



Tufões Haiyan e Haima: Características Durante a Formação, Maturação e Dissipação Haiyan and Haima typhoons: Characteristics During Formation, Maturation and Dissipation

Bruna Andreлина Silva; Rayan Reis Miranda Leite & Michelle Simões Reboita

Universidade de Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais

Avenida BPS, 1303, Pinheirinho, 37.500-903, Itajubá, MG - Brasil

E-mails: brunaandreлина@gmail.com; rayanmirandda@gmail.com; reboita@gmail.com

Recebido em: 21/12/2017 Aprovado em: 24/07/2018

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_37_53

Resumo

Os ciclones tropicais que possuem intensidade do vento igual ou superior a 119 km/h, quando formados no setor oeste do oceano Pacífico Tropical, recebem o nome de tufões. Esses sistemas causam grandes devastações em áreas continentais. Dois casos que atingiram as Filipinas e atraíram a atenção internacional foram os tufões Haiyan e Haima. O Haiyan foi o tufão mais intenso registrado desde 1979 no Pacífico ocidental e se manteve ativo entre os dias 3 a 11 de novembro de 2013. Já o Haima foi o segundo tufão a atingir ventos com intensidade superior a 220 km/h desde 1979. Esse sistema atuou entre os dias 15 e 21 de outubro de 2016. Diante do exposto, o objetivo do presente estudo é descrever a evolução do ciclo de vida dos tufões Haiyan e Haima (análise lagrangeana), evidenciar similaridades e diferenças entre eles e avaliar o impacto desses sistemas nas variáveis atmosféricas próximas das Filipinas (análise euleriana). As variáveis atmosféricas utilizadas no estudo foram obtidas do *Global Forecast System Analysis* e do *Tropical Rainfall Measuring Mission*. A região de ciclogênese dos tufões Haiyan e Haima apresentou anomalias positivas de temperatura da superfície do mar de 0,7 °C e 1,1 °C, respectivamente. Ao longo da trajetória, os tufões deixaram rastro frio sobre o oceano. Próximo às Filipinas, o Haiyan causou ventos com intensidade de 232 km/h e o Haima de 226 km/h. Com relação ao ciclo de vida desses sistemas, é na fase de maturidade que os tufões apresentam vorticidade relativa ciclônica mais intensa e maior desvio zonal de temperatura no centro em comparação às áreas vizinhas.

Palavras-chave: Ciclone tropical; oceano Pacífico Oeste; Haiyan; Haima

Abstract

Tropical cyclones that have wind intensity equal or higher than 119 km/h, when formed in the western sector of the tropical Pacific Ocean, are called typhoons. These systems are responsible for great devastation over continental areas. Two cases that reached the Philippines and attracted the international attention were the typhoons Haiyan and Haima. Haiyan was the strongest typhoon recorded since 1979 in the western Pacific and remained active from 3 to 11 November 2013. Haima was the second typhoon that reached winds with an intensity exceeding 220 km/h since 1979. The purpose of the present study is to describe the evolution of the lifecycle of Haiyan and Haima typhoons (lagrangian analysis), to show similarities and differences between them, and to evaluate the impact of these systems on atmospheric variables close to the Philippines (eulerian analysis). The atmospheric variables used in the study were obtained from the *Global Forecast System Analysis* and the *Tropical Rainfall Measuring Mission*. The cyclogenesis region of the Haiyan and Haima typhoons showed positive sea surface temperature anomalies of 0.7 °C and 1.1 °C, respectively. Along the trajectory, the typhoons produced a cold trail on the ocean. Near the Philippines, the Haiyan caused winds with an intensity of 232 km/h and the Haima of 226 km/h. Regarding the lifecycle of these systems, the maturation phase shows more intense cyclonic relative vorticity and the highest zonal departure of air temperature in the core of the typhoons in relation to the neighborhood.

Keywords: Tropical cyclone; Western Pacific Ocean; Haiyan; Haima

1 Introdução

Os ciclones tropicais são sistemas atmosféricos com centro de baixa pressão que se formam sobre os oceanos tropicais. Esses sistemas apresentam os ventos intensos em baixos níveis da atmosfera e circulação no sentido horário no Hemisfério Sul e anti-horário no Hemisfério Norte. O deslocamento dos ciclones tropicais é fortemente influenciado pela circulação geral da atmosfera e, portanto, se deslocam, em geral, para oeste e noroeste. Outra característica dos ciclones tropicais é que eles possuem núcleo mais quente do que suas cercanias por quase toda a troposfera e são sistemas com aparência simétrica tanto na nebulosidade quanto nas demais variáveis atmosféricas (Gray & Brody, 1967; Frank, 1977; Lim *et al.*, 2015; Reboita *et al.*, 2017a).

Quando os ventos nos ciclones tropicais atingem intensidade igual ou superior a 119 km/h, os ciclones podem receber diferentes denominações, o que depende da localização no globo. No setor tropical dos oceanos Atlântico Norte e Pacífico Tropical Leste, esses sistemas são denominados de furacão. Já na bacia do Pacífico Tropical Oeste recebem o nome de tufão (*National Hurricane Center*, s/d). Os ciclones tropicais com intensidade do vento acima de 119 km/h ainda podem ser classificados em 5 categorias de acordo com a escala de Saffir-Simpson (Tabela 1). Tal escala é baseada na velocidade do vento máximo sustentado em superfície (*National Hurricane Center*, s/d).

Categoria	Velocidade do Vento
Depressão Tropical (DT)	Menor que 62 km/h
Tempestade Tropical (TT)	63 - 118 km/h
1	119 - 153 km/h
2	154 - 177 km/h
3	178 - 208 km/h
4	209 - 251 km/h
5	maior que 252 km/h

Tabela 1 Classificação das depressões não frontais e ciclones, de acordo com a velocidade do vento sustentado na superfície. Adaptado de *National Hurricane Center* (s/d) e Têso (2006).

Com relação à formação dos ciclones tropicais, Anthes (1982) afirma que a gênese desses sistemas está fortemente associada à evaporação

das águas na superfície oceânica que produz um resfriamento da camada de ar adjacente. Isso contribui para o aumento do gradiente vertical de temperatura do ar e umidade na camada próxima à superfície e, conseqüentemente, para uma maior transferência de energia do oceano para a atmosfera (calor latente e sensível). Galvin (2008) destaca que a maior frequência de ciclones tropicais ocorre sobre superfícies oceânicas com temperatura acima de 26,5°C. Com relação à dissipação dos ciclones tropicais, essa ocorre quando a fonte de energia cessa; o que pode ocorrer quando os ciclones atingem águas mais frias ou o continente.

Segundo Anthes (1982) e Wang & Wu (2004), os ciclones tropicais são responsáveis por danos materiais e perda de vidas por ocasionar ventos fortes, aumento das ondas e nível do mar, chuvas torrenciais e inundações. Dois tufões que tiveram alto potencial destrutivo foram o Haiyan e Haima. O Haiyan se formou no dia 03 de novembro de 2013 e ao longo da sua trajetória causou mais de 10 mil mortes, mais de 1 mil desaparecidos e prejuízos de 14 bilhões de dólares nas Filipinas e Vietnã (jornal O GLOBO, 2013; G1, 2013). O jornal O GLOBO, baseado nas informações do *Met Office* da Europa, ainda menciona que o Haiyan foi o tufão mais intenso registrado desde 1979 no Pacífico ocidental. Embora muitos outros tufões tenham ocorrido após o Haiyan, outro de destaque foi o Haima, com gênese no dia 14 de outubro de 2016. Com fortes ventos e chuvas intensas, esse tufão causou cerca de 12 óbitos, além de inundações e danos em infraestruturas e plantações nas Filipinas e Hong Kong (portal de notícias G1, 2016; *Hong Kong Observatory*, 2016). O *site* G1, com base em informações da agência filipina para a redução de desastres, mencionou que o Haima foi o tufão mais potente a atingir as Filipinas desde a passagem do Haiyan, um dos mais intensos da história. Ambos tufões tiveram um ciclo de vida com aproximadamente nove dias e atingiram categoria 4 na escala Saffir-Simpson (Tabela 1) com ventos com intensidade superior a 220 km/h. Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho é descrever a evolução do ciclo de vida dos tufões Haiyan e Haima (análise lagrangeana), evidenciar similaridades e diferenças entre eles e avaliar o impacto desses sistemas nas variáveis atmosféricas próximas das Filipinas (análise euleriana).

2 Material e Métodos

Para o estudo dos tufões Haiyan e Haima foram obtidos dados de diferentes fontes (Tabela 2). Os dados correspondem aos períodos de 2 a 11 de novembro de 2013 para o tufão Haiyan e de 13 a 22 de outubro de 2016 para o Haima.

Variáveis	Resolução Espacial (lat x lon)	Frequência Temporal	Fonte
Componentes Zonal e Meridional do Vento	0,5°	6 horas	<i>Global Forecast System Analysis (GFSanl - Sistema de Previsão Global) pertencente a National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)</i> ftp://nomads.ncdc.noaa.gov/GFS/analysis_only/
Altura Geopotencial			
Temperatura do Ar			
Pressão ao Nível Médio do Mar			
Precipitação	0,25°	24 horas	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM 3B42)</i> https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm
Fluxos de calor latente e sensível	1,0°	24 horas	<i>Objectively Analyzed Air-Sea Fluxes (OAFux)</i> ftp://ftp.whoi.edu/pub/science/oafux/data_v3/daily/turbulence/
Temperatura da superfície do mar (TSM)	2,5°	24 horas	<i>National Centers for Environmental Prediction (NCEP)</i> https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html
Temperatura de brilho - canal infravermelho (IR)	0,07°	6 horas	<i>National Centers for Environmental Information (NOAA) - satellite GridSat-B1</i> https://www.ncei.noaa.gov/thredds/catalog/cdr/gridsat/files/catalog.html

Tabela 2 Resolução, frequência e fonte dos dados utilizados.

A área de estudo se estende entre as latitudes 0° e 30° N e as longitudes 110° E e 150° E, para ambos os tufões. De posse das variáveis mencionadas, foi realizado o estudo do ciclo de vida de cada tufão. Para isso (análise sinótica), o ciclo de vida foi caracterizado por três estágios: (1) gênese, que é o momento em que surgem isóbaras fechadas no

campo da pressão atmosférica ao nível médio do mar, (2) maturidade que é quando o sistema mostra o tubo vertical de vorticidade relativa ciclônica mais intenso e (3) dissipação, quando a característica descrita em (2) começa a enfraquecer. Essas definições foram utilizadas em estudos prévios como em Reboita et al. (2017b). Em relação à gênese é importante mencionar que essa depende do intervalo utilizado na representação gráfica entre as isóbaras; dependendo do valor utilizado o fechamento da isóbara pode ocorrer em horários sinóticos diferentes. A Tabela 3 indica a data e hora sinótica de cada fase do ciclo de vida dos tufões em estudo com base no método descrito. Ressalta-se que os dois sistemas tropicais em estudo tiveram assinatura na atmosfera antes da data considerada como gênese no presente estudo, pois aqui, estão sendo utilizadas isóbaras fechadas, mas a vorticidade dos ciclones é bem marcada mesmo antes das isóbaras fecharem (Sinclair, 1994; Reboita et al., 2017a-b). Por fim, chama-se a atenção que a classificação das fases do ciclo de vida teve como objetivo a identificação de horários para a apresentação das figuras para a análise sinótica.

Fase	Haiyan	Haima
Gênese	18Z04NOV2013	00Z16OCT2016
Maturidade	18Z07NOV2013	00Z19OCT2016
Dissipação	12Z10NOV2013	12Z21OCT2016

Tabela 3 Data e horário sinótico da gênese, maturidade e dissipação dos tufões Haiyan e Haima.

Antes da análise das variáveis atmosféricas é mostrada a trajetória de cada um dos tufões (Figura 1). A trajetória foi obtida extraindo-se a informação do ponto de latitude e longitude que correspondia a menor pressão ao nível médio do mar (PNMM), a cada 6 horas, do centro de cada tufão. Após, foi elaborado um mapa contendo todos os pontos extraídos (trajetória do sistema).

3 Resultados e Discussão

3.1 Trajetória dos Tufões Haiyan e Haima

O tufão Haiyan formou-se no oceano Pacífico Oeste (a cerca de 6° N e 147° E) como uma depressão tropical (ventos inferiores a 62 km/h, Tabela 1)

no dia 3 de novembro de 2013 e se dissipou no dia 11 de novembro de 2013, próximo ao Vietnã como tempestade tropical (ventos entre 63 e 118 km/h). Na análise mostrada na Tabela 3, a gênese em termos de configuração das isóbaras ocorre no dia 4 de novembro. O tufão Haima também se formou no oceano Pacífico Oeste (8° N e $142,5^{\circ}$ E) como uma depressão tropical, no dia 15 de outubro de 2016 e teve dissipação no dia 21 de outubro de 2016, quando atingiu Hong Kong. Para esse sistema, a configuração das isóbaras também ocorre um dia após à fase de depressão tropical, isto é, no dia 16 de outubro. Na Tabela 3, a dissipação significa o momento de enfraquecimento e não o desaparecimento total do sistema, que é de fato nos dias 11 de novembro e 21 de outubro com relação ao Haiyan e Haima, respectivamente.

A Figura 1 mostra a trajetória do ciclone Haiyan (cor vermelha) do dia 3 a 11 de novembro e do Haima (cor azul) do dia 15 a 21 de outubro, quando atingem o continente. Ambos os sistemas se deslocaram para noroeste. Os pontos na Figura 1 indicam a posição dos tufões a cada 6 horas. Nota-se que há mais pontos na trajetória do ciclone Haiyan comparada ao Haima. Isso ocorre devido ao fato de que o tufão Haiyan foi mais duradouro. Durante a trajetória, ambos tufões atingiram as Filipinas cau-

sando destruição e mudanças nas variáveis atmosféricas. Ao atingirem a costa asiática, os sistemas perderam a fonte de energia oceânica e decaíram (ver seção 3).

3.2 Classificação da Intensidade Baseada na Escala Saffir-Simpson

A fim de avaliar a evolução temporal da intensidade do vento e realizar a classificação dos dois ciclones tropicais em estudo, de acordo com a escala Saffir-Simpson (*National Hurricane Center, s/d*), registraram-se os valores da intensidade do vento nas coordenadas de latitude e longitude correspondentes ao centro de menor pressão (que na fase de furacão corresponde ao olho do sistema) e na região afastada do centro, em que constar a máxima intensidade dos ventos. O nível atmosférico usado foi 1000 hPa. Ressalta-se aqui que os ventos mais intensos nos ciclones tropicais não ocorrem exatamente no seu centro, mas adiante desse. Portanto, é de interesse mostrar a diferença na intensidade do vento nesses dois setores (Tabela 4). A Tabela 4 revela que, embora os ventos no centro dos ciclones em estudo sejam mais fracos do que na região externa ao centro, mesmo assim são intensos. Para confirmar essa característica, também foram analisados os campos de vento da

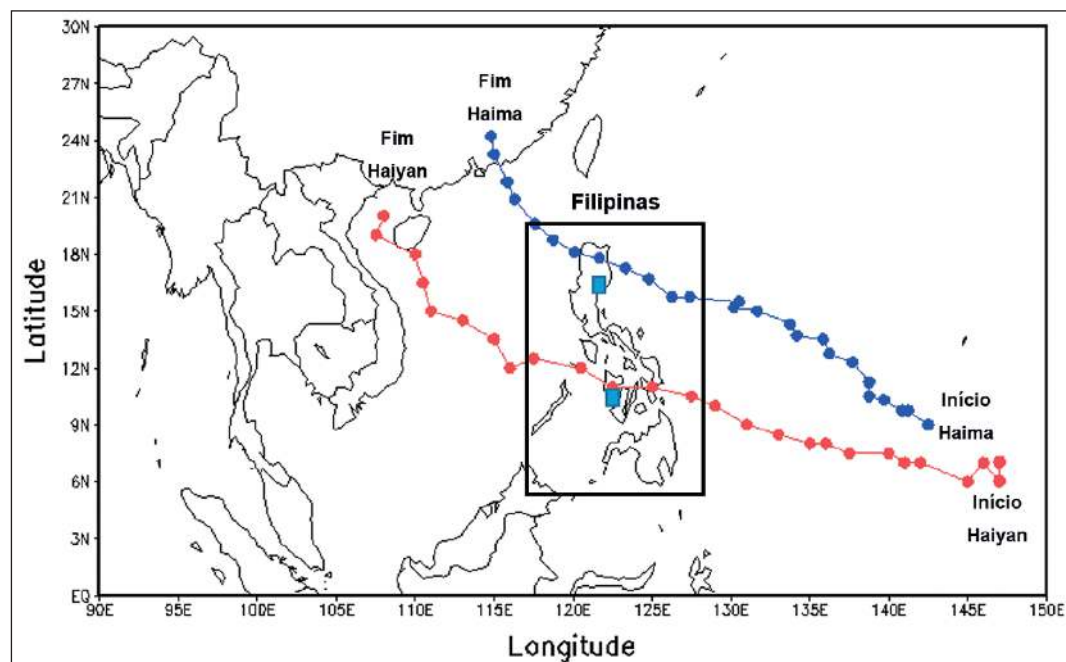


Figura 1 Trajetória do tufão Haiyan em vermelho e trajetória do ciclone Haima em azul a cada 6 horas. Os quadrados destacados em azul indicam os locais usados no estudo da evolução temporal das variáveis atmosféricas (análise euleriana).

reanálise ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011) do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF; figuras não apresentadas). Essa reanálise mostra sistemas com ventos mais fracos comparados aos do GFS, mas também indica que não há situação de calmaria na região central dos sistemas. De fato, vários trabalhos na literatura (NASA, 2013, Lim *et al.*, 2015) indicam a ocorrência de ventos intensos no centro de ciclones tropicais (superiores a 25 m/s).

Apesar dos tufões terem sido relatados pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA, 2013, 2016) e nos noticiários (*site Mashable*, 2016 e CNN, 2013) como sistemas de categoria 5, as análises realizadas com os dados do GFS mostram que os tufões não ultrapassaram a categoria 4 da escala Saffir-Simpson, isto é, apresentaram ventos com intensidade entre 209 e 251 km/h. Essa diferença nos resultados deve-se a alguns fatos: análises atmosféricas como a do GFS podem suavizar os dados assimilados devido às interpolações realizadas. Além disso, a classificação desses sistemas pelos centros de meteorologia leva em conta estimativas de satélite e dados observados em estações meteorológicas, o que pode informar valores mais elevados de intensidade do vento. A Tabela 4 também mostra que o tufão Haima manteve sua máxima intensidade por mais horários sinóticos do que o tufão Haiyan. Esse atingiu vento máximo de 232 km/h enquanto que a intensidade dos ventos do Haima não foi superior a 226 km/h (Tabela 4).

3.3 Ciclo de Vida dos Tufões Haiyan e Haima

Nessa parte do estudo é realizada uma análise sinótica dos tufões com base nas datas definidas na Tabela 3. As Figuras 2 a 9 com os índices A, C e E referem-se, respectivamente, às fases de formação, maturação e dissipação do tufão Haiyan. Já as figuras com os índices B, D e F dizem respeito à formação, maturação e dissipação do tufão Haima.

A Figura 2 mostra que a circulação dos dois tufões é bem simétrica no campo da PNMM e nas imagens de satélite do canal infravermelho (temperatura de brilho); cores mais brancas indicam nuvens mais espessas e com topos frios. As nuvens associadas aos tufões Haiyan e Haima são convectivas e, portanto, provocam totais elevados de precipitação (Figura 3). Ainda na Figura 2 é possível visualizar

Tufão Haiyan				Tufão Haima			
Data	Centro	Extremidade	Categoria	Data	Centro	Extremidade	Categoria
00Z04NOV	14,56	49,27	DT	18Z14OCT	10,95	54,87	DT
06Z04NOV	22,97	67,01	TT	00Z15OCT	10,45	63,57	TT
12Z04NOV	27,49	80,53	TT	06Z15OCT	27,69	96,13	TT
18Z04NOV	62,65	111,83	TT	12Z15OCT	36,34	95,28	TT
00Z05NOV	78,69	130,81	1	18Z15OCT	40,05	82,52	TT
06Z05NOV	95,87	140,10	1	00Z16OCT	35,75	95,97	TT
12Z05NOV	102,18	180,73	3	06Z16OCT	25,23	117,69	TT
18Z05NOV	99,79	175,91	2	12Z16OCT	61,34	135,72	1
00Z06NOV	107,24	187,06	3	18Z16OCT	74,83	142,68	1
06Z06NOV	79,98	151,71	1	00Z17OCT	63,12	156,47	2
12Z06NOV	121,52	164,21	2	06Z17OCT	85,74	159,71	2
18Z06NOV	77,84	166,18	2	12Z17OCT	131,81	207,68	3
00Z07NOV	84,28	177,40	3	18Z17OCT	86,76	214,64	4
06Z07NOV	74,87	184,11	3	00Z18OCT	38,04	210,97	4
12Z07NOV	106,20	202,36	3	06Z18OCT	95,50	199,10	3
18Z07NOV	100,55	232,70	4	12Z18OCT	99,42	202,26	3
00Z08NOV	112,25	166,49	2	18Z18OCT	92,94	215,53	4
06Z08NOV	82,86	135,07	1	00Z19OCT	78,16	226,40	4
12Z08NOV	57,19	141,78	1	06Z19OCT	137,48	222,96	4
18Z08NOV	61,27	126,16	1	12Z19OCT	86,07	190,97	3
00Z09NOV	83,41	189,30	3	18Z19OCT	37,44	127,93	1
06Z09NOV	67,25	161,12	2	00Z20OCT	58,89	125,15	1
12Z09NOV	51,22	132,45	1	06Z20OCT	29,56	140,15	1
18Z09NOV	48,91	132,09	1	12Z20OCT	37,68	136,40	1
00Z10NOV	42,93	132,01	1	18Z20OCT	25,87	143,49	1
06Z10NOV	65,87	122,68	1	00Z21OCT	28,99	142,21	TT
12Z10NOV	40,68	79,32	TT	06Z21OCT	21,78	100,99	TT
18Z10NOV	20,29	71,14	TT	12Z21OCT	12,60	52,51	DT

Tabela 4 Classificação da intensidade do tufão Haiyan e Haima de acordo com a Escala Saffir Simpson baseado na velocidade do vento em superfície (1000 hPa), definido em unidade de km/h.

nuvens próximo ao centro dos tufões com temperatura de brilho em torno de 160 K (~ -113 °C). Essas nuvens são arredondadas, simétricas e têm extenso desenvolvimento vertical. Com relação à PNMM, essa decresce em direção ao centro do sistema. Isso é bem evidente na fase de maturidade (Figura 2C e Figura 2D). Após esta fase o ciclone começa a se dissipar o que é constatado pelo aumento da PNMM. Na gênese, o tufão Haiyan teve pressão central de 997,6 hPa, enquanto que na sua maturidade atingiu 975,7 hPa. Já o Haima teve sua gênese caracterizada por pressão central de 997,2 hPa e, na fase mais intensa, de 973,5 hPa.

Antes da formação do tufão Haima há presença de um outro tufão próximo a Hong Kong. Este recebeu o nome de Songda e é evidente em algumas figuras, como na Figura 2B. O Songda não é diretamente objeto de estudo, mas será mostrado que esse sistema influencia a intensidade do tufão Haima.

A Figura 3 mostra os acumulados de precipitação diária para os três estágios do ciclo de vida dos tufões. Há volumes elevados a oeste/noroeste desses sistemas, onde também há baixos valores de temperatura de brilho (Figura 2). O Haiyan, na fase de maturidade, teve precipitação superior a 320,91 mm a noroeste do seu centro (10,375° lat e 125,125° lon), enquanto que o Haima contribuiu para precipitação superior a 325,25 mm, também a noroeste (17,625° lat e 121,125° lon). (Figura 6).

A gênese dos ciclones tropicais está associada com a energia proveniente do processo de evaporação dos oceanos (Anthes, 1982; Bister & Emanuel 1998). Isso está relacionado com a TSM e com os fluxos turbulentos de calor latente e sensível. As Figuras 4 e 5 referem-se às anomalias de TSM e aos fluxos de calor totais (soma do latente com o sensível), respectivamente. Na fase de formação do ciclone Haiyan, a TSM possuía valor de 29,8°C e anomalia positiva de 0,68°C (Figura 4A), enquanto que na fase de formação do ciclone Haima esses valores foram de 30,4°C e 1,12°C respectivamente (Figura 4B). Assim como D'Asaro *et al.* (2007) constataram em outros casos de ciclones tropicais, os tufões Haima e Haiyan deixaram as águas superficiais mais frias ao se deslocarem em direção ao continente (Figura 4E e 4F), ou seja, após a passagem dos ciclones, houve queda da TSM devido à ressurgência de águas frias e mais profundas do oceano.

Após a fase de maturação (4C e 4D), o tufão Haima desloca-se em direção a Hong Kong iniciando sua fase de dissipação. O tufão Songda parece contribuir na dissipação do Haima, pois deixou a TSM anormalmente fria, o que pode ter reduzido a transferência de energia oceano-atmosfera no caso do Haima (Figura 4C). De fato, a Figura 5F mostra fluxos de calor total mais fracos nesse estágio do Haima.

Com relação aos fluxos de calor total, na fase de formação do Haiyan (Figura 5) esses possuem valor de 2400 W/m² no centro do sistema, na dissipação o valor decresce para 1200 W/m². Já no Haima, os fluxos são muito mais intensos. Na fase de formação atingem 3000 W/m². A título de curiosidade os fluxos de calor total nos ciclones tropicais são muito maiores do que nos extratropicais. Reboita (2008) mostrou que nos ciclones extratropicais próximos à costa leste da América do Sul esses fluxos são de cerca de 200 W/m² (estudo considerando a média de vários ciclones em 10 anos).

Os fluxos de calor latente armazenam energia que é liberada na atmosfera quando há a condensação. A condensação ocorre em toda a coluna atmosférica, mas é máxima em níveis médios da atmosfera; por isso, que o centro dos ciclones tropicais é bem mais quente do que seus arredores (Figura 7). A energia que é liberada aquece as parcelas de ar que vão se deslocar para maiores altitudes. Para ocorrer conservação de massa, mais ar ascende na coluna atmosférica favorecendo o processo de convergência e circulação ciclônica em superfície. Portanto, há intensificação do ciclone tropical em superfície, isto é, ventos mais intensos e queda da pressão atmosférica.

A intensidade dos ventos nos ciclones tropicais é maior próximo à superfície (Chavas *et al.*, 2017) e tende a decrescer com a altitude (Franklin, 2003; Giammanco *et al.*, 2012). Esse efeito pode ser explicado como consequência do núcleo quente, o qual favorece a inversão do cisalhamento vertical do vento via equação do vento térmico. Em outras palavras, em baixos níveis da atmosfera o centro do sistema possui menor pressão do que os arredores favorecendo um intenso gradiente horizontal de pressão com a vizinhança, por outro lado, na alta troposfera, o centro do sistema contribui para maior pressão, invertendo os gradientes horizontais em relação à baixa troposfera. Stull (2017) mostra uma figura didática (figura 16 página 622) para essa explicação. O padrão da variação vertical da intensidade do vento nos ciclones tropicais também é importante para manter a convecção nesses sistemas (não a desorganiza com ventos fortes). Uma forma de avaliar o padrão dos ventos é através do campo de cisalhamento vertical entre dois níveis atmosféricos. A Figura 6 mostra o cisalhamento computado entre os níveis de 250 hPa e 850 hPa. Os tufões Haiyan e Haima se formaram em regiões de fraco cisalhamento vertical do vento, como mostrado na Figura 6A e

Tufões Haiyan e Haima: Características Durante a Formação, Maturação e Dissipação
 Bruna Andreлина Silva; Rayan Reis Miranda Leite & Michelle Simões Reboita

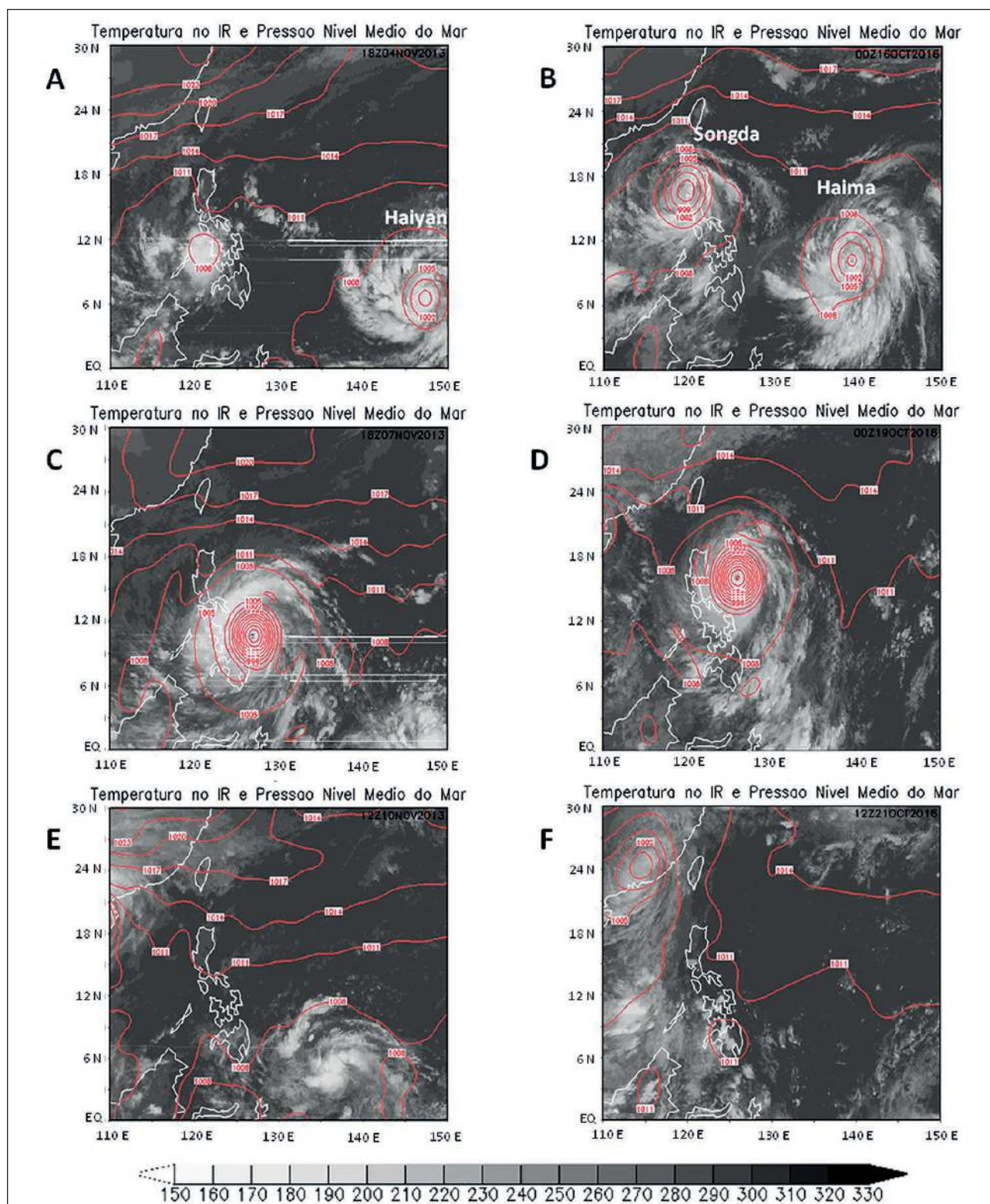


Figura 2 Temperatura de brilho (K) obtida do satélite GribSat em tons de cinza e PNMM (intervalos de 3 hPa) em linhas vermelhas. Contorno continental em branco (linhas sólidas). A frequência temporal das ilustrações corresponde aos horários sinóticos definidos na Tabela 3 (gênese, maturidade e dissipação). Os quadros A e B referem-se à gênese dos tufões Haiyan e Haima, respectivamente; os quadros C-D referem-se à fase de maturidade e os quadros E e F, de dissipação.

Tufões Haiyan e Haima: Características Durante a Formação, Maturação e Dissipação
 Bruna Andreina Silva; Rayan Reis Miranda Leite & Michelle Simões Reboita

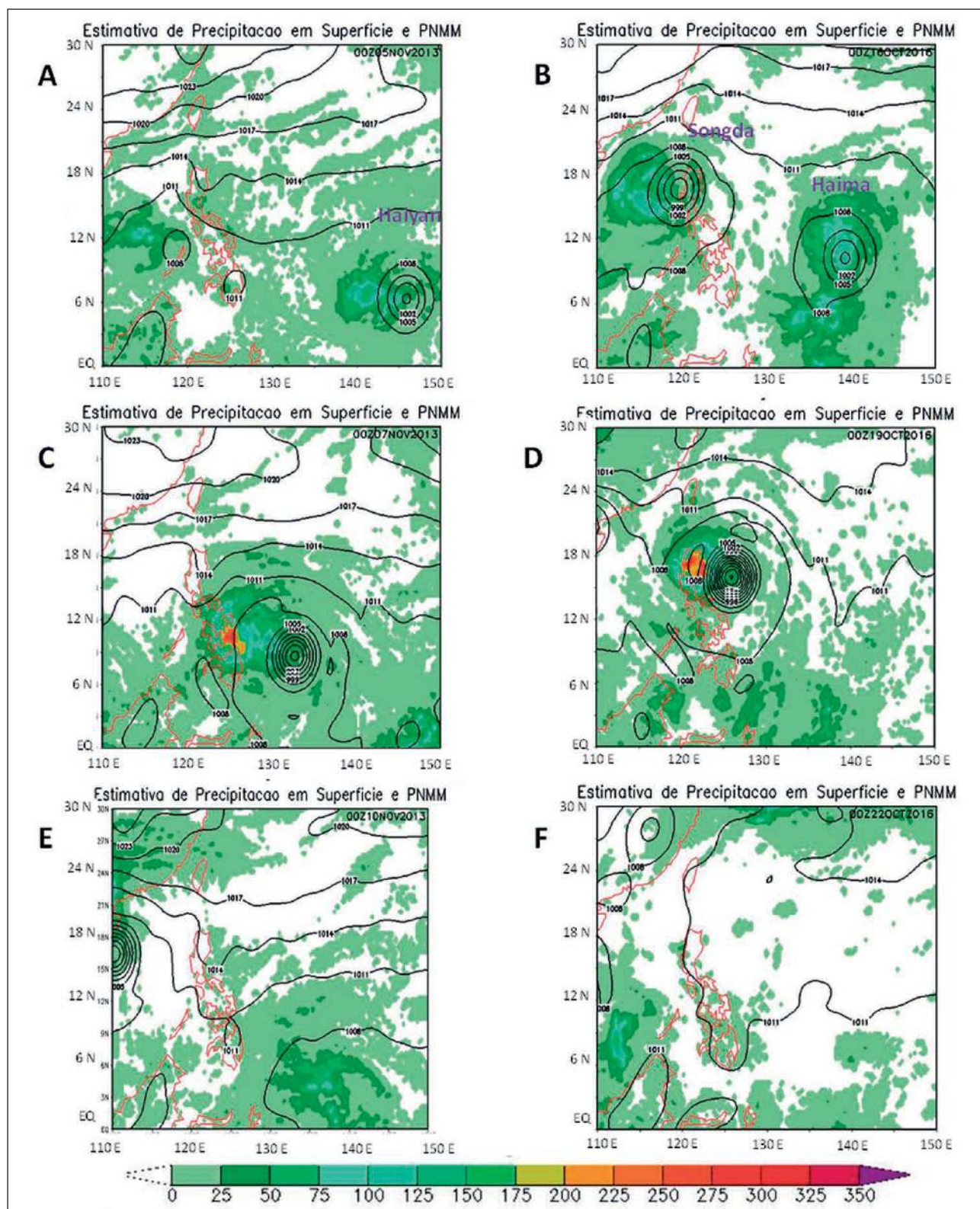


Figura 3 Evolução do acumulado de precipitação (mm/dia) em colorido e PNMM (intervalos de 3 hPa) em linhas pretas com rótulos indicando o valor da pressão atmosférica. Contorno continental em vermelho (linhas sólidas). A frequência temporal das ilustrações corresponde aos horários sinóticos definidos na Tabela 3 (gênese, maturidade e dissipação). Os quadros A e B referem-se à gênese dos tufões Haiyan e Haima, respectivamente; os quadros C-D referem-se à fase de maturidade e os quadros E e F, de dissipação.

6B. Os valores negativos nessas figuras indicam que a intensidade dos ventos em altos níveis é menor do que a em baixos níveis. Isso está de acordo com a literatura, em que a análise do perfil vertical do vento, mostra ventos mais intensos em baixos níveis do que em altos níveis (Frank, 1977; Gray 1979; Franklin, 2003; Hart, 2003; He *et al.*, 2016; Shu *et al.*, 2017).

As Figuras 7 e 8 mostram desvios zonais da temperatura do ar e altura geopotencial respectivamente. Uma vez fixada a latitude do centro do tufão, o desvio zonal é definido como a diferença entre a temperatura do ar (ou altura geopotencial) de uma dada camada (altura) e a média da camada. Na Figura 7, juntamente com o desvio zonal da temperatura do ar é mostrada a componente meridional do vento. Essa variável fornece uma visão da circulação ao redor do tufão. Imagine a figura como um tubo disposto na vertical. O tufão tem giro anti-horário no Hemisfério Norte, portanto, no setor a leste do centro do tubo os ventos são de sul para norte (valor positivo e em linha contínua na figura) e no setor a oeste, os ventos são de norte para sul (valor negativo e em linha pontilhada na figura). Além disso, é possível identificar a magnitude da componente meridional do vento. Na fase de maturidade (Figura 7C e 7D), a leste dos sistemas a componente meridional do vento mostra núcleos com valores de 70 m/s em aproximadamente 850 hPa, o que concorda com Chiao & Jenkins (2010).

Com relação ao desvio zonal da temperatura do ar (Figura 7), o núcleo quente se expande verticalmente na fase de formação dos dois tufões e atinge níveis superiores a 250 hPa na fase de maturação. Embora nessa fase (Figura 7C e Figura 7D), as linhas da componente meridional do vento dificultem a identificação do valor do desvio de temperatura, esse é superior a 18°C no Haiyan e Haima, sendo os desvios mais intensos da média para a alta troposfera. Fato que está associado ao processo de liberação de calor latente por condensação (Kidder *et al.*, 2000).

A Figura 8 mostra o perfil vertical do desvio zonal da altura geopotencial e a vorticidade relativa ciclônica. A atuação dos ciclones Haiyan e Haima é evidenciada pelo aumento da vorticidade relativa

(em módulo), atingindo valores máximos na maturação e decréscimo na fase de dissipação. Ao contrário dos ciclones extratropicais, o tubo de vorticidade relativa ciclônica não possui inclinação para oeste com a altura, já que os ciclones tropicais não ocorrem associados à baroclinia (Reboita *et al.*, 2017A-B).

Ao contrário do desvio zonal de temperatura, o desvio zonal de altura geopotencial mostra valores negativos (Figura 8). Como um tufão é um centro de baixa pressão e em região de menor pressão a altura geopotencial decresce mais rápido com a altura (Wallace & Hobbs, 2006), tal campo reflete exatamente esse processo físico. Entretanto, perto da tropopausa espera-se aumento de altura geopotencial em virtude da pressão exercida pelas parcelas de ar que ascendem na atmosfera. Um exemplo é mostrado na Figura 8A. Nas demais, essa característica não é mostrada, pois as figuras teriam que incluir maiores alturas (chegar a 10 hPa, por exemplo)

3.4 Evolução Temporal das Variáveis Atmosféricas nas Filipinas

Os tufões em estudo, apesar de apresentarem trajetória distinta, ambos atingiram as Filipinas. Para quantificar o impacto desses tufões nas variáveis atmosféricas em tal local, foi realizada uma análise euleriana. Representou-se, graficamente, na Figura 9A-B a evolução temporal da pressão atmosférica ao nível médio do mar e da magnitude do vento em 1000 hPa e na Figura 9C-D, a temperatura do ar a 2 metros de altura e do acumulado de precipitação, em pontos fixos. No caso do tufão Haiyan foram selecionadas tais variáveis na latitude 11°N e longitude 122,5°E (região central das Filipinas; Figura 1). Já no caso do tufão Haima, o ponto de estudo foi a latitude 17,5°N e a longitude 121,5°E (região norte das Filipinas; Figura 1).

O tufão Haiyan atingiu as Filipinas às 00Z de 07 de novembro de 2013 enquanto que o Haima alcançou a região às 00Z de 19 de novembro de 2016. É perceptível a queda da pressão em superfície até o momento em que os tufões se afastam do arquipélago (inferior a 950 hPa, em superfície). A queda de pressão é inversamente proporcional à intensidade

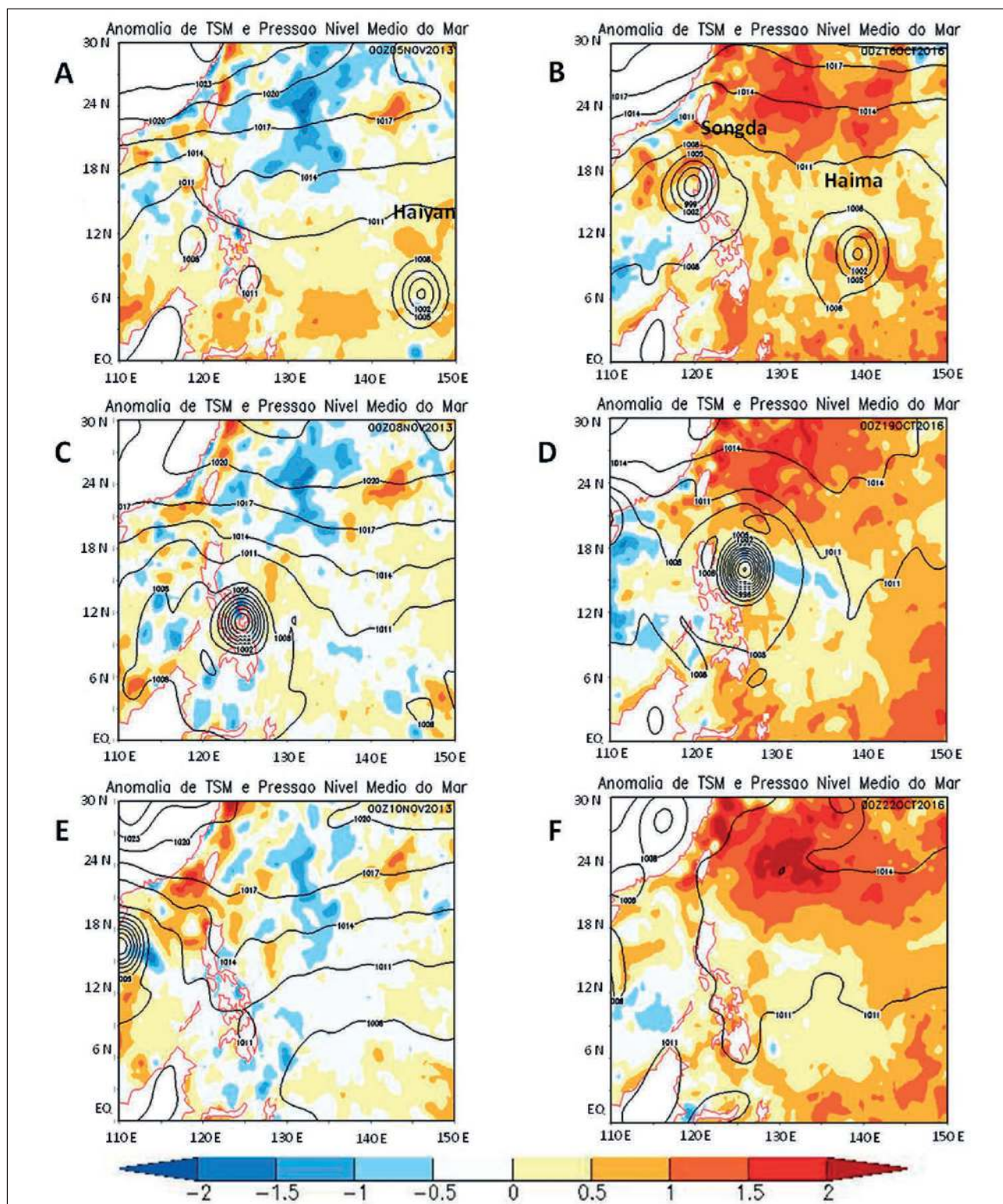


Figura 4 Anomalia de TSM (°C) em colorido e PNMM em linhas pretas (intervalos de 3 hPa). Contorno continental em vermelho (linhas sólidas). A frequência temporal das ilustrações corresponde aos horários sinóticos definidos na Tabela 3 (gênese, maturidade e dissipação). Os quadros A e B referem-se à gênese dos tufões Haiyan e Haima, respectivamente; os quadros C-D referem-se à fase de maturidade e os quadros E e F, de dissipação.

Tufões Haiyan e Haima: Características Durante a Formação, Maturação e Dissipação
 Bruna Andreлина Silva; Rayan Reis Miranda Leite & Michelle Simões Reboita

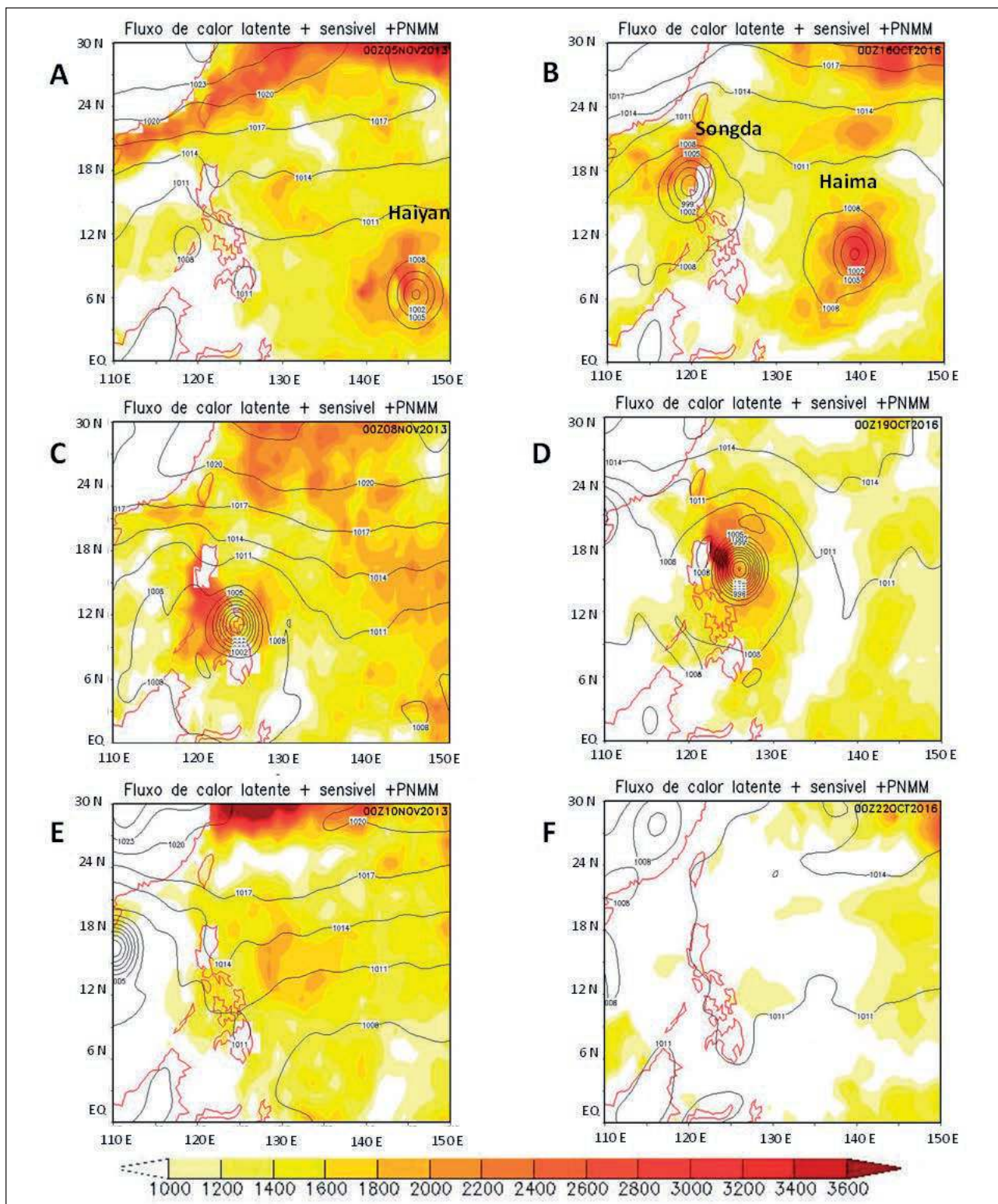


Figura 5 Fluxos de calor total (soma dos fluxos de calor latente e sensível; W/m^2) em colorido e PNMM (intervalos de 3 hPa) em linhas pretas. Contorno continental em vermelho (linhas sólidas). A frequência temporal das ilustrações corresponde aos horários sinóticos definidos na Tabela 3 (gênese, maturidade e dissipação). Os quadros A e B referem-se à gênese dos tufões Haiyan e Haima, respectivamente; os quadros C-D referem-se à fase de maturidade e os quadros E e F, de dissipação.

Tufões Haiyan e Haima: Características Durante a Formação, Maturação e Dissipação
 Bruna Andreina Silva; Rayan Reis Miranda Leite & Michelle Simões Reboita

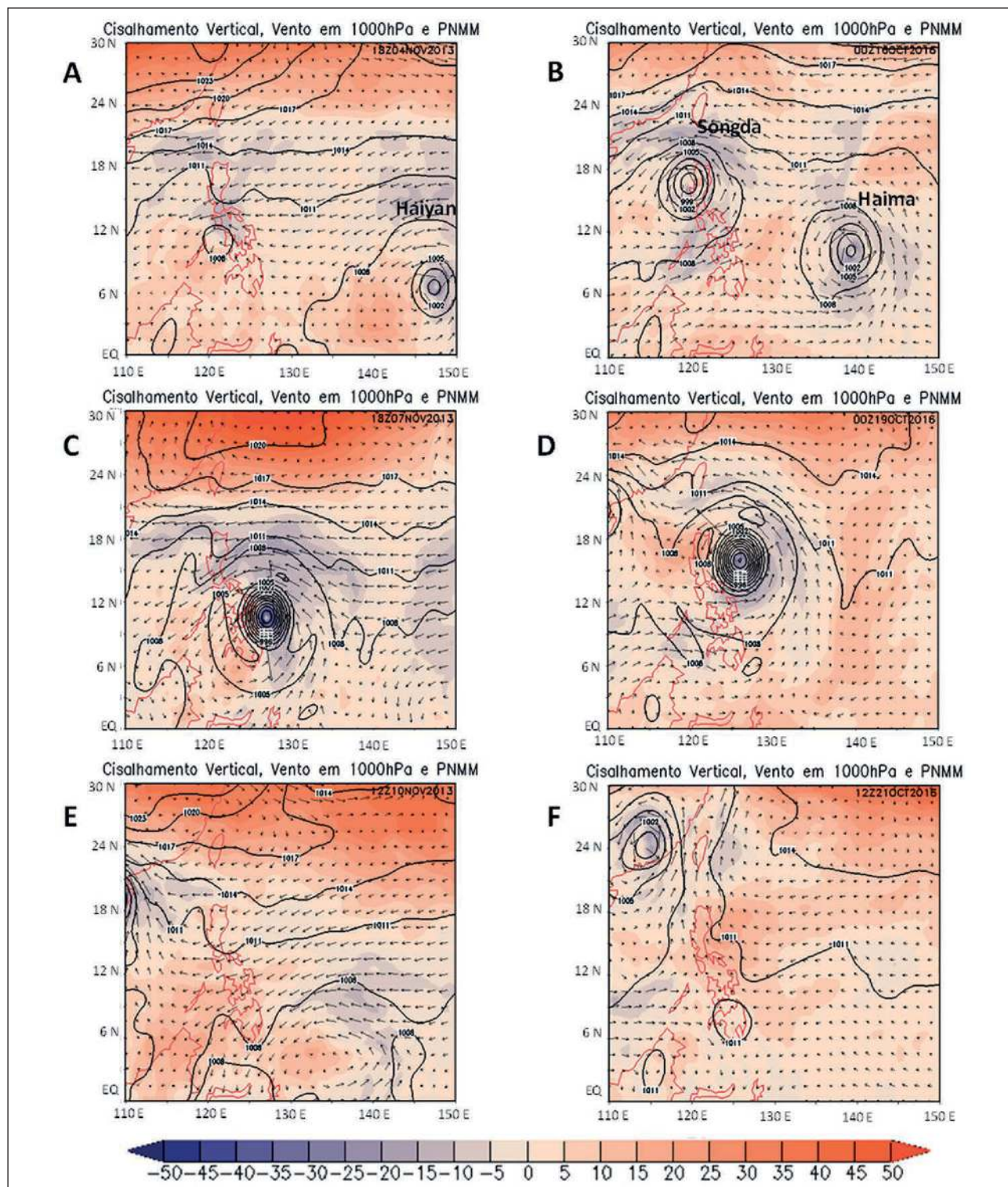


Figura 6 Cisalhamento vertical do vento (m/s) computado entre os níveis 250 hPa e 850 hPa em colorido, direção do vento no nível de 925 hPa em setas e PNMM (intervalo de 3 hPa) em linhas pretas. Contorno continental em vermelho (linhas sólidas). A frequência temporal das ilustrações corresponde aos horários sinóticos definidos na Tabela 3 (gênese, maturidade e dissipação). Os quadros A e B referem-se à gênese dos tufões Haiyan e Haima, respectivamente; os quadros C-D referem-se à fase de maturidade e os quadros E e F, de dissipação.

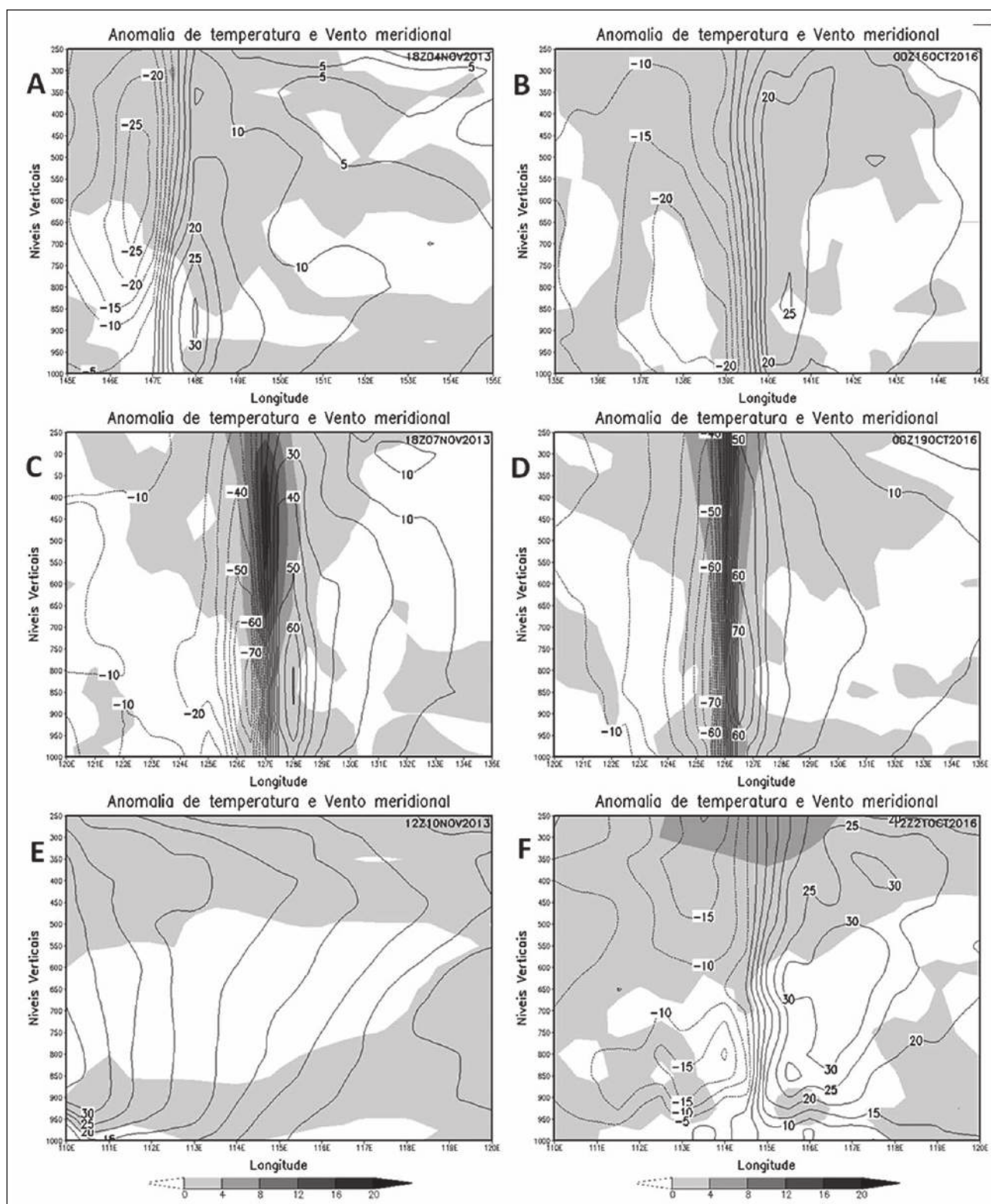


Figura 7 Perfil vertical de desvio zonal de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) em tons de cinza e componente meridional do vento (m/s) em linhas de contorno pretas. As linhas contínuas indicam o vento de sul e as linhas pontilhadas, o vento de norte. A frequência temporal das ilustrações corresponde aos horários sinóticos definidos na Tabela 3 (gênese, maturidade e dissipação). Os quadros A e B referem-se à gênese dos tufões Haiyan e Haima, respectivamente; os quadros C-D referem-se à fase de maturidade e os quadros E e F, de dissipação.

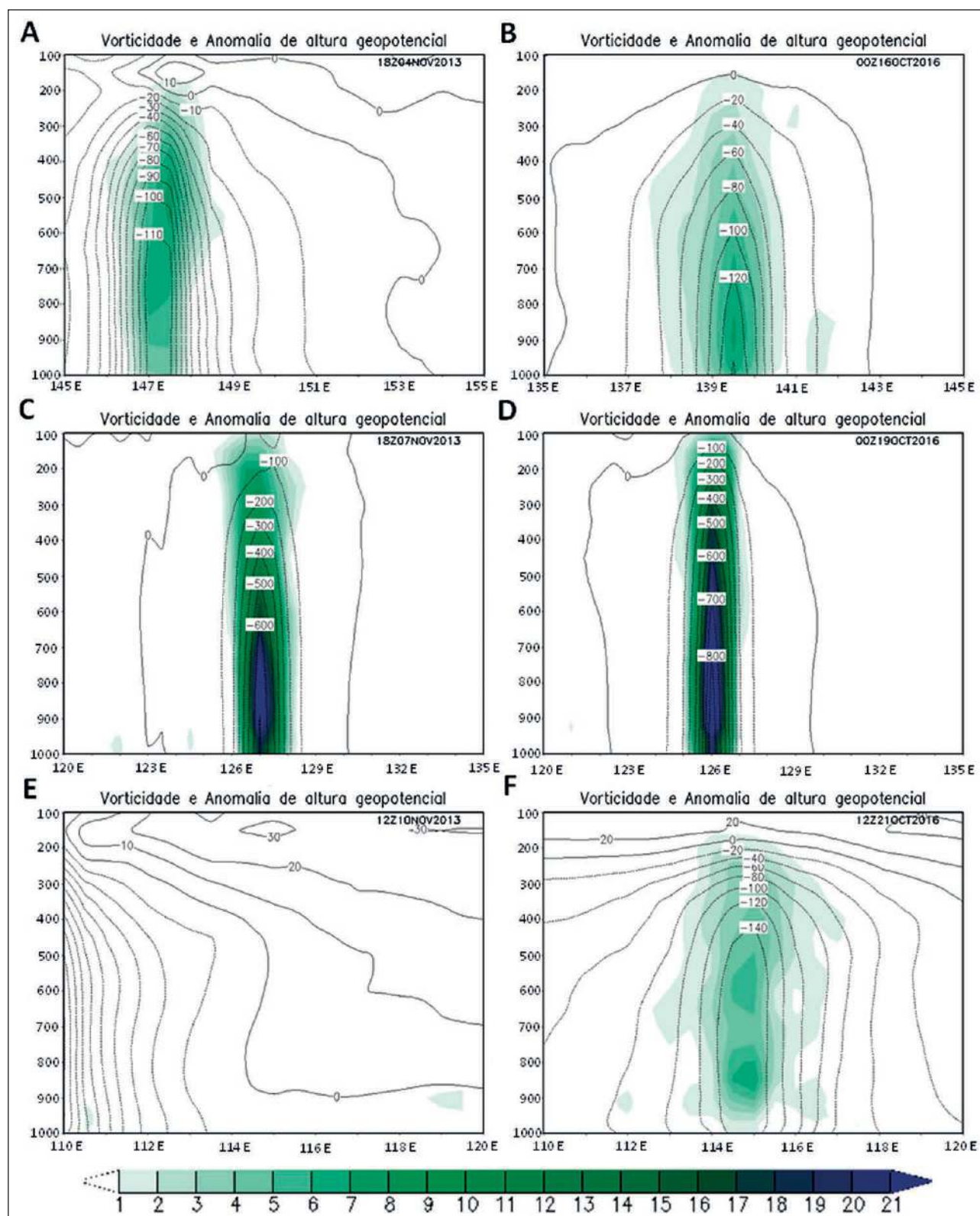


Figura 8 Perfil vertical do desvio zonal de altura geopotencial (m) em linhas sólidas pretas e vorticidade relativa ($\times 10^3 \text{ s}^{-1}$) em colorido. A frequência temporal das ilustrações corresponde aos horários sinóticos definidos na Tabela 3 (gênese, maturidade e dissipação). Os quadros A e B referem-se à gênese dos tufões Haiyan e Haima, respectivamente; os quadros C-D referem-se à fase de maturidade e os quadros E e F, de dissipação.

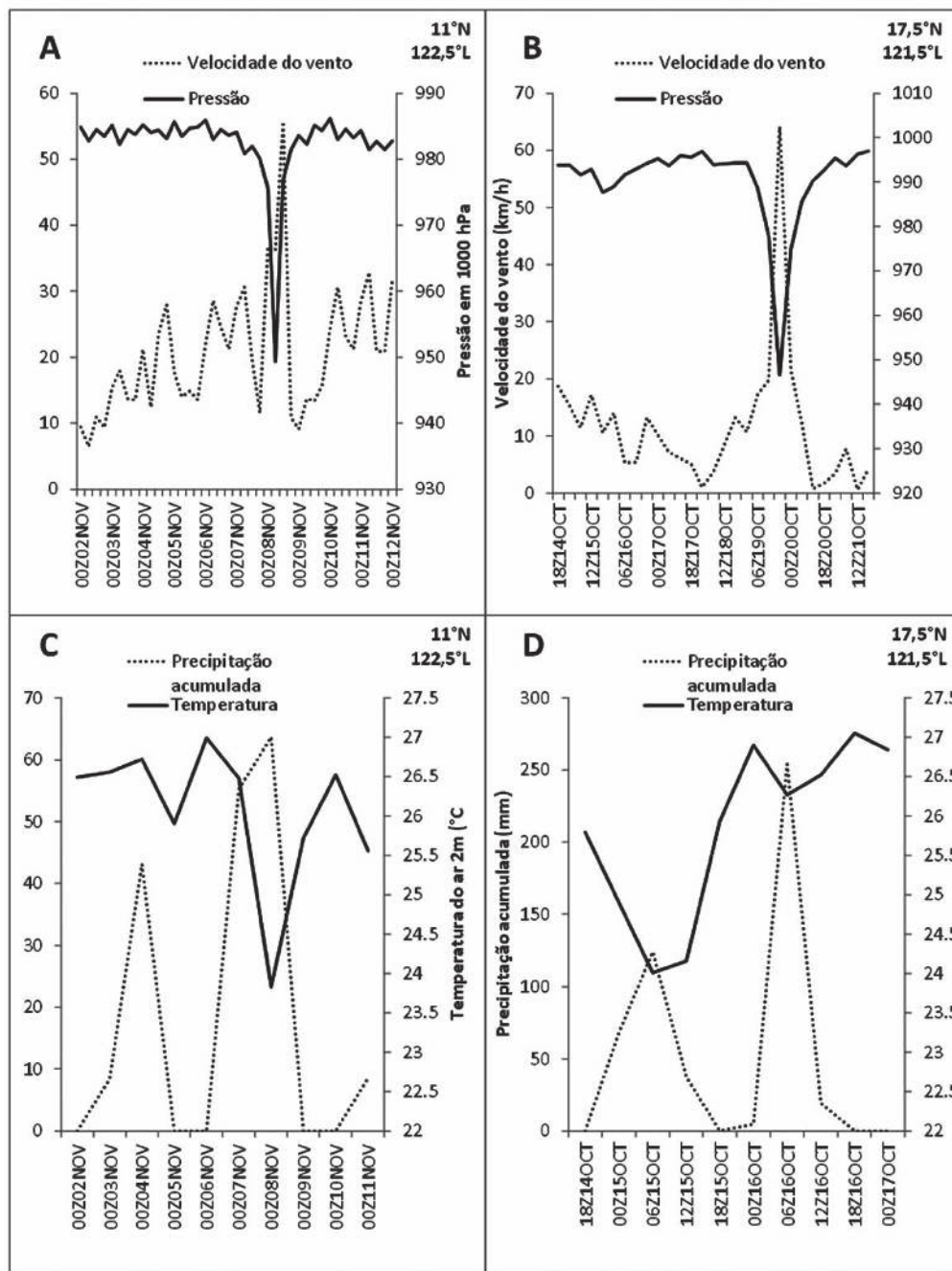


Figura 9 Quadros A e B: evolução temporal da pressão ao nível médio do mar e magnitude do vento (km/h) em 1000 hPa, do tufão Haiyan e Haima, respectivamente. Quadros C e D: evolução da temperatura do ar em 2 metros de altura e total de precipitação (mm/dia).

do vento em ambos os casos estudados; os ventos registrados alcançam velocidade de 55 e 65 km/h, no momento da passagem dos tufões Haiyan e Haima, respectivamente. Percebe-se, ainda, aumento no total pluviométrico e diminuição da temperatura do ar nos dias 07 de novembro de 2013 e 19 de outubro de 2016. O acumulado de chuva registrado na Figura 9D chega a 250 mm no dia 19 de outubro de

2016 e a queda da temperatura durante a passagem do tufão Haiyan é na ordem de 3°C (Figura 9C). A evolução das variáveis atmosféricas mostradas na Figura 9 concorda com a descrição encontrada na literatura (Oropeza e Raga, 2015; Lim *et al.*, 2015; Stull, 2017; NOAA, s/d).

4 Conclusões

Os ciclones tropicais Haiyan e Haima iniciaram como uma depressão e evoluíram até atingir a categoria de tufão (ventos com intensidade superior a 119 km/h). Neste estudo, foram realizadas duas análises: uma lagrangeana e outra euleriana. Na primeira, foi acompanhado o deslocamento dos tufões e descritas as características atmosféricas desses sistemas ao longo de três estágios do ciclo de vida (formação, maturidade e dissipação). Na segunda análise, fixou-se um ponto sobre o arquipélago das Filipinas e analisou-se o impacto dos tufões nas variáveis atmosféricas.

Com relação à análise lagrangeana, algumas similaridades entre o Haiyan e Haima foram:

- a gênese dos tufões ocorreu em regiões com anomalias positivas da TSM;
- fraco cisalhamento vertical do vento (valores negativos);
- fluxos turbulentos de calor latente e sensível elevados na região dos ciclones e
- nebulosidade bem organizada.

Em termos de diferenças, pode-se destacar a influência do tufão Songda, que ao deixar uma anomalia fria de TSM pode ter ajudado a enfraquecer o tufão Haima.

Na análise euleriana, a passagem dos tufões sobre as Filipinas causou alteração nas variáveis atmosféricas. Destaca-se aumento na velocidade do vento e precipitação e diminuição da temperatura do ar e pressão atmosférica. O tufão Haima causou maior impacto na precipitação, pressão em superfície e vento quando comparado ao impacto causado pelo tufão Haiyan. Já a temperatura a 2 metros, teve maior queda registrada em 7 de novembro de 2013, quando o tufão Haiyan passa pelo arquipélago.

Esse estudo indicou que a análise do GFS não mostra os tufões Haiyan e Haima atingindo a categoria 5 e que a intensidade dos ventos dessa análise é superior à da reanálise ERA-Interim; então sugere-se para trabalhos futuros uma comparação entre os diferentes conjuntos de dados (ERA-Interim, ERA-5, CFSR, QuikSCAT etc.) para verificar a performance

desses em representar a magnitude dos ventos dos ciclones tropicais. Para isso, também é necessário conseguir dados medidos *in situ*.

De modo geral, os campos atmosféricos descritos ao longo do estudo apresentaram resultados condizentes com a literatura (Anthes, 1982; Gray & Brody, 1967; Frank, 1977; Galvin, 2008; Reboita *et al.*, 2017a-b), nos quais os autores descrevem os processos de gênese e ciclo de vida de alguns ciclones tropicais. Por fim, ressalta-se que é de extrema importância conhecer/entender a estrutura física dos ciclones tropicais a fim de prognostica-los melhor.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem a NOAA por disponibilizarem os dados utilizados no estudo e ao CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

6 Referências

- Anthes, R.A. 1982. *Tropical Cyclones. Their Evolution, Structure and Effects*. Meteorological Monographs, American Meteorology Society, 208 p.
- Bister, M & Emanuel, K.A. 1998. Dissipative heating and hurricane intensity. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 65(3-4): 233-240.
- Chavas, D.R.; Reed, K.A. & Knaff, J.A. 2017. Physical understanding of the tropical cyclone wind-pressure relationship. *Nature communications*, 8(1): 1360.
- Chiao, S. & Jenkins, G.S. 2010. Numerical investigations on the formation of Tropical Storm Debby during NAMMA-06. *Weather and forecasting*, 25(3): 866-884.
- CNN, 2013. Super Typhoon Haiyan, one of strongest storms ever, hits central Philippines. Disponível em: <<http://edition.cnn.com/2013/11/07/world/asia/philippines-typhoon-haiyan/index.html>>. Acesso em 20 jun. 2017.
- D'Asaro, E.A.; Sanford, T.B.; Niiler, P.P. & Terril, E.J. 2007. Cold wake of hurricane Frances. *Geophysical Research Letters*, 34(15).
- Dec, D.P.; Uppala, S.M.; Simmons, A.J.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S.; Andrae, U.; Balmaseda, M.A.; Balsamo, G.; Baer, P.; Bechtold, P.; Beljaars, A.C.M.; van de Berg, L.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Delson, C.; Dragani, R.; Fuentes, M.; Geer, A.J.; Haimberger, L.; Healy, S.B.; Hersbach, H.; Hólm, E.V.; Isaksen, I.; Kallberg, P.; Köhler, M.; Matricardi, M.; McNally, A.P.; Monge-Sanz, B.M.; Morcrette, J.J.; Park, B.K.; Peubey, C.; de Rosnay, P.; Tavolato, C.; Thépaut, J.N. & Vitart, F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656): 553-597.
- Frank, W.M. 1977. The structure and energetics of the tropical cyclone I. Storm structure. *Monthly Weather Review*, 105(9): 1136-1150.
- Franklin, J.L.; Black, M.L. & Valde, K. 2003. GPS dropwind-

- sonde wind profiles in hurricanes and their operational implications. *Weather and Forecasting*, 18(1): 32-44.
- G1. 2013. Tufão haiyan chega ao Vietnã após mortes e destruição nas Filipinas. Disponível em: <<http://g1.globo.com/mundo/noticia/2013/11/tufao-haiyan-chega-ao-vietna-apos-mortes-e-destruicao-nas-filipinas.html>>. Acesso em: 03 jul. 2017.
- G1. 2016. Tufão Haima mata 12 nas Filipinas. Disponível em: <<http://g1.globo.com/mundo/noticia/2016/10/tufao-haima-mata-12-nas-filipinas.html>>. Acesso: 03 jun. 2017.
- Galvin, J.F.P. 2008. The weather and climate of the tropics: Parte 7- Tropical revolving storms. *Weather*, 63(11): 327-333.
- Giammanco, I.M.; Schroeder, J.L. & Powell, M.D. 2012. Observed characteristics of tropical cyclone vertical wind profiles. *Wind and Structures*, 15(1): 65.
- Gray, W.M. & Brody, L.R. 1967. *Global view of the origin of tropical disturbances and storms*. Colorado State University, Department of Atmospheric Science, 105 p.
- Gray, W.M. 1979. Hurricanes: Their Formation, Structure and Likely Role in the Tropical Circulation. In: SHAW, D.B. (ed.). *Meteorology over the Tropical Oceans*. Royal Meteorological Society, James Glaisher House, Grenville Place, Bracknell, p. 155-218.
- Hart, R.E. 2003. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Monthly Weather Review*, 131(4): 585-616.
- He, Y.C.; Chan, P.W. & Li, Q.S. 2016. Observations of vertical wind profiles of tropical cyclones at coastal areas. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 152: 1-14.
- Hong Kong Observatory, Super Typhoon Haima (1622) 14 to 22 October 2016. Disponível em: <<https://www.hko.gov.hk/informtc/haima16/report.htm>>. Acesso em 24 ago. 2018.
- Kidder, S.Q.; Goldberg, M.D.; Zehr, R.M.; DeMaria, M., Purdom, J.F., Velden, C.S., Grody, N.C. & Kusselson, S.J. 2000. Satellite Analysis of Tropical Cyclones Using the Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(6): 1241-1259.
- Lim, Y.K., Schubert, S.D., Reale, O., Lee, M.I., Molod, A.M., & Suarez, M.J. 2015. Sensitivity of tropical cyclones to parameterized convection in the NASA GEOS-5 model. *Journal of Climate*, 28(2): 551-573.
- Mashable, 2016. Super Typhoon Haima becomes Earth's seventh Category 5 storm of 2016. Disponível em: <<http://mashable.com/2016/10/18/super-typhoon-haima-philippines/#oww8..Fs.kqU>>. Acesso em: 20 ago. 2017.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). 2013. Haiyan (Northwestern Pacific Ocean). Disponível em: <<https://www.nasa.gov/content/goddard/haiyan-northwestern-pacific-ocean/>>. Acesso em: 20 ago. 2018.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). 2013. Hurricane Sandy (Atlantic Ocean). Disponível em: <https://www.nasa.gov/mission_pages/hurricanes/archives/2012/h2012_Sandy.html>. Acesso em: 26 ago. 2018.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). 2016. Haima (Northwest Pacific Ocean). Disponível em: <<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/haima-northwest-pacific-ocean>>. Acesso em: 20 ago. 2018.
- National Hurricane Center (NHC) s/d, Active Tropical Cyclones. Disponível em: <<http://www.nhc.noaa.gov/>>. Acesso em: 20 ago. 2017.
- National Hurricane Center (NHC) s/d, Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale. Disponível em: <<http://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php>>. Acesso em: 20 jun. 2017.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) s/d, *Hurricane Dynamics*. Disponível em: <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/hrd_sub/dynamics.html>. Acesso em: 20 ago. 2018.
- O Globo. 2013. Supertufão Haiyan pode ter sido o mais forte a atingir a Terra. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/mundo/supertufao-haiyan-pode-ter-sido-mais-forte-atingir-terra-0741480>>. Acesso em: 20 jun. 2017.
- O Globo. 2013. Tufão Haiyan atinge Vietnã após deixar 10 mil mortos nas Filipinas. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/mundo/tufao-haiyan-atinge-vietna-apos-deixar-10-mil-mortos-nas-filipinas-10742171>>. Acesso em: 30 jun. 2017.
- O Globo. 2013. Tufão Haiyan causa prejuízos de 14 bilhões nas Filipinas. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/mundo/tufao-haiyan-causa-prejuizos-de-us-14-bilhoes-nas-filipinas-10763284>>. Acesso em: 27 jun. 2017.
- Oropeza, F. & Raga, G.B. 2015. Rapid deepening of tropical cyclones in the northeastern Tropical Pacific: The relationship with oceanic eddies. *Atmosfera*, 28(1): 27-42.
- Reboita, M.S. 2008. *Ciclones extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação climática e experimentos de sensibilidade*. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 359p.
- Reboita, M.S.; Gan, M.A.; Rocha, R.P. & Custodio, I.S. 2017a. Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I. Revisão Bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32: 171-186.
- Reboita, M.S.; Gan, M.A.; Rocha, R.P. & Custodio, I.S. 2017b. Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte II. Estudo de Casos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32: 509-542.
- Sinclair, M.R. 1994. An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere. *Monthly Weather Review*, 122(10): 2239-2256.
- Shu, Z.R.; Li, Q.S.; He, Y.C. & Chan, P.W. 2017. Vertical wind profiles for typhoon, monsoon and thunderstorm winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 168: 190-199.
- Stull, R. 2017. *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science*. Vancouver, Canada. 926 p.
- Têso, J.M.C. 2006. Considerações sobre a tempestade tropical delta e influência na região autónoma da madeira. Disponível em: <https://www.ipma.pt/export/sites/ipma/bin/docs/relatorios/meteorologia/rm.int_tempestade.tropical.delta.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2017.
- Wallace, J.M. & Hobbs, P.V. 2006. *Atmospheric science: an introductory survey*. University of Washington. 487 p.
- Wang, Y. & Wu, C.C. 2004. Current understanding of tropical cyclone structure and intensity changes – a review. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 87(4): 257-278.