



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ

VINÍCIUS MILANEZ COUTO

**MODELAGEM NUMÉRICA DOS VENTOS LOCAIS NO MUNICÍPIO
DE FORTALEZA**

FORTALEZA - CEARÁ

2010

VINÍCIUS MILANEZ COUTO

MODELAGEM NUMÉRICA DOS VENTOS LOCAIS NO MUNICÍPIO DE FORTALEZA

Monografia submetida à Coordenação do Curso de Graduação em Física da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Graduado em Física.

Orientador : Prof. Dr. João Bosco Verçosa Leal Junior

FORTALEZA - CEARÁ

2010

C871m Couto, Vinícius Milanez
Modelagem numérica dos ventos locais no município de Fortaleza/ Vinícius Milanez Couto . — Fortaleza, 2010 .
44 p.
Orientador : Prof. Dr. João Bosco Verçosa Leal Junior .
Monografia (Graduação em Física) – Universidade Estadual do Ceará .
1. Ventos locais 2. Modelagem numérica 3. RAMS. I. Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia.

CDD: 530

VINÍCIUS MILANEZ COUTO

MODELAGEM NUMÉRICA DOS VENTOS LOCAIS NO MUNICÍPIO DE FORTALEZA

Monografia submetida à Coordenação do Curso de Graduação em Física da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Graduado em Física.

Aprovada em 01/10/2010.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Bosco Verçosa Leal Junior (Orientador)
Universidade Estadual do Ceará

Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva
Universidade Estadual do Ceará

Prof. Dr. Gerson Paiva Almeida
Universidade Estadual do Ceará

A todos que me fizeram chegar onde estou.

AGRADECIMENTOS

A meu orientador pelo grande auxílio e convívio;

A meus pais pela criação que me deram;

Ao Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas (MCFA) pela estrutura e pela possibilidade de desenvolver diversas capacidades;

Aos professores do MCFA, principalmente ao Prof. Emerson Mariano da Silva, Prof. Gerson Paiva Almeida e, a menos tempo, Prof. Alexandre de Araújo Costa pelos conhecimentos que adquiri;

A meus amigos, principalmente ao Rafael Magalhães Aragão, Francisco das Chagas Vasconcelos Júnior, Cíntia Carolina Mota Menezes, Camylla Maria Narciso de Melo por me aturar;

A Carla Farias Aragão, por me compreender e pelo convívio.

Não existe coincidência, só o inevitável.

Yuuko, do manga xxxHolic

RESUMO

O objetivo deste trabalho é simular a circulação de brisa marítima-terrestre para a região de Fortaleza, no Ceará. Para isso utilizou-se o modelo numérico *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS), com dados do projeto *Reanalysis-2*. Foram simulados os meses de agosto de 2008 e março de 2009. Os resultados mostram que o modelo reproduziu de forma satisfatória a brisa terrestre, com a formação de uma frente de brisa, que ocorre das 21 h às 09h local. Por outro lado, o modelo não foi capaz de reproduzir a brisa marítima, não sendo observada a presença da respectiva frente de brisa.

Palavras-chave: Ventos locais. Modelagem numérica. RAMS.

ABSTRACT

This work aims to simulate the sea-breeze circulations over Fortaleza city, located in Northeast of Brazil. The simulations were performed with the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) numerical model. The assimilation data was provided by the Reanalysis-2 project. The period were the months of august, 2008 and march, 2009. The model reproduced well the land breeze circulation, showing the formation of a breeze front, which penetrated the ocean. The model was not able to represent the sea breeze.

Keywords: Local winds. Atmospheric modeling. RAMS.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 Mapa do Ceará, com destaque em vermelho para o município de Fortaleza. Fonte: <http://www.guianet.com.br/>, acesso em 26/07/2010. 18
- Figura 2 O recorte da imagem do satélite ilustra a posição da ZCIT no dia 15/03/2009, às 21:00 UTC. Fonte: Climanalise (2009) 21
- Figura 3 Modo de como se comporta a atmosfera sob condições normais, sob influência de El Niño e La Niña, respectivamente. Fonte: en.wikipedia.org, acesso em 26/07/2010. 21
- Figura 4 Demonstração da brisa marítima. A chaminé de baixo está a 75 metros e está sob influência da brisa marítima e a de cima, a 115 metros, não. Fonte: Simpson (1994) 23
- Figura 5 Modo de como se comporta a atmosfera sob as condições da circulação de brisa marítima e terrestre, respectivamente. As linhas colocadas nas figuras são linhas que possuem mesmo nível de pressão. Fonte: www.master.iag.usp.br, acesso em 26/07/2010. 23
- Figura 6 Circulação de ilha de calor urbana. Fonte: www.intellicast.com, acesso em 26/07/2010. 24
- Figura 7 Exemplo de influência da brisa marítima e ilha de calor urbano. Adaptado. Fonte: Ohashi e Kida (2002). 25
- Figura 8 Disposição das grades utilizadas no estudo. 27

Figura 9	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 09 de agosto de 2009 as 21h local.	28
Figura 10	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 10 de agosto de 2009 as 00h local.	29
Figura 11	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 10 de agosto de 2009 as 03h local.	29
Figura 12	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 10 de agosto de 2009 as 06h local.	30
Figura 13	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 10 de agosto de 2009 as 09h local.	30
Figura 14	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 12h local.	31
Figura 15	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 10 de agosto de 2009 as 15h local.	31
Figura 16	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 10 de agosto de 2009 as 18h local.	32

Figura 17	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 05 de março de 2009 as 21h local.	33
Figura 18	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 06 de março de 2009 as 00h local.	34
Figura 19	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 06 de março de 2009 as 03h local.	34
Figura 20	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 06 de março de 2009 as 06h local.	35
Figura 21	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 06 de março de 2009 as 09h local.	35
Figura 22	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 06 de março de 2009 as 12h local.	36
Figura 23	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 06 de março de 2009 as 15h local.	36
Figura 24	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 06 de março de 2009 as 18h local.	37

Figura 25	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 21h local.	38
Figura 26	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 00h local.	38
Figura 27	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 03h local.	39
Figura 28	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 06h local.	39
Figura 29	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 09h local.	40
Figura 30	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 12h local.	40
Figura 31	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 15h local.	41
Figura 32	Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 18h local.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Definições de escala atmosférica, onde C_H é o comprimento de escala horizontal (em metros). Adaptado de Thunis e Bornstein (1996) e de Lin (2007).	20
Tabela 2	Algumas parametrizações utilizadas no trabalho.	27

LISTA DE SÍMBOLOS

C_H	Escala atmosférica horizontal (metros)
u	velocidade zonal
v	velocidade meridional

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
RAMS	<i>Regional Atmospheric Modeling System</i>
CSU	<i>Colorado State University</i>
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
omega	velocidade vertical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Estrutura do trabalho	18
2	TIPOS DE CIRCULAÇÃO E SUAS INTERAÇÕES	19
2.1	Ventos de escala sinótica	19
2.1.1	Zona de Convergência Intertropical	19
2.1.2	El Niño e La Niña	19
2.2	Ventos locais	22
2.2.1	Circulações de brisa	22
2.2.2	Circulações de ilhas de calor urbanas	23
2.3	Interações entre as circulações	24
3	METODOLOGIA	26
4	RESULTADOS	28
4.1	Período seco	28
4.1.1	Dia 10	28
4.2	Período chuvoso	33
4.2.1	Dia 6	33
4.2.2	Dia 13	38
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

Na sociedade atual, existe cada vez mais a valorização dos estudos dos fenômenos atmosféricos, pois há diversos fatores em que este assunto influencia, como no auxílio da previsão de fenômenos extremos (VASCONCELOS JÚNIOR, 2010), na dispersão de poluentes (FREITAS, 2003), nos meios de transporte (CAVALCANTI, 1982), geração e consumo de energia elétrica e problemas de saúde (MEMON; LEUNG; LIU, 2009). Outro fator importante é o aumento cada vez maior das regiões urbanas, modificando bastante as propriedades físicas e químicas do ar atmosférico nessas regiões.

Segundo Cavalcanti (1982), os ventos locais possuem bastante importância nesse quadro, pois eles podem modificar o clima nas regiões onde se desenvolvem através do escoamento do ar característico, do desenvolvimento de nuvens, aumento ou diminuição de chuvas e da alteração da temperatura, umidade relativa, velocidade e direção dos ventos, concentração de aerossóis, dentre outros.

Fortaleza é um município situado no litoral do Estado do Ceará (Figura 1), que por sua vez, se situa na região Nordeste do Brasil. Por causa disso, diversos ventos atuam nessa região, tanto as circulações de escala sinótica (grande escala), quanto as de mesoescala (ventos locais). Alguns exemplos de fenômenos oceano-atmosféricos que atuam de forma direta ou indireta na região do nordeste brasileiro são (CLIMANALISE, 2009; TEIXEIRA, 2008; MOURA; ZANELLA; SALES, 2008): A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), El Niño, La Niña, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), as linhas de instabilidade, brisa marítima-terrestre e as ilhas de calor urbanas.

O intuito deste trabalho é o de identificar a formação das circulações locais na cidade de Fortaleza, em especial as circulações de brisa marítima e terrestre. Também será verificado, de forma qualitativa, suas características e influências. Para isso, foram realizadas simulações computacionais no modelo numérico de mesoescala *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS), disponibilizado pela *Colorado State University* (CSU).

Os dados de saída do modelo servirão como base para o estudo da circulação de



Figura 1 – Mapa do Ceará, com destaque em vermelho para o município de Fortaleza. Fonte: <http://www.guianet.com.br/>, acesso em 26/07/2010.

brisa, e servirão para identificar a formação de frentes de brisa ao longo da costa próxima à Fortaleza.

1.1 Estrutura do trabalho

O texto apresentará a seguinte estrutura:

No Capítulo 2 será discutido de forma breve as classificações dos fenômenos que agem sobre a atmosfera, a circulação de brisa e de outros fenômenos que influem na atuação deste.

No Capítulo 3 será apresentado o modelo atmosférico utilizado no trabalho, além da obtenção dos dados e da configuração do modelo.

No Capítulo 4 será discutido os resultados gerados pelo modelo.

No Capítulo 5 haverá as discussões finais, a conclusão do estudo e as perspectivas para trabalhos futuros.

2 TIPOS DE CIRCULAÇÃO E SUAS INTERAÇÕES

Devido as diferentes forças que agem sobre o planeta, movimentos atmosféricos nos sistemas de fluidos possuem comportamentos diferentes nas diversas escalas temporais e espaciais. Para entender melhor a complexidade dos vários processos físicos e dinâmicos, foram criadas classificações das escalas atmosféricas, como se pode ver na Tabela 1.

A seguir, serão discutido alguns tipos de circulação e seus exemplos.

2.1 Ventos de escala sinótica

Segundo Thunis e Bornstein (1996), os ventos de escala sinótica são aqueles que possuem escala temporal superior a 1 dia e escala espacial horizontal de 200 km, podendo ter grande influência sobre os ventos locais, reforçando-os ou inibindo-os. Se encaixam nesse tipo de fenômeno, de acordo com Leal Junior (1997) a circulação atmosférica associada a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e ao El Niño e La Niña.

2.1.1 Zona de Convergência Intertropical

Durante a quadra chuvosa no Ceará (ALVES; REPELLI, 1992), que vai de fevereiro a maio, a ZCIT é a principal causa da formação de chuvas nas regiões Norte e Nordeste. Ela nada mais é do que uma grande região de confluência dos ventos Alísios e é caracterizada pela alta nebulosidade e pelas zonas de baixa pressão atmosférica permanente. Podemos observá-la como uma faixa de nebulosidade entre o Nordeste do Brasil e a África, na Figura 2, que mostra uma imagem de satélite sobre o Brasil, do dia 15/03/2009, às 21:00 UTC (Tempo Universal Coordenado, do inglês: *Universal Time Coordinated*).

2.1.2 El Niño e La Niña

O El Niño (La Niña) é caracterizado pelo aquecimento (resfriamento) anormal das águas superficiais do oceano Pacífico, na região equatorial próxima à América do Sul, associado a um enfraquecimento (aumento) da corrente equatorial. Para a região nordestina do Brasil pode influenciar na inibição (aumento) das chuvas.

Tabela 1 – Definições de escala atmosférica, onde C_H é o comprimento de escala horizontal (em metros). Adaptado de Thunis e Bornstein (1996) e de Lin (2007).

C_H (m)	Duração	Stull (1988)	Pielke (1984)	Orlanski (1975)	Thunis e Bornstein (1996)	Fenômenos atmosféricos
10^7	1 mês	Macro	Sinótica	Macro- α	Macro- α	Circulação geral, ondas longas.
	1 semana			Macro- β	Macro- β	Ciclones Sinóticos.
2×10^6				Meso- α	Macro- γ	Frentes, furacões, tempestades tropicais, complexos convectivos de mesoescala.
2×10^5	1 dia	Meso	Meso	Meso- β	Meso- β	Jatos de baixos níveis, grupos de tempestade, ventos e ondas de montanha, brisas marítimas, circulações urbanas.
2×10^4	1 hora			Micro	Micro	Meso- γ
	2×10^3	Micro- α	Meso- σ			Cumulus, tornado, saltos catabáticos.
200	30 minutos	Micro	Micro	Micro- β	Micro- β	Colunas de fumaça, pequenos vórtices turbulentos, trombas d'água, redemoinhos de areia.
20	1 minuto			Micro- σ	Micro- γ	Micro- γ
	2	1 segundo				

Um exemplo é a Figura 3, que mostra a circulação do ar nas seguintes condições: normal (sem anomalia de temperatura), sob influência de El Niño ou La Niña .

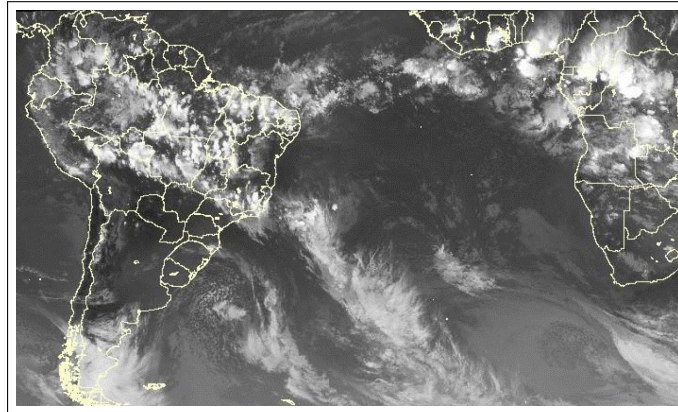


Figura 2 – O recorte da imagem do satélite ilustra a posição da ZCIT no dia 15/03/2009, às 21:00 UTC.
Fonte: Climanalise (2009)

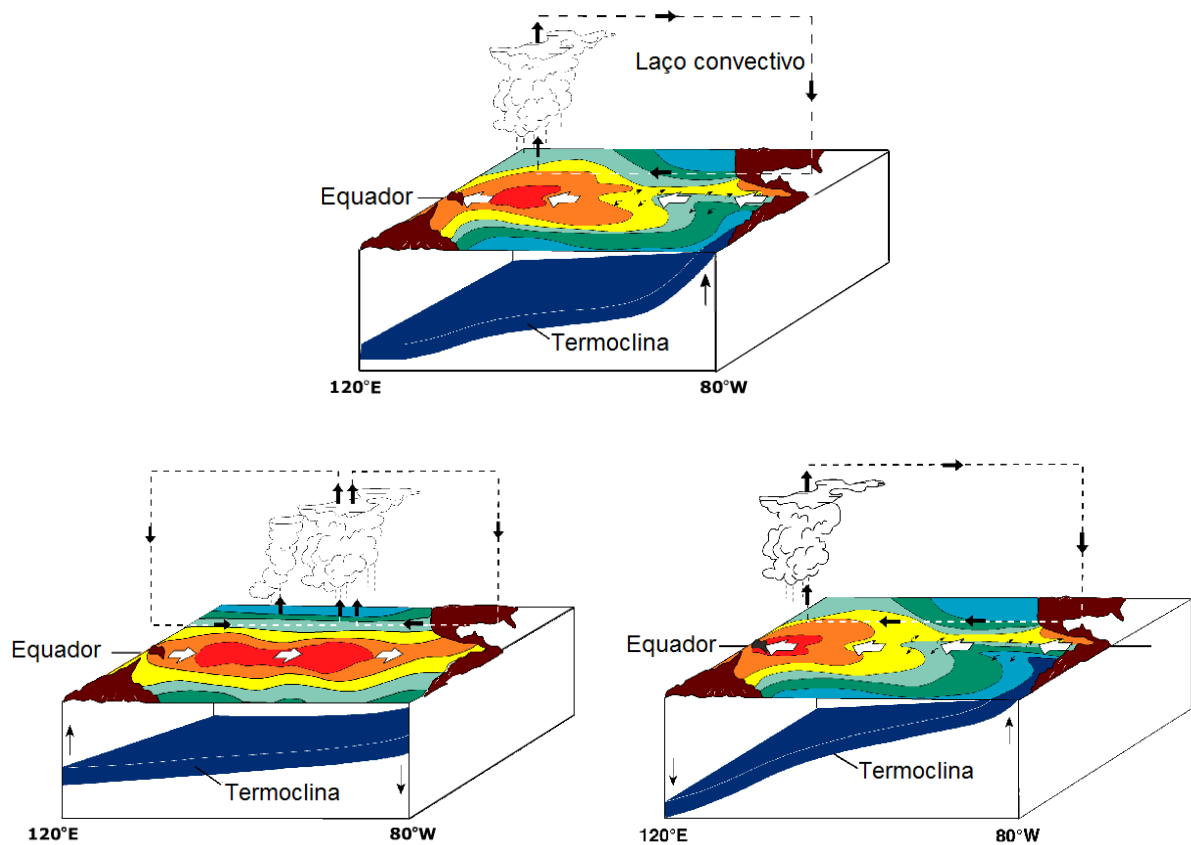


Figura 3 – Modo de como se comporta a atmosfera sob condições normais, sob influência de El Niño e La Niña, respectivamente. Fonte: en.wikipedia.org, acesso em 26/07/2010.

2.2 Ventos locais

Segundo Freitas (2003) ventos locais são uma classe de movimento atmosférico que possuem uma escala de tempo de até um dia e escala de espaço de até poucas centenas de quilômetros, o que para Thunis e Bornstein (1996) (ver Tabela 1) se encaixa na definição de mesoescala β . Sua formação pode ter como origem forçantes mecânicas ou térmicas.

As circulações mecanicamente forçadas são causadas por efeitos gerados pela topografia ou por obstáculos de porte considerável. As ondas de Lee e os pequenos vórtices turbulentos são exemplos desse tipo de forçante. As circulações termicamente forçadas são originados de contrastes térmicos da superfície. Exemplos desse tipo são as circulações de brisa e de ilha de calor.

2.2.1 Circulações de brisa

Para Freitas (2003), Cavalcanti (1982) e Teixeira (2008) as circulações de brisa marítima são causadas devido às diferentes capacidades térmicas entre o solo e o oceano. Pelo fato do oceano possuir uma maior capacidade térmica, quando expostos a radiação solar, ele aquece mais lentamente que o solo, o que influencia também no aquecimento da atmosfera próxima às suas superfícies. Como o ar mais aquecido é menos denso, gera-se um gradiente de pressão atmosférica, cujo sentido é perpendicular a fronteira das superfícies. O mesmo vale para a brisa terrestre, com a diferença de que o ar mais aquecido no caso é a do oceano, acarretando o sentido oposto do gradiente de pressão atmosférica. Ainda de acordo com esses autores, a brisa marítima possui características mais intensas que a brisa terrestre.

A influência das circulações de brisa no clima da região são: favorecer a formação e o desenvolvimento de chuvas no litoral, no oceano e também no interior, regular a temperatura e a umidade do ar.

As características da circulação de brisa marítima dependem da região onde se encontram. Para regiões tropicais temos: velocidade do vento podendo ultrapassar 11 m/s, altura limite de 2 km, período de ocorrência chegando a 80 % e penetração horizontal de mais de 100 km, e não se trata de um fenômeno cuja a formação ocorra necessariamente em períodos de céu claro.

Além da circulação de grande escala, outros fatores locais afetam a circulação de brisa, como: a forma da linha costeira, que se for côncava inibe (reforça) a brisa marítima (terrestre) e se for convexa ocorre o contrário, a topografia, a fricção diferencial e a vegetação.

Para Azorin-Molina e Chen (2009), a intensidade da brisa é proporcional a quantidade de radiação solar, e fatores de mesoescala que não dependem do gradiente de temperatura não causam muito efeito nas características do fenômeno.

Na figura 4, mostra-se um exemplo da brisa marítima. Durante o começo da manhã, a chaminé menor sofre o efeito de brisa marítima, enquanto o outro, não. Mas enquanto avança o tempo,

aumenta-se a intensidade e altura. Na figura 5 mostra a circulação de brisa marítima e terrestre.

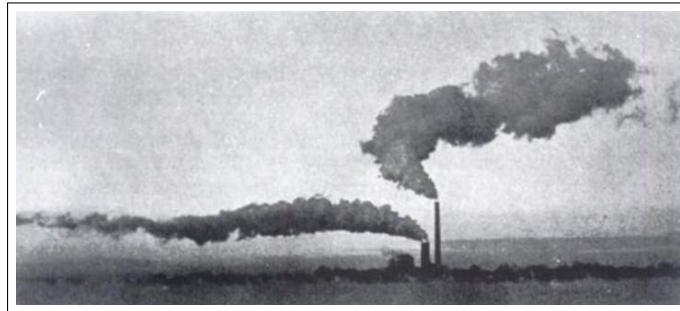


Figura 4 – Demonstração da brisa marítima. A chaminé de baixo está a 75 metros e está sob influência da brisa marítima e a de cima, a 115 metros, não. Fonte: Simpson (1994)

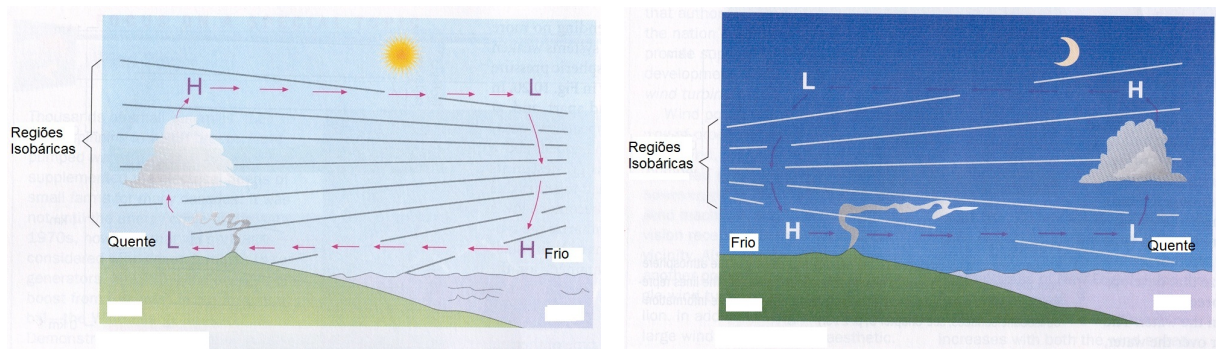


Figura 5 – Modo de como se comporta a atmosfera sob as condições da circulação de brisa marítima e terrestre, respectivamente. As linhas colocadas nas figuras são linhas que possuem mesmo nível de pressão. Fonte: www.master.iag.usp.br, acesso em 26/07/2010.

2.2.2 Circulações de ilhas de calor urbanas

Para Freitas (2003), Zhou e Shepherd (2010) e Moura, Zanella e Sales (2008), as circulações de ilha de calor urbanas são causadas pelos diferentes albedos das regiões afetadas, além da capacidade de liberar mais ou menos energia térmica para a atmosfera sobre as mesmas. Outro fator é a emissão de energia térmica através de fontes antropogênicas, quer dizer, indústrias, meios de transporte. Outras formas de aquecer são a alta reflexibilidade da luz solar entre as paredes de prédios e a alta taxa de transmissão de calor sensível e baixa transferência do calor latente, devido à alta eficiência do sistema de drenagem de água. Um fato interessante é que devido às fontes antropogênicas, a ilha de calor pode perdurar por tempo indefinido.

Também é interessante ressaltar que existe, além da ilha de calor, uma variação pouco conhecida aqui no Brasil, que é a ilha de frio ou ilha de frescor, na qual ocorre o contrário da ilha de calor.

Ohashi e Kida (2002) mostram que existem três fatores que determinam a intensidade da

ilha de calor, que são o tamanho da área urbana, a estabilidade térmica atmosférica e as diferentes propriedades superficiais das regiões. Como uma das regiões afetadas fica ao redor da outra, ela gera uma circulação convectiva ascendente, que contribui para a dispersão de poluentes.

Para Childs e Raman (2005), existe uma velocidade média máxima, onde acima disso é muito difícil a ocorrência da ilha de calor, pois o ar aquecido facilmente dispersa para outras regiões. Essa velocidade é por volta de 4 m/s.

Na figura 6 vemos como se comporta a circulação de ilha de calor urbana.

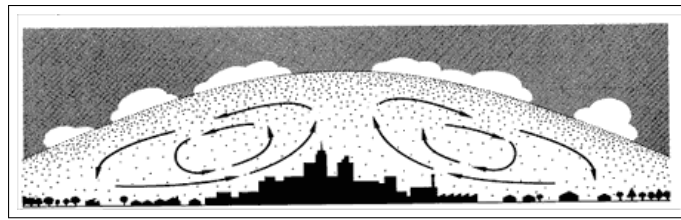


Figura 6 – Circulação de ilha de calor urbana. Fonte: www.intellicast.com, acesso em 26/07/2010.

2.3 Interações entre as circulações

Ohashi e Kida (2002) discutem as interações entre a circulação de brisa e a de ilha de calor através de modelo numérico. Também mostram a dispersão de poluentes causados por essa interação. Eles citam algumas características indicadas por Yoshikado (1990, 1992, 1994), dentre elas: a velocidade vertical da região é aumentada devido a convergência das circulações de brisa e a ilha de calor urbana, isso em relação a se não houvesse a região urbana; a escala vertical da circulação de brisa é aumentada, os poluentes são amplamente dispersados no eixo vertical; mesmo com a passagem da circulação de brisa sobre a cidade, a corrente de retorno da circulação de ilha de calor da região urbana é mantida e se move para o interior.

É possível se observar alguns dos resultados de Ohashi e Kida (2002) na Figura 7, onde ao lado esquerdo se apresenta a influencia de uma cidade de 10 km e do lado direito, duas cidades de 10 km e espaçamento de 32 km.

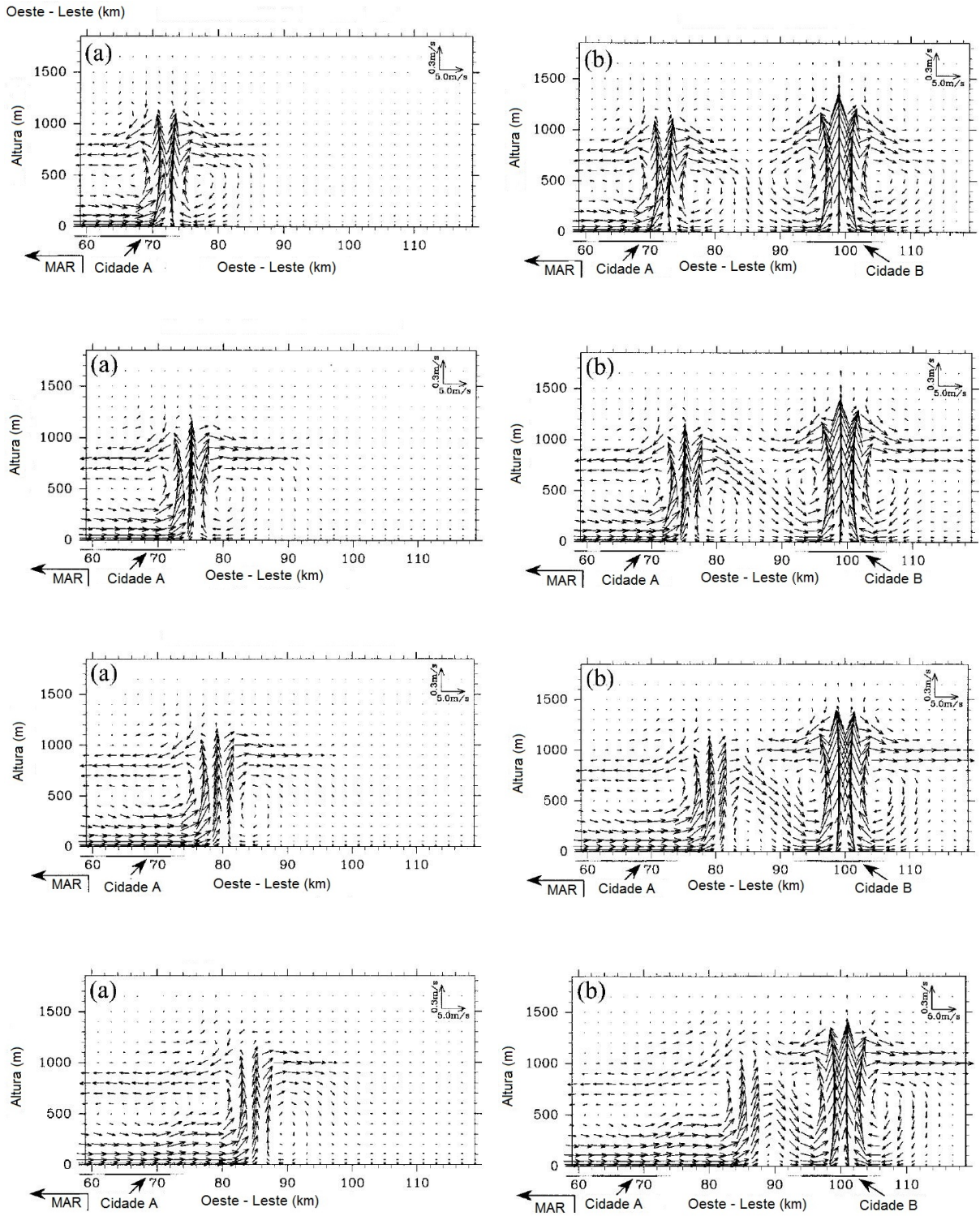


Figura 7 – Exemplo de influência da brisa marítima e ilha de calor urbano. Adaptado. Fonte: Ohashi e Kida (2002).

3 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, foi utilizado o modelo numérico de área limitada *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS), versão 6.0 (TREMBACK; WALKO, 2001). Suas parametrizações físicas contemplam circulações de mesoescala ou de resoluções de escala superiores. O modelo é construído sobre equações compressíveis e não hidrostáticas da dinâmica e termodinâmica da atmosfera, além das equações de diversas formas de água presentes na atmosfera. As grades podem se comunicar de forma interativa através de aninhamento, permitindo o estudo e cálculo dos diversos fenômenos meteorológicos em diferentes escalas.

Os dados de inicialização e das condições de fronteira são provenientes do projeto *Reanalysis-2* (KALNAY et al., 1996; KANAMITSU et al., 2002; SAHA et al., 2010) que são observados através de modelos globais e de dados observado de diversas fontes. Esses dados ficam dispostos em grades de $2,5^\circ$ horizontais, totalizando 144 pontos zonais por 73 pontos meridionais e 17 níveis verticais de pressão (hPa) (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10). São disponibilizados de 6 em 6 horas iniciando no ano de 1979. Os dados são disponibilizados no portal eletrônico¹ do projeto e possui as seguintes variáveis básicas: temperatura do ar, altura geopotencial, umidade relativa, velocidade vertical omega, velocidade zonal (u) e velocidade meridional (v) do vento.

Neste estudo serão simulados os períodos dos meses de agosto de 2008, que está inserido período seco do ano na região, e de março de 2009, que está inserido no período chuvoso. Foram utilizadas 3 grades aninhadas e centradas no município de Fortaleza, possuindo resoluções horizontais de 12500, 2500 e 500 metros e 81, 102 e 157 pontos em ambos os eixos, da grade de menor resolução para a de maior, de forma que a região em estudo, coberta pelas grades do modelo, são mostradas na Figura 8.

O eixo vertical possui 52 pontos nas três grades, começando de -9,3 m (o primeiro ponto vertical se localiza abaixo do nível do solo), com espaçamento inicial de 20 m e razão de alargamento de 1,1 até chegar aos 10248,7 m. Após essa altura o espaçamento entre pontos verticais é de 1000 m até chegar ao topo da grade, que é de 19252,7 m.

Na Tabela 2 estão listadas as principais parametrizações e esquemas disponíveis no modelo, juntamente com os valores adotados nas simulações.

¹http://nomad3.ncep.noaa.gov/ncep_data/index.html

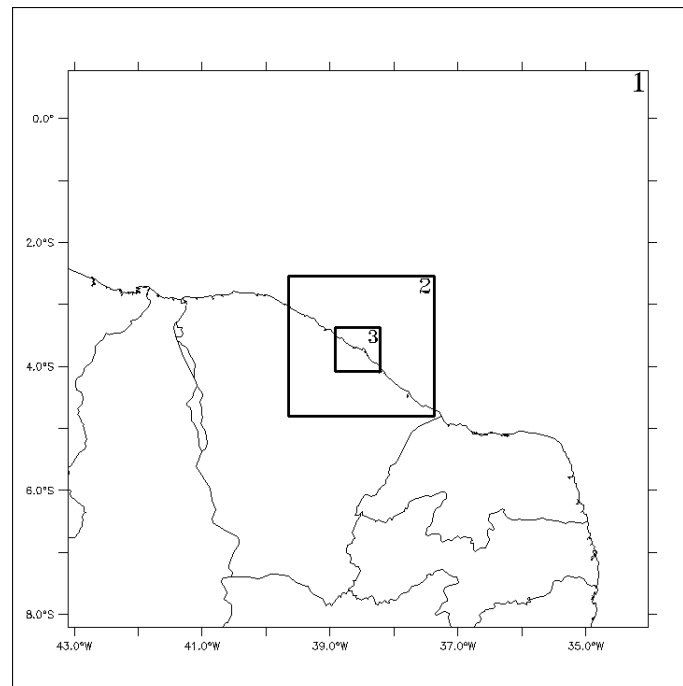


Figura 8 – Disposição das grades utilizadas no estudo.

Tabela 2 – Algumas parametrizações utilizadas no trabalho.

Ambos os períodos		
Parametrização de convecção		resolvida explicitamente
Parametrização de radiação	ondas longas	Harrington
Parametrização de radiação	ondas curtas	Harrington
Parametrização de turbulência		Mellor-Yamada
Parametrização de microfísica		nível 3
Pontos de <i>nudging</i> lateral		5
Início do <i>nudging</i> no topo		17000 m
Periodo seco		
Atualização das condições de radiação		1200 s
Atualização do <i>nudging</i> lateral		86400 s
Atualização do <i>nudging</i> no topo		108000 s
Atualização de <i>nudging</i> no centro		43200 s
Periodo chuvoso		
Atualização das condições de radiação		1200 s
Atualização do <i>nudging</i> lateral		1200 s
Atualização do <i>nudging</i> no topo		21600 s
Atualização de <i>nudging</i> no centro		17000 s

4 RESULTADOS

Na seção 4.1 e na seção 4.2, são mostrados os resultados das simulações para os períodos seco e chuvoso, respectivamente, a partir dos dados de saída para a grade 3 do modelo.

4.1 Período seco

Para o período seco, foi observado a formação de brisa terrestre em quase todos os dias de forma bastante semelhante. Podemos verificar através da subseção 4.1.1

4.1.1 Dia 10

Este é um típico dia em que há ocorrência da brisa terrestre, onde pode se observar a formação de brisa às 21 horas local (Figura 9) até as 09 horas local (Figura 13). Com o passar do tempo, a frente de brisa vai se desenvolvendo até conseguir adentrar o mar. Na figura 13 é possível observar que o limite do evento acompanha a linha do continente.

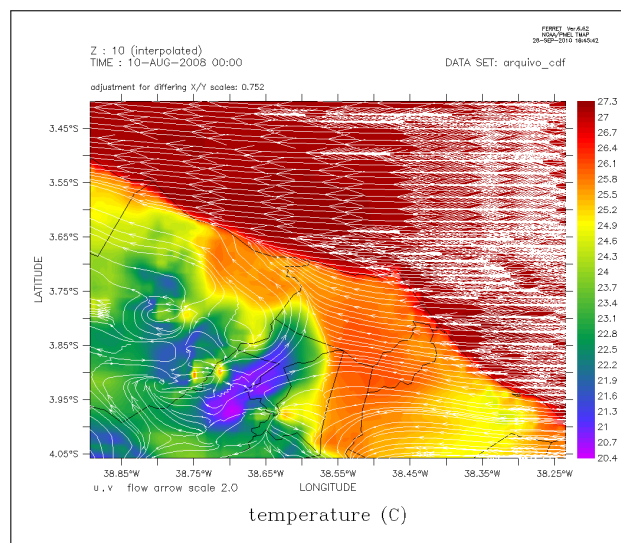


Figura 9 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 09 de agosto de 2009 as 21h local.

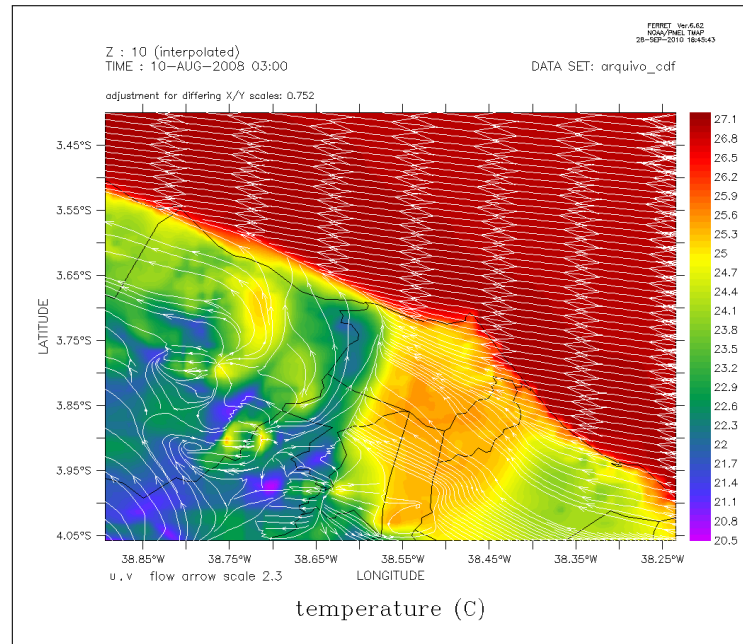


Figura 10 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 10 de agosto de 2009 as 00h local.

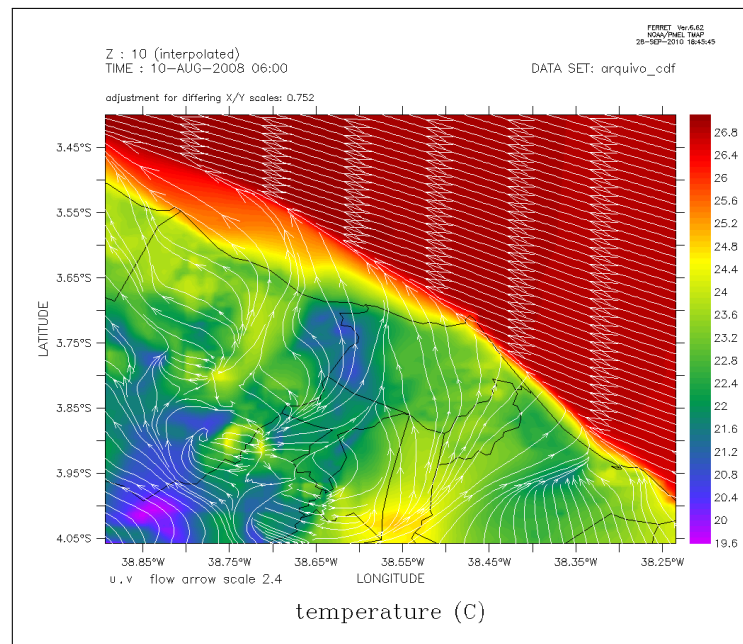


Figura 11 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 10 de agosto de 2009 as 03h local.

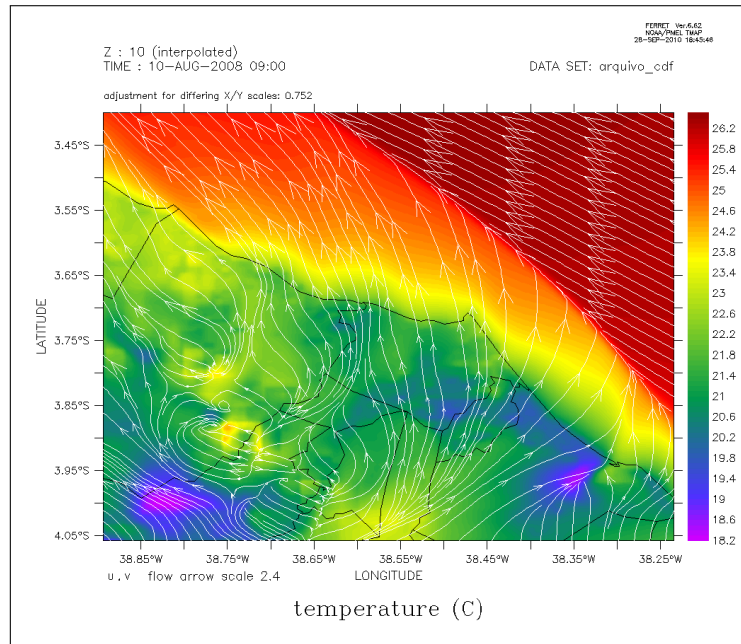


Figura 12 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 10 de agosto de 2009 as 06h local.

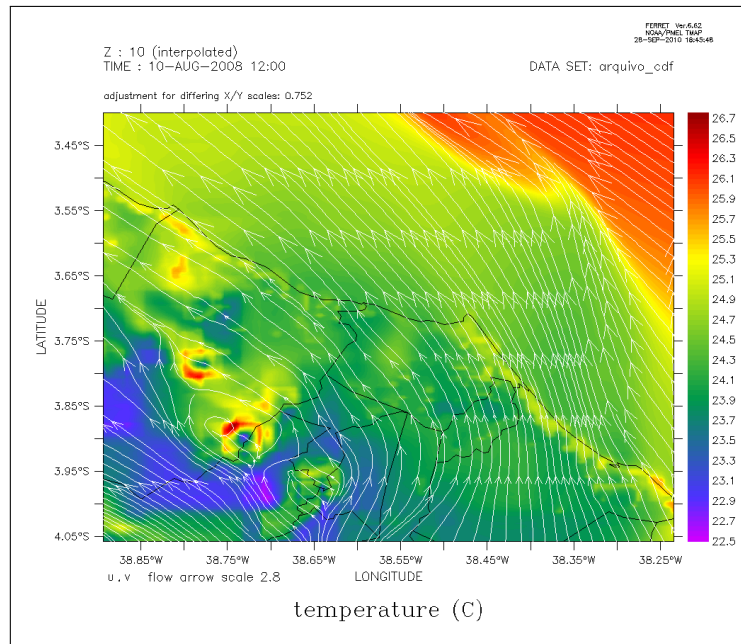


Figura 13 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 10 de agosto de 2009 as 09h local.

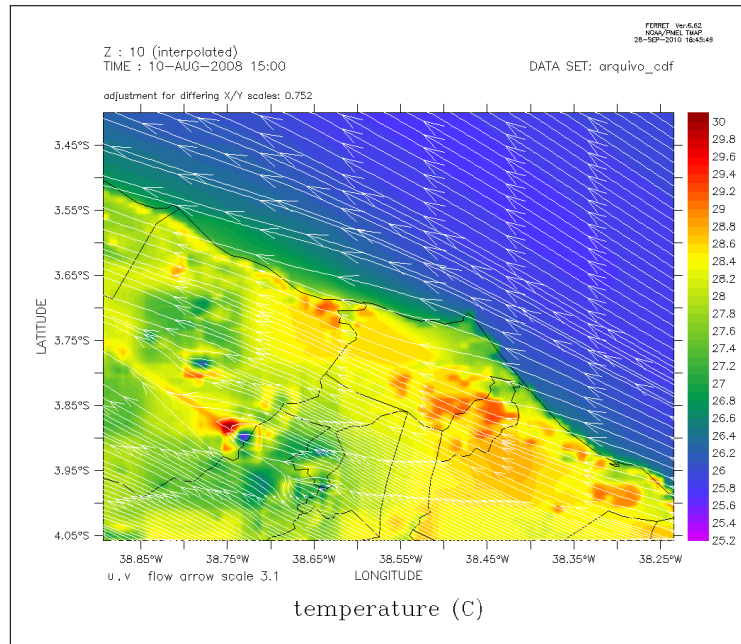


Figura 14 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 12h local.

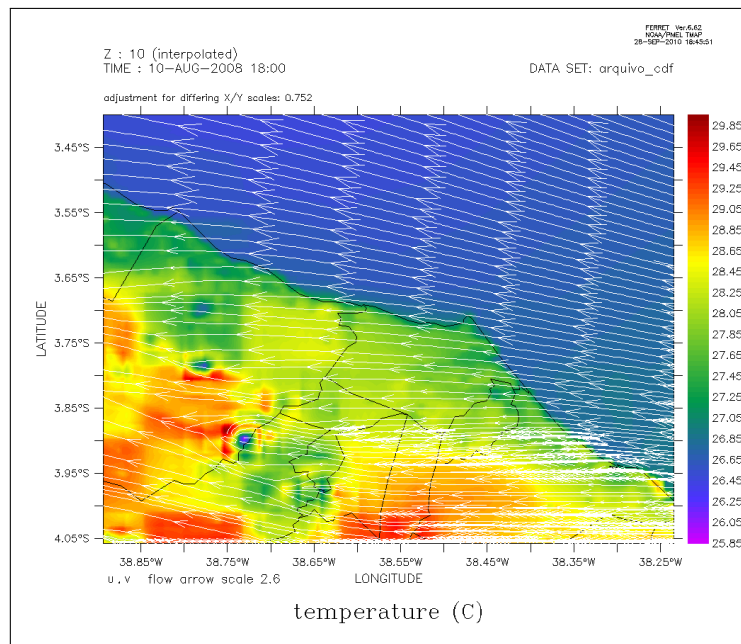


Figura 15 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 10 de agosto de 2009 as 15h local.

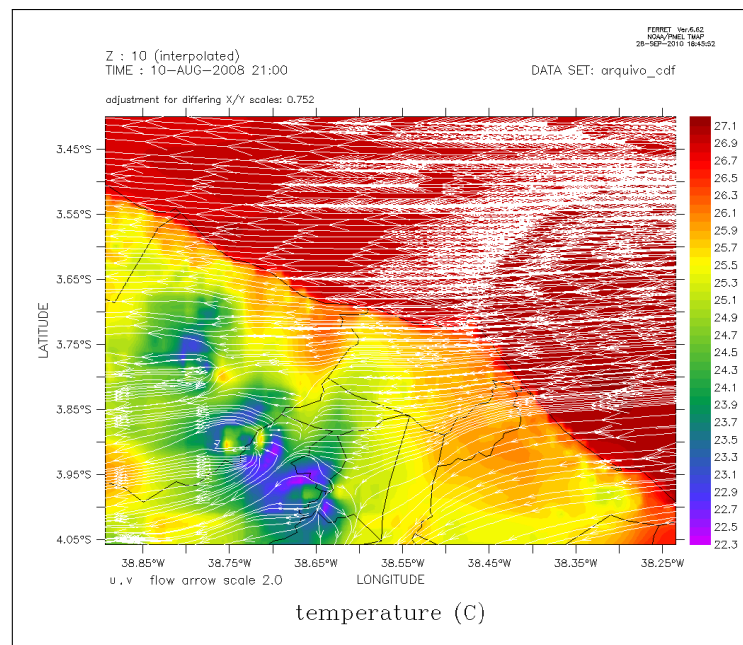


Figura 16 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 10 de agosto de 2009 as 18h local.

4.2 Período chuvoso

No período chuvoso foi verificado que em vários dias existe a formação da brisa terrestre, não sendo observado a formação brisa marítima (Ver subseção 4.2.1). Também foi observada a passagem da Zona de Convergência Intertropical. Neste período é mais difícil se observar a formação da brisa, podendo ser devido a grande formação de nuvens (Ver subseção 4.2.2).

4.2.1 Dia 6

Este é um dos dias em que há ocorrência da brisa terrestre, onde pode se observar a formação de brisa as 21 horas local (Figura 17) até as 12 horas local (Figura 22). Vemos que em relação ao dia 10 de agosto de 2008, a brisa é desenvolvida de modo mais lento, mas perdurando por mais tempo.

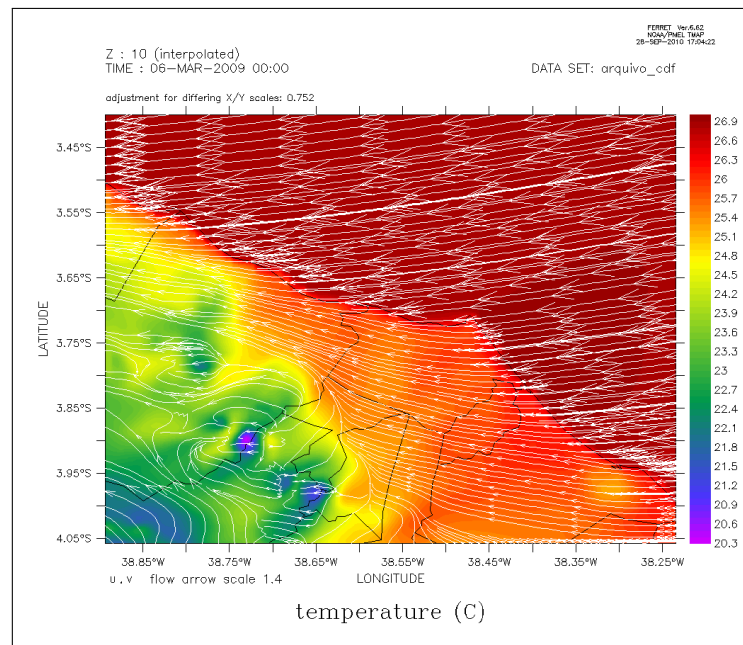


Figura 17 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 05 de março de 2009 as 21h local.

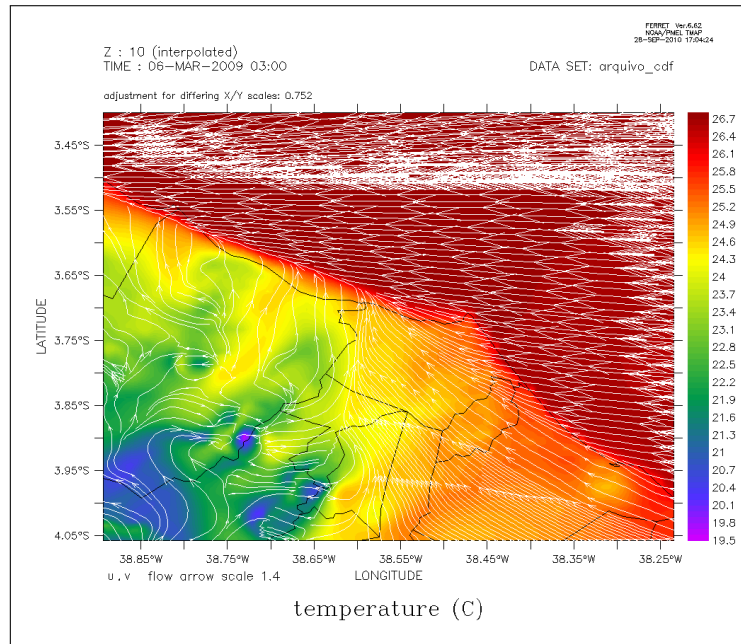


Figura 18 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 06 de março de 2009 às 00h local.

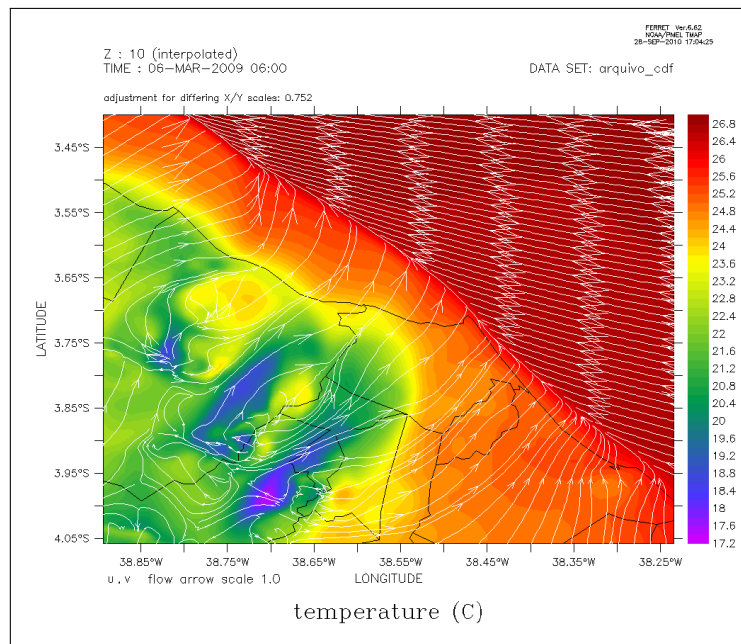


Figura 19 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 06 de março de 2009 às 03h local.

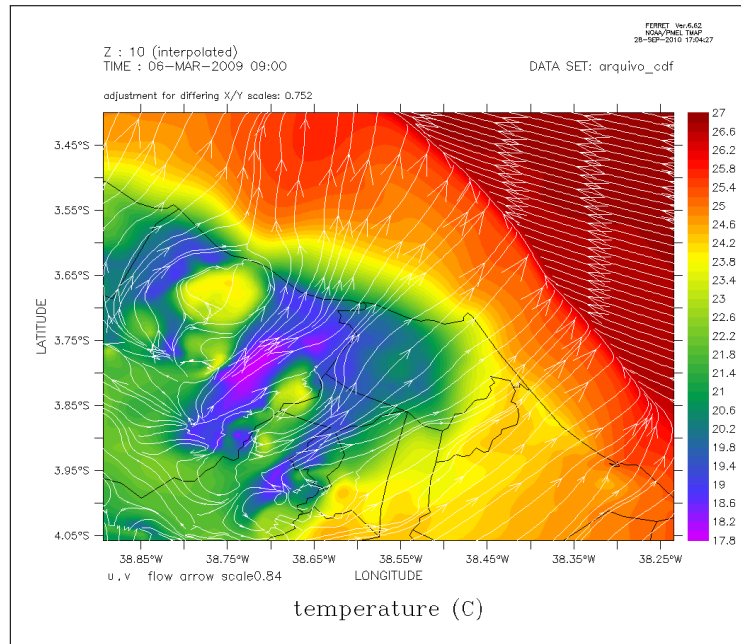


Figura 20 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 06 de março de 2009 as 06h local.

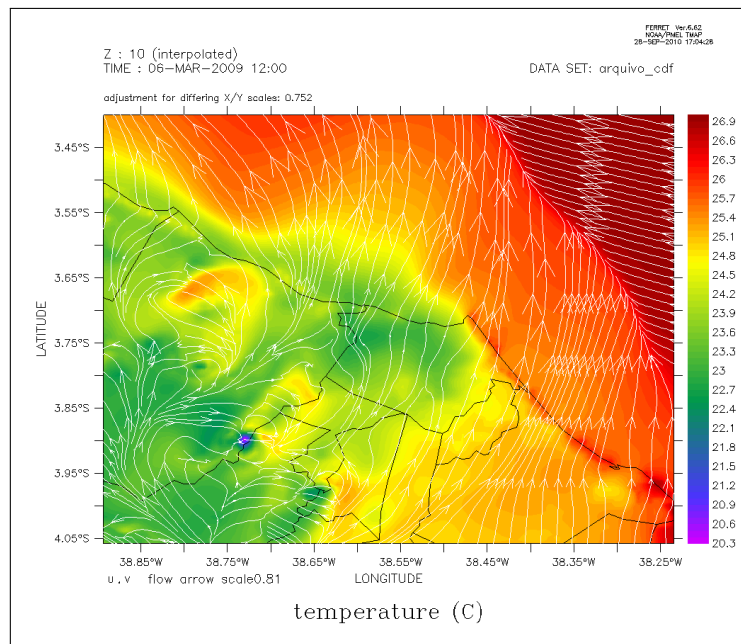


Figura 21 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 06 de março de 2009 as 09h local.

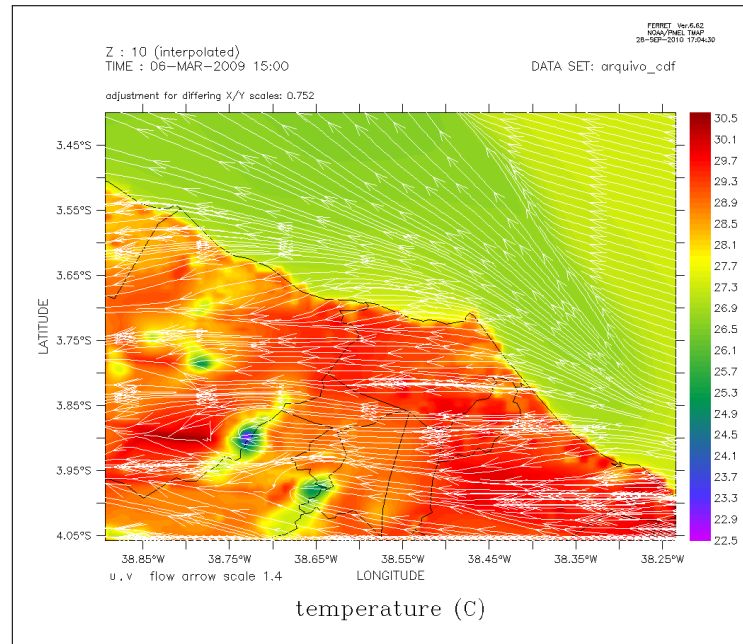


Figura 22 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 06 de março de 2009 as 12h local.

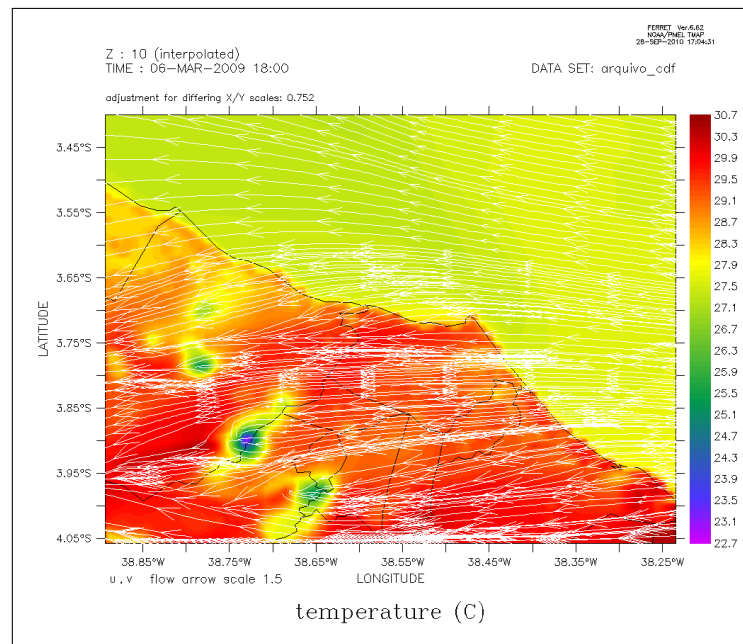


Figura 23 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 06 de março de 2009 as 15h local.

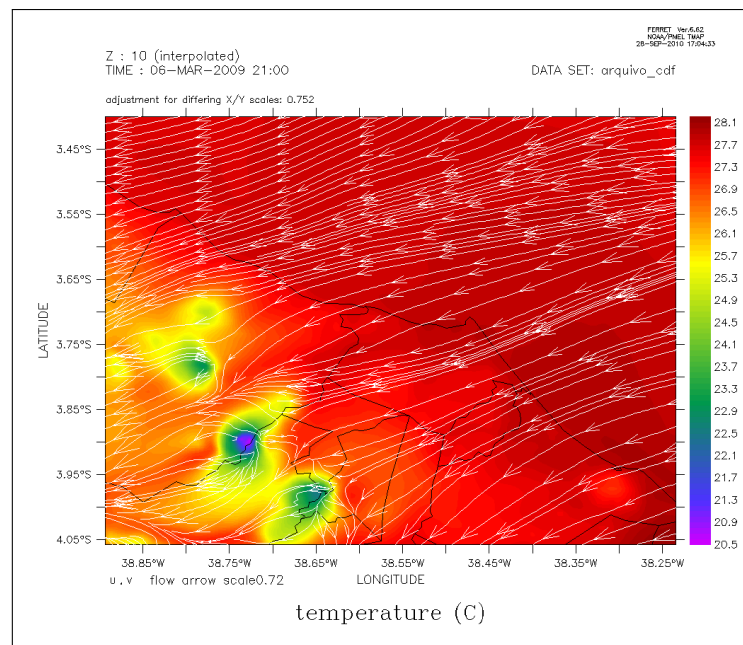


Figura 24 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 06 de março de 2009 as 18h local.

4.2.2 Dia 13

Este é um dia em que não houve a formação brisa terrestre, podendo a circulação associada a presença da Zona de Convergência Intertropical na região.

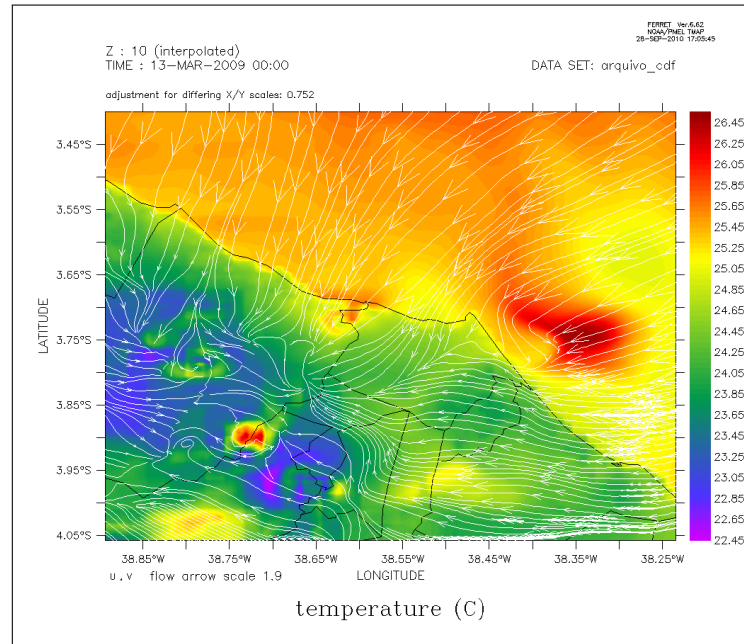


Figura 25 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 21h local.

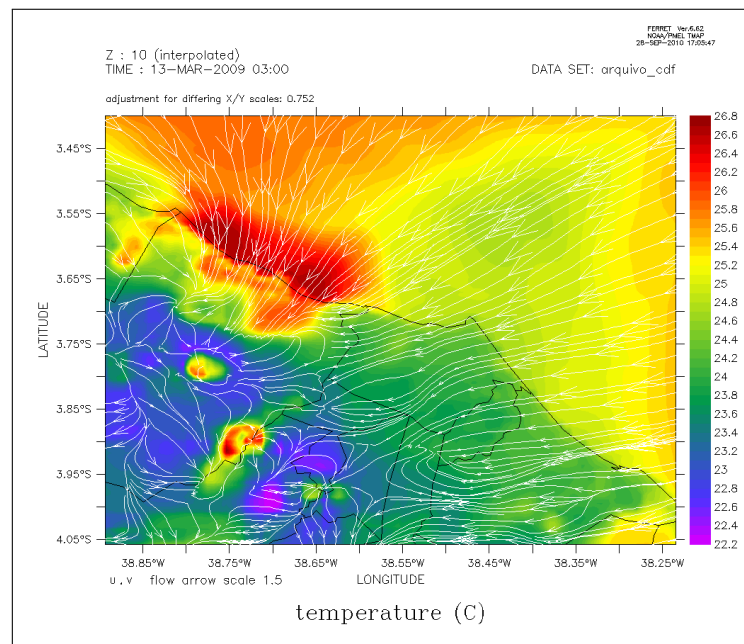


Figura 26 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 00h local.

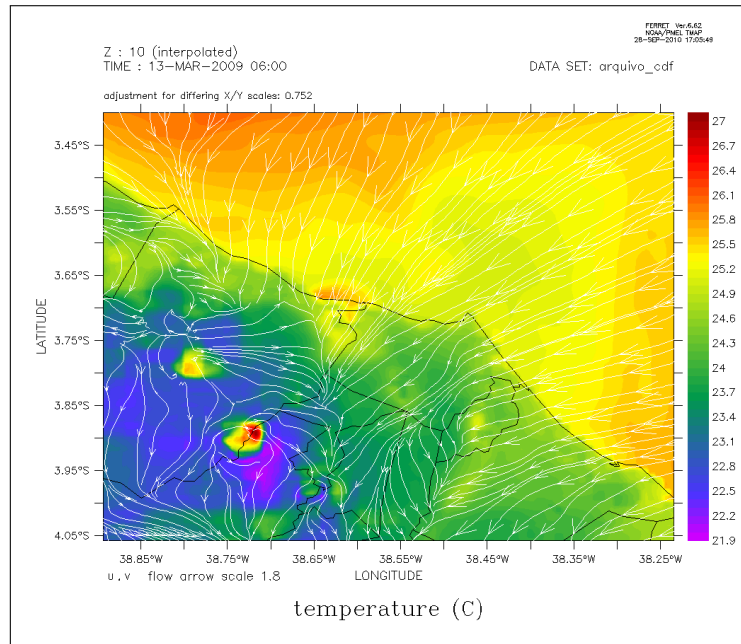


Figura 27 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 03h local.

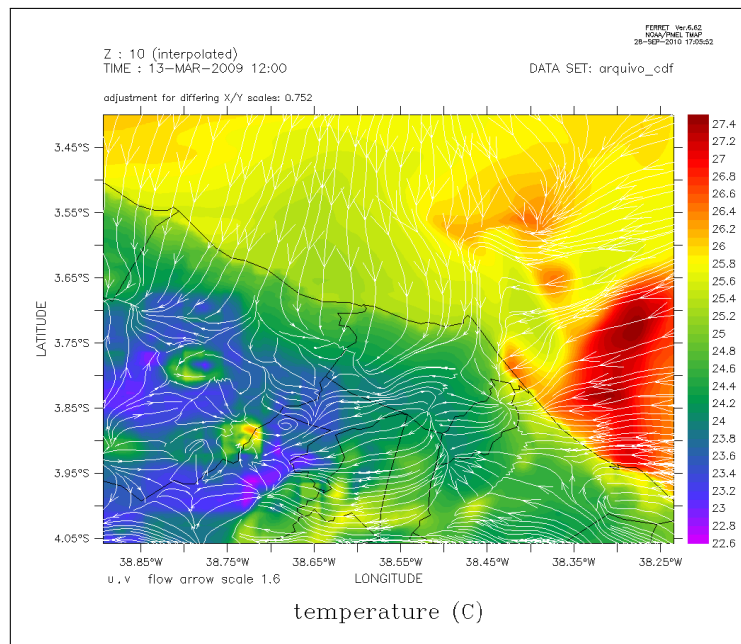


Figura 28 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 06h local.

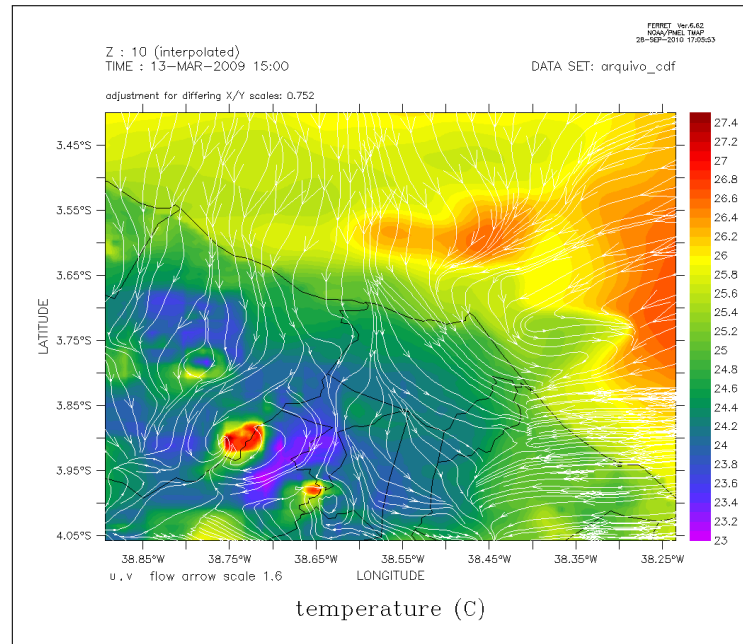


Figura 29 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 09h local.

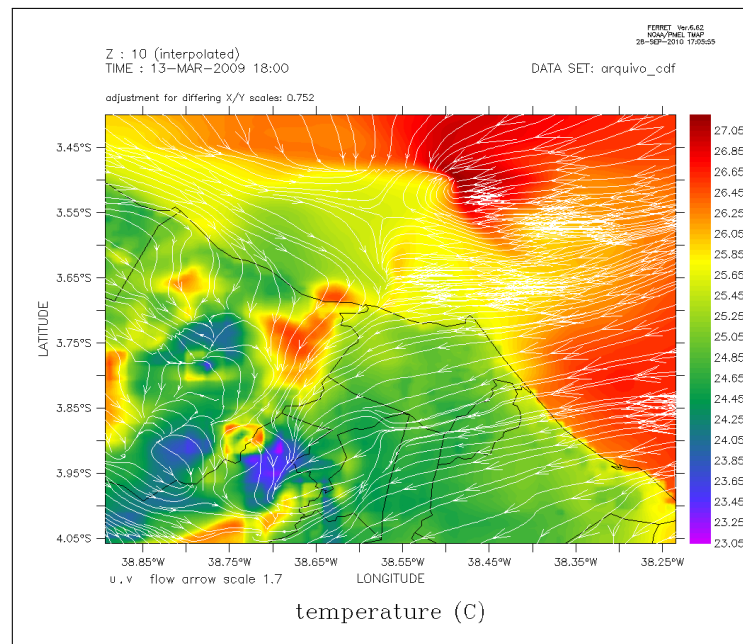


Figura 30 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 12h local.

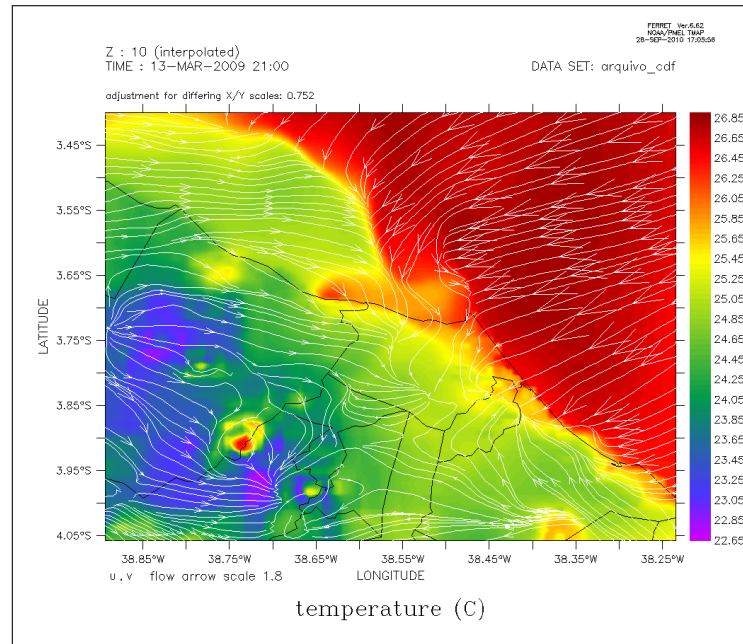


Figura 31 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 15h local.

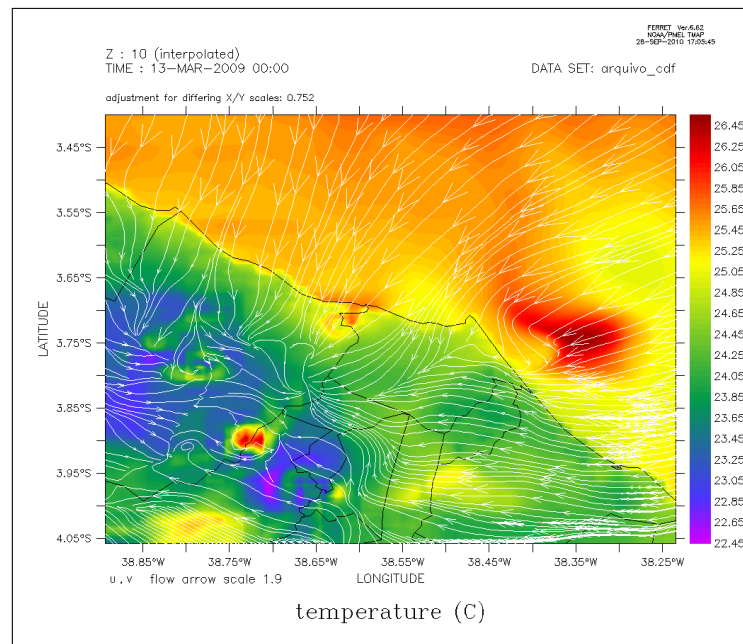


Figura 32 – Mapa da região coberta pela grade 3 que mostra a 10 metros de altura a temperatura, em graus Celsius, com as linhas de fluxo da velocidade do vento, em m/s, do dia 13 de março de 2009 as 18h local.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Na atualidade existe um grande esforço para se conseguir prever os diversos fenômenos atmosféricos e as influências das mudanças climáticas em diversas regiões, que a humanidade faz acelerar devido a alta taxa de urbanização e da formação de diversas fontes de calor e de aerossóis. Os ventos locais podem agir de forma a dispersar ou a reter a parcela de ar em determinadas regiões, que no caso das regiões urbanas podem gerar diversos problemas aos cidadãos, à fauna e à flora e ao clima local.

Este estudo teve como objetivo verificar a habilidade de um modelo de mesoescala para representar a formação e o desenvolvimento das circulações de brisa marítima e terrestre no município de Fortaleza. Foi utilizado para isso um modelo de área limitada RAMS, com os dados de assimilação do projeto *Reanalysis-2*, configurado de forma a tentar observá-los.

Para ambos os períodos estudados, conseguiu-se observar diversos dias em que houve a formação da brisa terrestre, mas não houve em nenhum dia a formação da brisa marítima. O horário em que ocorreu tanto a formação quanto o final da brisa terrestre ocorre de forma similar ao trabalho de Teixeira (2008). Além disso, durante um tempo do mês de março de 2009, foi observada a passagem da Zona de Convergência Intertropical, como mostrado em Climanalise (2009).

Vale lembrar que este estudo não possui dados observacionais, somente modelados, o que fez com que essa simulação não pudesse ser validada, a qual deve ser realizado em estudos posteriores. Também deverá ser melhor investigado um melhor estudo do modelo utilizado e por um período mais prolongado, através de testes de sensibilidade, ou se for o caso, utilizar também outros modelos disponíveis.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. M. B.; REPELLI, C. A. A variabilidade pluviométrica no setor norte do nordeste e os eventos el nino-oscilação sul (enos). *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 7, n. 2, p. 583–592, 1992.
- AZORIN-MOLINA, C.; CHEN, D. A climatological study of the influence of synoptic-scale flows on sea breeze evolution in the bay of alicante (spain). *Theoretical Applied Climatology*, v. 96, n. 3-4, p. 249–260, 2009.
- CAVALCANTI, I. F. A. *Um estudo sobre interações entre sistemas de circulação de escala sinótica e circulações locais*. 133 p. Dissertação (Mestra em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1982.
- CHILDS, P. P.; RAMAN, S. Observations and numerical simulations of urban heat island and sea breeze circulations over new york city. *Pure and Applied Geophysics*, v. 162, p. 1955–1980, 2005.
- CLIMANALISE. *Boletim de Monitoramento e análise climática*. Cachoeira Paulista, Março 2009. v. 24, n. 3.
- FREITAS, E. D. *Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes*. 157 p. Tese (Doutor em Ciências Atmosféricas) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- KALNAY, E. et al. The ncep/ncar 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 77, n. 3, p. 437–471, 1996.
- KANAMITSU, M. et al. Ncep–doe amip-ii reanalysis (r-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 83, n. 11, p. 1631–1643, 2002.
- LEAL JUNIOR, J. a. B. V. *Influência de mecanismos de mesoescala na variabilidade espacial da precipitação no Ceará*. 122 p. Dissertação (Mestre em Ciências) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1997.
- LIN, Y.-L. *Mesoscale Dynamics*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2007. 630 p.
- MEMON, R. A.; LEUNG, D. Y. C.; LIU, C. H. An investigation of urban heat island intensity (uhii) as an indicator of urban heating. *Atmospheric Research*, v. 94, n. 3, p. 491–500, 2009.
- MOURA, M. O.; ZANELLA, M. E.; SALES, M. C. L. Ilhas térmicas na cidade de fortaleza/ce. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 28, n. 2, p. 33–44, 2008.
- OHASHI, Y.; KIDA, H. Local circulations developed in the vicinity of both coastal and inland urban areas: a numerical study with a mesoscale atmospheric model. *Journal of Applied Meteorology*, v. 41, p. 30–45, 2002.
- ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 56, n. 5, p. 527–530, 1975.
- PIELKE, R. A. *Mesoscale Meteorological Modeling*. [S.l.]: Academic Press, 1984. 468 p.
- SAHA, S. et al. The ncep climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 91, n. 8, p. 1015–1057, 2010.

- SIMPSON, J. E. *Sea breeze and local wind*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1994. 248 p.
- STULL, R. B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. [S.l.]: Kluwer Academic, 1988. 666 p.
- TEIXEIRA, R. F. B. O fenômeno da brisa e sua reação com a chuva sobre fortaleza-ce. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 23, n. 3, p. 282–291, 2008.
- THUNIS, P.; BORNSTEIN, R. Hierarchy of mesoscale flow assumptions and equations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 53, n. 3, p. 380–397, 1996.
- TREMBACK, C. J.; WALKO, R. L. *RAMS: Regional Atmospheric Modeling System – Technical Description*. [S.l.], 2001.
- VASCONCELOS JÚNIOR, F. C. *Estudo numérico de jatos de baixos níveis no estado do Ceará*. 129 p. Dissertação (Mestre em Ciências Físicas Aplicadas) — Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2010.
- YOSHIKADO, H. Numerical experiment of the urban effect in a coastal region on the sea breeze and pollutant diffusion. *Tenki*, v. 37, p. 681–688, 1990. Em japonês.
- YOSHIKADO, H. Numerical study of the daytime urban effect in interaction with the sea breeze. *Journal of Applied Meteorology*, v. 29, p. 878–891, 1992.
- YOSHIKADO, H. Interaction of sea breeze with urban heat islands of different sizes and locations. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v. 72, p. 139–143, 1994.
- ZHOU, Y.; SHEPHERD, J. M. Atlanta's urban heat island under extreme heat conditions and potential mitigation strategies. *Natural Hazards*, v. 52, n. 3, p. 639–668, 2010.