superiores a 500m, 700m e 1000m, respectivamente; e da forma BSw (clima seco de estepe; a estação seca corresponde à estação fresca do ano; a temperatura média anual do ar é superior a 18°C) a sul do rio Save e na bacia do Zambeze entre a fronteira e a latitude 17°S .

### 3.2.1 Comportamento do vento em Moçambique

O regime dos ventos em Moçambique é essencialmente influenciado pela circulação da atmosfera na África meridional que por sua vez está condicionada por vários centros de acção cujos principais em relação a Moçambique são (Sueia, 2007):

- O vale depressionário equatorial;
- A frente intertropical FITS;
- A depressão de origem térmica sobre a África Meridional e
- Os anticiclones subtropicais do Hemisfério Sul.

### 3.3 Métodos

As características do vento (velocidade, direcção, turbulência, etc.) medidas em uma estação anemométrica dependem de dois factores: a climatologia e as características topográficas do local. Isto faz com que as medidas de vento coletadas por um anemógrafo sejam válidas apenas para o ponto de medição. A utilização de modelos atmosféricos para a análise do potencial eólico leva em consideração que a climatologia de uma região pode se estender por centenas de quilómetros. As simulações computacionais de um modelo atmosférico reproduzem a mesma climatologia em diferentes locais dentro de uma região e estimam a velocidade do vento calculando a influência da topografia e obstáculos no fluxo de vento de cada local (Feitosa et al., 2002).

A metodologia do presente trabalho baseia-se em simulações computacionais da atmosfera para estabelecer a climatologia típica de regiões do país, recorrendo à redução dinâmica (*dynamical downscaling*) de 5 anos, desde 1999 a 2003 de dados do Projecto Reanalysis II (do NCEP/NCAR) pelo modelo climático RegCM. Este é o método mais apropriado para o presente caso em que os dados observados nas estações meteorológicas não têm continuidade espacial e/ou temporal para todo o País. O domínio usado para correr o modelo foi escolhido com base na média da direcção do vento para um período de cinco anos, isto é, a área que contém a mesma direcção do vento. Como se pode ver da Figura 3.2 esta área está entre as latitudes 0°-33° S e longitudes 25°-53° E.

A simulação foi feita para um período de integração de 5 anos (1999 à 2003) com as seguintes condições:

- Projecção do Mapa: NORMER (Standard Mercator)
- Resolução :  $dx=60$  km
- Número de pontos na direcção y (norte-sul):  $iy=62$
- Número de pontos na direcção x (este-oeste) :  $ix=52$
- Latitude central :  $clat=16,74$  S
- Longitude central :  $clon= 39,04$  E

O domínio das simulações neste trabalho foi reduzido por se notar através da Figura 3.2 que não seria necessário cobrir todo o subcontinente da África Austral, dado que os ventos prevalentes são da direcção Este para Moçambique.

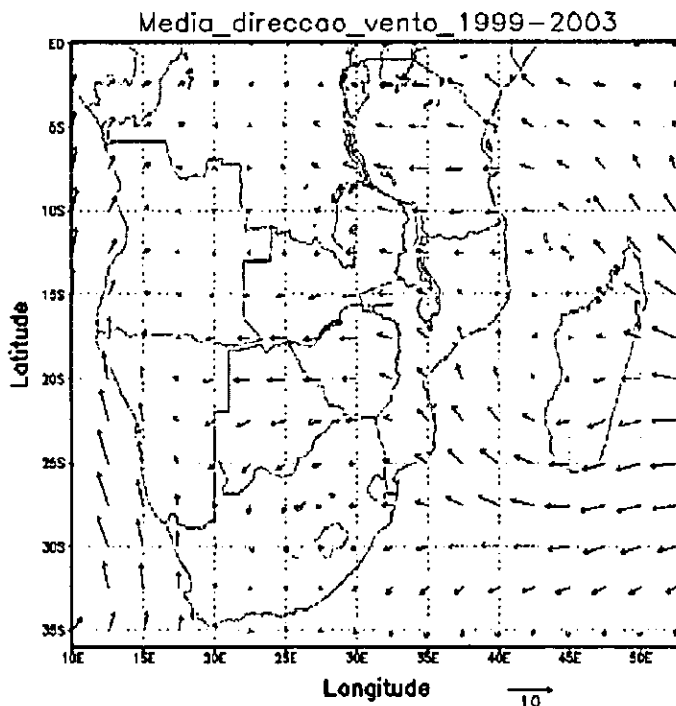


Figura 3.2: Média da direcção do vento para um período de cinco anos

No final das corridas os dados são tratados usando o GrADS, de forma a permitir as estatísticas apresentadas no Capítulo que se segue.

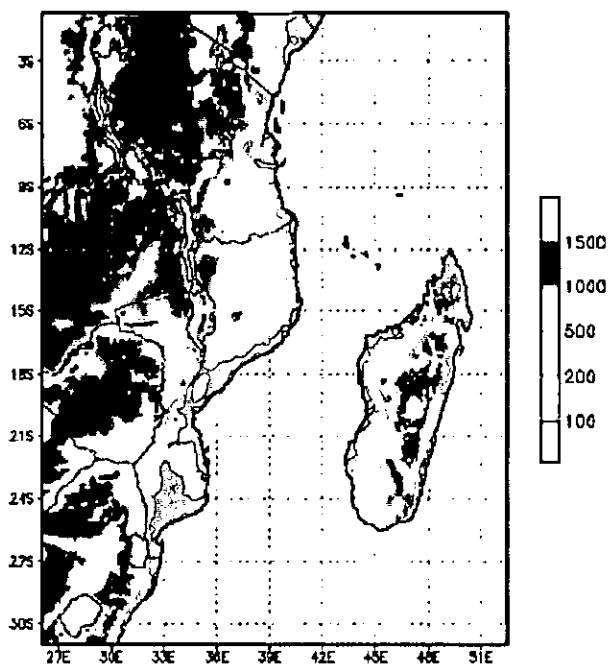


Figura 3.3: Domínio usado para correr o modelo



# Capítulo 4

## Resultados

Este capítulo apresenta os resultados de intensidades de ventos a 10 m da superfície, obtidos através de simulações realizadas com o modelo RegCM3, a uma resolução de 60 km.

### 4.1 Simulações Climáticas

Foram realizadas simulações climáticas regionais para o período de 5 anos, obtendo-se assim os mapas que indicam os recursos eólicos em escalas de cores que variam de branco (intensidades inferiores a 1 m/s) até cinzento (intensidades acima de 9 m/s) de forma a permitir que se possa facilmente identificar as áreas de maior potencial eólico.

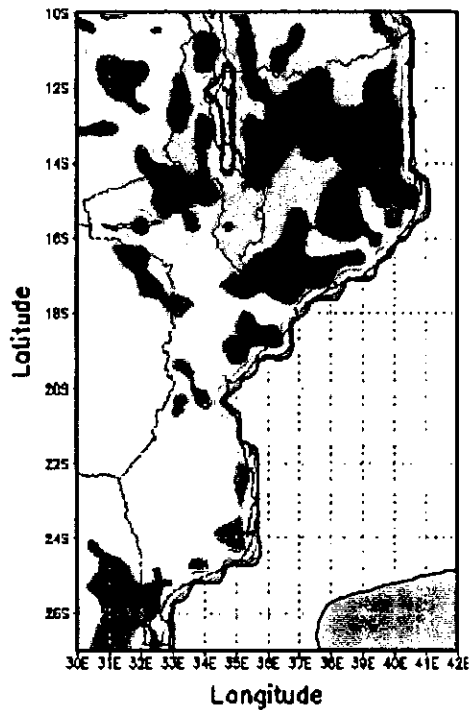


Figura 4.1: Velocidade média sazonal (m/s) a 10m Dez-  
Fev

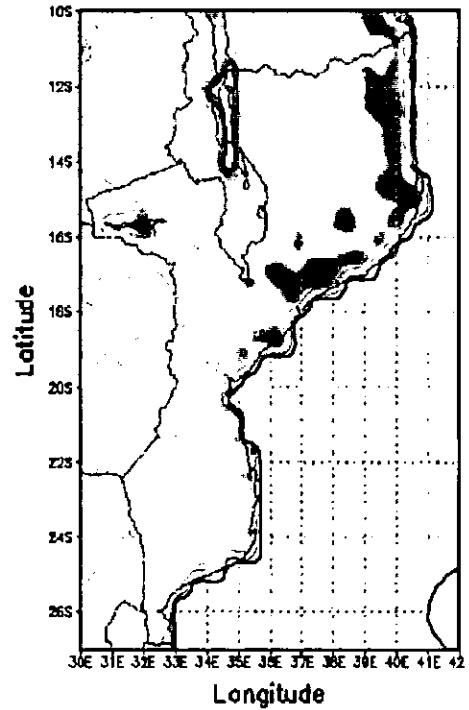


Figura 4.2: Velocidade média sazonal (m/s) a 10m Mar-  
Mai

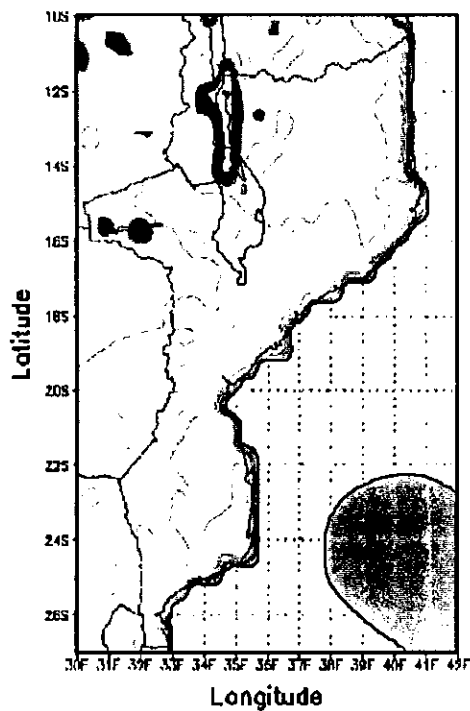


Figura 4.3: Velocidade média sazonal (m/s) a 10m Jun-  
Ago

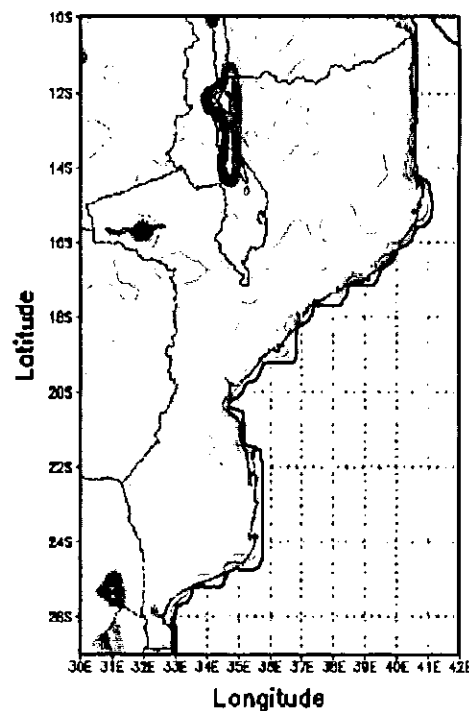


Figura 4.4: Velocidade média sazonal(m/s) a 10m Set-  
Nov

As figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 representam as médias sazonais da velocidade do vento a uma altura

de 10 m da superfície em m/s.

A figura 4.1 corresponde ao mapa da média sazonal de Verão austral (Dezembro-Janeiro-Fevereiro) de 5 anos (1999-2003), e pode-se ver que neste período o vento chegou a atingir velocidades na ordem de 7-8 m/s na região Norte, na região costeira do País e nalguma parte da província de Maputo.

A figura 4.2 corresponde ao mapa da média sazonal de Outono austral (Março-Abril-Maio) para o mesmo período de integração e pode-se ver que os ventos com maior intensidade na ordem de 7-8 m/s se registaram apenas na zona costeira da região Norte e nalguma parte da zona centro.

A figura 4.3 representa a média sazonal do período de Inverno austral (Junho-Julho-Agosto) e pode-se notar no mapa que neste período os ventos diminuem de intensidade chegando a atingir cerca de 3-4 m/s na região Norte, e uma pequena faixa da zona costeira na região centro com ventos na ordem de 5-6 m/s.

A figura 4.4 representa a média sazonal da Primavera austral (Setembro-Outubro-Novembro) e pode-se notar que a região norte apresenta ventos com menor intensidade em relação a região sul do País onde outrora apresentava ventos com maior intensidade. Durante esta época a região sul apresenta ventos com maior intensidade na ordem de 5-7 m/s .

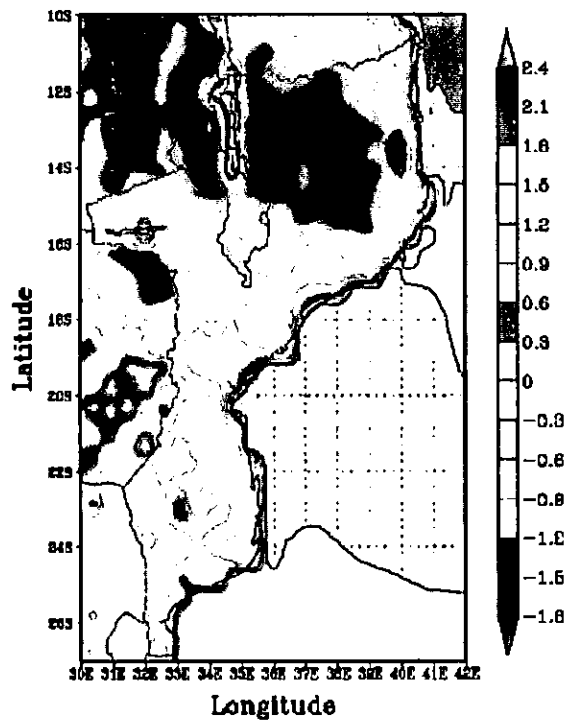


Figura 4.5: Variabilidade sazonal de ventos a 10m Dez-  
Fev

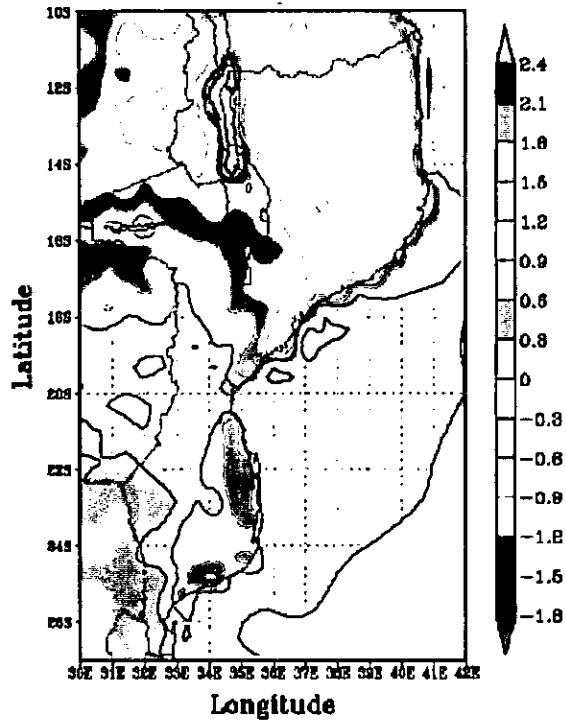


Figura 4.6: Variabilidade sazonal de ventos a 10m Mar-  
Mai

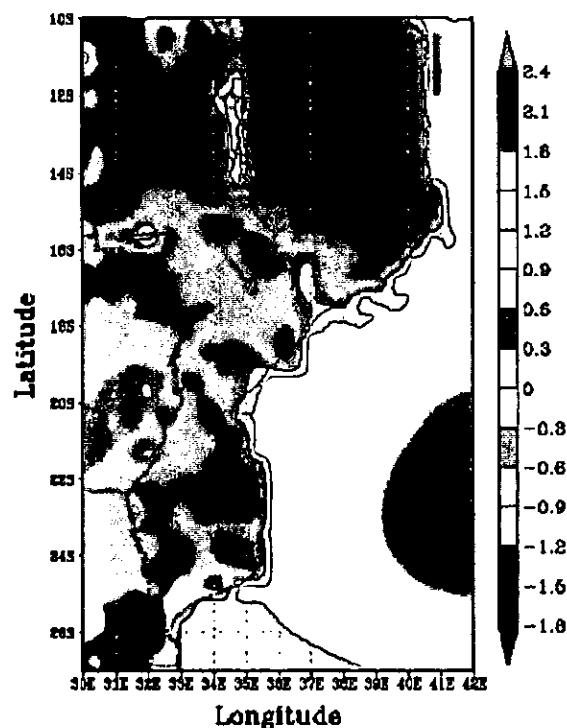


Figura 4.7: Variabilidade sazonal de ventos a 10m Jun-  
Ago

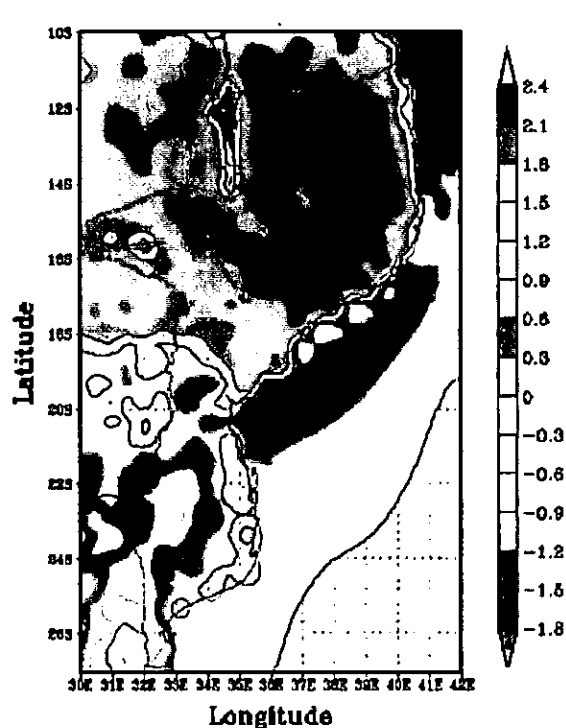


Figura 4.8: Variabilidade sazonal de ventos a 10m Set-  
Nov

As figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 representam as médias sazonais da velocidade do vento (em m/s) num período de cinco anos (1999-2003) a uma altura de 10m para Moçambique.

A figura 4.5 representa a variação sazonal para os meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro. Para este período o País registou ventos com intensidades acima da média como se pode constatar da figura.

A figura 4.6 representa a variação sazonal para os meses de Março, Abril e Maio. Pode-se ver que durante este período uma pequena parte da região centro e sul do País a intensidade do vento não variou. E uma pequena parte do interior da zona sul mais concretamente a província de Maputo e Gaza ocorreram intensidades do vento abaixo da média.

A figura 4.7 representa a variação sazonal para os meses de Junho, Julho e Agosto. Podemos constatar que para esse período do ano o País inteiro registou ventos abaixo da média.

A figura 4.8 representa a variação sazonal para os meses de Setembro, Outubro e Novembro. Durante este período a região norte e o norte da região central apresentaram ventos abaixo da média e a outra parte do País registou ventos acima da média.

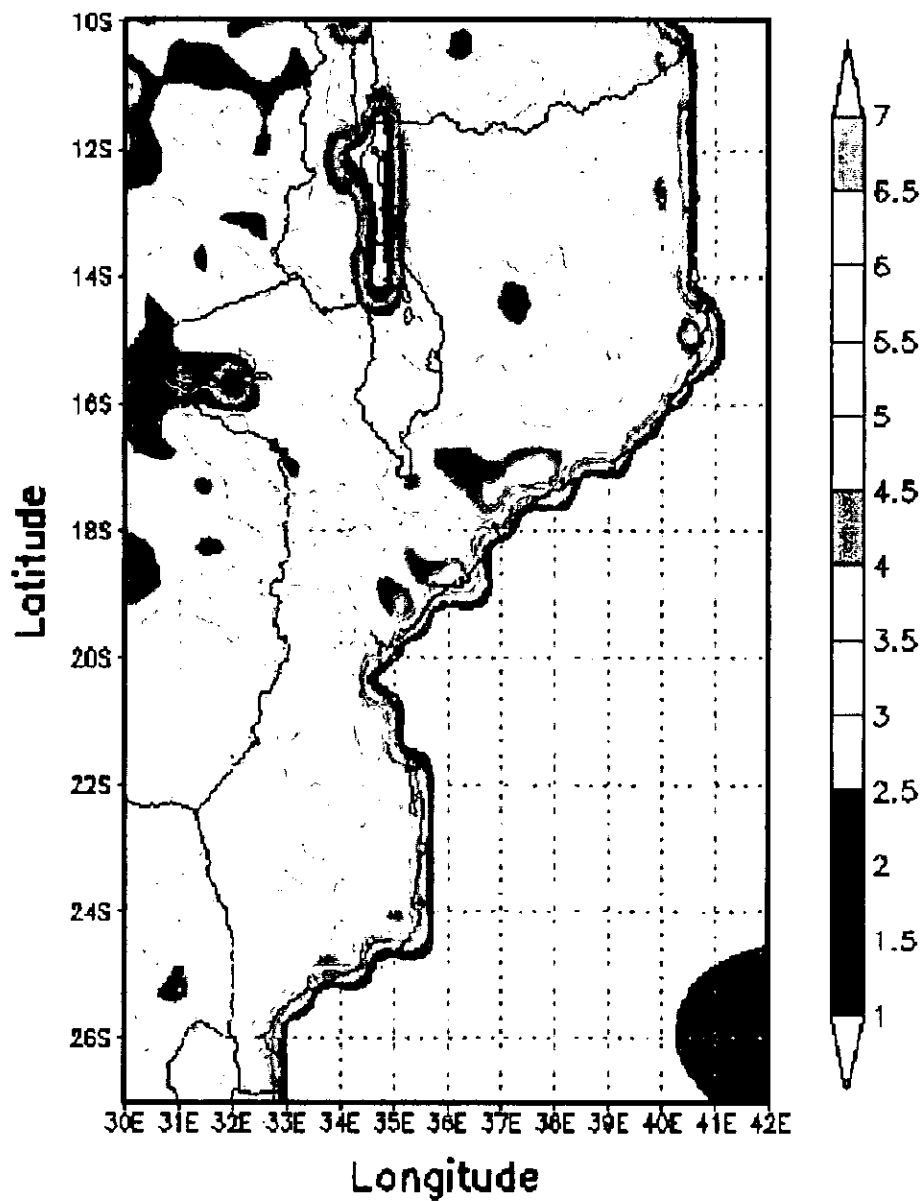


Figura 4.9: Velocidade média dos ventos (m/s) a 10m num período de cinco anos (1999-2003)

A figura 4.9 corresponde ao Atlas do recurso eólico para Moçambique. Deste mapa podemos verificar que o País apresenta médias da intensidade do vento acima de 4,5 m/s a uma altura de 10 m do solo.

## 4.2 Observações

Para verificação das simulações climáticas nos períodos seleccionados (5 anos) foram utilizadas as observações das estações meteorológicas de Lichinga, Pemba e Quelimane.

**Estação de Pemba (Lon. 40° 32' E, Lat. 12° 59' S)**

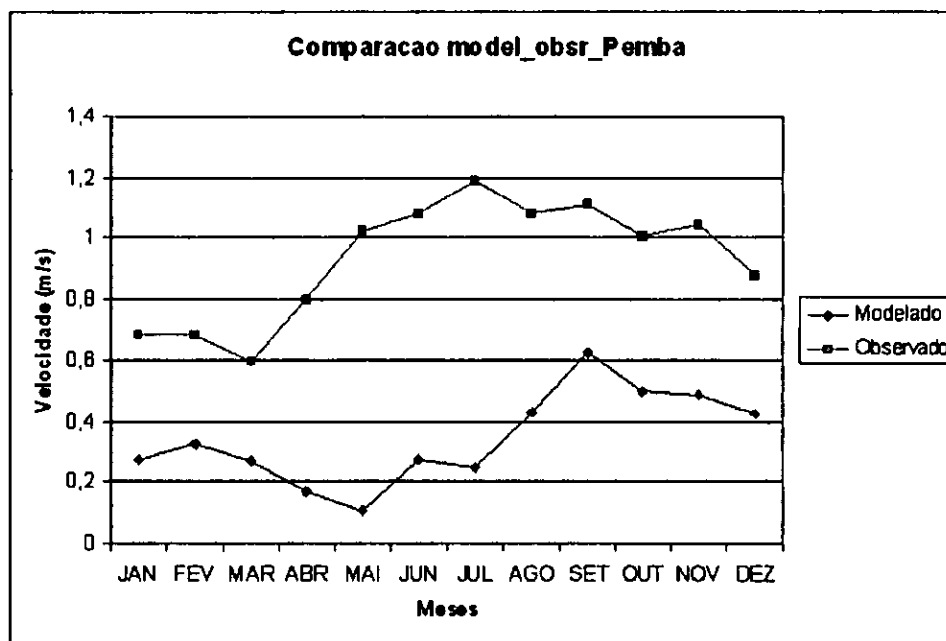


Figura 4.10: Comparação da velocidade do vento para estação de Pemba

Para a estação de Pemba o modelo subestima os valores observados mas com uma tendência a acompanhar os dados de observações, e o erro RMSE (ver Anexo) está próximo de zero, o que quer dizer que o modelo se aproxima a realidade.

Estação de Lichinga (Lon. 35° 14' E, Lat. 13° 18' S)

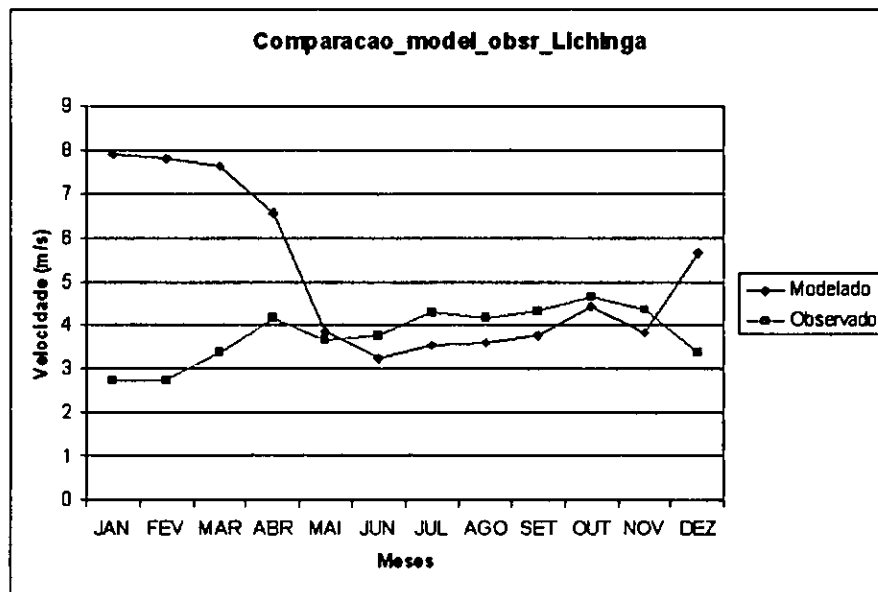


Figura 4.11: Comparação da velocidade do vento para estação de Lichinga

Para a estação de Lichinga o modelo sobrestima os valores observados até o mês de Maio e subestima os valores até Novembro com uma tendência de acompanhar os valores observados um erro médio a variar de 0.22 - 0.77 (Ver anexo).

Estação de Quelimane (Lon. 36° 53' E, Lat. 17° 53' S)

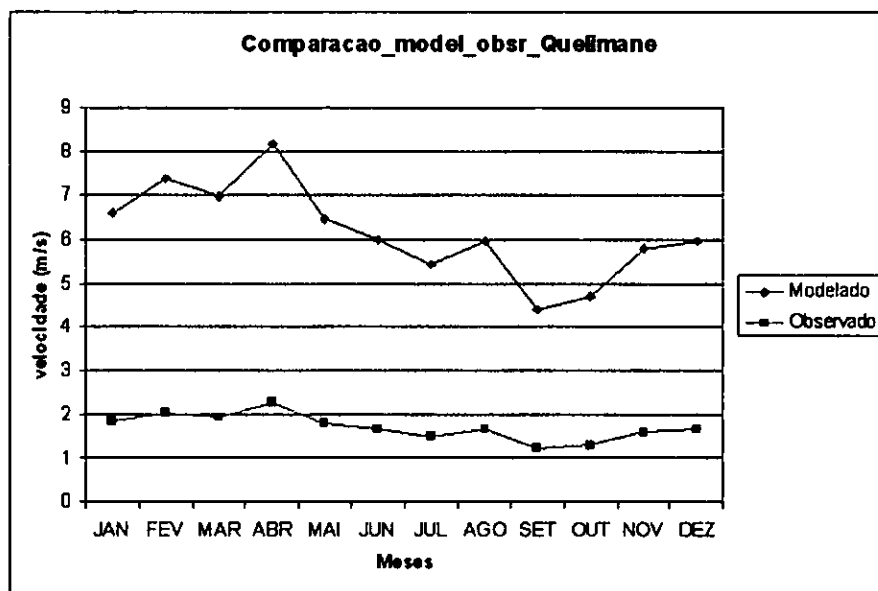


Figura 4.12: Comparação da velocidade do vento para estação de Quelimane



Para a estação de Quelimane o modelo sobrestima os dados observados. Para esta estação os dados do modelo e os observados estiveram distantes, isto é, o modelo não representou bem a realidade.

Convém notar que estamos a comparar dados observados de estações anemométricas, que são válidas apenas para o ponto de medição e dados modelados que dão a média por célula onde se localiza a estação e a célula tem uma área de 60km x 60 km.

# Capítulo 5

## Conclusões e Recomendações

### 5.1 Conclusões

Foram realizadas simulações climáticas regionais para cinco anos (1999, 2000, 2001, 2002 e 2003), utilizando o Modelo RegCM3 no Departamento de Física a partir de um servidor instalado no Centro de Informática da UEM.

Em geral, os resultados do modelo conseguem seguir a tendências de variação das observações, embora haja discrepância dos valores observados e modelados, devido potencialmente ao facto de os dados de vento colectados por estações anemométricas serem dados de um ponto, enquanto que os modelados representam a média de célula.

De acordo com os mapas sazonais (figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4) pode-se dizer que os ventos com maior intensidade ocorrem entre os meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro na Província de Cabo Delgado chegando a atingir cerca de 8-9 m/s, na Província de Niassa na ordem de 7-8 m/s, Província de Nampula com 8-9 m/s, Província da Zambézia com 8-9 m/s, no nordeste da Província de Tete com 7-8 m/s, na região costeira da Província de Inhambane com 7-8 m/s, e no interior da Província de Maputo com 7-8 m/s.

Nos meses de Março – Maio os ventos máximos ocorrem nas províncias de Cabo Delgado com velocidades na ordem de 7-8 m/s e na Província da Zambézia com 7-9 m/s.

Nos meses de Junho – Agosto a Província da Zambézia e uma pequena parte da Província de Sofala apresentaram ventos com máximos com velocidades na ordem de 6-7 m/s.

Nos meses de Setembro – Novembro as Províncias de Maputo, Gaza e Manica foram as que apresentaram ventos com intensidades máximas na ordem de 6-7 m/s.

De acordo com a figura 4.9, as Províncias de maior intensidade climatológica de ventos são: Zambézia, Cabo Delgado, Sofala, Inhambane e Maputo.

Uma limitação deste trabalho tem a ver com a pouca quantidade e baixa qualidade de dados observados que não permite um bom nível de comparação entre dados observados aos modelados.

## 5.2 Recomendações

Recomenda-se que se façam mais estudos sobre o tema em questão, aumentando o tempo de integração e a resolução do modelo a fim de se melhorar os resultados.

O Panorama do potencial eólico em Moçambique deverá ser continuamente actualizado com novos dados climatológicos globais de maior resolução e com o uso de *ensemble* de modelos com o intuito de aprimorar a qualidade de suas informações.

Um modelo que se pode juntar ao RegCM no mapeamento eólico de Moçambique é o WRF que já se encontra instalado e a correr na mesma máquina.

# Bibliografia

- Anthes, R. A. (1977). A Cumulus Parameterization Scheme Utilizing a One-Dimensional Cloud Model. *Mon. Wea. Rev.*, 105(3):270–286.
- Borowy, B. S. and Salameh, Z. M. (1996). Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 11(2):367–375.
- Bucuane, A. J. and Mulder, P. (2007). Avaliação de Opções de um Imposto de Electricidade sobre Mega-Projetos em Moçambique. Technical report, Ministério da Planificação e Desenvolvimento de Moçambique .
- Carraro, C. (2000). Efficiency and Equity of Climate Change Policy. In Carraro, C., editor, *Economics, Energy and Environment*, volume 15 of *Environmental Economics*, page 368 pp. Springer.
- Dickinson, R. E., Henderson-Sellers, A., and Kennedy, P. J. (1993). Biosphere-atmosphere Transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model. Technical report, National Center for Atmospheric Research.
- Feitosa, E., Pereira, A., and Veleda, D. (1999). Brazilian Wind Atlas Project. Technical report, Brazilian Wind Energy Center – CBEE, Recife–PE, 50740-530 Brazil.
- Feitosa, E. A. N., Pereira, A. L., Silva, G. R., Veleda, D. R., and Silva, C. (2002). Panorama do potencial eólico do Brasil. Technical report, Agencia Nacional de Energia Electrica–ANEEL, Brasil.
- Ferreira, P. H. A. (1965). Climatologia dinâmica da África meridional, Lisboa.
- Giorgi, F. (1990). Simulation of regional climate using a limited area model in a general circulation model. *J. Clim.*, 3:941–963.
- Giorgi, F., Bates, G. T., and Nieman, S. J. (1993a). The multi-year surface climatology of a regional atmospheric model over the western United States. *J. Climate*, 6:75–95.
- Giorgi, F., Marinucci, M. R., and Bates, G. T. (1993b). Development of a second generation regional climate model (regcm2) i: Boundary layer and radiative transfer processes. *Mon. Wea. Rev.*, 121:2794–2813.

- Glazer, A., Benoit, R., and Yu, W. (2005). Numerical wind energy for Canada. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7(05185):1607–7962.
- Grell, G. (1993). Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 121:764–787.
- Grell, G. A., Dudhia, J., and Stauffer, D. R. (1994). Description of the fifth generation penn state/ncar mesoscale model (mm5). Technical Report TN-398+STR, NCAR, Boulder, Colorado.
- Holtstlag, A. A. M., de Bruijn, E. I. F., and Pan, H.-L. (1990). A high Resolution Air Mass Transformation Model for Short-Range Weather Forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, 118:1561–1575.
- Hua, R. B. and Ghajar, C. R. (1996). Time-series models for reliability evaluation of power systems including wind energy. *Microelectronics and Reliability*, 36(9):1253–1261.
- Isaac, Y. F. L. and Lam, C. J. (2000). A study of Weibull parameters using long-term wind observations. *Renewable Energy*, 20(2):145–153.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, J., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., and Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3):437–471.
- Kiehl, J. T., Hack, J. J., Bonan, G. B., Boville, B. A., Breigleb, B. P., Williamson, D., and Rasch, P. (1996). Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3). Technical Report TN-420+STR, National Center for Atmospheric Research.
- Loveland, T., Reed, B., Brown, J., Ohlen, D., Zhu, J., Yang, L., and Merchant, J. (2000). Development of a global land cover characteristics database and igbp discover from 1-km avhrr data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6/7):1303–1330.
- Manne, A. S. and Richels, R. G. (2000). The Kyoto Protocol: A Cost-Effective Strategy for Meeting Environmental Objectives? *Energy Journal*, 21(suppl.):1–24.
- Moriondo, M. (2002-2003). Downscaling delle temperature minime e massime a partire da un gcm: il caso di firenze. Master's thesis, università degli Studi di Firenze.

- Pal, J. S., Small, E. E., and Eltahir, E. A. B. (2000). Simulation of regional-scale water and energy budgets: representation of subgrid cloud and precipitation processes within regcm. *J. Geophys. Res.-Atmospheres*, 105(D24)(29):579–594.
- Shields, C., D'Ambra, C. A., and Thompson, S. (1994). Regcm2 user documentation. Technical report, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.
- Silva, V. (2005). *Meteorologia e Climatologia*. Versão Digital, Recife.
- Sueia, H. (2007). Apontamentos de sinóptica. Universidade Eduardo Mondlane.
- Sundqvist, H., Berge, E., and Kristjansson, J. E. (1989). The effects of domain choice on summer precipitation simulation and sensitivity in a regional climate model. *J. Climate*, 11:2698–2712.
- Sutton, O. G. (1953). *Micrometeorology*. McGraw-Hill, N. York.
- Troen, I. and Petersen, E. L. (1989). European wind atlas. Technical report, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- Tucci, C., Clarke, R., Dias, P., and Collischonn (2000). Previsão de vazões com base na previsão climática. projecto BRA 00/029.
- Wilby, R., T.M.L., W., D., C., Jones, P., B.C, H., J., M., and D.S, W. (1998). Statistical downscaling of general circulation model output: a comparison methods. *Water Resources Research*, vol.34.
- WorldBank (2004). Estimating the Market Potential for the Clean Development Mechanism: Review of Models and Lessons Learned. PCFplus 19, WorldBank, Washington D.C.

# Apêndice A

## Médias anuais

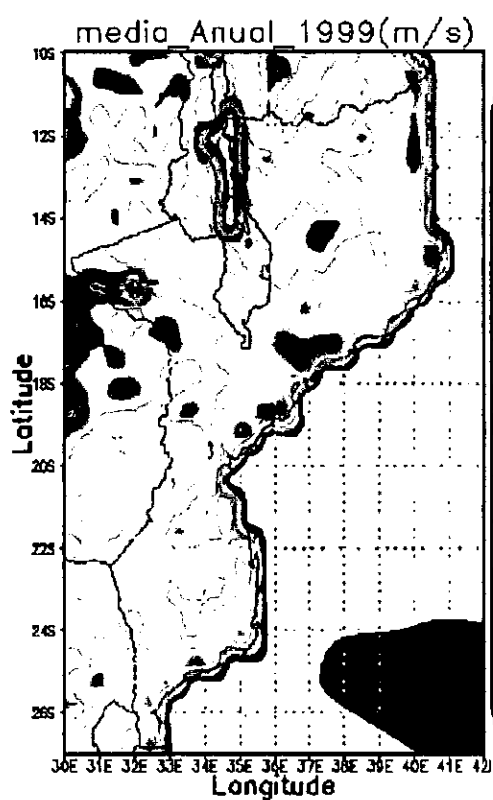


Figura A.1: Velocidade média dos ventos a 10m no ano de 1999

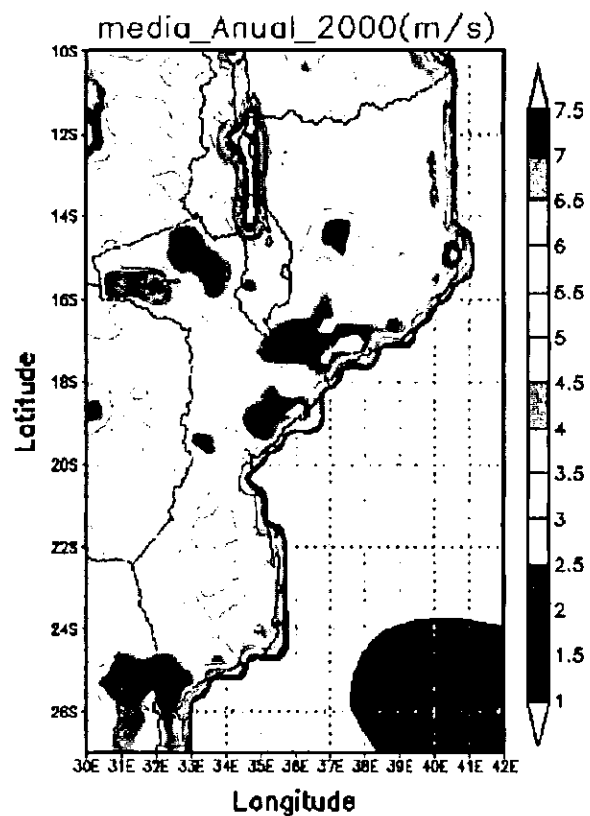


Figura A.2: Velocidade média dos ventos a 10m no ano de 2000

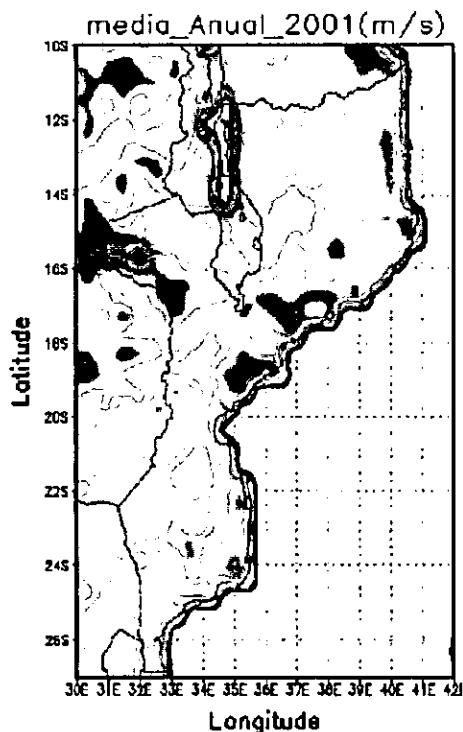


Figura A.3: Velocidade média dos ventos a 10m no ano de 2001

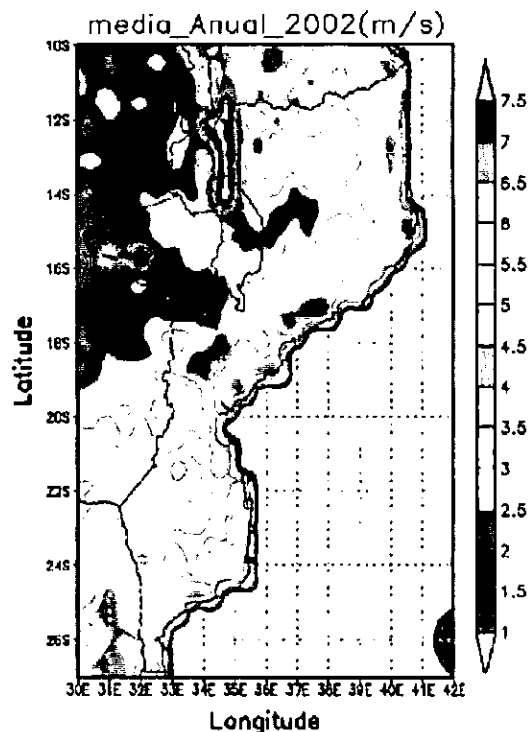


Figura A.4: Velocidade média dos ventos a 10m no ano de 2002

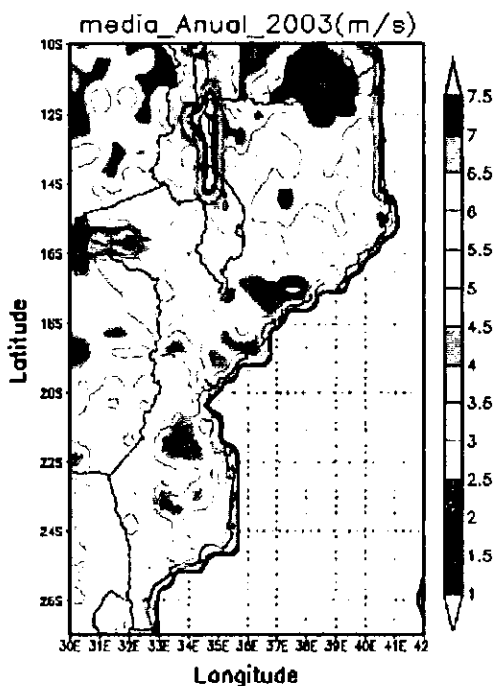


Figura A.5: Velocidade média dos ventos a 10m no ano de 2003



# Apêndice B

## Cálculo de Erros

Os erros foram calculados pelas seguintes fórmulas:

Erro Médio (Modelo-Observado):

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

Erro Viés (BE, Bias Error) mede a tendência do modelo para sobrestimar ou subestimar uma variável, e é definida por:

$$BE(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{oi}) \quad (\text{B.2})$$

Erro médio absoluto (MAE, Mean Absolute Error) é a medida das diferenças dos valores absolutos entre a previsão e observação de um campo particular e é definida por:

$$MAE(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - x_{oi}| \quad (\text{B.3})$$

Raiz do erro médio quadrático (RMSE, Root Mean Square Error) é a raiz quadrada da media das diferenças individuais quadráticas entre a previsão e as observações e é definida por:

$$RMSE(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{oi})^2} \quad (\text{B.4})$$

Onde:  $x_i$ - Valor obtido pelo modelo;

$x_{oi}$ - Valor observado;

N - Número total de observações .

## Apêndice C

### Gráficos e tabelas de cálculos de erros para as estações em estudo

#### C.1 Estação de Pemba

Ano	Valor Modelado	Valor Observado	Erro médio
JAN	0.28	0.68	0.41
FEV	0.32	0.68	0.36
MAR	0.27	0.59	0.32
ABR	0.17	0.8	0.63
MAI	0.11	1.02	0.92
JUN	0.27	1.08	0.8
JUL	0.25	1.19	0.94
AGO	0.43	1.08	0.65
SET	0.63	1.11	0.49
OUT	0.5	1.01	0.51
NOV	0.49	1.04	0.55
DEZ	0.42	0.88	0.45
	Erro BE	Erro MAE	Erro RMSE
	-0.59	0.59	0.62

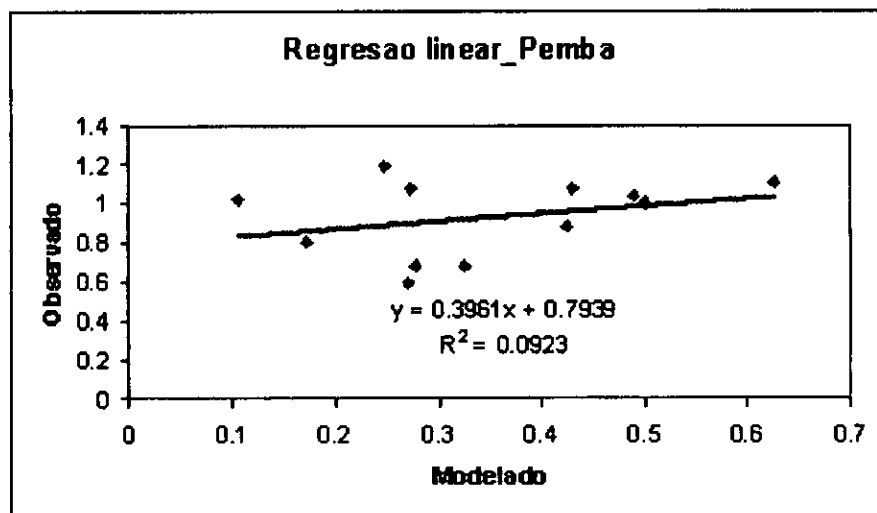


Figura C.1: Recta de regressão para estação de Pemba

## C.2 Estação de Lichinga

Ano	Valor Modelado	Valor Observado	Erro médio
JAN	7.91	2.74	5.16
FEV	7.8	2.72	5.08
MAR	7.62	3.37	4.26
ABR	6.56	4.17	2.39
MAI	3.87	3.68	0.19
JUN	3.23	3.77	0.54
JUL	3.55	4.32	0.77
AGO	3.59	4.17	0.58
SET	3.76	4.33	0.57
OUT	4.45	4.67	0.22
NOV	3.84	4.38	0.54
DEZ	5.65	3.37	2.28
	Erro BE	Erro MAE	Erro RMSE
	1.34	1.88	2.64

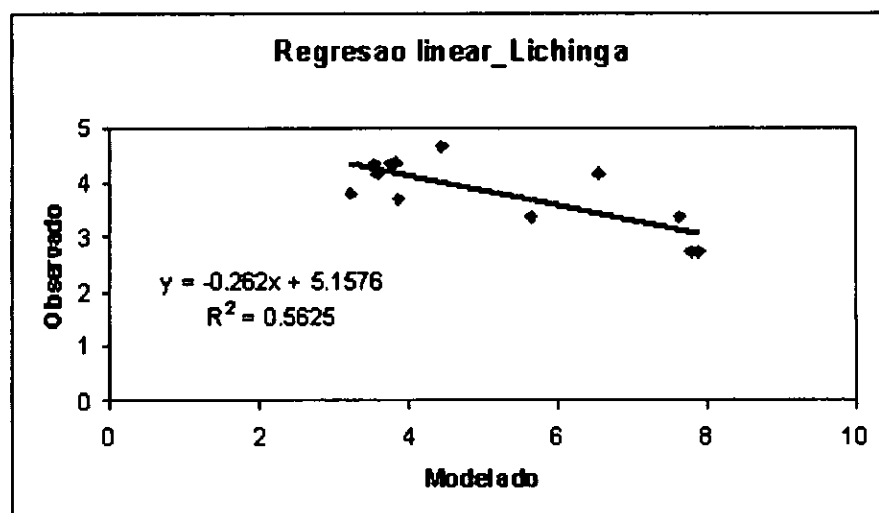


Figura C.2: Recta de regressão para estação de Lichinga

### C.3 Estação de Quelimane

Mes	Valor Modelado	Valor Observado	Erro médio
JAN	6.58	1.83	4.76
FEV	7.36	2.05	5.32
MAR	6.95	1.93	5.02
ABR	8.17	2.27	5.9
MAI	6.48	1.8	4.68
JUN	5.99	1.66	4.32
JUL	5.45	1.51	3.94
AGO	5.95	1.65	4.3
SET	4.39	1.22	3.17
OUT	4.69	1.3	3.39
NOV	5.79	1.61	4.18
DEZ	5.97	1.66	4.31
	Erro BE	Erro MAE	Erro RMSE
	4.44	4.44	4.5

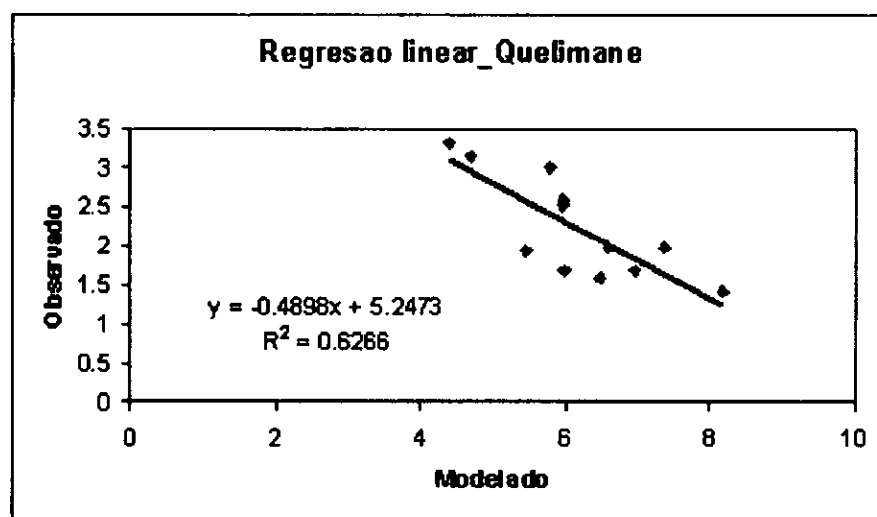


Figura C.3: Recta de regressão para estação de Quelimane