UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

PREVISÃO ESTATÍSTICA DE PRECIPITAÇÃO PARA A REGIÃO DO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCANTÂRA EM JULHO

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Aline Araújo de Freitas

Itajubá (MG)
2018

PREVISÃO ESTATÍSTICA DE PRECIPITAÇÃO PARA A REGIÃO DO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA EM JULHO

por

Aline Araújo de Freitas

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas.

Orientadora: Dra. Sâmia Regina Garcia Calheiros
Coorientador: Dr. Marcos Daisuke Oyama

Itajubá (MG)
2018

Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

PREVISÃO ESTATÍSTICA DA PRECIPITAÇÃO PARA A REGIÃO DO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA EM JULHO

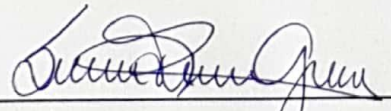
elaborada por

Aline Araújo Freitas

Como requisito parcial para a obtenção do grau de

Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:



Sâmia Regina Garcia Calheiros, Drª. (UNIFEI)
(Presidente/Orientadora)

Marcos Daisuke Oyama, Dr. (IAE/DCTA)
(coorientador)

Arcilan Trevenzoli Assireu, Dr. (UNIFEI)

Itajubá, 08 de novembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar força, esperança e saúde para concluir esse trabalho.

Aos meu pais, familiares e namorado por todo apoio, amor, paciência e incentivo nessa caminhada.

A minha orientadora Sâmia e meu coorientador Marcos Oyama por todo o aprendizado que me passaram. Por toda dedicação, apoio e confiança depositados em mim durante todo o período de realização desse trabalho.

Aos meus professores que tiveram paciência e dedicação de passar todos os conhecimentos ao longo desses anos, principalmente ao professor Arcilan que aceitou participar da minha banca.

Aos meus amigos que estiveram presentes em todos os momentos desse ciclo me apoiando e dando forças para prosseguir.

Ao CNPq pelo apoio financeiro da Iniciação Científica que resultou neste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

Aos meus pais, Angela e Luiz Carlos.

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

PREVISÃO ESTATÍSTICA DE PRECIPITAÇÃO PARA A REGIÃO DO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA EM JULHO

AUTORA: ALINE ARAÚJO DE FREITAS
ORIENTADORA: Dra. SÂMIA REGINA GARCIA CALHEIROS
COORIENTADOR: Dr. MARCOS DAISUKE OYAMA
Local e Data da Defesa: Itajubá, 08 de novembro de 2018.

A precipitação é uma das mais importantes variáveis meteorológicas, sendo considerada como a principal variável climática em regiões tropicais. No presente estudo, abordou-se a previsão de precipitação a prazo muito curto (em torno de 6-12 h) para a região do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), localizado na costa norte do Nordeste brasileiro e onde são realizados os lançamentos de veículos espaciais nacionais, para o mês de julho. Nesse mês específico, ocorre precipitação expressiva no final da tarde e/ou início da noite e não há atuação de forçantes sinóticas intensas. O objetivo do trabalho consistiu em elaborar uma árvore de decisão em que, dadas as condições atmosféricas da manhã (12 UTC), obtém-se a informação sobre a ocorrência de chuva no final da tarde e/ou início da noite. Para tanto, foram selecionados os casos em que há precipitação entre às 18 e 24 UTC (grupo 1) e os casos em que não há precipitação durante o todo o dia (grupo 2). A média das variáveis atmosféricas foi obtida para os grupos 1 e 2, e a significância da diferença entre as médias foi avaliada estatisticamente pelo teste t de *Student*. Os preditores da árvore de decisão foram selecionados dentre as variáveis que apresentaram diferenças das médias significativas. A partir dos preditores foram construídos dois índices: o primeiro discrimina entre os casos sem e com chuva, enquanto o segundo discrimina entre os casos de chuva fraca e forte. A árvore de decisão baseada nesses dois índices acertou cerca de 53% dos casos, o que representou um desempenho de 8-13 p.p acima do valor de referência (modelo que gera aleatoriamente as categorias de chuvas segundo a sua frequência observada). Esse resultado mostra que o trabalho tem o potencial de contribuir à previsão de precipitação em julho para as localidades da região do CLA.

Palavras-chave: Precipitação. CLA. Árvore de decisão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Algoritmo (árvore de decisão) de previsão da ocorrência de ausência de convecção, convecção costeira ou LI às 18 LST a partir de condições atmosféricas às 09 LST.....3

Figura 2 – Região do CLA no estado do Maranhão.....5

Figura 3 – Área na qual foi feita os cálculos de média e porcentagem explicada da intensidade de precipitação, tendo como ponto central o CLA.....6

Figura 4 – Ciclo diurno médio da porcentagem da área com precipitação em julho de 2011....7

Figura 5 – Ciclo diário médio da intensidade de precipitação considerando os 43 casos com chuva.....11

Figura 6 – Perfis verticais de: a) DPO; b) Velocidade (magnitude) do vento; c) Componente meridional do vento; d) Divergência atmosférica; e) Divergência de umidade; f) Umidade específica; g) Movimento vertical para os casos com e sem chuva. Os níveis com diferenças significativas ao nível de 5% entre os casos, segundo o teste t, são indicados por círculos preenchidos de preto.....13

Figura 7 – Gráficos de fração estimada pelo modelo de: a) DPO; b) Velocidade (magnitude) do vento em 300 hPa; c) Componente meridional do vento em 150 hPa; d) Divergência de umidade em 850 hPa; e) Divergência de umidade em 500 hPa; f) Movimento vertical em 400 hPa, para definir quais variáveis categorizam melhor casos com chuva e sem chuva.....19

Figura 8 – Gráficos de fração estimadas pelo modelo de: a) DPO; b) Velocidade (magnitude) do vento em 300 hPa; c) Componente meridional do vento em 150 hPa; d) Divergência de umidade em 850 hPa; e) Divergência de umidade em 500 hPa; f) Movimento vertical em 400 hPa, para definir quais variáveis categorizam melhor casos com chuva menos intensa (categoria 1) e chuva mais intensa (categoria 2).....20

Figura 9 – Modelo baseado na árvore de decisão para previsão de ausência de chuva (categoria 0), ocorrência de chuva fraca (categoria 1) ou mais intensa (categoria 2) entre 18 e 24 UTC. Os preditores e os índices referem-se ao horário de 12 UTC.....21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis utilizadas da Reanálise ERA-Interim.....6

Tabela 2: Equações utilizadas para o cômputo das variáveis derivadas dos dados utilizados da Reanálise ERA-Interim.....9

Tabela 3: Resultados do teste F para variáveis que apresentaram diferença significativa ao nível de 5% nas variâncias entre os casos com e sem precipitação.....12

Tabela 4: Resultados obtidos pelo teste t ao nível de significância de 5% para variáveis que não possuem perfil vertical.....15

Tabela 5: Correlação entre as variáveis com diferenças significativas pelo teste t.....17

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CLA – Centro de Lançamento de Alcântara

CMORPH – *CPC MORPHing*

D700 – Depressão do ponto de orvalho em 700 hPa

DIVQ_500 – Divergência de umidade em 500 hPa

DIVQ_850 – Divergência de umidade em 850 hPa

DPO – Depressão do ponto de orvalho

DPO_700 – Depressão do ponto de orvalho em 700 hPa

ECMWF – *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

LI – Linha de Instabilidade

MAG_300 – Magnitude do vento em 300 hPa

NNEB – Norte do Nordeste brasileiro

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

OMEGA_400 – Movimento vertical ômega em 400 hPa

PE – Porcentagem explicada

V_150 – Vento meridional em 150 hPa

V350 – Vento meridional em 350 hPa

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E REFERENCIAL TEÓRICO.....1

1.1 Objetivos.....4

2 DADOS E METODOLOGIA.....5

2.1 Dados.....5

2.2 Metodologia.....6

2.2.1 *Seleção dos casos*.....6

2.2.2 *Análise das variáveis estatisticamente significativas*.....8

2.2.3 *Criação do algoritmo*.....10

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 11

3.1 Seleção dos casos.....11

3.2 Significância estatística das variâncias e das médias das variáveis.....12

3.3 Árvore de decisão.....16

4 CONCLUSÕES.....23

5 REFERÊNCIAS 24

APÊNDICE A.....26

1 INTRODUÇÃO E REFERENCIAL TEÓRICO

A precipitação é uma das mais importantes variáveis meteorológicas, sendo considerada como a principal variável climática em regiões tropicais (MORAES et al., 2005). Conhecer as suas características, como os ciclos anual e diário, e as variabilidades interanual e intrasazonal, é de extrema importância, visto que essas características impactam diretamente diferentes setores da sociedade, tais como transporte, energia, agricultura e turismo.

Neste trabalho, aborda-se a previsão de precipitação a prazo muito curto – especificamente, entre 6 e 12 h – para a região do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) no mês de julho. Nesse mês, não há a atuação de forçantes sinóticas intensas.

O CLA localiza-se na costa norte do Nordeste brasileiro (CNNEB), nas coordenadas 2º20’S e 44º26’W, e é um dos órgãos que compõem o Programa Espacial Brasileiro. No CLA, são realizados os lançamentos de veículos espaciais nacionais e, a fim de auxiliar na previsão do tempo e nos estudos para a região, a Seção de Meteorologia (SMTCLA) do CLA é responsável pela coleta contínua de dados meteorológicos (MARQUES; FISCH, 2005). No CLA, radiossondas são lançadas diariamente às 12 UTC (e às 00 UTC nos anos mais recentes) e os dados de ar superior coletados são armazenados em um banco de dados e posteriormente utilizados em pesquisas para a região. Os estudos feitos com o objetivo de caracterizar as variáveis meteorológicas e/ou aprimorar a previsão do tempo para a região do CLA são de grande importância para garantir a segurança do voo durante o lançamento de veículos espaciais.

A região do CLA apresenta um regime de precipitação com duas estações bem definidas: o trimestre seco, que ocorre entre setembro e novembro, e o chuvoso, entre março e maio (PEREIRA et al., 2002). Os sistemas meteorológicos associados à ocorrência de precipitação sobre a CNNEB em geral, e no CLA em particular, podem ser de escala sinótica, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), de mesoescala, como a Linha de Instabilidade (LI), e de escala local, como as tempestades isoladas (BARROS; OYAMA, 2010).

A ZCIT caracteriza-se por uma banda de nebulosidade convectiva formada a partir da convergência dos ventos alísios de sudeste e nordeste, e sua posição varia entre 5ºS e 10ºN ao longo do ano (UVO, 1989). Durante os meses que caracterizam a estação chuvosa do Nordeste brasileiro, a ZCIT é o principal sistema atuante, sendo que sua intensidade, segundo observações em imagens de satélites, aumenta nos anos em que sistemas frontais alcançam latitudes equatoriais sobre o Atlântico, tanto no Hemisfério Sul quanto no Hemisfério Norte

(MOLION; BERNARDO, 2002). Segundo Lobo (1982), nos meses de março e abril, a ZCIT migra e atinge sua posição mais ao sul sendo responsável pela ocorrência da época mais chuvosa no NNEB. Na região do CLA, a ZCIT é responsável por cerca de 50% dos eventos de precipitação anual (BARROS, 2008).

Com relação às LIs, Kousky (1980) foi um dos primeiros a identificar esse sistema ao utilizar dados de precipitação para os anos de 1961 a 1970. A sua formação sobre a CNNEB estaria associada ao aquecimento solar e aos efeitos de brisas. Mais tarde, Cohen (1989) definiu as LIs como uma banda de nebulosidade convectiva organizada linear e paralelamente à CNNEB que pode se manter confinada à região costeira ou propagar-se continente adentro por grandes distâncias.

Analisando dados de satélites e radiossondas, Garstang (1994) conseguiu identificar 6 estágios das LIs que se propagam continente adentro e atuam na Amazônia durante seu ciclo de vida: gênese (formação das primeiras células sobre a região costeira devido à penetração da brisa marítima), intensificação (organização das tempestades em aglomerados convectivos mais extensos), maturação (estágio onde todo o sistema apresenta largura e comprimento máximo), enfraquecimento (as bordas do sistema passam a ser irregulares e os aglomerados que compõem o sistema tornam-se menos extensos) reintensificação (sistemas ganham intensificam-se à medida que se deslocam para oeste durante o período de aquecimento diurno máximo) e dissipação (os aglomerados convectivos tornam-se irregulares e dissipam-se). Barros (2008) encontrou que as LIs são responsáveis por cerca de 25% a 30% do total anual de precipitação na região do CLA, sendo fevereiro o mês de maior ocorrência.

As tempestades isoladas referem-se às nuvens convectivas profundas isoladas que afetam a escala local. Barros e Oyama (2010) encontraram que a ocorrência dessas tempestades isoladas concentra-se nos meses de fevereiro a junho, sendo junho o mês de maior ocorrência. Os autores também concluíram que as tempestades locais representam cerca de apenas 10% da fração dos eventos que ocasionam precipitação no CLA

O mês de julho encontra-se na transição entre o trimestre chuvoso e o seco. Enquanto no trimestre seco a precipitação é pouco observada, e no trimestre chuvoso há a presença da ZCIT como uma forçante sinótica intensa, em julho a precipitação decorre principalmente da atuação de sistemas convectivos de mesoescala, como as LIs. Oliveira e Oyama (2015) mostraram que, dos oito casos de LIs no CLA em julho de 2005 e 2006, nenhum deles foi associado com a ZCIT.

Barros (2008), utilizando totais horários de precipitação provenientes do pluviômetro instalado no CLA no período de setembro de 1993 a março de 2007, mostrou que o ciclo

diário de precipitação em julho possui maiores valores no início da noite. Além disso, os casos de chuva apresentam baixo acumulado (<0,5 mm) e baixa intensidade (< 0,5 mm h^{-1}).

O prazo de previsão de 6 a 12 h enfocado no presente trabalho encontra-se entre o *nowcasting* (prazo ≤ 2 h) e a previsão do tempo a curto prazo (entre 12 e 72 h)[1]. O problema específico abordado é a previsão de ocorrência de precipitação no final da tarde ou início da noite sendo conhecidas as condições atmosféricas da manhã.

O trabalho de Oyama e Oliveira (2013) aborda uma questão semelhante, já que os autores propuseram um método objetivo capaz de prever ausência de convecção, convecção costeira ou LI no final da tarde ou início da noite no mês de julho sobre a região do CLA a partir das condições atmosféricas antecedentes no período da manhã (12 UTC). As condições selecionadas pelos autores, que são os preditores no método, basearam-se nos resultados do trabalho de Oliveira e Oyama (2015): depressão do ponto de orvalho em 700 hPa (D700) e vento meridional em 350 hPa (V350). O algoritmo consiste em uma árvore de decisão e está mostrado na Figura 1. Por exemplo, para a ocorrência de LI no final da tarde e/ou início da noite (21 UTC ou 18 LST), é necessário que, às 12 UTC (09 LST), D700 < 6º C e V350 < 0.

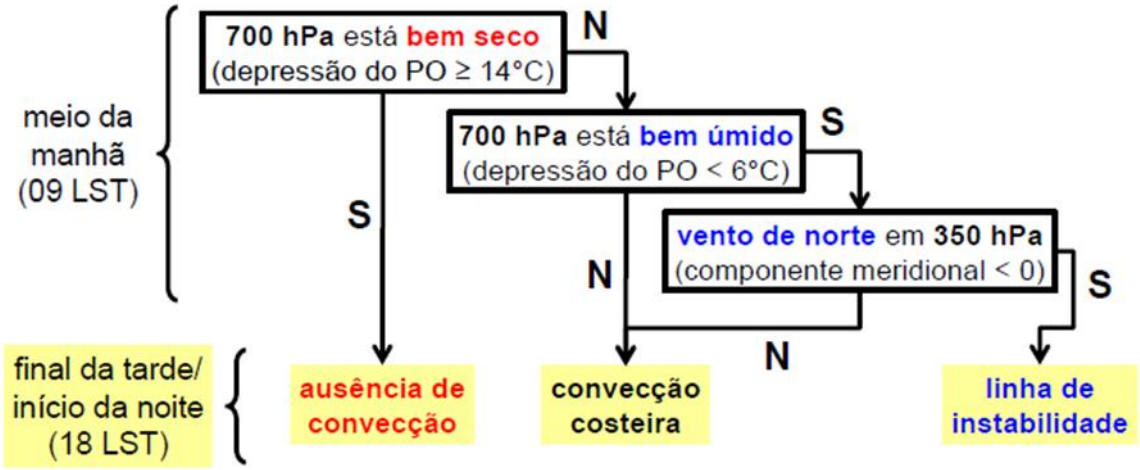


Figura 1 – Algoritmo (árvore de decisão) de previsão da ocorrência de ausência de convecção, convecção costeira ou LI às 21 UTC (18 LST) a partir de condições atmosféricas às 12 UTC (09 LST) (fonte: OYAMA e OLIVEIRA, 2013).

[1] http://www.wmo.int/pages/prog/www/DPS/GDPS-Supplement5-AppI-4.html

1.1 Objetivos

O objetivo do presente trabalho consiste em expandir o algoritmo mostrado na Figura 1 por meio das seguintes ações:

i) Realizar um levantamento dos casos sem chuva durante o dia (grupo 1) e dos casos com chuva no final da tarde ou início da noite (18 a 24 UTC) (grupo 2) na região do CLA;

ii) Verificar as variáveis atmosféricas para as quais as diferenças das médias entre os grupos 1 e 2 no meio da manhã (12 UTC) apresentam significância estatística;

iii) Elaborar uma árvore de decisão que faz o prognóstico da ocorrência de precipitação no final da tarde ou início da noite (sem chuva, chuva fraca ou chuva forte) a partir das condições atmosféricas no meio da manhã.

2 DADOS E METODOLOGIA

2.1 Dados

São utilizados dados de intensidade de precipitação para o mês de julho de 1998 a 2016, abrangendo a região do CLA (Figura 2). Os dados são disponibilizados pelo *National Weather Service* da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e provenientes da técnica CPC MORPHing (CMORPH). Essa técnica produz análises de precipitação global a partir de dados no comprimento de onda do microondas e infravermelho provenientes de satélites de órbita baixa e geoestacionários, respectivamente (JOYCE et al., 2004). Os dados do CMORPH possuem alta resolução espacial, com espaçamento horizontal de 0,07277º (equivalente a 8 km), e alta frequência temporal, com dados a cada trinta minutos.

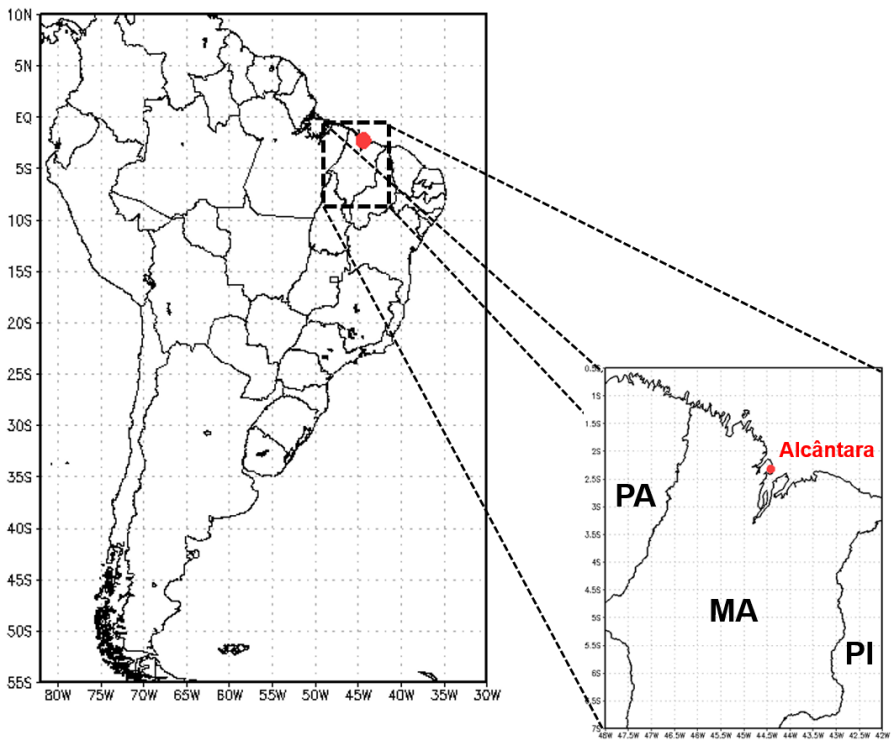


Figura 2 – Região do CLA no estado do Maranhão (Adaptado de Barros, 2008)

Ainda para o mesmo período (1998–2016), são utilizados dados da Reanálise ERA Interim do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) (DEE et al., 2011) para às 12 UTC do mês de julho. Esses dados possuem espaçamento horizontal de 0,75º (80 km), intervalo temporal de 6 horas e estão dispostas em 60 níveis na vertical (da superfície a 0,1 hPa). As variáveis utilizadas estão mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Variáveis utilizadas da Reanálise ERA-Interim

Variáveis	Níveis
Geopotencial	1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150
Temperatura do ar	
Umidade específica	
Movimento vertical	
Componente meridional do vento	
Componente zonal do vento	

2.2 Metodologia

A metodologia utilizada para a elaboração da árvore de decisão descrita nas etapas seguintes:

2.2.1 Seleção dos casos

Os dados do CMORPH são utilizados para calcular, em uma área de 80 × 80 km aproximadamente centrada no CLA (Figura 3), a média (em área) da intensidade de precipitação e a porcentagem da área com precipitação. Esses cálculos são realizados a fim de selecionar casos onde se verifica ausência ou presença de precipitação na região do CLA.

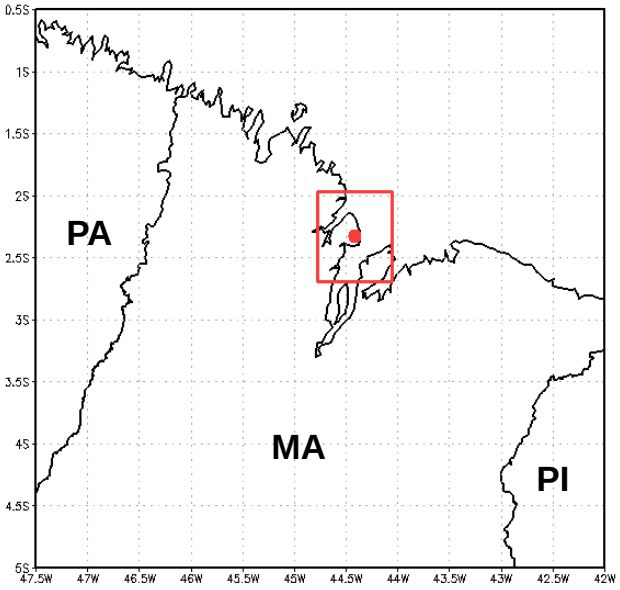


Figura 3 – Área (limitado por borda vermelha) na qual são feitos os cálculos da média de intensidade de precipitação e da porcentagem da área com precipitação. O ponto vermelho refere-se à localização aproximada do CLA.

Para a seleção dos casos onde há ou não a ocorrência de precipitação, é necessário definir um limiar. Para isso, inicialmente, utiliza-se a porcentagem da área (80 × 80 km) com precipitação.

Para o mês de julho de cada ano, contam-se todos os pontos de grade na área com precipitação acima do limiar de 0,1 mm h^{-1}, e divide-se o resultado pelo número total de pontos de grade na área. Esse limiar é utilizado pelo Comando da Aeronáutica (2016). A Figura 4 mostra o ciclo diário médio da porcentagem para julho de 2011; ciclo semelhante é encontrado nos demais anos. A chuva que ocorre no final da tarde e/ou início da noite cobre cerca de 5 a 7% da área. Isso sugere a natureza convectiva da precipitação que ocorre nesse horário.

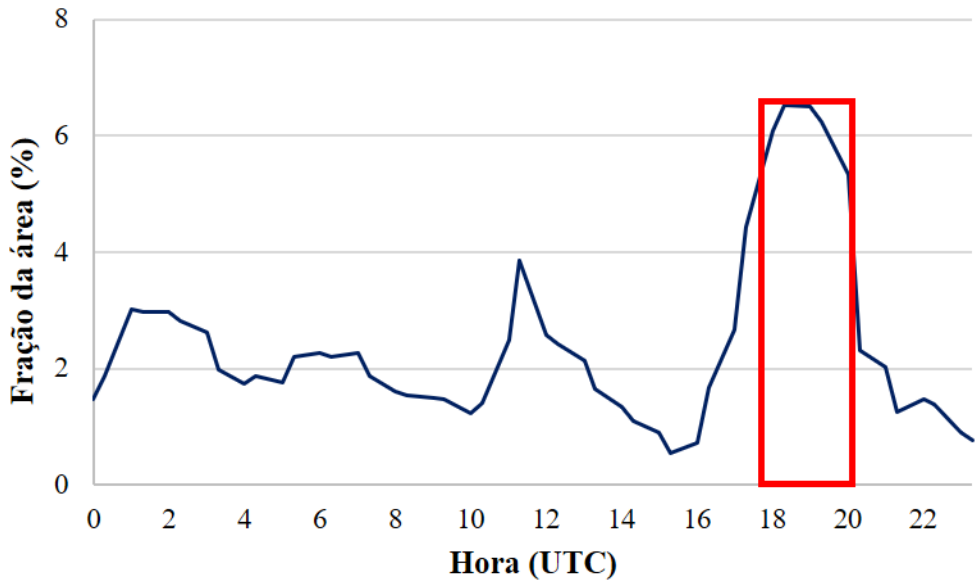


Figura 4 – Ciclo diário médio da porcentagem da área com precipitação em julho de 2011.

Além do limiar de 0,1 mm h^{-1} para ocorrência de chuva, também é utilizado o limiar de 2,5 mm h^{-1} para precipitação moderada (Comando da Aeronáutica, 2016). Esses limiares são válidos para medidas pontuais (no presente caso, são também usadas para os valores no ponto de grade). Para obter limiares que sejam válidos para a intensidade média na área (ou seja, não pontual), consideram-se duas situações. Na primeira, ocorre precipitação com intensidade de 0,1 mm h^{-1} em uma determinada fração da área (PE); na segunda, de 2,5 mm h^{-1} nessa mesma fração. Os limiares para a área, portanto, podem ser dados pelas seguintes equações:

$$Ic = 2{,}5 * PE \quad (1)$$

$$Is = 0{,}1 * PE \quad (2)$$

onde I_s é o limiar que separa chuva de não-chuva na área, e I_c separa chuva fraca de mais intensa.

Após determinar os limiares, para obter os casos em que não há ocorrência de chuva, a média diária de precipitação deve ser inferior a 0,01 mm h^{-1} (grupo 2). Já para os casos onde há chuva, analisa-se a média das 09 UTC às 15 UTC e das 18 UTC às 24 UTC, as quais devem apresentar valores menores que 0,01 mm h^{-1} e maiores ou iguais a 0,1 mm h^{-1}, respectivamente (grupo 1). Portanto, os casos com chuva representam os dias em que não há chuva na manhã, mas há chuva mais intensa no final da tarde e/ou início da noite. Evita-se, assim, os casos em que a ocorrência de chuva durante a manhã estabiliza o perfil vertical e dificulta o prognóstico de chuva à tarde a partir de índices de instabilidade.

2.2.2 Variáveis com diferenças estatisticamente significativas

O próximo passo consiste em utilizar os dados da Reanálise ERA-Interim durante os casos dos grupos 1 e 2, com o intuito de identificar os preditores da precipitação que ocorre no final de tarde e/ou início da noite no CLA.

Além das variáveis descritas na Tabela 1, são utilizadas a divergência atmosférica, divergência de umidade e velocidade (magnitude) do vento para os mesmos níveis dos dados da Reanálise. Utilizando as equações descritas na Tabela abaixo, as variáveis derivadas dos dados utilizados da Reanálise ERA-Interim também são calculadas, sendo elas: depressão do ponto de orvalho (DPO), na qual a temperatura do ponto de orvalho foi calculada para os mesmos níveis utilizando a Equação 3; índice de instabilidade IK (Equação 4); lapse rate entre 850 e 500 hPa (Equação 5); e cisalhamento do vento entre 1000 e 500 hPa (Equação 6).

Tabela 2: Equações utilizadas para o cômputo das variáveis derivadas dos dados utilizados da Reanálise ERA-Interim

EQUAÇÃO		REFERÊNCIA
$\boldsymbol{Td = \left(\frac{243,5}{\frac{17,67}{A} - 1} \right)}$ $\boldsymbol{A = ln\left(\frac{pq}{3,112.(0,622 + 0,378.q)} \right)}$	(3)	Bolton (1980)
$\boldsymbol{IK = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} + Td_{700})}$	(4)	Silva Dias (2000)
$\boldsymbol{\Gamma = -\frac{T_{500} - T_{850}}{Z_{500} - Z_{850}}}$	(5)	Wallace e Hobbs (2006)
$\boldsymbol{cis.vento = \frac{V_{500} - V_{1000}}{Z_{500} - Z_{1000}}}$	(6)	Silva Dias (2000)

*Observações: *Td* representa a temperatura do ponto de orvalho; Td_n é a temperatura do ponto de orvalho no nível *n* descrito na equação; *A* é uma constante; *p* é a pressão do nível calculado; *q* denota a umidade específica; *T* é a temperatura do ar; T_n é a temperatura do ar no nível *n* descrito na equação; *Z* é considerada a altura geométrica do nível de pressão, podendo ser calculada utilizando a razão entre o geopotencial e a gravidade; e *V* é a velocidade (magnitude) do vento.

Em seguida, são calculadas a média e o desvio-padrão sobre a região do CLA das variáveis para os grupos 1 (casos com chuva) e 2 (sem chuva). São utilizados testes estatísticos para identificar se as diferenças entre as médias são ou não significativas para cada variável comparando os casos com e sem precipitação.

São utilizados os testes F de Fisher-Snedecor (teste F) e o teste t de Student, sendo a análise dos mesmos feita através do resultado do p-valor. O p-valor representa a probabilidade de ocorrer o valor observado da estatística de teste (WILKS, 2006). Inicialmente, foi utilizado o teste F para determinar se as variâncias entre os casos são diferentes ou não ao nível de 5% de significância estatística. Caso o p-valor resultante do teste F seja maior que 0,05, então não há evidências para se rejeitar H_0 (hipótese nula sobre a igualdade das variâncias) e, assim, tem-se que não há diferença significativa entre as variâncias. Por outro lado, se o p-valor resultante do teste F for menor que 0,05, então há evidências para se rejeitar H_0 e, assim, tem-se que há diferença significativa entre as variâncias (WILKS, 2006).

A aplicação do teste F fez-se necessária para que o teste t de Student bilateral (teste t) fosse aplicado para os casos de variâncias iguais ou diferentes. O teste t foi realizado com o nível de significância estatística de 5% para encontrar variáveis que possuem médias diferentes em relação aos casos com e sem precipitação. Assim, tomando H_0 a hipótese nula sobre a igualdade das médias, tem-se que, se o p-valor resultante do teste t for maior que 0,05, então não há evidências para se rejeitar H_0 e, assim, tem-se que não há diferença significativa

entre as médias. Por outro lado, se o p-valor resultante do teste t for menor que 0,05, então há evidências para se rejeitar H_0 e, assim, tem-se que há diferença significativa entre as médias.

2.2.3 Criação do algoritmo

Inicialmente, são selecionadas variáveis que são consideradas como os preditores do modelo, ou seja, como informações iniciais a serem fornecidas ao modelo. Essa seleção é feita através da análise da correlação linear entre as variáveis que apresentam diferença significativa ao nível de 5% pelo teste t. São escolhidas como variáveis independentes as que apresentam correlação baixa com as demais. Para as variáveis que apresentam correlação alta com outra variável, utiliza-se como preditando apenas uma, pois esta é representativa da outra. Variáveis que apresentam correlação alta com a série de precipitação média entre 18 e 24 UTC também são escolhidas como preditores.

Após serem selecionados, os preditores são agrupados em índices que são usados na árvore de decisão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Seleção dos casos

Utilizando os limiares mostrados na seção 2.2.1 para determinar os casos em que há ocorrência de precipitação no período da tarde e/ou início da noite (grupo 1) e os casos em que não há precipitação para a região do CLA (grupo 2), foram selecionados 100 casos, sendo 57 com ausência e 43 casos com ocorrência de precipitação. A lista completa com todos os casos encontra-se no Apêndice A.

A Figura 5a mostra o ciclo diário médio da intensidade de precipitação para os casos selecionados com precipitação no período da tarde e/ou início da noite (grupo 1). Embora haja um período entre 00 UTC e 06 UTC com precipitação mais fraca, as maiores intensidades ocorrem entre 16 UTC e 24 UTC. A intensidade pode chegar a aproximadamente 1,4 mm h^{-1} (às 20 UTC). Já para os 57 casos onde não há precipitação, a intensidade é nula ou quase nula ao longo de todo o dia. Logo, existe uma diferença expressiva no ciclo diário médio de precipitação entre os casos com e sem chuva. O ciclo diário médio dos casos com chuva assemelha-se ao mostrado na Figura 5b, que se refere ao conteúdo de a água proveniente de nevoeiros orográficos associados à brisa marítima para a região de Valência (Espanha) (AZORIN et al., 2010). A semelhança da bimodalidade de ambos os ciclos é evidente.

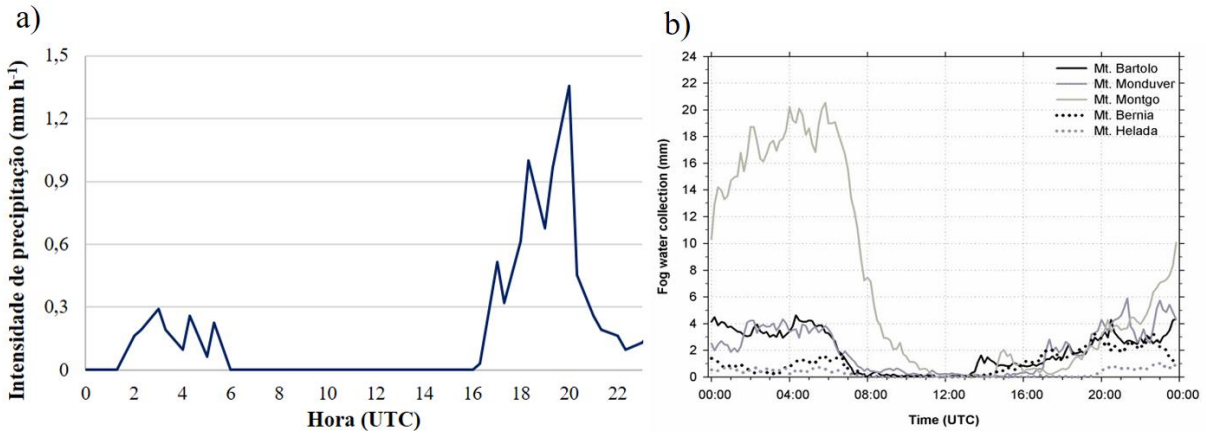


Figura 5 – a) Ciclo diário médio da intensidade de precipitação considerando os 43 casos com chuva; b) Ciclo diário médio do conteúdo de água em Água de nevoeiro orográfico (Fonte: Azorin et al., 2010).

3.2 Significância estatística das variâncias e das médias das variáveis

Em seguida, a média e o desvio-padrão são calculados para os 43 casos com chuva (grupo 1) e para os 57 casos sem chuva (grupo 2) das seguintes variáveis atmosféricas: geopotencial, temperatura do ar, umidade específica, componentes zonal, meridional e vertical do vento, divergência atmosférica, divergência de umidade, depressão do ponto de orvalho, índice de instabilidade IK, lapse rate entre 850 e 500 hPa, cisalhamento do vento entre 1000 e 500 hPa e magnitude do vento. Aplicando o teste F e analisando o p-valor, tem-se na Tabela 3 as variáveis para as quais as variâncias apresentam diferença significativa entre os casos. Para as demais variáveis e níveis da atmosfera analisados, não há evidências para rejeitar a hipótese nula, ou seja, hipótese de que as variâncias não possuem diferença estatisticamente significativa entre os casos; nessa situação, o teste t é aplicado considerando variâncias iguais.

Tabela 3: Resultados do teste F para variáveis que apresentaram diferença significativa ao nível de 5% nas variâncias entre os casos com e sem precipitação

Variáveis	Níveis	Limite inferior do intervalo de confiança	Limite Superior do intervalo de confiança	teste F	p-valor
Divergência de umidade	1000	1,0898	3,4258	1,90947	0,02394
	700	1,0260	3,2253	1,79773	0,04045
Depressão do ponto de Orvalho	500	0,2557	0,8037	0,44795	0,0076
	400	0,2696	0,8476	0,47246	0,01248
Lapse rate	-	0,3053	0,9597	0,53492	0,03618
Temperatura do ar	500	0,2441	0,7674	0,42773	0,00485
Componente zonal do vento	500	0,3039	0,9553	0,53245	0,03486
Umidade específica	400	0,2666	0,8380	0,46708	0,01124
Movimento vertical	500	1,1812	3,7131	2,06965	0,01119
	400	1,0690	3,3604	1,87304	0,02842

A Figura 6 apresenta os perfis verticais das variáveis analisadas para os casos com e sem chuva, sendo que apenas as variáveis que apresentam diferença significativa em algum nível da atmosfera são mostradas. Os níveis que apresentaram diferenças significativas entre as médias de ambos os casos são indicados nas figuras com círculos preenchidos de preto.

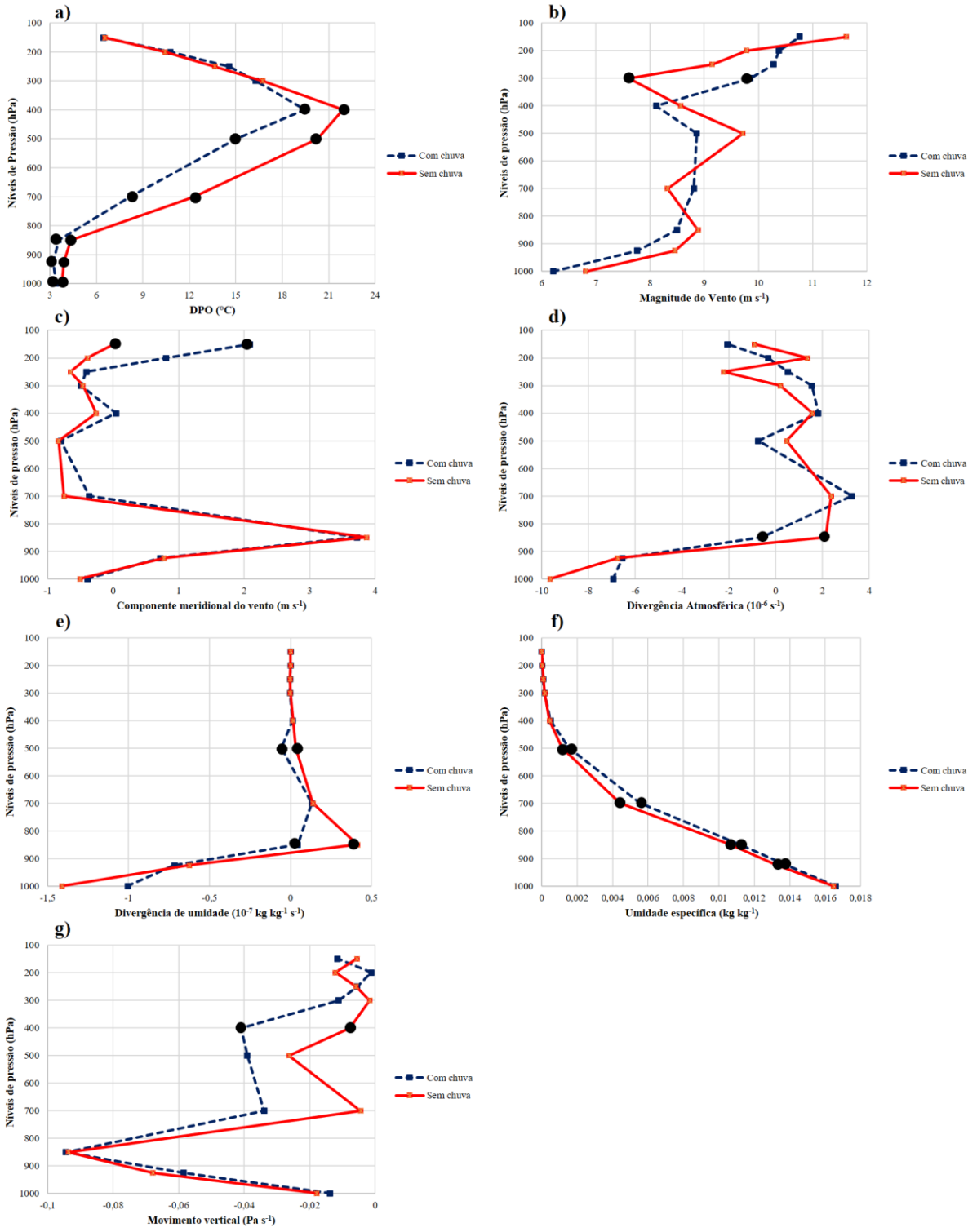


Figura 6 – Perfis verticais de: a) DPO; b) Velocidade (magnitude) do vento; c) Componente meridional do vento; d) Divergência atmosférica; e) Divergência de umidade; f) Umidade específica; g) Movimento vertical para os casos com e sem chuva. Os níveis com diferenças significativas ao nível de 5% entre os casos, segundo o teste t, são indicados por círculos preenchidos de preto.

A variável DPO apresenta, em média, menores valores para os casos com chuva na camada entre os níveis de 1000 hPa e 400 hPa (Figura 6a). Este resultado indica que, em

níveis baixos e médios, existe uma camada mais úmida nos casos com chuva, o que é coerente ao encontrado por Oliveira e Oyama (2015).

A velocidade (magnitude) do vento (Figura 6b) apresenta diferença significativa no nível de 300 hPa, com ventos mais intensos para os casos com chuva. Além disso, a diferença entre as médias da componente meridional do vento (Figura 6c) em 150 hPa mostra ventos de sul mais intensos para os casos com chuva.

Os perfis de divergência atmosférica (Figura 6d) mostram para o nível de diferença significativa de médias, 850 hPa, convergência atmosférica para os casos com chuva, ao passo que para os casos sem chuva, nesse nível, verifica-se divergência. Com relação à divergência de umidade (Figura 6e), para esse mesmo nível, nota-se uma diminuição da divergência de umidade para os casos com chuva quando comparado aos casos sem chuva. Ainda sobre essa variável, no nível de 500 hPa verifica-se divergência de umidade para os casos sem chuva enquanto que, para os casos com chuva, há convergência de umidade.

Quando analisados os perfis de umidade específica, a umidade é em média maior para os casos com chuva. A camada entre 925 hPa e 500 hPa encontra-se significativamente mais úmida quando comparada com as médias dos casos sem chuva. Analisando especificamente o nível de 850 hPa, pode-se notar convergência atmosférica (Figura 6d), diminuição da divergência de umidade (Figura 6e) e maior umidade específica (Figura 6f), ou seja, um ambiente favorável para o desenvolvimento de convecção profunda. Essas características coincidem com aquelas favoráveis à ocorrência de LIs em março como descrito por Oliveira (2017).

Em relação ao perfil de movimento vertical na atmosfera (Figura 6g), em 400 hPa, nível onde há diferença significativa entre as médias, ocorre um movimento ascendente muito maior para os casos com chuva se comparado aos casos sem chuva.

Esperava-se que a componente zonal do vento próximo à superfície apresentasse diferença significativa na média entre os casos com e sem precipitação devido à atuação da brisa marítima sobre o CLA. Entretanto, isso não ocorre possivelmente devido ao fato da resolução espacial dos dados da Reanálise não conseguir representar adequadamente essa circulação local.

Na Tabela 4 encontram-se os resultados obtidos pelo teste t para as variáveis que não possuem perfil vertical. O índice de instabilidade IK é a única variável que apresenta diferenças significativas nas médias dos casos. Essa variável indica o potencial de ocorrência de tempestades. Comparando os resultados encontrados com o trabalho de Hallak (2012), para

os casos com chuva há uma probabilidade de 40-60% de ocorrência de tempestades; para os casos sem chuva essa probabilidade se reduz para cerca de 20-40%.

Tabela 4: Resultados obtidos pelo teste t ao nível de significância de 5% para variáveis que não possuem perfil vertical

Variável	Média - Com chuva	Média - Sem chuva	Limite inferior do intervalo de confiança	Limite superior do intervalo de confiança	teste t	p-valor
Cisalhamento do vento	0,000461355	0,000518779	-0,00032858	0,00021373	-0,42027	0,6752
Índice lK	27,20711	22,62232	2,537687	6,631897	4,4445	2,32E-05
Lapse rate	-5,174356	-5,148384	-0,10511655	0,05317101	-0,65125	0,5164

3.3 Árvore de decisão

Para criar a árvore de decisão, é necessário definir as variáveis de entrada, ou seja, os preditores. Os preditores são escolhidos dentre as variáveis que apresentam diferença significativa nas médias pelo teste t entre os casos com e sem chuva (seção anterior).

Inicialmente, calcula-se a correlação linear entre as variáveis a fim de selecionar preditores independentes entre si. A correlação entre as variáveis está mostrada na Tabela 5, e considera-se que uma variável é independente quando possui correlação baixa com todas as demais. Os preditores selecionados são:

- magnitude do vento em 300 hPa (MAG_300), vento meridional em 150 hPa (V_150) e divergência de umidade em 500 hPa (DIVQ_500), que são variáveis independentes em relação a todas as demais (valor absoluto da correlação em relação às demais variáveis é inferior a 0,12);
- movimento vertical ômega em 400 hPa (OMEGA_400), que é relativamente independente em relação às demais (a correlação é baixa em relação à maioria das variáveis);
- depressão do ponto de orvalho em 700 hPa (DPO_700), que é representativa do perfil da depressão do ponto de orvalho e da umidade específica, e também do índice IK; e
- divergência de umidade em 850 hPa (DIVQ_850), que é também representativa da divergência atmosférica em 850 hPa.

Dentre os 6 preditores, DPO_700 e DIVQ_850 são os que possuem maior correlação (em torno de 0,20) com a precipitação que ocorre no final da tarde e/ou início da noite (entre 18 e 24 UTC).

Os preditores são normalizados (subtraindo-se a média, μ, e então dividindo pelo desvio-padrão, σ), e 4 intervalos de valores normalizados são considerados: < -1 (ou seja, $< \mu - \sigma$), $[-1; 0)$, $[0, 1)$, e ≥ 1 (ou seja, $\geq \mu + \sigma$). Em uma distribuição normal, esses intervalos contêm 16,4; 34,1; 34,1 e 16,4% da frequência total, respectivamente.

Tabela 5: Correlação linear entre as variáveis com diferenças significativas pelo teste t

Variáveis	DPO 1000 hPa	DPO 925 hPa	DPO 850 hPa	DPO 700 hPa	DPO 500 hPa	DPO 400 hPa	Mag V 300 hPa	V 150 hPa	Div 850 hPa	Divq 850 hPa	Divq 500 hPa	Ue 925 hPa	Ue 850 hPa	Ue 700 hPa	Ue 500 hPa	ω 400 hPa	IK	Precipitação (18-24 UTC)
DPO 1000 hPa	1,00	0,67	0,58	0,34	0,25	0,25	0,02	0,01	0,42	0,42	-0,06	-0,64	-0,63	-0,33	-0,21	0,38	-0,44	-0,23
DPO 925 hPa		1,00	0,73	0,30	0,30	0,24	0,06	-0,02	0,54	0,53	-0,04	-0,92	-0,77	-0,29	-0,24	0,36	-0,45	-0,22
DPO 850 hPa			1,00	0,43	0,43	0,28	0,11	0,02	0,42	0,46	-0,03	-0,70	-0,96	-0,43	-0,36	0,36	-0,59	-0,20
DPO 700 hPa				1,00	0,45	0,30	0,00	-0,03	0,30	0,31	0,04	-0,33	-0,45	-0,97	-0,46	0,13	-0,96	-0,21
DPO 500 hPa					1,00	0,52	0,01	0,05	0,26	0,29	0,12	-0,31	-0,41	-0,49	-0,94	0,16	-0,54	-0,21
DPO 400 hPa						1,00	0,05	0,11	0,20	0,20	0,03	-0,22	-0,25	-0,33	-0,51	0,23	-0,34	-0,16
Mag V 300 hPa							1,00	0,00	-0,05	-0,05	-0,01	-0,06	-0,09	-0,01	-0,01	-0,04	-0,01	0,05
V 150 hPa								1,00	0,00	0,01	0,02	0,05	0,01	0,03	-0,04	0,00	0,03	-0,03
Div 850 hPa									1,00	0,92	0,00	-0,45	-0,47	-0,28	-0,24	0,26	-0,38	-0,19
Divq 850 hPa										1,00	0,06	-0,46	-0,51	-0,29	-0,27	0,26	-0,40	-0,22
Divq 500 hPa											1,00	0,01	0,03	-0,02	-0,09	0,13	-0,05	-0,08
Ue 925 hPa												1,00	0,80	0,34	0,26	-0,34	0,48	0,20
Ue 850 hPa													1,00	0,46	0,34	-0,35	0,63	0,21
Ue 700 hPa														1,00	0,52	-0,11	0,94	0,21
Ue 500 hPa															1,00	-0,11	0,52	0,23
ω 400 hPa																1,00	-0,20	-0,13
IK																	1,00	0,24
Precipitação (18-24 UTC)																		1,00

A precipitação é agrupada em 3 categorias: 0, que representa ausência de precipitação (< 0,01 mm h^{-1}); 1, precipitação fraca (≥ 0,01 mm h^{-1} e < 0,1 mm h^{-1}); e 2, precipitação mais intensa (≥ 0,1 mm h^{-1}). No total, entre 1998 a 2016, há 589 dias, sendo 351 na categoria 0, 116 na categoria 1 e 122 na categoria 2. Percentualmente, em média, há 60% de casos sem chuva (categoria 0) e 40% com chuva (categoria 1 ou 2, ou seja, categoria 1 + 2).

Para simplificar a árvore de decisão, os preditores são agrupados em dois índices, I_1 e I_2. O índice I_1 agrupa os preditores que conseguem discriminar melhor entre a ausência e a ocorrência de precipitação, ou seja, entre os casos sem chuva (categoria 0) e com chuva (categoria 1 + 2). O índice I_2 agrupa os preditores que conseguem discriminar melhor entre os casos com chuva fraca (categoria 1) e mais intensa (categoria 2).

A Figura 7 mostra, para cada preditor, a fração de casos sem chuva (categoria 0) e com chuva (categoria 1 + 2) nos 4 intervalos de variação dos valores do preditor. A fração é calculada em relação à frequência no intervalo; logo, a soma das frações em um intervalo é 100%. Como, em média, há 60% de casos sem chuva e 40% com chuva, considera-se que um preditor consegue discriminar melhor entre esses casos quando a diferença entre as frações, para certos intervalos, fica acima da média (ou seja, > 20%, que é a diferença entre 60 e 40%).

Os preditores DPO_700 (Figura 7a), DIVQ_850 (Figura 7d) e OMEGA_400 (Figura 7f) discriminam melhor: quanto maior (menor) o valor, maior é fração de casos sem (com) chuva. Isso é fisicamente consistente, pois a menor umidade em médios níveis, a maior divergência (ou menor convergência) em baixos níveis e a maior subsidência (ou menor ascendência) em médios níveis são condições desfavoráveis à ocorrência de precipitação. O preditor MAG_300 (Figura 7b) consegue discriminar bem apenas quando o seu valor normalizado é menor que -1 (para os outros intervalos, as frações são semelhantes à média). Os demais preditores possuem menor capacidade de discriminação e, por isso, não são considerados na composição do índice I_1.

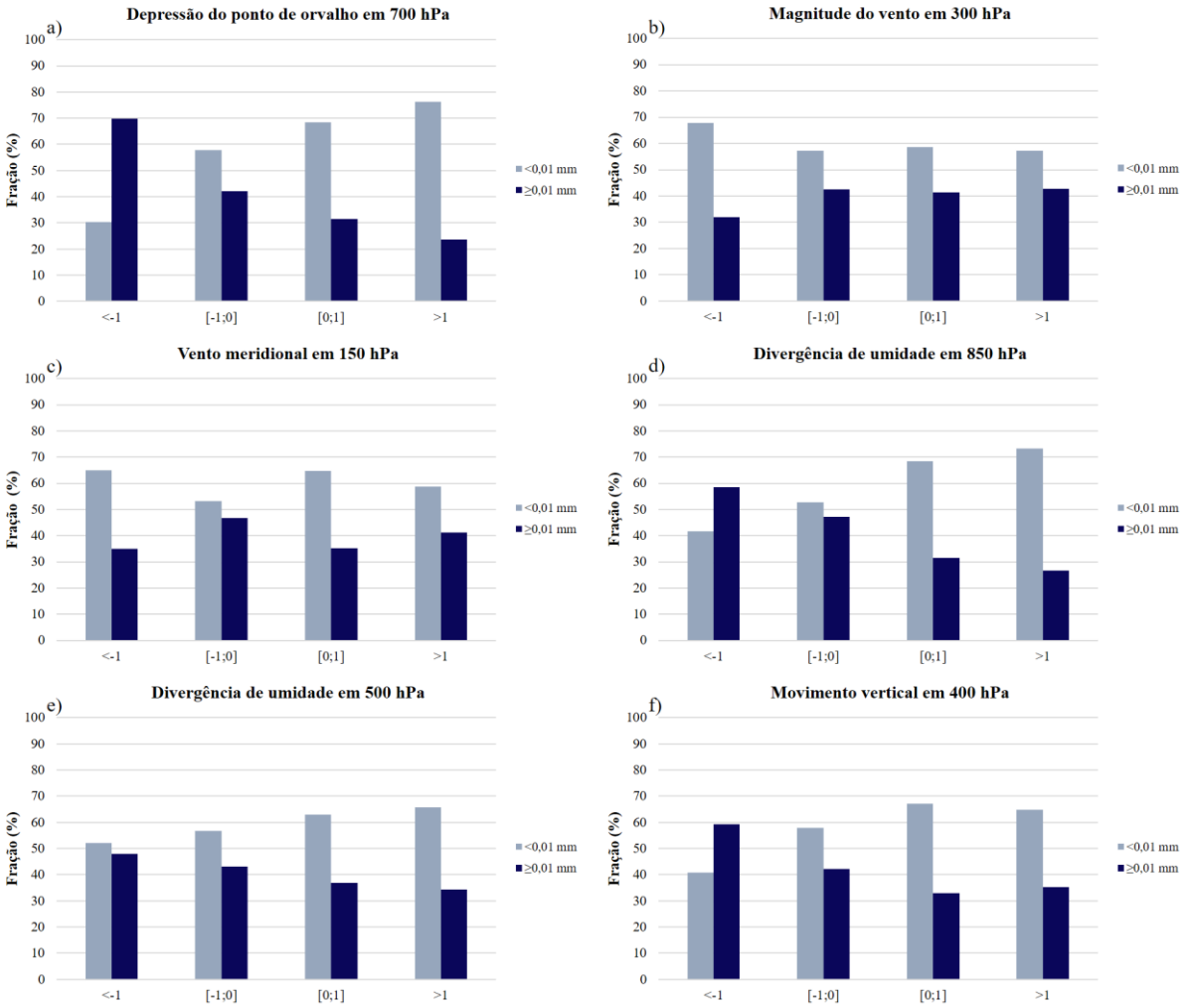


Figura 7 – Gráficos de fração estimada pelo modelo de: a) DPO; b) Velocidade (magnitude) do vento em 300 hPa; c) Componente meridional do vento em 150 hPa; d) Divergência de umidade em 850 hPa; e) Divergência de umidade em 500 hPa; f) Movimento vertical em 400 hPa, para definir quais variáveis categorizam melhor casos com chuva e sem chuva.

O índice I_1 é definido como a soma dos preditores normalizados que discriminam melhor entre os casos sem e com chuva, sendo eles: DPO_700 (DPO'); DIVQ_850 (DIVQ'); OMEGA_400 (ω400'); e MAG_300 (MAG'). O sinal de MAG_300 é negativo para que os valores positivos do índice estejam associados à ausência de chuva.

$$I_1 = DPO' + DIVQ' + \omega 400' \qquad MAG' > 0 \tag{7}$$

$$I_1 = DPO' + DIVQ' + \omega 400' - MAG' \qquad MAG' \leq 0 \tag{8}$$

Com relação às categorias 1 e 2, há 238 casos. Cerca de 49% dos casos encontram-se na categoria 1 e 51%, na categoria 2. A Figura 8 é análoga à Figura 7, só que entre as categorias 1 e 2. Considera-se que um preditor consegue discriminar melhor entre essas

categorias se a diferença entre as frações, para certos intervalos, fica acima da média (ou seja, > 2%, que é a diferença entre 51 e 49%).

Os preditores DPO_700 (Figura 8a), DIVQ_850 (Figura 8d) e OMEGA_400 (Figura 8f) discriminam bem: quanto maior (menor) o valor, maior é fração de casos com chuva fraca (mais intensa). O preditor V_150 (Figura 8c) consegue discriminar bem apenas quando o seu valor normalizado é menor que -1 (para os outros intervalos, as frações são semelhantes à média). Os demais preditores possuem menor capacidade de discriminação e, por isso, não são considerados na composição do índice I_2.

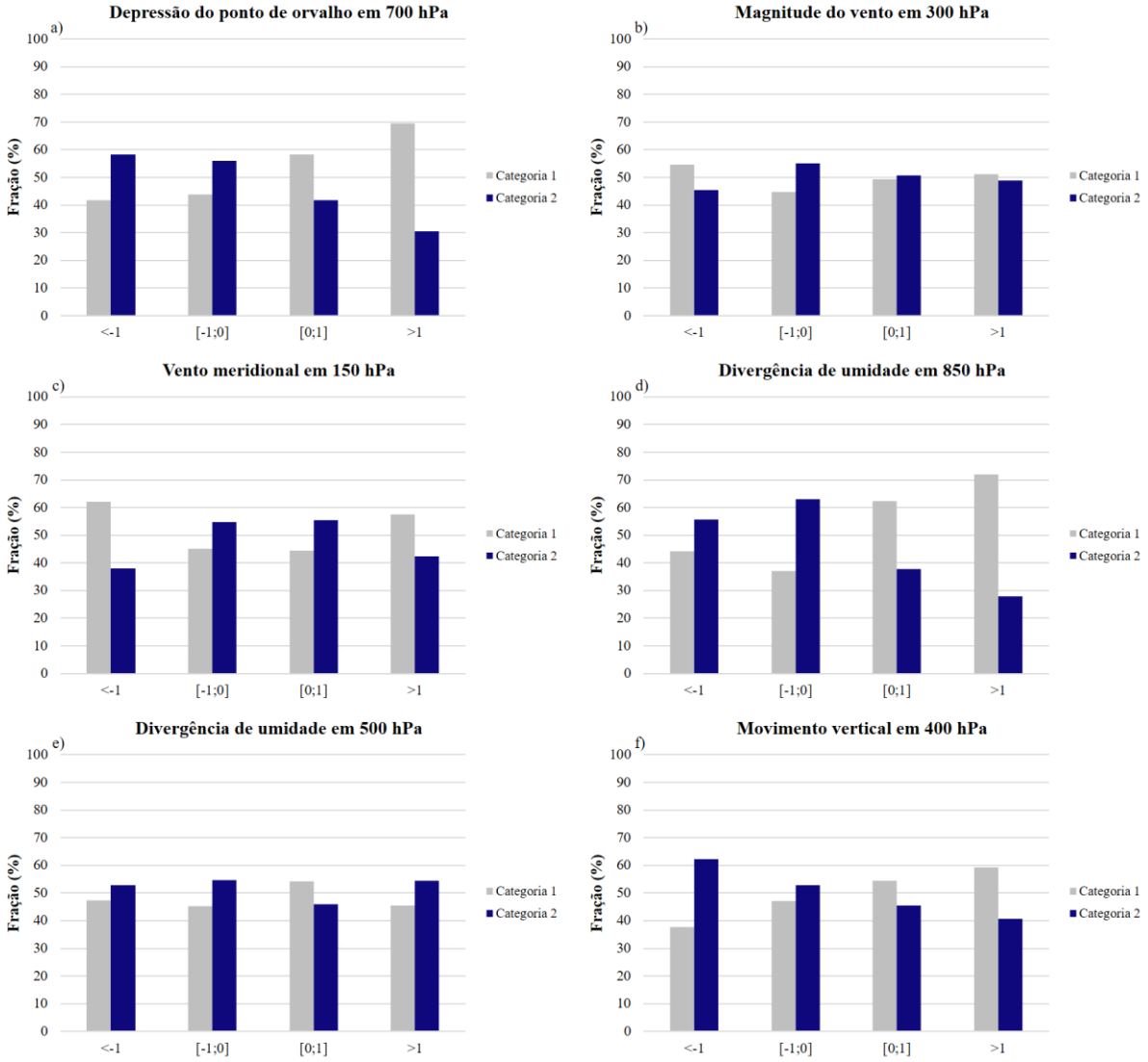


Figura 8 – Gráficos de fração estimada pelo modelo de: a) DPO; b) Velocidade (magnitude) do vento em 300 hPa; c) Componente meridional do vento em 150 hPa; d) Divergência de umidade em 850 hPa; e) Divergência de umidade em 500 hPa; f) Movimento vertical em 400 hPa, para definir quais variáveis categorizam melhor casos com chuva menos intensa (categoria 1) e chuva mais intensa (categoria 2).

O índice I_2 é definido como a soma dos preditores que discriminam melhor entre os casos de chuva fraca e mais intensa, sendo eles: DPO_700 (DPO'); DIVQ_850 (DIVQ'); OMEGA_400 (ω400'); e V_150 (V'). O sinal de V_150 é negativo para que os valores positivos do índice estejam associados à chuva fraca.

$$I_2 = DPO' + DIVQ' + \omega 400' \quad V' > -1 \tag{8}$$

$$I_2 = DPO' + DIVQ' + \omega 400' - V' \quad V' \leq -1 \tag{9}$$

A árvore de decisão está mostrada na Figura 9. A partir do valor normalizado dos preditores às 12 UTC, calculam-se os índices I_1 e I_2. Se o valor de I_1 for acima (abaixo) da média do I_1 (0,41), então o prognóstico é de ausência (ocorrência) de precipitação entre 18 e 24 UTC. Havendo prognóstico de ocorrência de precipitação, se o valor de I_2 for acima (abaixo) da média do I_2 (0,22), então o prognóstico adicional é de chuva fraca (mais intensa).

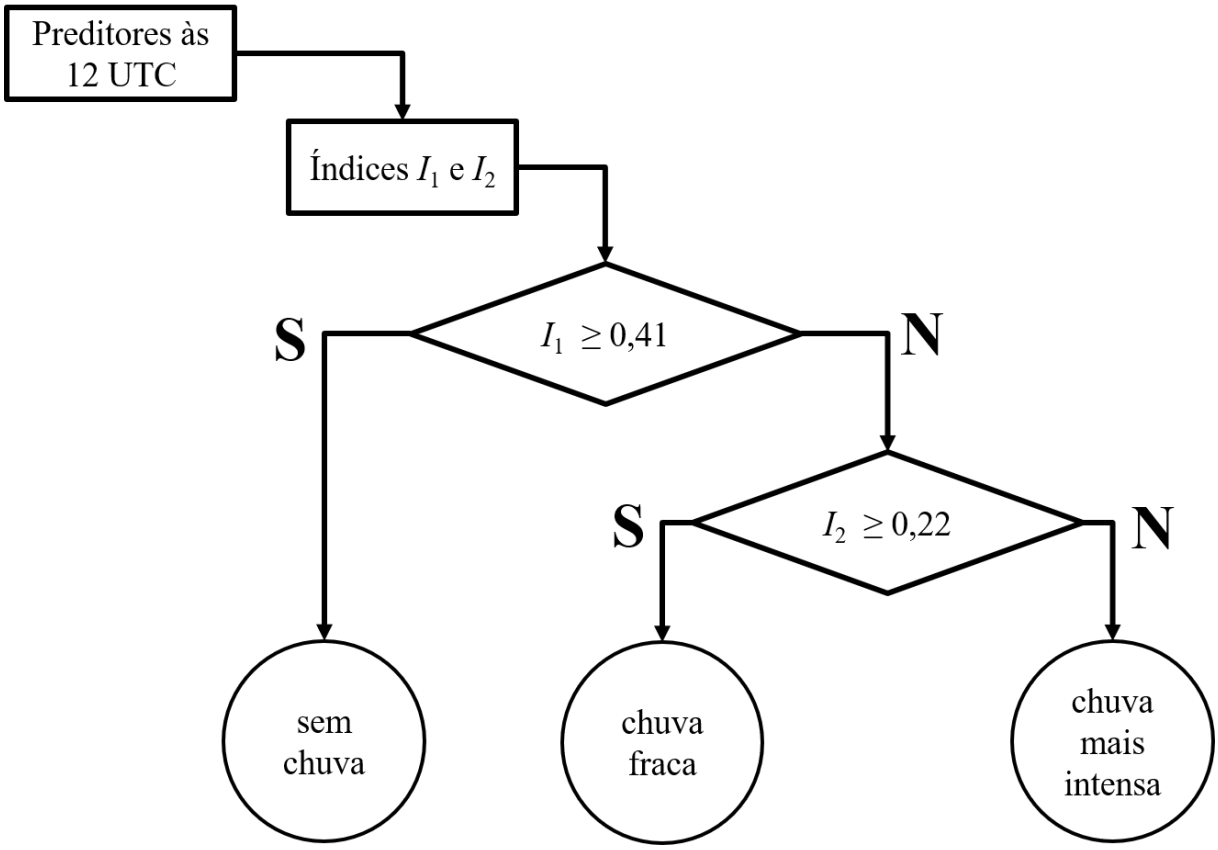


Figura 9 – Modelo baseado na árvore de decisão para previsão de ausência de chuva (categoria 0), ocorrência de chuva fraca (categoria 1) ou mais intensa (categoria 2) entre 18 e 24 UTC. Os preditores e os índices referem-se ao horário das 12 UTC.

O modelo baseado na árvore de decisão consegue acertar a categoria de precipitação em cerca de 53% dos casos. Esse desempenho é cerca de 8-13 p.p. acima do valor de referência (40-45%), que se refere ao desempenho de um modelo aleatório (ou seja, que gera as categorias aleatoriamente baseadas na sua frequência observada). Esse ganho de previsibilidade tem o potencial de ser aumentado, pois os limiares utilizados no modelo não foram calibrados.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho, para a região do CLA, abordou-se o problema de prognosticar estatisticamente a ocorrência de precipitação entre às 18 e 24 UTC (final da tarde e início da noite) a partir das condições atmosféricas às 12 UTC (meio da manhã) para o mês de julho. Para os meses de julho de 1998 a 2016, utilizando dados do CMORPH, foram selecionados casos com ausência e ocorrência de precipitação (57 e 43 casos, respectivamente) entre 18 e 24 UTC.

Para esses casos, foram obtidas as variáveis que apresentaram diferenças significativas entre as médias pelo teste t, dos casos com e sem precipitação. As variáveis foram: depressão do ponto de orvalho de 1000 a 400 hPa; magnitude do vento em 300 hPa; componente meridional do vento em 150 hPa; divergência atmosférica em 850 hPa; divergência de umidade entre 850 a 500 hPa; umidade específica entre 925 a 500 hPa, movimento vertical em 400 hPa, e o índice IK.

Dessas variáveis, seis – depressão do ponto de orvalho em 700 hPa, divergência de umidade em 850 hPa e 500 hPa, movimento vertical em 400 hPa, magnitude do vento em 300 hPa e vento meridional em 150 hPa –foram selecionadas para servirem de preditores do modelo estatístico. O modelo é baseado em uma árvore de decisão que considera 2 índices (I_1 e I_2) calculados a partir dos preditores. O I_1 discrimina os casos com ausência (categoria 0) e ocorrência de precipitação, enquanto o I_2 discrimina entre os casos de chuva leve (categoria 1) e mais intensa (categoria 2).

Considerando os meses de julho de 1998 a 2016, o modelo apresentou um desempenho com cerca de 53% de acerto na previsão das categorias de precipitação. Esse desempenho é cerca de 8 a 13 p.p superior à previsão aleatória, e tem potencial de ser melhorado, uma vez que os limiares utilizados no modelo não foram calibrados.

O modelo obtido neste trabalho poderá ser utilizado pelos previsores nas campanhas de lançamento de foguete no CLA como uma ferramenta adicional no prognóstico da precipitação. Além de melhorias no próprio modelo, como a calibração dos parâmetros, estudos futuros poderão verificar o desempenho do modelo para outros meses.

5 REFERÊNCIAS

AZORIN, C.; CORELL, D. Fog water collection under sea breeze conditions in the western Mediterranean basin (Valencia region, Spain). 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew Münster, Germany, 25–30 July 2010.

BARROS. S. S. **Precipitação no Centro de Lançamento de Alcântara: aspectos observacionais e de modelagem.** 102f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) –Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

BARROS, S. S.; OYAMA, M. D. Sistemas Meteorológicos Associados à Ocorrência de Precipitação no Centro de Lançamento de Alcântara. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n.3, p. 333-344, 2010.

BOLTON, D. The Computation of Equivalent Potential Temperature. **Monthly Weather Review**,v.108, p.1046-1053, 1980.

COHEN, J. C. P. **Um estudo observacional de linhas de instabilidade na Amazônia**. 1989. 174 p. (INPE-4865-TDL/376). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1989.

Comando da Aeronáutica. Estações Meteorológicas de Superfície. **ICA 105-15. 2016**. 70 p.

DEE, D. P.; UPPALA, S. M.; SIMMONS, A. J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M. A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A. C. M.; van de BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; DELSOL, C.; DRAGANI, R.; FUENTES, M.; GEER, A. J.; HAIMBERGER, L.;HEALY, S. B.; HERSBACH, H.; HÓLM, E. V.; ISAKSEN, L.; KÅLLBERG, P.; KÖHLER, M.; MATRICARDI, M.; McNALLY, A. P.; MONGE-SANZ, B. M.; MORCRETTE, J.-J.; PARK, B.-K.; PEUBEY, C.; de ROSNAY, P.; TAVOLATO, C.; THÉPAUT, J.-N.; VITART, F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, p. 553–597, 2011.

GARSTANG, M.; MASSIE JR., H. L.; HALVERSON, J.; GRECO, S.; SCALA, J. Amazon coastal squall lines, part I: Structure and kinematics. **Mon. Wea. Rev.**, v. 112, p. 608-622. 1994.

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, n. 2, p. 173-206, 2012.

JOYCE, R. J; JANOWIAK, J. E; ARKIN, P. A; XIE, P. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. **Journal of Hydrometeorology**, v. 5, n. 3, p. 487-503, 2004.

KOUSKY, V. E. Diurnal Rainfall Variation in Northeast Brazil. **Mon. Wea. Rev.**, v.108, p. 488–498, 1980.

LOBO, P. R. V. **Um estudo climatológico da zona de convergência intertropical (ZCIT) e sua influência sobre o Nordeste do Brasil**. fev. 1982. 93 p. (INPE-2534- TDL/101). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos. 1982.

MARQUES, R.F.C.; FISCH, G.F. As atividades de meteorologia aeroespacial no Centro Técnico Aeroespacial (CTA). **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.3, p.21-25, 2005.

MOLION L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n.1, p. 1-10, 2002.

MORAES, B. C; COSTA, J. M. N; COSTA, A. C. L; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazon**, v. 35, p. 207-217, 2005.

OLIVEIRA, F. P. Processos convectivos na iniciação de linhas de instabilidade na costa norte do Brasil. 2017. 181 p. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/04.26.18.41-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

OLIVEIRA, F. P.; OYAMA, M. D. Antecedent Atmospheric Conditions Related to Squall-Line Initiation over the Northern Coast of Brazil in July. **Weather and Forecasting**, v. 30, n. 5, p. 1254-1264, 2015.

OYAMA, M. D.; OLIVEIRA, F. P. Previsão de Ocorrência de Linhas e Instabilidade sobre o Centro de Lançamento de Alcântara em julho. Resumo. **Anais do V Simpósio Internacional de Climatologia**, Florianópolis, 2013.

PEREIRA, E.I.; MIRANDA, I.; FISCH, G.F.; MACHADO, L.A.T.; ALVES, M.A.S. **Atlas climatológico do Centro de Lançamento de Alcântara**. São José dos Campos: Centro Técnico Aeroespacial, 2002. Relatório de desenvolvimento, ACA/RT-01/01, GDO-000000/B0047.

SILVA DIAS, M. A. Índices de instabilidade para previsão de chuva e tempestades severas. **Universidade de São Paulo, SP**, 2000.

UVO, C. B. **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro.** 81p. (INPE – 4887 – TDL/378). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1989.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric Science: an introduction survey**. 2ed. Academic Press, 2006. 483p.

WILKS, D. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. Elsevier, 2006, 2ed, 649 p.

APÊNDICE A

Tabela 1 – Casos selecionados com e sem precipitação

Ano	Com chuva				Sem chuva			
		Médias				Médias		
	Dia	Diária	Manhã (09-15 UTC)	Tarde (18-24 UTC)	Dia	Diária	Manhã (09-15 UTC)	Tarde (18-24 UTC)
1998	6	0,66039	0,00000	2,39625	11	0,0001354	0,0005001	0,0000000
					21	0,0000000	0,0000000	0,0000000
					22	0,0000000	0,0000000	0,0000000
1999	9	0,28471	0,01009	0,58444	1	0,0007186	0,0013845	0,0000000
					5	0,0008126	0,0000000	0,0000000
					23	0,0000000	0,0000000	0,0000000
2000	18	0,20469	0,01315	0,62997	21	0,0004425	0,0016338	0,0043840
	22	0,43182	0,00085	0,96839	24	0,0030838	0,0000000	0,0000000
					30	0,0000000	0,0000000	0,0000000
2001	10	0,09111	0,00208	0,30991	5	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	13	0,30578	0,00290	1,09938	6	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	21	0,15003	0,00010	0,55091	20	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	31	0,12271	0,00331	0,44130				
2002	9	0,13224	0,00000	0,49398	12	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	21	0,03991	0,00000	0,14736	15	0,0000000	0,0000000	0,0000000
					17	0,0000000	0,0000000	0,0000000
2003	3	0,21269	0,00185	0,78415	10	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	27	0,06551	0,00050	0,23873	30	0,0000000	0,0000000	0,0004996
					31	0,0010105	0,0000000	0,0000000
2004	11	0,13756	0,00827	0,21327	6	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	16	0,03359	0,00000	0,17223	9	0,0000624	0,0002306	0,0000000
					10	0,0000000	0,0000000	0,0000000
2005	8	0,18520	0,00965	0,59556	3	0,0005729	0,0021154	0,0000000
					16	0,0000000	0,0000000	0,0000000
					20	0,0000000	0,0000000	0,0000000
2006	10	0,03656	0,00000	0,13499	9	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	24	0,08978	0,00000	0,33823	16	0,0000000	0,0000000	0,0000000
					19	0,0000000	0,0000000	0,0000000
2007	9	0,21688	0,00000	0,92653	13	0,0000000	0,0000000	0,0000000
					17	0,0000000	0,0000000	0,0000000
					20	0,0000000	0,0000000	0,0000000
2008	4	0,02725	0,00000	0,10061	20	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	12	0,07386	0,00000	0,31679	26	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	19	0,51856	0,00000	1,01089	30	0,0005625	0,0020767	0,0000000
2009	20	0,02823	0,00106	0,10153	2	0,0000000	0,0000000	0,0000000
					13	0,0000000	0,0000000	0,0000000
					19	0,0000000	0,0000000	0,0000000
2010	2	0,09433	0,00208	0,30062	6	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	13	0,02781	0,00000	0,10269	28	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	16	0,06025	0,00123	0,22177	31	0,0000000	0,0000000	0,0000000
2011	4	0,23688	0,00000	0,82467	15	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	6	0,26085	0,00000	0,96314	19	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	17	0,03794	0,00519	0,12378	29	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	18	0,10582	0,00000	0,37897				
	23	0,53675	0,00000	1,90236				
	27	0,02858	0,00000	0,10552				
2012	3	0,37571	0,00162	1,33268	6	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	8	0,05758	0,00115	0,16620	12	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	13	0,18076	0,00127	0,64758	17	0,0000000	0,0000000	0,0000000
2013	12	0,02777	0,00000	0,10833	6	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	19	0,05786	0,00000	0,22162	17	0,0000000	0,0000000	0,0000000
					21	0,0000000	0,0000000	0,0000000
2014	2	0,18426	0,00000	0,68035	15	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	3	0,03434	0,00000	0,12681	16	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	10	0,04920	0,00043	0,15397	19	0,0000000	0,0000000	0,0000000
2015	1	0,07432	0,00000	0,12208	12	0,0000000	0,0000000	0,0000000
					19	0,0000000	0,0000000	0,0000000
					30	0,0000000	0,0000000	0,0000000
2016	8	0,03742	0,00000	0,10500	16	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	19	0,12551	0,00000	0,43885	17	0,0000000	0,0000000	0,0000000
					27	0,0000000	0,0000000	0,0000000