

Brenda Almeida Santos

**SITUAÇÕES METEOROLÓGICAS ASSOCIADAS A NEVOEIRO E
OPERAÇÃO COMBOIO NO SISTEMA ANCHIETA-IMIGRANTES**

São Paulo – SP

2022

Brenda Almeida Santos

SITUAÇÕES METEOROLÓGICAS ASSOCIADAS A NEVOEIRO E OPERAÇÃO COMBOIO NO SISTEMA ANCHIETA-IMIGRANTES

Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.

Dissertação apresentada ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências – Área de concentração: Meteorologia.

Orientadora: Dr^a Rita Yuri Ynoue

São Paulo – SP

2022

Brenda Almeida Santos

Situações meteorológicas associadas a nevoeiro e Operação Comboio no Sistema Anchieta-Imigrantes / Brenda Almeida Santos. – São Paulo, 2022 –

144 p.

Orientadora: Dr^a Rita Yuri Ynoue

Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração: Meteorologia) –
Universidade de São Paulo

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

Departamento de Ciências Atmosféricas, 2022.

Nevoeiro. 2. Operação Comboio. 3.Sistemas Meteorológicos.

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Ciências Atmosféricas

SITUAÇÕES METEOROLÓGICAS ASSOCIADAS A NEVOEIRO E OPERAÇÃO COMBOIO NO SISTEMA ANCHIETA-IMIGRANTES

elaborada por

Brenda Almeida Santos

Como requisito parcial para a obtenção do título de
Mestre em Ciências – Área de concentração: Meteorologia

Comissão Examinadora:

Prof^ª.Dr^ª Rita Yuri Ynoue
Universidade de São Paulo
Orientadora

Prof^ª. Dr^ª. Nisia Krusche
Universidade Federal do Rio Grande
Convidada 1

Prof^ª. Dr^ª Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Convidada 2

São Paulo – SP

2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado essa oportunidade, por ter me dado saúde, esperança, fé, sabedoria e bons amigos durante essa caminhada.

Aos meus pais Denizar (que veio a falecer durante esse curso) e Sildmeire e ao meu irmão Kevin pelos conselhos, compreensão, ajuda e incentivo desde criança e por não terem me deixado desistir de nada. Pelo carinho, amor e alegrias que me transmitiram. Ao meu marido e atual companheiro, Gabriel Marcatto, por todo apoio dado durante essa etapa, pelos conselhos, por me fazer sorrir e por ser um grande amigo.

A todas as escolas que passei desde o primário, em especial a Escola Estadual Barão do Rio Branco, onde passei a maior parte de minha vida escolar, onde fiz várias amizades e não só me preparei para entrar em um curso superior, como também me preparei para ser uma boa cidadã. A todos os professores meus sinceros agradecimentos.

Ao Cursinho Assistencial Amigos de Itajubá por ter me dado a oportunidade de me preparar melhor para o vestibular e a todos os professores que ali estavam de coração, de boa vontade em ensinar.

As amizades feitas durante a graduação, principalmente com o pessoal da turma de Ciências Atmosféricas de 2015 (UNIFEI) que sempre apoiaram/ajudaram um ao outro mantendo uma turma unida. A todos os professores que ministraram aulas para mim durante a graduação. Com certeza vocês tiveram muito a acrescentar não só em conhecimentos específicos, profissionais, mas também da vida. Aos projetos que participei ao longo deste período (ONG Amigos de Itajubá, Cia de Dança Corpo a Corpo e Forró de Segunda).

Aos meus orientadores de projetos que realizei até chegar aqui: Roger Rodrigues Torres (UNIFEI), Izabelly Carvalho da Costa (CPTEC-INPE), Renato Galante Negri (CPTEC-INPE) e Marcos Daisuke Oyama (IAE/CTA).

A minha orientadora e professora Rita Yuri Ynoue por ter aceitado me orientar desde começo do curso de mestrado sem ao menos me conhecer, pela receptividade, amizade, pelos conselhos, conhecimentos transmitidos, suporte, paciência, e correções ao longo dessa jornada. Ao corpo docente do Instituto de Ciências Atmosféricas IAG/USP por me instruir e aconselhar durante essa longa jornada do mestrado.

A todos colegas de curso, em especial a Camila e Melissa pelos momentos em que passamos juntas tanto no curso quanto morando juntas. Pelas amizades que fiz e cultivei durante o curso, que fizeram da vivência em São Paulo mais especial. Aos projetos de extensão Poli Dance e ForrIO por me darem a chance de expressar meus sentimentos através da dança, além de ser um horário de descontração na universidade, principalmente nos dias mais difíceis.

Meus sinceros agradecimentos a todos que aqui não foram citados, mas que de alguma forma estiveram presentes nos momentos mais importantes e decisivos de minha vida.

Agradeço a EM/IAG e ao LAbMicro pelos dados de meteorologia, à Ecovias por ceder os dados registrados em suas estações assim como por receber a minha orientadora e a mim na sede para nos apresentar um pouco mais sobre a OC e sua logística, à Marinha do Brasil e ao CPTEC-INPE pelas cartas sinóticas disponibilizadas, a REDEMET pelos dados de METAR e de radar disponíveis, a Universidade de Wyoming pela disponibilidade dos resultados de radiossondagens atmosféricas e ao ECMWF pelas reanálises do ERA-Interim e do ERA5, utilizados neste estudo. Além disso, agradeço ao suporte financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) que proporcionaram o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

Aos meus pais.

“Ser um campeão não é superar o outro, mas conseguir realizar
os seus talentos no nível mais alto de sua existência”
Roberto Shinyashiki

RESUMO

SITUAÇÕES METEOROLÓGICAS ASSOCIADAS A NEVOEIRO E OPERAÇÃO COMBOIO NO SISTEMA ANCHIETA-IMIGRANTES

AUTORA: BRENDA ALMEIDA SANTOS

ORIENTADORA: Dr^a RITA YURI YNOUE

Neste trabalho, foram feitas análises dos sistemas meteorológicos associados tanto aos nevoeiros da Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (EM/IAG) quanto daqueles que iniciaram as Operações Comboio (OC) no Sistema Anchieta-Imigrantes em 2015. Para isso foram utilizados dados de estações meteorológicas de Itutinga e da EM/IAG, registro de OC, dados de reanálises, METAR e radiossondagens, cartas sinóticas e imagens de radar e satélite. A maior parte dos nevoeiros da EM/IAG ocorre predominantemente no inverno e o número de dias com nevoeiro tem diminuído ao longo do tempo. Dos nevoeiros que ocorreram no inverno de 2007, 57% foram radiativos e 43% advectivos. A brisa marítima (BM) contribuiu com 43% dos nevoeiros radiativos e 14% dos nevoeiros advectivos. A Alta Pós-frontal (APF) contribuiu para 25% dos nevoeiros radiativos e 86% dos advectivos e a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) esteve presente em 32% dos nevoeiros radiativos. Em 2015, foram registrados 50 nevoeiros, 49 deles foram classificados como radiativos (44% devido à BM e 30% devido à APF). A OC ocorre em maior número na primavera e é mais frequente na Rodovia Anchieta quando comparada com a Rodovia dos Imigrantes. A partir de 2012, houve, em média, aproximadamente 568 OC na Rodovia Anchieta e 423 na dos Imigrantes. Há um maior número de OC iniciando à tarde, seguido do período da noite. Das 87 OCs estudadas para o ano de 2015, a BM contribuiu em 38% dos casos, seguida da APF, com 31%. Em geral, a umidade é fornecida por advecção de umidade da BM ou da APF e, por vezes, de algum sistema precipitante resultante da passagem de um sistema frontal ou de alguma instabilidade termodinâmica. A esse aporte de umidade se adiciona a diminuição de temperatura, causada pela entrada da BM, pelo ar pós-frontal ou mesmo pela perda de radiação noturna. Apesar de ser possível identificar o sistema meteorológico associado ao início da OC, nem sempre se consegue determinar o que de fato gerou o nevoeiro.

Palavras-chave: Nevoeiro. Operação Comboio. Sistemas Meteorológicos.

ABSTRACT

WEATHER CONDITIONS ASSOCIATED WITH FOG AND OPERAÇÃO COMBOIO IN THE ANCHIETA-IMIGRANTES SYSTEM

AUTHOR: BRENDA ALMEIDA SANTOS
TUTOR: Dr^a RITA YURI YNOUE

Meteorological systems associated with both the Meteorological Station of the Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences (EM/IAG) fog and those that started the Operações Comboio (OC) in the Anchieta-Imigrantes System in 2015 were investigated. For this, data from EM/IAG and Meteorological Station of Itutinga, OC record, reanalysis data, METAR, atmospheric soundings, synoptic charts and radar and satellite images were used. Most EM/IAG fog occurs predominantly in winter and the number of fog days has decreased over time. Of the fogs that occurred in the winter of 2007, 57% were radiative and 43% advective. The sea breeze (SB) contributed with 43% of the radiative fogs and 14% of the advective fogs. The Post-frontal High (PFH) contributed to 25% of the radiative fogs and 86% of the advectives and the South Atlantic subtropical high (SASH) was present in 32% of the radiative fogs. In 2015, 50 fogs were recorded, 49 of them were classified as radiative (44% due to SB and 30% due to PFH). OC occurs in greater numbers in the spring and is more frequent on Rodovia Anchieta when compared to Rodovia dos Imigrantes. From 2012, there were annually, on average, approximately 568 OCs on Rodovia Anchieta and 423 on Rodovia dos Imigrantes. There is a greater number of OC starting in the afternoon, followed by the night period. Of the 87 OCs studied for 2015, SB contributed in 38% of cases, followed by PFH, with 31%. In general, moisture is provided by advection by the SB or the PFH, and sometimes from a precipitating system resulting from the passage of a frontal system or from some thermodynamic instability. To this contribution of humidity is added the decrease in temperature, caused by the entrance of the SB, by the post-frontal air or even by the loss of nighttime radiation. Although it is possible to identify the meteorological system that start the OC, it is not always possible to determine what actually generated the fog.

Keywords: Fog. Operação Comboio. Weather Conditions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da evolução da brisa marítima e terrestre num período de 24 horas.....	11
Figura 2 - Esquema que ilustra uma situação típica de inverno na região costeira do estado de São Paulo.....	14
Figura 3 - Rodovia dos Imigrantes – trecho da serra.....	16
Figura 4 - Mapa hipsométrico da área de estudo com localização das rodovias, os pontos de bloqueio da OC.....	18
Figura 5 - Média e desvio padrão mensal dos dias com nevoeiro registrados na EM/IAG no período de 1981 a 2015.	24
Figura 6 – Cartas sinóticas de superfície às 09 HL (Reanálise Era-Interim) para os dias A) 02 e B) 03 de julho de 2007, com a pressão reduzida ao nível médio do mar (hPa linhas contínuas), espessura entre 1000 e 500 hPa (dam, linhas tracejadas) e vetor vento (com vetor referência de 20 m.s ⁻¹ no canto inferior esquerdo do gráfico).....	29
Figura 7 - Distribuição temporal das variáveis Temperatura (°C), Temperatura do ponto de orvalho (°C), velocidade do vento (m s ⁻¹) e Umidade Relativa (%) da EM/IAG e do ERA5 a 2 m e Divergência (*10 ⁻⁵ s ⁻¹) do ERA5 para o dia 02 de julho de 2007.	30
Figura 8 - Campos de temperatura a 2 m (°C, colorido) e vento a 10 m (m s ⁻¹ , vetor) do ERA5 para às 16 HL do dia A) 02 e B) 03 de julho de 2007.....	31
Figura 9 - Radiossondas do Aeroporto Campo de Marte do dia A) 02 de julho às 09 HL e B) 21 HL e C) dia 03 às 09 HL e D) 21 HL e E) dia 04 às 09 HL.	33
Figura 10 - Idem à Figura 7, mas para o dia 03 de julho de 2007.....	34
Figura 11 - Idem à Figura 7, mas para o dia 20 de julho de 2007.....	36
Figura 12 - Campos de temperatura (°C, colorido) e vento (m s ⁻¹ , vetor) às A) 07 e B) 13 HL do nevoeiro ocorrido no dia 20 de julho de 2007.....	37
Figura 13 - Cartas sinóticas de superfície (A), 850 hPa (B), 500 hPa (C) e 250hPa (D) para o dia 27 de julho de 2007 às 09 HL.	38
Figura 14 - Idem à figura 13, mas para o dia 28 de julho de 2007 às 09 HL.	40
Figura 15 - Idem à Figura 7, mas para o dia 27 de julho de 2007.....	42
Figura 16 - Campos de A) Temperatura (°C, colorido) e B) umidade relativa (% , colorido) e vento (m.s ⁻¹ , vetor) para o dia 27 de julho de 2007 às 19 HL.....	43
Figura 17 - Quantidade de comboios entre 2005-2018 na (A) Rod. Anchieta e Rod. dos Imigrantes e (B) Interligação Planalto.....	44
Figura 18 - Total anual de dias com nevoeiro na EM/IAG no período de 1981-2018..	46
Figura 19 - Climatologia mensal dos comboios entre 2002-2018 na Rod. Anchieta e Rod. Dos Imigrantes (A) e Interligação Planalto (B).	47

Figura 20 - Média mensal de dias com nevoeiro na EM/IAG no período de 1981-2018.	48
Figura 21 - Distribuição de eventos de OC iniciados em cada período do dia entre 2002 - 2018.	49
Figura 22 - Quantidade de comboios mensal para os anos de 2013(A), 2014(B), 2015(C), 2016(D), 2017(E) e 2018(F) na Rodovia Anchieta e dos Imigrantes.	50
Figura 23 - Acumulado mensal de OC no ano de 2015 nas Rod. Anchieta (azul) e Rod. dos Imigrantes (laranja).	52
Figura 24 - Acumulado mensal de dias com OC nas Rod. Anchieta (azul) e Rod. dos Imigrantes (laranja) no ano de 2015.	53
Figura 25 - Quantidade de dias com OC iniciados em cada período do dia em 2015...	53
Figura 26 - Sistemas meteorológicos associados a OC no ano de 2015.	54
Figura 27 - Sistemas meteorológicos que causaram o fenômeno de névoa/nevoeiro na EM/IAG no ano de 2015.	57
Figura 28 - Média horária da temperatura (°C) da EM/Itutinga para cada mês do ano de 2015 e para dias com OC.	58
Figura 29 - Média horária da umidade relativa (%) da EM/Itutinga para cada mês do ano de 2015 e para dias com OC.	59
Figura 30 - Média horária da umidade específica (g kg^{-1}) da EM/Itutinga para cada mês do ano de 2015 e para dias com OC.	60
Figura 31 - Média horária da precipitação (mm h^{-1}) da EM/Itutinga para cada mês do ano de 2015 e para dias com OC.	61
Figura 32 - Média horária da velocidade do vento (m s^{-1}) da EM/Itutinga para cada mês do ano de 2015 e para dias com OC.	62
Figura 33 – Rosa dos ventos para períodos de 6 horas da EM/Itutinga para o verão de 2015 e para dias com OC nessa estação do ano.	64
Figura 34 - Rosa dos ventos para períodos de 6 horas da EM/Itutinga para o outono de 2015 e para dias com OC nessa estação do ano.	65
Figura 35 - Rosa dos ventos para períodos de 6 horas da EM/Itutinga para o inverno de 2015 e para dias com OC nessa estação do ano.	66
Figura 36 - Rosa dos ventos para períodos de 6 horas da EM/Itutinga para o primavera de 2015 e para dias com OC nessa estação do ano.	67
Figura 37 - Cartas sinóticas de superfície das 09 e 15 HL do dia 21 de julho de 2015.	68
Figura 38 – Imagens de satélite do canal infravermelho realçado do satélite GOES-13, às A)13 HL e B)15 HL do dia 21 de julho de 2015.	70
Figura 39 - Distribuição temporal das variáveis Temperatura (°C) e velocidade do vento (ms^{-1}) da EM/Itutinga e do ERA5 a 2 m e Divergência ($\ast 10^{-5}\text{s}^{-1}$) e Temperatura do ponto	

de orvalho (°C) do ERA5 e Umidade Relativa (%) da EM/Itutinga para o dia 21 de julho de 2015. A linha tracejada na cor na cor preta (verde) representa a hora inicial e final do evento de OC registrado na RA (RI).	72
Figura 40 - Campos de Temperatura (°C, colorido) e vento (m s ⁻¹ , vetor), Temperatura do ponto de orvalho (°C, colorido) e vento (m s ⁻¹ , vetor) e Divergência (*10 ⁻⁵ s ⁻¹ , colorido) e vento (m s ⁻¹ , vetor) do ERA5 para às 07, 10, 13 e 16 HL do dia 21 de julho de 2015.	74
Figura 41 - Imagem da refletividade (dBZ) do radar de São Roque do dia 21 de julho de 2015, às 12 HL.....	76
Figura 42 - Cartas sinóticas de superfície do dia 19 de agosto de 2015 às A) 09 e B) 21 HL e C) Imagem de satélite do canal infravermelho realçado do satélite GOES-13, às 13:30 HL do dia 19 de agosto de 2015.....	77
Figura 43 - Idem à Figura 39, mas para o dia 19 de agosto de 2015.....	80
Figura 44 - Campos de Temperatura (°C, colorido) e vento (m s ⁻¹ , vetor), Temperatura do ponto de orvalho (°C, colorido) e vento (m s ⁻¹ , vetor) e Divergência (*10 ⁻⁵ s ⁻¹ , colorido) e vento (m s ⁻¹ , vetor) do ERA5 para às 15, 17, 18 e 20 HL do dia 19 de agosto de 2015.	81
Figura 45 - Cartas sinóticas de superfície do dia 13 de setembro de 2015 às A) 21 e 14 de setembro de 2015 às B) 09 HL.	84
Figura 46 - Imagens do satélite GOES-13 do canal infravermelho realçado A) 02 e D) 20 HL e do canal visível B)10 e C)16:30 HL do dia 14 de setembro de 2015.....	85
Figura 47 - Idem à Figura 39, mas para o dia 14 de setembro de 2015.	88
Figura 48 - Campos de Temperatura (°C, colorido) e vento (m s ⁻¹ , vetor), Temperatura do ponto de orvalho (°C, colorido) e vento (m s ⁻¹ , vetor) e Divergência (*10 ⁻⁵ s ⁻¹ , colorido) e vento (m s ⁻¹ , vetor) do ERA5 para às 02, 11, 15 e 20 HL do dia 14 de setembro de 2015.	89
Figura 49 - Imagem da refletividade (dBZ) do radar de São Roque do dia 14 de setembro de 2015, às 06 HL.....	91
Figura 50 – Imagem da refletividade (dBZ) do radar de São Roque do dia 14 de setembro de 2015, às 12 HL.....	92
Figura 51 - Cartas sinóticas de superfície das A) 21 do dia 20 de setembro de 2015 e B) 09 HL e imagem do satélite GOES-13 do canal visível às C)14 e D)16:30 HL do dia 21 de setembro de 2015.....	94
Figura 52 - Idem à Figura 39, mas para o dia 21 de setembro de 2015.	97
Figura 53 - Campos de Temperatura (°C, colorido) e vento (m s ⁻¹ , vetor), Temperatura do ponto de orvalho (°C, colorido) e vento (m s ⁻¹ , vetor) e Divergência (*10 ⁻⁵ s ⁻¹ , colorido) e vento (m s ⁻¹ , vetor) do ERA5 para às 11, 14, 17 e 20 HL do dia 21 de setembro de 2015.	99

Figura 54 - Cartas sinóticas de superfície às A) 00 e B) 09 HL e radiossondas do Aeroporto de Campo de Marte das A) 21 HL do dia 22 de novembro de 2015 e das B) 21 HL do dia 23 de novembro de 2015.	102
Figura 55 - Imagens do satélite GOES-13 do canal infravermelho realçado às A) 02:30 e às B)05:30 do dia 23 de novembro de 2015.	105
Figura 56 - Campos de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor), Temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor) e Divergência ($*10^{-5} \text{ s}^{-1}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor) do ERA5 para às 00, 03 e 06 HL do dia 23 de novembro de 2015.	106
Figura 57 - Campos de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor), Temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor) e Divergência ($*10^{-5} \text{ s}^{-1}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor) do ERA5 para às 09 e 11 HL do dia 23 de novembro de 2015.	109
Figura 58 - Imagens do satélite GOES-13 do canal infravermelho realçado A) 08:30 e B)10:30 HL do dia 23 de novembro de 2015.	110
Figura 59 - Idem à Figura 39, mas para o dia 23 de novembro de 2015.	111
Figura 60 - Imagens do satélite GOES-13 do canal infravermelho realçado A) 13:30 e B)18:30 HL do dia 23 de novembro de 2015.	112
Figura 61 - Campos de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor), Temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor) e Divergência ($*10^{-5} \text{ s}^{-1}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor) do ERA5 para às 14, 17 e 20 HL do dia 23 de novembro de 2015.	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de nevoeiro e suas características dados pela EM/IAG.....	19
Tabela 2 - Estações do estudo e sua localização.....	20
Tabela 3 - Casos de nevoeiros registrados pela EM/IAG no inverno de 2007 em Horal Local (UTC-3).	25
Tabela 4 - Resultados calculado para série de número total de dias com nevoeiros por ano na EM/IAG.	45
Tabela 5 - Dados da estação meteorológica de Itutinga para o dia 21 de julho de 2015.	71
Tabela 6 - Dados da estação meteorológica de Itutinga para o dia 19 de agosto de 2015.	79
Tabela 7 - Dados da estação meteorológica de Itutinga para o dia 14 de setembro de 2015.	87
Tabela 8 - Dados da estação meteorológica de Itutinga para o dia 21 de setembro de 2015.	96
Tabela 9 - Dados da estação meteorológica de Itutinga para o dia 23 de novembro de 2015.	104

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

APF Alta Pós Frontal

ARTESP Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transportes do Estado de São Paulo

ASAS Alta Subtropical do Atlântico Sul

BM Brisa marítima

CPTEC Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos

ECMWF *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

EM/IAG Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

EM/Itutinga Estação Meteorológica de Itutinga

ERA5 *ECMWF Reanalysis 5^a generation*

FF Frente Fria

HL Hora Local (= UTC – 3)

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LabMicro Laboratório de Micrometeorologia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo

METAR *Meteorological Aerodrome Report*

OC Operação Comboio

PPT Precipitação

RA Rodovia Anchieta

RI Rodovia dos Imigrantes

SAI Sistema Anchieta- Imigrantes

SC Sistema Convectivo

SCA Sistema de Controle Ambiental da Ecovias

TSM Temperatura da Superfície do Mar

UR Umidade Relativa

UTC *Coordinated Universal Time*

WMO *World Meteorological Organization*

ZCAS Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Tipos de nevoeiro	4
2.1.1 Nevoeiro Advectivo.....	4
2.1.2 Nevoeiro Radiativo	4
2.1.3 Nevoeiro orográfico	6
2.2 Sistemas Meteorológicos	6
2.2.1 Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS)	7
2.2.2 Frentes e altas pós-frontais (APF)	8
2.2.3 Brisa Marítima (BM)	10
2.2.4 Brisa vale-montanha	13
3 DADOS E METODOLOGIA	16
3.1 Área de estudo	16
3.2 Operação Comboio (OC).....	17
3.3 Dados	19
3.3.1 Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (EM/IAG)	19
3.3.2 Estação Meteorológica de Itutinga (EM/Itutinga)	20
3.3.3 Dados da Ecovias	20
3.3.4 Dados utilizados nas análises sinóticas	22
3.3.5 Dados utilizados nas análises de mesoescala	22
3.3.6 Dados de radiossonda e METAR	23
3.3.7 Imagens de satélite e radar	23
3.4. Critérios de identificação de sistemas meteorológicos	23
3.4.1. Brisa marítima (BM)	23
3.4.2. Frente	24
4 RESULTADOS E ANÁLISES	25
4.1 Climatologia dos nevoeiros na EM/IAG.....	25
4.1.2 Estudo de casos	29
4.2 Operação Comboio - OC.....	45
4.2.1 Operação Comboio em 2015.....	54
4.2.2 Névoas e nevoeiros na EM/IAG em 2015	58
4.2.3 Climatologia dos dados da Estação de Itutinga – EM/Itutinga	60
4.2.4 Estudos de caso de 2015	71

4.2.5 Conclusões dos estudos de caso de 2015.....	119
5 CONCLUSÕES	121
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
APÊNDICES	129
APÊNDICE A – Análise dos dados das estações meteorológicas da Ecovias	129
APÊNDICE B – Características meteorológicas associadas a OC em 2015.	133
APÊNDICE C – Quantidade de Operações Comboio no ano de 2015 para Rod. Anchieta e Rod. dos Imigrantes e sua diferença.	138
APÊNDICE D – Casos de névoas e nevoeiros registrados pela EM/IAG durante o ano de 2015 em Hora Local (UTC-3).	141
APÊNDICE E – Dados do METAR do aeroporto de Santos do dia 21 de julho de 2015.	144

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO

A ocorrência de nevoeiro afeta diretamente a sociedade. Sua presença provoca o fechamento de aeroportos, cais/portos e estradas, com a aplicação de medidas de segurança específicas para prevenir acidentes, atrasos e cancelamentos (Haeffelin *et al.* 2010). Os acidentes causados em condições de intensa névoa e chuva podem causar danos materiais, ser de grandes proporções e até mesmo fatais.

Tendo em vista a segurança de seus usuários, a Ecovias implementa a Operação Comboio (OC) “sempre que a visibilidade é prejudicada pela incidência de névoa, mais especificamente, quando o equipamento do Sistema de Controle Ambiental - SCA (composto por estações meteorológicas instaladas ao longo do Sistema Anchieta – Imigrantes (SAI), permitindo o monitoramento das condições de tempo) aponta uma visibilidade inferior a 100 metros.”¹ As Rodovias Anchieta e Imigrantes são duas das principais rodovias do Estado de São Paulo e fazem parte do SAI, administrado pela Concessionária Ecovias.

De acordo com o site da Ecovias, há, em média, cerca de 550 Operações Comboio (OC's) por ano (ocorrendo mais de uma vez por dia, em alguns dias, e em mais de uma rodovia) e muitos usuários costumam reclamar sobre esta implementação devido aos atrasos no trânsito que ela acarreta. Desta forma, o levantamento de situações meteorológicas que levam à implementação da OC é fundamental tanto para aumentar a segurança nas rodovias associadas quanto para diminuir a insatisfação dos motoristas.

Assim, o objetivo deste estudo consiste na identificação dos sistemas meteorológicos associados à formação da névoa/nevoeiro que inicia estas OC's no Sistema Anchieta-Imigrantes.

Para isso, foram solicitados dados das estações meteorológicas do SCA da Ecovias. Enquanto esses dados não eram disponibilizados (foram solicitados em 22 de fevereiro e entregues em 29 de outubro de 2019), optou-se por fazer estudos com as observações da estação meteorológica do IAG/USP (EM-IAG).

Assim, este trabalho começa com a análise das condições meteorológicas associadas a nevoeiro na EM-IAG e prossegue com a análise dos dados da Ecovias. Apesar de uma grande cobertura espacial (10 estações meteorológicas) e temporal (de

¹<https://www.ecovias.com.br/atendimento/duvidas> - Por que é feita a operação comboio

01/11/2004 a 30/11/2018) das estações da SCA-Ecovias, havia muitas falhas na coleta de dados, bem como frequentes valores questionáveis nas séries temporais de cada uma das estações. Isso levou à decisão de não trabalhar com os dados meteorológicos coletados pela Ecovias, mas aproveitar os dados (horário de início e término) sobre as implementações de cada uma das OC's entre os anos de 2002 e 2018.

As condições meteorológicas foram caracterizadas inicialmente através de análises sinóticas e de meso-escala, entretanto, ainda era necessário um dado mais local. Essa necessidade foi suprida pela estação meteorológica de Itutinga para o ano de 2015 (disponibilizada em outubro de 2020 pelo Grupo de Micrometeorologia do IAG-USP).

O número de OC's a serem realizadas devem levar em conta não apenas os sistemas meteorológicos mas também outros fatores como, por exemplo, a disponibilidade de pessoal, preço de combustível, o trânsito, volume do tráfego – que em feriados sobe de forma expressiva e varia dependendo da época de safra - acidentes, fechamento de vias, entre outros.

Desta forma, este trabalho apresenta no seu próximo capítulo uma revisão bibliográfica sobre os principais tipos de nevoeiro e os sistemas meteorológicos associados à sua formação. No capítulo 3 são descritos os dados utilizados bem como os critérios adotados na classificação dos sistemas meteorológicos com relação aos nevoeiros na EM-IAG e ao fenômeno causador das OC's. No capítulo 4 são mostrados os resultados de cada etapa: inicialmente com relação às condições meteorológicas de nevoeiros na EM-IAG, depois com relação aos dados da Ecovias e, por fim, com o uso de mapas criados a partir das reanálises da 5ª geração do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) – ERA5 em conjunto com as informações da estação meteorológica de Itutinga, finalizando com a compilação dos sistemas meteorológicos causadores das OC's e estudo de alguns casos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A névoa úmida ou bruma e o nevoeiro são fenômenos atmosféricos que se formam próximo ou junto à superfície terrestre e são constituídos de gotículas de água ou cristais de gelo suspensos na atmosfera. Estes fenômenos formam-se quando o vapor de água condensa, a temperatura do ar e a temperatura do ponto de orvalho se aproximam. Isso pode ocorrer tanto pela diminuição da temperatura do ar quanto pelo aumento de umidade. A diferença entre névoa/bruma e nevoeiro está relacionada com a extensão da visibilidade horizontal - definida pela maior distância na qual um objeto pode ser visto e identificado (WMO, 2010). Tanto a névoa quanto o nevoeiro reduzem a visibilidade horizontal, entretanto, o nevoeiro é mais denso, reduzindo a visibilidade a menos de um quilômetro e pode ser considerado como uma nuvem do tipo Stratus (St), ao passo que a névoa é menos densa, e a visibilidade horizontal é maior que um quilômetro (WMO, 2010; CPTEC, 2020). Neste trabalho serão usadas as denominações de névoa e nevoeiro.

Os nevoeiros são comumente observados por todo o Brasil (exceto na Região Nordeste, onde são raros). Da Silva (2018) realizou um estudo sobre os nevoeiros no Brasil utilizando dados de observações de superfície em aeroportos, imagens de satélite e o modelo PAFOG. A análise de persistência do nevoeiro mostrou que a duração do nevoeiro aumenta de latitudes mais baixas para latitudes mais altas. Os dados das radiossondas revelaram que os nevoeiros foram, na maior parte das vezes, precedidos por uma inversão de temperatura ou isoterma (87%) e a análise temporal mostrou que as primeiras centenas de metros acima da superfície se tornaram mais frias e úmidas. Também foi encontrado, na análise do primeiro nível da radiossonda, um aumento na frequência de nevoeiros mais frios e camadas de inversões mais fortes com base na superfície nas estações de outono-inverno. Além disso, a detecção por satélite revelou que nuvens baixas foram mais frequentemente observadas na costa leste do Brasil.

Durante o dia, um fator que favorece a formação e manutenção do nevoeiro é o menor aquecimento da superfície, que pode ocorrer na presença de nuvens baixas, médias e altas que reduzem a radiação solar incidente no solo, reduzindo a turbulência na camada de mistura e mantendo a umidade relativa mais alta nas camadas inferiores do nevoeiro (França, 2008).

Existem vários tipos de nevoeiros que são classificados de acordo com a região geográfica na qual se estabelecem, o sistema sinótico que os induzem e os seus processos

de evolução (Croft *et al.*, 1997). Os nevoeiros identificados neste estudo são descritos a seguir.

2.1. Tipos de nevoeiro

2.1.1 Nevoeiro Advectivo

Ocorre quando há deslocamento de uma massa de ar relativamente quente e úmida sobre uma superfície mais fria. Assim, esse ar se resfria por contato ou por mistura com

o ar mais frio até chegar à temperatura do ponto de orvalho. Nesse caso, uma certa quantidade de turbulência é necessária para um maior desenvolvimento do nevoeiro facilitando o resfriamento de uma camada mais profunda de ar, levando o nevoeiro para maiores alturas (Willet, 1928). O manual de técnicas de previsão da força aérea de Nebraska (EUA) relata que ventos acima de 9 nós ($4,6 \text{ m s}^{-1}$) normalmente causam dissipação desse nevoeiro (Reymann *et al.*, 1998).

Gomes *et al.* (2012) simularam um nevoeiro de advecção para o porto da cidade de Rio Grande (RS), no dia 1 de julho de 2010, com um modelo numérico de mesoescala com 2 grades aninhadas (uma com espaçamento de 30 km e outra de 10 km). Na simulação, houve a formação de nevoeiro no local esperado, com gradiente de temperatura de aproximadamente $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ entre a superfície do mar e a temperatura do ar, ventos fortes de norte paralelos à costa, característico de nevoeiro de advecção, com mais de 24 horas de antecedência ao evento.

Liu *et al.* (2016) estudaram o nevoeiro advectivo que ocorreu na cidade de Delta do Rio Yangtzé (China) entre os dias 1 e 2 de dezembro de 2009. Eles encontraram que este nevoeiro de longa duração foi gerado pela interação entre a advecção fria de nordeste numa camada inferior e advecção quente e úmida de sudeste numa camada superior. A região de estudo estava ao sul do sistema de alta pressão em superfície, que se movia para sudeste, com ventos de nordeste, o que promoveu a formação e sustentação do nevoeiro. A altitude do topo do nevoeiro foi superior a 600 m na maior parte do tempo, e o nevoeiro reduziu a visibilidade para menos de 100 m por aproximadamente 12 horas.

2.1.2 Nevoeiro Radiativo

Ocorre em noites com céu limpo² (sem ou pouca nebulosidade), ventos fracos ou ausentes e com alta umidade relativa. Esta ausência de nebulosidade e os ventos calmos favorecem o resfriamento da camada de ar próximo à superfície por perda de radiação de

onda longa, que pode ser acompanhada de uma inversão térmica. Em uma atmosfera com umidade suficiente, este resfriamento leva à saturação do ar fazendo com que o vapor d'água presente comece a condensar, formando o nevoeiro (Willet, 1928).

Lima (1983) caracterizou as condições meteorológicas necessárias à ocorrência de nevoeiros de radiação em Porto Alegre, onde tal fenômeno ocorre devido a condições de estagnação atmosférica, semelhantes às que ocorrem em episódios de alta concentração de poluentes. Estes nevoeiros são mais frequentes no inverno, quando há maior ocorrência de inversão de temperatura por perda radiativa à noite, com ventos fracos próximos a superfície e umidade suficiente para permitir condensação.

Também em Porto Alegre, Piva e Fedorova (1999) estudaram 11 casos de nevoeiro de radiação ocorridos no período de janeiro de 1995 a abril de 1996. Seus resultados mostraram que 8 deles (72,7%) ocorreram no outono, e que sua formação estava associada a um anticiclone com intensidade moderada (1020 a 1030 hPa). Eles observaram também que a duração dos nevoeiros foi grande (12 horas em média) e que o nevoeiro de radiação se dissipa entre 1-4 horas após o nascer do sol.

Liu *et al.* (2011) estudaram a parte macro/microfísica de um evento de nevoeiro radiativo muito denso que ocorreu em Nanjing (China) durante 10-11 de dezembro de 2007. Este evento de nevoeiro foi marcado pela rápida evolução que ocorreu após o nascer do sol, quando a evaporação da superfície aumentada e a intrusão de ar frio levaram a um aumento de três ordens de magnitude no teor de água líquida em apenas 20 minutos. Sinoticamente, este evento foi marcado por uma zona de alta pressão. O diâmetro máximo de gota aumentou quatro vezes durante o mesmo período. A estrutura de névoa era de duas camadas, com os topos da camada superficial e da camada superior caracterizados por fortes inversões de temperatura e umidade, e jatos de baixos níveis existiam na camada limite acima de cada camada do nevoeiro. A intensidade da turbulência, a energia cinética turbulenta e a velocidade de atrito diferiram notavelmente de fase para fase (formação, desenvolvimento e dissipação).

Uma simulação para avaliar o impacto da resolução horizontal do modelo RegCM3 (*Regional Climate Model* versão 3) para reproduzir características do nevoeiro na Região Metropolitana de São Paulo, foi realizado por Da Rocha *et al.* (2015). Foram utilizadas resoluções horizontais de 50 km (R50) e 20 km (R20) para os invernos austrais de 2003 e 2004, de junho a setembro. As simulações são comparadas com análises em

²O termo “céu limpo”, neste trabalho, se refere a céu sem nuvens, mas não está relacionado à qualidade do ar.

grade e observações de estações. Tanto a R20 quanto a R50 foram capazes de simular a frequência de eventos de névoa semelhante às observadas durante este período, com superestimação dos dados abaixo de 10%. Em relação à característica do nevoeiro, algumas de suas conclusões foram que: (1) as estações localizadas nos vales apresentam maior frequência de eventos de nevoeiro do que nas áreas costeiras; (2) os erros das variáveis atmosféricas durante os eventos de nevoeiro são claramente menores do que para todo o período JJAS e (3) o padrão sinótico durante o evento de névoa pode ser claramente caracterizado pela simulação R20 – presença de um sistema de alta pressão associado a um alto grau de umidade específica.

Price (2019) estudou o nevoeiro radiativo com dados de seis locais no Reino Unido (5 em Shropshire e 1 em Bedfordshire). Ele constatou que durante a noite, em condições de céu limpo, o nevoeiro de radiação termicamente estável só se forma quando a variância da velocidade vertical (ω'^2 doravante denotado σ_w^2) perto do solo (a 2 m) diminui para 0,002 - 0,005 $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ou menos. Quando a variação da velocidade vertical excede esses valores o nevoeiro se dissipa, podendo ainda ocorrer a saturação próximo ao solo, mas a formação de nevoeiro é inibida devido ao transporte mais eficiente da umidade para o solo na forma de orvalho.

2.1.3 Nevoeiro orográfico

Ocorre quando o ar é forçado a subir uma região elevada, como por exemplo, uma montanha. Conforme ele vai subindo, se expande e resfria. Se o ar for úmido o suficiente e ocorrer a saturação, pode haver a formação de nevoeiro.

2.2 Sistemas Meteorológicos

A formação de nevoeiro está associada a diferentes situações sinóticas. Geralmente, quando São Paulo está sob o domínio de uma alta pressão (Alta Subtropical do Atlântico Sul ou alta pós-frontal) há condições favoráveis para a formação de nevoeiro. Nestas condições sinóticas, também ocorre a circulação de meso-escala de brisas (marítima-terrestre e de vale-montanha). Os sistemas frontais, por sua vez, contribuem com condições favoráveis à chuva, que aumenta a disponibilidade de umidade e, associada ao resfriamento pela entrada de um ar mais frio, também pode propiciar nevoeiros.

2.2.1 Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS)

As Altas Subtropicais são sistemas de alta pressão localizados em torno de 30 graus de latitude nos principais oceanos. Elas estão associadas à circulação média meridional da atmosfera, surgindo devido a quebra da célula de Hadley. No Atlântico Sul, a ASAS afeta o clima do Brasil tanto no inverno como no verão.

No inverno, a ASAS se torna mais intensa e inibe a entrada de frentes, causa inversão térmica com base mais próxima à superfície e aumenta a concentração de poluentes nos principais centros urbanos e nas proximidades do litoral das regiões sudeste e sul do Brasil, ocasionando problemas de saúde e de meio ambiente (Kodama, 1992; Quadro, 1994; Bastos e Ferreira, 2000). Pelo fato do continente estar mais frio que o oceano, a ASAS tende a se aproximar do continente, deixando o vento consideravelmente fraco na Região Sul/Sudeste. Esses fatores são propícios a formações de nevoeiros de radiação, inversões térmicas e geadas, prejudicando a agricultura e a população nessas regiões.

Durante o período de verão, os ventos de superfície associados a ASAS enfraquecem à medida que se aproximam do continente. O transporte de umidade nos baixos níveis troposféricos ao longo da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Kodama, 1992; Quadro, 1994) é afetado pela circulação associada a ASAS, pois ao longo do litoral da Região Sudeste os ventos predominantes são de NE favorecendo o transporte de umidade do Oceano Atlântico equatorial para o ramo oceânico da ZCAS (Bastos e Ferreira, 2000).

Reboita *et al.* (2010) revisaram os sistemas atmosféricos que atuam nos diferentes setores do continente sul-americano e que contribuem para a precipitação. Na revisão sobre a Região Sudeste do Brasil, identificaram que a baixa precipitação, nessa região no inverno, é devido à ASAS que se posiciona mais a oeste, atingindo a Região Sudeste do Brasil. Dessa forma, eventos de chuva ocorrem quando os sistemas frontais e ciclones subtropicais e extratropicais conseguem se sobrepor à ASAS. Sistemas como linhas de instabilidade pré-frontais, frentes, complexos convectivo de mesoescala (CCMs), bloqueios atmosféricos e brisas também atuam nessa região, durante a atuação da ASAS.

2.2.2 Frentes e altas pós-frontais (APF)

Os sistemas frontais são sistemas de grande escala muitas vezes associados a ciclones extratropicais. A passagem de uma frente fria num determinado local está associada às seguintes características: mudança da direção do vento, presença de nuvens e precipitação, variações no conteúdo de umidade, decréscimo da temperatura, aumento da pressão atmosférica, forte cisalhamento vertical e horizontal (Petterssen, 1956, Wallace e Hobbs, 1977).

As frentes frias (FF) estão presentes no litoral brasileiro durante todo o ano trazendo, desde seu processo de formação, mudanças nas variáveis meteorológicas observadas principalmente no sul e sudeste do Brasil (Kousky, 1979 e Satyamurty *et al.*, 1998). Durante o inverno, esses sistemas que são acompanhados de massas de ar de latitudes altas (altas pós-frontais -APF) que, muitas vezes, causam geadas no Sudeste e Sul do Brasil. Eventualmente, as FF alcançam latitudes muito baixas sobre o oeste da Amazônia e também ao longo da costa nordeste do Brasil, fenômeno conhecido como friagem (Hamilton e Tarifa, 1978).

Na América do Sul, Satyamurty e Mattos (1989) identificaram a região centro-sul do continente, localizada entre os dois anticiclones subtropicais, do Pacífico e Atlântico Sul, como altamente frontogenética (favorável à formação e intensificação de frentes). O desenvolvimento da zona frontal é verificado em associação aos distúrbios baroclínicos provenientes do Pacífico, que atravessam os Andes em latitudes médias.

As FF que percorrem o litoral da América do Sul são, tipicamente, configuradas na direção noroeste-sudeste e apresentam uma trajetória de sudoeste para nordeste e atingem latitudes em torno de 20°S, onde tem início seu processo de dissipação, conhecido como frontólise (Oliveira, 1986; Satyamurty e Mattos, 1989; Cavalcanti e Kousky, 1996).

Segundo Oliveira (1986), as FF que ultrapassam latitude em torno de 35°S podem adquirir uma trajetória mais meridional, em direção ao Equador, mas os sistemas que atravessam a costa leste da América do Sul em latitudes ao sul de 40°S, apresentam uma trajetória predominantemente zonal.

No litoral do Sudeste do Brasil, ocorre um número de sistemas frontais relativamente maior em meses de inverno, quando comparado ao período de verão, como encontrado por Taljaard (1972), um dos estudos pioneiros sobre a climatologia de FF no

Hemisfério Sul, que apresentou a distribuição das frentes em superfície durante o ano de 1958 e posteriormente confirmado por Oliveira (1986), Lemos e Calbete (1996) e Justi da Silva e Silva Dias (2000, 2002). O maior tempo de permanência dos sistemas, no entanto, foi observado nos meses de verão, em associação à atividade da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Satyamurty *et al.*, 1998).

Durante o verão, as FF frequentemente se posicionam ao longo da costa do Brasil, entre São Paulo e Bahia, na região da posição climatológica da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), originando períodos prolongados de chuva forte, algumas vezes com ocorrência de inundações e prejuízos materiais e humanos na região.

Nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, Justi da Silva e Silva Dias (2002) identificaram que ventos de nordeste predominam em baixos níveis devido à influência da ASAS. Já em uma situação pré-frontal, o vento é tipicamente de noroeste, depois gira para sudoeste e, posteriormente, sudeste, à medida que a frente se desloca. As autoras também identificaram maior frequência de frentes no litoral e em torno da latitude de 30 °S.

Os nevoeiros associados a sistemas frontais podem ocorrer devido à condição pré-frontal (aproximação de frente), pós-frontal (associada à APF) ou durante a passagem de um sistema frontal. Caso a frente esteja associada à precipitação, pode ocorrer nevoeiro de precipitação, pois, quando a chuva cai sobre o ar mais seco, a gotícula evapora aumentando a umidade e favorecendo a formação temporária de nevoeiros.

As características sinóticas associadas a incursões de ar frio, que seguem a passagem de FF sobre a região subtropical da América do Sul, incluem: 1) uma crista amplificada nos níveis médios da troposfera e anticiclone em superfície sobre o Pacífico Sul Leste; 2) um cavado nos níveis médios da troposfera, em intensificação sobre a região central da Argentina. O avanço para norte/nordeste do ar frio e do anticiclone em superfície é propiciado pela intensificação do escoamento de sul na média troposfera a leste dos Andes, gerado por essa configuração.

Os sistemas de alta pressão migratórios são importantes por serem fontes de ar frio no inverno (Sinclair, 1996), gerando movimento subsidente, desfavorecendo a formação de nuvens e, portanto, influenciando a perda radiativa que atua de forma a estabilizar a atmosfera em baixos níveis. Estas condições são favoráveis para formação de nevoeiros por radiação. Além disso, na costa dos estados do SE e S do Brasil, os ventos

da APF, muitas vezes, advectam umidade do oceano para dentro do continente, contribuindo assim para a formação do nevoeiro por advecção. Dependendo da configuração do escoamento da escala sinótica, este pode inibir ou favorecer a penetração da brisa marítima (Perez e Silva Dias, 2017). Oliveira (1998) realizou a classificação sinótica para os dias com nevoeiro e dias anteriores em Pelotas RS, com o uso de imagens de satélite e dados sinóticos convencionais no período de 1995-1996, e identificou que as temperaturas médias do ar do dia anterior foram maior ou igual do que no dia de nevoeiro nos casos com ciclones associados a FF.

Segundo Scola (1994), que realizou um estudo sobre ciclo diurno da temperatura com modelo de camada limite planetária, a formação mais comum do nevoeiro na região central do estado de São Paulo é caracterizada pela passagem de um sistema frontal com precipitação que umedece o ar atmosférico próximo à superfície.

2.2.3 Brisa Marítima (BM)

As brisas marítimas e terrestres são um tipo de circulação térmica de meso-escala. As circulações termicamente forçadas correspondem aos efeitos produzidos por aquecimento diferenciado entre duas superfícies vizinhas. Este contraste térmico pode ser devido a vários fatores, tais como as diferenças no tipo de ocupação do solo como vegetação, solo nu ou urbanização, que irá gerar um fluxo de energia diferente para a atmosfera causando gradientes de pressão em níveis acima, os quais impulsionam o movimento. Este fenômeno de mesoescala é denominado brisa (Atkinson, 1981; Freitas, 2003).

As desigualdades nas taxas de aquecimento da terra e do mar causam um sistema de ventos costeiros, o qual é raso na atmosfera, geralmente confinados nas primeiras camadas da troposfera (Simpson, 1994). Em geral, a BM inicia por volta das 09 HL (hora local), ficando bem estabelecida às 12 HL e a brisa terrestre às 24 HL (Pielke, 1981).

Durante o dia, a temperatura da terra se eleva mais rapidamente que a da água. Isso acontece porque o calor específico da água é maior que o da terra em decorrência disso, quando exposta a uma mesma intensidade de radiação solar, a superfície da terra aquece mais rapidamente que a superfície de água. Assim, as camadas de ar que estão em contato com a superfície terrestre se aquecem mais rapidamente, diminuindo sua densidade e gerando uma diminuição da pressão atmosférica neste local. Sobre o oceano, o ar encontra-se mais frio, conseqüentemente mais denso, isto caracteriza uma região de

maior pressão atmosférica e, portanto, um gradiente de pressão é formado resultando em um deslocamento do ar em direção ao continente. Este movimento é conhecido como BM e se inicia por volta das 09 HL (Figura 1). Assim, os ventos em direção à costa advectam sobre este ar marinho mais frio e úmido e, conseqüentemente a BM em direção a terra (15 HL) (Pielke, 1981; Leite, 2013).

À noite (Figura 1, coluna 2), o movimento inverte-se, à medida que o sol se põe, ocorre um resfriamento radiativo (que é maior sobre a terra) e, portanto, o processo repete desta vez com o deslocamento de ar ocorrendo em direção ao oceano, gerando assim a brisa terrestre.

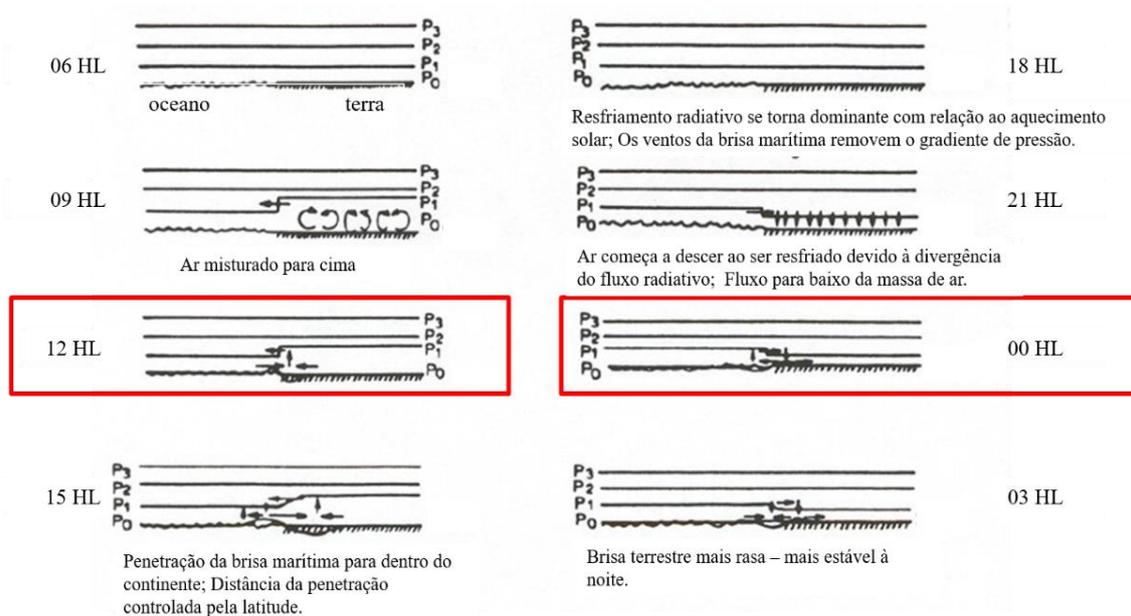


Figura 1 - Representação esquemática da evolução da brisa marítima e terrestre num período de 24 horas. Fonte: Adaptado de Pielke (1981, p.92)

Segundo Simpson (1994) nos trópicos a BM tem velocidade de 2 a 5 m s^{-1} e, em média, avança 100 km no continente. O desenvolvimento de uma circulação da BM propriamente dita, de escala regional e capaz de penetrar a muitas dezenas de quilômetros no continente, necessita um gradiente térmico de pelo menos 4°C nas latitudes intertropicais (Okoola, 1978). Nessas latitudes, em virtude da menor aceleração da força de Coriolis, quando o aquecimento diurno continental é intenso e, quando o relevo permite, a penetração da BM pode superar os 100 km . Em latitudes maiores, essa aceleração desvia o vento, limitando, dessa forma, o alcance das brisas (DeCaria, 2005). Nos climas tropicais de alternância sazonal, isto é, estação chuvosa/estação seca, a estação seca (ou pouco chuvosa) é a mais favorável ao desenvolvimento da circulação da brisa,

tendo-se em consideração a insolação mais forte e a menor temperatura da superfície do mar (Dubreuil, 2004).

A BM é frequente na cidade de São Paulo (Oliveira e Silva Dias, 1982), e ela ocorre quando o sistema sinótico atuante é a ASAS. Um dos trabalhos pioneiros sobre a BM em São Paulo foi o estudo de Oliveira e Silva Dias (1982) que, utilizando dados de superfície da estação climatológica do IAG-USP, caracterizaram a variação diurna e sazonal dos ventos. Segundo os autores, existem três padrões de entrada da BM em São Paulo: (i) BM padrão, na qual o vento passa de NE, no período da manhã, para SE à tarde; (ii) vento NW no período da manhã passando a SE ou calmaria no período da tarde ou início da noite; (iii) intensificação do componente SE no período diurno. A penetração da BM em São Paulo, durante o período por eles analisado, ocorre entre 13 e 14 HL na maioria dos casos, podendo haver uma antecipação ou atraso, dependendo da situação sinótica atuante e da estação do ano.

No extremo sul do Brasil, Braga e Krusche (2000) verificaram que no verão a BM adentra o continente por volta das 12 HL, alcançando a máxima intensidade de 1 m s^{-1} às 17 HL e a brisa terrestre adentra o oceano por volta das 23 HL, com seu pico às 5 HL.

Segundo Reboita *et al.* (2010), no município de São Paulo, a BM contribui para instabilizar o ar e, muitas vezes, propicia chuviscos. Porém, quando interage com outros sistemas atmosféricos pode favorecer eventos com chuvas intensas. Pereira Filho *et al.* (2002) identificaram que 65% dos casos de enchentes ocorridos na Região Metropolitana de São Paulo entre março de 1999 e março de 2002 estavam associados à penetração de BM no período da tarde e temperatura do ar superior a $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Estudos de caso para os dias 01 e 04 de agosto de 1999, realizados por Freitas e Silva Dias (2004), sobre a relação existente entre algumas situações de grande escala e a propagação e intensidade da BM na Região Metropolitana de São Paulo identificaram, através da modelagem numérica com a assimilação das análises globais do CPTEC e dados de superfície pelo modelo RAMS, que o posicionamento de centros de alta pressão desempenham um papel fundamental sobre a propagação e intensidade da BM e da brisa terrestre. Quando a alta pressão impõe um regime de ventos de SE (NE) sobre o estado, ela enfraquece a brisa terrestre (BM) e intensifica a BM (brisa terrestre), fazendo que ela se propague por maiores distâncias.

2.2.4 Brisa vale-montanha

Em regiões de topografia com vales e elevações, geralmente, ocorre o desenvolvimento de brisas de vale e de montanha. De forma similar à brisa marítima-terrestre, o aquecimento diferenciado é responsável pelos gradientes de pressão que forçam os movimentos da brisa de vale-montanha.

Durante o dia, a superfície da encosta da montanha mais voltada para o sol aquece mais rapidamente que o ar na mesma altura, sobre o vale vizinho. A diferença espacial de pressão estabelecida entre eles origina uma circulação diurna do ar em direção à encosta da montanha. Se a atmosfera estiver instável na região e houver disponibilidade de vapor d'água no ar, a presença da circulação em direção ao topo da montanha favorece a formação de nuvens e, dependendo das condições atmosféricas podem ocorrer chuvas locais, nas regiões mais elevadas.

À noite o resfriamento radiativo no topo da montanha é mais intenso do que o do ar acima do vale na mesma altura. Assim, estabelece um centro relativo de alta pressão sobre a montanha e um de baixa pressão sobre o vale menos frio. Esta inversão na posição dos centros de pressão origina uma circulação noturna com o ar mais frio e denso fluindo em direção ao vale. Sobre o vale, se houver disponibilidade de vapor d'água no ar, e sob intenso resfriamento noturno, pode acarretar na condensação do vapor d'água e então na formação de orvalho ou nevoeiro e criar condições para a formação de uma inversão térmica favorecendo a estabilidade do ar nesta altitude. Assim, o nevoeiro ficará restrito ao vale, se dissipando durante a manhã quando o aquecimento da superfície, em razão da insolação, provocar o enfraquecimento da inversão térmica.

Em geral, as circulações locais (como a brisa marítima-terrestre e vale-montanha), sob condições sinóticas ou de mesoescala intensas podem ser modificadas ou até mesmo suprimidas (Gleeson, 1951).

Stewart *et al.* (2002) descreveram as características climatológicas das circulações induzidas termicamente em quatro regiões da Intermountain West dos Estados Unidos, onde redes de energia eólica foram instaladas. Alguns dos resultados encontrados foram que o tempo de inversão do vento dia-noite e noite-dia é geralmente consistente de região para região. Durante o período de transição matinal, os ventos de descida mudaram para subida logo após o nascer do sol. Da mesma forma, a transição de subida para descida ocorreu logo após o pôr do sol. Os ventos descendentes são mais fortes durante as primeiras horas após o pôr do sol e geralmente são mais fortes do que os ventos

ascendentes durante o dia. Os ventos de maior escala em muitos locais superam os ventos locais de origem térmica.

Campos *et al.* (2016) analisaram as circulações de vale e montanha no Vale do Paraíba e na Serra da Mantiqueira para um período entre os dias 16 e 22 de agosto de 2010 através de uma simulação com o modelo *Weather and Research Forecasting* (WRF). A simulação foi capaz de representar as condições de temperatura do ar e vento na região, com maiores diferenças entre simulação e observação para os ventos. O padrão de escoamento entre vale e montanha foi nítido ao se comparar a circulação e topografia da região, bem como nas anomalias de temperatura que indicam a indução da brisa através das diferenças horizontais de temperatura do ar. Porém, em regiões de topografia mais acidentada, as células da brisa foram menos caracterizadas, provavelmente por influência da rugosidade do terreno. As simulações apontaram que a brisa de vale iniciou aproximadamente às 11 HL e a de montanha às 19 HL, sendo que a fase de transição entre a brisa de montanha para a de vale ocorreu, em média, entre as 03 e 07 HL.

Quando as áreas montanhosas estão situadas próximas a costas marítimas, as circulações de vale e montanha combinam-se com as brisas terrestre e marítima para formar um sistema de vento local bem mais forte. Isto acontece ao longo da maior parte da costa leste do Brasil. À tarde, ventos encosta acima auxiliam a penetração continental do ar marítimo associado com a BM. Com o acoplamento da brisa de vale e da BM, essas conseguem chegar até a Região Metropolitana de São Paulo, podendo exceder 100 km (Oliveira *et al.*, 2003).

Ao lado (Figura 2), o esquema ilustra uma situação típica de inverno na região costeira do estado de São Paulo.

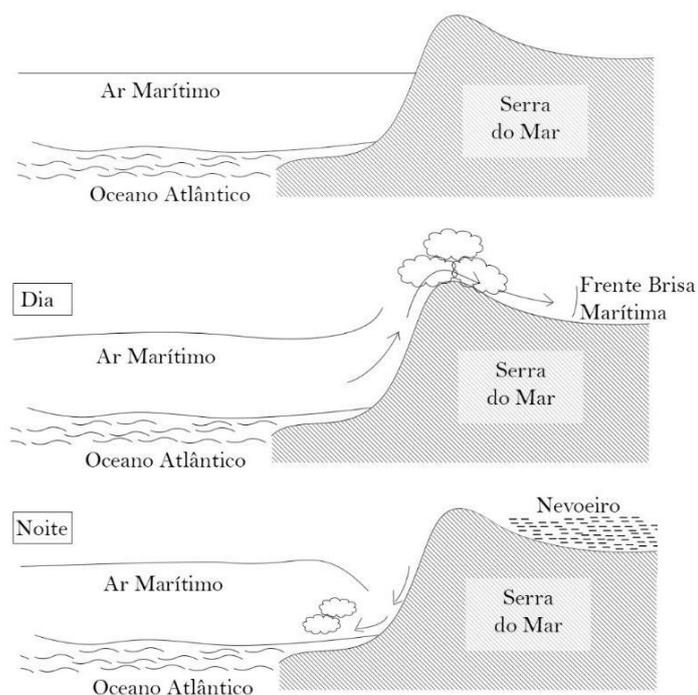


Figura 2 - Esquema que ilustra uma situação típica de inverno na região costeira do estado de São Paulo. A linha horizontal sobre o mar, em cada figura, representa o topo da inversão marítima. Autor: Marcatto G. Adaptado de Kousky e Elias, 1982.

A linha horizontal sobre o mar, em cada figura, representa o topo da inversão marítima.

Nesta figura, nota-se que a BM, ao encontrar a barreira da Serra do Mar, é forçada a subir, expandindo o volume de ar e resfriando, podendo gerar nuvens orográficas próximas ao topo da Serra. Se a BM conseguir chegar até a Região Metropolitana de São Paulo, ela pode fornecer umidade suficiente para que, à noite, com a perda de calor por radiação de onda longa, ocorra nevoeiro. Isso foi identificado no estudo de Machado (1993) que realizou simulações numéricas para o período de fevereiro de 1989 na grande São Paulo e adjacências.

3 DADOS E METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

O Sistema Anchieta-Imigrantes (SAI) se localiza no Planalto Paulista e na Serra do Mar (Figura 3). De acordo com Almeida e Carneiro (1998), a Serra do Mar é um conjunto de escarpas festonadas com cerca de 1.000 km de extensão, em que termina o Planalto Atlântico no trecho voltado para a Bacia de Santos. Ela se estende do Rio de Janeiro até norte de Santa Catarina. Em São Paulo, impõe-se como típica borda de planalto, frequentemente nivelada pelo topo em altitudes de 800 a 1.200 m (Almeida e Carneiro, 1998). A Serra do Mar é constituída pela vegetação da Mata Atlântica, sendo caracterizada como Floresta Ombrófila Densa ou Floresta de Encostas que apresenta uma grande diversidade de espécies, árvores que atingem os 30 m de altura, com corpo florestal denso e copas próximas fazendo com que o ambiente interno tenha sombra.

O SAI é a principal ligação entre a Região Metropolitana de São Paulo e o Porto de Santos – o maior da América Latina –, o Polo Petroquímico de Cubatão, as indústrias do ABCD e a Baixada Santista. O Porto de Santos é considerado o porto brasileiro com maior diversidade em importações e exportações, ocupando a posição de maior porto do hemisfério sul (Porto de Santos, 2019).

Desde 1998, o SAI é administrado pela empresa Ecovias dos Imigrantes junto ao Governo do Estado de São Paulo e regulamentado pela Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transportes do Estado de São Paulo – Artesp.



Figura 3 - Rodovia dos Imigrantes – trecho da serra. Fonte: Ecovias.

3.2 Operação Comboio (OC)

A Operação Comboio consiste na condução dos veículos feita por viaturas da Ecovias e da Polícia Militar Rodoviária no Sistema Anchieta- Imigrantes (SAI) toda vez que a visibilidade horizontal – maior distância na qual um objeto pode ser visto e identificado - é menor que 100 m.

A visibilidade ao longo do Sistema Anchieta-Imigrantes é medida pelas estações meteorológicas do SCA instaladas em pontos críticos de ocorrência de nevoeiro, que enviam informações em tempo real ao seu Centro de Controle Operacional, sinalizando aos operadores sempre que a visibilidade começa a ficar prejudicada – abaixo de 500 m. A partir deste momento, inicia-se o protocolo homologado pela Artesp para essas situações, que inclui o acionamento da polícia para que mantenha equipes preparadas e inserção da informação nos meios de comunicação da concessionária. Quando a visibilidade baixa dos 200 m, as alças da Interligação Planalto são bloqueadas e as viaturas, posicionadas para possível montagem do comboio (ABC do ABC, 2018). Ao atingir menos de 100 metros em qualquer ponto do SAI, a OC é iniciada na rodovia que estiver sendo afetada, ou seja, nas praças de cobrança de pedágio da Rodovia Anchieta – SP 150 (Pedágio Riacho Grande, km 31+106m) e/ou nas da Rodovia dos Imigrantes - SP 160 (Pedágio Piratininga, km 32+381m). O tráfego é interrompido para concentração de cerca de 350/500 veículos que saem em caixas de comboio, guiadas por viaturas, a cada 30 minutos numa velocidade média de 40 km h⁻¹ até um local onde as condições de visibilidade melhorem.

O trecho mais crítico em relação à visibilidade são os 8 km da Interligação Planalto. Quando a visibilidade fica abaixo do limiar de 100 m as alças da Interligação são bloqueadas para quem está subindo a serra, sem prejuízo ao tráfego de veículos. No entanto, na descida, as alças não podem ser bloqueadas pois os veículos precisam obrigatoriamente trocar de rodovia para descer a serra pela Rodovia Anchieta.

De acordo com Douglas Albiero, Josimar L. de Macedo, Marcio R. Vono e Roberto C. Lima, em uma reunião *online* realizada no dia 25 de fevereiro de 2022 pelo Google Meet (Albiero *et al.*, 2022), nas situações em que a névoa for densa apenas na Interligação Planalto, mas com boa visibilidade na Imigrantes, os veículos com destino à Anchieta, são represados no início do trecho da Interligação (km 08), logo após a alça de acesso da Imigrantes, na altura do km 40. Assim, os usuários com veículos de passeio que pretendem seguir ao Litoral pela Imigrantes continuam a viagem livremente.

Uma vez que é iniciada a formação do comboio, mesmo que a condição de visibilidade já venha melhorando, a caixa de comboio deve continuar até um local seguro para evitar possíveis acidentes como, por exemplo, aqueles causados por motoristas tentando recuperar o tempo de espera. A OC é realizada apenas na descida na serra, pois na subida não há praças de pedágios para que se formem os comboios. Assim, na subida da serra, os usuários são orientados a reduzir a velocidade por meio de placas piscantes, que são acionadas sempre que a visibilidade estiver prejudicada. Nestas situações, os motoristas de caminhão também são obrigados a se manter na faixa da direita, sem realizar ultrapassagens. Essa sinalização de alerta é reforçada por placas educativas, tachas refletivas, balizadores com material refletivo e painéis eletrônicos de mensagem (ABC do ABC, 2018).

Com os dados da Topodata (Topodata - INPE), foi feito um mapa hipsométrico da área de estudo (Figura 4) onde se pode observar que a área onde é realizado o bloqueio da OC está numa altitude entre 750 – 800 m. Depois de passar pela Interligação Planalto, essa altitude já diminui para 200 – 550 m, chegando até o litoral.

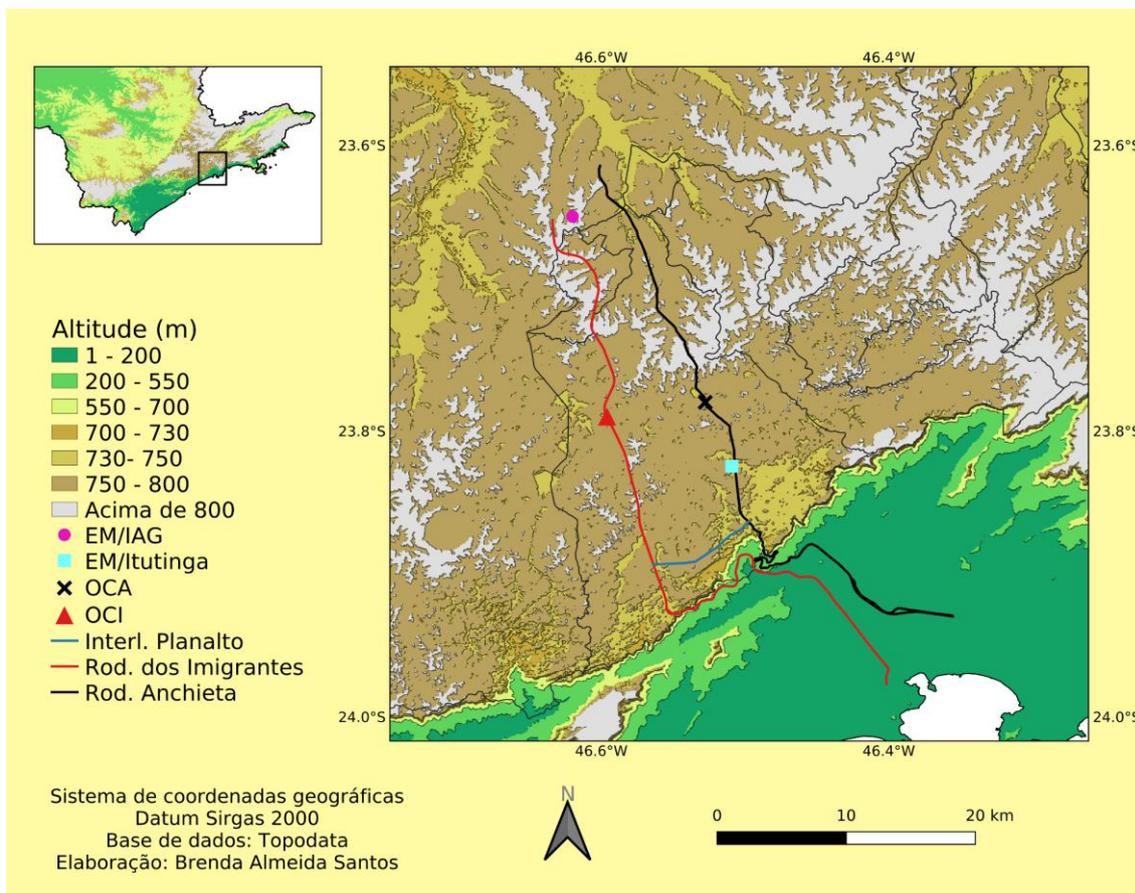


Figura 4 - Mapa hipsométrico da área de estudo com localização das rodovias, os pontos de bloqueio da OC (OCA = Operação Comboio Anchieta; OCI = Operação Comboio Imigrantes, a EM/IAG e a EM/Itutinga).

3.3 Dados

Os dados utilizados neste trabalho vieram de diferentes fontes. Com relação às horas, optou-se por manter de acordo com os dados originais das estações meteorológicas: Hora Local (ou seja, Hora solar. Caso o dado seja fornecido em Hora de Brasília, o mesmo é transformado para Hora Local = UTC – 3).

3.3.1 Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (EM/IAG)

Tendo em vista a demora na liberação dos dados pela Ecovias, a pesquisa começou com a análise dos dados da Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (EM/IAG), localizada na Água Funda (Lat.: 23,651161°S, Lon.: 046,622399°W, Alt.: 800 m) e registrada junto à Organização Meteorológica Mundial sob o número 83004. Com o objetivo de avaliar as condições meteorológicas para os dias em que ocorreu o nevoeiro utilizaram-se as informações com relação a névoa e nevoeiro

registradas pelo observador da EM/IAG para o período de 1981 a 2018. Os critérios adotados para a identificação desses fenômenos nessa estação são: visibilidade horizontal menor ou igual a 3000 m (divididas em névoa (névoa úmida), nevoeiro e nevoeiro denso) e umidade relativa (UR) superior a 70% (Tabela 1). O período de observação nesta estação ocorre entre 07 - 24 HL, os possíveis eventos que ocorram durante a madrugada não são registrados, ou seja, no caso do nevoeiro, se seu início ocorrer após às 24 HL e sua dissipação ocorrer antes das 07 HL, este não será registrado, como observado por Armani *et al.* (2010).

Tabela 1 - Tipos de nevoeiro e suas características dados pela EM/IAG.

Termo Usado	Visibilidade	Código	UR
Nevoeiro Denso	0-500 m	0-1-2	
Nevoeiro	500-1000 m	3	> 70%
Névoa	1000-3000 m	4-5	

Os códigos usados pela EM-IAG estão associados à visibilidade horizontal e serviram como um primeiro indicador de ocorrência de nevoeiro. O Nevoeiro Denso é definido como aquele em que a visibilidade é menor que 500 m e, dentro desta categoria, a visibilidade tem o código 0 para visibilidade até 50 m; código 1, entre 50 e 200 m e código 2, entre 200 e 500 m. Nevoeiro é definido para visibilidade entre 500 e 1000 m, com código 3. Névoa ocorre quando o horizonte estiver embaçado e para a visibilidade entre 1000 e 2000 m utiliza-se o código 4, e código 5 para a visibilidade entre 2000 e 3000 m (Fonte: Me. Eng. Mario Festa, especialista em laboratório da EM/IAG, em comunicação pessoal, 3 de fevereiro de 2021).

3.3.2 Estação Meteorológica de Itutinga (EM/Itutinga)

A EM/Itutinga é uma estação meteorológica automática instalada e mantida pelo Laboratório de Micrometeorologia do IAG-USP. Fica localizada no Parque de Itutinga-Pilões, próximo à Rodovia Anchieta, na latitude de 23,82472°S, longitude -046,50917°W e altitude de 747 m (Figura 4 – mapa hipsométrico). Com o propósito de analisar as condições meteorológicas nos eventos da OC, foram analisados os dados horários de precipitação (mm), umidade específica (g kg^{-1}), umidade relativa (%), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), medidos a 2 m de altura, direção do vento ($^{\circ}$) e velocidade do vento (m s^{-1}) medidos a 10 m de altura, para o ano de 2015. Os dados são fornecidos em Hora Local (HL).

3.3.3 Dados da Ecovias

A Ecovias, concessionária do Sistema Anchieta-Imigrantes, forneceu dados de suas estações meteorológicas para o período de 01/11/2004 a 30/11/2018 e registros de OC's para o período de 2002 a 2018.

As estações meteorológicas do SCA da Ecovias consistem em 10 estações automáticas e registram dados horários de: velocidade (m s^{-1}) e direção ($^{\circ}$) do vento, chuva (mm), visibilidade (m) e temperatura ($^{\circ}\text{C}$), localizadas ao longo das Rodovias Anchieta, Imigrantes e Interligação, conforme descrito na Tabela 2. Nesta pesquisa, foram selecionadas três estações, destacadas em vermelho e sublinhadas na Tabela 2, por serem as mais próximas dos locais das OC's. Entretanto, após algumas análises (Apêndice A), todos os dados meteorológicos foram descartados devido a falhas na coleta, bem como frequentes valores questionáveis ao longo de toda a série.

Tabela 2 - Estações do estudo e sua localização.

Rodovia dos Imigrantes (SP160)	Rodovia Anchieta (SP150)	Interligação Planalto (SP040)
SCA 04 Km 12,1	<u>SCA 01 Km 38,8</u>	<u>SCA 09 Km 2,0</u>
SCA 05 Km 24,4	SCA 02 Km 40,1	
<u>SCA 06 Km 32,3</u>	SCA 03 Km 44,5	
SCA 07 Km 40,5	SCA 10 Km 56,7	
SCA 08 Km 44,4		

Foram utilizados, então, somente os registros de OC, fornecidos para o período de 2002 a 2018, no horário de Brasília, que foram transformadas em Hora Local. O ano de 2015 foi selecionado para uma análise mais aprofundada: os registros das OC foram reorganizados observando os horários de bloqueio e término, separando-se os eventos contínuos de cada dia e colocando a hora inicial e final para cada evento seguindo os critérios abaixo:

- Se a diferença entre o horário de término e de início de bloqueio do próximo item fosse menor que duas horas, considerar como uma OC apenas;
- Os horários de início e final de cada OC foi aproximado para a hora cheia mais próxima: se os minutos forem >30 considerar a próxima hora cheia e se for <30 considerar a hora cheia anterior.

Para análise da distribuição diurna das OC's e dos nevoeiros registrados na EM/IAG, foram considerados os seguintes períodos:

Madrugada: 00:00 às 05:59 HL;

Tarde: 12:00 às 17:59 HL;

Manhã: 06:00 às 11:59 HL;

Noite: 18:00 às 23:59 HL.

3.3.4 Dados utilizados nas análises sinóticas

Para analisar as condições sinóticas, as variáveis atmosféricas empregadas foram pressão reduzida a nível médio do mar, altura geopotencial e as componentes zonal e meridional do vento, obtidas da reanálise ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011; <https://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>), com resolução espacial de 2,5°, às 9 HL nos níveis atmosféricos de 1000, 850, 500 e 250 hPa. Foram utilizadas também as cartas sinóticas de superfície analisadas pela Marinha do Brasil (<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas>) para o ano de 2007 e pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC - INPE) para o ano de 2015.

3.3.5 Dados utilizados nas análises de mesoescala

Foram utilizados dados horários de temperatura e temperatura de ponto de orvalho a 2 m, e componentes zonal e meridional do vento a 10 m da reanálise do ERA5, a quinta geração de reanálise do *European Centre for Medium-Range WeatherForecasts* (ECMWF), que representa o estado da arte em dados de reanálises (Hersbach *et al.*, 2020), com resolução espacial de 0,25°.

Nas análises sobre os nevoeiros registrados na EM/IAG no inverno de 2007, para auxiliar na caracterização dos sistemas atuantes, tomou-se como base o trabalho de Perez e Silva Dias (2017) que estudaram a ocorrência e tempo de passagem da BM em São Paulo entre 1960 e 2009 na EM/IAG, diferenciando os casos de passagem frontal da BM através de um algoritmo com base no modelo conceitual de Cavalcanti e Kousky (2009). O primeiro passo deste algoritmo é verificar a ocorrência de ventos sudeste no período entre 09 e 20 HL. Caso positivo, o próximo passo é verificar se este vento estava associado a um padrão típico de FF, definido como mudança da direção dominante do vento de noroeste para sudeste/sudoeste ou persistência sudeste/sudoeste pelo menos até a manhã de próximo dia. No estudo de Perez e Silva Dias (2017), não foram considerados os casos em que ocorreram a passagem frontal e a passagem da BM no mesmo dia.

Utilizando os dados do ERA5, foram plotados os campos de temperatura (°C), temperatura do ponto de orvalho (°C) e vento (m s^{-1}) e calculada e plotada a divergência ($\text{*}10^{-5} \text{ s}^{-1}$) dos ventos em superfície para todos os dias do ano de 2015, para cada hora do dia, para avaliar a distribuição dessas variáveis espacialmente.

Para uma melhor análise do comportamento das variáveis próxima a região da OC, selecionou-se o ponto de grade mais próximo da região e plotaram-se essas variáveis em um gráfico para cada dia, marcando os horários em que foi registrado OC e nevoeiro na EM/IAG.

Deste modo, foram analisados os campos e os gráficos do ERA5, dia por dia do ano de 2015, assim como a carta sinótica de superfície do CPTEC – INPE e feito um compilado dessas informações, mostrados no Apêndice B.

3.3.6 Dados de radiossonda e METAR

As radiossondagens do Aeroporto de Campo de Marte, coletadas pela Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMETS), foram obtidas da Universidade de Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Foram utilizados ainda os *Meteorological Aerodrome Report* (METAR) do Aeroporto de Congonhas (SBSP), situado a aproximadamente 4,9 (38) km da EM/IAG (OC) e do Aeroporto de Santos (SBST) (<https://www.redemet.aer.mil.br/>).

3.3.7 Imagens de satélite e radar

Foram avaliadas ainda, nos estudos de caso da OC, as imagens do canal visível e infravermelho do satélite GOES-13, disponíveis no site da Divisão de Satélites e Estudos Ambientais (INPE) e imagens do radar de São Roque (localizado a cerca de 83 km de distância dos locais de OC, em linha reta) disponibilizados pela REDEMETS (<https://www.redemet.aer.mil.br/>).

3.4. Critérios de identificação de sistemas meteorológicos

3.4.1. Brisa marítima (BM)

Para a ocorrência de BM (termo aqui adotado que combina as circulações da brisa marítima e da brisa vale-montanha), os seguintes critérios foram considerados:

- i. A temperatura do continente ser maior do que a temperatura do ar acima do oceano (a temperatura na EM/IAG maior que aproximadamente 23 °C) e a circulação associada a este sistema ser visível nos mapas de temperatura e vento do ERA5; em conjunto com
- ii. Giro do vento na EM/Itutinga para SE, acompanhado de queda na temperatura e/ou aumento na umidade específica ou umidade relativa entre 09 e 17 HL.

3.4.2. Frente

A identificação da passagem da frente foi feita utilizando inicialmente as cartas sinóticas do CPTEC e da Marinha, mas depois confirmados por cartas do ERA5, juntamente com dados das estações meteorológicas. O horário de passagem da frente foi definido através do giro do vento para SE, acompanhado de queda na temperatura, e esta temperatura deveria ser menor ou igual do que nos dias anteriores. Além disso, nos mapas do ERA5, os ventos de SE deveriam estar associados a circulação da APF, e a temperatura no continente poderia ser mais fria do que no litoral/oceano.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados serão apresentados em duas seções: na primeira são mostradas a climatologia para os nevoeiros ocorridos na EM/IAG e o estudo de caso para os dias 02, 03, 20 e 27 de julho de 2007; e na segunda seção são apresentados a análise das situações meteorológicas associadas a OC no ano de 2015 e estudo de caso para os dias 21 de julho, 19 de agosto, 14 e 21 de setembro de 2015.

4.1 Climatologia dos nevoeiros na EM/IAG

A Figura 5 mostra a quantidade de dias com ocorrência de nevoeiros na EM/IAG no período de 1981-2015, podendo-se observar que o nevoeiro é mais frequente no período de inverno, tendo um pico em junho (11 dias). Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Da Silva (2018) que identificou que na Região Sudeste do Brasil, no período entre 2003 – 2012, o fenômeno do nevoeiro foi mais frequente no outono-inverno, observando o pico de ocorrência também no mês de junho.

Machado (1993) relatou que as circulações locais associadas à formação de nevoeiro na grande São Paulo não apresentavam alterações consideráveis no comportamento sazonal do fenômeno entre os períodos analisados (1933-37;1981-90), com os meses de maio, junho, julho e agosto apresentando os maiores índices de ocorrência de nevoeiro, indicando que o fenômeno é mais propício a desenvolver-se no final de outono e durante o inverno. Observou ainda que fenômeno é bastante comum também nos meses de verão, porém, ocorre com menor frequência.

Nesta série, os anos que registraram maior número de dias com nevoeiros no inverno foram 1981 e 2007 (anos com La Niña) com 45 e 43 dias, respectivamente. Assim, o inverno de 2007 foi selecionado para um estudo mais detalhado, por ser mais recente e com maior disponibilidade de dados do que 1981.

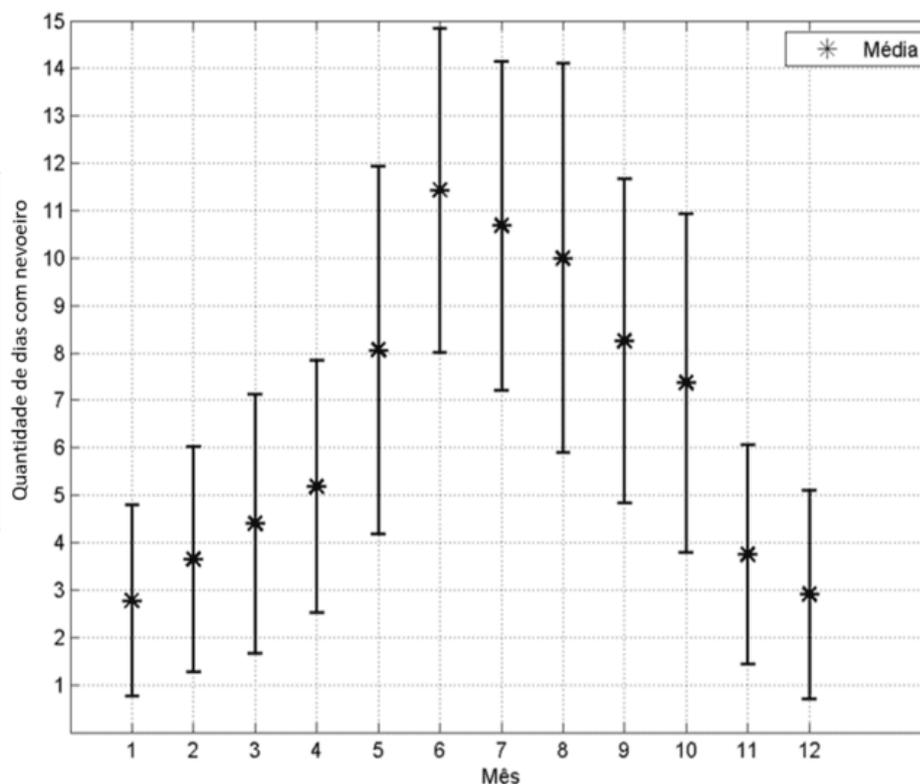


Figura 5 - Média e desvio padrão mensal dos dias com nevoeiro registrados na EM/IAG no período de 1981 a 2015.

A Tabela 3 resume os nevoeiros registrados na EM/IAG no inverno de 2007, bem como a categoria, os sistemas meteorológicos presentes e a classificação do nevoeiro. Dentro dos 43 dias com nevoeiro entre junho e agosto de 2007, ocorreram 49 casos: 3 casos iniciaram às 00 HL, 22 durante a manhã, 6 à tarde e 18 casos no período da noite; ou seja, os eventos se concentram naqueles que iniciam durante o período da manhã e noite, assim como visto por Da Silva (2018) nos aeroportos do Brasil. Em 11 dias houve alteração na intensidade de nevoeiros (Tabela 3 destacados em cinza), a maioria destas alterações foi de moderada a leve ocorrendo no início da manhã, associada à dissipação do nevoeiro devido ao aquecimento diurno. A intensidade registrada dos nevoeiros variou entre névoa (49) e nevoeiro (13). Em alguns casos, pôde-se constatar o uso do termo “nevoeiro de superfície” que ocorre “quando o observador consegue ver o céu limpo acima de um ângulo de 30 graus acima da superfície, para diferenciar de quando não consegue ver o céu” (Fonte: Me. Eng. Mario Festa). Assim, o nevoeiro de superfície é comparável ao nevoeiro classificado por Da Silva (2018) com “céu visível acima do banco de nevoeiro”.

Tabela 3 - Casos de nevoeiros registrados pela EM/IAG no inverno de 2007 em Horal Local (UTC-3).

Data	Hora inicial (HL)	Hora final (HL)	Categoria	Sistemas meteorológicos	Classificação
02/06/2007	19	24	Névoa	APF	Radiativo
05/06/2007	07	10	Nevoeiro → Névoa	ASAS + BM ant	Radiativo
05/06/2007	21	24	Névoa de superfície	ASAS + BM	Radiativo
06/06/2007	06:55	11	Nevoeiro de superfície → Névoa spf	ASAS + BM ant	Radiativo
08/06/2007	07	08	Névoa de superfície	ASAS	Radiativo
08/06/2007	23	24	Névoa	ASAS + BM	Radiativo
09/06/2007	07	11	Nevoeiro → Névoa spf	ASAS + BM ant	Radiativo
10/06/2007	07	10	Névoa de superfície	ASAS	Radiativo
11/06/2007	07	08	Névoa de superfície	ASAS	Radiativo
18/06/2007	18	20	Névoa	ASAS + BM	Advectivo (BM)
20/06/2007	07	08	Névoa	ASAS	Radiativo
26/06/2007	20	24	Névoa de superfície	ASAS + BM	Radiativo
29/06/2007	16	20	Nevoeiro de superfície → Névoa spf	APF	Radiativo
30/06/2007	07	09	Nevoeiro → Névoa	APF	Radiativo
01/07/2007	07	10	Névoa	ASAS	Radiativo
01/07/2007	18	24	Névoa → Nevoeiro	ASAS + BM	Advectivo (BM)
02/07/2007	07	10	Névoa	ASAS + BM ant	Radiativo
02/07/2007	18	24	Névoa - > Nevoeiro → Névoa spf	ASAS + BM	Radiativo
03/07/2007	07	08	Névoa de superfície	ASAS + BM ant	Radiativo
03/07/2007	18	24	Névoa de superfície	ASAS	Radiativo
04/07/2019	07	09	Nevoeiro → Névoa	ASAS	Radiativo
12/07/2007	09	10	Nevoeiro	APF	Advectivo (APF)
12/07/2007	13	15	Névoa	APF	Advectivo (APF)
19/07/2007	07	09	Nevoeiro → Névoa	APF	Radiativo
20/07/2007	07	14	Nevoeiro → Névoa	APF	Advectivo (APF)
21/07/2007	07	08	Névoa de superfície	ASAS	Radiativo

Data	Hora inicial (HL)	Hora final (HL)	Categoria	Sistemas meteorológicos	Classificação
24/07/2007	08	14	Névoa	APF	Advectivo (APF)
26/07/2007	22	23	Névoa	APF	Advectivo (APF)
27/07/2007	18	22	Névoa	APF	Advectivo (APF)
30/07/2007	...	07	Névoa de superfície	APF	Advectivo (APF)
02/08/2007	22	24	Névoa	ASAS + BM	Adeectivo (BM)
04/08/2007	24	...	Névoa de superfície	APF	Radiativo
05/08/2007	24	...	Névoa	APF	Advectivo (APF)
08/08/2007	18	19	Névoa	APF	Advectivo (APF)
09/08/2007	07	10	Névoa	APF	Advectivo (APF)
12/08/2007	14:40	15	Névoa de superfície	APF	Advectivo (APF)
13/08/2007	17	24	Névoa	ASAS	Radiativo
17/08/2007	16	17	Névoa de superfície	ASAS + BM	Radiativo
19/08/2007	18	19	Névoa de superfície	ASAS + BM	Radiativo
20/08/2007	22	24	Névoa	APF	Advectivo (APF)
21/08/2007	08	09	Névoa	APF	Advectivo (APF)
22/08/2007	18	24	Névoa → Nevoeiro	APF	Radiativo
23/08/2007	07	09	Nevoeiro → Névoa	APF	Radiativo
27/08/2007	18	19	Névoa	APF	Advectivo (APF)
28/08/2007	24	...	Névoa	APF	Advectivo (APF)
29/08/2007	07	08	Névoa	APF	Advectivo (APF)
29/08/2007	12	17	Névoa	APF	Advectivo (APF)
30/08/2007	18	19	Névoa	APF	Advectivo (APF)
31/08/2007	19	24	Névoa	ASAS + BM	Radiativo

*As datas sombreadas correspondem aos dias em que o nevoeiro mudou de intensidade. APF: Alta pós-frontal; ASAS: Alta Subtropical do Atlântico Sul; BM: Brisa marítima (ant = dia anterior); FF: Frente fria, spf: superfície.

Analisando as cartas sinóticas de superfície, pode-se notar que, na maioria dos casos, o sistema sinótico predominante foi uma alta pressão em superfície. Essa alta pressão estava associada à FF que passou pela região – APF – ou à ASAS deslocada para oeste, conforme o esperado para esta estação (Reboita *et al.*, 2010). Os sistemas de alta pressão transientes são importantes por serem fontes de ar frio no inverno (Sinclair, 1996), possuírem movimento subsidente do ar e, muitas vezes, advectarem umidade do oceano para dentro do continente, as quais são condições favoráveis para formação de nevoeiros por radiação e por advecção, respectivamente (Perez e Silva Dias, 2017). Nota-se também que a BM esteve associada a diversos casos e ela ocorre quando a ASAS é o sistema sinótico atuante em São Paulo (Oliveira e Silva Dias, 1982), conforme mostrado na Tabela 3.

Avaliando os dados da EM/IAG, o nevoeiro foi classificado como radiativo quando não havia registro de vento e pouca nebulosidade. Geralmente ocorreu com a presença da ASAS, registrado principalmente no período entre a noite e o amanhecer e foi mais frequente no início do inverno. Já o nevoeiro advectivo se refere aos dias em que, no momento do nevoeiro, houve registro de vento ($\geq 0,5 \text{ m s}^{-1}$), ou seja, uma advecção mais pronunciada de umidade, seja pela passagem de uma FF, BM e até mesmo a circulação mais intensa de uma APF no local, que também está associada a ventos de sudeste. A APF favoreceu a formação deste tipo de nevoeiro principalmente no meio e final do inverno. Nesses dias, os dados também mostram a presença de mais nebulosidade (8 oitávos de céu coberto). Nos casos de nevoeiro advectivo, devido à BM, o fator principal foi o aporte de umidade e temperatura relativamente mais fria, diferentemente da definição que considera o transporte de uma massa de ar mais quente e úmida para uma região mais fria e seca. Também foi possível notar que situações pré-frontais, com ventos persistentes de NW não favorecem a formação de nevoeiro.

Para analisar melhor a formação e evolução desses nevoeiros, foram escolhidos alguns casos para um estudo mais detalhado. Dois nevoeiros por radiação, 02 e 03 de julho de 2007, e dois nevoeiros por advecção, 20 e 27 de julho de 2007.

4.1.2 Estudo de casos

4.1.2.1 Nevoeiros radiativos – Dias 02 e 03 de julho de 2007

O observador da EM/IAG registrou névoa no dia 02 de julho, das 18 às 24 HL e no dia 03 de julho, das 07 às 08 HL. No METAR do Aeroporto de Congonhas (SBSP) há

registro de névoa úmida (BR) desde 17 HL do dia 02 até 08 HL do dia 03. Assim, concluímos que se trata de um evento único que durou 14 horas.

A passagem de uma FF na cidade de São Paulo ocorreu no dia 28 de junho e a APF permaneceu na região durante os dias seguintes, juntando-se à ASAS por volta do dia 02 de julho (Figura 6A). Nas observações da EM/IAG do dia 02 de julho registrou-se névoa das 07 - 09 HL, mas o evento aqui estudado iniciou mais tarde, às 18 HL, como névoa, intensificando para nevoeiro às 19 HL e retornando a névoa de superfície das 20 – 00 HL. Ao longo deste dia, houve registro de nuvens Stratus apenas durante a manhã, entre às 07 – 10 HL, sem registro de precipitação. As informações da EM/IAG são fundamentais para o estudo dos nevoeiros. Entretanto, tendo em vista que circulações locais podem contribuir para a sua formação e duração, foram adicionadas análises do ERA5. A Figura 7 mostra a comparação entre as observações da EM/IAG e os dados de superfície do ERA5 para o dia 2 de julho.

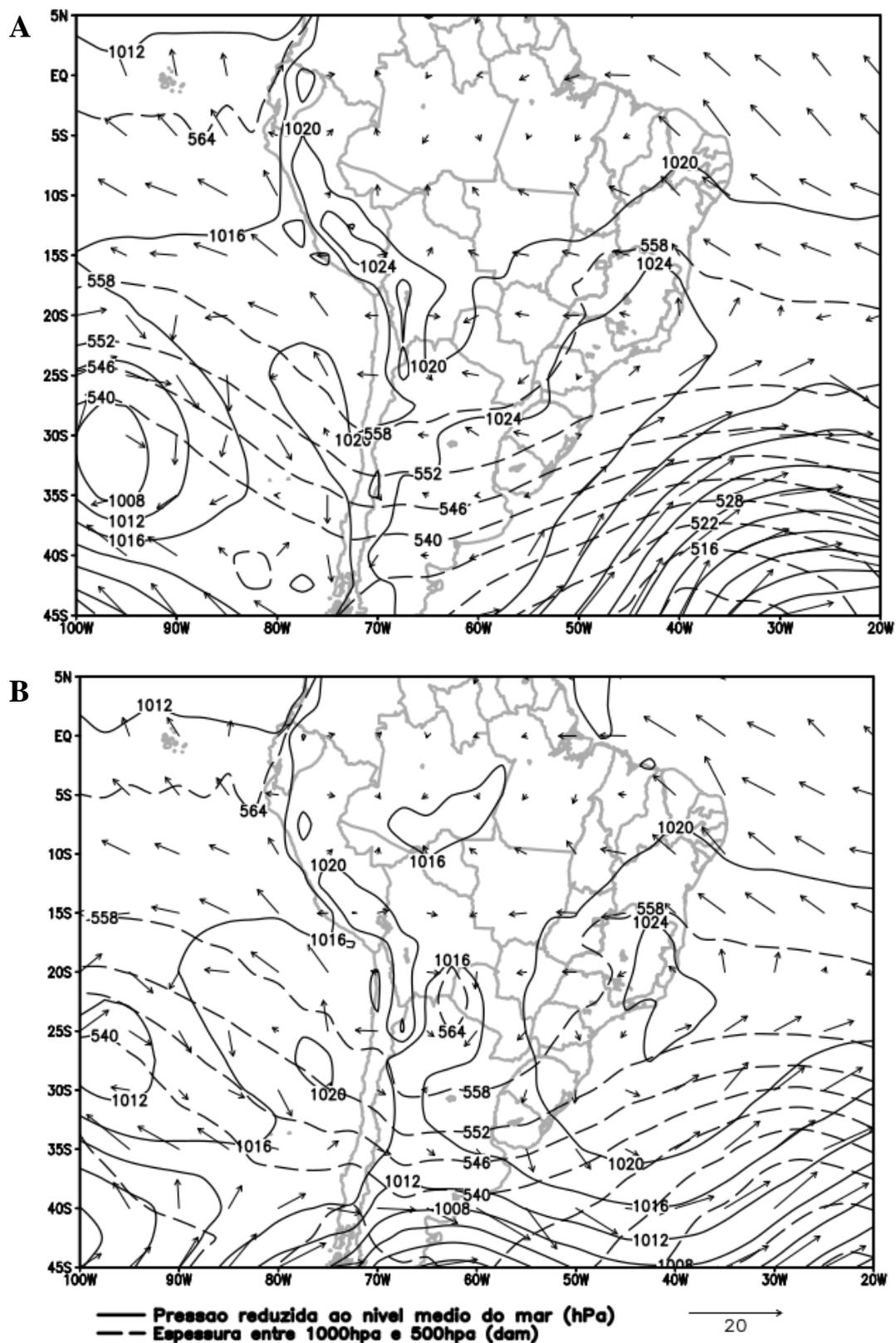


Figura 6 – Cartas sinóticas de superfície às 09 HL (Reanálise Era-Interim) para os dias A) 02 e B) 03 de julho de 2007, com a pressão reduzida ao nível médio do mar (hPa linhas contínuas), espessura entre 1000 e 500 hPa (dam, linhas tracejadas) e vetor vento (com vetor referência de $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ no canto inferior esquerdo do gráfico).

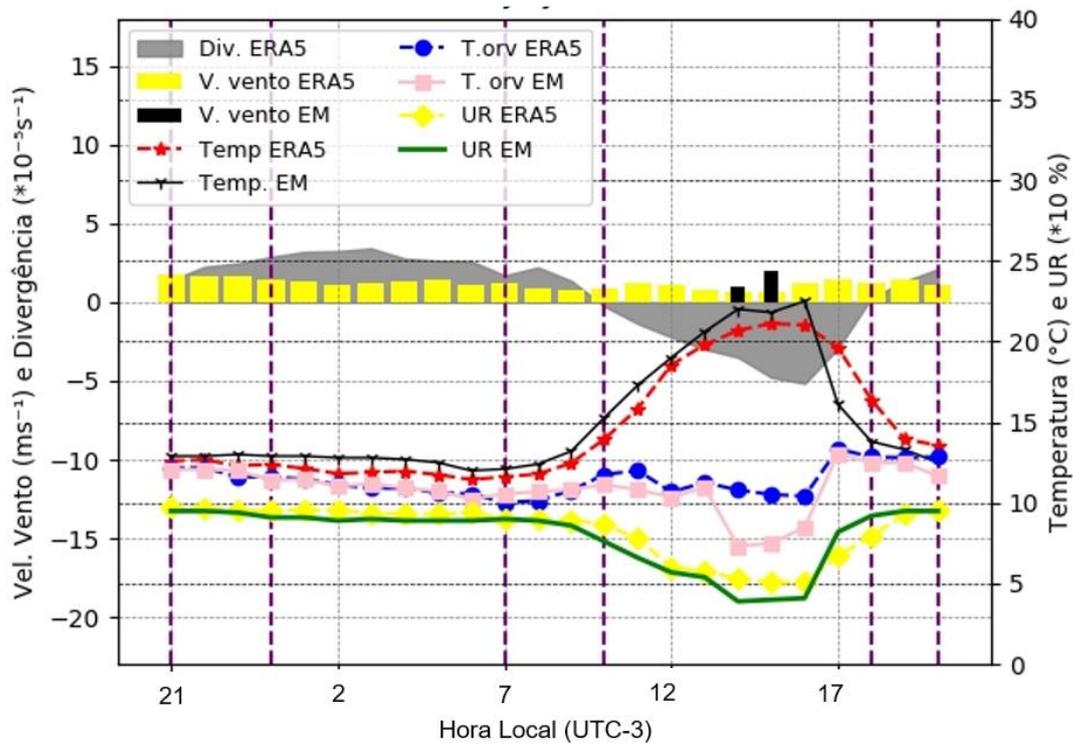


Figura 7 - Distribuição temporal das variáveis Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$), velocidade do vento (m s^{-1}) e Umidade Relativa (%) da EM/IAG e do ERA5 a 2 m e Divergência ($*10^{-5} \text{ s}^{-1}$) do ERA5 para o final do dia 01 até a noite do dia 02 de julho de 2007. A linha tracejada na cor tracejada na cor roxa representa a hora inicial e final do evento de nevoeiro registrado na EM/IAG.

Os dados de temperatura e UR do ERA5 se aproximaram bastante dos dados medidos pela EM/IAG. Entre 14 e 15 HL deste dia os ventos fluíam de noroeste passaram para sudoeste ($\sim 2 \text{ m s}^{-1}$), a temperatura diminuiu de 22 para $21,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e a umidade específica (q) aumentou ligeiramente de 6,9 para 7 g kg^{-1} . Apesar dos dados observados na EM/IAG não configurarem as características clássicas da entrada da BM (Oliveira e Silva Dias, 1982, Perez e Silva Dias, 2017), a reanálise mostra claramente esta circulação (Figura 8A) às 16 HL quando BM atinge o centro da Região Metropolitana de São Paulo, assim como visto por Freitas e Silva Dias (2004).

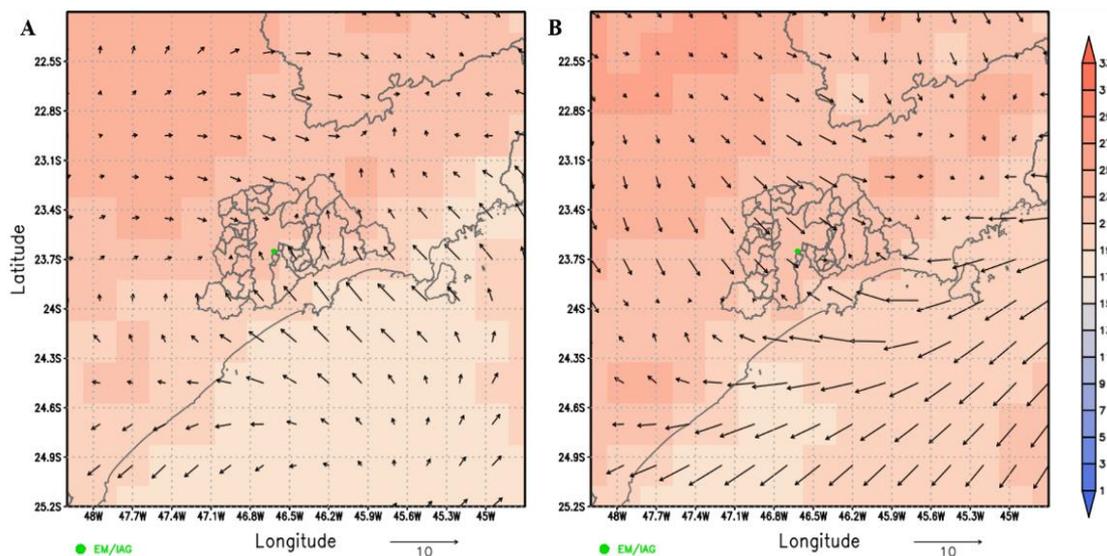


Figura 8 - Campos de temperatura a 2 m ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento a 10 m (m s^{-1} , vetor) do ERA5 para às 16 HL do dia A) 02 e B) 03 de julho de 2007.

O início do nevoeiro foi marcado por queda da temperatura (de $13,3^{\circ}\text{C}$ às 19 HL para $12,5^{\circ}\text{C}$ às 20 HL, resfriamento de $0,8^{\circ}\text{C h}^{-1}$), diminuindo gradativamente ao longo da madrugada até atingir a temperatura mínima de 9°C às 07 HL (taxa de resfriamento $0,3^{\circ}\text{C h}^{-1}$). A umidade específica (q) também diminuiu ao longo da noite e madrugada (de $9,8 \text{ g kg}^{-1}$ às 19 HL para $7,4 \text{ g kg}^{-1}$ às 07 HL), associada à condensação para a formação do nevoeiro, que também pode ser observada na queda de Td no decorrer da madrugada. O observador da EM/IAG registrou logo no início do dia 03 a presença de névoa de superfície, dissipando às 08 HL. Não foi observada nenhuma nuvem (céu limpo) e nem ventos. Entre 07 e 08 HL, a pressão e a temperatura aumentaram $0,4 \text{ hPa}$ e 2°C , respectivamente. Como o nevoeiro estava se dissipando, a evaporação das gotículas de água aumentou UR e a umidade específica: de 95 % para 98 % e de $7,4$ para $8,6 \text{ g kg}^{-1}$. Analisando os dados do ERA5 para o dia 3 (Figura 10), pode-se observar que a temperatura e o vento se mantiveram praticamente constantes e era um período de pouca divergência dos ventos.

A Figura 9 mostra as radiossondas realizadas no Aeroporto de Campo de Marte (zona norte da capital paulista) para os dias 02 às 09 HL, 03 e 04 às 21 e 09 HL. No dia 02 às 09 HL, percebe-se uma camada neutra entre a superfície até 900 hPa , o que pode estar associado ao início do aquecimento diurno erodindo a inversão térmica logo acima. É possível ainda ver a camada residual do dia anterior, entre 890 e 840 hPa e a inversão térmica associada à subsidência da ASAS entre 840 e 810 hPa . A radiossonda do dia 02 às 21 HL (Figura 9B) mostra o impacto do aquecimento diurno até 810 hPa . A

temperatura máxima do dia 02 foi de 22,5 °C na EM/IAG. Entretanto, já se nota o resfriamento da camada mais próxima à superfície com uma inversão térmica que vai se intensificando até a próxima radiossonda, do dia 03 às 09 HL, de 2 para 5 °C (diferença das temperaturas entre os níveis de 890 e 925 hPa), com base em torno de 925 hPa. No estudo de Da Silva (2018), a maioria dos casos teve inversão menor ou igual a 3 °C, e raros eventos com valores altos (10 °C) no inverno, e foi observado também que na maioria dos casos a base da inversão foi na superfície. Acima desta camada de inversão, T e Td estão um pouco separadas o que indica uma atmosfera mais seca e sem presença de nuvens, confirmado pelos registros da EM/IAG. O vento na superfície diminuiu, favorecendo a perda radiativa com o pôr do sol.

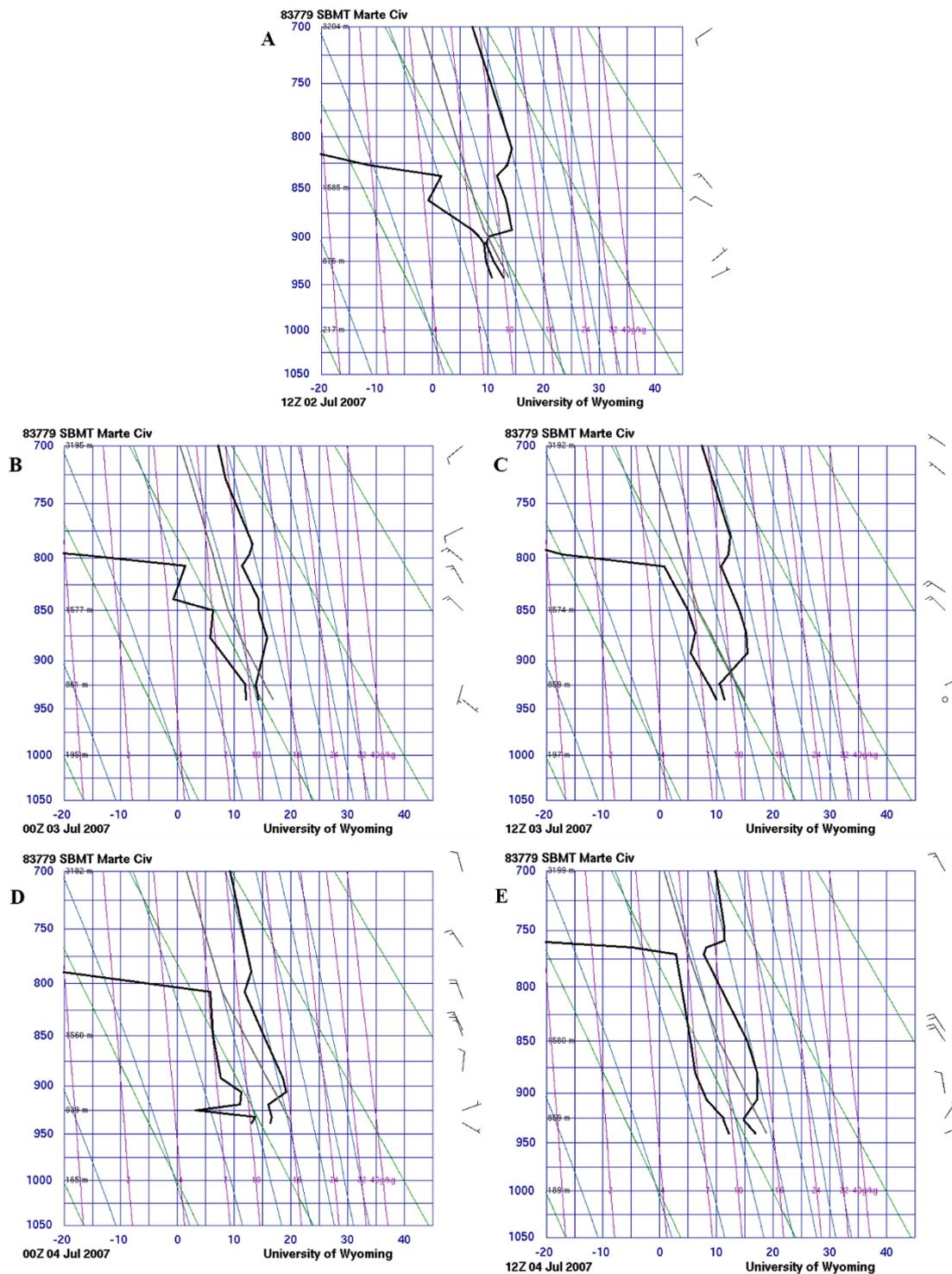


Figura 9 - Radiossondas do Aeroporto Campo de Marte do dia A) 02 de julho às 09 HL e B) 21 HL e C) dia 03 às 09 HL e D) 21 HL e E) dia 04 às 09 HL.

Portanto, este nevoeiro foi classificado como nevoeiro radiativo, tendo injeção de umidade pela BM no dia anterior, com posterior perda radiativa devido à falta de nebulosidade e ventos fracos associados à ASAS.

Outro evento do dia 03 foi registrado das 18 às 00 HL. No nevoeiro que começou às 18 HL, a taxa média de resfriamento do ar foi de $1,2\text{ }^{\circ}\text{C h}^{-1}$ antes da formação do nevoeiro

(entre as 15–17 HL) e de $0,9\text{ }^{\circ}\text{C h}^{-1}$ durante seu desenvolvimento (por aproximadamente 7 horas: 17-00 HL). Nos dias 5, 7 e 8 de julho, quando não houve nevoeiros, as taxas de resfriamento do ar para esse mesmo horário (15 – 17 HL) foram de $1,0$; $0,6$ e $1,0\text{ }^{\circ}\text{C h}^{-1}$ respectivamente. Os dados do ERA5 mostram que a partir das 10 HL até o fim do dia houve convergência dos ventos na região, provavelmente devido aos ventos de noroeste, mais intensos do que no dia anterior. A velocidade do vento e a temperatura atingiram seus valores máximos às 15 HL ($2,5\text{ m s}^{-1}$ e $22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). O nevoeiro das 18 HL se iniciou quando a velocidade do vento diminuiu, a temperatura estava decrescendo e a UR aumentando.

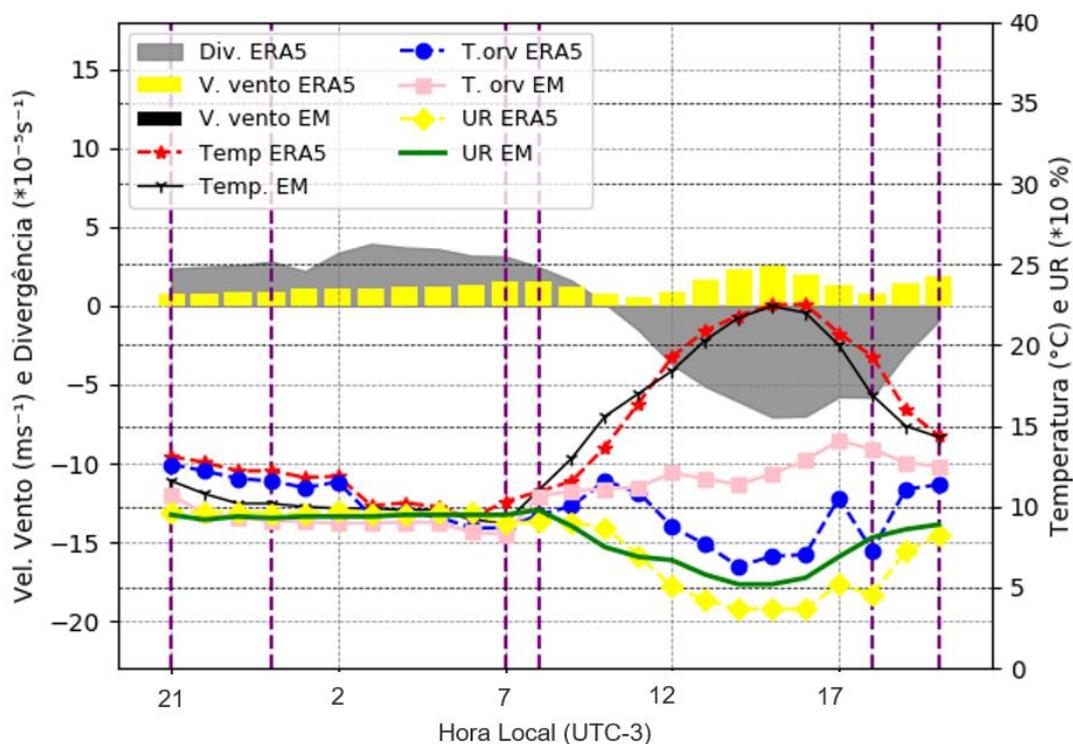


Figura 10 - Idem à Figura 7, mas para ERA5 para o final do dia 02 até a noite do dia 03 de julho de 2007.

Neste dia não houve a penetração da BM na EM/IAG, apesar do campo de vento do ERA5 mostrar que a frente de brisa se aproximou bastante da região (Figura 8B). Isso provavelmente também se deve aos ventos de noroeste mais fortes. Apesar de não haver esta fonte de umidade para a ocorrência do nevoeiro, nota-se que a Td ao longo do dia foi maior do que no dia anterior (Figuras 7 e 10). A EM/IAG está rodeada por vegetação que pode ter favorecido este relativamente alto Td ao longo do dia e que, com o resfriamento noturno, levou à formação do nevoeiro. À noite, na radissondagem das 21 HL do dia 03 (Figura 9D), nota-se uma camada mais seca – com relação ao dia anterior – próxima ao chão, temperatura um pouco acima de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, reflexo do aquecimento diurno devido à

falta de nebulosidade. Os ventos medidos pela radiossonda neste dia foram baixos. Os índices (não mostrados) indicam uma atmosfera bem estável. Portanto, este nevoeiro também foi classificado como nevoeiro radiativo, sob a influência da ASAS com velocidade do vento igual a zero.

4.1.2.2 Nevoeiro advectivo - Dia 20 de julho de 2007

Ocorreu um evento de nevoeiro das 07 – 10 HL e névoa das 10 – 14 HL tendo um total de sete horas de duração. Este evento foi selecionado pois ocorreu com ventos de 3 m s⁻¹ de NE.

Uma FF passou por São Paulo no dia 15 de julho e foi registrada muita chuva nos dias seguintes. Uma outra FF passou entre os dias 18 e 19 de julho. Nas cartas sinóticas de superfície (não mostradas) pode-se notar uma APF de 1020 hPa a nordeste do estado de São Paulo (SP), atuando sobre uma parte de MG, RJ, ES e leste de SP, favorecendo os ventos de norte e nordeste na região da EM/IAG.

Nas observações na EM/IAG, nos dias anteriores houve precipitação devido a FF o que deixou a superfície bastante úmida. No dia anterior ao evento (19), a temperatura mínima foi 7,7 °C, com muita nebulosidade; mas a temperatura máxima atingiu 18,7 °C. Nesse dia também teve formação de nevoeiro e névoa das 07 – 09 HL.

No dia 20 havia apenas nuvens Stratus entre às 07 e 10 HL (período com nevoeiro). Neste evento, a temperatura aumentou a uma taxa de 1,8 °C h⁻¹ durante o desenvolvimento do nevoeiro (de 9,9 para 26 °C entre 07 e 14 HL). Apenas para comparação, esta taxa foi de 2,4 °C h⁻¹ no dia seguinte, quando havia pouca nebulosidade, mas com registro de ventos de 2 m s⁻¹ de NE. A UR foi maior que 89% durante o nevoeiro e na névoa variou de 47 – 75% (Figura 11). A umidade específica foi maior às 11 HL (9,1 g kg⁻¹).

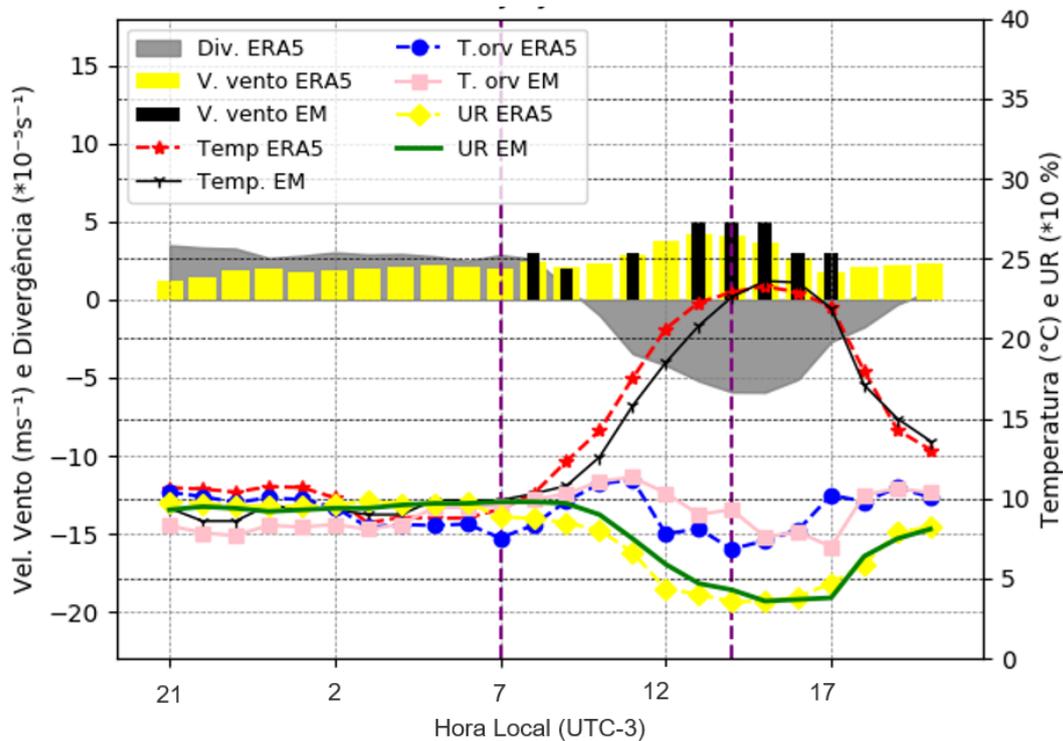


Figura 11 - Idem à Figura 7, mas para o dia 20 de julho de 2007.

Nos campos do ERA5 percebe-se melhor o transporte de umidade coincidindo com o nevoeiro moderado. Nesses campos pode-se notar ventos de norte/nordeste (Figura 12), advectando temperaturas mais frias e ar mais úmido da Serra da Cantareira, local com mais vegetação e mais úmido e frio, quando comparado ao ambiente em que a EM/IAG está inserida. A partir das 13 HL, o vento muda para N e NW, a temperatura aumentou levando à diminuição da intensidade do nevoeiro. Portanto, a umidade da chuva, ocasionada pela FF, mais a umidade transportada da serra e a diminuição da temperatura que levou à ocorrência do nevoeiro neste dia. Este nevoeiro foi, portanto, classificado como nevoeiro de advecção.

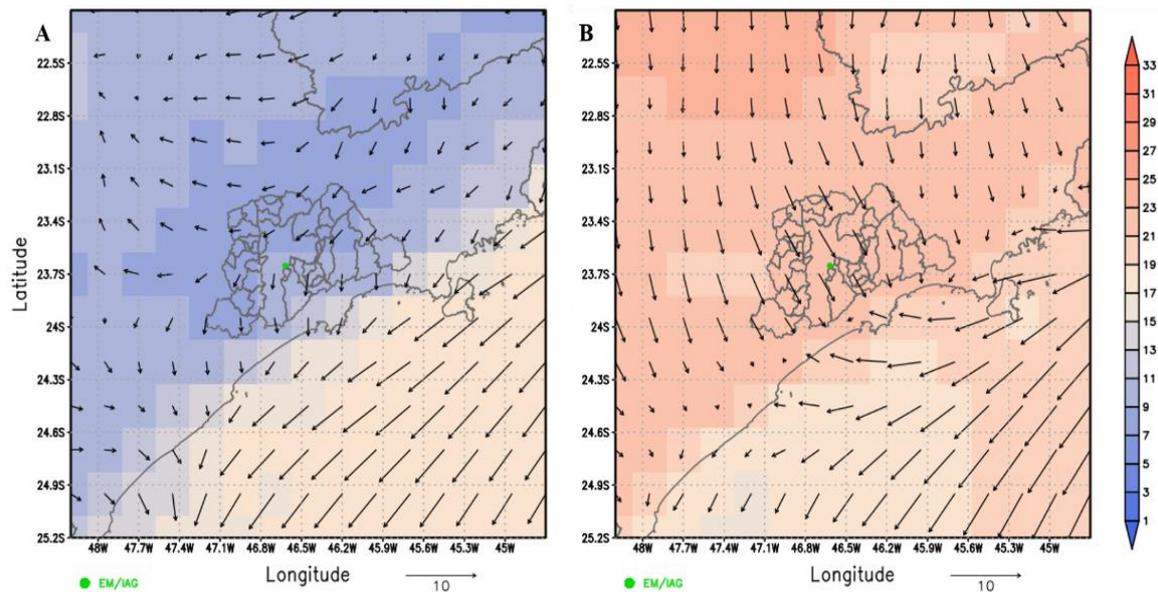


Figura 12 - Campos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor) às A) 07 e B) 13 HL do nevoeiro ocorrido no dia 20 de julho de 2007.

4.1.2.3 Nevoeiro advectivo - Dia 27 de julho de 2007

Um evento de névoa foi registrado entre 18 - 22 HL. No dia 23, uma FF foi acompanhada de precipitação que se prolongou por mais 2 dias. Esta chuva contribuiu para a umidificação do solo, deixando a temperatura do ponto de orvalho mais alta. Outra FF passou no dia 25, quando o acumulado de 24 horas de precipitação foi de 50.3 mm. No dia 26 não houve precipitação, mas teve registro de névoa a partir das 22 HL. Neste dia, a APF atuava sobre a região, colaborando para uma perda de calor da superfície durante a noite. A temperatura mínima do dia foi de 8°C às 23 HL e a máxima foi de $14,1^{\circ}\text{C}$ às 15 HL. No dia 27, a APF ainda atuava sobre a região de São Paulo e seu núcleo se encontrava sobre a Argentina, com uma crista se estendendo para o sul do Brasil e parte do Paraguai (Figura 13A). Em 850 hPa (Figura 13B) as linhas de corrente mostram um padrão de sela, decorrente do escoamento da ASAS, do ciclone associado à frente atuando no Rio Grande do Sul e da APF na Argentina, e em 500 hPa (Figura 13C) o escoamento em São Paulo era de noroeste, estando corrente abaixo de um cavado, com o jato subtropical atuando no Rio Grande do Sul, associado à frente que atua neste estado. Já em 250 hPa (Figura 13D) nota-se o Jato Subtropical atuando sobre o estado de São Paulo, trazendo nuvens do interior para o litoral. Não houve registro de precipitação na EM/IAG, mas foi registrado garoa no mesmo horário do nevoeiro, até às 22 HL. Nas análises sinóticas do dia 28 (Figura 14) às 09 HL, nota-se o deslocamento da APF, trazendo ar frio de sul para São Paulo.

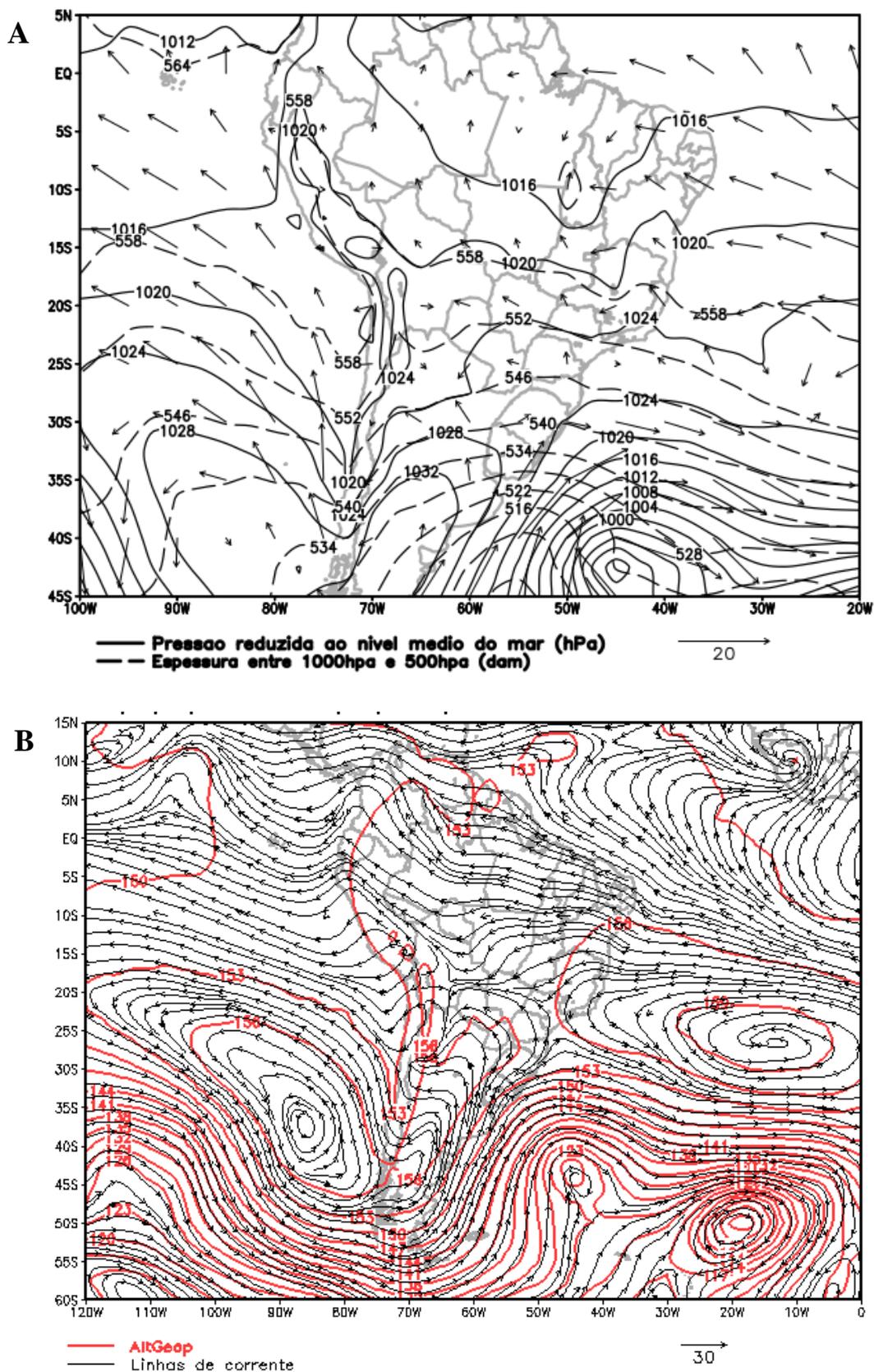


Figura 13 - Cartas sinóticas de superfície (A), 850 hPa (B), 500 hPa (C) e 250hPa (D) para o dia 27 de julho de 2007 às 09 HL. Em superfície são mostradas a Pressão reduzida ao nível médio do mar (hPa, linhas contínuas), espessura entre 1000 e 500 hPa (linhas tracejadas) e vetor vento. Em 850 hPa são mostradas a

altura geopotencial (dam, linhas contínuas vermelhas) e linhas de corrente. Em 500 e 250 hPa são mostradas a altura geopotencial (dam, linhas contínuas vermelhas), linhas de corrente e intensidade do vento (m.s⁻¹, colorido). Fonte: ERA-Interim.

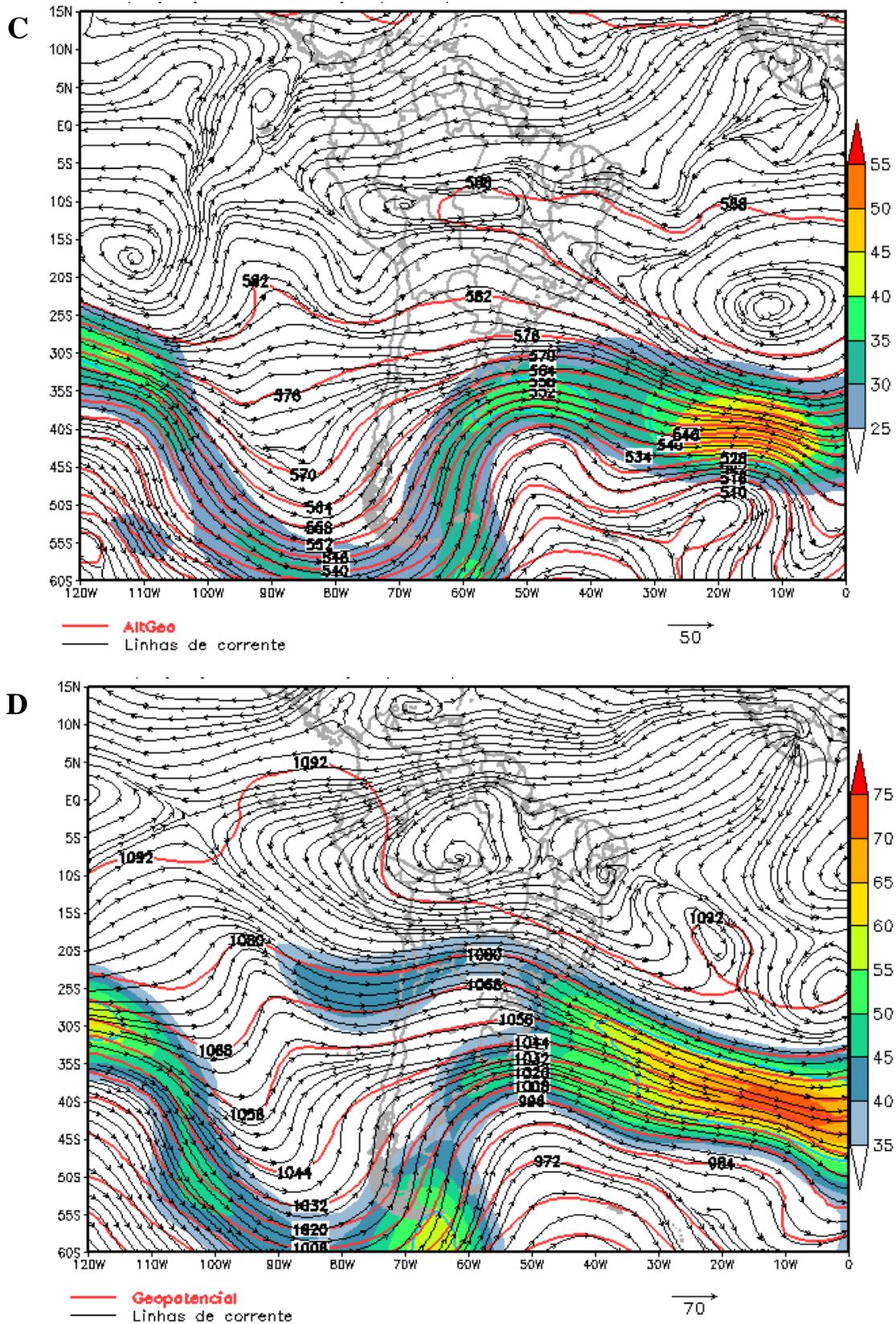


Figura 13 – Continuação.

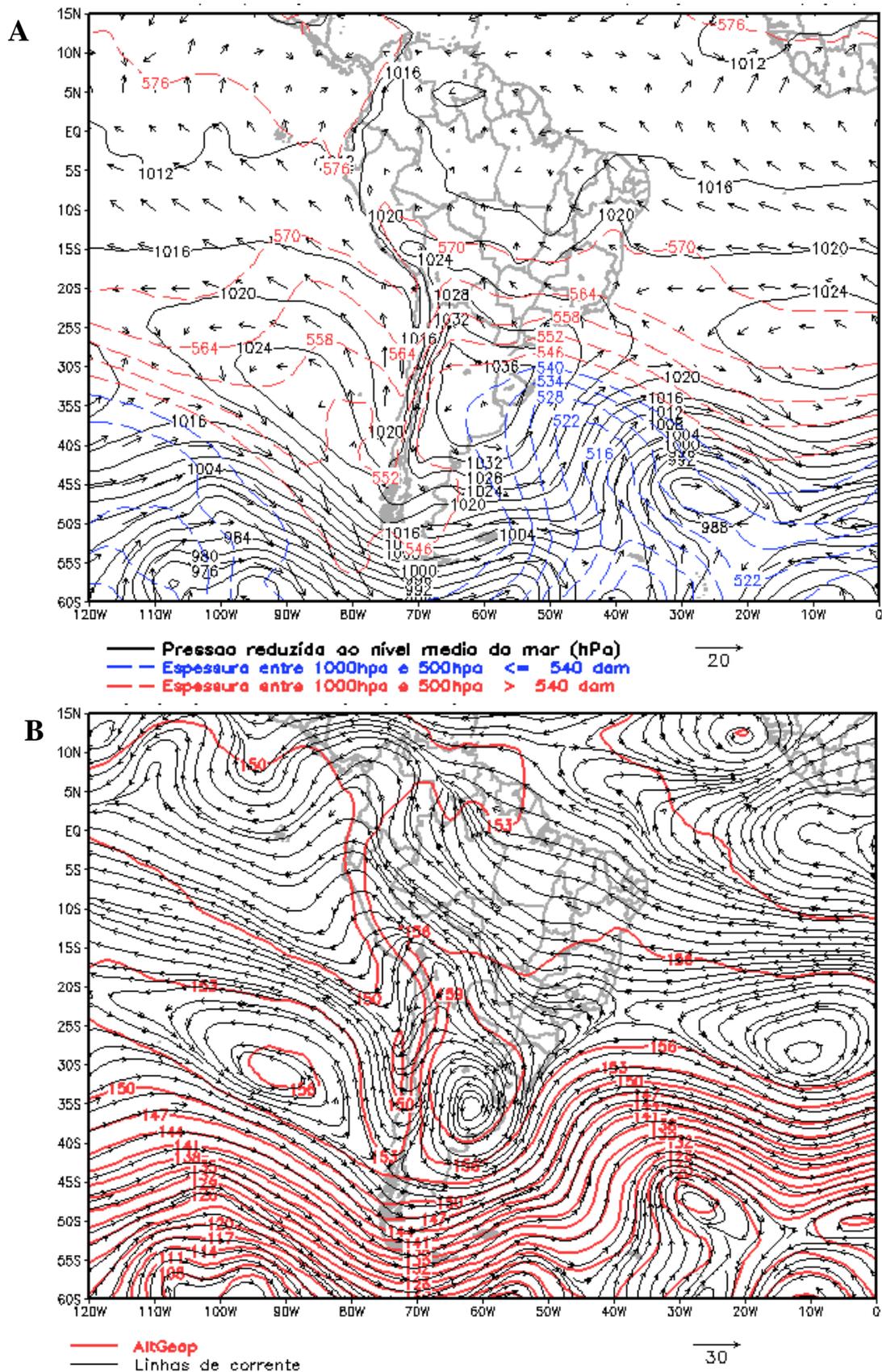


Figura 14 - Idem à figura 13, mas para o dia 28 de julho de 2007 às 09 HL. Fonte: ERA-Interim

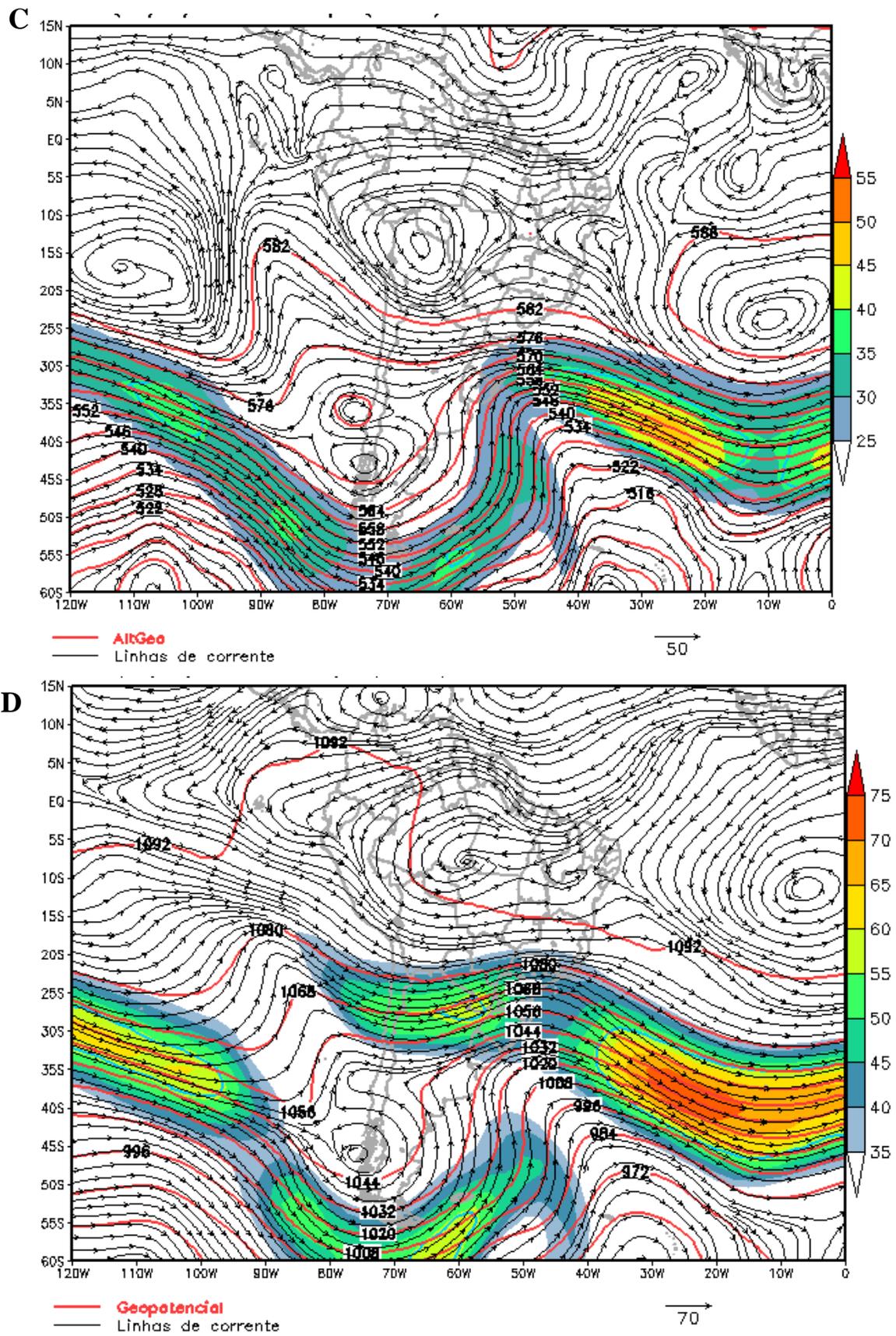


Figura 14 – Continuação.

Nas observações na EM/IAG, na parte da manhã, além da nuvem Stratus havia também outras nuvens baixas, médias e altas como Stratocumulus, Altostratus e Cirrus. A circulação da APF pôde ser observada com os ventos fracos de leste-nordeste entre as 09 e 10 HL. A taxa média de resfriamento do ar foi de $1,6\text{ }^{\circ}\text{C h}^{-1}$ antes da formação da névoa e de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C h}^{-1}$ durante seu desenvolvimento. Os ventos estavam fracos até às 14 HL. Entre 14 e 15 HL, a temperatura atingiu seu valor máximo diário ($17,6\text{ }^{\circ}\text{C}$), mas às 15 HL fluíu um vento de 3 m s^{-1} de sudeste acompanhado de diminuição da temperatura, e aumento da UR e Td (Figura 15), provavelmente associado ao deslocamento da APF para leste, como mostrado na análise sinótica do dia 28 às 09 HL (Figura 14A). A partir das 17 HL a calmaria voltou. Nota-se também que a UR se manteve consideravelmente alta, em praticamente todo o dia.

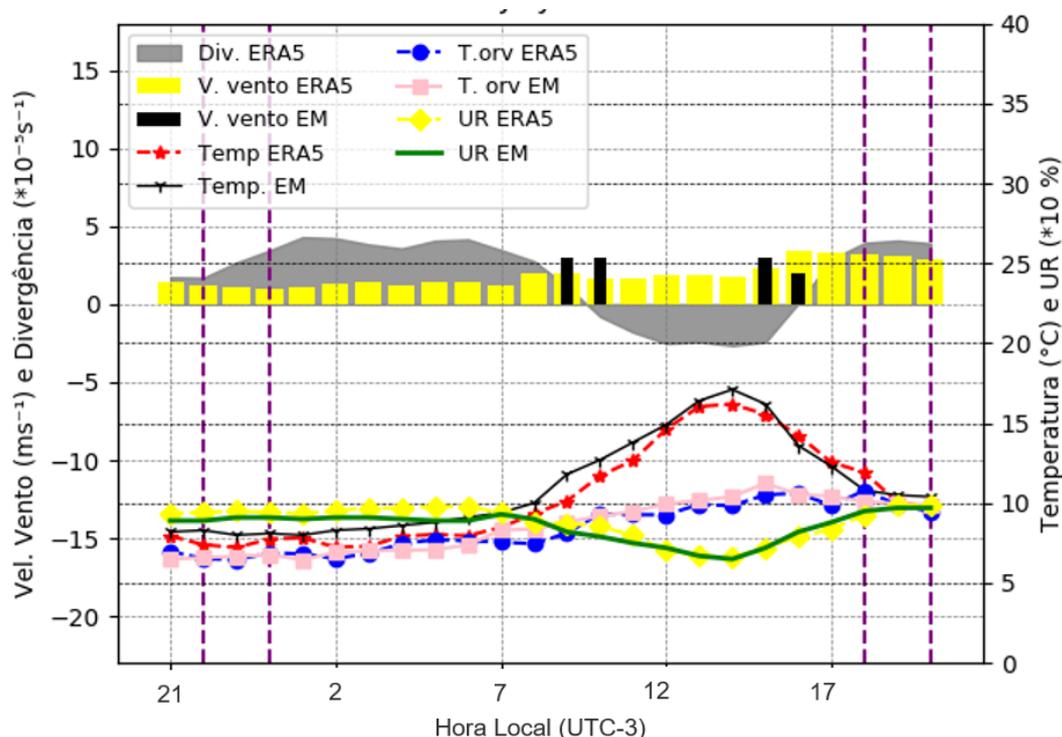


Figura 15 - Idem à Figura 7, mas para o final do dia 26 até a noite do dia 27 de julho de 2007.

Analisando os campos do ERA5, no período antes da ocorrência da névoa registrada (18 - 21 HL), até às 09 HL os ventos são fracos e com orientação praticamente de nordeste. A partir das 10 HL eles começam a se intensificar e a fluírem de sudeste. Conforme o passar do dia, observa-se a temperatura aumentando do interior do continente para o litoral. Para o horário da névoa os ventos ficam um pouco mais intensos e fluem de sul, observa-se que a UR maior ou igual a 93% atingiu o leste do município de São Paulo por volta da 18 HL, cobrindo uma extensa área mais para o final do dia (Figura 16). Essa umidade foi aumentando de leste para oeste, após um período com maior velocidade

do vento (das 15 - 19 HL aproximadamente). A UR sobre o oceano mostrava valores relativamente baixos. Observando também o METAR do aeroporto de Congonhas para o horário do evento de névoa, houve registro de bruma, vento relativamente forte (8 nós) de sudeste, céu encoberto, visibilidade baixa e a temperatura se aproximando da temperatura do ponto de orvalho, o que reafirma o que foi dito anteriormente. Provavelmente, o ar mais frio e úmido, vindo do oceano, foi advectado pela Serra do Mar, pelos ventos da APF, para a região da EM/IAG. No dia 28 pode-se notar, tanto nos dados da EM/IAG quanto nos dados da reanálise, a intensificação da circulação de alta pressão com ventos de sul/sudeste.

Assim, apesar do vento estar fraco na EM/IAG, este evento foi classificado como nevoeiro do tipo advectivo, regido pelos ventos da APF que foi se intensificando com o passar do tempo.

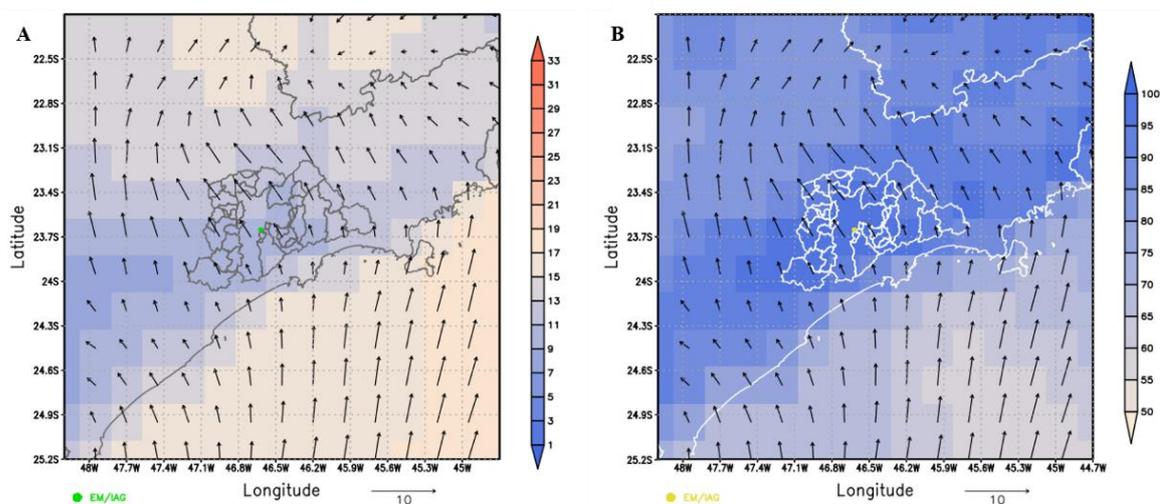


Figura 16 - Campos de A) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e B) umidade relativa (% , colorido) e vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, vetor) para o dia 27 de julho de 2007 às 19 HL.

4.2 Operação Comboio - OC

Após uma análise inicial dos dados oferecidos pela ECOVIAS (Apêndice A), perceberam-se vários períodos sem dados e valores bastante questionáveis. Os dados da OC são os que, aparentemente, podem fornecer melhores resultados. Assim, foi analisada a distribuição das OC's no período disponível: 2002 a 2018. A quantidade de OC's nas Rodovias Anchieta e Imigrantes, bem como na Interligação Planalto são mostradas na Figura 17.

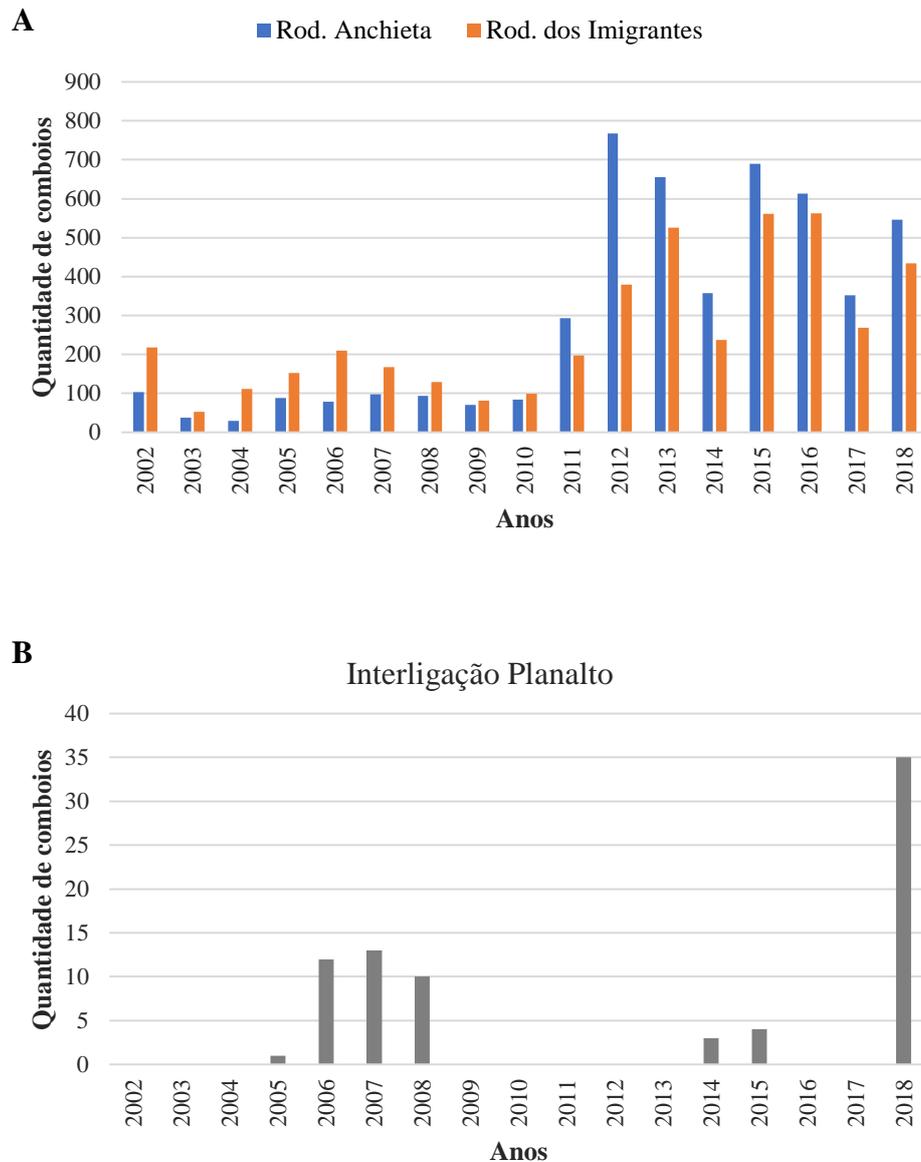


Figura 17 - Quantidade de comboios entre 2002-2018 na (A) Rod. Anchieta e Rod. dos Imigrantes e (B) Interligação Planalto.

Sobre a distribuição anual na Rodovia Anchieta entre 2002 e 2010 o máximo de OC's realizado foi cerca de 100, tendo entre 2003 e 2004 menos de 50 OC's realizados. A partir de 2011 esse número sobe de forma expressiva, tendo no mínimo cerca de 300 OC's, mais que o dobro do período anterior. Segundo funcionários da Ecovias (Albiero *et al.*, 2022), isso se deu devido ao maior acidente que ocorreu na Rod. dos Imigrantes no dia 15/09/2011, envolvendo cerca de 300 veículos em um engavetamento resultando em 29 pessoas feridas e 1 morte. A partir daí a empresa começou a realizar mais OC's. Pode-se observar também que os picos ocorrem em 2012 (768), 2013 (656), 2015 (690), 2016 (613) e 2018 (546).

Na Rodovia dos Imigrantes pode-se observar o mesmo comportamento citado anteriormente, porém com muito mais OC's do que na Rodovia Anchieta no início do período registrado, entre 2002 e 2010. Comparando as OC's da Anchieta com os da Imigrantes, os dois possuem o mesmo comportamento com crescimento expressivo a partir de 2011. As maiores quantidades anuais de OC's na Rodovia dos Imigrantes também ocorreram em 2012 (379), 2013 (525), 2015 (561), 2016 (562) e 2018 (434), mas, com quantidades bem menores do que as da Rodovia Anchieta. É interessante notar, ainda que, nas duas rodovias, os anos de 2014 e 2017 registraram valores bem menores de OC's.

Na Interligação Planalto, as OC's foram registrados no período entre 2005-08, 2014-15 e 2018, como mostra a Figura 17B. Segundo Albiero *et al.* (2022), as OC's que aconteceram na Interligação, antes de 2018 foram OC testes, iniciando oficialmente em 2018. Entre 2006-2008 a quantidade de OC's ficou entre 10 e 13 OC's registrados. Em 2018 o total registrado foi de 35 OC's devido a instalação dos dispositivos de sinalização. As informações sobre as OC's na Interligação Planalto estão um pouco dúbias e, portanto, também foram excluídas das análises posteriores a esta seção.

Tendo em vista que o período disponível para as OC's foi entre 2002 e 2018, foram adicionados os anos de 2016 a 2018 na climatologia dos nevoeiros da EM/IAG (feita inicialmente para o período de 1981 a 2015) para possibilitar uma comparação entre OC's e nevoeiros no IAG. O número de dias com nevoeiros entre 1981 e 2018 na EM/IAG é mostrado na Figura 18. Em média, a EM/IAG registra cerca de 78 dias com nevoeiros por ano. O menor valor registrado foi de 42 no ano de 2016 e o maior valor de 127 foi no ano de 1981 (apesar de 1981 ser o ano com maior acumulado, ele possui também o desvio padrão mais alto dessa série de dados – 1981 a 2018 – equivalente a 5,8 casos). Na Tabela 4 é possível observar que, durante esse período, os dados possuem um desvio padrão de 19 casos.

Tabela 4 - Resultados calculado para série de número total de dias com nevoeiros por ano na EM/IAG.

Período	Total	Média	Desvio Padrão	Valor mínimo	Primeiro quartil	Valor médio	Terceiro quartil	Valor máximo
1981 - 2018	2967	78,1	19,3	42	64,8	78	92	127
2002 - 2018	1202	70,7	17,7	42	59	72	80,0	99

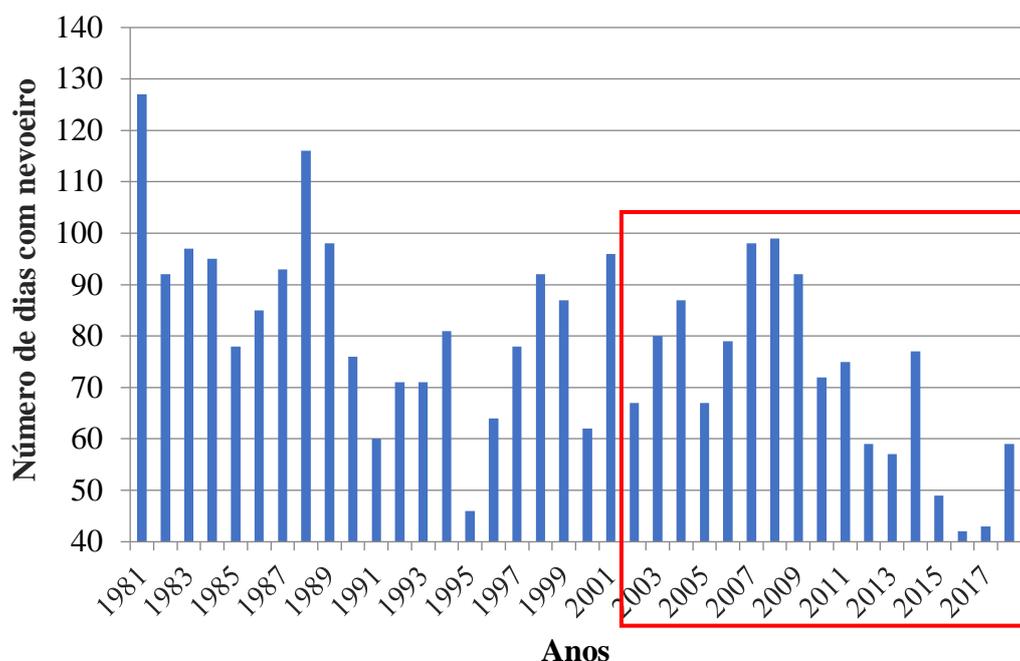


Figura 18 - Total anual de dias com nevoeiro na EM/IAG no período de 1981-2018.

Agora, considerando a partir de 2002 (data de início dos dados da OC – Tabela 4), o valor máximo registrado foi de 99 no ano de 2008. A partir de 2010, todos os valores estão abaixo do quartil superior (92 e 80) em ambos períodos. De uma forma geral, os casos de nevoeiros têm diminuído com os anos. Pode-se observar valores abaixo de 50 nos anos de 1995 (46), 2015 (49) 2016 (42) e 2017 (43). Krusche e Gomes (2009) e Barreto (2013) também identificaram uma diminuição dos eventos de nevoeiro ao longo dos anos em seus estudos.

Analisando a distribuição dos nevoeiros na EM/IAG para o mesmo período do registro de OC's (2002-2018) pode-se notar que os picos se encontram no período entre 2007- 2009 seguido por 2004, com valores superiores a 80 dias. Esses picos ocorrem em diferentes anos em comparação aos picos nas OC's que se deu nos anos de 2012-2013-2015 e 2016 que são os anos com menos casos registrados de nevoeiro na EM/IAG.

Preciso lembrar também que, o número de OC's se refere ao número de operações (pode ter ocorrido mais de uma em um dia), já o número de nevoeiros no IAG, neste caso, se refere aos dias que ocorreram nevoeiros (não levando em consideração se ocorreu mais de uma vez no dia).

Ao comparar as distribuições mensais de OC's nas Rodovias Anchieta e Imigrantes, nota-se que possuem uma distribuição bastante similar (Figura 19). De janeiro a maio, as OC's chegaram próximas a 200, sendo fevereiro o mês com menor registro (~100). A

partir de junho essa quantidade começou a aumentar (acima de 300), atingindo seu pico no mês de outubro, com aproximadamente 1000 e 950 registros na Anchieta e Imigrantes, respectivamente. Sazonalmente, o verão e outono são as estações com menos OC's (~650) e a primavera é a estação com maior número (~2300). Na Interligação Planalto não há dados de OC's nos meses de março e maio. O mês de outubro também é o mês com maior quantidade de OC's (~32) seguido por novembro, com aproximadamente 20 OC's. Como já observado anteriormente, a representatividade dos dados de OC's na Interligação Planalto é questionável.

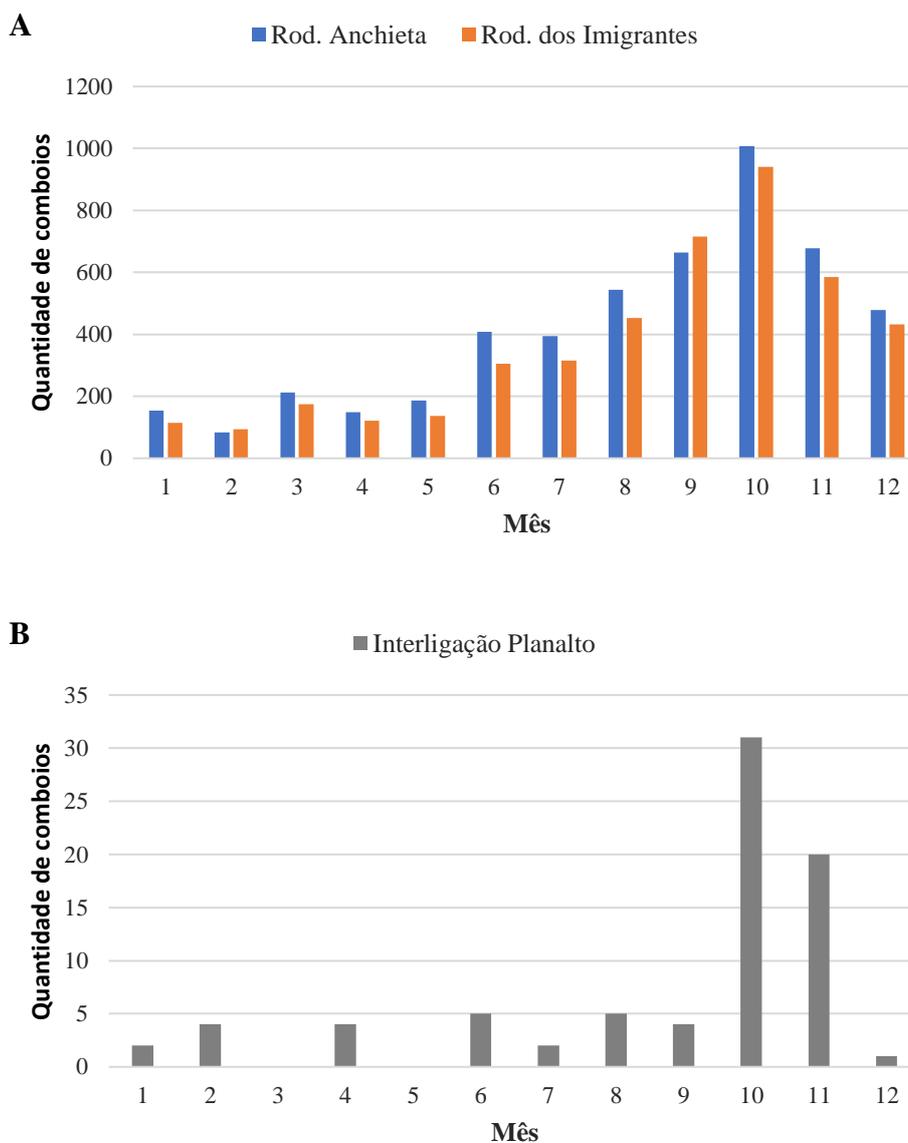


Figura 19 - Climatologia mensal de Operações Comboio entre 2002-2018 na Rod. Anchieta e Rod. Dos Imigrantes (A) e Interligação Planalto (B).

Na EM/IAG, o maior acumulado mensal de dias com nevoeiro (Figura 20) do período foi em junho com total de 428 casos, com uma média de 11,4 ocorrências, seguida

por julho com 404 casos e agosto com 369 casos, ou seja, o nevoeiro ocorre com maior frequência no inverno, confirmando estudos de Lima (1983), Machado (1993), Perrela (1998), Cossich *et al.* (2009), De Paula *et al.* (2015), Da Silva (2018), entre outros.

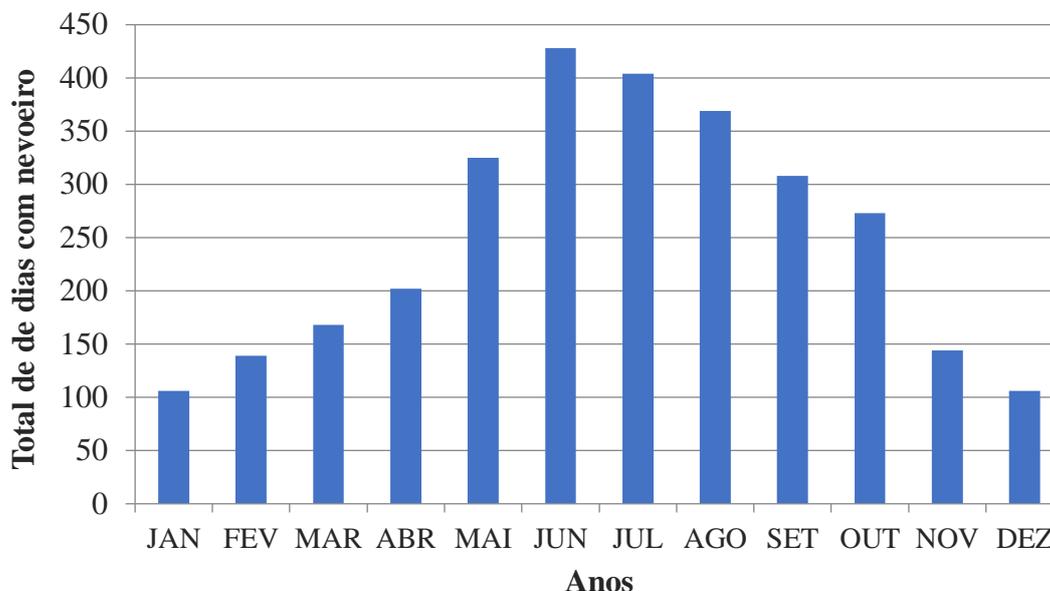
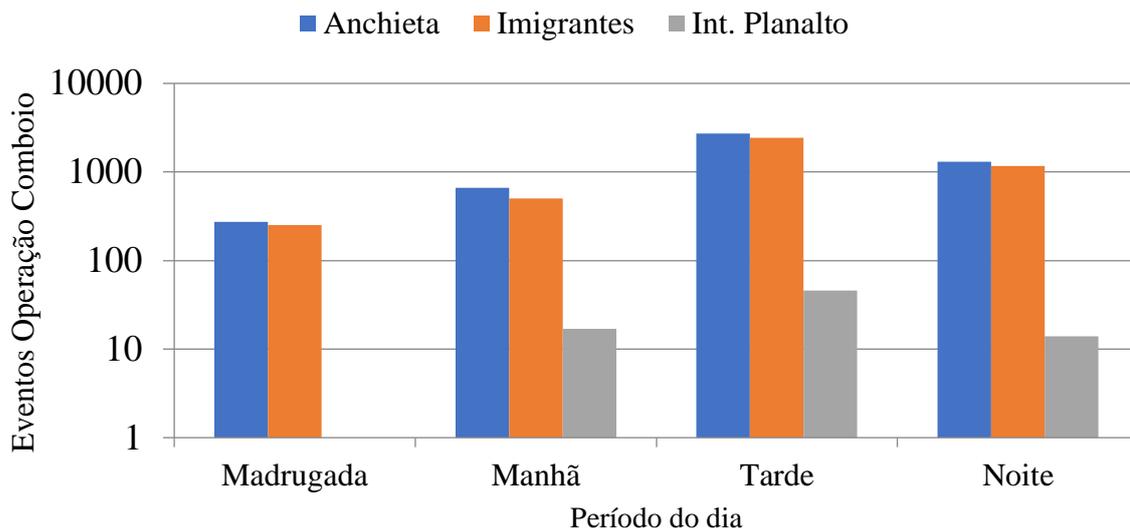


Figura 20 - Média mensal de dias com nevoeiro na EM/IAG no período de 1981-2018.

Analisando a distribuição horária dos OC's (Figura 21), na Rod. Anchieta (RA) e na dos Imigrantes (RI) o número de OC's para cada período variou de forma similar. Durante a madrugada, não foram iniciados OC's na Interligação Planalto, na RA, 274, e na RI, 253 (2002-18). De manhã, foram iniciados 661 OC's na RA, 500 na RI e 17 na Interligação. A tarde foi o período com mais OC's: 2701 na Anchieta, 2434 na Imigrantes e 46 na Interligação. Esse número mais elevado pode estar associado com a entrada da BM no período da tarde, que traz mais umidade para a região. O período noturno ficou em segundo lugar, com 1296 na RA, 1171 na RI e 14 na Interligação.

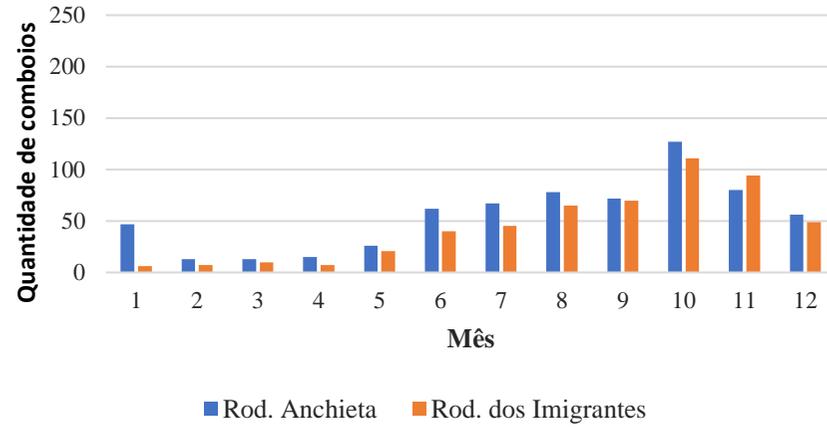


Madrugada: 00:00-05:59; Manhã: 06:00-11:59; Tarde:12:00-17:59 e Noite:18:00-00:00 H.
Figura 21 - Distribuição de eventos de OC iniciados em cada período do dia entre 2002 - 2018.

Para a escolha de um ano a ser estudado, foram plotados gráficos da distribuição mensal das OC's na Rodovia Anchieta e na Rodovia dos Imigrantes (Figura 22) nos anos de 2013 a 2018. A escolha do ano de início (2013) foi em razão de estar dentro do período do aumento de números de OC's (2011 a 2018) e devido ao período de dados das estações da ECOVIAS (não possui dados entre 2010 a início de 2013). Há uma grande variação anual de OC em ambas as rodovias. Na Figura 22, para a Rodovia Anchieta, observa-se que o ano com o comportamento mais similar ao da climatologia é o ano de 2013 onde tem-se um pico no valor de dados no mês 10 (outubro) diminuindo em suas "extremidades". Já o ano que teve a distribuição mais próxima à distribuição dos nevoeiros registrados na EM/IAG foi o ano de 2018, com os maiores valores no inverno.

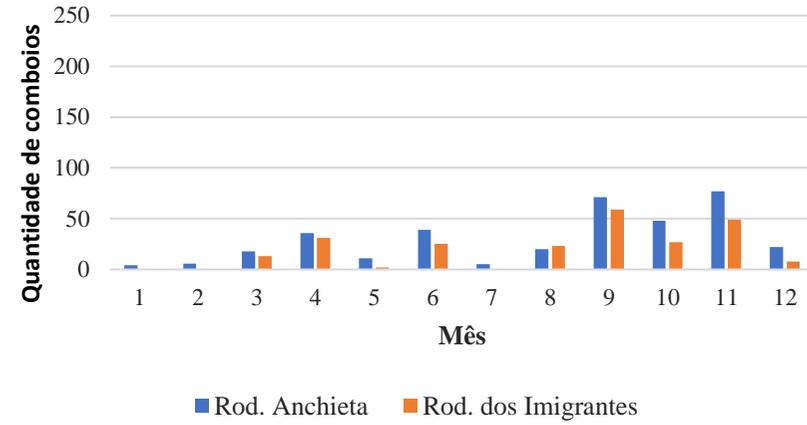
A

2013



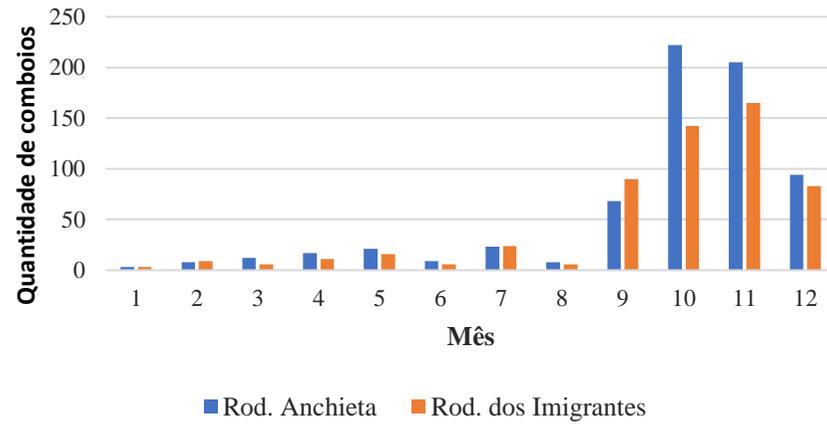
B

2014



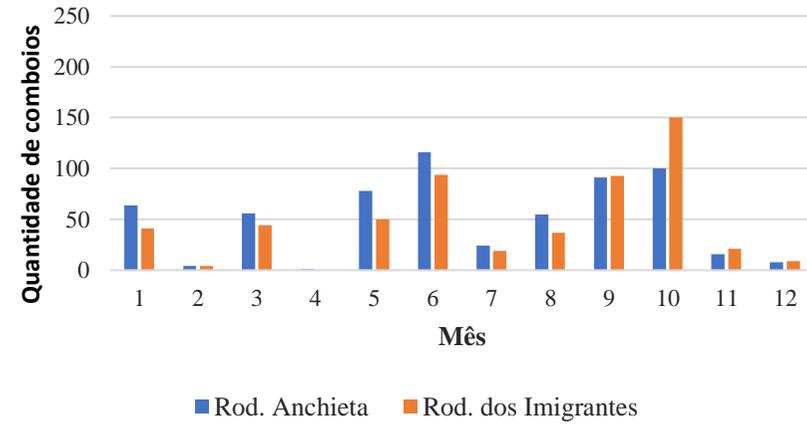
C

2015



D

2016



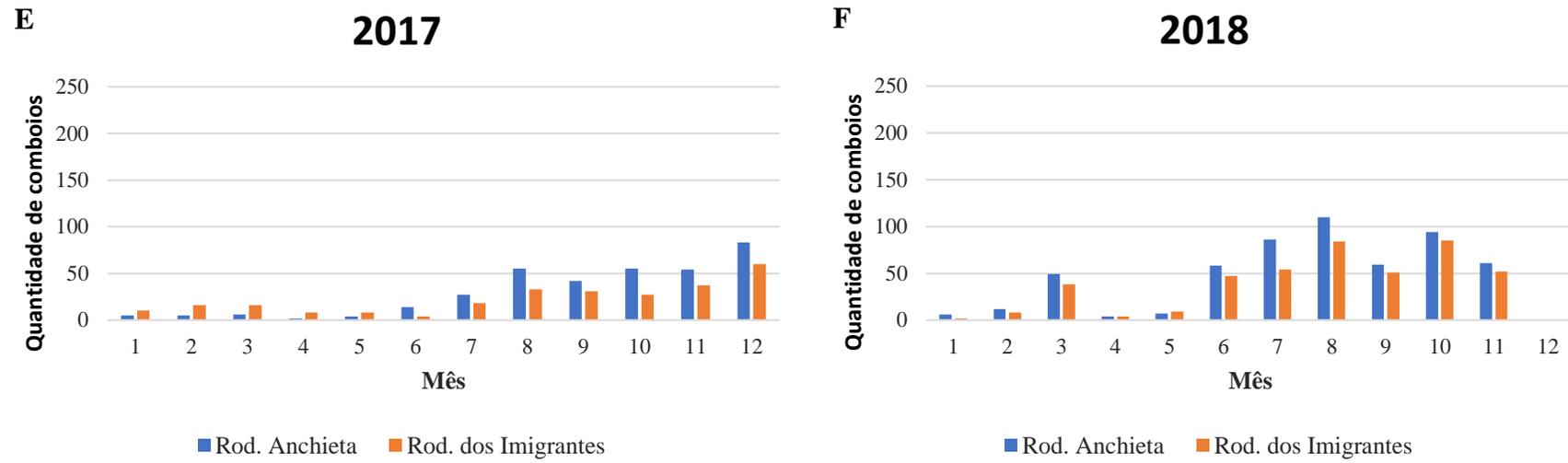


Figura 22 - Quantidade de Operações Comboio mensal para os anos de 2013(A), 2014(B), 2015(C), 2016(D), 2017(E) e 2018(F) na Rodovia Anchieta e dos Imigrantes.

Na Rodovia dos Imigrantes, o ano de 2013 também é o que melhor representa a série climatológica (2002-2018), onde possui os maiores valores concentrados entre os meses de setembro, outubro e novembro. Já olhando a distribuição dos nevoeiros registrados na EM/IAG nenhum ano teve uma distribuição semelhante ou com maiores valores no inverno.

Como os anos são bem distintos, optou-se por escolher o ano de 2015 para estudo, por ser o ano com o maior número de OC's.

4.2.1 Operação Comboio em 2015

Para o ano de 2015 foi feita a contagem do número de OC's para cada dia em cada rodovia e calculada a diferença (Apêndice C e Figura 23). Na distribuição mensal da OC durante esse ano (Figura 23) é notável o grande número de casos no fim do ano, de setembro a dezembro, chegando a 226 (150) OC na RA (RI) no mês de outubro e 205 (165 na RI) em novembro. A RA possui maiores acumulados em grande parte do ano. Isso se deve também ao fato da parte da RA que é mais afetada por nevoeiros estar em uma região de vale. Há casos como, por exemplo, no dia 14 de setembro, que a diferença entre a quantidade de OC nas rodovias chegou a 15 operações (14 – RA em 3 OC's e 29 – RI em 1 OC's).

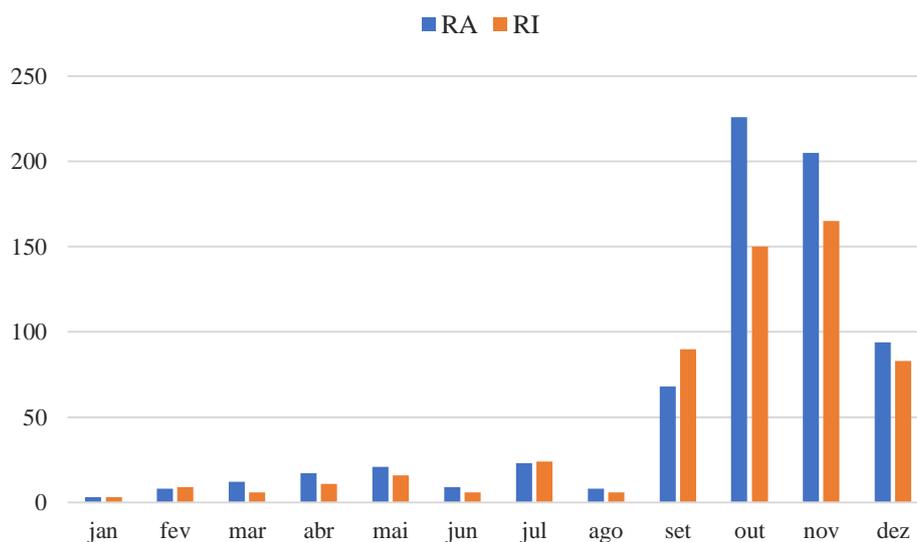


Figura 23 - Acumulado mensal de OC no ano de 2015 nas Rod. Anchieta (azul) e Rod. dos Imigrantes (laranja).

Lembrando que num mesmo dia pode haver várias caixas de OC, a Figura 24 apresenta a quantidade de dias para cada mês com OC em 2015, podendo-se notar que a

distribuição mensal de dias com OC é similar ao acumulado de caixas de OC durante o ano.

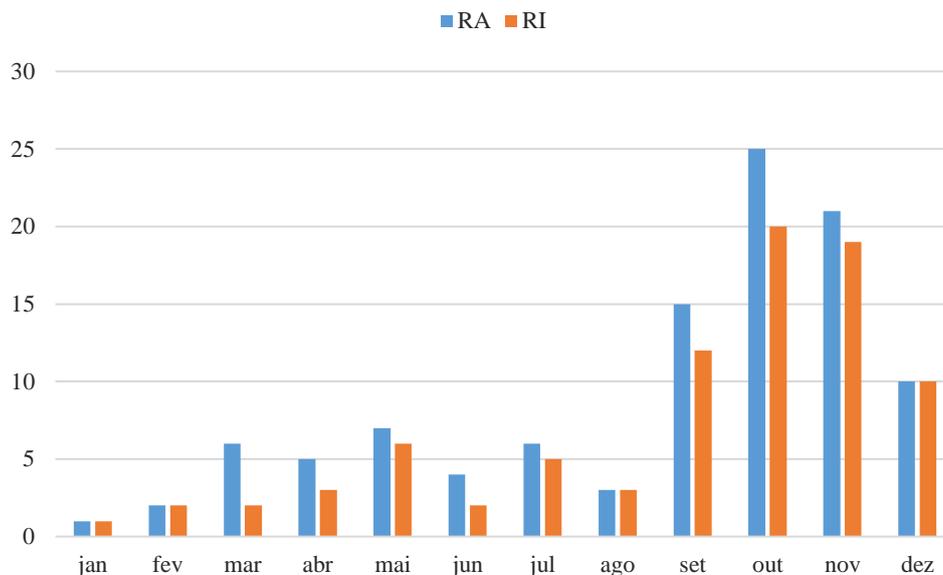
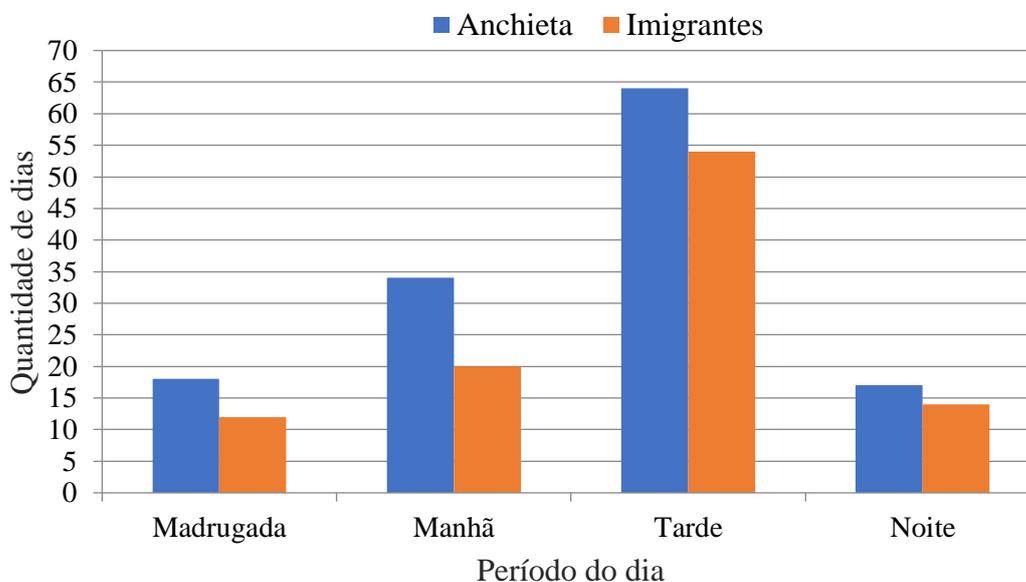


Figura 24 - Acumulado mensal de dias com OC nas Rod. Anchieta (azul) e Rod. dos Imigrantes (laranja) no ano de 2015.

Com os dados de OC da ECOVIAS, observando os horários de início e término de bloqueio, foram separados os eventos contínuos de cada dia, colocando a hora inicial e final para cada evento (Figura 25). Assim, foi encontrado mais OC iniciando no período da tarde (64 RA 54 RI), seguido pela manhã (34 RA e 20 RI). Durante a madrugada e a noite o número foi quase a metade dos ocorridos no período da tarde (entre 12 e 17 OC's).



Madrugada: 00:00-05:59; Manhã: 06:00-11:59; Tarde:12:00-17:59 e Noite:18:00-23:59 H. Local

Figura 25 - Quantidade de dias com OC iniciados em cada período do dia em 2015.

4.2.1.1 Sistemas meteorológicos associados a OC no SAI em 2015

Ao longo de 2015, foram implantadas aproximadamente 130 OC em 106 dias. Para cada OC, foi feita uma análise sinótica, de meso-escala e dos dados meteorológicos, com a utilização de imagens de satélite ou de radar para identificar o sistema meteorológico associado ao início da OC. Um resumo desta análise se encontra no Apêndice B. Algumas OC que foram implementadas em horários diferentes, mas tiveram a mesma causa, foram consideradas como apenas um evento. As OC que foram implementadas somente em uma das rodovias foram descartadas. Após estas considerações, foram consideradas 87 OC para o ano de 2015.

Analisando os mapas sinóticos e de mesoescala, foram identificados os seguintes sistemas (sigla da Figura 26 e a quantidade de OC): Brisa Marítima (BM, 33), Pré-frontal (PF, 1), Frente (F, 11), Alta pós-frontal (APF, 27), Instabilidades associadas a cavados, sistemas convectivos ou chuva convectiva (Instabilidades, 8), Sistema não-identificado, entretanto, havia vento e transporte de umidade durante a OC (Advecção, 7). A BM influencia ao longo de todo o ano, aparecendo com mais frequência na primavera. O sistema frontal em suas diversas etapas (pré-frontal, passagem da frente e pós-frontal) é o sistema meteorológico que mais aparece associado à OC, totalizando 39 casos. No ano de 2015, entre abril e dezembro passaram entre 4 e 5 FF por mês na região da OC (GREC, 2022). Sua influência foi maior a partir de maio, mas nota-se sua grande participação, assim como a BM, ocorreu na primavera.

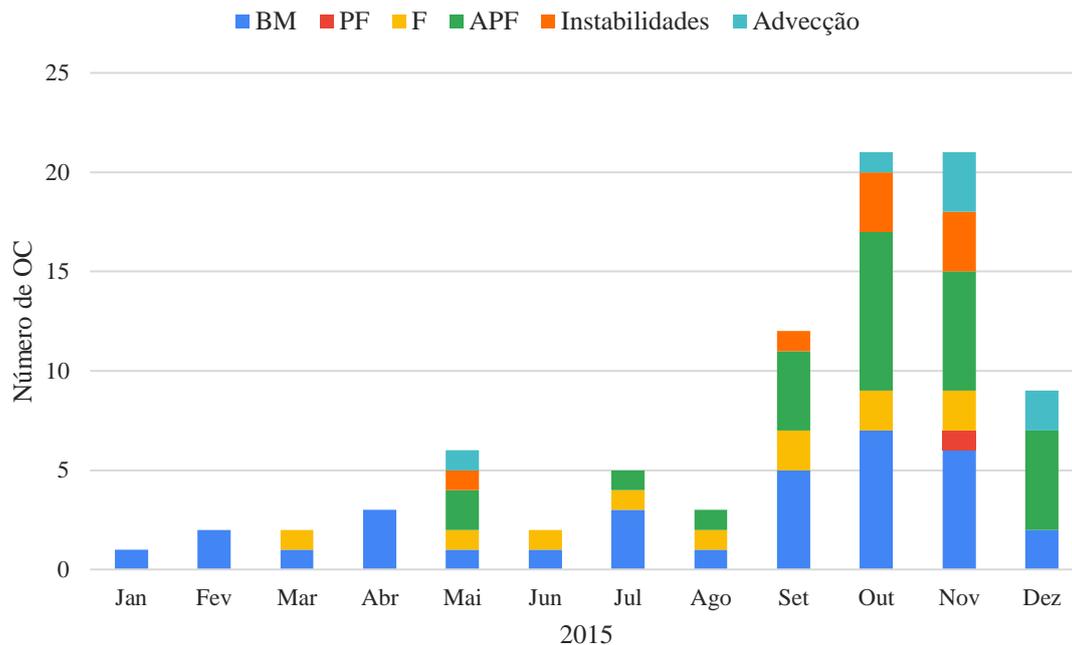


Figura 26 - Sistemas meteorológicos associados a OC no ano de 2015.

A atuação da BM na OC ocorre de diferentes formas:

- i. A entrada da BM ocorre entre 11 e 15 HL, mas a OC só ocorre após 1 a 3 horas e, em geral, persistindo por 1 a 6 horas (16 casos);
- ii. A entrada da BM ocorre entre 10 e 16 HL e a OC ocorre logo em seguida, persistindo no mínimo por 5 horas, atingindo o máximo de 11 horas (12 casos);
- iii. A entrada da BM ocorre entre 13 e 18 HL, mas a OC só ocorre após às 21 HL, durando entre 3 e 6 horas, com a saturação da atmosfera ocorrendo devido tanto ao aporte de umidade trazido pela BM quanto pelo resfriamento noturno.

Com relação ao sistema frontal:

- i. A aproximação da frente (pré-frontal, 1 caso) ou a própria entrada da frente (10 casos) provocou precipitação (até $6,1 \text{ mm h}^{-1}$ em Itutinga), que foi a fonte de umidade para a geração de nevoeiro e logo a seguir, a implementação da OC (duração entre 3 a 13 horas); 7 deles iniciando à tarde, os outros 3, de manhã e o caso da pré-frontal, iniciando de madrugada.
- ii. Os ventos de sudeste (de $0,4$ a $1,6 \text{ m s}^{-1}$) associados à situação pós-frontal, trazendo umidade do oceano para a Serra do Mar, adicionado ao

resfriamento desta situação sinótica contribuíram em 26 casos de OC, com duração de 2 até 18 horas. Na maior parte dos casos (25) houve registro de precipitação em Itutinga durante a OC (até $3,8 \text{ mm h}^{-1}$), sendo que em 7 destes houve também registro de chuva na EM/IAG. O período de início das OC's variou entre madrugada (4), manhã (8), tarde (10) e noite (4).

Em 7 casos de OC, não foi possível identificar nenhum sistema meteorológico, apenas uma advecção de umidade persistente do quadrante Sul (1 de Sul, 5 de SE e 1 de SW), com ventos entre $0,7$ e $1,3 \text{ m s}^{-1}$ e registro de precipitação em Itutinga antes da OC. A maior parte destas OC foram iniciadas no período da manhã (05 às 09 HL), uma iniciou às 14 e outra às 21 HL, com durações variando entre 3 e 17 horas.

Por fim, 8 casos de OC foram associados a instabilidades – tempestades convectivas associadas a cavados em níveis médios (4) ou sistemas convectivos de mesoescala (4) que provocaram chuva na Serra ou próximo a ela, servindo de fonte de umidade para o nevoeiro. Os horários de início da OC também variaram, com 2 iniciando no período da manhã, 3 à tarde e 3 de madrugada.

Assim, diferentemente do que foi realizado na EM/IAG, não foi possível separar os nevoeiros em advectivos ou radiativos na Serra do Mar. Na maior parte dos eventos, nota-se a importância da Serra do Mar para a formação do nevoeiro orográfico; em outros, a abundância da vegetação como fonte de umidade também é perceptível e, por fim, alguns nevoeiros são mais abrangentes, como por exemplo, nevoeiros frontais.

Para entender as diferenças entre as diferentes classificações, foram feitos estudos de caso para os dias: 21 de julho (nevoeiro frontal), 19 de agosto (nevoeiro orográfico associado à circulação de uma frente), 14 de setembro (nevoeiro orográfico associado à circulação de uma APF), 21 de setembro (nevoeiro orográfico associado à circulação da BM) e 23 de novembro (nevoeiro orográfico associado a instabilidades) de 2015.

4.2.2 Névoas e nevoeiros na EM/IAG em 2015

Em 2015 (Apêndice D) ocorreram 50 casos de névoas/nevoeiros em 48 dias o que, comparado com o inverno de 2007 quando foram registrados 49 casos em 43 dias, mostra uma grande diminuição nos eventos. Houve 45 casos de névoa (1 o nevoeiro diminui de intensidade), 5 de nevoeiro e somente 1 de nevoeiro denso. Dentro dos 50 casos: 2 iniciaram de madrugada, 31 durante a manhã, 5 à tarde e 12 no período da noite. Os

eventos que não possuem a hora inicial definida (simbolizados com "...") foram considerados como iniciados pela manhã.

As mudanças climáticas, assim como a qualidade do ar, é um fator para a diminuição do nevoeiro pois, alguns estudos (Vautard *et al.*, 2009; Williams *et al.* 2015), indicam que uma diminuição do nevoeiro ocorre com mais frequência junto com a urbanização devido ao, por exemplo, efeito de ilha de calor urbana que pode levar ao aumento da temperatura do ar e, portanto, à diminuição da umidade relativa, desde que não haja mecanismos de *feedback* que substituam o efeito da temperatura (Klemm e Lin, 2016).

Para melhor analisar os sistemas meteorológicos atuantes nesses dias, distribuídos ao longo do ano, foi feita a Figura 27 com base nas informações de carta sinótica, dados do ERA5 e dados meteorológicos das estações.

Pode-se observar que a BM foi o sistema que mais contribuiu para a formação dos nevoeiros ao longo deste ano (22 casos), seguido pela APF (15 casos) e pela FF (5). Os sistemas convectivos (SC) atuaram mais no final do verão (5 casos) e os eventos que ocorreram apenas por resfriamento aconteceram no inverno (3). A influência das frentes e APF se concentraram a partir de junho (Figura 27).

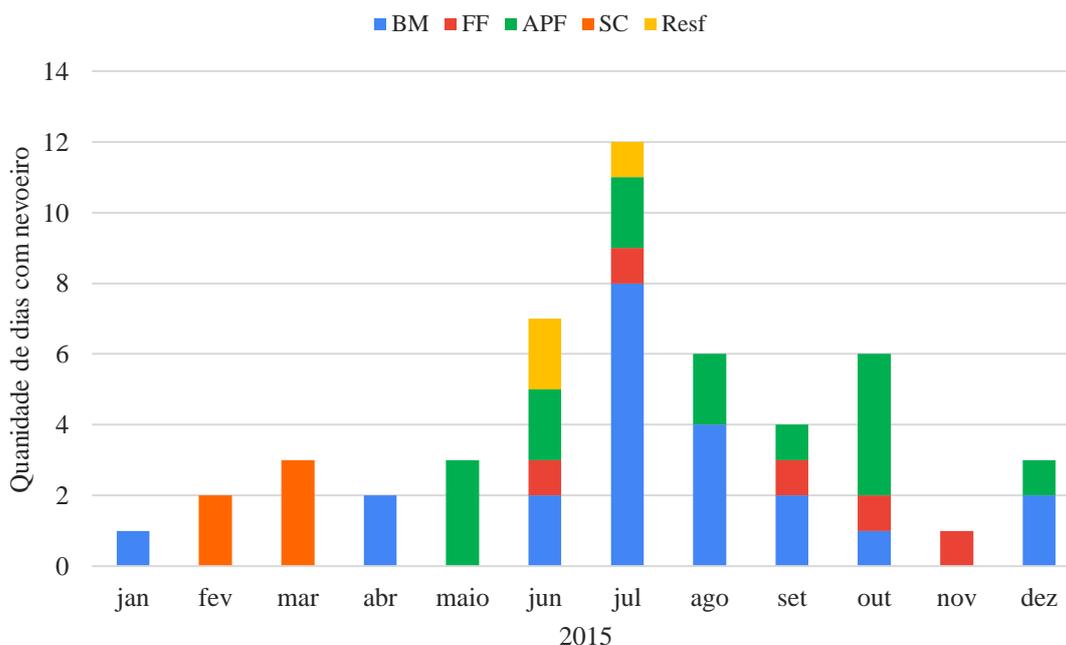


Figura 27 - Sistemas meteorológicos que causaram o fenômeno de névoa/nevoeiro na EM/IAG no ano de 2015.

4.2.3 Climatologia dos dados da Estação de Itutinga – EM/Itutinga

4.2.3.1 Comparação da média horária da série com a média horária dos dias em que ocorreram OC

Na comparação da média horária dos dados meteorológicos de Itutinga durante o ano de 2015 com a média horária dos dias em que ocorreram OC, foi possível notar que, para a variável temperatura (Figura 28), nesses dias os valores ficaram abaixo da média mensal principalmente das 10 – 20 HL em grande parte do ano, exceto no mês de abril, onde os valores nesses dias ficaram 0,1 - 2,0 °C mais altos neste intervalo de tempo. Entre o período das 00 - 05 HL os valores para OC ficaram iguais/acima da média do ano em todos os meses exceto em dezembro e janeiro. Durante os meses de março, maio, outubro e novembro as curvas ficaram bem próximas, notando que os meses de outubro e novembro tiveram praticamente todos os dias com OC.

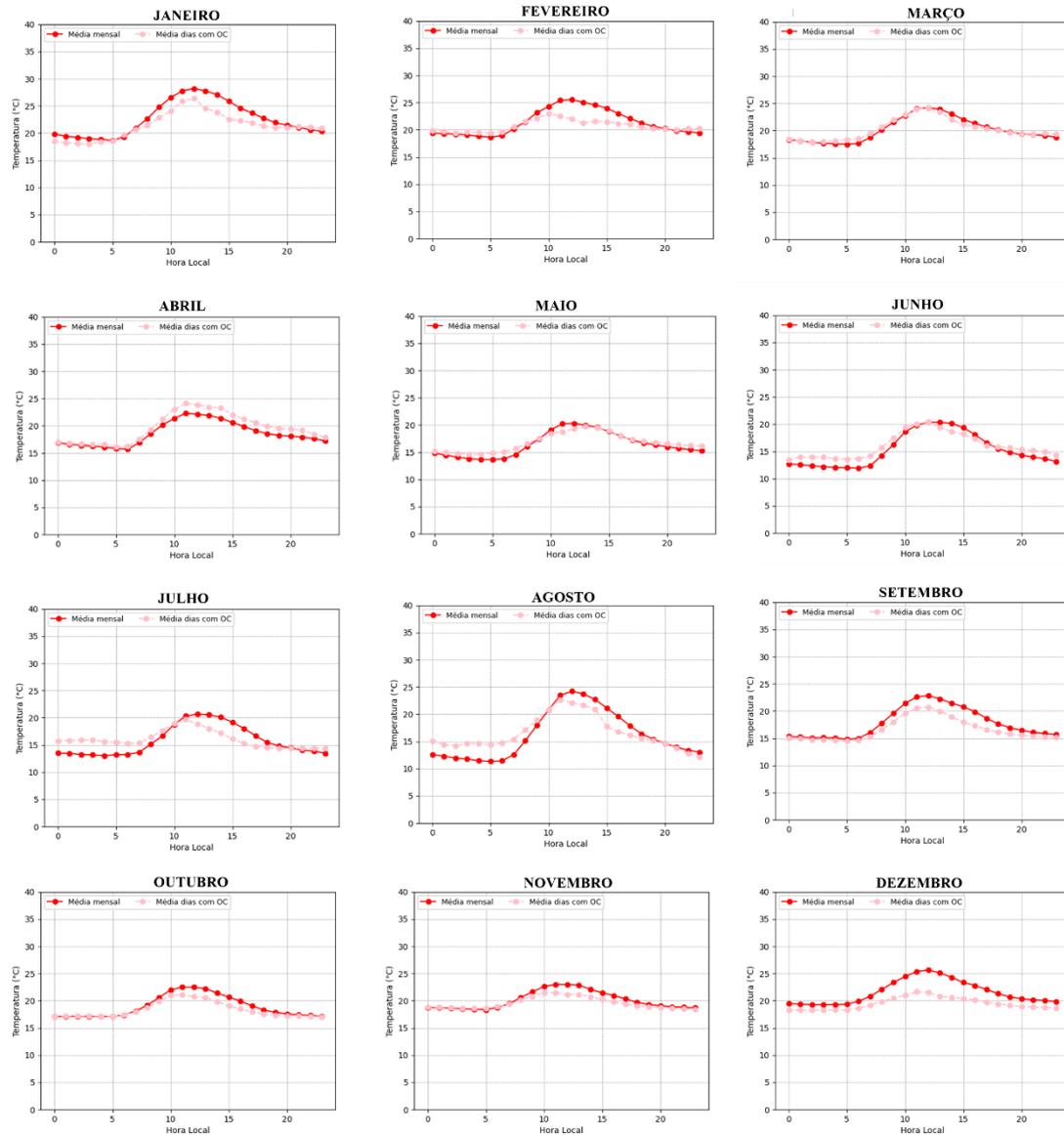


Figura 28 - Média horária da temperatura (°C) da EM/Itutinga para cada mês do ano de 2015 e para dias com OC.

A média da UR nos dias com OC (Figura 29) foram, em grande parte, iguais e/ou superiores à média de 2015. Entre as 00 - 06 e 19 - 23 HL foram os intervalos em que os dados de ambas as séries ficaram mais próximos e mais próxima a 100%. Os meses de julho e agosto foram os que tiveram as curvas mais diferentes. Em agosto, foram observados os menores valores 65% (71%) em 2015 (OC) e as madrugadas nos dias de OC foram mais secas. A média da umidade específica (Figura 30) nos dias com OC ficou acima da média anual na maior parte do tempo, durante todo o ano. A partir de setembro, as séries se aproximam, tendo pouca diferença entre elas.

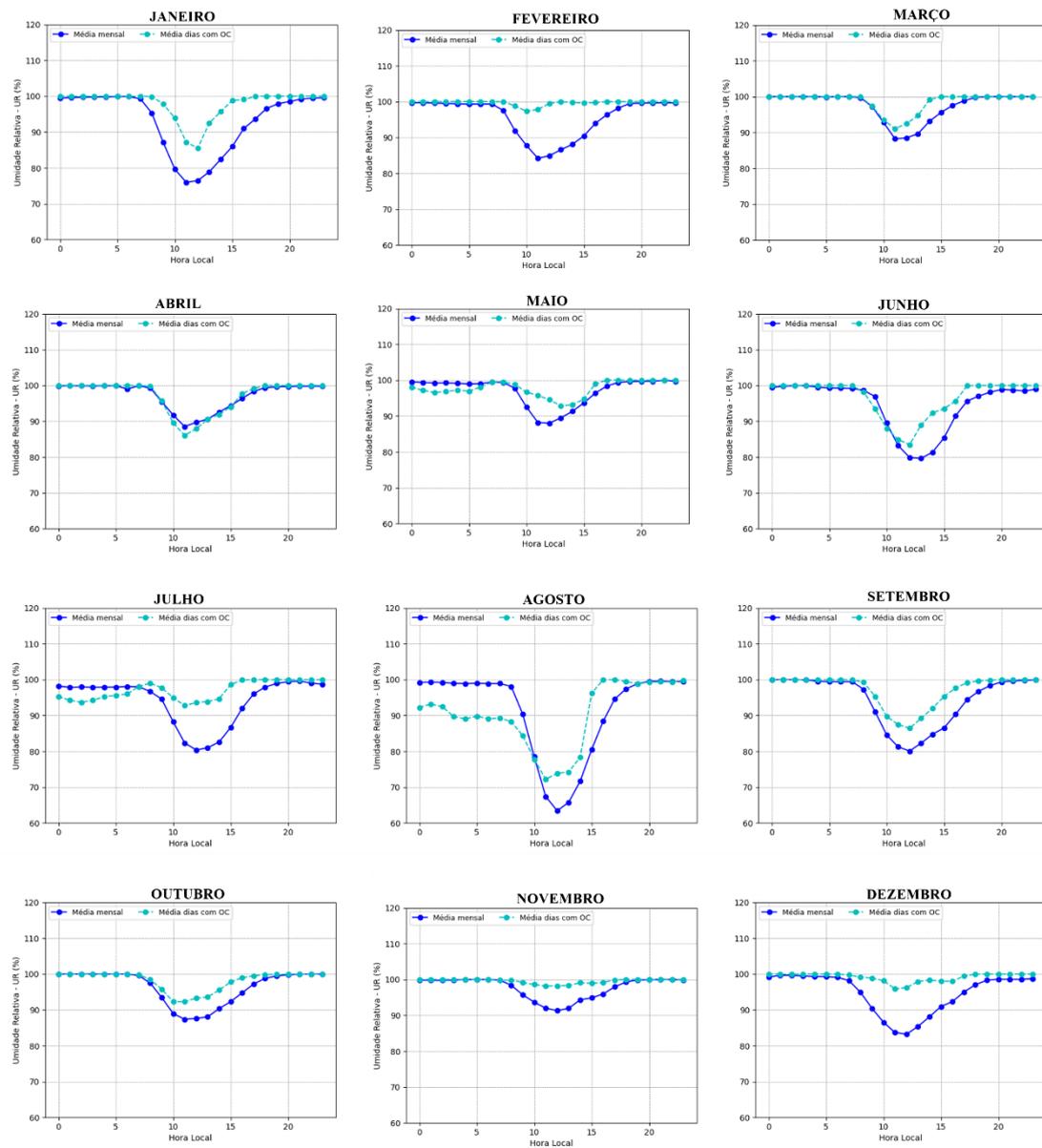


Figura 29 - Média horária da umidade relativa (%) da EM/Itutinga para cada mês do ano de 2015 e para dias com OC.

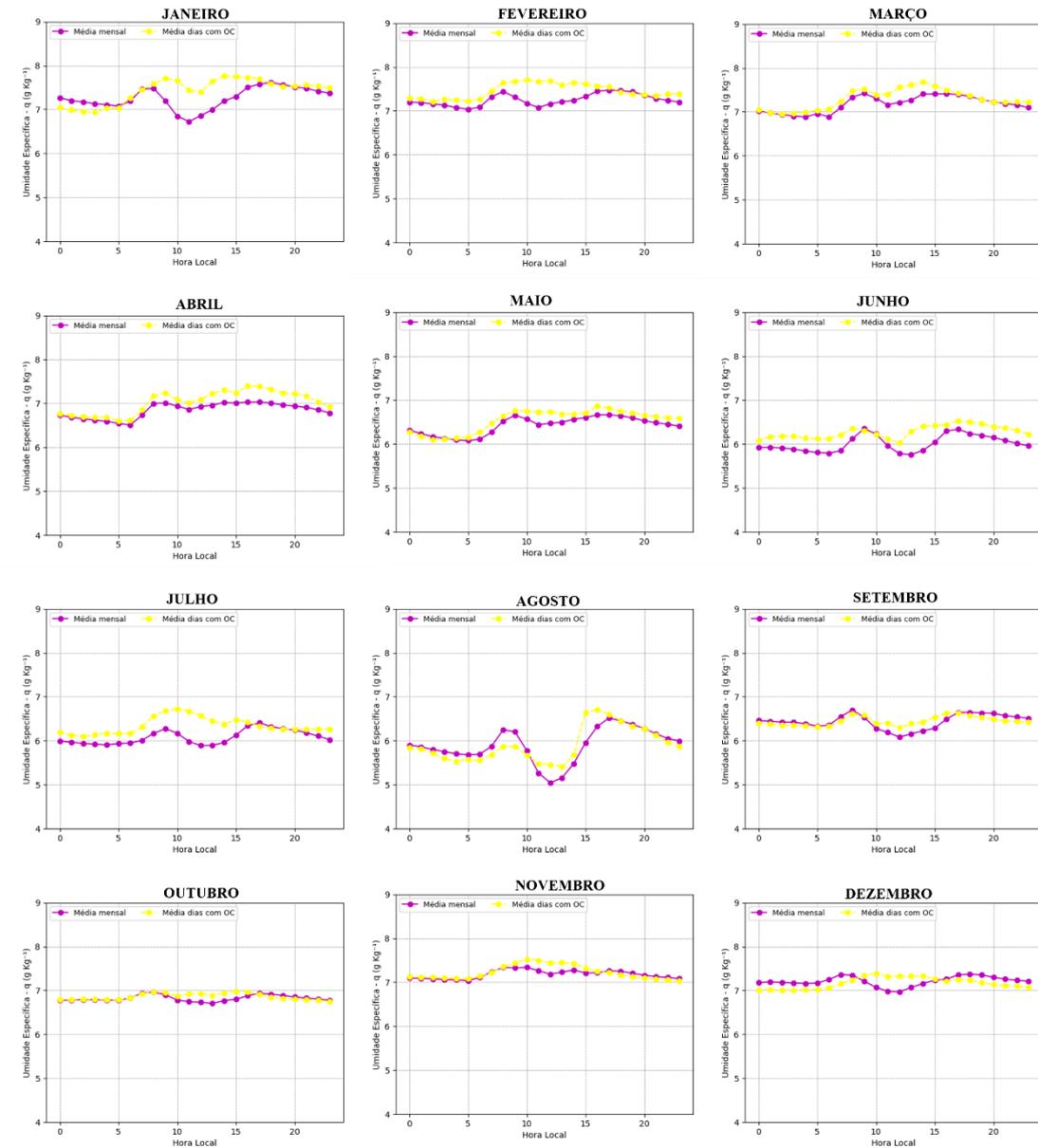


Figura 30 - Média horária da umidade específica (g kg^{-1}) da EM/Itutinga para cada mês do ano de 2015 e para dias com OC.

Sobre a precipitação (Figura 31), nos meses de verão, principalmente em janeiro e fevereiro é possível observar que, nos casos de OC, houve maiores registros de precipitação entre as 16 - 23 HL (horário próximo ou após a entrada da BM). De maneira geral a precipitação foi maior nos horários após as 15 HL, principalmente na primeira metade do ano e nos meses de setembro e novembro. Em agosto, a precipitação foi praticamente nula (mês com menores UR).

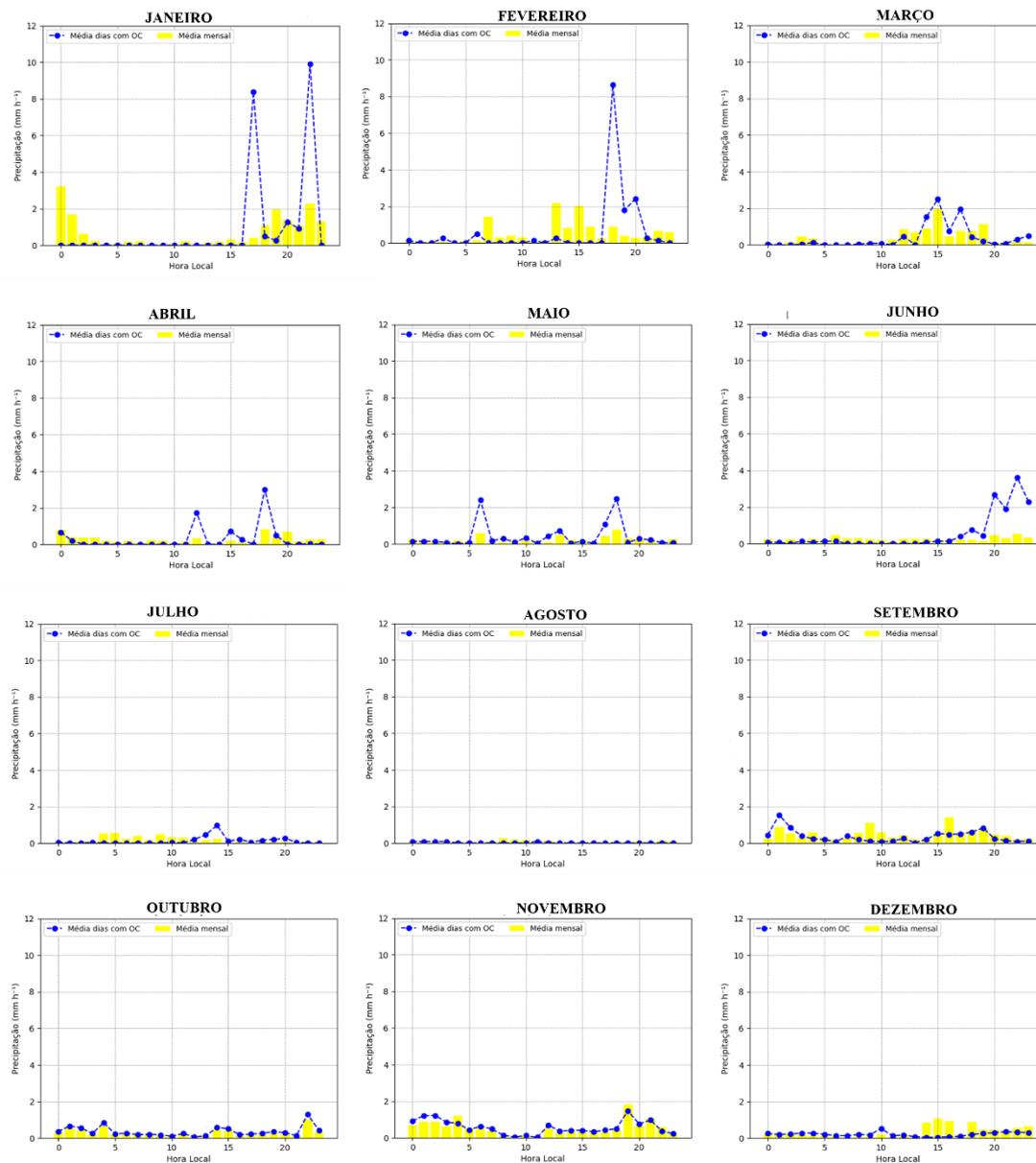


Figura 31 - Média horária da precipitação (mm h^{-1}) da EM/Itutinga para cada mês do ano de 2015 e para dias com OC.

Em relação a velocidade do vento (m s^{-1}) (Figura 32), nota-se que, durante os meses de transição da estação do ano (março, abril, maio, setembro, outubro e novembro), não houve muitas diferenças entre as séries anual e de dias com OC, com valor máximo de intensidade mais baixo que dos outros meses ($1,5 \text{ m s}^{-1}$). Em geral, a série de dias com OC teve valores abaixo da média anual, exceto para o mês de agosto, que ultrapassou esses valores durante a maior parte do dia.

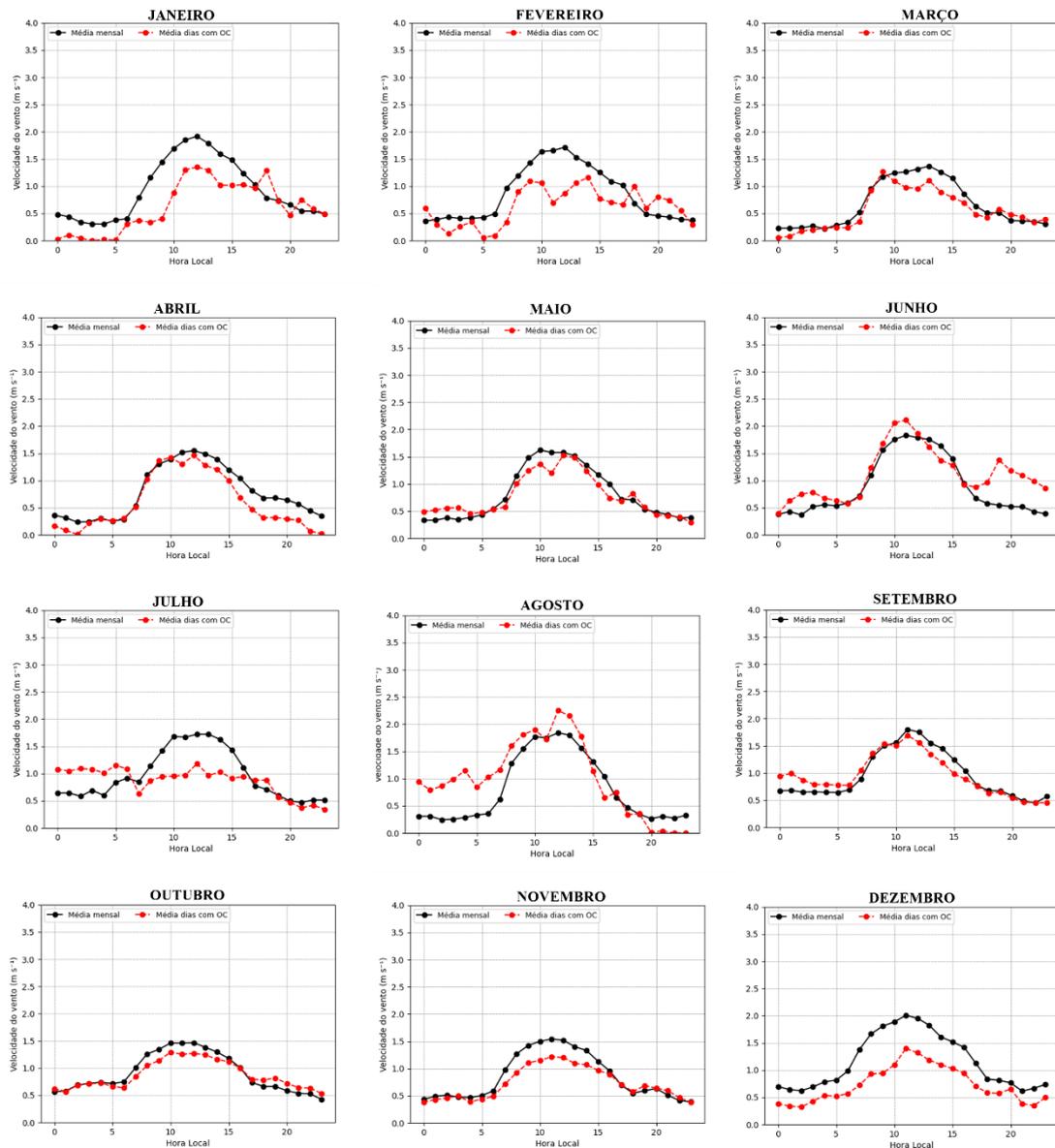


Figura 32 - Média horária da velocidade do vento (m s^{-1}) da EM/Itutinga para cada mês do ano de 2015 e para dias com OC.

Na análise das rosas do vento (Figura 33, 34, 35 e 36), é possível notar que a direção predominante do vento, durante todo o ano, é de SE e S com velocidades até 2 m s^{-1} . A direção de SE é em grande parte atribuída à influência da BM e da APF. Valores maiores da velocidade nessa série (2015), foram encontrados de quadrante Norte. Na média geral de 2015 as velocidades do vento tiveram valores maiores entre 10 e 13 HL. Observando por estações do ano, o inverno teve ventos mais fortes e a primavera mais ventos de SE. Observando os períodos do dia, entre as 00 - 05 HL os ventos foram predominantes de Oeste, exceto na primavera (de quadrante sul). Das 06 - 11 HL a distribuição na direção do vento foi mais variável, tendo ventos vindo de todas as direções, principalmente de quadrante Norte em todas as estações do ano. Durante a tarde,

12 – 17 HL, predominou o vento de SE e S também em todas as estações do ano, sendo mais intensos (até 3 m s^{-1}) no verão, na série geral. Das 18 - 23 HL os ventos são predominantes de S, SO e O chegando até 3 m s^{-1} , no inverno, durante os casos de OC.

VERÃO

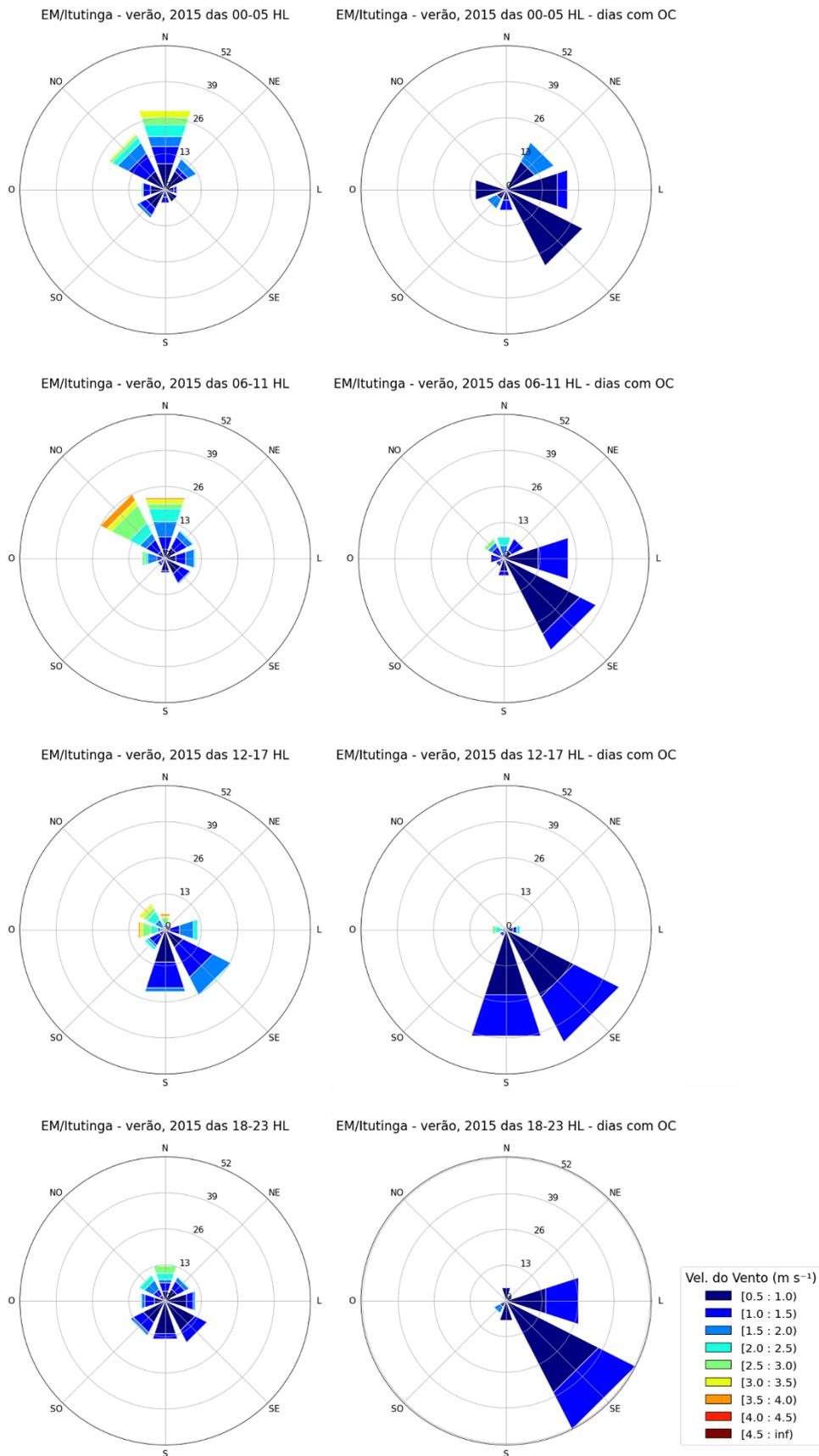


Figura 33 – Rosa dos ventos para períodos de 6 horas da EM/Itutinga para o verão de 2015 e para dias com OC nessa estação do ano.

OUTONO

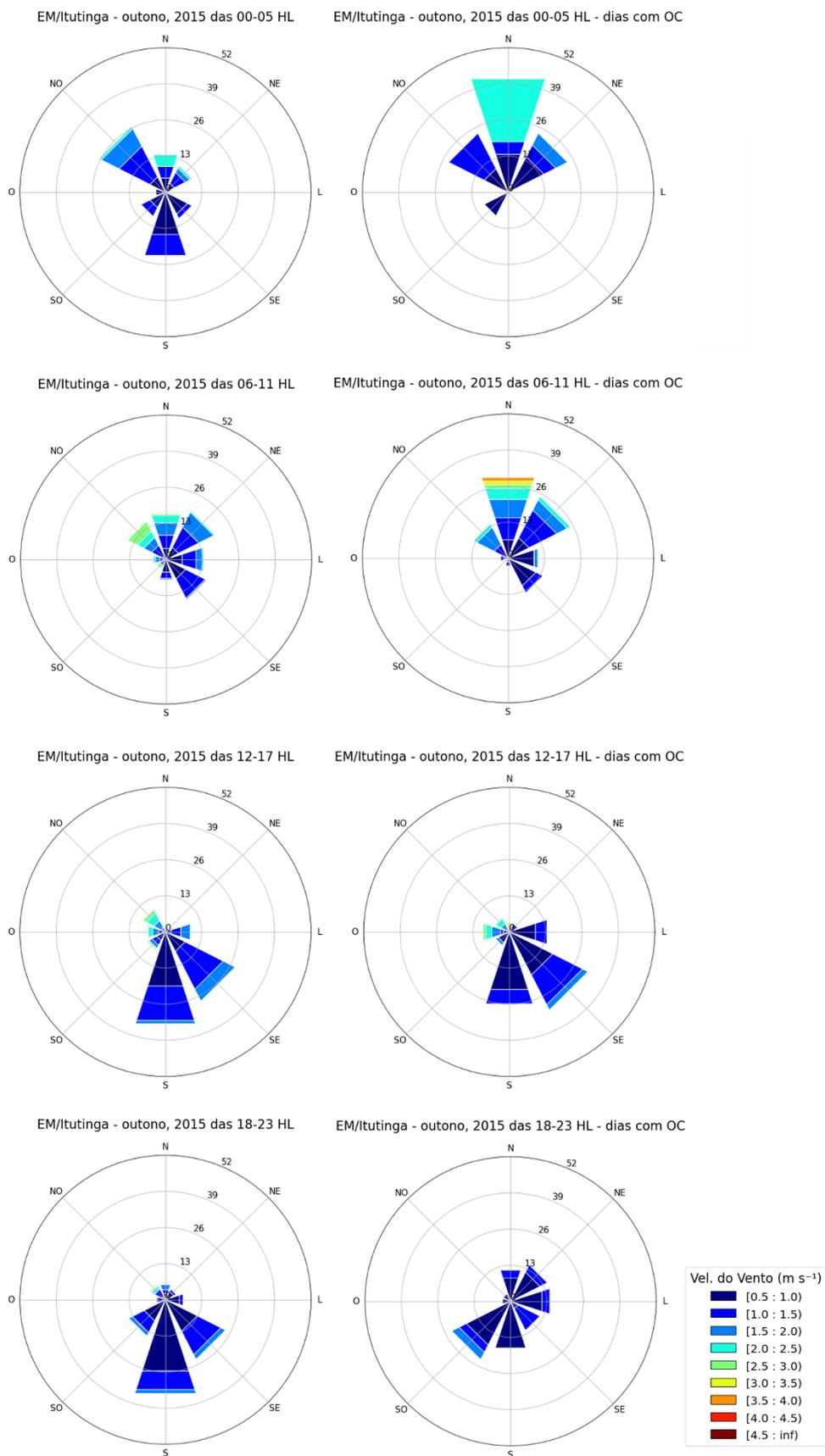


Figura 34 - Rosa dos ventos para períodos de 6 horas da EM/Itutinga para o outono de 2015 e para dias com OC nessa estação do ano.

INVERNO

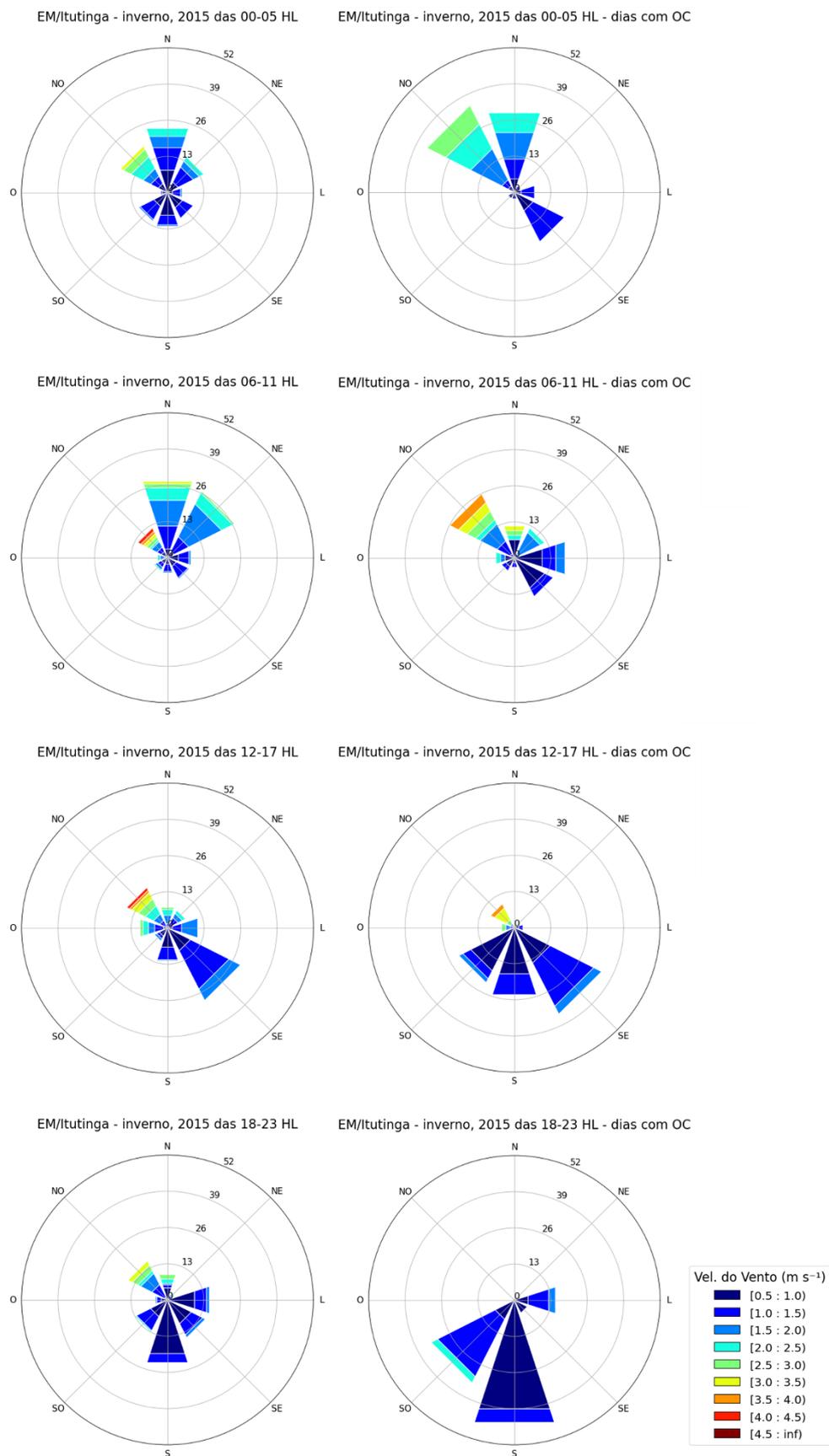


Figura 35 - Rosa dos ventos para períodos de 6 horas da EM/Itutinga para o inverno de 2015 e para dias com OC nessa estação do ano.

PRIMAVERA

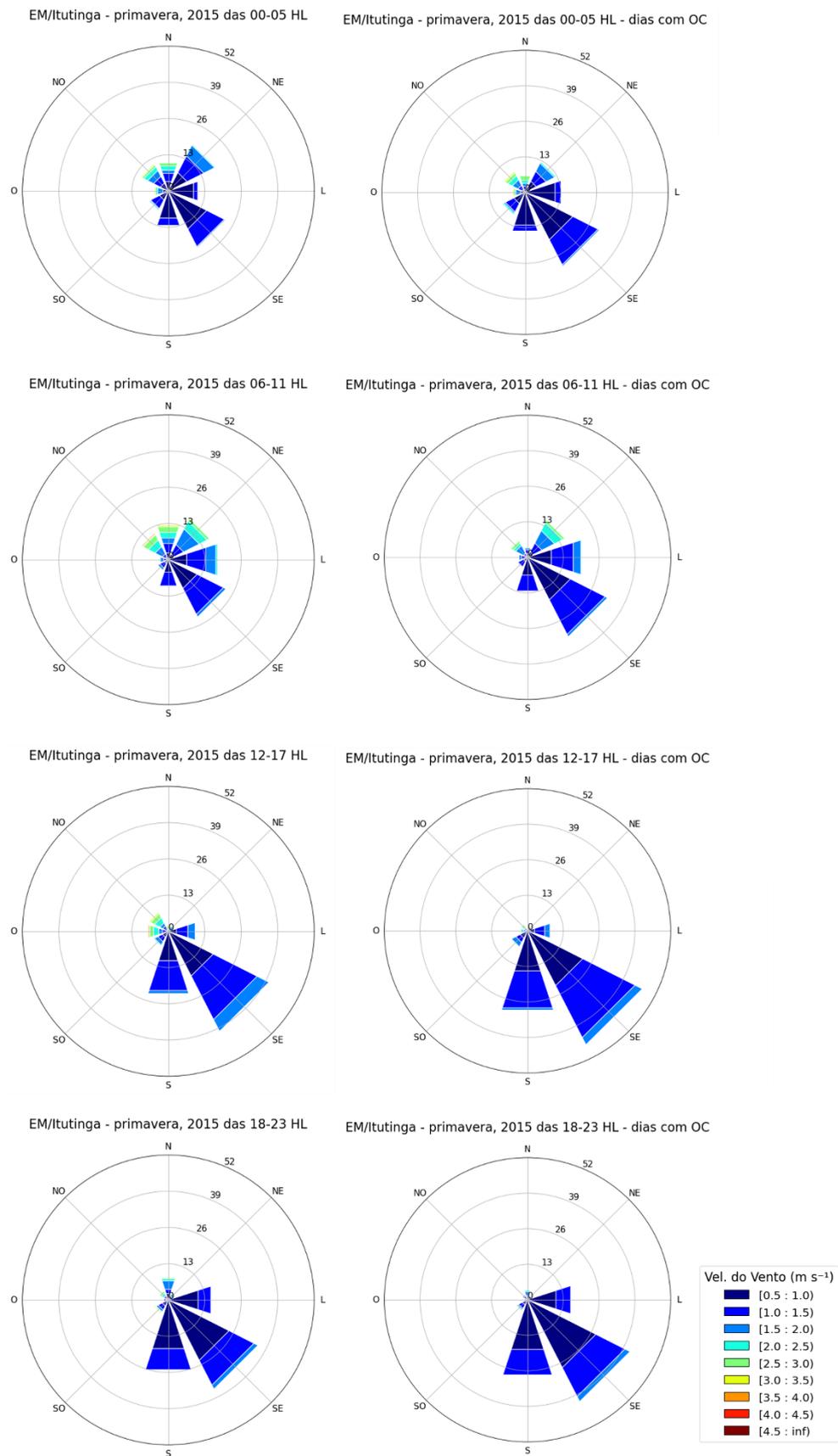


Figura 36 - Rosa dos ventos para períodos de 6 horas da EM/Itutinga para o primavera de 2015 e para dias com OC nessa estação do ano.

4.2.4 Estudos de caso de 2015

4.2.4.1 Caso de 21 de julho: nevoeiro frontal

Ocorreram 3 (2) OC na RA (RI) em 1 período, das 12-15 HL em ambas rodovias, tendo três horas de duração.

Em escala sinótica há uma alta pressão de 1020 hPa sobre o estado de SP no dia 19, no dia 20 (Figura 37A), essa alta pressão se encontra sobre nordeste do estado. No dia 21 (Figura 37B), às 00Z, a ASAS está localizada sobre a Região Norte/Nordeste e há uma frente estacionária, com configuração típica de noroeste-sudeste, sobre o estado do Paraná. Às 12Z essa frente se desloca para nordeste, estando sobre o sul do estado de SP e às 18Z, a frente se encontra sobre a região das Rodovias. Na carta das 00Z do dia 22 a FF se encontra sobre o centro do estado. Nas imagens do satélite GOES-13 (Figura 38), no canal do infravermelho, com temperatura realçada, nota-se a nebulosidade associada ao ciclone extratropical e sua frente nessa região. Entretanto, não mostra nenhuma instabilidade convectiva mais significativa com temperatura realçada sobre o estado de SP.

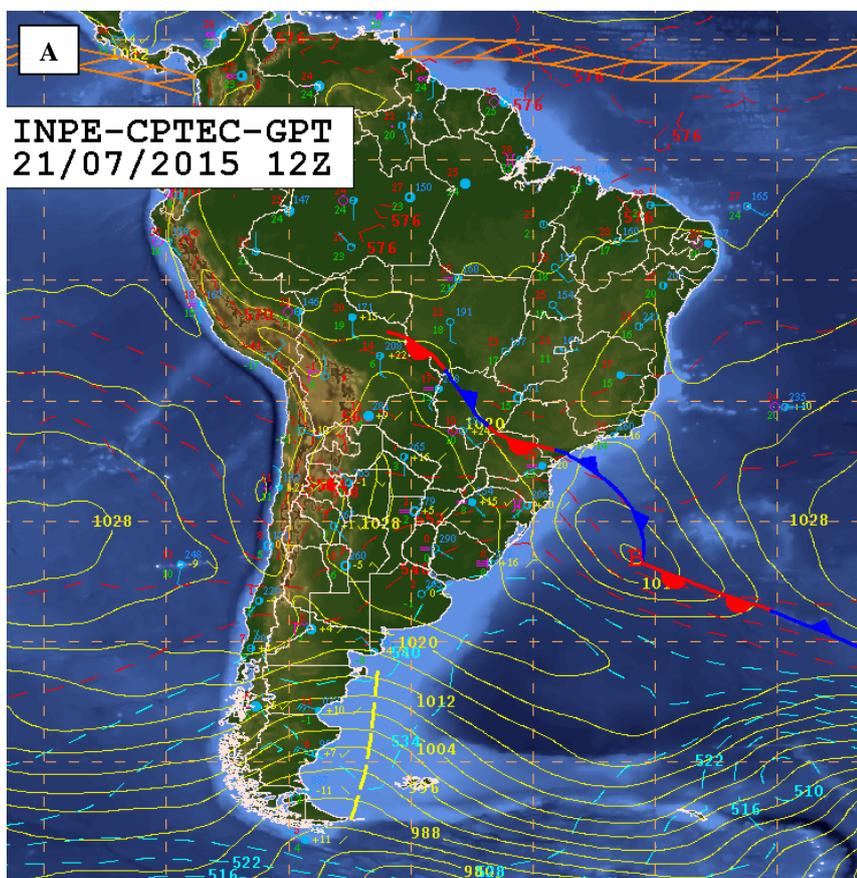


Figura 37 - Cartas sinóticas de superfície das 09 e 15 HL do dia 21 de julho de 2015. Fonte: CPTEC-INPE

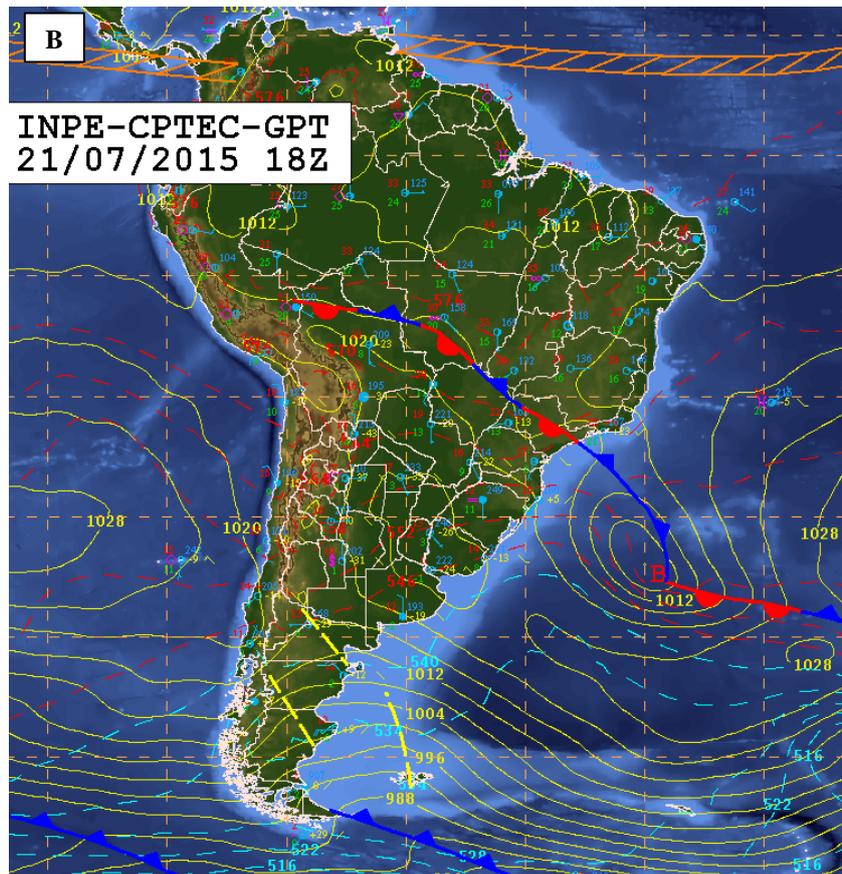


Figura 37 – Continuação.

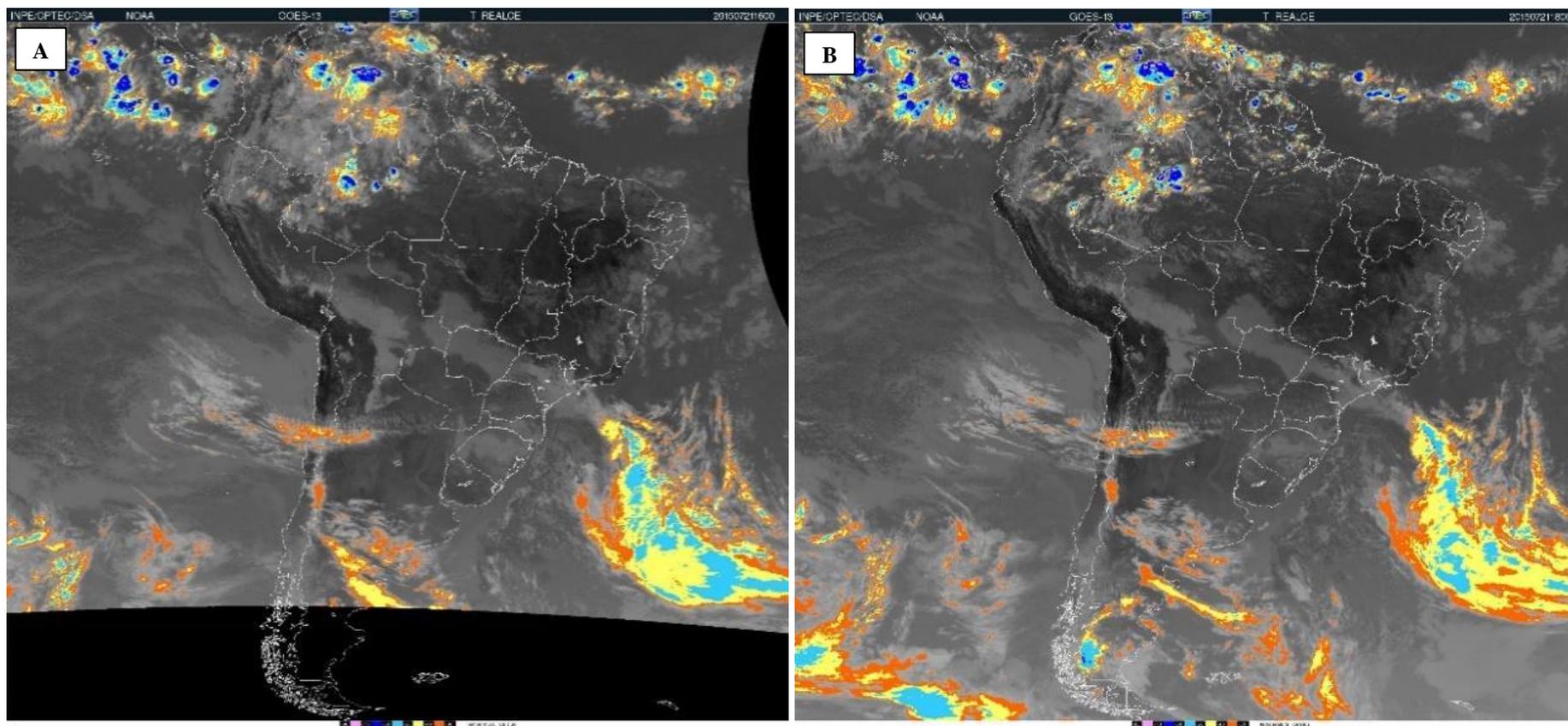


Figura 38 – Imagens de satélite do canal infravermelho realçado do satélite GOES-13, às A)13 HL e B)15 HL do dia 21 de julho de 2015. Fonte: DSA-INPE

Na EM/Itutinga (Tabela 5), durante a madrugada do dia 21, os ventos fluíam de N/NW, na situação da pré-frontal. A partir das 08:30 HL foram registrados ventos de SE e, a partir das 13:30 HL, ventos de SW (passagem da frente pela estação), assim como identificado por Justi da Silva e Silva Dias (2002), na climatologia de sistemas frontais com os dados do NCEP. Durante a OC a temperatura foi aproximadamente 10 °C mais baixa para estes mesmos horários do dia anterior, tendo uma temperatura média de 15,9 °C durante a OC, como identificado também no trabalho de Oliveira (1998) em dias com nevoeiro nos casos com FF. Neste dia a temperatura foi caindo gradualmente, o que é explicado pela presença da FF. A UR atingiu os 100% às 10:30 HL – quando foi registrado 0,3 mm de precipitação (valor acumulado entre 09:30 e 10:30 HL), em seguida, às 11:30 HL, foi observado o maior valor de umidade específica: 6,9 g kg⁻¹. A velocidade média dos ventos de SE antes da OC, foi de 0,8 m s⁻¹ e, durante OC, foi de 1 m s⁻¹ (Tabela 5 e Figura 39). A umidade proveniente da precipitação e a queda na temperatura promoveram condições de saturação da atmosfera, formando o nevoeiro que deu início à OC. Além disso, houve registro de precipitação das 14:30-16:30 HL, com acumulado de 4,9 mm (Tabela 5). Essa precipitação foi devido à FF caracterizando assim, um nevoeiro devido a precipitação, nesse momento. No radar é possível observar que a precipitação que ocorreu está relacionada a um sistema de maior escala. Segundo Scola (1994), na região central do estado de São Paulo a formação mais comum do nevoeiro é caracterizada pela passagem de um sistema frontal com precipitação que umedece o ar próximo à superfície.

Tabela 5 - Dados da estação meteorológica de Itutinga para o dia 21 de julho de 2015.

Dados Estação de Itutinga - 21 de julho de 2015						
HL (h:mm)	Temp. Med (°C)	Dir. vento (°)	Vel. Vento (m/s)	UR (%)	Umid. Esp. (g/kg)	Prec (mm/h)
0:30	18,2	357,6	2,0	77,0	5,4	0,0
1:30	18,7	349,0	2,3	73,0	5,2	0,0
2:30	19,3	334,4	2,8	69,7	5,0	0,0
3:30	19,3	333,1	3,0	71,3	5,1	0,0
4:30	18,3	308,7	2,0	76,9	5,4	0,0
5:30	18,1	326,7	2,2	78,7	5,5	0,0
6:30	18,1	310,6	1,5	80,2	5,6	0,0
7:30	17,2	54,5	0,2	90,5	6,1	0,0
8:30	17,2	118,1	0,8	96,3	6,5	0,0
9:30	16,7	112,0	0,9	99,3	6,6	0,0
10:30	16,7	95,5	0,6	100,0	6,7	0,3

HL (h:mm)	Temp. Med (°C)	Dir. vento (°)	Vel. Vento (m/s)	UR (%)	Umid. Esp. (g/kg)	Prec (mm/h)
11:30	17,9	141,6	0,6	99,3	6,9	0,0
12:30	17,2	138,2	1,0	98,7	6,7	0,0
13:30	15,8	210,4	0,8	100,0	6,5	0,0
14:30	14,8	215,0	1,4	100,0	6,3	4,1
15:30	13,6	220,2	0,9	100,0	6,1	0,3
16:30	13,0	195,8	1,1	100,0	6,0	0,5
17:30	12,8	204,2	0,8	100,0	6,0	0,0
18:30	12,4	195,2	0,9	100,0	5,9	0,8
19:30	12,3	210,1	0,9	100,0	5,9	0,8
20:30	12,3	185,4	0,8	100,0	5,9	1,0
21:30	12,2	204,4	0,7	100,0	5,9	0,0
22:30	12,4	196,9	0,7	100,0	5,9	0,0
23:30	12,5	198,9	0,6	100,0	5,9	0,0

Os horários sombreados indicam o intervalo de tempo em que ocorreu as OC's.

Na série temporal do ERA5 (Figura 39) pode-se notar a frente chegando na região por volta das 10 HL quando a convergência fica mais intensa na região. Nota-se também a queda na temperatura. Nos campos de temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e divergência do ERA5 (Figura 40), pode-se observar a passagem da FF às 10 HL.

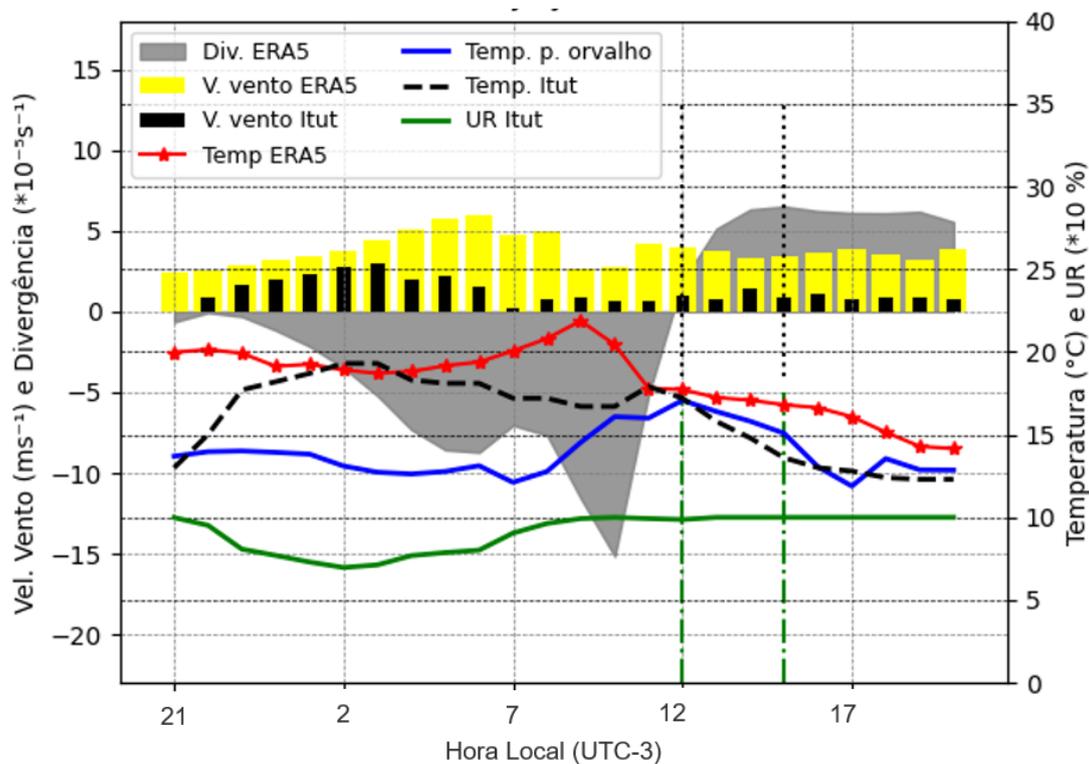


Figura 39 - Distribuição temporal das variáveis Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e velocidade do vento (ms^{-1}) da EM/Itutinga e do ERA5 a 2 m e Divergência ($*10^{-5}\text{s}^{-1}$) e Temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$) do ERA5 e Umidade Relativa (%) da EM/Itutinga para o final do dia 20 até a noite do dia 21 de julho de 2015. A linha tracejada na cor na cor preta (verde) representa a hora inicial e final do evento de OC registrado na RA (RI).

Neste dia, na EM/IAG, não foi registrado nevoeiro. Nessa estação, a temperatura começou a diminuir a partir das 14 HL, quando atingiu o seu máximo de umidade específica, com a atmosfera ainda calma (sem ventos). Às 20 HL houve registro de ventos de SSE que, em seguida, se acalmou e precipitação às 21 HL ($0,4 \text{ mm h}^{-1}$). Assim, apesar da FF ter passado pela região da OC e pela EM/IAG, registrou-se diminuição de visibilidade – nevoeiro – apenas na região de estudo, podendo constatar o quanto os fatores locais são determinantes para a formação do fenômeno.

Os dados do METAR de Santos (Apêndice E) indicaram a presença de chuvisco às 13 HL no dia 21 de julho, assim como visto na imagem do radar (Figura 41). Deste modo, a frente provocou chuva em vários locais e, portanto, esta OC foi iniciada devido a precipitação frontal ($0,3 \text{ mm}$ às 10:30 HL na Estação Itutinga) que aumentou a UR, juntamente com a diminuição de temperatura, gerando o nevoeiro que fez persistir a OC e continuou ainda devido a mais precipitação frontal ($4,1 \text{ mm}$ às 14:30 na Estação Itutinga).

Portanto, conclui-se que a diminuição da visibilidade neste dia foi causada pela passagem da FF na região.

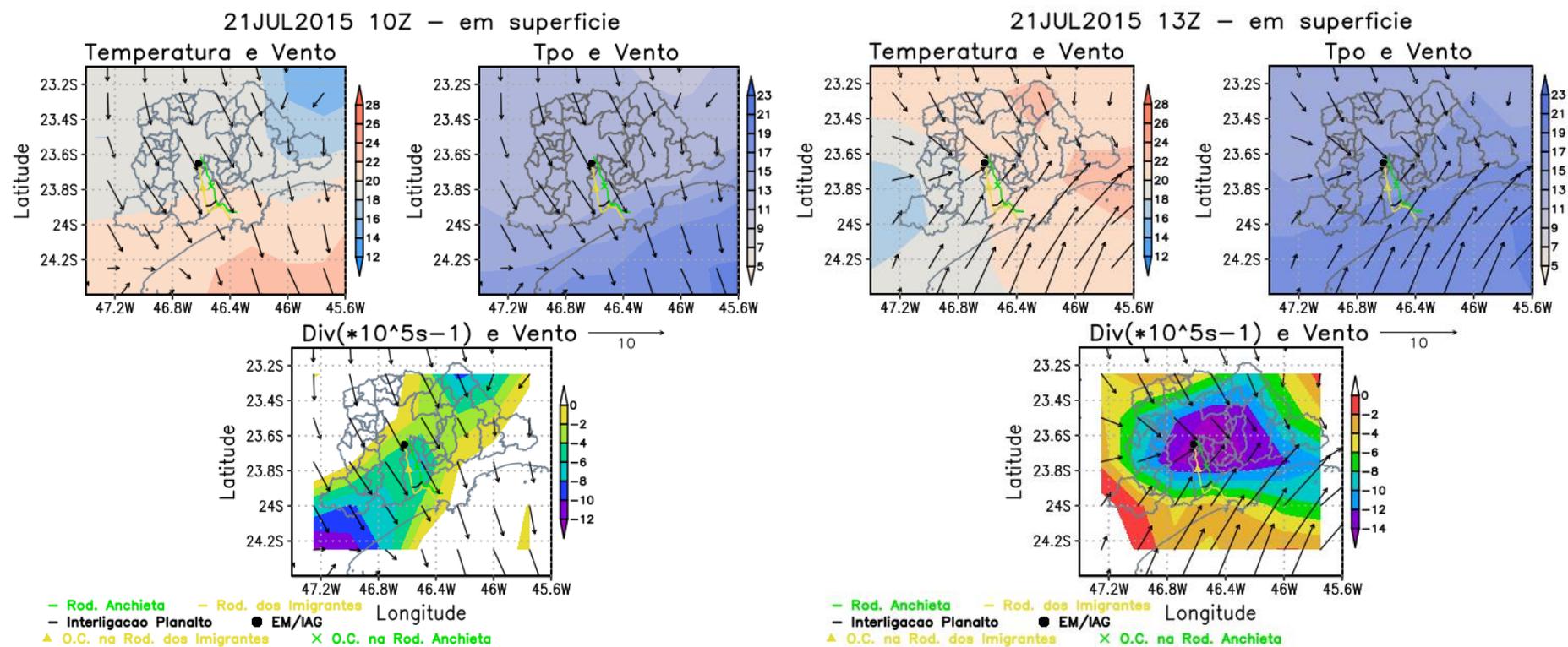


Figura 40 - Campos de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$, colorido a 2 m) e vento (m s^{-1} , vetor a 10 m), Temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$, colorido a 2m) e vento (m s^{-1} , vetor a 10 m) e Divergência dos ventos ($*10^{-5} \text{ s}^{-1}$, colorido a 10 m) e vento (m s^{-1} , vetor a 10 m) do ERA5 para às 07, 10, 13 e 16 HL do dia 21 de julho de 2015.

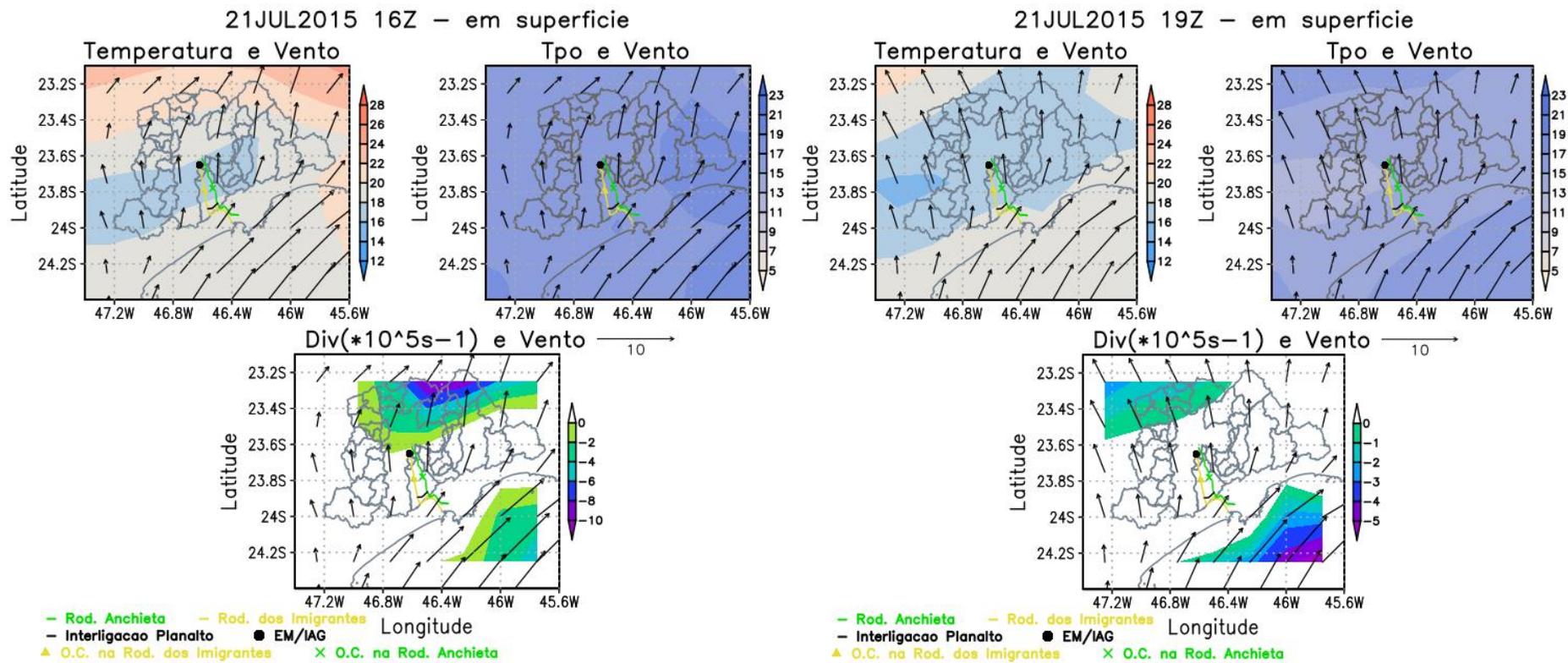


Figura 40 – Continuação.

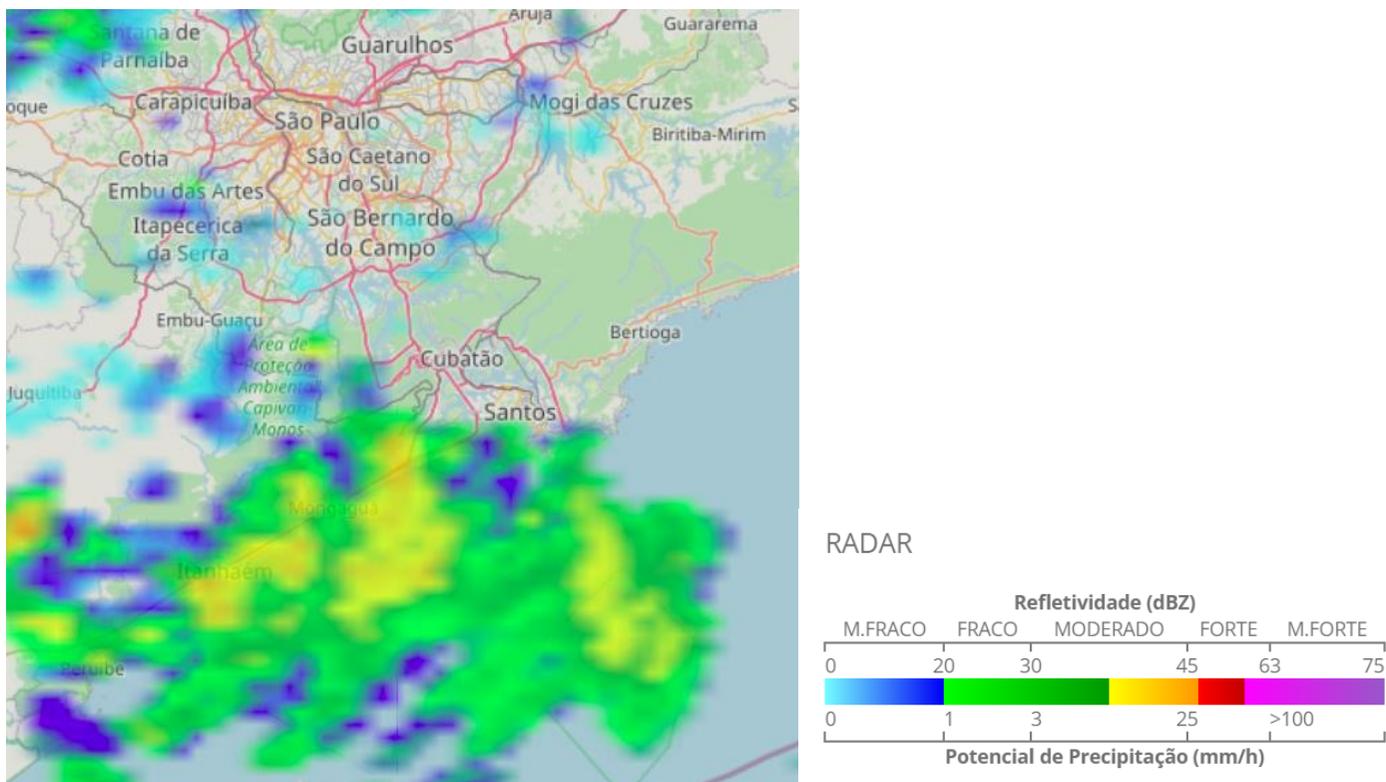


Figura 41 - Imagem da refletividade (dBZ) do radar de São Roque do dia 21 de julho de 2015, às 12 HL.

4.2.4.2 Caso de 19 de agosto: nevoeiro orográfico devido à frente fria (FF)

Ocorreu 1 OC tanto na RA quanto na RI durante o mesmo período, das 17-18 HL, tendo uma hora de duração.

Sinoticamente, desde dia 16, às 21 HL, a ASAS atuava sobre parte do estado de SP. No dia 19, às 09 HL (Figura 42A), uma FF se aproxima do estado, vinda de sudoeste. Às 09 HL ela se encontra sobre o sul de SP. Na carta do dia 20, às 00Z (Figura 42A), observa-se que a frente subtropical – que são FF clássicas que vão perdendo força conforme avançam para latitudes mais baixas, tendo um fraco contraste térmico (Kousky, 1979) - está sobre o nordeste de SP. A imagem de satélite das 13:30 HL (Figura 42C) mostra que esta frente não esteve muito associada a nebulosidade muito intensa, sendo possível ver que praticamente não há nuvens no estado de SP.

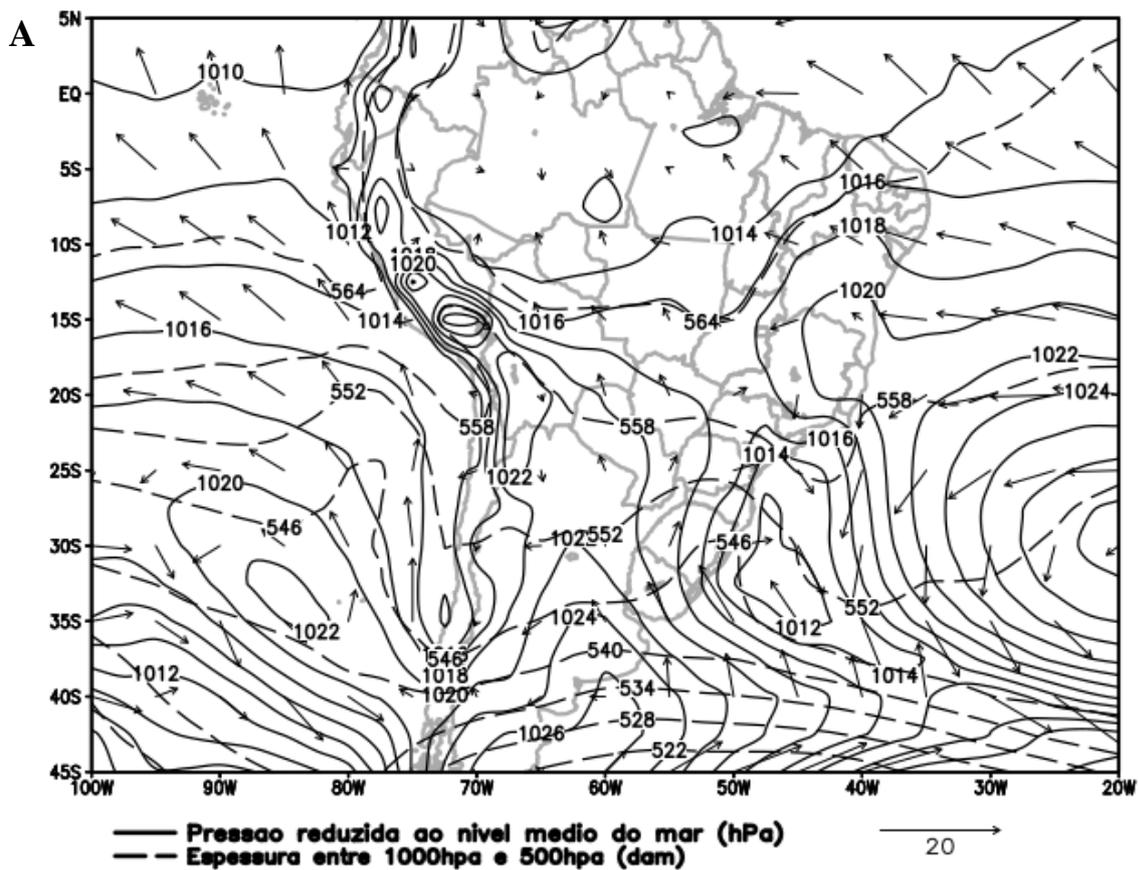


Figura 42 - Cartas sinóticas de superfície do dia A) 19 de agosto de 2015 às 09 HL e do dia B) 19 de agosto de 2015 às 21 HL e C) Imagem de satélite do canal infravermelho realçado do satélite GOES-13, às 13:30 HL do dia 19 de agosto de 2015.

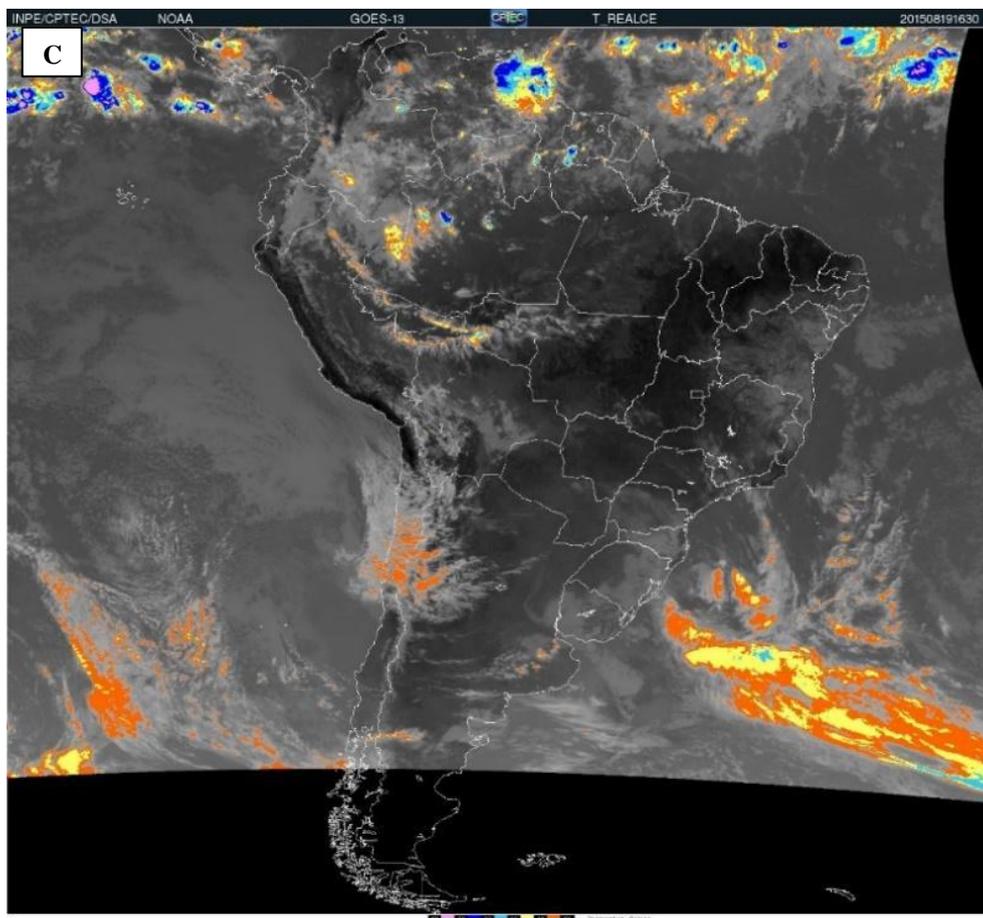
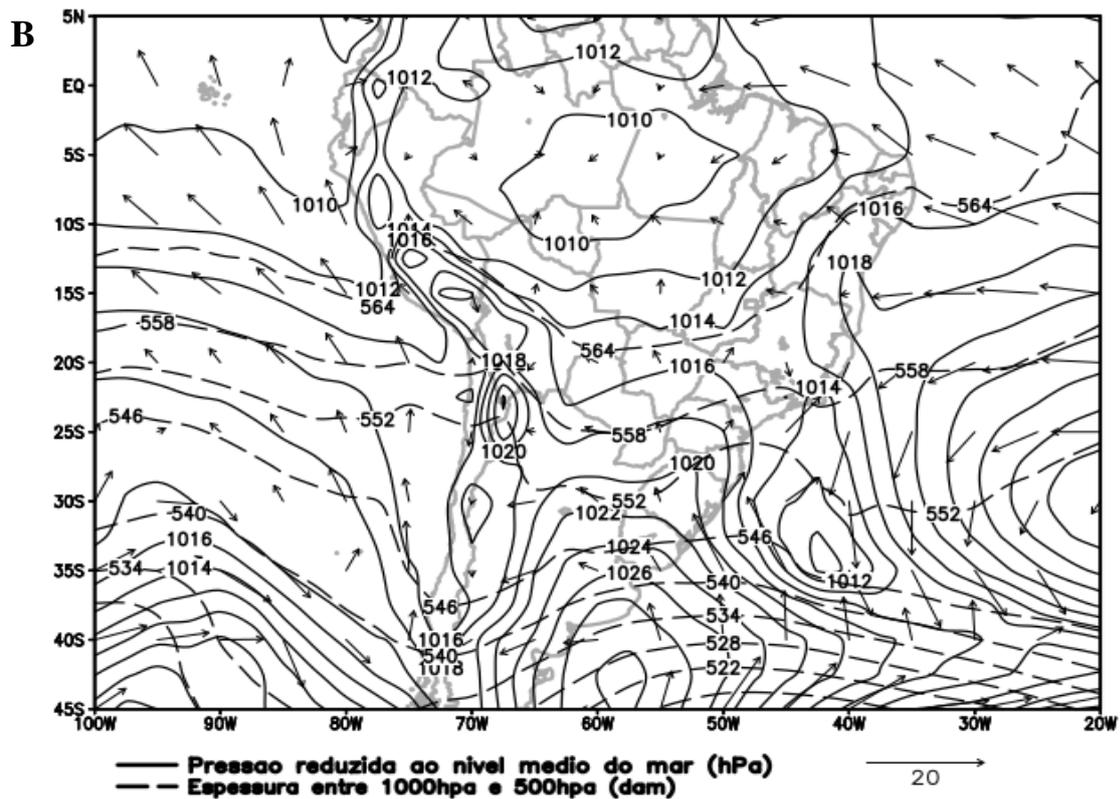


Figura 42 – Continuação.

As variáveis da EM/Itutinga (Tabela 6 e Figura 43) registraram ventos de NW das 04:30 – 14:30 HL, depois de SE e S das 15:30 as 19:30 HL. Nessa virada do vento de NW para SE, a temperatura diminui 6,6 °C e a UR aumentou 35,7%. Esse máximo na temperatura do ar e ventos ainda de NW nos dados horários da EM/Itutinga indicam a passagem, a chegada, da FF segundo Wallace e Hobbs (2006). Durante a OC a temperatura média foi 16,8 °C, com uma taxa média de resfriamento de 1,3 °C h⁻¹, e a UR média de 99,6%. A velocidade média do vento durante a OC foi de 0,9 m s⁻¹.

Este padrão das variáveis meteorológicas de vento e temperatura também foi identificado nos campos do ERA5 (Figura 44), concordando com os medidos na EM/IAG.

Nota-se que a FF foi importante para a intensificação dos ventos de SE na região da Serra do Mar. Neste caso, não houve precipitação e nem registro de nebulosidade no Aeroporto de Congonhas, mas havia um pouco no Aeródromo de Guarujá (SBST). Entretanto, a diminuição da visibilidade nas Rodovias Anchieta e Imigrantes foi decorrente de nevoeiro orográfico, alimentado pela umidade dos ventos de SE devido à passagem da frente. No trabalho de Machado (1993) o nevoeiro orográfico, formado pela saturação das parcelas de ar que são forçadas a ascender as serras, foi o segundo tipo de nevoeiro mais visto nas simulações.

Portanto a diminuição da visibilidade neste dia foi causada por nevoeiro orográfico, restrito à região da Serra do Mar, com auxílio da FF.

Tabela 6 - Dados da estação meteorológica de Itutinga para o dia 19 de agosto de 2015.

Dados Estação de Itutinga - 19 de agosto de 2015						
Hora (h:mm)	Temp. Med (°C)	Dir. vento (°)	Vel. Vento (m/s)	UR (%)	Umid Esp(g/kg)	Prec (mm/h)
0:30	17,9	14,1	1,6	76,6	5,3	0,0
1:30	17,4	14,4	1,2	79,7	5,4	0,0
2:30	17,6	4,3	1,4	77,3	5,3	0,0
3:30	19,4	354,6	2,0	69,2	5,0	0,0
4:30	19,7	337,1	2,3	67,2	4,9	0,0
5:30	19,1	333,3	1,9	69,4	5,0	0,0
6:30	19,7	338,3	2,3	67,3	4,9	0,0
7:30	20,2	334,2	2,3	67,9	5,0	0,0
8:30	21,6	345,2	3,0	64,9	5,0	0,0
9:30	23,7	348,2	3,1	59,2	4,8	0,0
10:30	25,6	335,2	3,3	53,4	4,5	0,0
11:30	27,5	330,0	2,9	49,8	4,4	0,0
12:30	28,5	293,4	3,0	47,8	4,4	0,0
13:30	28,0	293,2	3,7	48,5	4,4	0,0

Hora (h:mm)	Temp. Med (°C)	Dir. vento (°)	Vel. Vento (m/s)	UR (%)	Umid Esp(g/kg)	Prec (mm/h)
14:30	26,5	299,6	2,9	56,7	4,9	0,0
15:30	19,9	123,8	1,8	92,4	6,8	0,0
16:30	17,7	161,3	1,2	99,9	6,9	0,0
17:30	16,8	170,9	0,9	100,0	6,7	0,0
18:30	15,9	163,6	0,6	98,9	6,5	0,0
19:30	15,5	182,3	0,2	97,8	6,3	0,0
20:30	14,9	270,0	0,0	98,5	6,3	0,0
21:30	14,5	162,4	0,1	98,8	6,2	0,0
22:30	13,2	270,0	0,0	98,8	6,0	0,0
23:30	11,3	270,0	0,0	99,5	5,7	0,0

Os horários sombreados indicam o intervalo de tempo em que ocorreu as Operações Comboio.

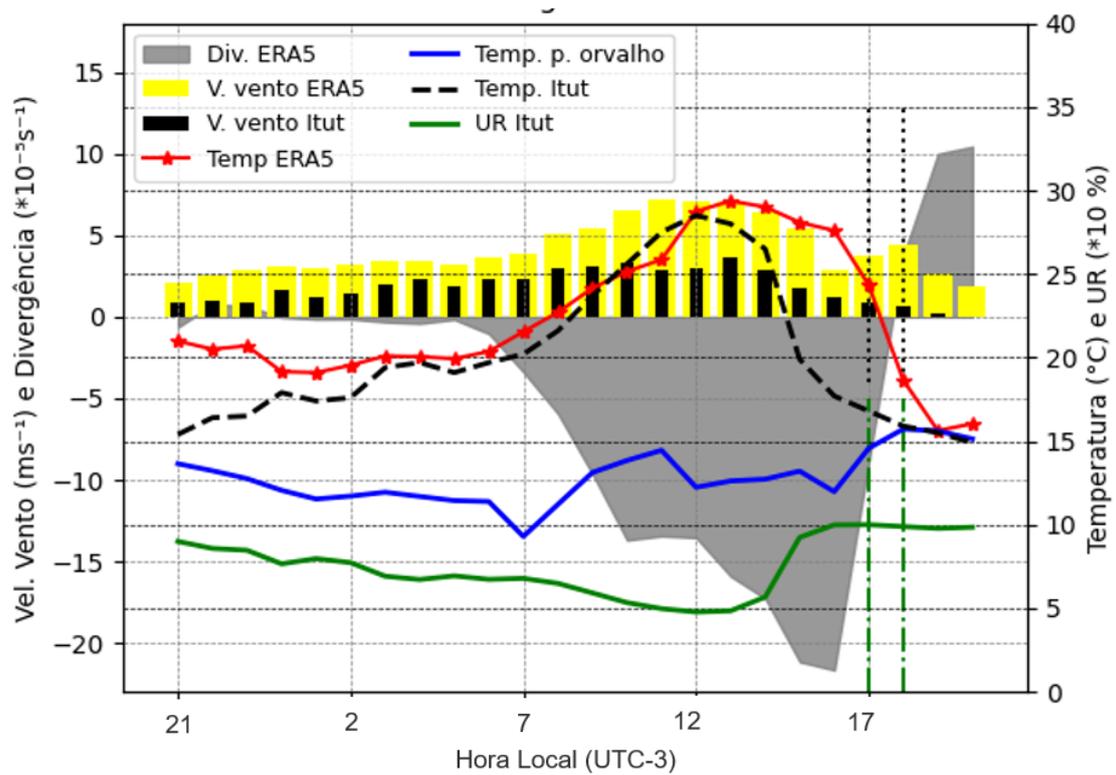


Figura 43 - Idem à Figura 39, mas para o final do dia 18 até a noite do dia 19 de agosto de 2015.

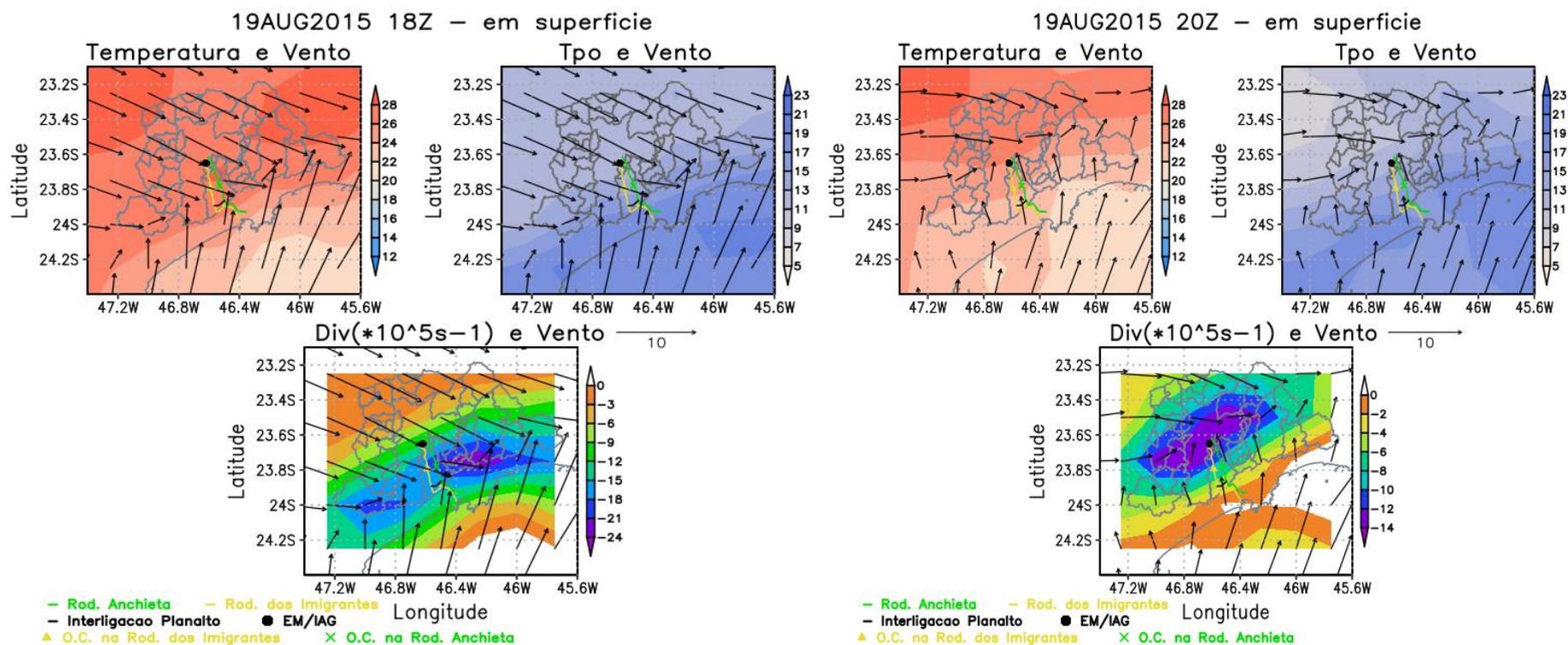


Figura 44 - Campos de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor), Temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor) e Divergência ($*10^{-5} \text{ s}^{-1}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor) do ERA5 para às 15, 17, 18 e 20 HL do dia 19 de agosto de 2015.

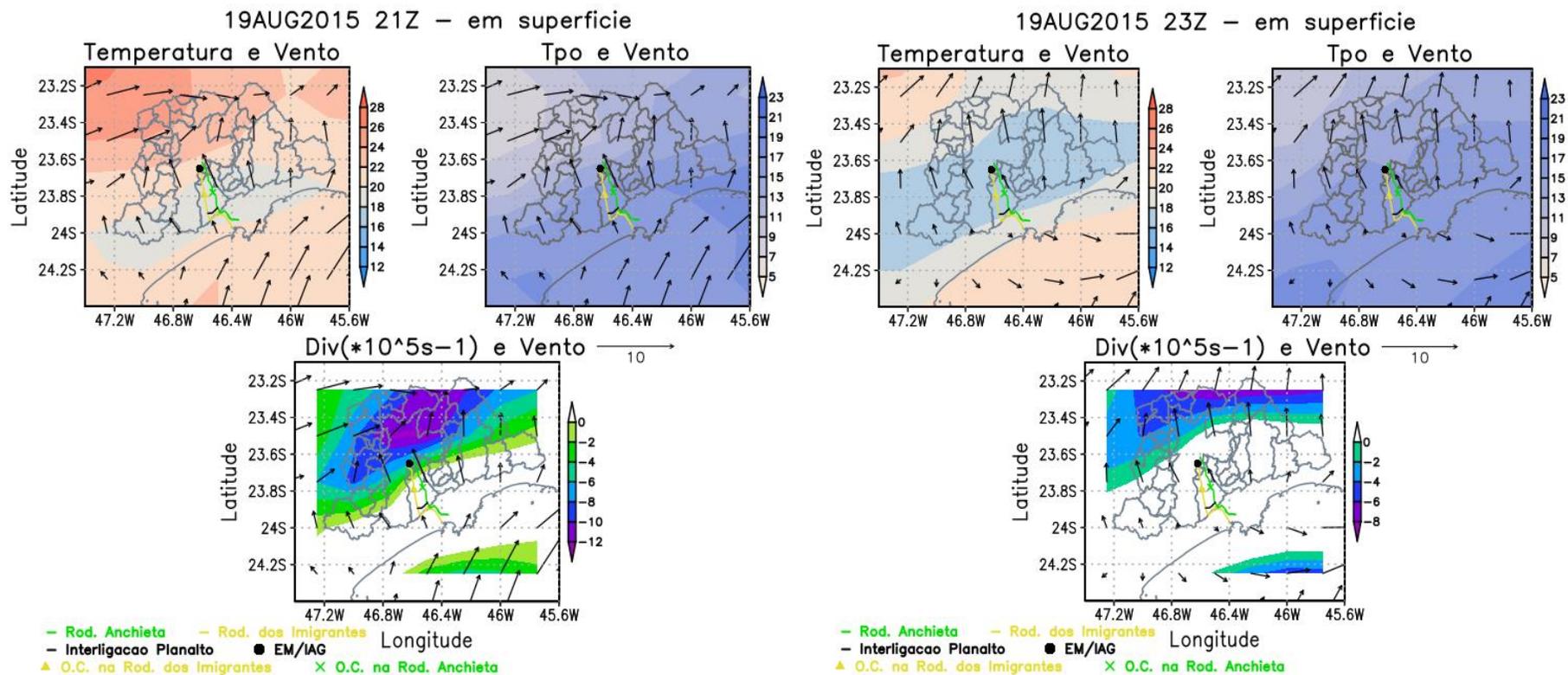


Figura 44 – Continuação.

4.2.4.3 Caso de 14 de setembro: Nevoeiro orográfico devido à alta pós frontal (APF)

Ocorreram 14 (29) OC na RA (RI). Na RA ocorreu em 3 períodos diferentes: 01-03, 07-14 e das 16-01 HL. Já na RI as OCs ocorreram em dois períodos: 00-04 e das 07-01 HL.

Neste dia (Figura 45), a APF atuava sobre o estado de SP, onde a FF havia passado nos dois dias anteriores. Nas imagens de satélite do infravermelho realçado (Figura 46), em nenhum momento foi registrado um sistema de precipitação mais convectiva nessa região da OC, nem próximo a ela, devido a subsidência do ar impedindo a formação de nuvens profundas. Nas imagens do visível é possível notar uma maior refletividade sobre o litoral e porção leste do estado de SP, mostrando a nebulosidade presente ali.

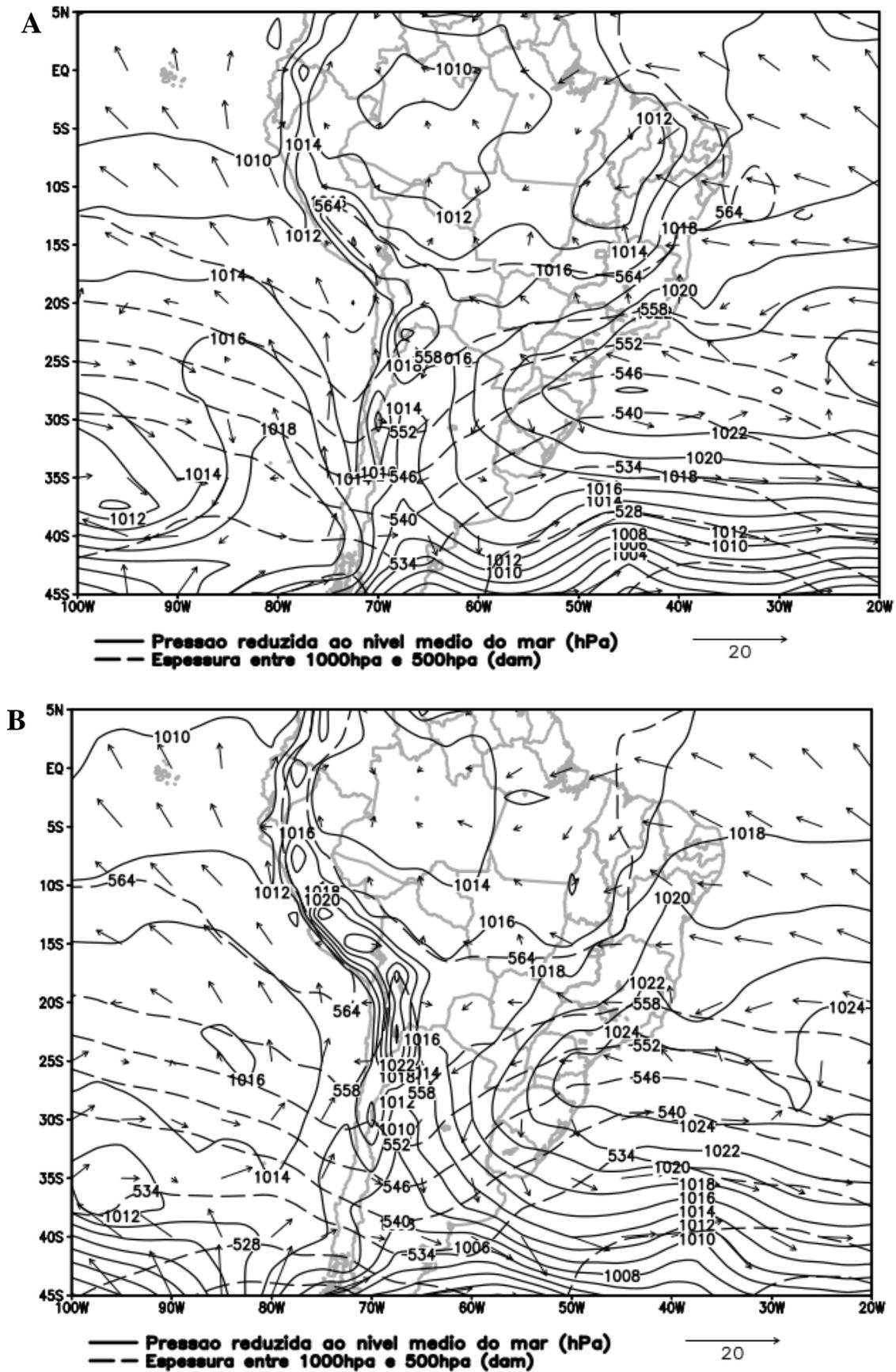


Figura 45 - Cartas sinóticas de superfície do dia 13 de setembro de 2015 às A) 21 e 14 de setembro de 2015 às B) 09 HL.

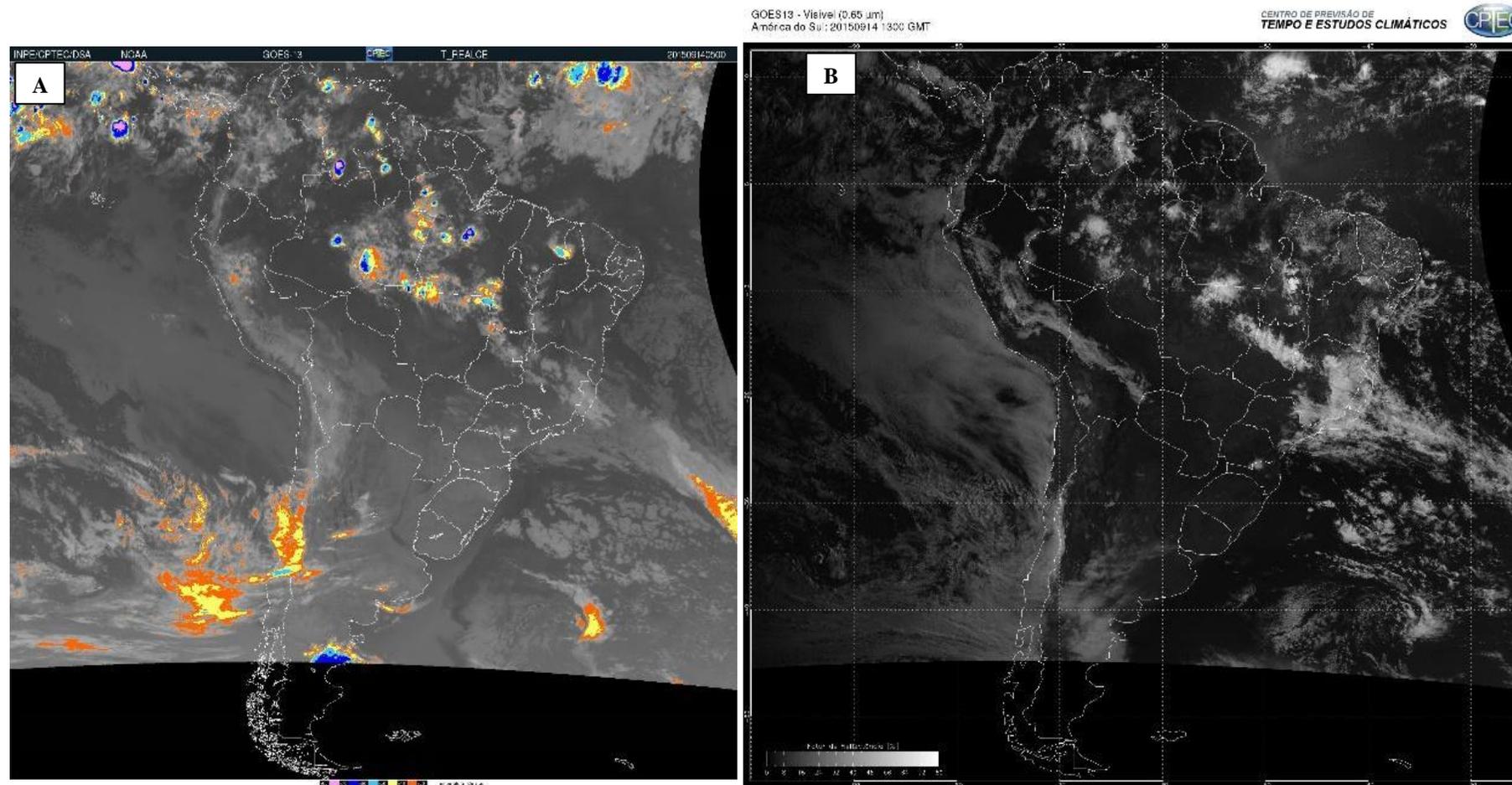


Figura 46 - Imagens do satélite GOES-13 do canal infravermelho realçado A) 02 e D)20 HL e do canal visível B)10 e C)16:30 HL do dia 14 de setembro de 2015.

GOES13 - Visível (0.65 µm)
América do Sul: 20150914 1930 GMT

CENTRO DE PREVISÃO DE
TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS
CPEC

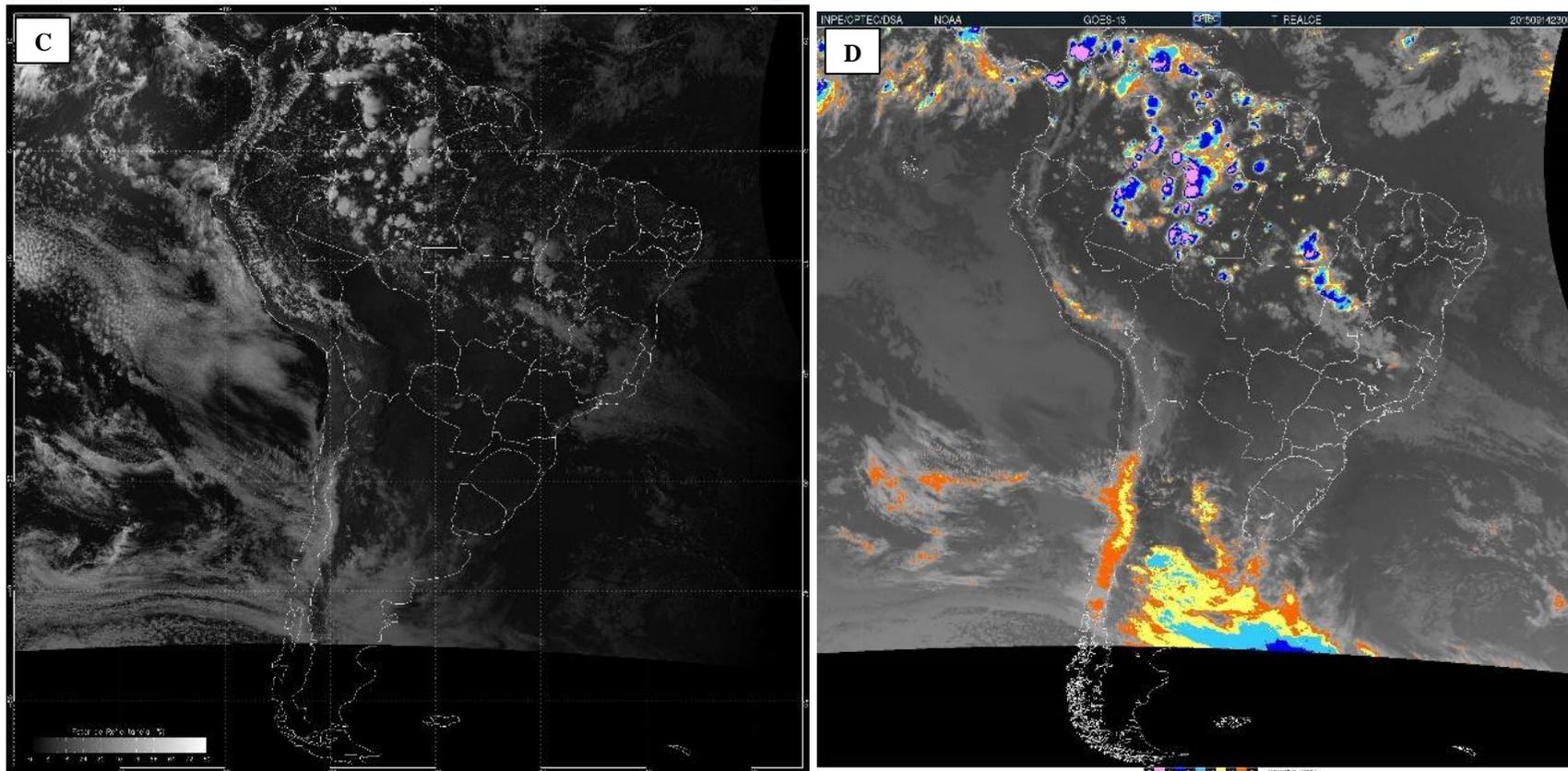


Figura 46 - Continuação.

Nesta data houve OC durante quase todo o dia. A temperatura mínima registrada em Itutinga foi de 12,9 °C e a máxima de 17,6 °C. O vento foi predominantemente de SE, com velocidade média de 0,9 m s⁻¹, associados à circulação da APF que estava atuando sobre o oceano, próximo ao litoral. Houve precipitação (0,3 mm às 23:30 HL do dia anterior) antes do início da OC que começou as 00:15 HL (Tabela 7 e Figura 47).

Tabela 7 - Dados da estação meteorológica de Itutinga para o dia 14 de setembro de 2015.

Dados Estação de Itutinga - 14 de setembro de 2015						
Hora (h:mm)	Temp. Med (°C)	Dir. vento (°)	Vel. Vento (m/s)	UR (%)	Umid Esp(g/kg)	Prec (mm/h)
0:30	12,9	199,6	0,5	100,0	6,0	0,0
1:30	12,9	155,4	0,5	100,0	6,0	0,0
2:30	13,0	127,2	0,6	100,0	6,0	0,3
3:30	13,2	140,1	0,7	100,0	6,0	0,3
4:30	13,1	103,2	0,9	100,0	6,0	0,3
5:30	13,1	142,5	0,5	100,0	6,0	0,0
6:30	13,3	113,7	0,6	100,0	6,0	0,0
7:30	13,6	122,1	0,7	100,0	6,1	0,0
8:30	14,1	106,3	1,1	100,0	6,2	0,0
9:30	15,0	116,2	1,0	100,0	6,3	0,0
10:30	16,1	139,0	1,1	99,5	6,5	0,0
11:30	16,4	113,2	1,2	98,1	6,5	0,0
12:30	17,6	122,1	1,6	94,2	6,4	0,0
13:30	17,4	129,4	1,4	94,6	6,4	0,0
14:30	16,1	122,3	1,1	98,4	6,5	0,0
15:30	15,2	152,5	0,9	100,0	6,4	0,0
16:30	14,7	149,9	0,9	100,0	6,3	0,0
17:30	14,5	178,3	0,9	100,0	6,3	0,0
18:30	14,4	126,3	1,1	100,0	6,2	0,5
19:30	14,3	125,2	1,2	100,0	6,2	0,3
20:30	14,4	138,3	1,0	100,0	6,2	0,0
21:30	14,5	135,4	1,1	100,0	6,2	0,0
22:30	14,4	108,5	1,2	100,0	6,2	0,3
23:30	14,5	106,5	0,8	100,0	6,3	0,0

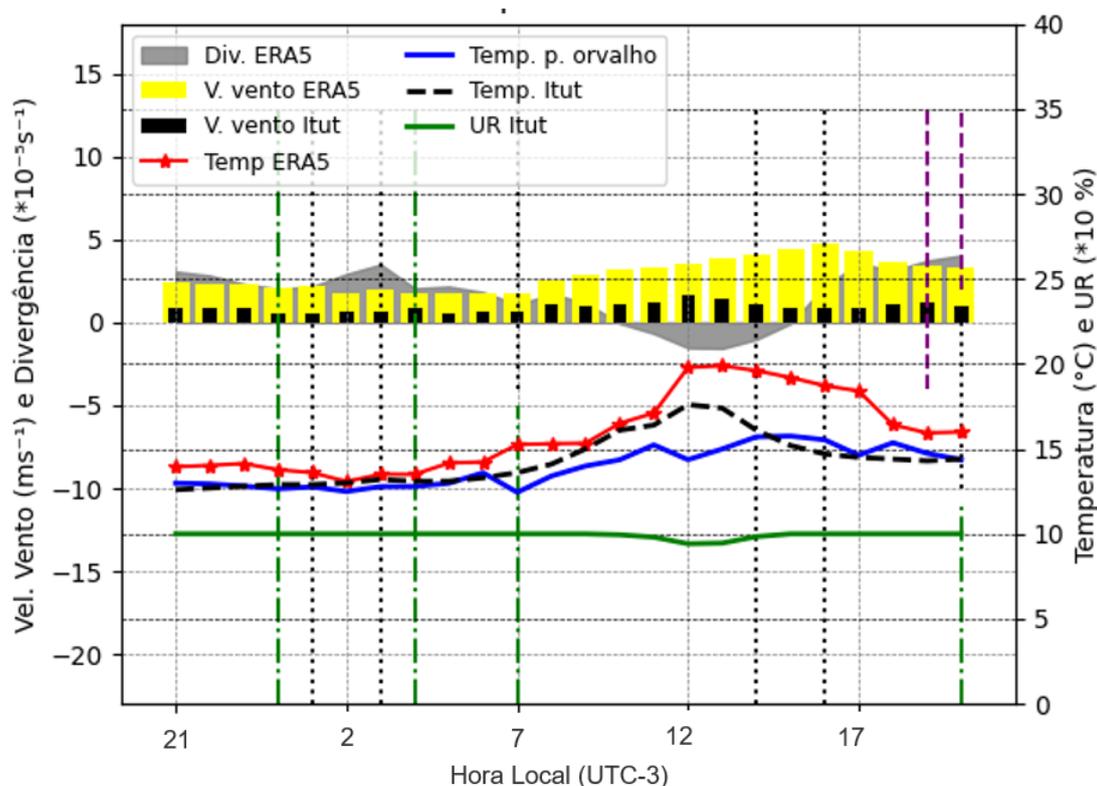


Figura 47- Idem à Figura 39, mas para o final do dia 13 até a noite do dia 14 de setembro de 2015.

Nos campos do ERA5 (Figura 48) é possível ver a circulação da APF sobre a região e, observa-se também convergência no local próximo a EM/Itutinga e a OC entre as 10-15 HL, aproximadamente.

Nas imagens do radar nota-se refletividade muito fraca – fraca, distribuída na região da Serra do Mar, principalmente em horários que registraram precipitação (Figura 49 e 50) entre 06 - 08 HL e 12 - 14 HL. No aeroporto de Santos foi registrado chuva até às 09 HL, depois, nebulosidade baixa. Ou seja, a orografia intensificou tanto o nevoeiro quanto a precipitação causada pela APF.

Portanto a diminuição da visibilidade neste dia foi causada por nevoeiro orográfico gerado pela persistente advecção de umidade de SE pelos ventos da APF.

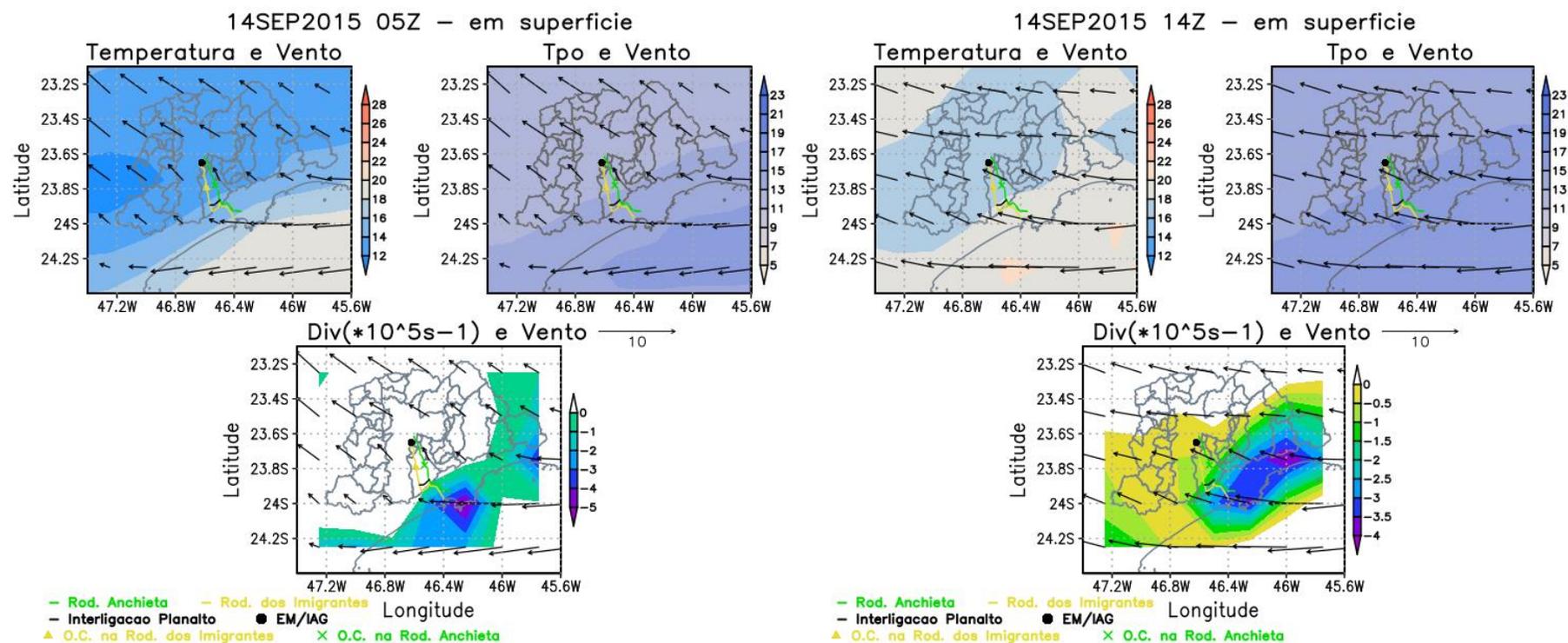


Figura 48 - Campos de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor), Temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor) e Divergência ($\ast 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor) do ERA5 para às 02, 11, 15 e 20 HL do dia 14 de setembro de 2015.

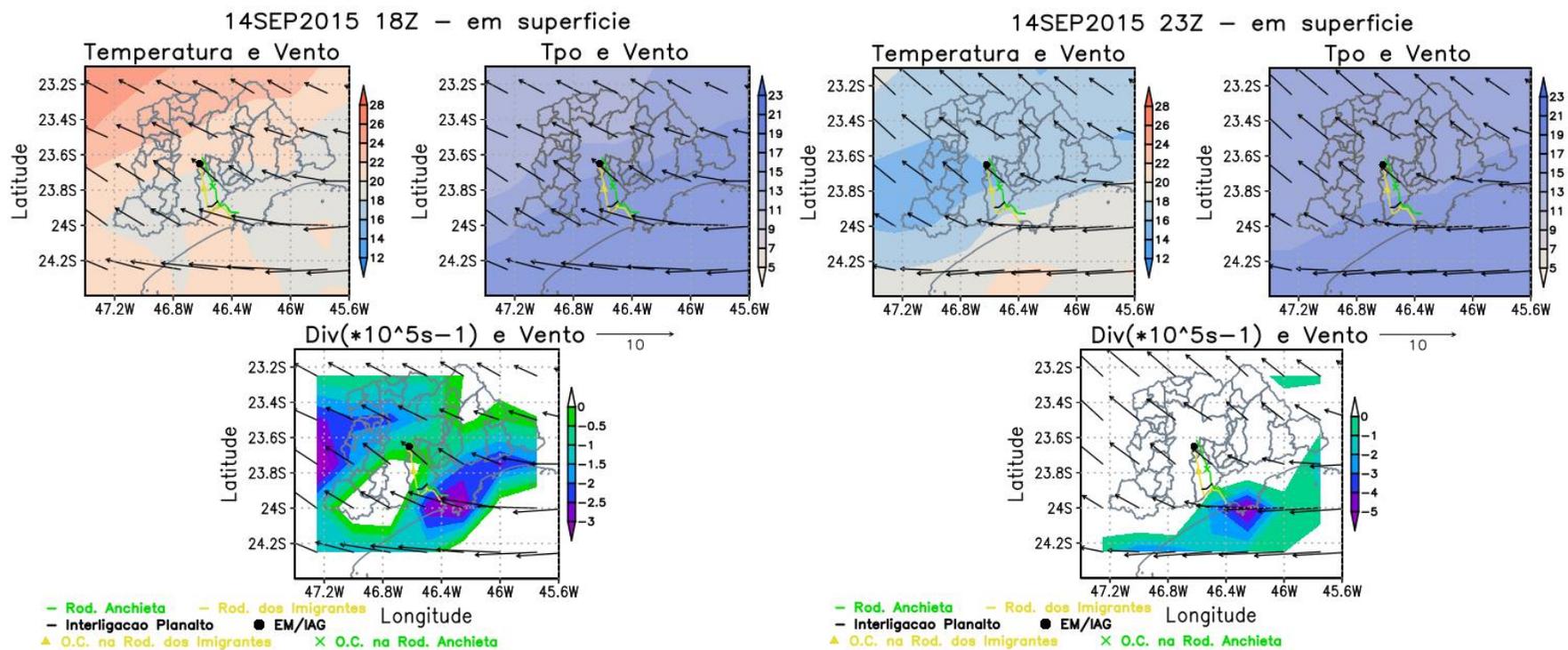


Figura 48 – Continuação.

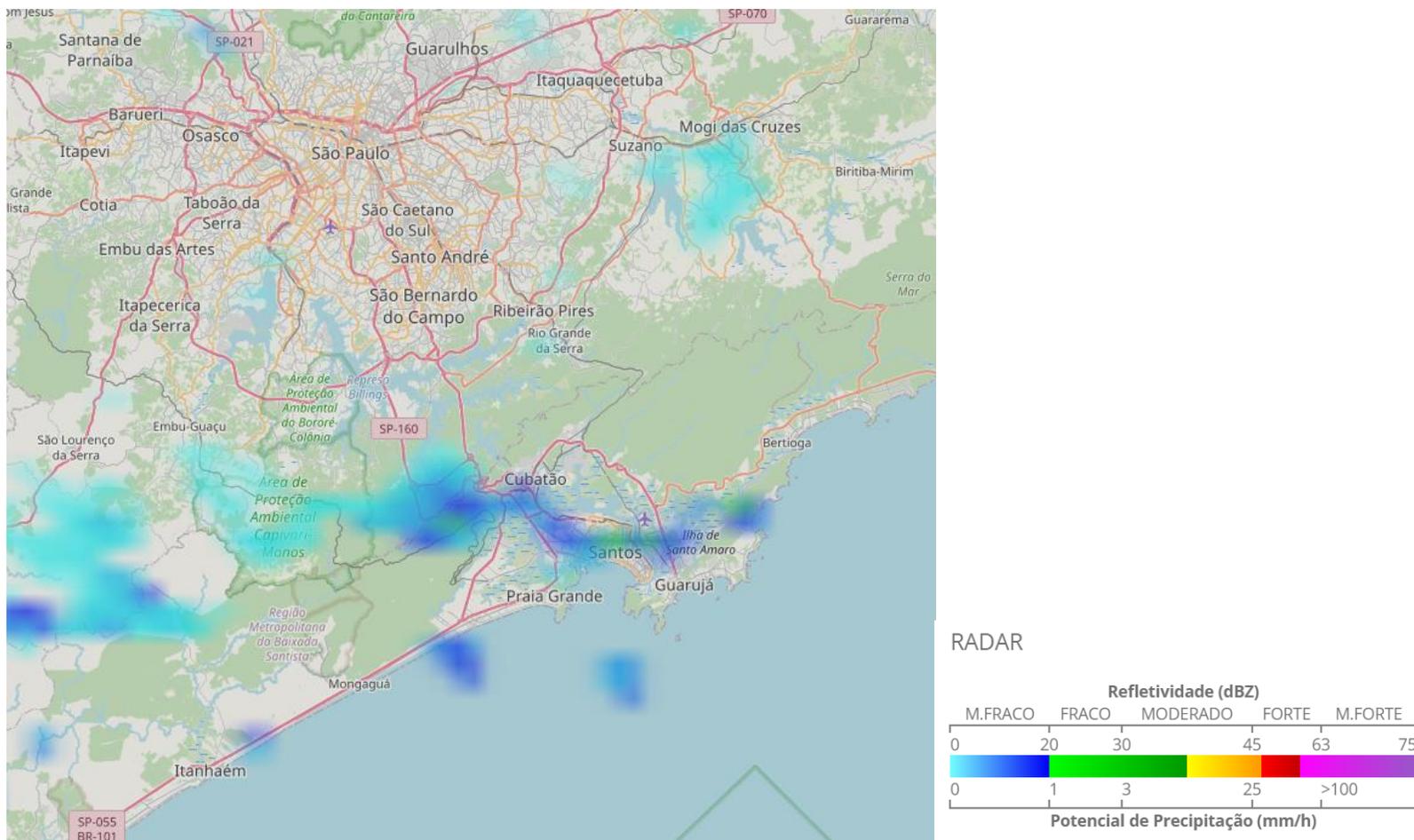


Figura 49 - Imagem da refletividade (dBZ) do radar de São Roque do dia 14 de setembro de 2015, às 06 HL.

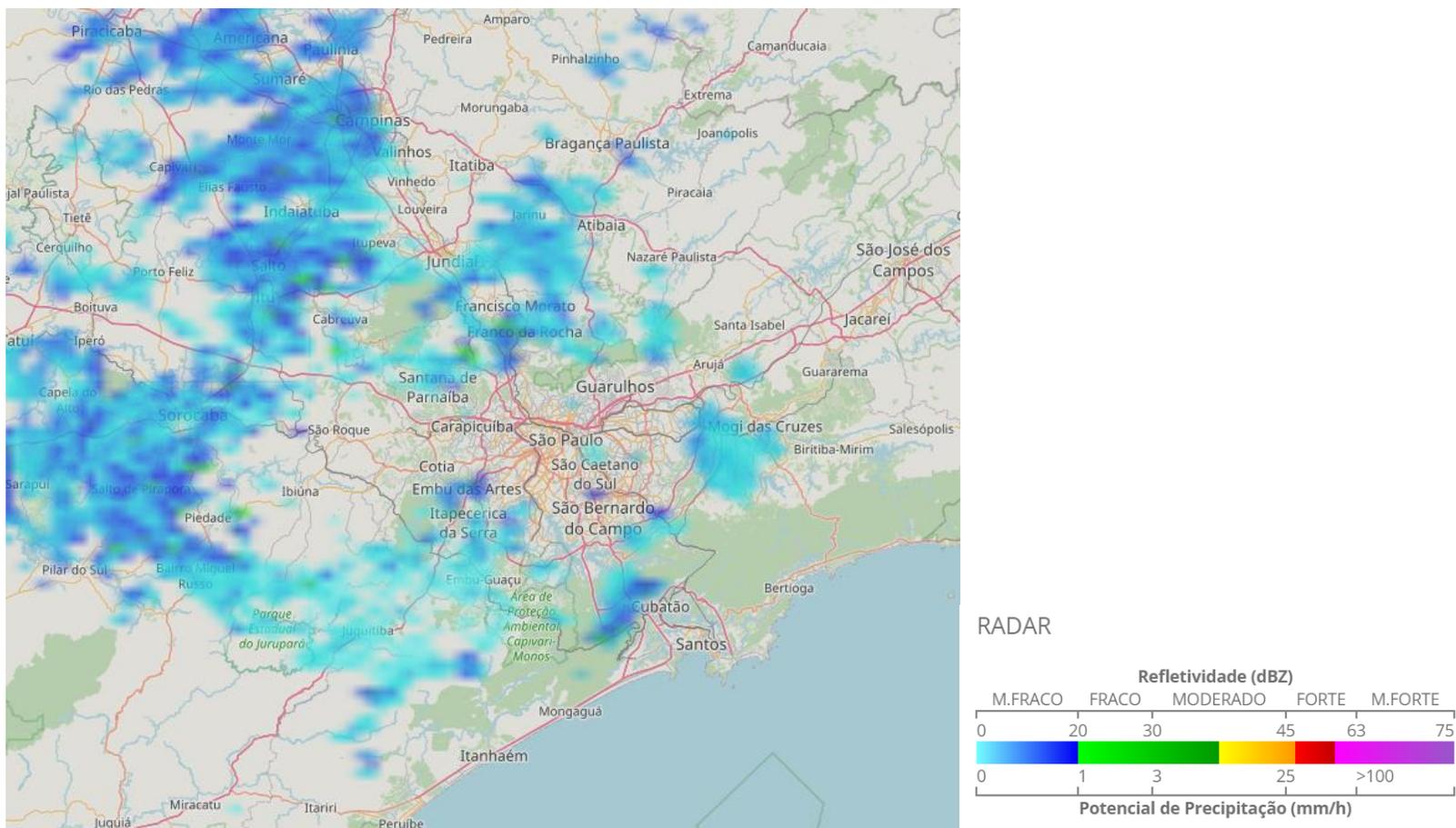


Figura 50 – Imagem da refletividade (dBZ) do radar de São Roque do dia 14 de setembro de 2015, às 12 HL.

4.2.4.4 Caso de 21 de setembro: nevoeiro orográfico + brisa marítima (BM)

Ocorreram 7 (6) OC na RA (RI) em 1 período, das 14-20 HL em ambas rodovias, tendo seis horas de duração.

Não há nenhum sistema sinótico sobre a região neste dia e nem nos anteriores como mostra a carta sinótica do CPTEC (Figura 51). Na imagem de satélite, do canal visível, é possível ver uma nebulosidade no litoral e no oceano adjacente de SP com uma aparência lisa e bordas bem definidas pela topografia (Figura 51). Nas imagens do radar (não mostradas) a refletividade é muito fraca mais no início da OC, sinalizando que não há precipitação na região.

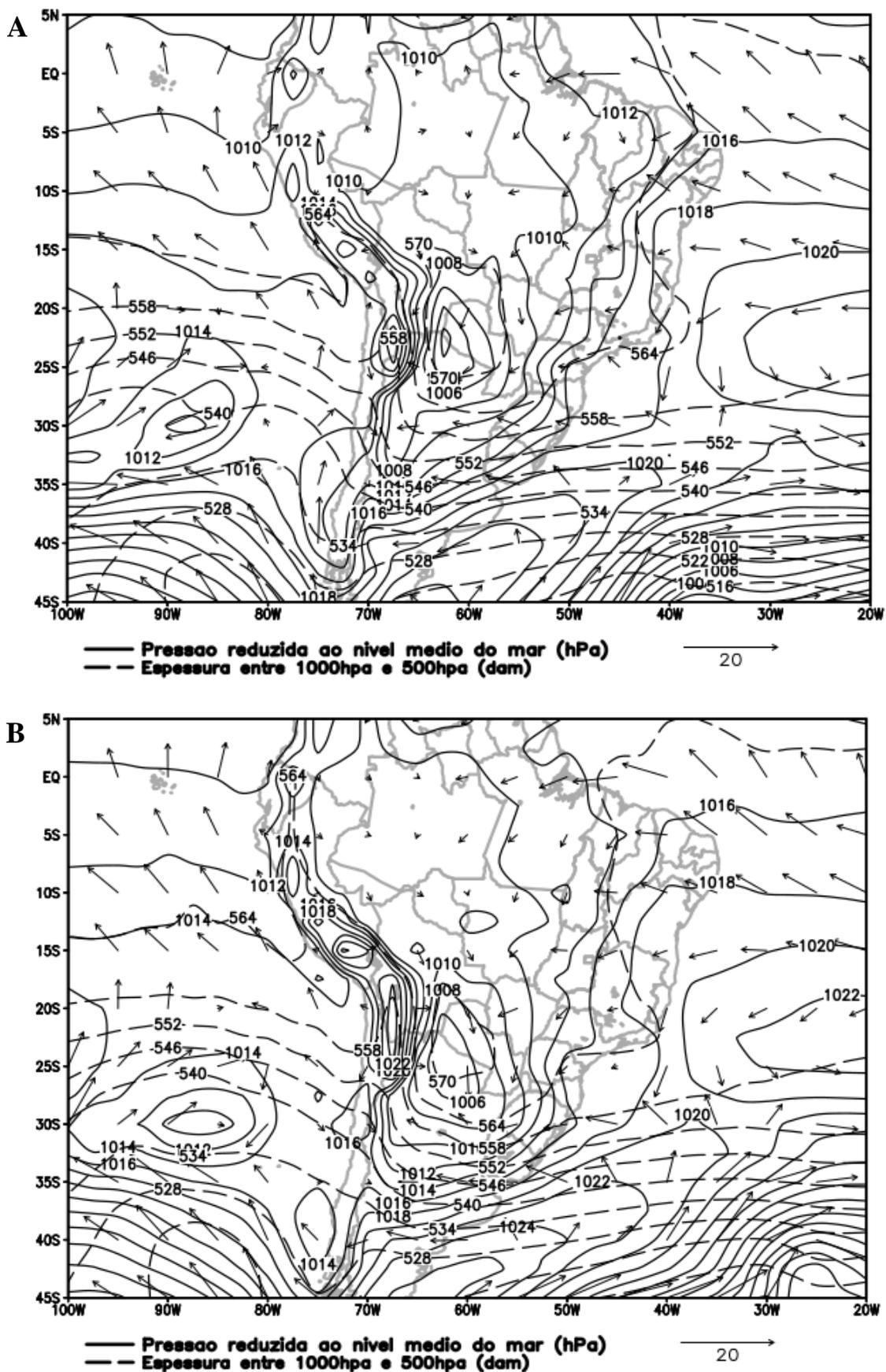


Figura 51 - Cartas sinóticas de superfície das A) 21 do dia 20 de setembro de 2015 e B) 09 HL e imagem do satélite GOES-13 do canal visível às C)14 e D)16:30 HL do dia 21 de setembro de 2015.

GOES13 - Visível (0.65 μm)
América do Sul: 20150921 1700 GMT

CENTRO DE PREVISÃO DE
TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS



GOES13 - Visível (0.65 μm)
América do Sul: 20150921 1930 GMT

CENTRO DE PREVISÃO DE
TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS

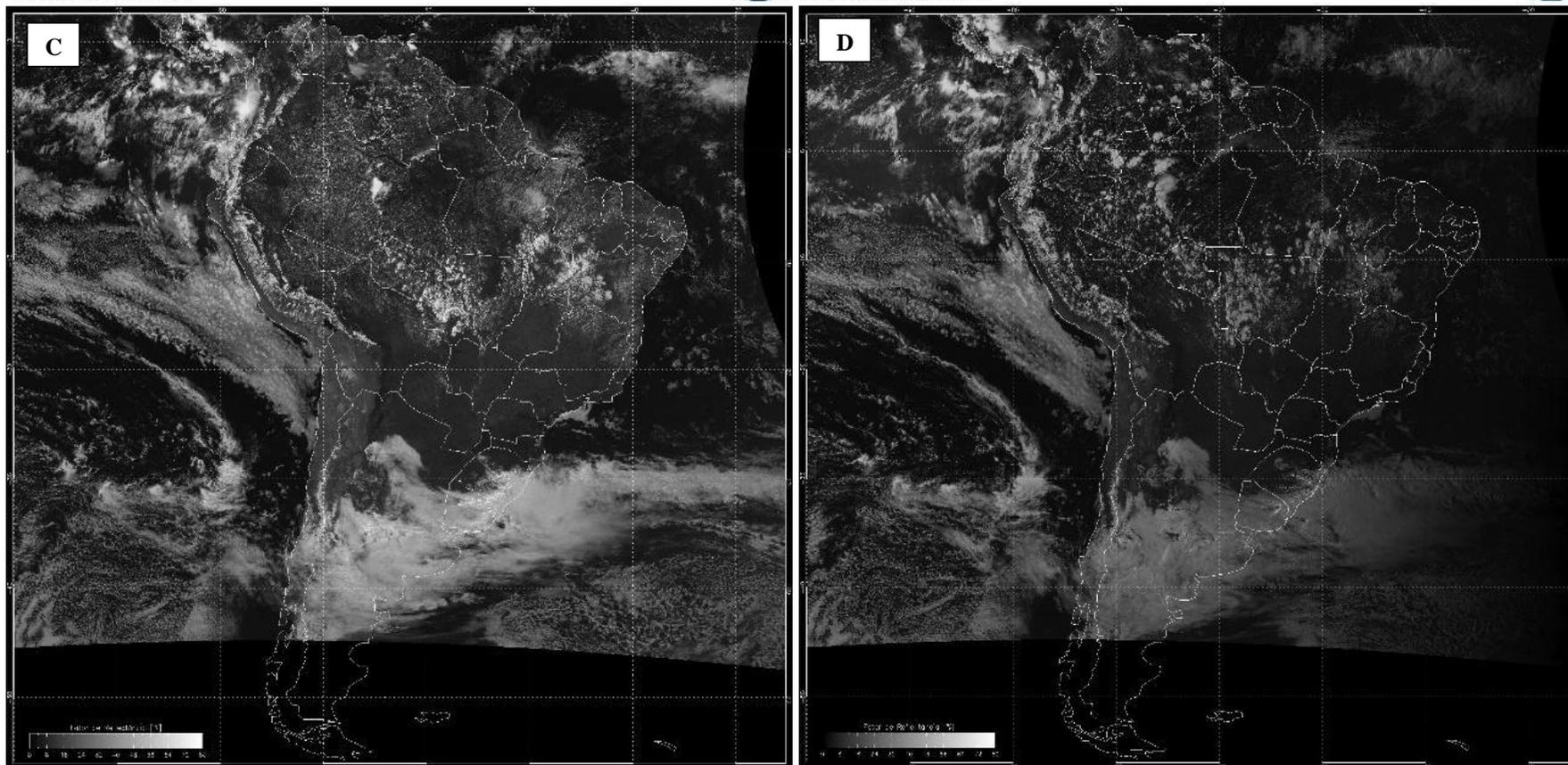


Figura 51 – Continuação.

Os dados na EM/Itutinga (Tabela 8 e Figura 52) mostram que a temperatura vai aumentando das 8:30 HL até atingir o máximo de 27,6 °C às 12:30 HL, quando a BM passa pela estação, virando e intensificando o vento de NE (durante o período da manhã) para SE (a partir das 12:30 HL), padrão já identificado por Oliveira e Silva Dias (1982) como entrada da BM em São Paulo. A entrada do ar marítimo também é notada pelo aumento da umidade relativa que atinge 99% às 14:30 HL, quando tem início a OC. Os ventos vão enfraquecendo a partir das 18:30 HL, o que diminui a advecção de umidade na região, proporcionando melhor visibilidade e o fim da OC às 20 HL. Em Santos, houve registro de nebulosidade baixa durante quase todo o dia. Em Congonhas, a nebulosidade foi variável. Entretanto, a temperatura máxima atingida foi de 32 °C (com 8 °C de ponto de orvalho) às 15 HL. Não foi registrada precipitação neste dia, e, portanto, a OC foi associada à diminuição da visibilidade causada por nevoeiro orográfico tendo como fonte de umidade a BM. Muitos estudos como, por exemplo, o de Oliveira e Silva Dias (1982), observaram esse mesmo padrão nas características da entrada da BM: aumento na intensidade do vento, mudança na direção do vento, queda de temperatura e aumento de umidade.

Tabela 8 - Dados da estação meteorológica de Itutinga para o dia 21 de setembro de 2015.

Dados Estação de Itutinga - 21 de setembro de 2015						
Hora (h:mm)	Temp. Med (°C)	Dir. vento (°)	Vel. Vento (m/s)	UR (%)	Umíd Esp(g/kg)	Prec (mm/h)
0:30	12,7	219,7	0,4	100,0	6,0	0,0
1:30	12,3	221,2	0,1	100,0	5,9	0,0
2:30	11,7	270,0	0,0	100,0	5,8	0,0
3:30	11,4	270,0	0,0	100,0	5,8	0,0
4:30	11,3	270,0	0,0	100,0	5,8	0,0
5:30	12,4	38,4	0,5	100,0	5,9	0,0
6:30	15,3	96,1	0,6	100,0	6,4	0,0
7:30	16,8	41,8	1,6	100,0	6,7	0,0
8:30	18,5	25,6	1,8	99,1	7,0	0,0
9:30	22,6	27,4	1,6	87,3	6,8	0,0
10:30	26,3	44,3	1,4	71,7	6,2	0,0
11:30	27,1	97,1	1,6	72,0	6,3	0,0
12:30	27,6	101,9	1,7	71,8	6,4	0,0
13:30	23,0	114,5	1,9	88,2	7,0	0,0
14:30	19,7	121,2	1,2	99,4	7,2	0,0
15:30	19,1	126,1	1,0	100,0	7,2	0,0
16:30	18,8	134,8	0,8	100,0	7,1	0,0
17:30	18,3	124,7	0,7	100,0	7,0	0,0

Hora (h:mm)	Temp. Med (°C)	Dir. vento (°)	Vel. Vento (m/s)	UR (%)	Umid Esp(g/kg)	Prec (mm/h)
18:30	17,8	89,5	0,4	100,0	6,9	0,0
19:30	17,4	190,1	0,1	100,0	6,8	0,0
20:30	17,1	284,9	0,2	100,0	6,8	0,0
21:30	16,4	258,3	0,1	100,0	6,6	0,0
22:30	16,2	199,8	0,1	100,0	6,6	0,0
23:30	15,7	221,1	0,2	100,0	6,5	0,0

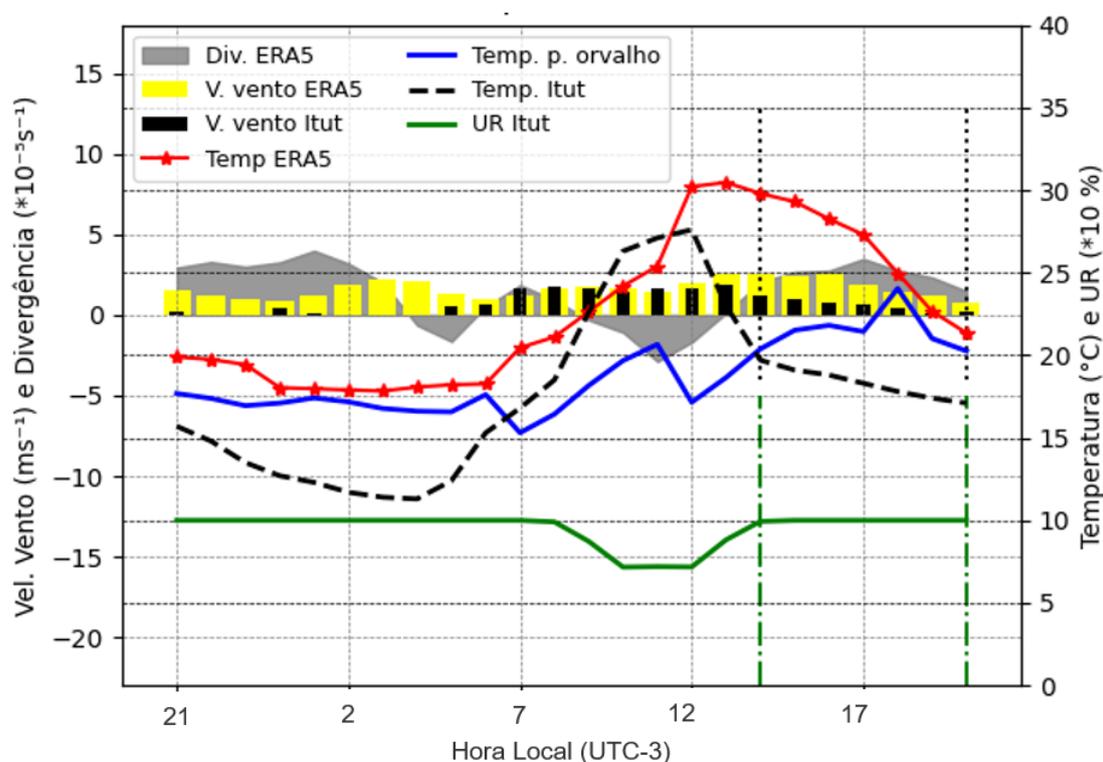


Figura 52 - Idem à Figura 39, mas para o final do dia 20 até a noite do dia 21 de setembro de 2015.

Os mapas do ERA5 (Figura 53) corroboram com os dados na EM/Itutinga. A evolução dos campos de temperatura de ponto de orvalho e vento entre 09 - 18 HL é mostrada na Figura 53 do ERA5. Às 09 HL, os ventos são de leste em toda a região, com temperaturas de ponto de orvalho relativamente altas. A entrada da BM na região da OC ocorre a partir das 12 HL, quando também é possível notar o movimento do ar mais úmido continente adentro. A OC é realizada antes da descida da Serra do Mar que é uma cadeia montanhosa situada próxima a costa marítima o que faz com que a brisa marítima-terrestre combine com a circulação de vale/montanha, intensificando a circulação associada à BM. À tarde, ventos encosta acima auxiliam a penetração continental do ar marítimo associado com a BM. Isto combinado com o escoamento geral no sentido do

continente, às vezes resulta numa penetração de ar marítimo numa maior extensão (~100 km). Isto acontece ao longo da maior parte da costa leste do Brasil e pode ser observada nas cartas das 15 e 18 HL. Neste último horário percebe-se a desintensificação dos ventos mais próximo ao litoral, o que deve ter diminuído também a advecção de umidade na região e favorecendo o término da OC às 20 HL.

Na EM/IAG foi registrado orvalho às 20 HL no dia 21 e às 07 HL do dia 22 (não há horário de início devido ao horário do expediente do observador).

Portanto a diminuição da visibilidade neste dia foi causada por: nevoeiro orográfico, com advecção de umidade devido à BM.

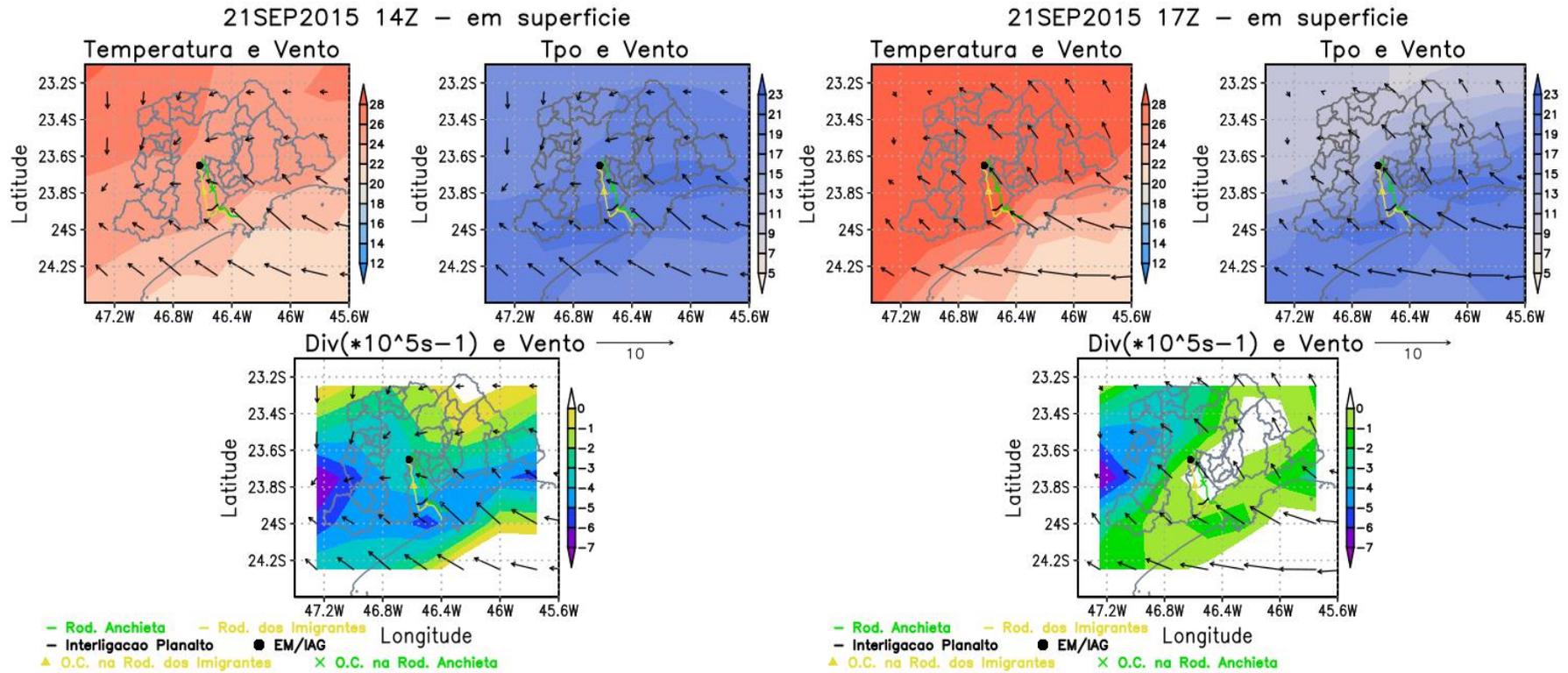


Figura 53 - Campos de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor), Temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor) e Divergência ($*10^{-5} \text{ s}^{-1}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor) do ERA5 para às 11, 14, 17 e 20 HL do dia 21 de setembro de 2015.

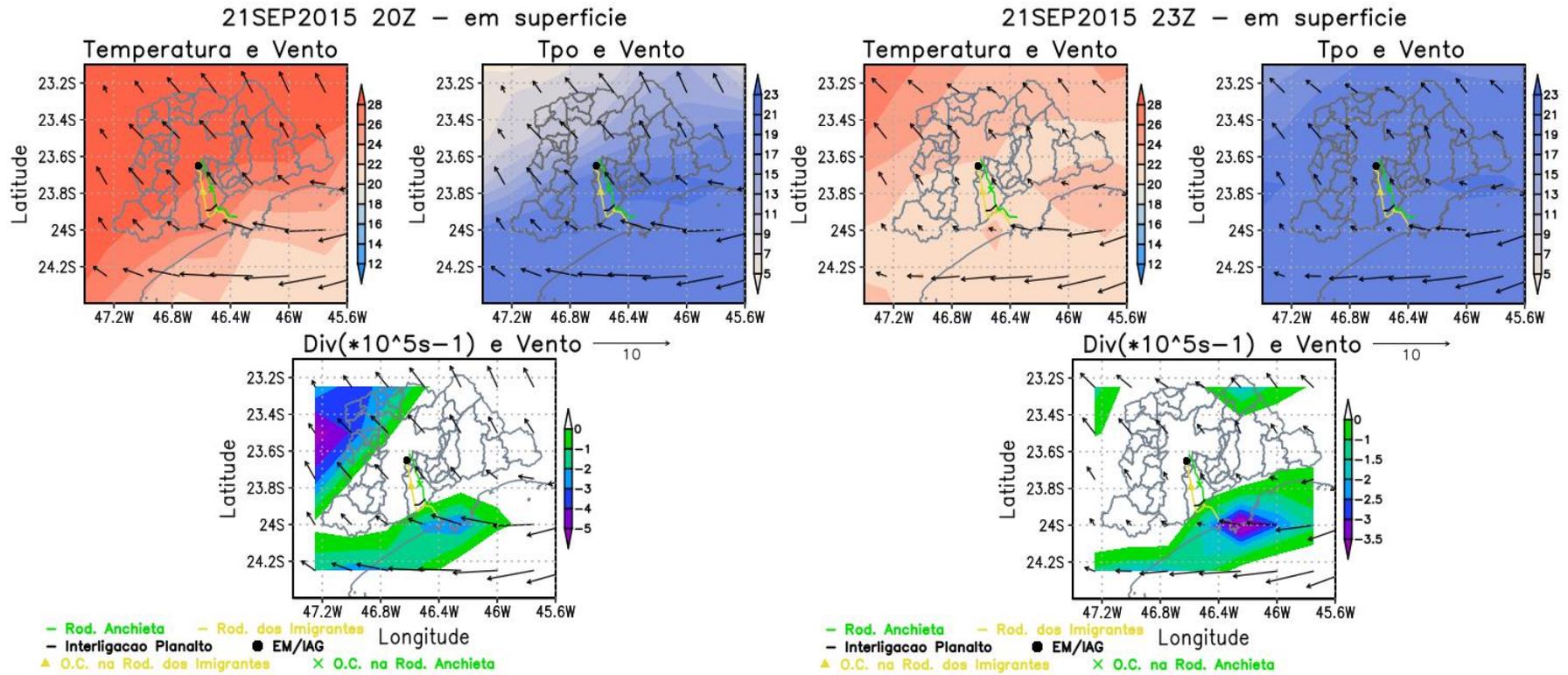


Figura 53 – Continuação.

4.2.4.5 Caso de 23 de novembro: nevoeiro orográfico + instabilidades

Ocorreram 14 (7) OC na RA (RI) em 3 períodos, das 00-06 (02-03), 09-11 (09-11) e das 14-23 (21-23) HL, tendo seis (uma), duas (duas) e nove (duas) horas de duração.

Em escala sinótica, no dia 22 havia uma APF sobre litoral SP. No dia 23 (Figura 54 A e B) não havia nenhum sistema sinótico sobre a região. Sobre o oceano há uma FF próximo ao litoral de SC. Em 500 hPa havia um ligeiro cavado que pode ter fornecido suporte dinâmico para os sistemas convectivos. As radiossondas do Aeroporto de Campo de Marte (Figura 54 C e D) mostraram alguns índices indicando instabilidade (Índice K: 41,70; Showalter: -3,05) às 21 HL do dia 22 e (Índice K: 35,30; Total-Totals: 44,2; Showalter: -0,80) às 21 HL do dia 23 (referência Hallack e Pereira Filho, 2012). Na EM/IAG foi registrado precipitação de 0,7 mm h⁻¹ às 07 HL, 2,3 às 14 HL e de 1,9 mm h⁻¹ às 21 HL. No Aeroporto do Congonhas também foi registrado chuva durante quase todo o dia.

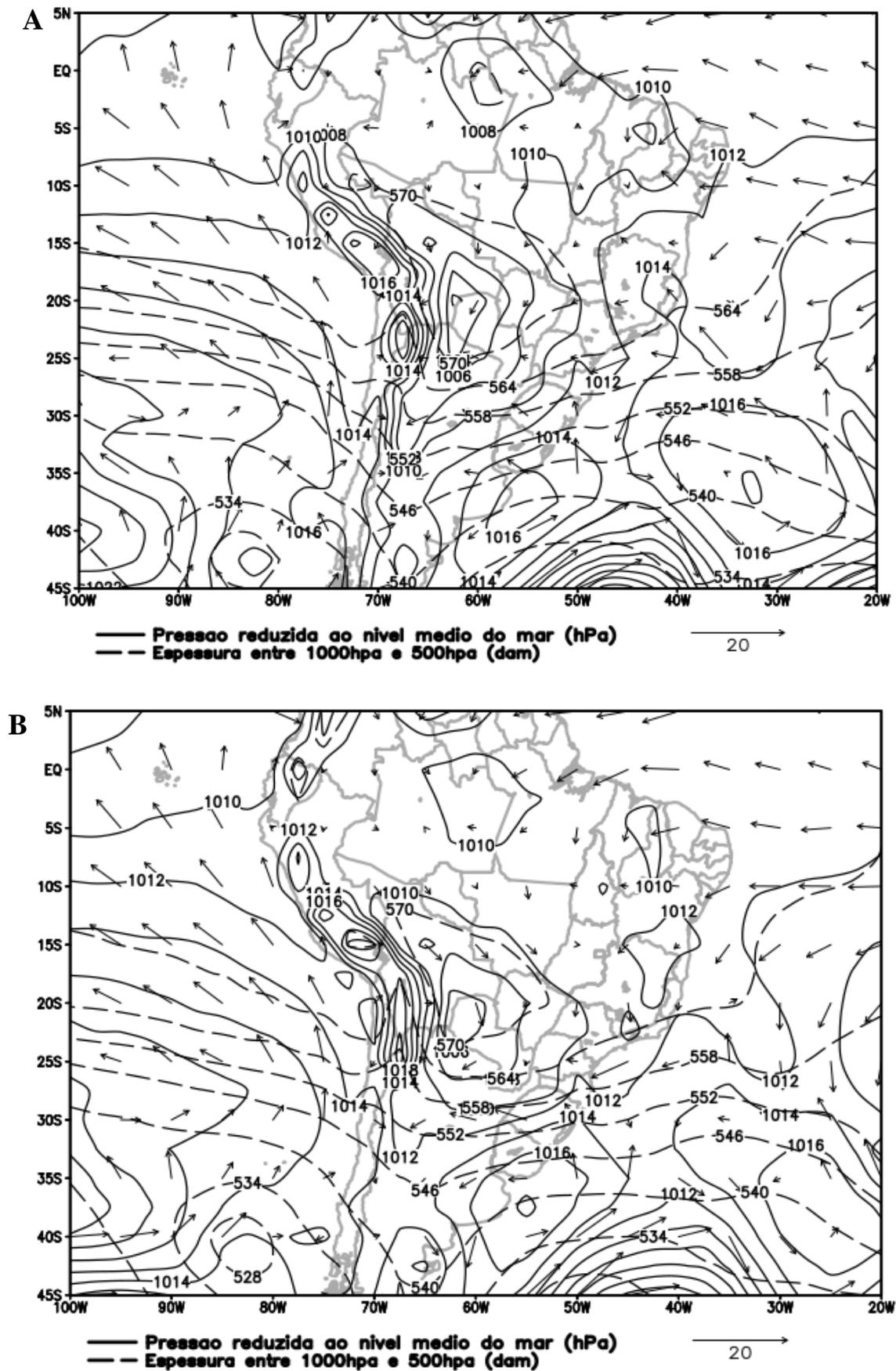


Figura 54 - Cartas sinóticas de superfície às A)00 e B)09 HL e radiossondas do Aeroporto de Campo de Marte das A)21 HL do dia 22 de novembro de 2015 e das B) 21 HL do dia 23 de novembro de 2015.

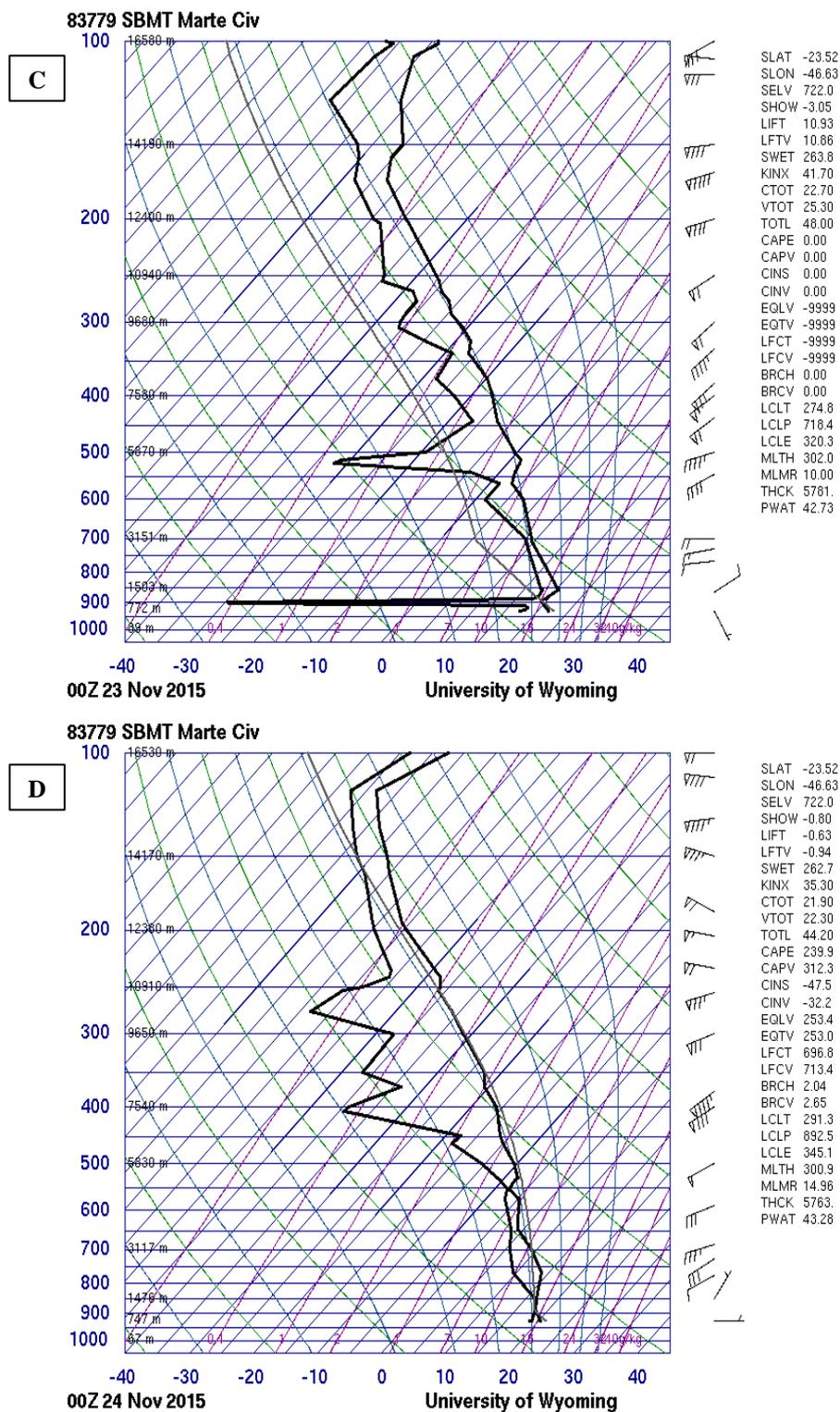


Figura 54 – Continuação.

Para as OC que ocorreram dentro do intervalo das 00 – 06 HL os ventos, registrados pela EM/Itutinga, foram fracos (média de $0,5 \text{ m s}^{-1}$) predominantemente de SW. A temperatura média foi de $18,8 \text{ }^\circ\text{C}$ tendo um pequeno aumento no início e, depois,

começou a resfriar. A UR foi de 100% e teve registro de precipitação de 0,3 mm h⁻¹ às 02:30 HL (Tabela 9)

Tabela 9 - Dados da estação meteorológica de Itutinga para o dia 23 de novembro de 2015.

Dados Estação de Itutinga - 23 de novembro de 2015						
Hora (h:mm)	Temp. Med (°C)	Dir. vento (°)	Vel. Vento (m/s)	UR (%)	Umid Esp(g/kg)	Prec (mm/h)
0:30	18,8	203,2	0,6	100,0	7,1	0,0
1:30	18,9	205,4	0,5	100,0	7,2	0,0
2:30	18,9	98,2	0,6	100,0	7,1	0,3
3:30	18,8	151,5	0,4	100,0	7,1	0,0
4:30	18,8	215,7	0,7	100,0	7,1	0,0
5:30	18,5	194,0	0,3	100,0	7,1	0,0
6:30	18,7	218,7	0,1	100,0	7,1	0,0
7:30	19,0	230,0	0,5	100,0	7,2	1,8
8:30	19,7	98,8	0,7	100,0	7,3	0,0
9:30	20,4	136,9	0,7	100,0	7,4	0,3
10:30	21,4	57,2	0,8	100,0	7,6	0,0
11:30	21,4	11,7	0,4	100,0	7,6	0,0
12:30	21,8	300,7	1,2	100,0	7,7	0,0
13:30	21,6	225,3	0,8	100,0	7,7	0,3
14:30	20,6	160,3	1,1	100,0	7,5	0,5
15:30	20,0	145,4	0,6	100,0	7,4	3,0
16:30	19,7	186,6	0,5	100,0	7,3	1,3
17:30	19,3	132,1	0,5	100,0	7,2	0,3
18:30	19,1	201,0	0,1	100,0	7,2	0,8
19:30	19,1	76,5	0,6	100,0	7,2	0,0
20:30	19,1	119,8	0,8	100,0	7,2	0,0
21:30	19,2	98,9	1,0	100,0	7,2	0,3
22:30	19,2	82,6	0,6	100,0	7,2	0,0
23:30	19,3	182,5	0,2	100,0	7,2	0,0

Os horários sombreados indicam o intervalo de tempo em que ocorreram as Operações Comboio

Nas imagens de satélite (Figura 55) pode-se observar um sistema convectivo vindo de SW, que passa sobre o local de estudo por volta das 23:30 HL do dia 22 de novembro. Mais tarde, por volta das 04 HL do dia 23, outro sistema, que estava mais para sul, sobre o oceano, passa na região. Nos campos do ERA5 (Figura 56) a convergência aparece das 01 - 03 e das 06 - 08 HL tendo ventos de quadrante SW no início e, depois, ventos de S.

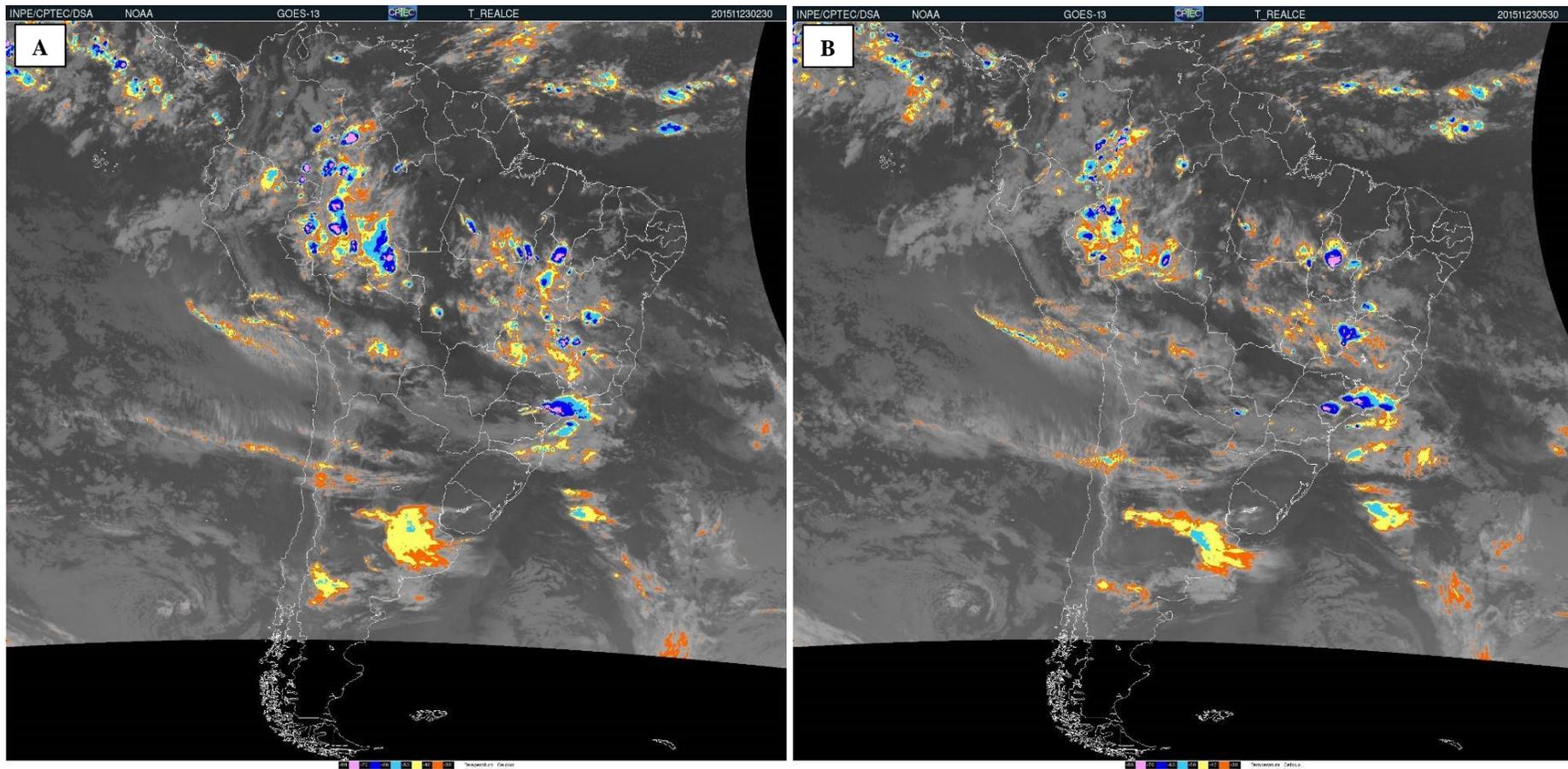
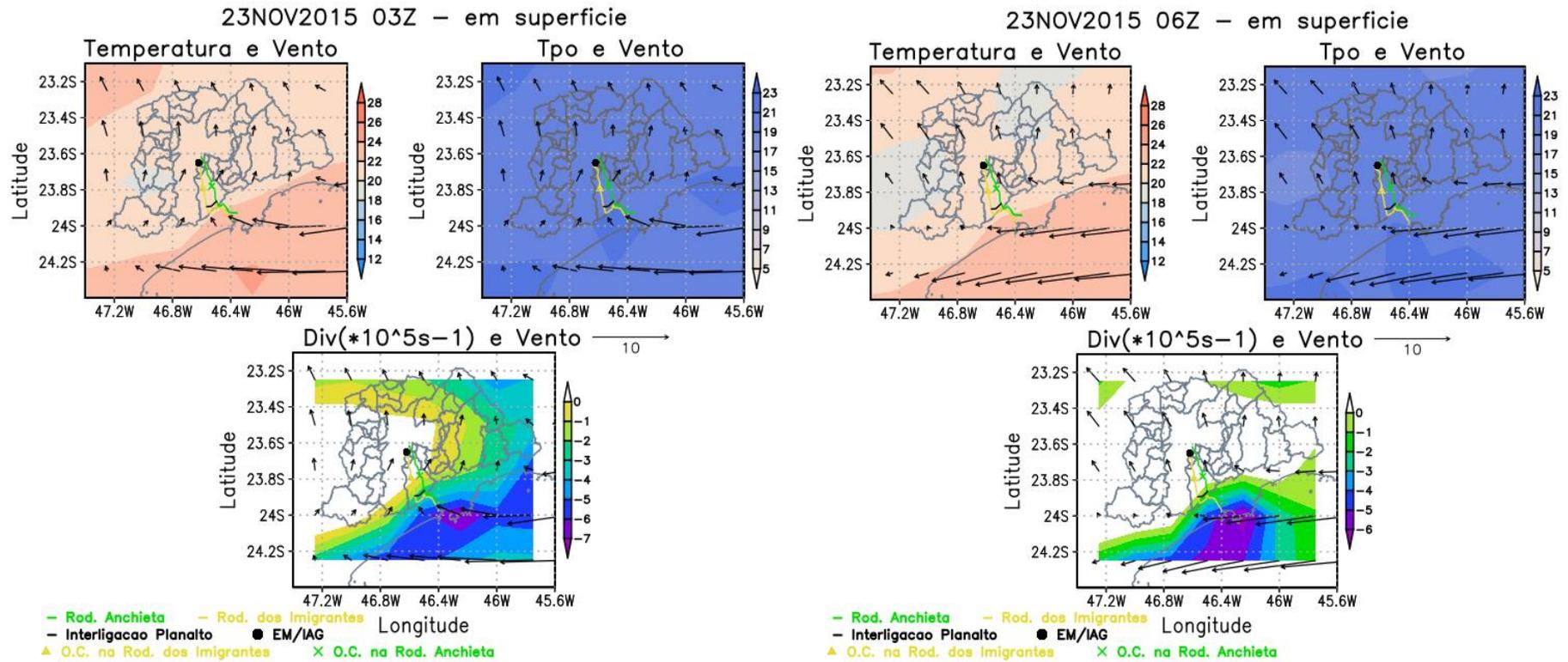


Figura 55 - Imagens do satélite GOES-13 do canal infravermelho realçado às A) 02:30 e às B) 02:30 HL do dia 23 de novembro de 2015.



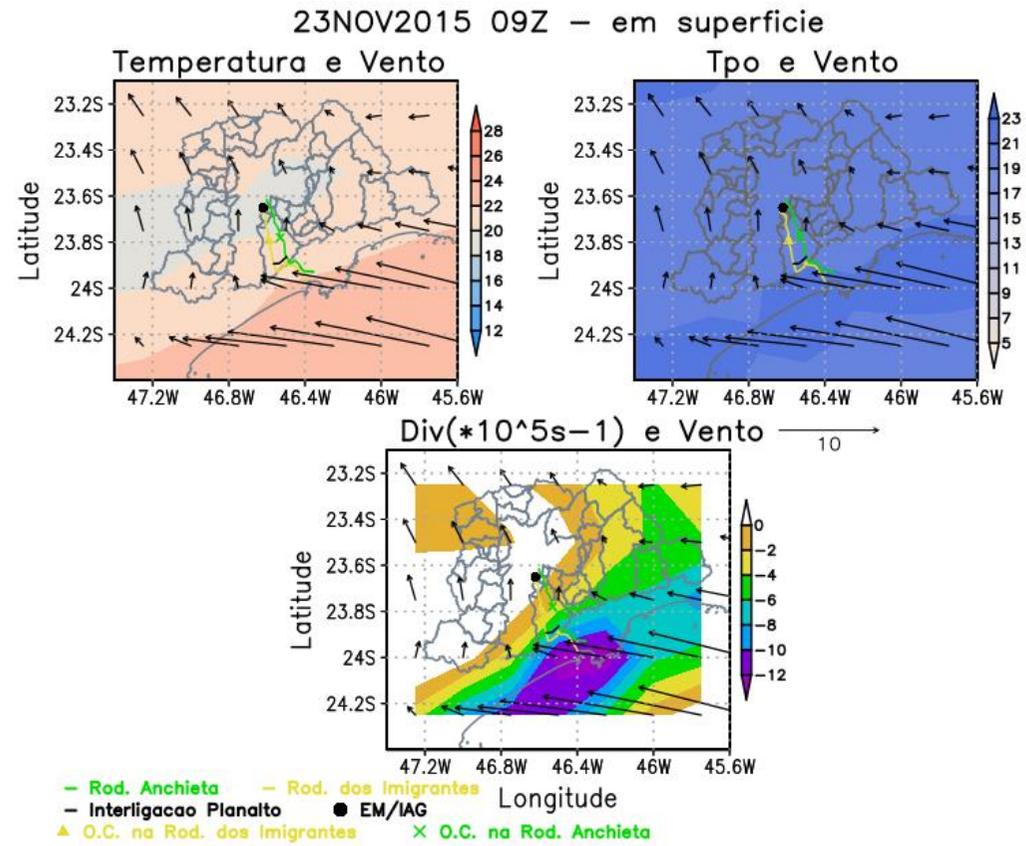


Figura 56 - Continuação.

Nas imagens do radar foi possível observar vários sistemas convectivos por volta da região de estudo, onde aparece com refletividade muito fraca onde, por volta das 02 HL, passa um sistema com refletividade de muito fraca a fraca, possivelmente o que causou a precipitação.

A dissipação do nevoeiro se deu por volta do horário do nascer do sol. O aquecimento solar é um dos fatores que contribuem para dissipação do nevoeiro radiativo sobre uma superfície não líquida (Damasceno, 2008).

Portanto a diminuição da visibilidade neste período do dia foi causada por: nevoeiro devido à advecção de umidade de SW associada a uma célula de precipitação convectiva.

Os que ocorreram entre as 09 – 11 HL, é possível notar que a temperatura aumentou $0,6\text{ }^{\circ}\text{C h}^{-1}$, a UR permaneceu em 100% e teve registro de precipitação às 09:30 HL. A direção do vento mudou de SW (no qual fluiu por umas 4 horas antes da OC) para de SE/E, com velocidade média de $0,7\text{ m s}^{-1}$ (Tabela 9).

Nos campos do ERA5 (Figura 57) observa-se bem essa virada na direção do vento. Durante o período da OC não apareceu convergência na região.

Nas imagens de satélite (Figura 58), pode-se ver um sistema maior, que surgiu sobre o sul de SP horas antes, sobre a região. Esse sistema se desloca para leste. Nas imagens do radar, antes da passagem do sistema convectivo, aparece uma refletividade muito fraca sobre a região da OC.

Portanto a diminuição da visibilidade neste período dia foi causada por: nevoeiro devido à precipitação.

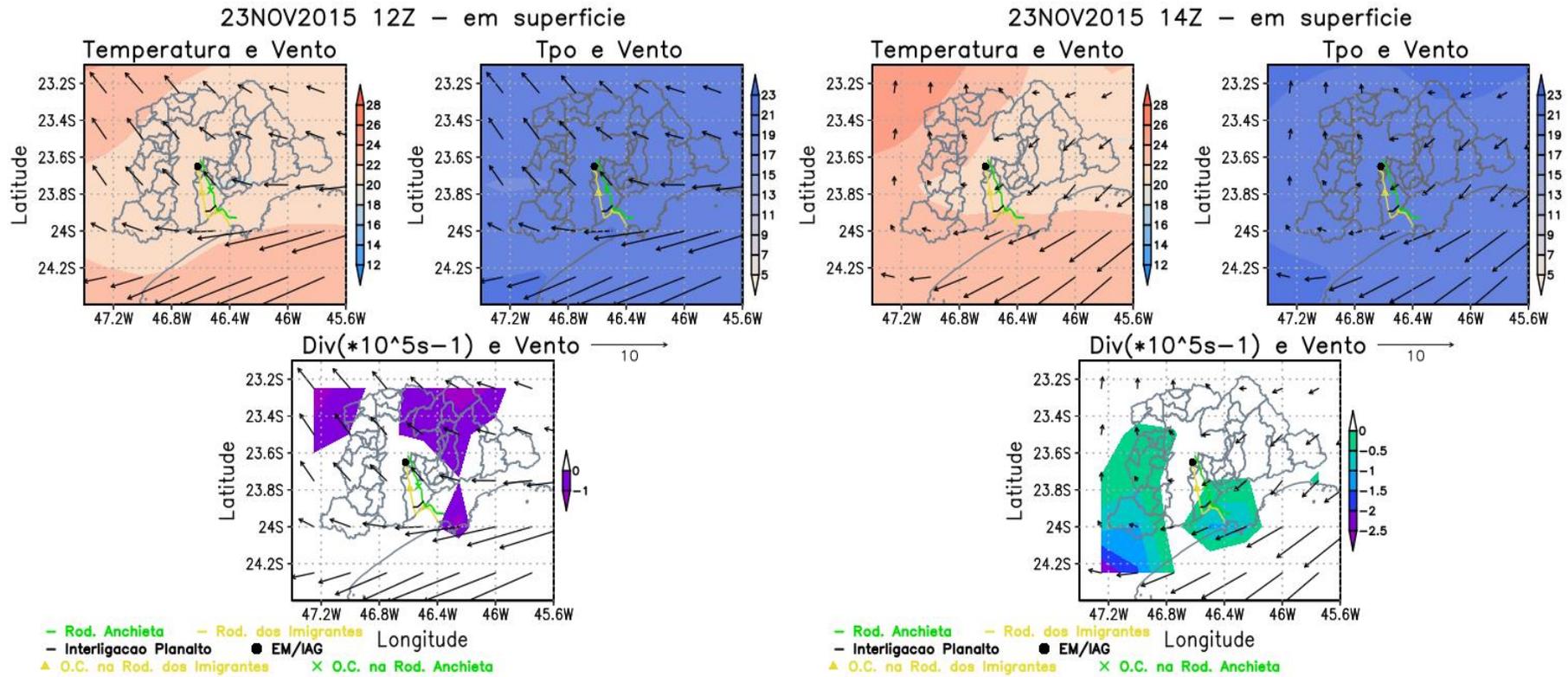


Figura 57 - Campos de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor), Temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor) e Divergência ($\ast 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor) do ERA5 para às 09 e 11 HL do dia 23 de novembro de 2015.

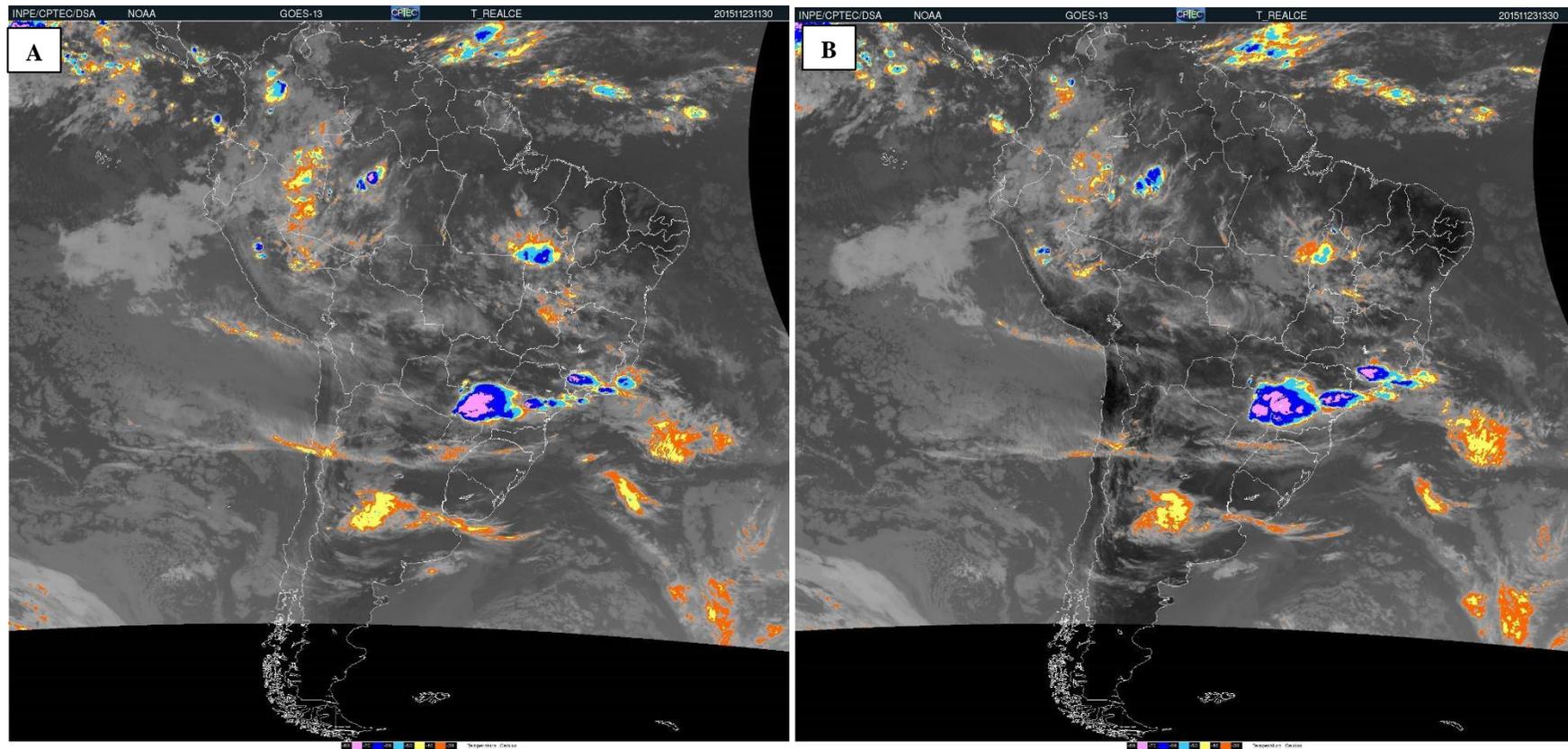


Figura 58 - Imagens do satélite GOES-13 do canal infravermelho realçado A) 08:30 e B)10:30 HL do dia 23 de novembro de 2015.

Com relação ao período das 14 – 23 HL (Tabela 9 e Figura 59), a temperatura teve um resfriamento no início-meio da OC (taxa de $0,3\text{ }^{\circ}\text{C h}^{-1}$) e, a partir das 18:30 HL foi aumentando. A direção predominante do vento foi de SE. A velocidade predominante do vento foi de 0,6

m s^{-1} . A UR foi de 100%. Teve registro de precipitação desde 1 hora antes do início da OC, acumulando $5,8 \text{ mm h}^{-1}$ durante o evento. Teve registro de precipitação também às 21:30 HL, de $0,3 \text{ mm h}^{-1}$.

Nas imagens de satélite (Figura 60) pode-se ver que o sistema convectivo, presente na região citado anteriormente, se desloca para NE com o passar do tempo e aumentando sua área. Essa área com temperaturas mais baixas, passa sobre a região de estudo até umas 20 HL, aproximadamente.

Nas imagens do radar esse sistema aparece com refletividade de muito fraca a fraca. A partir das 19 HL a refletividade diminui (muito fraca).

Portanto a diminuição da visibilidade neste período do dia foi causada por: nevoeiro devido à precipitação convectiva e advecção de SE/E.

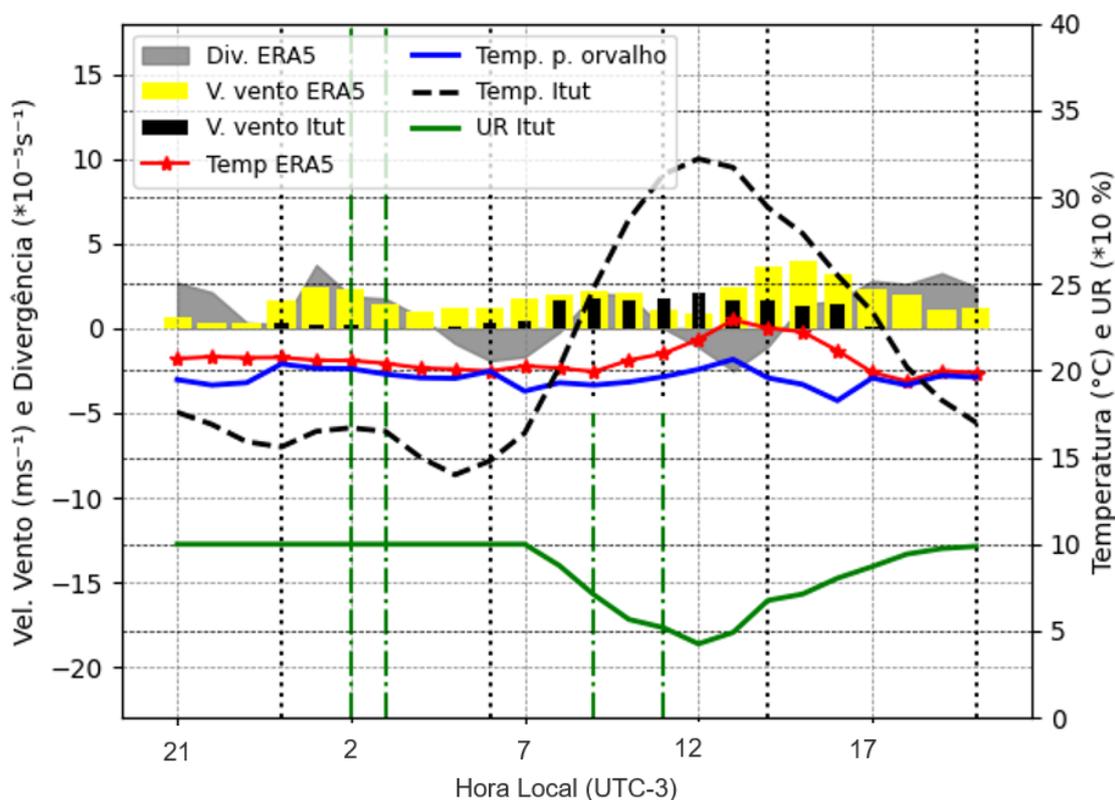


Figura 59 - Idem à Figura 39, mas para o final do dia 22 até a noite do dia 23 de novembro de 2015.

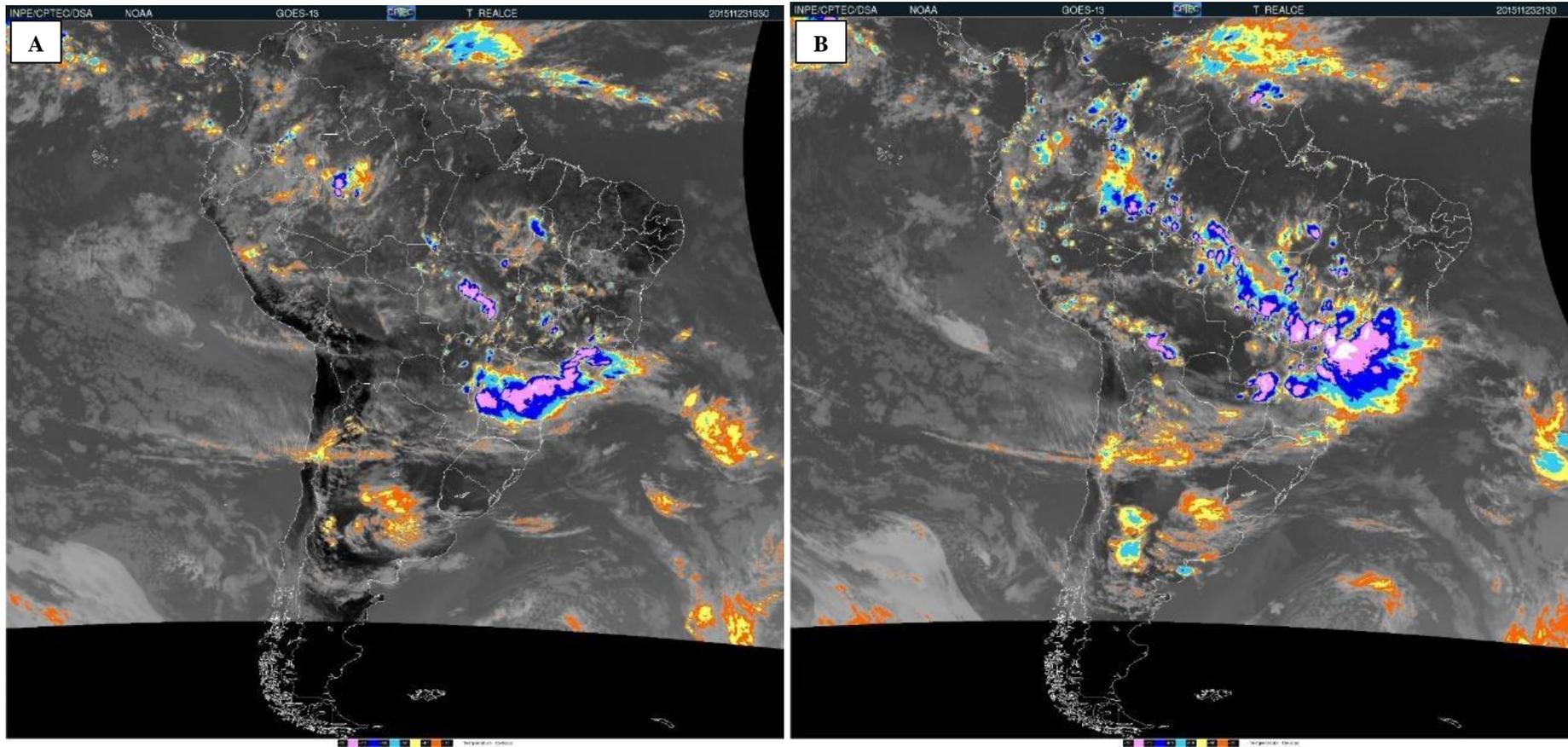


Figura 60 - Imagens do satélite GOES-13 do canal infravermelho realçado A) 13:30 e B)18:30 HL do dia 23 de novembro de 2015.

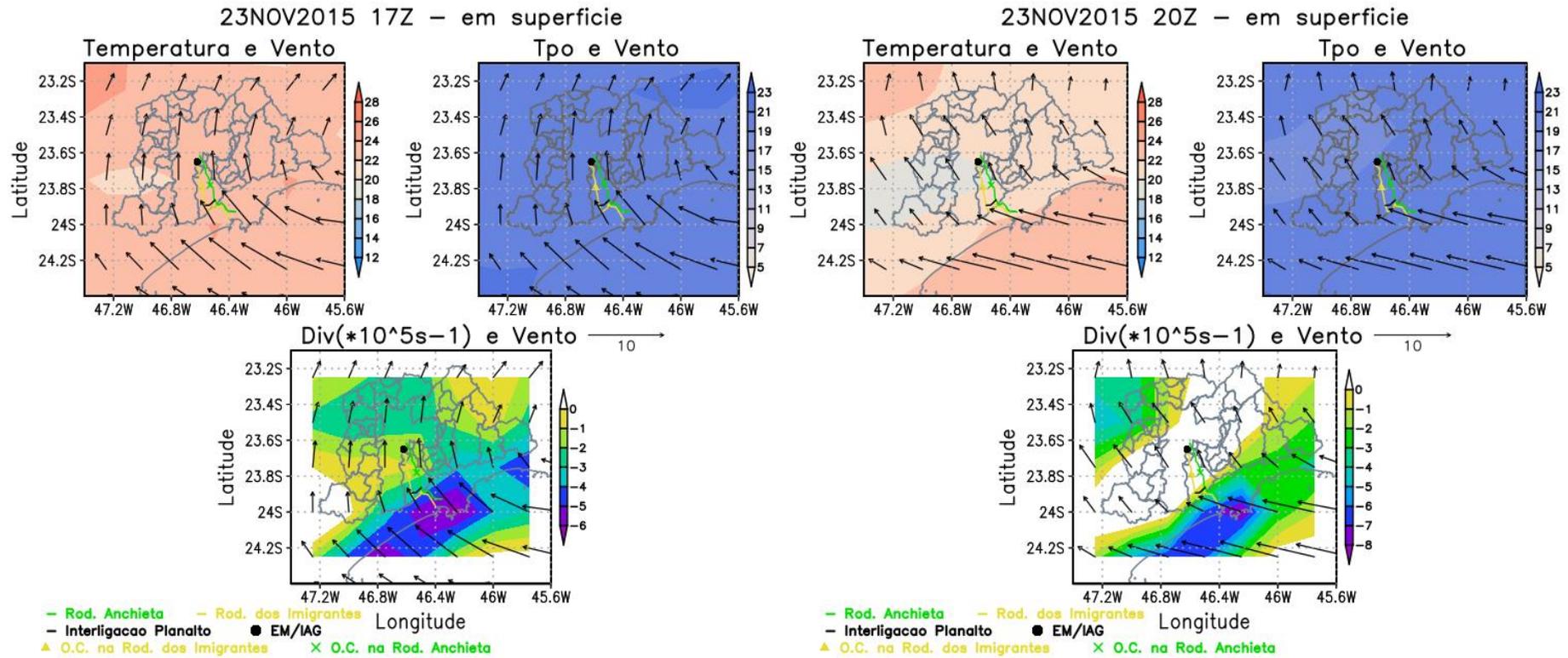


Figura 61 - Campos de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor), Temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor) e Divergência ($*10^{-5} \text{ s}^{-1}$, colorido) e vento (m s^{-1} , vetor) do ERA5 para às 14, 17 e 20 HL do dia 23 de novembro de 2015.

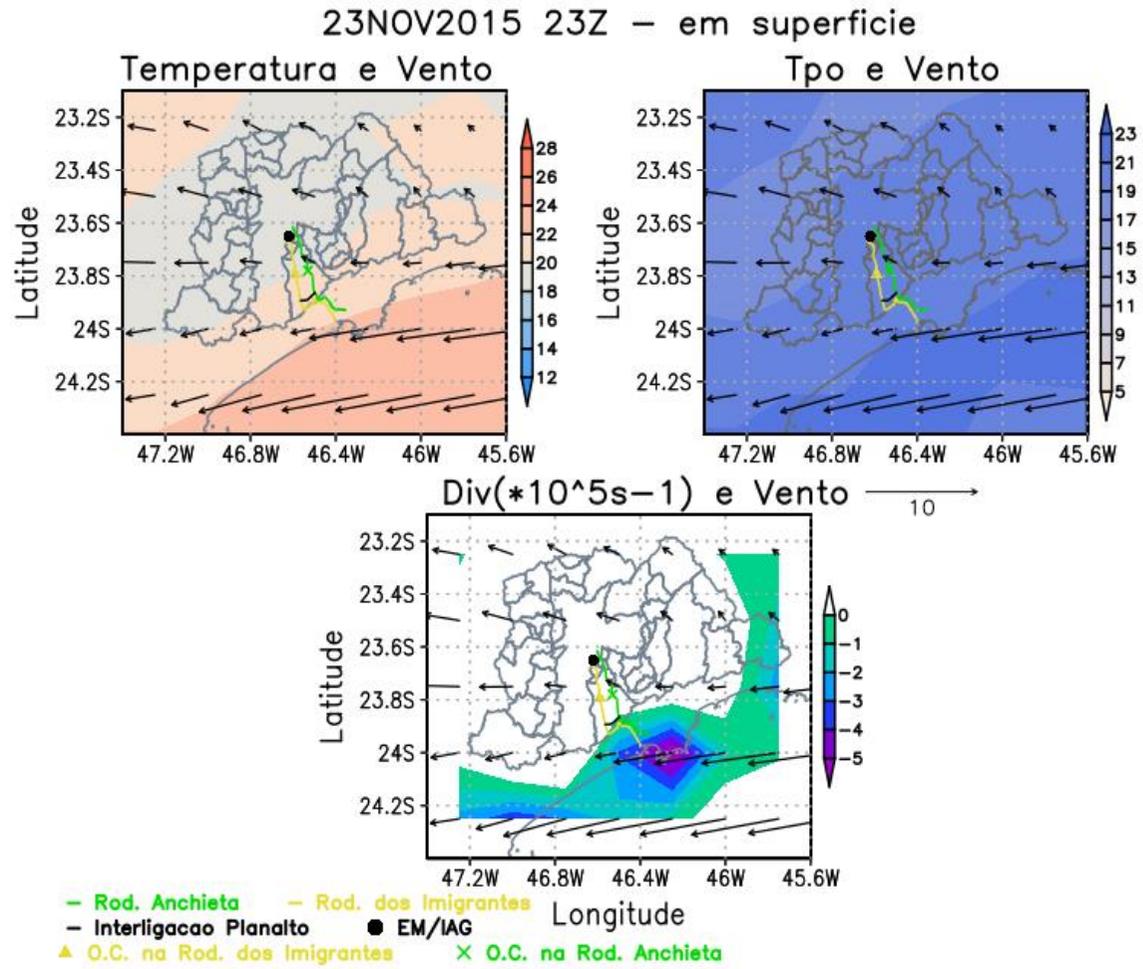


Figura 61 – Continuação.

4.2.5 Conclusões dos estudos de caso de 2015

O ano de 2015 foi um ano de forte El Niño e a temperatura da superfície do mar (TSM) no Oceano Atlântico adjacente ao estado de São Paulo estiveram anormalmente mais quentes também. Conseqüentemente a evaporação das águas do oceano aumenta, elevando a quantidade de vapor d'água disponível no ar. Além disso, o ciclo diurno de aquecimento e resfriamento das encostas da Serra do Mar favorecem a formação da brisa vale-montanha, e o contraste de temperatura entre o oceano e a temperatura máxima do continente, propicia a configuração do sistema de BM (mais intensas e frequentes no segundo semestre do ano – primavera e verão – Oliveira e Silva Dias 1982) que carrega a umidade para dentro do continente. Essa BM atingiu o planalto em alguns casos de OC, mas nem sempre ela atingiu a Grande São Paulo, no caso, a EM/IAG.

De acordo com o boletim climatológico da EM/IAG (EM/IAG, 2016 <http://www.estacao.iag.usp.br/Boletins/2015.pdf>), todos os meses de 2015 apresentaram temperaturas do ar médias mensais maiores que as normais, destacando-se os meses de janeiro, julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro, com valores superiores a 10 % de suas normais mensais. A temperatura média anual (20,4 °C) e a temperatura média mínima anual (16,3 °C) foram também as maiores já registradas desde o início da OC da EM/IAG em 1933. Na EM/IAG, foram batidos os recordes absolutos mensais nos dias 19 de janeiro de 2015: 36,2 °C (o anterior era 03 de Janeiro de 2014, 36,1 °C); 31 de Agosto de 2015: 33,2 °C (o anterior era 31 de Agosto de 1963, 33,0 °C); e 24 de Setembro de 2015: 36,1 °C (o anterior era 27 de Setembro de 1988, 35,3 °C). A maior temperatura registrada em 2015 foi 36,4 °C, em 15 de outubro e a menor temperatura registrada foi 8,2 °C, em 27 de julho. As temperaturas maiores no continente favorecem maior quantidade de eventos de BM, que por sua vez, favorecem a formação de nevoeiro na Serra do Mar.

Ainda na EM/IAG, o ano de 2015 também foi chuvoso, sendo que o total de chuva acumulada (1829,4 mm) foi 30% acima da média climatológica de 1933 a 2015. Os meses mais chuvosos de 2015 foram: janeiro, fevereiro, março, julho, setembro, novembro, sendo que em julho, setembro e novembro choveu mais que o dobro das respectivas médias climatológicas. Em novembro foram registrados 28 dias com chuva.

A passagem de sistemas frontais também foi relevante para a formação de nevoeiros na Serra do Mar. A climatologia indica que a frequência de passagens destes sistemas sobre o estado de São Paulo são maiores na primavera (Cavalcanti e Kousky,

2009) assim como as OC's. Moraes *et al.* (2010) contabilizaram o número de FF que passam por mês na Região Metropolitana de São Paulo: em média 3 FF por mês, com maior frequência nos meses de abril, agosto, setembro e outubro (3,5 FF por mês). No ano de 2015, entre abril e dezembro passaram entre 4 e 5 FF frias por mês na região do Sistema Anchieta-Imigrantes (GREC, 2022). Esta maior quantidade de FF ao longo de 2015 implica em maior quantidade de situações onde a APF predomine na região, o que também favoreceu o grande número de OC's implementadas nesse ano.

A formação dos fenômenos ne névoas/nevoeiros na Serra do Mar é um tanto quanto complexo, por exemplo, em alguns momentos têm-se BM, mas não tem a presença de névoa/nevoeiro. Para uma possível previsão do fenômeno é necessário um estudo de diversos fatores como TSM, circulações locais, sistemas transientes, bem como estudos de escala micrometeorológica, entre outras que serão citadas no tópico Sugestões para trabalhos futuros.

O número de OC's a serem realizadas deve levar em conta, além dos sistemas meteorológicos que diminuem a visibilidade e, portanto, induzem a formação do nevoeiro, também o trânsito, volume do tráfego – em feriados esse número sobe de forma expressiva - acidentes, fechamento de vias, entre outros.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram feitas análises dos sistemas meteorológicos associados tanto aos nevoeiros da EM/IAG quanto daqueles que iniciaram as OC's no Sistema Anchieta-Imigrantes em 2015.

A maior parte dos nevoeiros da EM/IAG ocorre predominantemente no inverno e o número de dias com nevoeiro tem diminuído ao longo do tempo. Dos nevoeiros que ocorreram no inverno de 2007, 57% foram radiativos e 43% advectivos. A BM contribuiu com 43% dos nevoeiros radiativos e 14% dos nevoeiros advectivos. A APF contribuiu para 25% dos nevoeiros radiativos e 86% dos advectivos e a ASAS esteve presente em 32% dos nevoeiros radiativos. Em 2015, foram registrados 50 nevoeiros, 49 deles foram classificados como radiativos (44% devido à BM e 30% devido à APF). Nota-se um aumento da influência da APF na formação de nevoeiro para o ano de 2015, provavelmente associada a um maior número de FF que passaram na região.

A OC ocorre em maior número na primavera e é mais frequente na Rodovia Anchieta quando comparada com a Rodovia dos Imigrantes. A partir de 2012, houve, em média, aproximadamente 568 OC na Rodovia Anchieta e 423 na dos Imigrantes. Segundo os operadores da SAI, há uma tendência de aumento nas OC's nos últimos anos, entretanto, a amostra fornecida é pequena para se fazer este tipo de afirmação. Há um maior número de OC iniciando à tarde, seguido do período da noite. Das 87 OC estudadas para o ano de 2015, a BM contribuiu em 38% dos casos, seguida da APF, com 31%. Apesar de ser possível identificar o sistema meteorológico associado ao início da OC, nem sempre se consegue determinar o que de fato gerou o nevoeiro. Em geral, a umidade é fornecida por advecção de umidade da BM ou da APF e, por vezes, de algum sistema precipitante resultante da passagem de um sistema frontal ou de alguma instabilidade termodinâmica. A esse aporte de umidade se adiciona a diminuição de temperatura, causada pela entrada da BM, pelo ar pós-frontal ou mesmo pela perda de radiação noturna. Esses aspectos foram todos identificados no início e durante as OC. Entretanto, os mesmos padrões foram identificados em outras ocasiões em que não houve a implementação de OC. Isso mostra a complexidade da formação e dissipação do nevoeiro na Serra do Mar, deixando uma previsão tanto do início quanto para o término de uma OC como um verdadeiro desafio.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho contribui para compreensão da distribuição espacial da frequência de ocorrência das OC's e dos sistemas meteorológicos que os precedem, mas alguns pontos não foram explorados. O nevoeiro é um fenômeno complexo de abrangência multidisciplinar. Portanto, sugere-se alguns pontos a serem investigados para um melhor entendimento das variáveis que modulam esse fenômeno:

- Estudo de mais casos de OC, em outros anos;
- Relação da poluição com os nevoeiros na Serra do Mar;
- Estudo da microfísica dos nevoeiros;
- Estudo detalhado entre circulação dos ventos e nevoeiros na serra do Mar;
- Relação do nevoeiro nesta região com a temperatura da superfície do Mar;
- Modelagem do nevoeiro na Serra do Mar;
- Previsão de nevoeiro utilizando inteligência artificial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABC do ABC. **Mudanças na Operação Comboio**. 2018. Disponível em: <https://www.abcdoabc.com.br/abc/noticia/mudancas-operacao-comboio-66913>. Acesso em: 30 jan. 2022.
- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 2, p. 135-150, 1998.
- ARMANI, G; FUNARI, F. L; HAEGELY, M. E. Frequência de Nevoeiro na Cidade de São Paulo, *In: IX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA*, 26 – 30 Setembro de 2010, Fortaleza. **Anais [...]** Fortaleza, 2010. p. 1- 15.
- ATKINSON, B. W. *Meso-Scale Atmospheric Circulations*. **Academic Press**, London. p. 125-214, 1981.
- BARRETO, E.C.A. Estudo sobre a ocorrência de nevoeiro no aeródromo de Eduardo Gomes em Manaus-AM – Implicações no Tráfego Aéreo. *In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA*, 2012, Gramado. **Anais [...]** Gramado-RS: SBMET, 2012. p. 172-176.
- BASTOS, C. C.; FERREIRA, N. J. Análise climatológica da alta subtropical do Atlântico Sul. *In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA*, 2000, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, 2000. p. 612-619.
- BRAGA, M. F. S., KRUSCHE, N. Padrão de Ventos em Rio Grande, RS, no período de 1992 a 1995. **Revista Atlântica**, Rio Grande, v. 22, p. 27-40, 2000.
- CAMPOS, B.; REBOITA, M.; CARVALHO, V. Circulações Locais Induzidas pela Topografia no Vale do Paraíba e na Serra da Mantiqueira: um estudo de caso para o período entre os dias 16 e 22 de agosto de 2010. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 3, p. 753-765, 2016.
- CAVALCANTI, I. F. A., KOUSKY V. E. Frentes frias sobre o Brasil. *In: Tempo e Clima no Brasil*, Cavalcanti I.F.A., Ferreira J.F., Justi da Silva M. G.A., Silva Dias M.A..F (eds). São Paulo: Oficina de Texto, 2009.
- CAVALCANTI, I. F. A., KOUSKY, V. E. Configuração de anomalias associadas à propagação de sistemas sinóticos sobre a América do Sul *In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA*, Campos do Jordão – SP. **Anais [...]**. Campos do Jordão, 1996. p. 1331-1332.
- COSSICH W., PINHEIRO F., MARTON E., PIMENTEL L. C., Ocorrências de Nevoeiro na Cidade do Rio de Janeiro no Período de 2003-2007, **Ciência e Natura**, p. 177–180, 2009.
- CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **Glossários**. Disponível em: <https://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml#n>. Acesso em: 22 jan. 2019.
- CROFT, P. J., PFOST, R. L., MEDLIN, J. M. E JOHNSON, G. A., ‘Fog forecasting for the southern region: A conceptual model approach’, **Weather and Forecasting**, v. 12, n. 3, p. 545–556, 1997.
- DA ROCHA, R. P., GONÇALVES, F. L. T., SEGALIN, B. Fog events and local atmospheric features simulated by regional climate model for the metropolitan area of São Paulo, Brazil. **Atmospheric Research**, v. 151, p. 176-188, 2015.
- DA SILVA, O. A. 2018, **Nevoeiro e Nuvem Estratos no Brasil: Observação, Sensoriamento Remoto e Simulação Numérica**. 2018. 119 f. Tese (Doutorado em

Meteorologia) - Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

DAMACENO, M. A. **Análise de frequência da ocorrência de nevoeiro no Aeroporto Internacional Afonso Pena em Curitiba-PR**. 2008. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Meteorologia Aeronáutica) – ICEA, São José dos Campos, 2008.

DE PAULA, N. F. *et al.* Características meteorológicas médias associadas a nevoeiro de radiação em Santa Maria-RS. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 3, p. 613-624, 2015.

DECARIA, A. Exploring the land/sea breeze circulations. Lead to learn modules, Millersville. 2005.

DEE, *et al.* *The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data Assimilation system*. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.137, n.656, p. 553-597, 2011.

DUBREUIL, V. *et al.* Contribuição dos dados GOES para a cartografia das frentes da brisa marítima no Nordeste. *In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA*, 2004, Aracaju-SE, **Anais [...]**. Aracaju-SE, 2004.

ECOVIAS. **Rodovia Anchieta-Imigrantes**. [S.I.]. Disponível em: <https://www.ecovias.com.br/institucional/sistema-anchieta-imigrantes>. Acesso em: 16 nov. 2019.

Estação Meteorológica - IAG/USP. **A História da Estação Meteorológica**. [S.I.]. Disponível em: <http://www.estacao.iag.usp.br/historia.php>>. Acesso em: 29 set. 2020.

FESTA, M. **Dúvida sobre a classificação do nevoeiro utilizado na estação meteorológica do IAG** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: <mario.festa@iag.usp.br> em 3 de fevereiro de 2021.

FRANÇA, V. D. J. **Avaliação da metodologia de previsão de nevoeiro e visibilidade horizontal do modelo eta**. 2008. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

FREITAS, E. D. **Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes**. 2003. 176 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

FREITAS, E. D. e SILVA DIAS, P. L. Desenvolvimento da brisa marítima sob diferentes situações de grande escala: um estudo de caso. *In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*., 2004, Hotel Mabu, Fortaleza – CE. **Anais [...]**. Fortaleza – CE, 2004.

GLEESON, T. A., On the theory of cross-valley winds arising from differential heating of the slopes. **Journal of Meteorology** v. 8, 398-405, 1951.

GOMES, Camila S. *et al.* Estudo de caso: Simulação numérica do nevoeiro de advecção do dia 1 de julho de 2010. *In: 2012 International Conference on Offshore and Marine Technology: Science and Innovation*. IEEE, 2012. p. 24-26, 2012.

GREC – Grupo de Estudos Climáticos. **Monitoramento Climático – Frentes frias**. Disponível em:http://www.grec.iag.usp.br/data/frentes-frias_BRA.php_. Acesso em: 26 mar. 2022.

- HAEFFELIN M., BERGOT T., ELIAS T., TARDIF R., CARRER D., CHAZETTE P., COLOMB M., DROBINSKI P., DUPONT J. C., GOMES L., MUSSON-GENON L., PIETRAS C., PLANA-FATTORI A. PARISFOG: Shedding new light on fog physical processes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, n. 6, p. 767-783, 2010.
- HALLAK, R., PEREIRA FILHO, A. J. Análise de desempenho de índices de instabilidade atmosférica na previsão de fenômenos convectivos de mesoescala na Região Metropolitana de São Paulo entre 28 de janeiro e 04 de fevereiro de 2004. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, p. 173-206, 2012.
- HAMILTON, M. G.; TARIFA, J. R. Synoptic aspects of a polar outbreak leading to frost in tropical Brazil, July, 1972. **Mon. Weather Rev.**, v. 106, n. 11, p. 1545-1556, 1978.
- HERSBACH, H. *et al.* The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n.730, p. 1999-2049, 2020.
- JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. A Estatística dos Transientes na América do Sul *In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA*, 2000, Rio de Janeiro – RJ. **Anais [...]**. Rio de Janeiro – RJ, 2000.
- JUSTI DA SILVA, M.G.A.; SILVA DIAS, M.A.F. A frequência de fenômenos meteorológicos na América do Sul: uma climatologia. *In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA*, 2002, Foz do Iguaçu, 2002. **Anais [...]** Foz do Iguaçu, 2002.
- KLEMM, O. e LIN, N. What causes observed fog trends: air quality or climate change?. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 16, n. 5, p. 1131-1142, 2016.
- KODAMA, Y. Large-Scale Common Features of Subtropical Precipitation Zones (The Baiu Frontal Zone, The SPCZ and The SACZ), Part I: Characteristics of Subtropical Precipitation Zones. **J. Met. Soc. Japan**, v. 70, n. 4, p. 813- 836, 1992.
- KOUSKY VE. 1979. Frontal Influences on Northeast Brasil. **Monthly Weather Review**, v. 107, n. 9, p. 1140-1153, 1979.
- KOUSKY, V. E.; ELIAS, M. Meteorologia Sinótica: Parte I. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São José dos Campos, SP.1982. 105 p. (INPE-2605-MD/021).
- KRUSCHE, N., GOMES, C. Fog in the coastal region of southern Brazil: seasonal variations. *In: AGU Spring Meeting Abstracts*. 2009. p. GC23B-05.
- LEITE, M. R. S. G. **Circulações Locais no Rio Grande do Sul: brisas marítima/terrestre e sua interação com as brisas lacustres/terrestres**. 2013. 105 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Universidade Federal do Rio Grande,, 2013.
- LEMONS, C. F.; CALBETE, N. O. Sistemas Frontais que atuaram no Brasil de 1987 a 1995. *Climanálise Especial, Edição comemorativa de 10 anos*. CPTEC, 1996.
- LIMA, J. S. Previsão de ocorrência e duração de nevoeiro em Porto Alegre – método objetivo. *In: SEMINÁRIOS DO DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA*, São José dos Campos, 1983. (Palestra apresentada no INPE).
- LIU D., YANG J., NIU S., LI Z., On the evolution and structure of a radiation fog event in Nanjing, **Advances in Atmospheric Sciences**, vol. 28, p. 223, 2011.

LIU, D.Y., YAN, W.L., YANG, J. *et al.* A Study of the Physical Processes of an Advection Fog Boundary Layer. *Boundary-Layer Meteorol* v. 158, p. 125–138, 2016.

MACHADO, A. J. **As Circulações Locais Associadas à Formação de Nevoeiro na Grande São Paulo**. 1993. 147 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

MORAIS, M. A., CASTRO, W. A. C., TUNDISI, J. G. Climatologia de frentes frias sobre a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), e sua influência na limnologia dos reservatórios de abastecimento de água. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.2, p. 205 - 217, 2010.

OKOOLA, R.E.A. Spatial distribution of precipitation in the Mombasa area of Kenya, Kenya Meteorological Department, IMTR Research Report, 1-78, 1978.

OLIVEIRA, A. P. e SILVA DIAS, L., 1982: Aspectos observacionais da Brisa Marítima em São Paulo, *In: II CONGRESSO BRASILEIRO METEOROLOGIA*, 18-22 outubro de 1982, Pelotas. **Anais [...]** Pelotas, 1982. p. 129-161.

OLIVEIRA, A. P., BORNSTEIN, R., SOARES, J. Annual and diurnal wind patterns in the city of São Paulo. **Water, Air and Soil Pollution** , v. 3, n. 5, p. 3-15, 2003.

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção na Amazônia**, INPE – 4008 – TDI/239, 1986. 115 p.

OLIVEIRA, V. M. **Condições de formação de nevoeiro em Pelotas**. 1998. 186f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1998.

OPERAÇÃO COMBOIO – ECOVIAS. **Por que é feita a Operação Comboio?** [S.I]. Disponível em: <http://www.ecovias.com.br/atendimento/duvidas>. Acesso em: 29 maio 2021.

PEREIRA FILHO, A. J.; HAAS, R.; AMBRIZZI, T. Caracterização de eventos de enchentes na bacia do Alto Tietê por meio do radar meteorológico e da modelagem numérica de mesoescala. *In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA*, 2002, Foz do Iguaçu, PR. **Anais [...]** Foz do Iguaçu, 2002 p. 59-80.

PEREZ, G. M. P., SILVA DIAS, M. A. F. Long-term study of the occurrence and time of passage of sea breeze in São Paulo, 1960–2009. **International Journal of Climatology**, v. 37, p. 1210-1220, 2017.

PERRELA, A. C. F.; SAKURAGI, J. Estudo de nevoeiro em São José dos Campos. *In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA*, 1998, Brasília, DF. **Anais [...]** Brasília, DF: SBMET, 1998.

PETTERSSSEN, S. **Weather analysis and forecasting**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1956, v.1, 428 p.

PIELKE, R.A. An overview of our current understanding of the physical interactions between the sea- and land-breeze and the coastal waters. **Ocean Management**, v. 6, p. 87-100, 1981.

PIVA, E.; FEDOROVA, N. Um estudo sobre a formação de nevoeiro de radiação em Porto Alegre. **Rev. Bras. Met.**, v.14, n.2, p. 47 – 62, 1999.

PORTO DE SANTOS. **Porto de Santos completa 127 anos**. 2019 Disponível em: <https://www.portodesantos.com.br/2019/01/25/porto-de-santos-completa-127-anos/>. Acesso em: 17 jan. 2020.

PRICE, J. D. On the Formation and Development of Radiation Fog: An Observational Study. *Boundary-Layer Meteorol* v. 172, p. 167–197, 2019.

QUADRO, M. F. L. **Estudos de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul**. 1994. 188 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1994.

REBOITA, M. S., GAN, M. A., ROCHA, R. P. E AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

REYMANN M., PIASECKI J., HOSEIN F., LARABEE S., WILLIAMS G., 1998 **Technical report Meteorological techniques**. AFWA/TN-98/002. AIR WEATHER SERVICE SCOTT AFB IL

SATYAMURTY P, MATTOS LF, NOBRE CA e SILVA DIAS PL. Tropics - South America. *In*: KAULY, D. J. AND VINCENT, D. G. **Meteorology of the Southern Hemisphere**, Boston: American Meteorological Society, 1998. cap. 3, p. 119-139.

SATYAMURTY, P.; MATTOS, L. F. Climatological lower tropospheric frontogenesis in midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. **Monthly Weather Review**, , v. 117, n. 6, p. 1355-1364, 1989.

SCOLAR, J. Simulação numérica do ciclo diurno de temperatura com modelo de camada limite planetária. *In*: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 1994. Belo Horizonte-MG. **Anais [...]** Belo Horizonte-MG, 1994, p. 312-314.

SERRA DO MAR E MOSAICOS DA MATA ATLÂNTICA. 1. ed. São Paulo: kpmo, 2014. 138 p.

SIMPSON, J. E., 1994: **Sea breeze and local wind**. 1. ed. Nova Iorque: Cambridge University Press., 1994. 234 p.

SINCLAIR, M. R A climatology of anticyclones and blocking for the southern hemisphere, **Monthly Weather Review**, v. 124, n. 2, p. 245-264, 1996.

SISTEMA ANCHIETA-IMIGRANTES. ECOVIAS. **Sistema Anchieta-Imigrantes**. Disponível em: <http://www.ecovias.com.br/institucional/sistema-anchieta-imigrantes>. Acesso em: 8 jun. 2020.

STEWART, J. Q. *et al*. A Climatological Study of Thermally Driven Wind Systems of the U. S. Intermountain West. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, n. 5, p. 699-708, 2002.

TALJAARD J.J. 1972. Synoptic meteorology of the Southern Hemisphere. *In*: NEWTON. C.W.**Meteorology of the Southern Hemisphere**, Boston: American Meteorological Society, 1972. v. 13, p. 139 – 213.

TOPODATA – INPE. **Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Acesso em: 09 out. 2020.

VAUTARD, R., YIOU, P., VAN OLDENBORGH, G. J. Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years. **Nat. Geosci**. v. 2, p. 115–119, 2009.

WALLACE J.M. e HOBBS P.V. **Atmospheric Science: An Introductory Survey**. Londres: Academic Press, 1977. 467 p.

WALLACE, J. M. e HOBBS, P. V. **Atmospheric science: an introductory survey**. Elsevier, 2006. v. 92. 504 p.

WILLETT H. C., Fog and haze, their causes, distribution and forecasting, **Monthly Weather Review**, 1928, vol. 56, p. 435

WILLIAMS, A. P., SCHWARTZ, R. E., IABOBELLIS, S., SEAGER, R., COOK, B. I., STILL, C., HUSAK, G. MICHAELSEN, J. Urbanization causes increased cloud base height and decreased fog in coastal Southern California. **Geophys. Res. Lett.** v. 42, p. 1527–1536, 2015.

WMO - World Meteorological Organization. **Manual on the Global Observing System**. Volume I: Global aspects, 2003.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Análise dos dados das estações meteorológicas da Ecovias

A Figura 1 mostra a evolução das variáveis: temperatura, direção e velocidade do vento, precipitação, visibilidade e temperatura nas estações SCA01, 06 e 09 da Ecovias. É possível observar períodos sem dados, como entre os anos de 2010 e 2013 em todas as variáveis, assim como valores extremos como, por exemplo, 50 °C de temperatura média horária ou ainda, valores errados, como direção do vento maior que 360°, precipitação horária de 120 mm, valores negativos de visibilidade e de temperatura.

Deste modo, para um primeiro controle de qualidade dos dados foram aplicados os seguintes limiares:

- Direção do vento: entre 0 e 360°;
- Velocidade do vento: entre 0 a 20 m s⁻¹ (no IAG, o valor máximo da média horária foi de 13 m s⁻¹);
- Precipitação: entre 0 e 100 mm/hora (no IAG, o valor máximo foi de 80 mm/hora);
- Visibilidade: mínimo 0 m e
- Temperatura: entre 2 e 40 °C (no IAG, o mínimo foi de 7 °C e o máximo foi menor que 40 °C).

Esses limiares foram baseados nos valores extremos registrados pela EM/IAG para o período de 2004 a 2018. Além disso, só foram considerados os dados de velocidade e direção do vento quando os dois valores estavam dentro dos limiares simultaneamente.

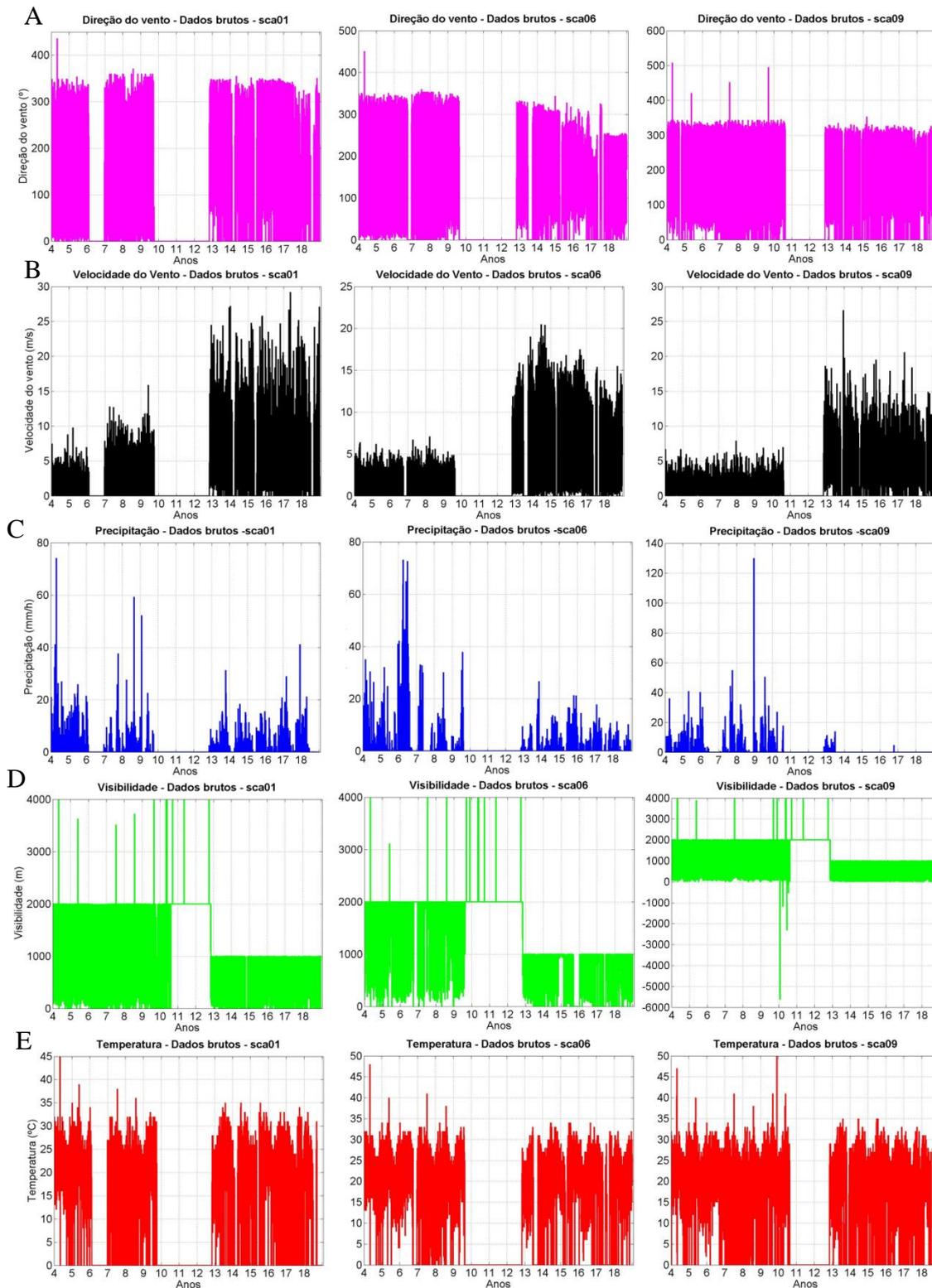


Figura 1 - Distribuição dos dados de direção (A) e velocidade (B) do vento, precipitação (C), visibilidade (D) e temperatura (E) para as estações SCA01, SCA06 e SCA09.

Nos dados originais havia cerca de 80% de dados com registros horários completos para as 24 horas do dia nas 10 estações. Após a primeira filtragem, a quantidade de dados inadequados para cada variável para cada estação foi somada e está apresentada na tabela

abaixo (Tabela 1). Nota-se que a variável que apresentou uma maior quantidade de valores inadequados foi a temperatura. Esses valores devem-se pela leitura/registro incorreto ou por falhas/inoperação do equipamento.

Tabela 1 – Quantidade de dados inadequados para cada variável após a filtragem utilizada.

	Velocidade e direção do vento	Chuva	Visibilidade	Temperatura
SCA01	188	0	0	43417
SCA02	2610	6	2	39723
SCA03	20	4	112	39740
SCA04	92	197	0	44988
SCA05	479	0	0	33944
SCA06	6	0	0	34777
SCA07	63	230	1	28862
SCA08	28	1	454	23815
SCA09	14	1	21	23541
SCA10	190	0	0	39318

Os dados filtrados são mostrados na Figura 2. Ainda é possível notar que houve uma alteração no sensor ou limiar de valores antes e depois do período com ausência de dados. Na velocidade do vento, por exemplo, nota-se que as velocidades aumentaram muito em todas as estações. Já a visibilidade teve seu valor máximo alterado de 4000 para 2000 m. Nesta análise inicial, perceberam-se vários períodos sem dados e dados bastante questionáveis. Os dados da OC são os que, aparentemente, podem fornecer melhores resultados. Assim, foi analisado a distribuição das OC's no período disponível: 2002 a 2018.

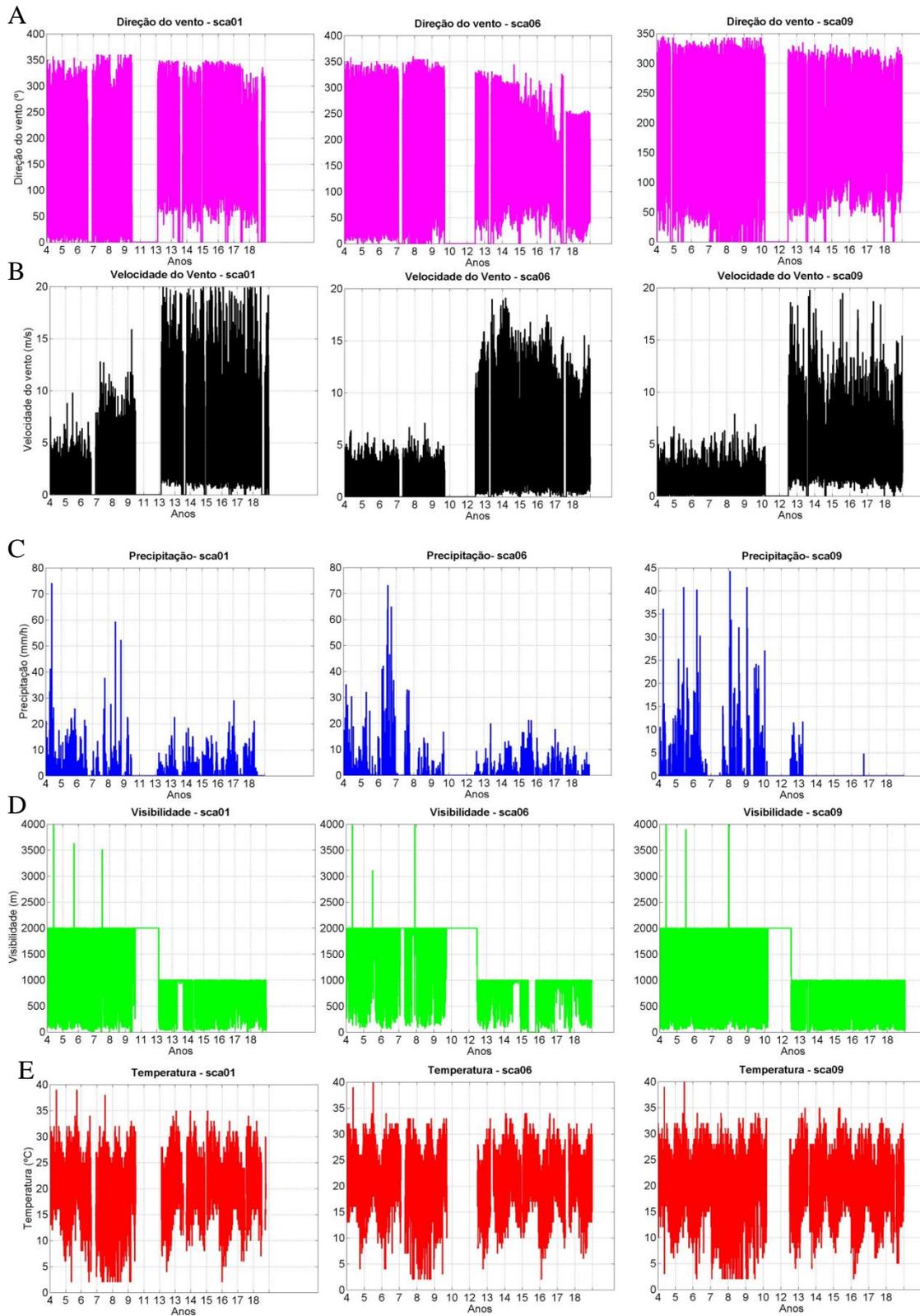


Figura 2 – Distribuição dos dados de A) direção e B) velocidade do vento, C) precipitação, D) visibilidade e E) temperatura após a filtragem dos dados, para as estações SCA01, SCA06 e SCA09.

APÊNDICE B – Características meteorológicas associadas a OC em 2015.

Data	Período (HL)	EM/IAG	EM/Itutinga	Resumo causa da OC
05/01/2015	21~24	ppt 13:50 e 21:50 HL	ppt das 17:30 às 22:30 HL	BM > ppt convectiva> nev
01/02/2015	13 ~ 15	ppt às 14:10 e às 20:00 HL	ppt das 18:30 até às 22:30 HL	BM > nev > ppt
17/02/2015	13 ~19	ppt das 11:00 às 12:30 HL	ppt às 11:30 e após às 18:30	BM > nev > ppt
06/03/2015	13 ~15	ppt às 13:30 e às 16:00 HL	ppt após às 14:30	BM > nev > ppt
08/03/2015	18 ~20	ppt 07, 10, 15, 20 e 22 HL	às 08:30, 12:30 e após às 22:30 HL	ZCAS > ppt > nev
10/03/2015	16 ~18	ppt mad, às 16:30 e a partir das 21:00 HL	às 14:30, 15:30 e 17:30 HL	BM > ppt > nev
12/03/2015	16 ~18	às 16:00 HL	16:30 e 17:30 HL	BM > ppt > nev
20/03/2015	15~18	às 13:10 HL	das 15:30 às 17:30 HL	BM > ppt > nev
29/03/2015	14 ~18	às 09, 14, 15:30 e 17	das 09:30 às 10:30 e após às 17:30 HL	PF > ppt > nev frontal
11/04/2015	17 ~ 18			BM > nev
15/04/2015	17 ~18	às 12, 15, 18 e 19 HL	às 12:30 e depois, das 15:30 às 19:30 HL	BM > ppt > nev
18/04/2015	18 ~22			BM > nev
19/04/2015	15 ~19	às 13, 16 e 19 HL	entre 00:30 e 01:30 e depois às 22:30 HL	BM > nev
24/04/2015	15 ~18			BM > nev
04/05/2015	18 ~21	ppt às 07, 08, 19 e 20 HL	ppt das 08:30 às 11:30 e após às 20:30	PF > ppt > nev
10/05/2015	16 ~18	ppt às 12, 17, 18 e 20 HL	ppt 12:30 às 13:30 e após 17:30	SCM > ppt > nev
14/05/2015	11 ~13		ppt 14:30 e 15:30	APF > nev > ppt
25/05/2015	16 ~ 21		ppt às 21:30 HL	BM > nev > ppt
26/05/2015	21 ~ 1		ppt às 09:30, 15:30 e 21:30 (0,3 mm) HL	Adv SE > ppt > nev
29/05/2015	16 ~20		ppt 06:30 às 09:30 HL	F > ppt > nev
31/05/2015	16 ~18	ppt mad, 7 às 10, 17, 19 às 20	ppt das 16:30 às 18:30	APF > nev+ppt > ppt
01/06/2015	14 ~ 16	chuveiro 16 e 18 HL	ppt a partir das 14:30	APF > nev+ppt > ppt
18/06/2015	17 ~20	ppt 17:40 e 19 HL	ppt 17:30 e 18:30	F > nev+ppt
23/06/2015	15 ~18	ppt 19 e 23 HL	ppt a partir das 18:30	BM > nev > ppt
25/06/2015	18 ~19	ppt mad e 19 HL	ppt das 17:30 às 19:30	APF > nev+ppt > ppt

Data	Período (HL)	EM/IAG	EM/Itutinga	Resumo causa da OC
02/07/2015	14 ~18			APF > nev
04/07/2015	11 ~13	ppt 12:50	ppt a partir das 12:30	PF > nev > ppt
15/07/2015	17 ~19			BM > nev
16/07/2015	12 ~22			BM > nev
21/07/2015	12 ~15	ppt às 10 e 14:30	ppt às 10:30 e depois das 14:30	F > ppt > nev
24/07/2015	16 ~20	ppt às 19 HL		BM > nev > ppt
11/08/2015	15 ~18			BM > nev
19/08/2015	17 ~18			BM > nev > APF seca
25/08/2015	13 ~15	ppt mad, 9, 11 e 16 HL	ppt até 3:30 e às 11:30	APF > nev
01/09/2015	17 ~19	ppt 15:40 às 17 HL	ppt a partir das 17:30	F > nev+ppt > ppt
02/09/2015	13 ~17		ppt 10:30, 12:30	APF > nev+ppt > ppt
05/09/2015	11 ~12	ppt 18 HL	ppt das 09:30 às 12:30	APF > nev+ppt
06/09/2015	17 ~19	ppt 7, 12 - 14, 15 HL	ppt das 14:30 às 16:30	ppt > nev
09/09/2015	13 ~15	chuvisco 6:40		F > nev frontal
09/09/2015	17~21			nev frontal
11/09/2015	13 ~17	ppt mad, depois das 13 às 18	ppt das 14:30 às 21:30	F > nev frontal > ppt
12/09/2015	06~7	ppt às 08 e às 16HL	ppt das 06:30 às 17:30	APF > nev+ppt
13/09/2015	13 ~15	ppt às 17HL	ppt das 02:30 às 10:30 e das 14:30 às 21:30	APF > nev
14/09/2015	00 ~ 4	ppt às 19:40	ppt das 02:30 às 04:30 e das 18:30 às 22:30	APF > nev+ppt
14/09/2015	07 ~01			APF > nev
14/09/2015	16~01			APF > nev+ppt
15/09/2015	15 ~17			BM > nev
19/09/2015	0 ~3			BM > nev
19/09/2015	22 ~1			BM > nev
21/09/2015	14 ~20			BM > nev
26/09/2015	13 ~20	ppt 7, 8 e 17 HL	ppt até 09:30	BM > nev > ppt
27/09/2015	19 ~21	ppt 19 e 20 HL	ppt 19:30	BM > ppt > nev

Data	Período (HL)	EM/IAG	EM/Itutinga	Resumo causa da OC
28/09/2015	14 ~ 19	ppt madrugada	ppt 00:30 às 03:30, 18:30 e 21:30	F > ppt > nev
29/09/2015	2 ~20		ppt às 00:30, 03:30 e 05:30	APF > ppt > nev
01/10/2015	00 ~09			ppt > nev
01/10/2015	12 ~1			ppt > nev
02/10/2015	11 ~17			BM > nev
03/10/2015	00 ~3	ppt mad, 07, 17, 18, 19	ppt 03:30 às 07:30, 16:30 às 19:30	AdvSW > nev
03/10/2015	14 ~17			BM > nev
03/10/2015	14 ~16	ppt mad, 08, 24 HL	ppt 22:30 às 03:30, 06:30 às 11:30, depois 15:30	F > ppt > nev
05/10/2015	07 ~9	ppt 08:30 e 19 HL	ppt 00:30 às 12:30, 15:30 às 20:30	APF > ppt > nev
05/10/2015	16 ~21			APF > nev+ppt
06/10/2015	17 ~20			APF > nev
09/10/2015	07 ~9			ppt > nev
10/10/2015	0 ~1	ppt até às 07 HL		BM > nev
11/10/2015	03~8			BM > nev
11/10/2015	13~20			BM > nev
13/10/2015	12~21	ppt até às 07 HL	ppt 03:30 às 07:30, 15:30 às 20:30	F > nev frontal
14/10/2015	08~16			APF > nev
16/10/2015	14~18	ppt 20:37 HL		BM > nev
17/10/2015	06~19	ppt às 14, 16, 17, 18 e 23 HL	ppt 05:30 às 08:30, 14:30 até 22:30 do dia seguinte	FF > nev + ppt
18/10/2015	0~5		ppt o dia inteiro	APF > nev+ppt
18/10/2015	09~13			APF > nev+ppt
18/10/2015	18~00			APF > nev+ppt
19/10/2015	11~23		ppt às 11:30 HL	APF > nev + ppt
21/10/2015	15~22	ppt 09:37, 19, 20, 21, 22 HL	ppt às 14:30, 19:30, das 21:30 às 00:30	BM > nev > ppt
22/10/2015	08~17	ppt às 09, 12, 13, 14, 18, 19 HL	ppt às 08, 09, 11, 13:30 às 16:30	ppt > nev
23/10/2015	05~8	ppt mad, 19 e 20 HL	ppt das 19:30 às 23:30 HL	advSW > nev
23/10/2015	13~19			BM > nev > ppt

Data	Período (HL)	EM/IAG	EM/Itutinga	Resumo causa da OC
24/10/2015	08~9	ppt mad, 08:30	ppt 06:30 às 10:30, 13:30 às 23:30	APF > ppt > nev
24/10/2015	23~01			APF > ppt > nev
25/10/2015	14~23		ppt às 02:30, 10:30 às 14:30, 17:30 às 19:30, 22:30	APF > nev+ppt
26/10/2015	13~19	ppt mad	ppt 00:30 às 03:30, 11:30	BM > nev
27/10/2015	09~21		ppt 02:30 às 04:30, 13, 18, 22:30	ppt > nev
28/10/2015	05~13	ppt 16, 19, 21	ppt 16:30, 18:30 até dia seguinte	advSW > nev
28/10/2015	23~04			APF > nev+ppt
29/10/2015	08~23	ppt madrugada	ppt dia inteiro	APF > nev+ppt
31/10/2015	16~02	ppt 22:15	ppt às 23:30	BM > nev > ppt
01/11/2015	13~00	ppt às 07, 11 e 13 HL	ppt das 00 às 08:30, 10 às 20:30, 22:30	ppt > nev
02/11/2015	10~20	ppt mad, 13, 19, 20 e 21	ppt das 00 às 07:30, 13:30, 18:30, 20 às 22:30	FF > ppt > nev frontal
03/11/2015	14~21	ppt 7, 18, 21, 22	ppt às 05 e 07:30, 21 e 22:30	BM > nev
04/11/2015	04~20	ppt 16, 20, 24	ppt às 02:30, 07:30, 14 às 23:30	PF > ppt > nev frontal
05/11/2015	11~21	ppt 08 HL	ppt 00 às 07:30, 19:30, 23:30	APF > ppt > nev
06/11/2015	04~06	ppt 07:30, 11 às 14, 20 HL	ppt 04:30 às 09:30, 15:30 às 23:30	APF > ppt > nev
08/11/2015	07~21	ppt 07, 08, 17	ppt 00, 01, 06, 16:30	APF > ppt > nev
09/11/2015	11~19	ppt mad, 12, 13	ppt 1 às 05:30, 12:30	BM > nev
10/11/2015	13~21		ppt 2, 4:30 HL	BM > nev
12/11/2015	09~20	ppt 17 às 22 HL	ppt 16, 21, 23:30 HL	BM > nev
13/11/2015	10~12	ppt 12, 13, 19 20	ppt 19 às 23:30	AdvE > nev
15/11/2015	09~00	ppt 21:30	ppt 3, 18 às 23:30	APF > nev > ppt
15/11/2015	21~23			APF > nev > ppt
16/11/2015	20~23		ppt 00 às 03:30, 08:30, 17:30 às 20:30	APF > ppt > nev
17/11/2015	07~09	ppt às 15 e 20 HL	ppt 00 às 02:30, 20 às 23:30	AdvSE > nev
17/11/2015	11~21			BM > nev
21/11/2015	12~13	ppt mad	ppt 00 às 07:30, 18 às 20:30	nev frontal
23/11/2015	0~06	ppt mad, 7, 12 a 14	ppt às 02, 7, 09, 13 às 18 e 21:30	SCM > ppt > nev

Data	Período (HL)	EM/IAG	EM/Itutinga	Resumo causa da OC
23/11/2015	09~11			SCM > ppt > nev
23/11/2015	14~23			SCM > ppt > nev
24/11/2015	00~08	ppt mad, 8	ppt 01:30, 21, 22:30	SCM > ppt > nev
24/11/2015	18~23			SCM > ppt > nev
25/11/2015	14~20	ppt 06:30, 17 HL	ppt 06:30, 16:30, 17:30, 22:30, 23:30	AdvS > nev > ppt
26/11/2015	17~23	ppt mad, 10 HL	ppt 1 às 06:30, 12:30, 16:30	BM > nev+ppt
29/11/2015	09~21	ppt mad, 11, 13 HL	ppt 00 às 3:30, 10:30, 12-13, 16-17, 19, 21-23	AdvSE > nev
30/11/2015	07~12	ppt 16, 17, 20 HL	ppt 0 às 12:30, 14:30 às 20:30	F > ppt > nev
30/11/2015	14~05			APF > nev+ppt
01/12/2015	16~01	ppt 08:40, 19 HL	ppt 00, 2-3:30, 18:30, 20:30, 22:30	APF > nev > ppt
02/12/2015	03~07	ppt mad, 16 HL	ppt 04:30, 16-00:30	APF > nev > ppt
02/12/2015	11~21			APF > nev > ppt
03/12/2015	07~00	ppt 21 HL	ppt 00, 2, 10, 17, 18, 20, 22:30	AdvSE > nev
04/12/2015	09~18		ppt 3, 5:30	AdvSE > nev
06/12/2015	07~09	ppt mad, 13, 16, 19, 24	ppt 0, 1, 3, 12, 16, 18 às 23	AdvSW > nev
06/12/2015	14~19			F > nev frontal
07/12/2015	05~08	ppt 7, 17 HL	ppt 00-23	APF > nev+ppt
07/12/2015	13~19			APF > nev+ppt
08/12/2015	08~10	ppt 16 HL	ppt 1-12:30, 18:30	APF > nev+ppt
08/12/2015	13~23			BM > nev+ppt
09/12/2015	00~03		ppt 04, 09, 10:30	nev rad
11/12/2015	13~20			BM > nev
17/12/2015	12~14		ppt 2:30 e 3:30	BM > nev
17/12/2015	17~22			BM > nev

APF: Alta pós-frontal; Adv: advecção; BM: Brisa marítima (ant = dia anterior); F: Frente; FF: Frente Fria; nev: nevoeiro; PF: pós frontal; ppt: precipitação; SCM: Sistema Convectivo de mesoescala; ZCAS: Zona de Convergência do Atlântico Sul.

APÊNDICE C – Quantidade de Operações Comboio no ano de 2015 para Rod. Anchieta e Rod. dos Imigrantes e sua diferença.

Dia	Mês	Rod. Anchieta	Rod. dos Imigrantes	Diferença (Anc.-Imi.)*
5	1	3	3	0
1	2	1	2	-1
17	2	7	7	0
6	3	1		1
8	3	2		2
10	3	1		1
12	3	2		2
20	3	2	1	1
29	3	4	5	-1
11	4	2		2
15	4	3	2	1
18	4	3		3
19	4	5	5	0
24	4	4	4	0
4	5	3		3
10	5	1	1	0
14	5	2	2	0
25	5	4	4	0
26	5	4	5	-1
29	5	5	3	2
31	5	2	1	1
1	6	2		2
18	6	3	3	0
23	6	3	3	0
25	6	1		1
2	7	3	3	0
4	7	1		1
15	7	2	2	0
16	7	11	12	-1
21	7	3	2	1
24	7	3	5	-2
11	8	4	3	1
19	8	1	1	0
25	8	3	2	1
1	9	1		1
2	9	1	4	-3
5	9	1		1
6	9	2	1	1

Dia	Mês	Rod. Anchieta	Rod. dos Imigrantes	Diferença (Anc.-Imi.)*
9	9	4	5	-1
11	9	5	4	1
12	9	2		2
13	9	1	2	-1
14	9	14	29	-15
15	9	1		1
19	9	5	5	0
21	9	7	6	1
26	9	5	6	-1
27	9	1	1	0
28	9		11	-11
29	9	18	16	2
1	10	30	28	2
2	10	7	1	6
3	10	4		4
4	10	1		1
5	10	7	6	1
6	10	2		2
9	10	3		3
11	10	14	7	7
13	10	10	11	-1
14	10	10	6	4
16	10	4	1	3
17	10	10	1	9
18	10	15	4	11
19	10	12	12	0
21	10	7	3	4
22	10	7	4	3
23	10	8	2	6
24	10	2		2
25	10	15	14	1
26	10	7	6	1
27	10	13	11	2
28	10	6		6
29	10	21	21	0
31	10	7	4	3
1	11	14	12	2
2	11	12	13	-1
3	11	9	7	2
4	11	16	16	0
5	11	13	11	2
6	11	1	2	-1
8	11	13	9	4

Dia	Mês	Rod. Anchieta	Rod. dos Imigrantes	Diferença (Anc.-Imi.)*
9	11	7	10	-3
10	11	9	9	0
12	11	11	9	2
13	11	2		2
15	11	15	10	5
16	11	2	4	-2
17	11	14	13	1
21	11	1		1
23	11	14	7	7
24	11	13	5	8
25	11	6	4	2
26	11	5	3	2
29	11	15	13	2
30	11	13	8	5
1	12	8	17	-9
2	12	13	7	6
3	12	20	19	1
4	12	9	8	1
6	12	8	1	7
7	12	8	6	2
8	12	12	14	-2
9	12	3	2	1
11	12	7	4	3
17	12	6	5	1

*As células em destaques são para diferença maior que 5. Verde: mais OC na RA; vermelho: mais OC na RI.

APÊNDICE D – Casos de névoas e nevoeiros registrados pela EM/IAG durante o ano de 2015 em Hora Local (UTC-3).

Data	Hora inicial (HL)	Hora final (HL)	Categoria	Sistemas meteorológicos	Classificação
16/01/2015	16	19	Névoa de superfície	BM ant	Nev por ppt
02/02/2015	00	...	Névoa de superfície	SC	Radiativo
07/02/2015	...	07	Nevoeiro	SC ant	Radiativo
08/03/2015	07	07:12	Névoa de superfície	SC ant	Radiativo
12/03/2015	06:40	...	Névoa de superfície	SC ant	Radiativo
16/03/2015	...	07	Névoa de superfície	SC ant	Radiativo
15/04/2015	...	07	Névoa de superfície	BM ant	Radiativo
16/04/2015	...	07	Nevoeiro	BM ant	Radiativo
02/05/2015	23	00	Névoa de superfície	APF	Radiativo
30/05/2015	...	07	Névoa de superfície	APF	Radiativo
31/05/2015	21	0	Névoa	APF	Radiativo
02/06/2015	13	14	Névoa de superfície	APF	Radiativo
04/06/2015	07	10	Nevoeiro → Névoa	BM ant	Radiativo
05/06/2015	...	07	Névoa de superfície	BM ant	Radiativo
10/06/2015	07	08	Névoa de superfície	RR	Radiativo
16/06/2015	18	20	Névoa	APF	Radiativo
19/06/2015	...	07	Névoa + Ppt	FF ant	
28/06/2015	...	07	Nevoeiro	RR	Radiativo
02/07/2015	19	20	Névoa	APF	Radiativo
16/07/2015	...	07	Névoa de superfície	BM ant	Radiativo
17/07/2015	...	07	Névoa	BM ant	Radiativo
24/07/2015	06:30	07	Névoa de superfície	RR	Radiativo

25/07/2015	...	07	Névoa	FF	Radiativo
26/07/2015	...	07	Névoa de superfície	APF	Radiativo
28/07/2015	...	07	Nevoeiro	BM ant	Radiativo
29/07/2015	...	07	Névoa de superfície	BM ant	Radiativo
30/07/2015	...	07	Nevoeiro denso	BM ant	Radiativo
30/07/2015	10	11	Névoa		
30/07/2015	00	...	Névoa		
31/07/2015	...	08	Névoa	BM ant	Radiativo
14/08/2015	...	07	Névoa de superfície	BM ant	Radiativo
17/08/2015	...	07	Névoa de superfície	BM ant	Radiativo
22/08/2015	...	07	Névoa de superfície	ASAS + APF ant	Radiativo
23/08/2015	...	07	Névoa de superfície	BM ant	Radiativo
25/08/2015	21	...	Névoa	APF	Radiativo
27/08/2015	...	07	Névoa de superfície	BM ant	Radiativo
09/09/2015	21	...	Névoa	FF	Radiativo
14/09/2015	19:40	20	Névoa	APF	
15/09/2015	21	24	Névoa de superfície	BM	Radiativo
16/09/2015	...	07	Névoa de superfície	BM ant	Radiativo
13/10/2015	14	15	Névoa	FF	Radiativo
14/10/2015	07	08	Névoa de superfície	APF	Radiativo
19/10/2015	17	21	Névoa	APF	Radiativo
24/10/2015	22	23	Névoa	APF	Radiativo
25/10/2015	19	20	Névoa	APF	Radiativo
27/10/2015	07	08	Névoa	BM ant	Radiativo
05/11/2015	06:30	7	Névoa de superfície	FF ant	Radiativo

01/12/2015	19	...	Névoa com garoa	APF	Radiativo
08/12/2015	17	20	Névoa	BM	Radiativo
17/12/2015	19	20	Névoa	BM	Radiativo

*As datas sombreadas correspondem aos eventos em que o nevoeiro mudou de intensidade. APF: Alta pós-frontal; ASAS: Alta Subtropical do Atlântico Sul; BM: Brisa marítima (ant = dia anterior); FF: Frente fria, spf: superfície; SC: Sistema Convectivo, RR: Resfriamento Radiativo.

APÊNDICE E – Dados do METAR do aeroporto de Santos do dia 21 de julho de 2015.

Dados do METAR de Santos do dia 21 de julho de 2015 das 15 - 19 UTC

METAR SBST 211500Z 22006KT 9999 BKN012 BKN055 20/17 Q1018=

METAR SBST 211600Z 22006KT 3000 -DZ BR BKN010 OVC023 20/17 Q1018=

METAR SBST 211700Z 22007G17KT 3000 RA BR BKN010 OVC030 18/16 Q1018=

METAR SBST 211800Z 24004G14KT 2000 RA BR BKN012 OVC030 18/16 Q1019 RERA=

METAR SBST 211900Z 22006KT 2000 -RA BR BKN012 OVC033 17/15 Q1019 RERA=
