

## Capítulo 3

Modelagem Atmosférica

### Autores do Capítulo

#### Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia - UFRJ

Me. Ian Cunha D'Amato Viana Dragaud

Dr. Rafael Henrique Oliveira Rangel

Prof. Dr. Luiz Paulo de Freitas Assad

Prof. Dr. Luiz Landau

### Coordenação Científica do Projeto Costa Norte

Profa. Dra. Carla Bernadete Madureira Cruz

Prof. Dr. Filipe de Oliveira Chaves -  
NEGEMC/UERJ

Dr. Júlio Augusto de Castro Pellegrini –  
PROOCEANO

Prof. Dr. Luiz Paulo de Freitas Assad –  
LAMCE/UFRJ

Prof. Dr. Marcelo Rollnic – LAPMAR/UFPA

Prof. Dr. Mário Luiz Gomes Soares -  
NEGEMC/UERJ

### Coordenação Geral do Projeto

Ma. Maria Eduarda Pessoa- ENAUTA

Dr. Júlio Augusto de Castro Pellegrini –  
PROOCEANO

Bela. Anne Goni Guedes - ENAUTA

Bela. Dyellen Soares Queiroz – ENAUTA

### Coordenação de Comunicação do Projeto

Frederico Luna Rinaldi - PROOCEANO

Rebeca Kiperman – ENAUTA

### Citação Sugerida

DRAGAUD, I.C.D.V., RANGEL, R.H.O., ASSAD, L.P.F., LANDAU, L. “Modelagem Atmosférica”, Capítulo 3. Em: Projeto Costa Norte, – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira. v.2. Rio de Janeiro (BR), 2020.

## Sumário

3.	MODELAGEM ATMOSFÉRICA	327
3.1.	Objetivos	328
3.2.	Metodologia	328
3.2.1.	Descrição do modelo WRF	328
3.2.2.	Módulos	329
3.2.3.	Condições Iniciais e de Contorno	330
3.2.4.	Configuração do modelo WRF	330
3.2.5.	Sistema operacional	331
3.3.	Resultados	335
3.3.1.	Variáveis de superfície	335
3.4.	Resultados operacionais	337
3.4.1.	Campos meteorológicos	337
3.4.2.	Séries temporais	340
3.4.3.	Avaliação para o ano de 2016	342
3.4.4.	Avaliação espacial	343
3.4.5.	Avaliação temporal	353
3.5.	Conclusão	355
3.6.	Referências	356

## Índice de Figuras

Figura 3-1: Ilustração esquemática do fluxo de dados e programas no WPS e no WRF-ARW. Fonte: Adaptado de SKAMAROCK et al. (2019).....	329
Figura 3-2: Posicionamento das grades aninhadas do modelo WRF, configuradas para a Margem Equatorial Brasileira.....	331
Figura 3-3: Fluxograma do sistema operacional de previsão numérica de tempo. ....	332
Figura 3-4: Parte da Margem Equatorial Brasileira. Os retângulos vermelhos representam os polígonos da Tabela 3-2. Os pontos pretos representam os pontos de grade do WRF, de onde são extraídas as séries temporais de variáveis meteorológicas. ....	334
Figura 3-5: Representação da topografia utilizada pelo modelo WRF nas grades numéricas com resoluções horizontais de 27 e 9 km. A escala de cores indica a altura do terreno em metros. ....	335
Figura 3-6: Representação terra-água utilizada pelo modelo WRF nas grades numéricas com resolução horizontal de a) 27 km e b) 9 km.....	336
Figura 3-7: Representação do uso do solo utilizado pelo modelo WRF nas grades numéricas com resolução horizontal de a) 27 km e b) 9 km.....	337
Figura 3-8: Campos de variáveis meteorológicas. Temperatura do ar a 2 m (a, b), vento a 10 m (c, d), precipitação na superfície (e, f) e pressão atmosférica ao nível médio do mar (g, h). À esquerda estão os resultados referentes às 06 UTC e à direita referentes às 18 UTC. ....	340
Figura 3-9: Séries temporais da temperatura do ar à 2 metros (°C) (superior), vento à 10 metros (ms-1) (centro) e precipitação na superfície (mmh-1) (inferior). Em (a), Polígono Cabo Norte/Sucuriju; em (b) Polígono Soure; (c) Polígono Turiaçu e (d) Polígono São Caetano de Odivelas. ....	341
Figura 3-10: Boias do projeto PIRATA na Margem Equatorial Brasileira. Fonte: <a href="http://www.goosbrasil.org/pirata/">http://www.goosbrasil.org/pirata/</a> .....	342
Figura 3-11: Campos de vento (m/s) próximos à superfície para o dia 20/01/2016 às 06 UTC. a) GFS, b) WRF 27km, c) WRF 9 km.....	344
Figura 3-12: Campos de vento (m/s) próximos à superfície para o dia 20/01/2016 às 18 UTC. a) GFS, b) WRF 27 km, c) WRF 9 km.....	345
Figura 3-13: Campos de vento (m/s) próximos à superfície para o dia 31/03/2016 às 06 UTC. a) GFS, b) WRF 27 km, c) WRF 9 km.....	346
Figura 3-14: Campos de vento (m/s) próximos à superfície para o dia 31/03/2016 às 18 UTC. a) GFS, b) WRF 27 km, c) WRF 9 km.....	347
Figura 3-15: Campos de vento (m/s) próximos à superfície para o dia 15/08/2016 às 06 UTC. a) GFS, b) WRF 27 km, c) WRF 9 km.....	349
Figura 3-16: Campos de vento (m/s) próximos à superfície para o dia 15/08/2016 às 18 UTC. a) GFS, b) WRF 27 km, c) WRF 9 km.....	350

---

Figura 3-17: Campos de vento (m/s) próximos à superfície para o dia 01/11/2016 às 06 UTC. a) GFS, b) WRF 27 km, c) WRF 9 km.....	351
Figura 3-18: Campos de vento (m/s) próximos à superfície para o dia 01/11/2016 às 18 UTC. a) GFS, b) WRF 27 km, c) WRF 9 km.....	352
Figura 3-19: Séries temporais de intensidade (m/s) (painéis à esquerda) e direção (°) (painéis a direita) do vento para a boia 0N35W (painéis superiores) e 4N38W (painéis inferiores) referentes ao período de 20 a 26 de janeiro de 2016. ....	353
Figura 3-20: Séries temporais de intensidade (m/s) (painéis à esquerda) e direção (°) (painéis a direita) do vento para a boia 0N35W (painéis superiores) e 4N38W (painéis inferiores) referentes ao período de 24 a 30 de março de 2016. ....	354
Figura 3-21: Séries temporais de intensidade (m/s) (a) e direção (°) (b) do vento para a boia 0N35W referentes ao período de 10 a 16 de agosto de 2016. O primeiro dia da série da boia está ausente da base de dados. ...	355
Figura 3-22: Séries temporais de intensidade (m/s) (a) e direção (°) (b) do vento para a boia 0N35W referentes ao período de 01 a 07 de novembro de 2016. ....	355

## Índice de Tabelas

Tabela 3-1 – Parametrizações físicas utilizadas no sistema operacional com o modelo WRF.....	331
Tabela 3-2 – Coordenadas os vértices dos polígonos das regiões do Cabo Norte, Soure, Turiaçu e São Caetano de Odivelas.....	333

### 3. MODELAGEM ATMOSFÉRICA

A implantação de sistemas computacionais para a modelagem atmosférica em escala regional vem sendo discutida ao longo das últimas décadas, com aplicações em diferentes segmentos da sociedade. Com a constante evolução computacional dos últimos 10 anos, a modelagem numérica está cada vez mais acessível e difundida, tanto no que diz respeito ao desenvolvimento dos modelos quanto a sua adequação e operacionalização.

A operacionalização é uma etapa importante, pois desta forma, os modelos tornam-se independentes da intervenção humana para ser executado, gerar resultados e processá-los. Contudo, para que a operacionalização seja implementada, é necessário o desenvolvimento de diversos códigos computacionais em que cada um executa uma função necessária no processo.

A Margem Equatorial Brasileira é destacada pela sua diversidade e complexidade fisiográfica e meteorológica. Do ponto de vista fisiográfico, a linha de costa é extremamente variada, sendo modificada pela presença de cabos, baías, lagoas e rios (Figura 3-5). Além disso, há regiões com topografia íngreme e complexa (Figura 3-5). Do ponto de vista meteorológico, a região é influenciada por sistemas em grande escala como os ventos alísios e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sistemas em mesoescala como as circulações termicamente induzidas, caracterizadas pelas brisas terrestre, marítima, de vale-montanha e de rio, dentre outros (SOUZA e OYAMA, 2017; UTIDA et al., 2019).

Regiões geograficamente complexas são desafiadoras para a previsão numérica de tempo, já que a representação numérica da circulação atmosférica depende da representação da superfície Terrestre. A representação numérica do uso do solo, da topografia e da distribuição terra-mar, depende da resolução horizontal das grades numéricas e a princípio, quanto maior a resolução horizontal das grades, melhor a representação da superfície. Contudo, isso depende do detalhamento das bases de dados geográficos, suas implementações nos modelos (GIANNAROS et al., 2017; PAIVA et al., 2014) e do poder computacional disponível para as simulações.

No presente trabalho, apresenta-se o desenvolvimento e operacionalização de um sistema de previsão numérica de tempo para a Margem Equatorial Brasileira. Neste sistema foi utilizado o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF), o qual foi implementado e adequado para a região de interesse. O sistema funcionou operacionalmente fornecendo campos espaciais e séries temporais de variáveis meteorológicas como o vento, temperatura do ar, pressão atmosférica, precipitação, dentre outras. Além das simulações operacionais, os resultados do modelo foram avaliados através de uma simulação computacional compreendendo o período de um ano.

Este capítulo está organizado iniciando pelos objetivos (3.1), seguido pela metodologia referente às simulações numéricas e os dados observados (3.2) e finalizando com os resultados obtidos com o sistema de previsão operacional e para a simulação de um ano.

### 3.1. Objetivos

- i) Instalação do modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF).
- ii) Adequação do modelo WRF para a região de interesse.
- iii) Desenvolvimento e operacionalização do sistema de previsão numérica de tempo.

Para uma avaliação mais robusta, na qual possa se entender a variação intrasazonal, objetiva-se desenvolver uma simulação computacional compreendendo o período de um ano.

- iv) Simulação para o ano de 2016.

### 3.2. Metodologia

Na presente seção, apresenta-se os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho, o que abrange uma descrição do modelo WRF, seus módulos, as condições iniciais e de contorno utilizadas, e o sistema operacional para previsão numérica de tempo.

#### 3.2.1. Descrição do modelo WRF

O *Weather Research and Forecasting* (WRF) é um modelo de previsão numérica de tempo desenvolvido tanto para fins de pesquisa quanto operacionais, utilizado em aplicações para diferentes escalas espaciais e temporais (SKAMAROCK et al., 2019). O código é aberto e foi desenvolvido para ser flexível, portátil e eficiente em ambientes de computação paralela.

O núcleo dinâmico utilizado é o *Advanced Research WRF* (ARW), no qual são integradas as equações para fluido compressível, sem considerar aproximação hidrostática. O ARW utiliza o sistema de coordenada vertical que segue o terreno,  $\eta$ , e arranjo de grade C de Arakawa.

Em relação às parametrizações físicas, no modelo WRF são utilizados esquemas de parametrização para a microfísica de nuvens, nuvens cúmulos, camada limite atmosférica, camada de superfície, modelo de solo e radiação. Estas parametrizações físicas interagem entre si, através das variáveis de estado do modelo (temperatura potencial, umidade, vento, entre outras) e suas tendências, e através de fluxos na superfície.



### 3.2.2. Módulos

Como descrito por SKAMAROCK et al. (2019), o sistema de modelagem WRF é dividido nos módulos de pré-processamento (*WRF Preprocessing System - WPS*), processamento e pós-processamento. A Figura 3-1 ilustra o fluxo de dados e programas no sistema de modelagem.

O WPS é um conjunto de três programas que tem o objetivo de preparar as condições iniciais e de contorno, além de adequar as informações de posicionamento e resolução das grades e o tipo de projeção cartográfica para o programa real. Os três programas que compõem o WPS são: *geogrid*, *ungrib* e *metgrid*. Cada um dos programas realiza um estágio da preparação.

O *geogrid* define os domínios do modelo e interpola os dados de terreno para as grades numéricas. O *ungrib* extrai campos meteorológicos no formato GRIB (*GRidded Binary*); e o *metgrid* interpola horizontalmente os campos extraídos pelo *ungrib* para as grades do modelo definidas pelo *geogrid*.

A interpolação dos campos meteorológicos para os níveis verticais é realizada pelo programa *real*. Finalmente, os arquivos processados pelo *real* são utilizados pelo ARW, que é o modelo propriamente dito.

A configuração do modelo e da simulação é feita através da definição de parâmetros nos arquivos *namelist.wps* e *namelit.input*. O pré-processamento é configurado através do arquivo *namelist.wps*, enquanto o módulo *real* e o ARW são configurados pelo *namelit.input*.

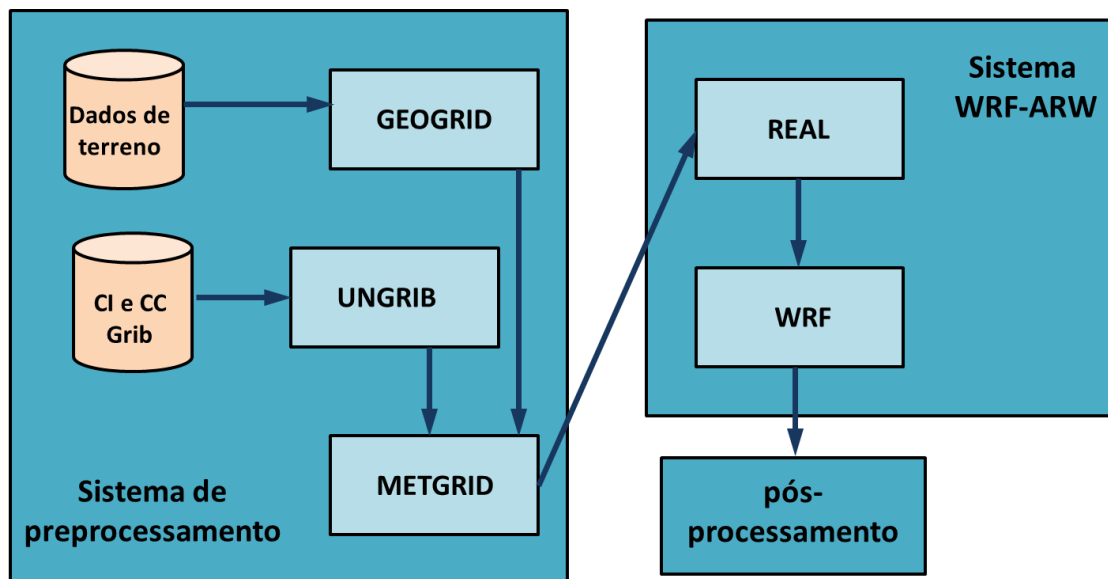


Figura 3-1: Ilustração esquemática do fluxo de dados e programas no WPS e no WRF-ARW. Fonte: Adaptado de SKAMAROCK et al. (2019).

### 3.2.3. Condições Iniciais e de Contorno

Uma característica dos modelos atmosféricos regionais, como o WRF, é a necessidade de se utilizar resultados de modelos globais como condições iniciais e de contorno. Para este projeto, foram utilizados os resultados do modelo *Global Forecast System* (GFS) como fonte das condições necessárias para as simulações com o modelo WRF, tanto para as simulações operacionais quanto para o *hindcast*.

O GFS é um modelo de previsão numérica de tempo desenvolvido pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) (<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>). O *Global Data Assimilation System* (GDAS,) é o sistema utilizado pelo GFS para dispor dados observados, em grade, com o intuito de inicializar as previsões (<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-data-assimilation-system-gdas>). São utilizados dados medidos em estações de superfície, por radiossondas, aviões, observações de radar e estimativas de satélite, dispostos pelo GDAS em uma grade tridimensional.

Os resultados do GFS são disponibilizados de forma aberta nos servidores NCEP. As condições iniciais são disponibilizadas para o horário de 00 UTC (21 h no horário de Brasília, do dia anterior), e as condições de contorno são disponibilizadas a cada 3 horas depois de 00 UTC. A resolução espacial horizontal dos arquivos do GFS utilizados foi de  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  (aprox. 55 km).

A base topográfica utilizada foi a *Global multi-resolution terrain elevation data 2010* (GMTED2010) (DANIELSON; GESCH, 2011). Este modelo de elevação do terreno foi desenvolvido pela *United States Geological Survey* (USGS) em colaboração com a *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA). Essa base de dados cobre todo o globo com resolução de 30s ( $\sim 1$  km) e se baseia em dados de 11 fontes (DANIELSON; GESCH, 2011).

O produto de uso e cobertura do solo *Collection 5.1 do Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Land Cover Type* (MCD12Q1) possui resolução espacial horizontal de 15s ( $\sim 500$  m) e foi gerado por observações obtidas entre os anos de 2001 a 2010 (BROXTON et al., 2014). Estes dados de topografia e cobertura do solo foram adquiridos através do sítio:

[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_sources\\_wps\\_geog.html](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources_wps_geog.html).

### 3.2.4. Configuração do modelo WRF

O modelo WRF versão 3.9, foi configurado com duas grades aninhadas com resoluções espaciais horizontais de 27 km e 9 km (Figura 3-2). A grade de 27 km de resolução possui 104 pontos em latitude e 112 pontos em longitude, abrangendo uma área de 2.808 km x 3.024 km. A grade de 9 km de resolução possui 256 pontos em latitude e 277 pontos em longitude, abrangendo uma área de 2.304 km x 2.493 km (Figura 3-2). Na vertical, todos os domínios foram configurados com 28 níveis. O passo de tempo utilizado é de 120 segundos e os resultados foram armazenados em frequência horária.

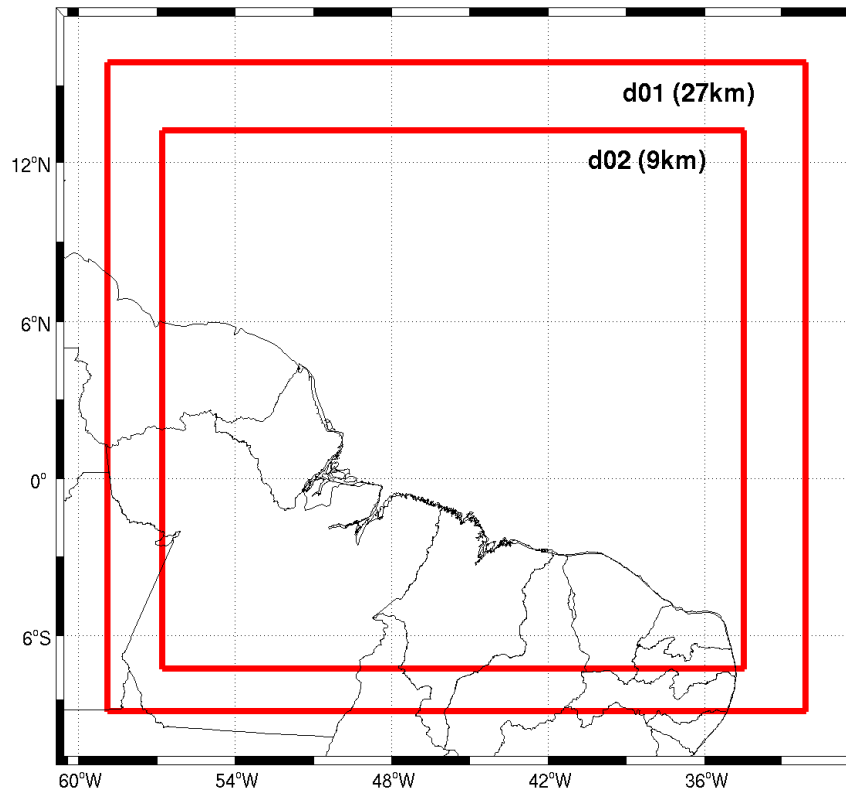


Figura 3-2: Posicionamento das grades aninhadas do modelo WRF, configuradas para a Margem Equatorial Brasileira.

Os efeitos de diversos processos físicos foram representados por esquemas de parametrizações, como apresentado na Tabela 3-1:

Tabela 3-1 – Parametrizações físicas utilizadas no sistema operacional com o modelo WRF.

Tipo de parametrização física	Opção utilizada
Microfísica de nuvens	<i>WRF Single-Moment 3-class scheme</i>
Nuvens cúmulus	<i>Kain-Fritsch scheme</i>
Radiação de onda longa	<i>RRTMG scheme</i>
Radiação de onda curta	<i>RRTMG scheme</i>
Modelo de solo	<i>Noah-MP (multi-physics) Land Surface Model</i>
Camada de superfície	<i>Revised MM5 surface layer scheme</i>
Camada limite atmosférica	<i>Yonsei University scheme</i>

### 3.2.5. Sistema operacional

O sistema operacional de previsão numérica de tempo com o modelo WRF foi composto por rotinas computacionais na linguagem Shell (*bash*) nativa do sistema LINUX. Estas rotinas foram executadas em horário

pré-determinado e em sequência, de forma que cada etapa realizada no sistema gera condições para a próxima etapa (Figura 3-3). O Fluxograma do sistema operacional de previsão numérica de tempo está ilustrado na Figura 3-3.

O agendamento das tarefas foi realizado pelo código computacional *crontab*, nativo do LINUX, o qual ativou o sistema de previsão diariamente às 2h local (Figura 3-3) através da rotina computacional *Controle*. Esta rotina gerencia todos os outros códigos que fazem parte do sistema operacional (Figura 3-3). A etapa inicial consistiu na aquisição das condições iniciais e de contorno provenientes do GFS. Posteriormente, estes resultados foram pré-processados para serem utilizados como condições para o prognóstico com o WRF. Em seguida, o modelo WRF foi executado, gerando as previsões de vento, temperatura do ar, pressão atmosférica, entre outros parâmetros. Por fim, a partir dos resultados do modelo WRF foi feito um pós-processamento para confecção de campos e séries temporais das variáveis previstas.

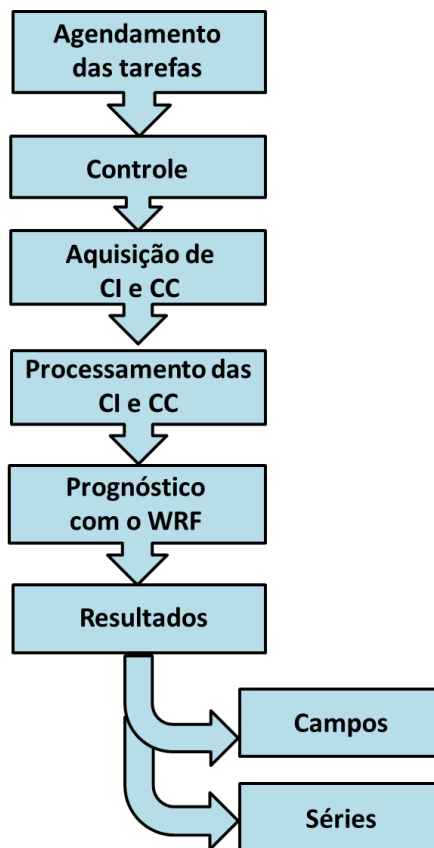


Figura 3-3: Fluxograma do sistema operacional de previsão numérica de tempo.

Os campos meteorológicos foram confeccionados para ambos os domínios e com frequência horária. Em relação às séries temporais, foram confeccionadas operacionalmente séries relativas às variáveis de temperatura do ar a 2 m, vento a 10 m e precipitação na superfície. No total, foram geradas séries representativas de cada um dos quatro polígonos definidos na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 – Coordenadas os vértices dos polígonos das regiões do Cabo Norte, Soure, Turiaçu e São Caetano de Odivelas.

Local	Longitude	Latitude
Cabo Norte / Sucuriju	-50,29361	1,09931
Cabo Norte / Sucuriju	-50,29361	1,88097
Cabo Norte / Sucuriju	-49,74752	1,88097
Cabo Norte / Sucuriju	-49,74752	1,09931
Soure	-48,55422	-0,77385
Soure	-48,55422	-0,19320
Soure	-48,33412	-0,19320
Soure	-48,33412	-0,77385
Turiaçu	-45,39641	-1,74324
Turiaçu	-45,39641	-1,30798
Turiaçu	-45,05475	-1,30798
Turiaçu	-45,05475	-1,74324
São Caetano de Odivelas	-48,04665	-0,79479
São Caetano de Odivelas	-48,04665	-0,63269
São Caetano de Odivelas	-47,93214	-0,63269
São Caetano de Odivelas	-47,93214	-0,79479

Visto que cada polígono tem a forma de um retângulo, o ponto definido como o mais representativo é o ponto central de cada retângulo. Desta forma, o ponto central pode ser encontrado calculando-se as médias aritméticas dos valores de latitude e longitude dos vértices de cada quadrado.

A partir da definição dos pontos centrais dos polígonos, o passo seguinte foi encontrar no domínio de maior resolução horizontal do modelo WRF, qual o ponto de grade mais próximo do centro de cada polígono. Além de avaliar a distância entre os pontos de grade do modelo e o ponto central de cada polígono, foi verificado se este ponto de grade representa a região continental ou marítima. Caso o ponto de grade mais próximo estivesse sobre o domínio marítimo do modelo, buscou-se outro ponto próximo sobre o domínio continental.

Assim, quatro pontos da grade do modelo WRF foram definidos como representativos de cada um dos polígonos e para estes pontos (Figura 3-4), foram confeccionadas operacionalmente as séries temporais das variáveis meteorológicas.

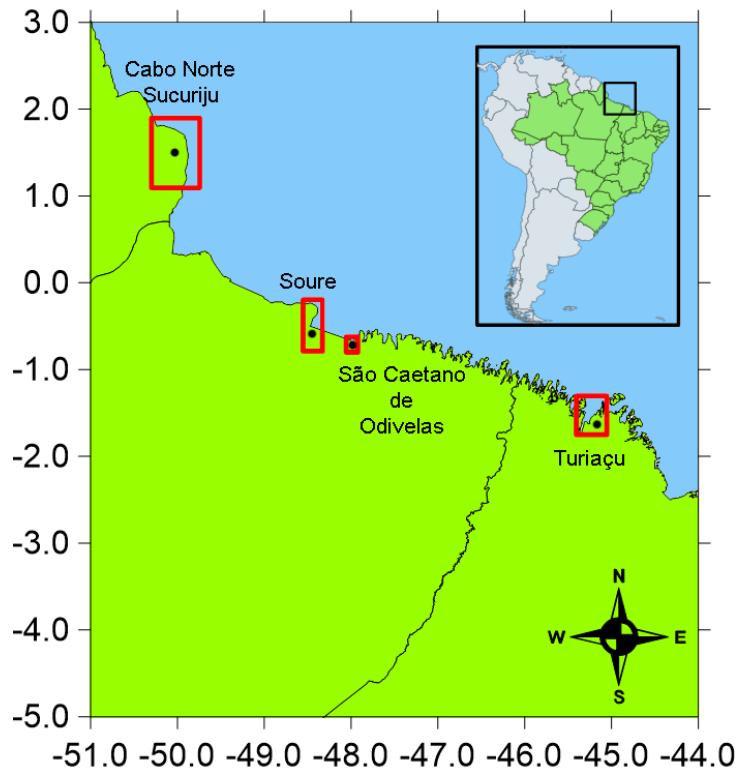


Figura 3-4: Parte da Margem Equatorial Brasileira. Os retângulos vermelhos representam os polígonos da Tabela 3-2. Os pontos pretos representam os pontos de grade do WRF, de onde são extraídas as séries temporais de variáveis meteorológicas.

### 3.3. Resultados

#### 3.3.1. Variáveis de superfície

Na Figura 3-5 está representada a topografia utilizada pelo modelo WRF. Maiores valores de topografia são observados na Região Nordeste, em relação à Região Norte (Figura 3-5).

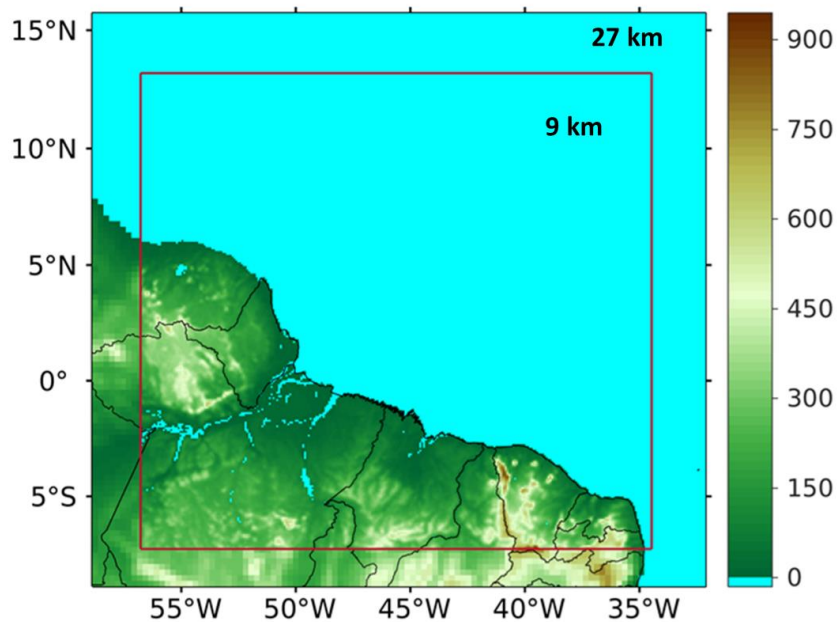


Figura 3-5: Representação da topografia utilizada pelo modelo WRF nas grades numéricas com resoluções horizontais de 27 e 9 km. A escala de cores indica a altura do terreno em metros.

Na Figura 3-6 está ilustrada a distribuição terra-água utilizada pelo modelo. Nota-se que, com o aumento da resolução horizontal de 27 km (Figura 3-6 a) para 9 km (Figura 3-6 b) houve um refinamento da representação da linha de costa. Dessa forma, há melhor representação dos corpos d'água, como as baías e rios.

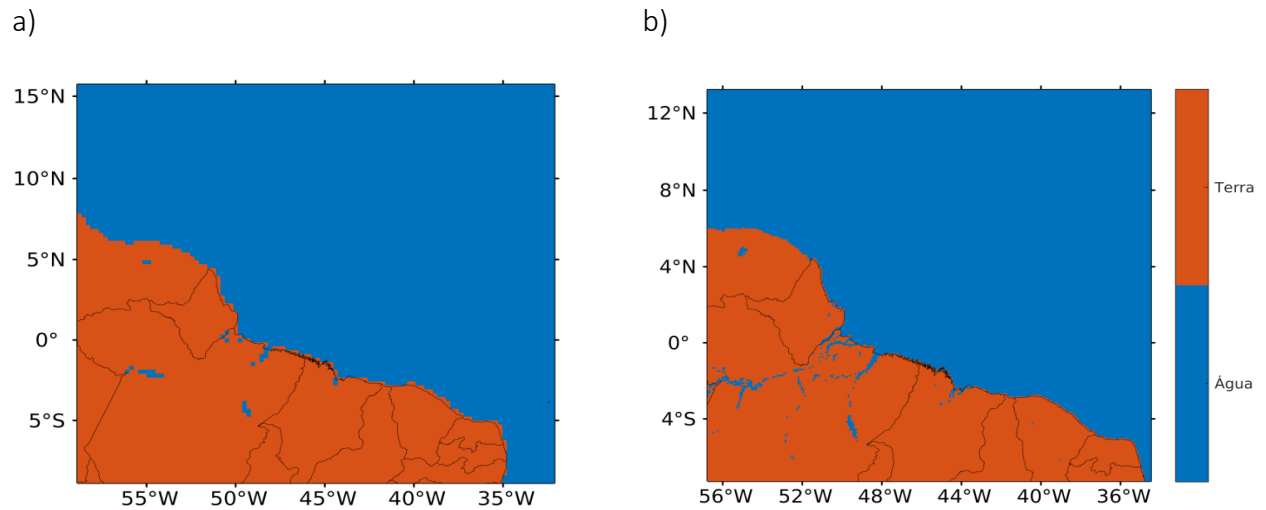


Figura 3-6: Representação terra-água utilizada pelo modelo WRF nas grades numéricas com resolução horizontal de a) 27 km e b) 9 km.

A Figura 3-7 ilustra o uso de solo representado pelo modelo WRF na região de interesse. Estas categorias são provenientes do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Sobre o continente, verifica-se o predomínio de florestas e campos/pastagem (Figura 3-7).



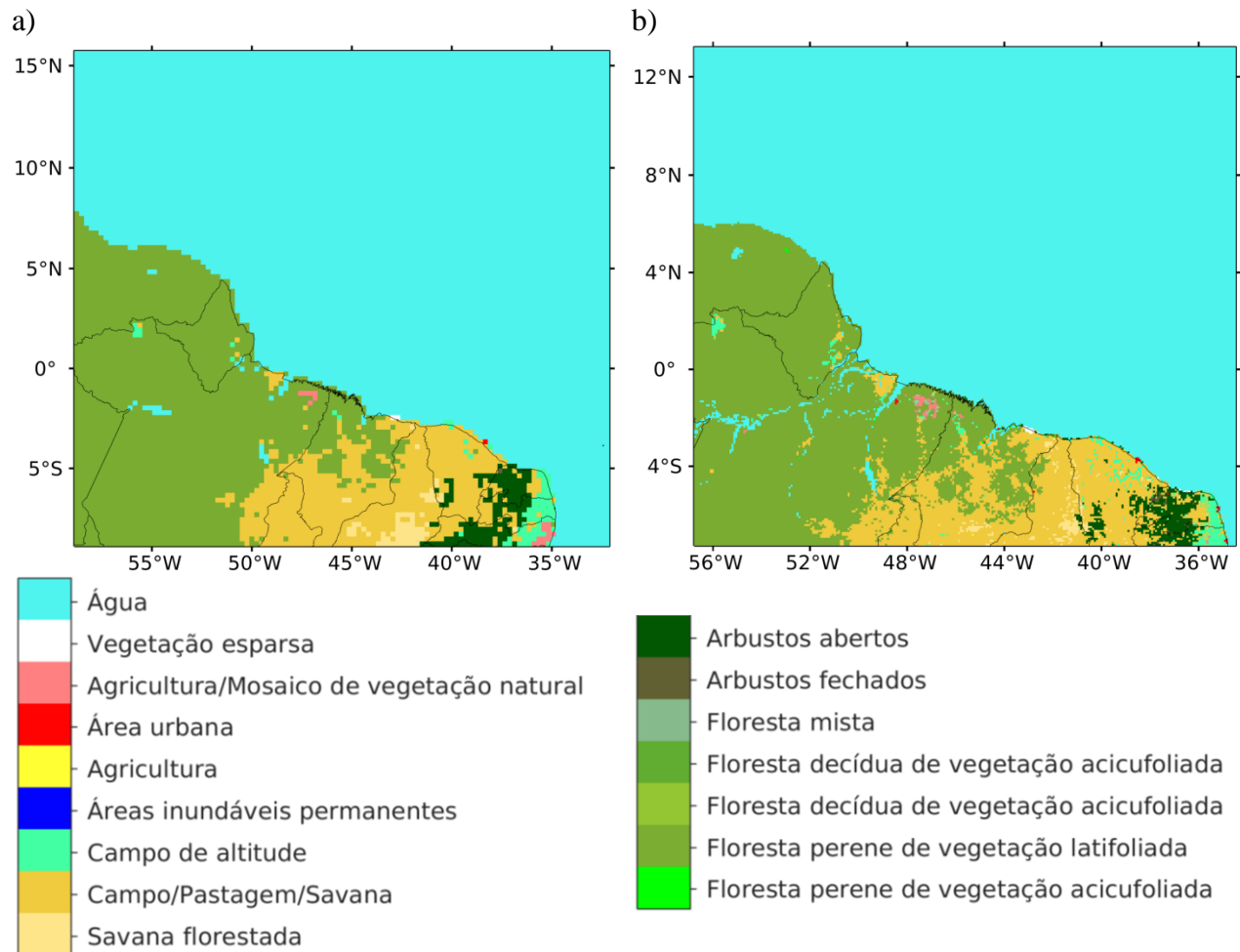


Figura 3-7: Representação do uso do solo utilizado pelo modelo WRF nas grades numéricas com resolução horizontal de a) 27 km e b) 9 km.

## 3.4. Resultados operacionais

### 3.4.1. Campos meteorológicos

Operacionalmente foram confeccionados campos de temperatura do ar a 2 m (Figura 3-8 a, b), vento a 10 m (Figura 3-8 c, d), precipitação na superfície (Figura 3-9 e, f), pressão atmosférica ao nível médio do mar (Figura 3-9 g, h), dentre outras variáveis, em frequência horária. Na Figura 3-9 estão ilustrados campos das variáveis meteorológicas para os horários das 06 UTC e 18 UTC. Pode-se observar sobre o continente a variação diurna da temperatura do ar a 2 m devido ao aquecimento solar (Figura 3-8 a, b), a qual influencia a pressão

atmosférica ao nível médio do mar (Figura 3-9 g, h), com menores valores sobre o continente no período da tarde. Em relação ao vento, nota-se o padrão imposto pela circulação em grande escala, os ventos alísios, com predomínio de direção do quadrante leste (Figura 3-8 c, d). Contudo, há variação diurna evidente próxima da costa. No período da tarde (18Z), os ventos na região costeira são mais intensos, visto que o forçante em grande escala e a brisa marítima, induzem escoamento na mesma direção (Figura 3-9 d). A precipitação esteve associada com processos termodinâmicos sobre o continente e com a dinâmica da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Figura 3-9 e, f).

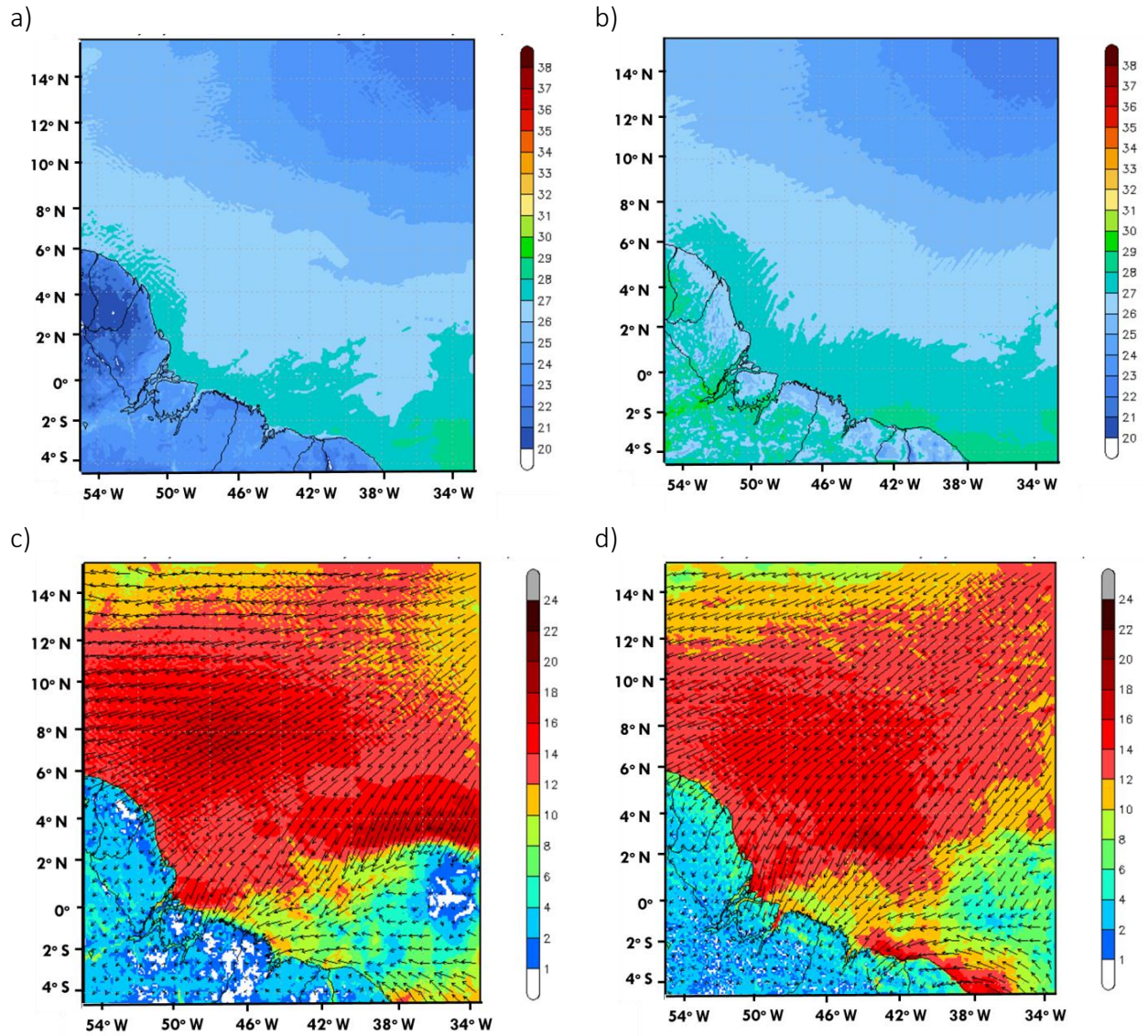


Figura 3-8: Campos de variáveis meteorológicas. Temperatura do ar a 2 m (a, b) e vento a 10 m (c, d). À esquerda estão os resultados referentes às 06 UTC e à direita referentes às 18 UTC.

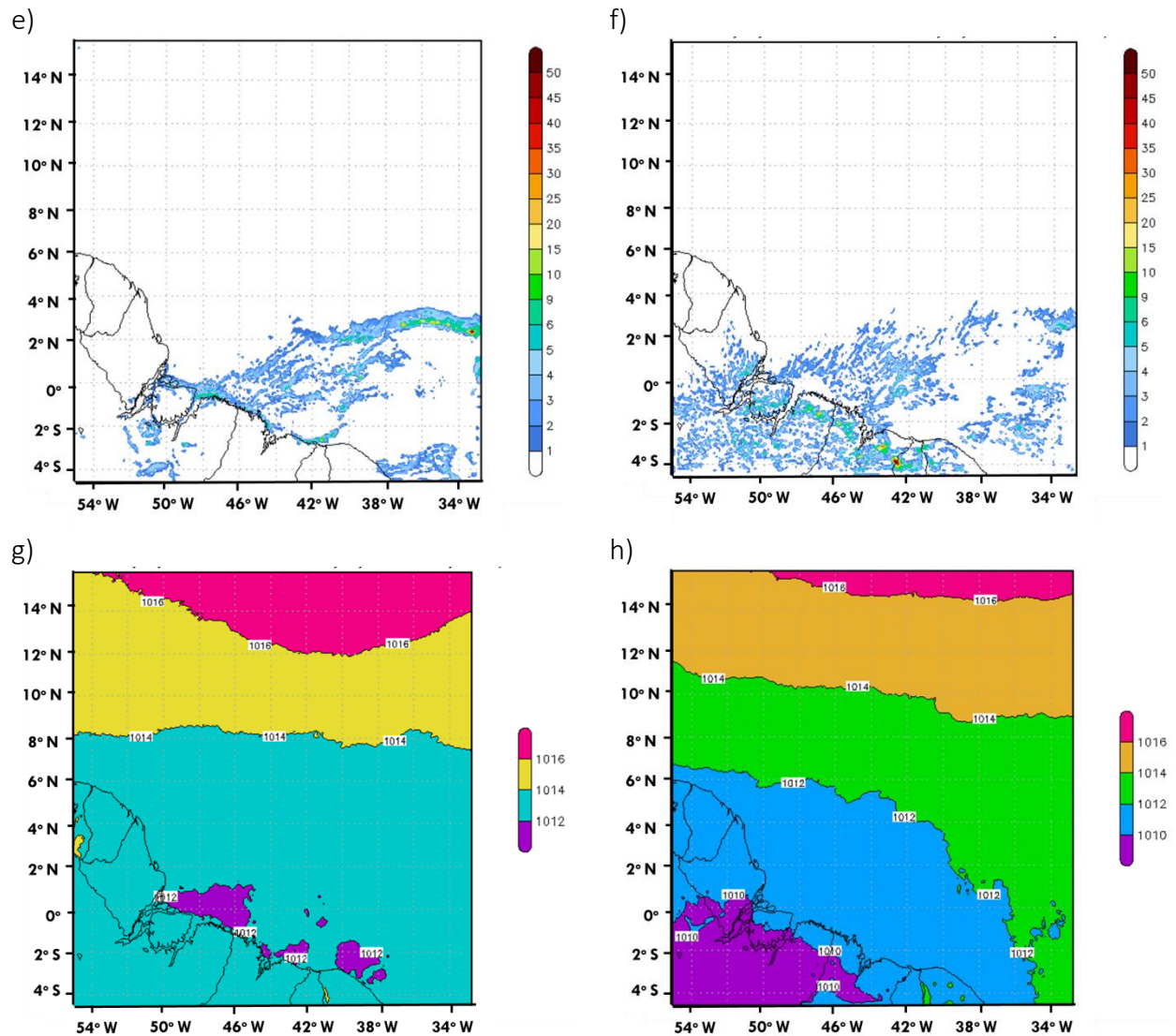


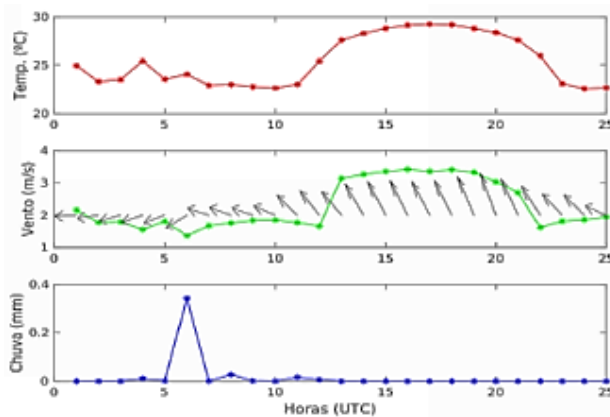
Figura 3-9: Campos de variáveis meteorológicas. Precipitação na superfície (e, f) e pressão atmosférica ao nível médio do mar (g, h). À esquerda estão os resultados referentes às 06 UTC e à direita referentes às 18 UTC.

### 3.4.2. Séries temporais

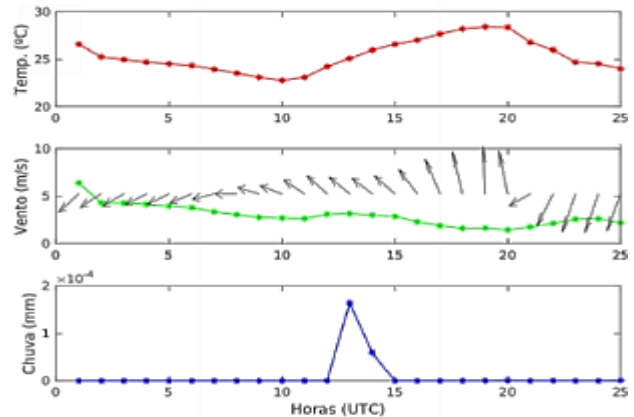
A Figura 3-10 ilustra as séries temporais para cada polígono. Nos resultados do modelo, a precipitação é acumulada a cada passo de tempo e, para ilustrar o valor desta variável referente apenas ao acumulado horário, foi computada uma diferença temporal entre cada horário e o horário anterior. Para todos os pontos,

nota-se a variação diurna das variáveis. O ciclo diurno da temperatura do ar foi caracterizado por menores valores durante a madrugada e os maiores valores durante o período da tarde (Figura 3-10). Houve predomínio de ventos do quadrante norte durante a manhã e do quadrante sul à tarde, associados às circulações de brisa marítima terrestre e modulados pelos ventos alísios em escala sinótica (Figura 3-10). Em geral, a maior taxa de precipitação ocorreu no período da tarde (Figura 3-10).

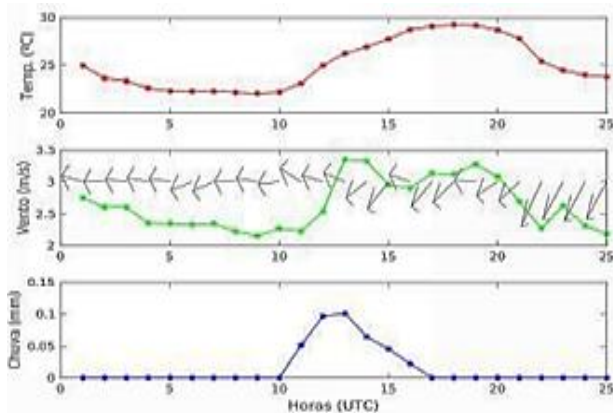
a)



b)



c)



d)

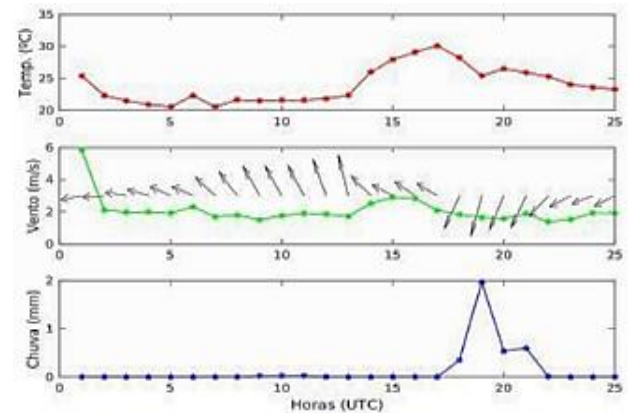


Figura 3-10: Séries temporais da temperatura do ar à 2 metros (°C) (superior), vento à 10 metros (ms-1) (centro) e precipitação na superfície (mmh-1) (inferior). Em (a), Polígono Cabo Norte/Sucuriçu; em (b) Polígono Soure; (c) Polígono Turiaçu e (d) Polígono São Caetano de Odivelas.



### 3.4.3. Avaliação para o ano de 2016

Para avaliação da representatividade do modelo, uma simulação abrangendo o ano de 2016 foi realizada. Os resultados da simulação que abrange o ano de 2016 foram analisados comparando-se o modelo WRF com resultados do modelo GFS e com dados observados provenientes de boias meteoceanográficas do projeto *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA) (Figura 3-11). Com o intuito de desenvolver uma análise sazonal, os resultados foram avaliados para cada estação do ano de 2016: 20 a 26 de janeiro, 24 a 30 de março, 10 a 16 de agosto e 01 a 07 de novembro para as séries temporais (Figura 3-20 a Figura 3-23), e nos horários das 06Z e 18Z dos dias 20 de janeiro, 31 de março, 15 de agosto e 31 de novembro para os campos de vento (Figura 3-12 a Figura 3-19).

As análises dos campos de vento dos modelos GFS e WRF foram feitas para a região do domínio de maior resolução do WRF (9 km). Os resultados do GFS possuem resolução espacial horizontal de  $0,5^\circ$  (aproximadamente 55 km) e resolução temporal de 6 horas, correspondendo às análises de 00Z, 06Z, 12Z e 18Z.

As boias utilizadas foram a 4N38W e 0N35W do projeto PIRATA (Figura 3-11), fundeadas na região do domínio de mais alta resolução do WRF. As medições *in situ* foram obtidas através do sítio do projeto (<http://www.goosbrasil.org/pirata/>), no qual são disponibilizados os dados de intensidade e direção do vento. Estes dados correspondem a médias diárias das medições realizadas em intervalos de 10 min. O período de coleta de dados das boias foi finalizado pelo projeto PIRATA em 10 de agosto e 20 de novembro de 2016, para a boia 4N38W e 0N35W, respectivamente.



Figura 3-11: Boias do projeto PIRATA na Margem Equatorial Brasileira. Fonte: <http://www.goosbrasil.org/pirata/>.

Para comparação entre os resultados do modelo WRF e os dados das boias, foram extraídos os resultados do modelo no ponto da grade numérica mais próximo da posição de cada boia. Os resultados do modelo WRF

estão em frequência horária e, desta forma, para a comparação, foram calculadas médias diárias das variáveis meteorológicas.

O modelo WRF disponibiliza as componentes meridional (v) e zonal (u) do vento, sendo necessária a composição da intensidade (eq. 1) e direção do vento (eq. 2), como a seguir:

$$V = \sqrt{(u)^2 + (v)^2}$$

Equação 1

$$D = 270 - (\text{atan2}(v, u) * \text{rad})$$

\*se  $D > 360$ , então  $D = D - 360$

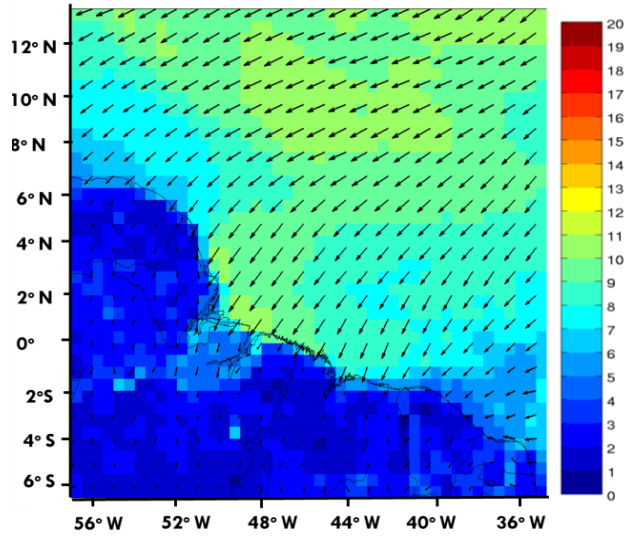
Equação 2

Em que V é a intensidade do vento em  $\text{ms}^{-1}$  e D é a direção do vento em graus.

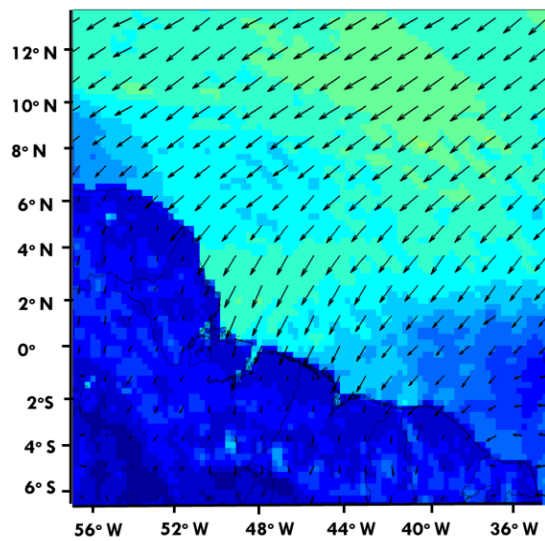
#### 3.4.4. Avaliação espacial

Verificam-se no verão e outono austrais ventos provenientes de direções entre Norte e Leste, o que evidencia a predominância dos ventos alísios. Nota-se entre  $0^\circ$  e  $6^\circ\text{S}$ , uma região com baixa intensidade do vento, devido a convergência do escoamento próximo à superfície. Além disso, a comparação entre os resultados dos horários das 06Z e 18Z evidencia a ausência de um ciclo diurno do vento bem definido (Figura 3-12 a Figura 3-15).

a)



b)



c)

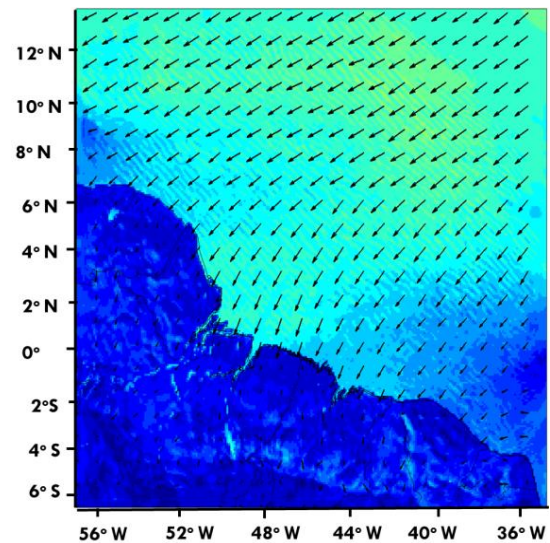
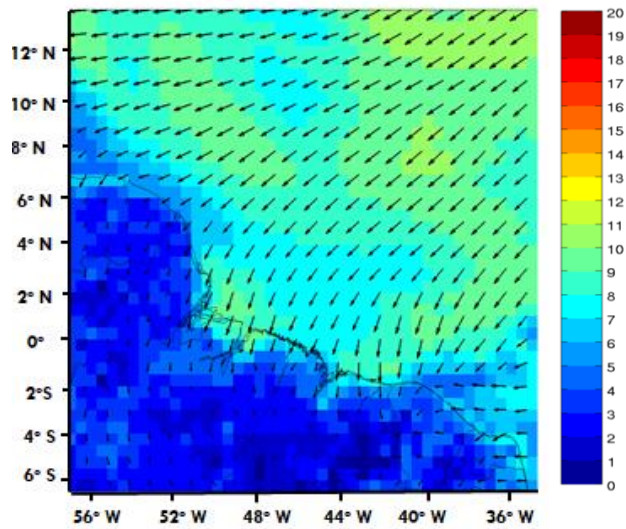


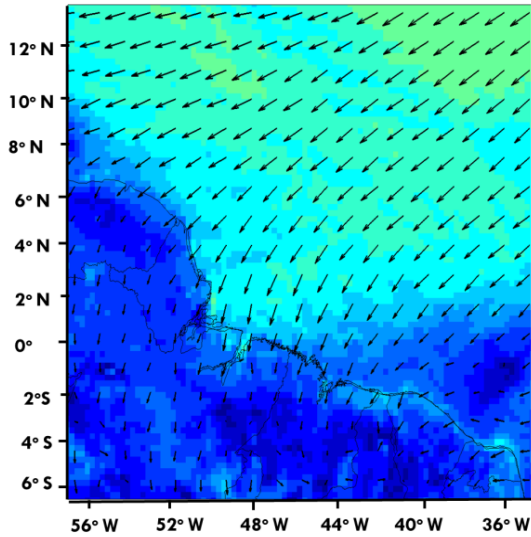
Figura 3-12: Campos de vento (m/s) próximos à superfície para o dia 20/01/2016 às 06 UTC. a) GFS, b) WRF 27km, c) WRF 9 km.



a)



b)



c)

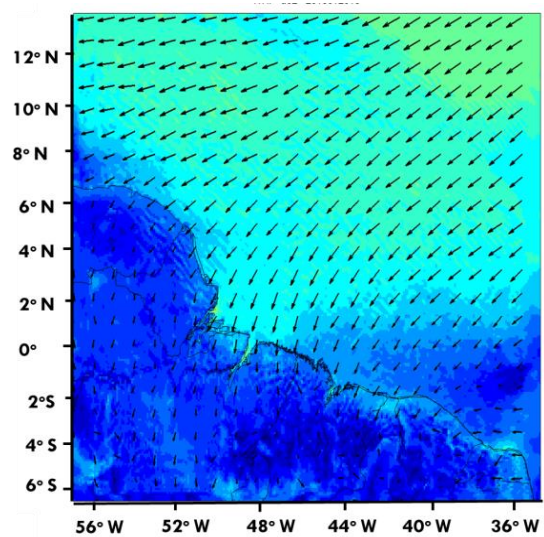
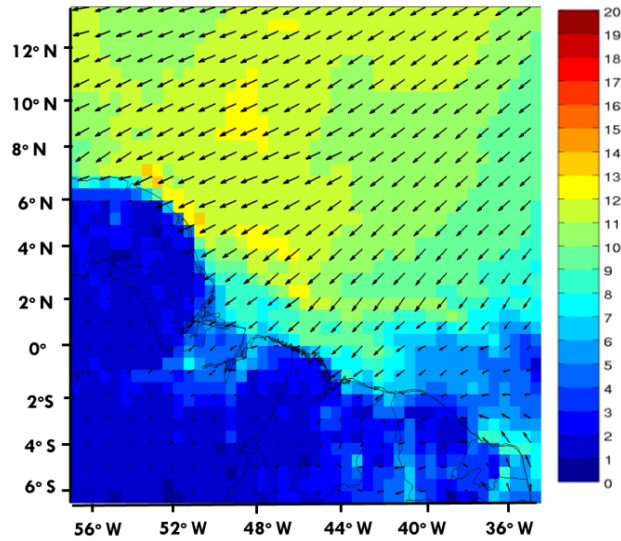
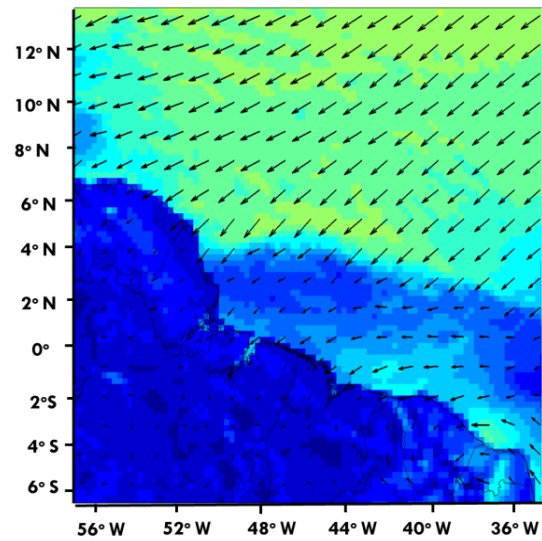


Figura 3-13: Campos de vento (m/s) próximos à superfície para o dia 20/01/2016 às 18 UTC. a) GFS, b) WRF 27 km, c) WRF 9 km.

a)



b)



c)

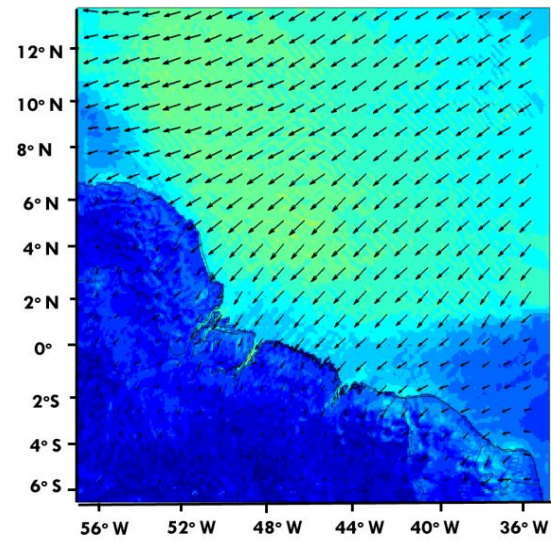
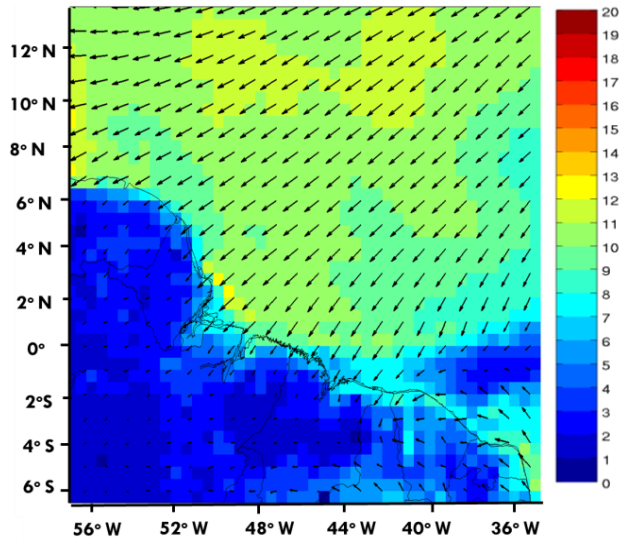
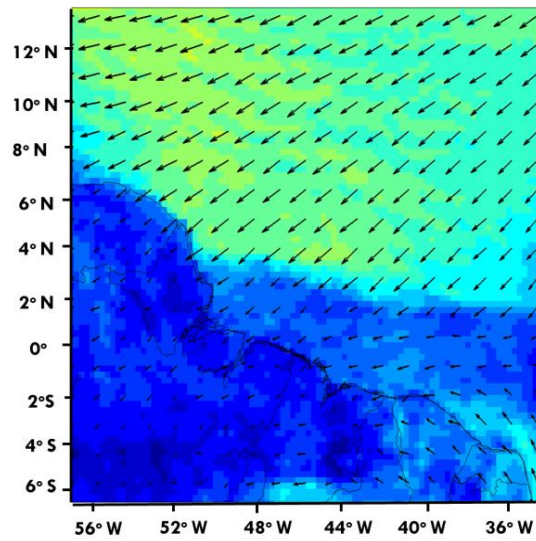


Figura 3-14: Campos de vento (m/s) próximos à superfície para o dia 31/03/2016 às 06 UTC. a) GFS, b) WRF 27 km, c) WRF 9 km.

a)



b)



c)

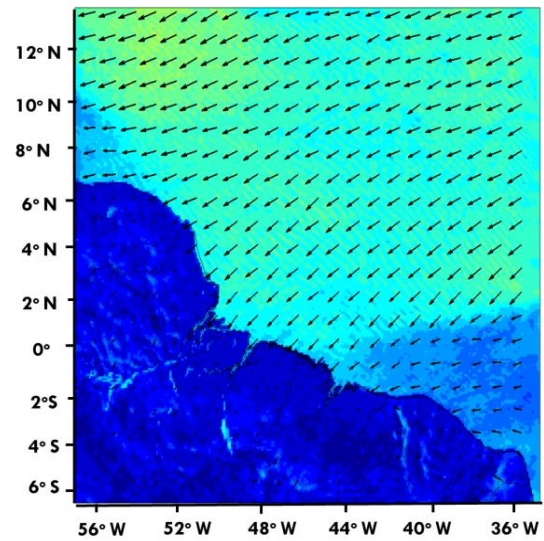
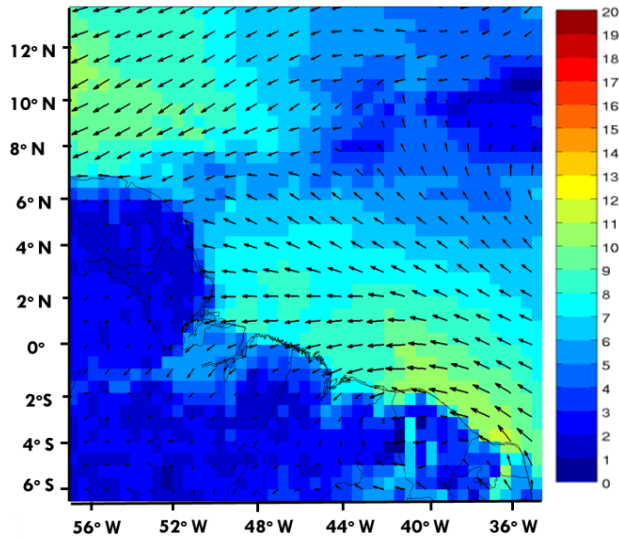


Figura 3-15: Campos de vento (m/s) próximos à superfície para o dia 31/03/2016 às 18 UTC. a) GFS, b) WRF 27 km, c) WRF 9 km.

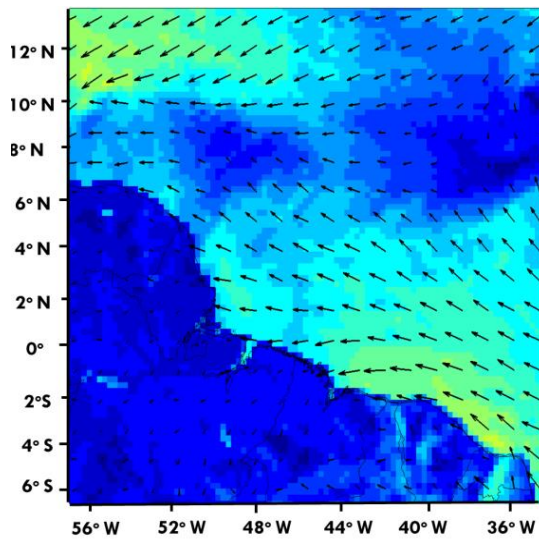
Observa-se no inverno e primavera austrais, ventos provenientes de direções entre leste e sul, na região mais próxima da costa. Este resultado evidencia a predominância dos ventos alísios. Nota-se entre 6°N e 10°N, uma região com baixa intensidade do vento, devido à convergência do escoamento próximo à superfície. As maiores intensidades do vento são verificadas próximo da região costeira do Nordeste do Brasil. A comparação entre os resultados dos horários das 06Z e 18Z também evidencia a ausência de um ciclo diurno do vento bem definido nestes períodos do ano (Figura 3-16 a Figura 3-19).



a)



b)



c)

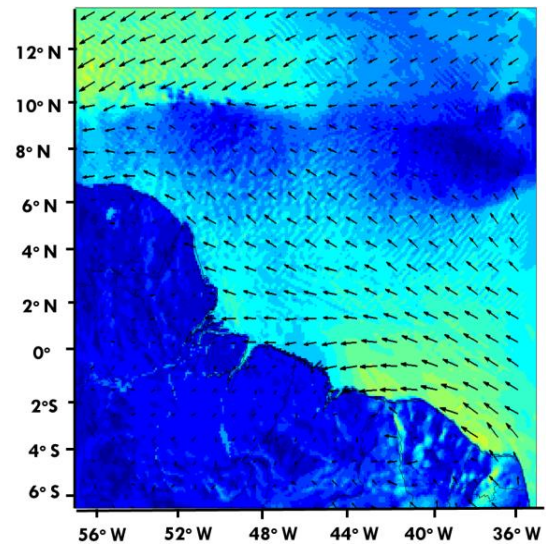
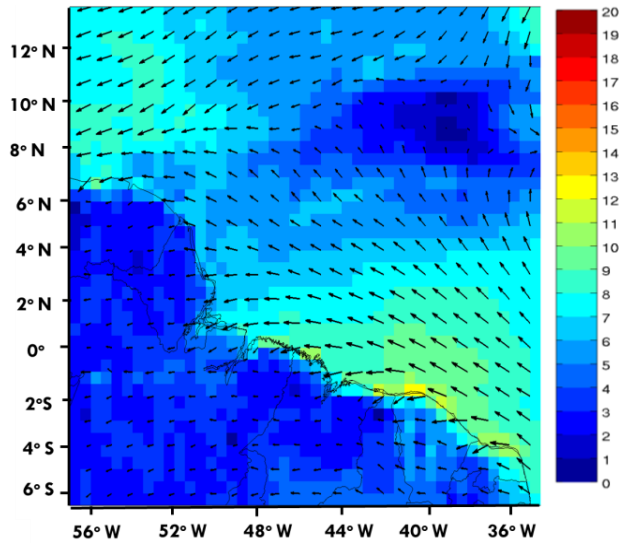
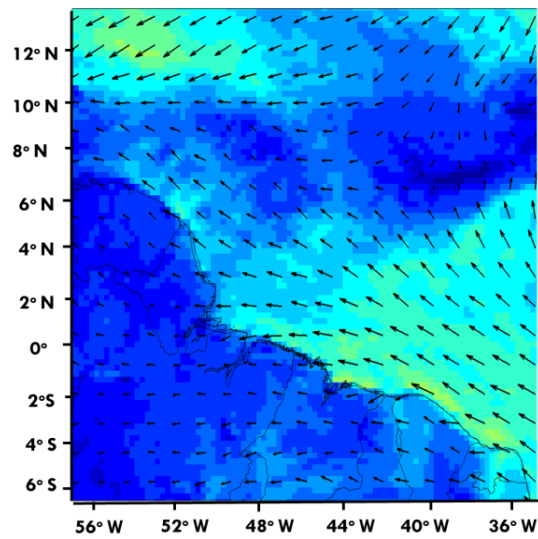


Figura 3-16: Campos de vento (m/s) próximos à superfície para o dia 15/08/2016 às 06 UTC. a) GFS, b) WRF 27 km, c) WRF 9 km.

a)



b)



c)

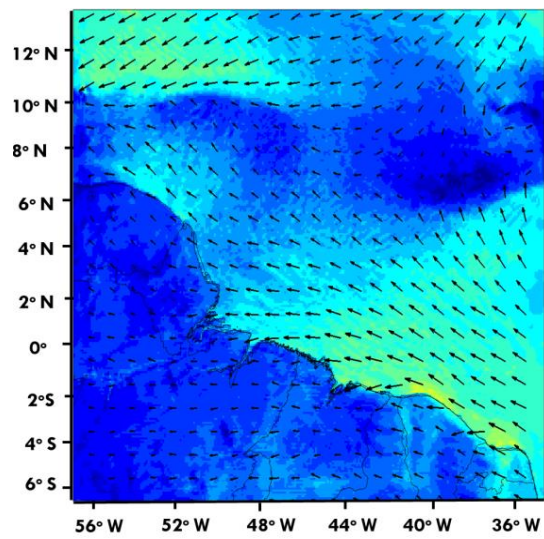
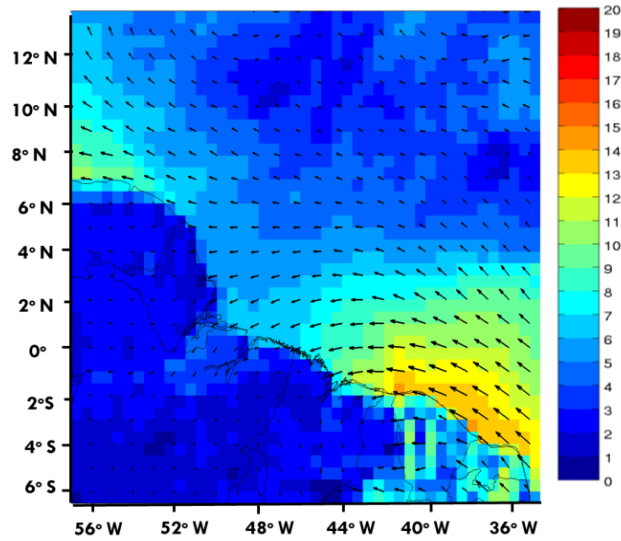
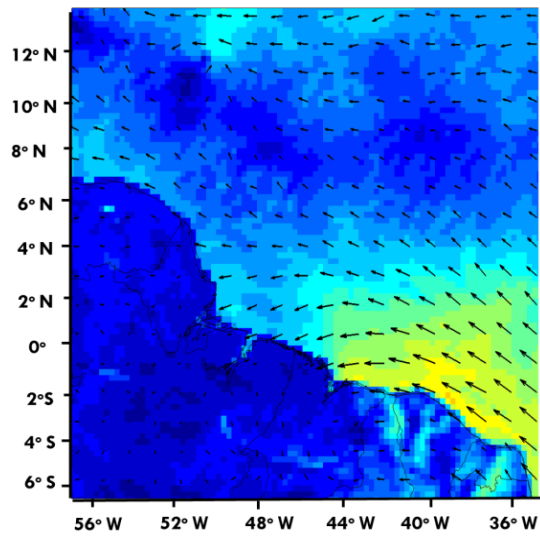


Figura 3-17: Campos de vento (m/s) próximos à superfície para o dia 15/08/2016 às 18 UTC. a) GFS, b) WRF 27 km, c) WRF 9 km.

a)



b)



c)

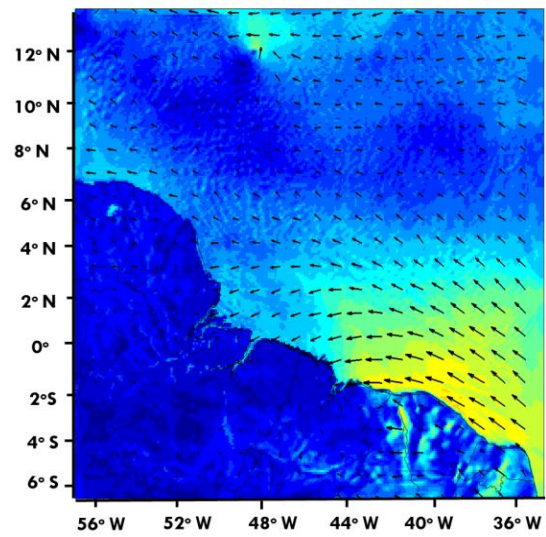
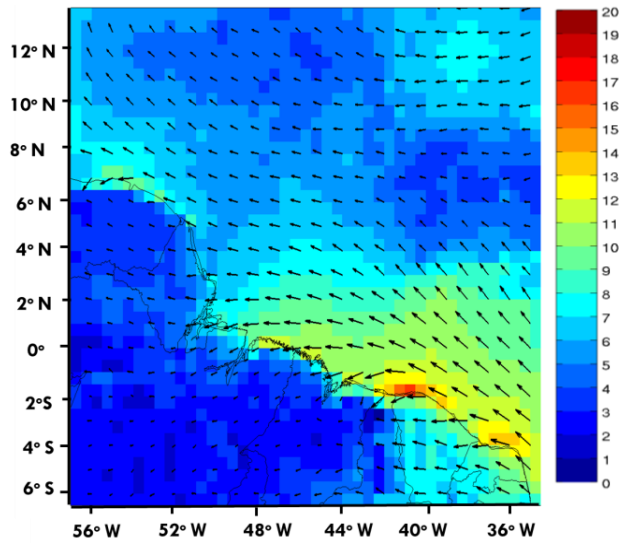
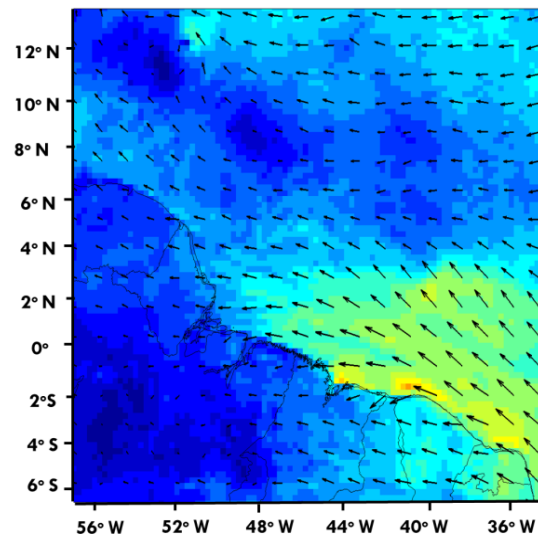


Figura 3-18: Campos de vento (m/s) próximos à superfície para o dia 01/11/2016 às 06 UTC. a) GFS, b) WRF 27 km, c) WRF 9 km.

a)



b)



c)

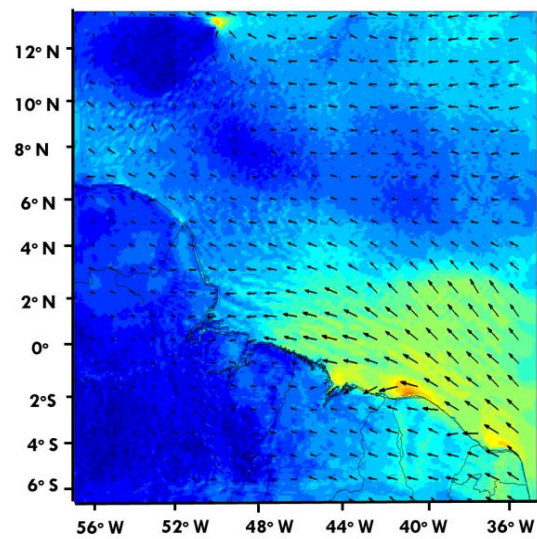


Figura 3-19: Campos de vento (m/s) próximos à superfície para o dia 01/11/2016 às 18 UTC. a) GFS, b) WRF 27 km, c) WRF 9 km.



### 3.4.5. Avaliação temporal

Nas Figura 3-20 a Figura 3-23 são apresentadas comparações entre os resultados do modelo WRF e os dados das boias do projeto PIRATA. Nota-se que, de maneira geral, o modelo WRF simulou as variações de intensidade e direção do vento registradas pelas boias ao longo de todos os períodos analisados. A menor diferença encontrada foi de  $1 \text{ ms}^{-1}$  e  $10^\circ$ , e a maior diferença foi de  $1,6 \text{ ms}^{-1}$  e  $52^\circ$ . Ressalta-se que a maior diferença de direção, que foi encontrada no mês de março, destoa dos outros períodos, cujas diferenças ficaram abaixo de  $16^\circ$ . A Figura 3-22 e Figura 3-23 apresentam os resultados apenas para a boia 0N35W, pois os dados da boia 4N38W estão ausentes.

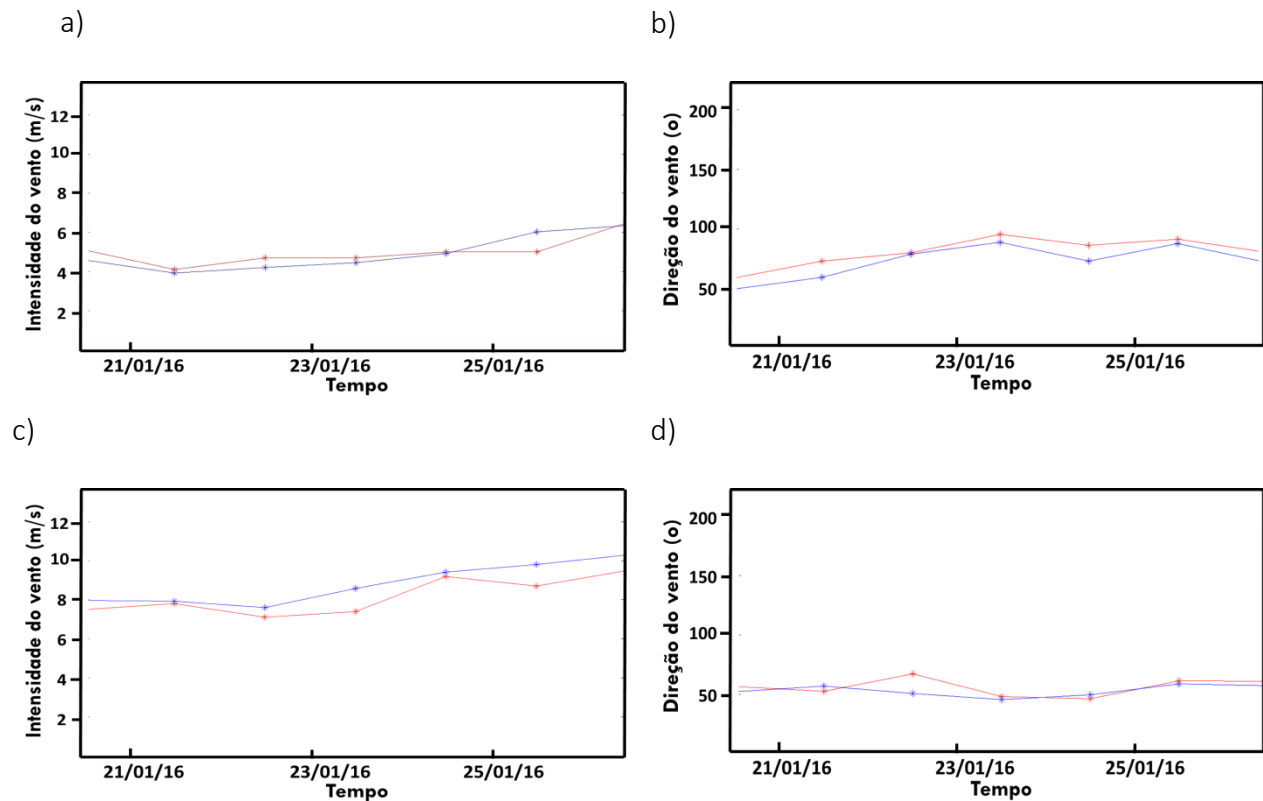
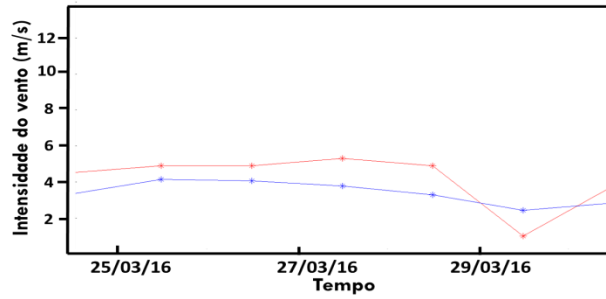
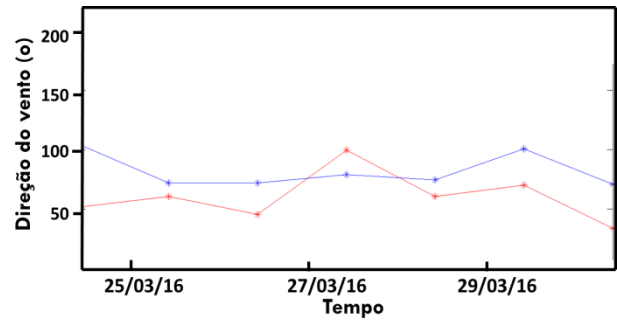


Figura 3-20: Séries temporais de intensidade (m/s) (painéis à esquerda) e direção (°) (painéis a direita) do vento para a boia 0N35W (painéis superiores) e 4N38W (painéis inferiores) referentes ao período de 20 a 26 de janeiro de 2016.

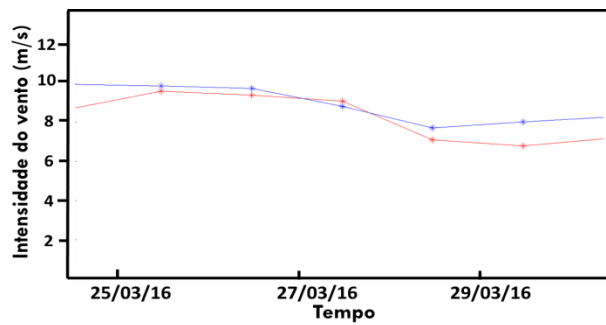
a)



b)



c)



d)

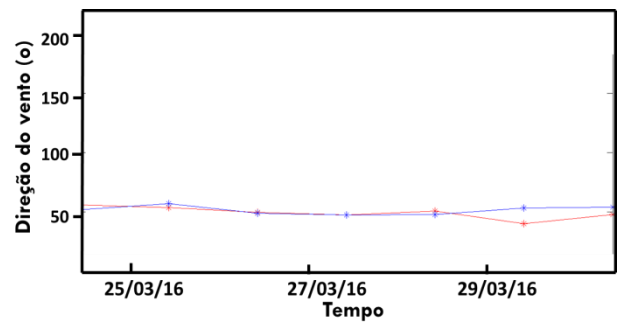


Figura 3-21: Séries temporais de intensidade (m/s) (painéis à esquerda) e direção (°) (painéis a direita) do vento para a bóia 0N35W (painéis superiores) e 4N38W (painéis inferiores) referentes ao período de 24 a 30 de março de 2016.

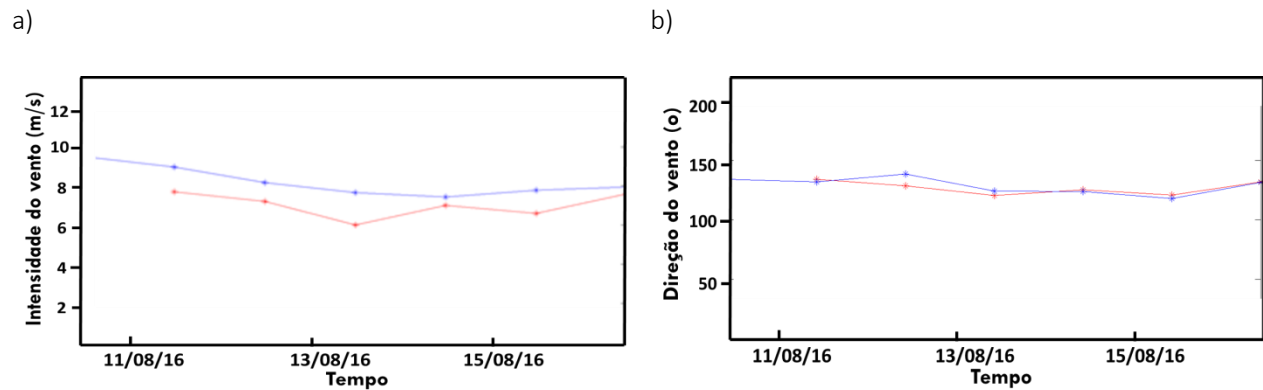


Figura 3-22: Séries temporais de intensidade (m/s) (a) e direção (°) (b) do vento para a bóia 0N35W referentes ao período de 10 a 16 de agosto de 2016. O primeiro dia da série da boia está ausente da base de dados.

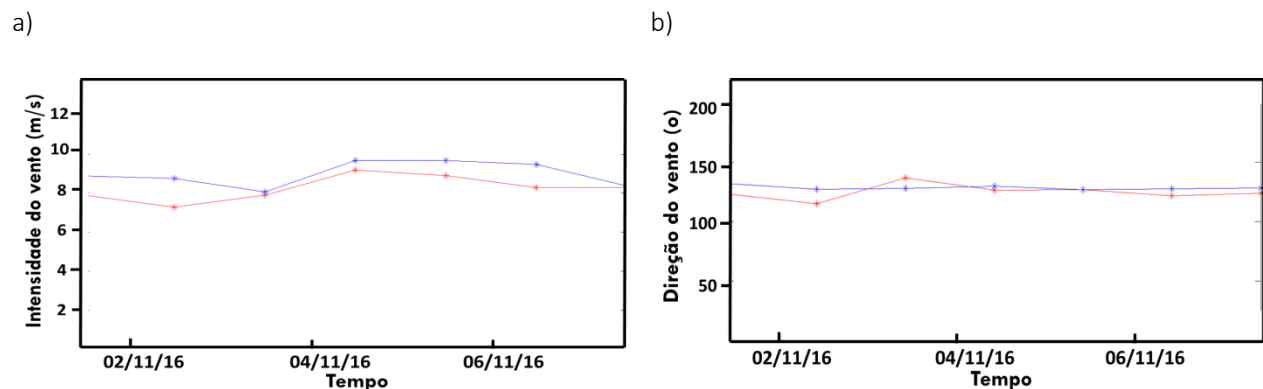


Figura 3-23: Séries temporais de intensidade (m/s) (a) e direção (°) (b) do vento para a bóia 0N35W referentes ao período de 01 a 07 de novembro de 2016.

### 3.5. Conclusão

No escopo do Projeto Costa Norte, foi desenvolvido e operacionalizado um sistema de previsão numérica de tempo para a Margem Equatorial Brasileira. Destaca-se que esta região é geograficamente complexa, devido à variada linha de costa e à atuação de fenômenos atmosféricos em diferentes escalas espaço-temporais, o que torna um desafio para a previsão numérica de tempo.

No sistema de previsão desenvolvido, o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) foi implementado e adequado para a região de interesse. O sistema funcionou operacionalmente fornecendo campos espaciais e séries temporais de variáveis meteorológicas como o vento, temperatura do ar, pressão atmosférica, precipitação, dentre outras. Através dos resultados, verificou-se que o modelo foi capaz de representar numericamente as variações diurnas e sazonais do escoamento atmosférico próximo da superfície.

### 3.6. Referências

- BROXTON, P. D. et al. A Global Land Cover Climatology Using MODIS Data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 53, n. 6, p. 1593–1605, 2014.
- DANIELSON, J. J.; GESCH, D. B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). [s.l.: s.n.].
- GIANNAROS, T. M. et al. Ultrahigh resolution wind forecasting for the sailing events at the Rio de Janeiro 2016 Summer Olympic Games. *Meteorological Applications*, v. 25, n. 1, p. 86–93, 2017.
- PAIVA, L. M. S.; BODSTEIN, G. C. R.; PIMENTEL, L. C. G. Influence of high-resolution surface databases on the modeling of local atmospheric circulation systems. *Geoscientific Model Development*, v. 7, n. 4, p. 1641–1659, 14 ago. 2014.
- SKAMAROCK, W. C. et al. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. NCAR/TN-556+STR, v. 1, p. 1–154, 2019.
- SOUZA, D. C. DE; OYAMA, M. D. Breeze Potential Along the Brazilian Northern and Northeastern Coast. *Journal of Aerospace Technology and Management*, v. 9, n. 3, p. 368–378, 3 ago. 2017.
- UTIDA, G. et al. Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, p. 1698, 8 dez. 2019.