



Universidade Federal do Pará



Faculdade de Meteorologia



Instituto de Geociências

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CHRISTOPHER HENRIQUE DE ALMEIDA DUARTE

CICLO DIÁRIO DA TEMPERATURA DE BRILHO DO TOPO DE NUVENS
E CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO EM CUIARANA-PA

Nº 374

BELÉM - PARÁ

MARÇO - 2016

CHRISTOPHER HENRIQUE DE ALMEIDA DUARTE

CICLO DIÁRIO DA TEMPERATURA DE BRILHO DO TOPO DE NUVENS
E CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO EM CUIARANA-PA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Meteorologia do Instituto de
Geociências da Universidade Federal do Pará –
UFPA, em cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Bacharel em Meteorologia.
Orientador: Prof. Dr. Galdino Viana Mota.

Belém

2016

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Duarte, Christopher Henrique de Almeida, 1995-

Ciclo diário da temperatura de brilho do topo de nuvens e características da precipitação em Cuiarana-PA / Christopher Henrique de Almeida Duarte. – 2015.

71 f : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Galdino Viana Mota

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Meteorologia, Belém, 2015.

1. Precipitação (Meteorologia) – Salinópolis (PA). 2. Temperatura de brilho. I. Título.

CDD 22 ed. 551.57728115

CHRISTOPHER HENRIQUE DE ALMEIDA DUARTE

CICLO DIÁRIO DA TEMPERATURA DE BRILHO DO TOPO DE NUVENS
E CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO EM CUIARANA-PA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Meteorologia do Instituto de
Geociências da Universidade Federal do Pará –
UFPA, em cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Bacharel em Meteorologia.

Data de aprovação: ____/____/____

Conceito: _____

Banca examinadora:

Prof. Galdino Viana Mota - Orientador
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará

Prof. Francisco de Souza Oliveira - Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof. José de Paulo Rocha da Costa - Membro
Doutor em Meteorologia Agrícola
Universidade Federal do Pará

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que iluminou o meu caminho durante esta jornada acadêmica, e me concedeu a força necessária para superar dificuldades.

Aos meus pais, Walmir e Rosa, por sempre me incentivarem aos estudos.

Ao Prof. Galdino Mota, pela orientação, pelos dados cedidos e incentivos que tornaram possível a elaboração desta monografia.

Ao Prof. José de Paulo, pelos dados cedidos para a realização deste trabalho de conclusão de curso.

Ao Programa Integrado de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão (PROINT) edição 2014-2015 pela oportunidade de bolsa de iniciação científica.

E a todos os professores da Faculdade de Meteorologia que contribuíram direta ou indiretamente na minha formação acadêmica.

RESUMO

Este estudo utiliza dados de satélites no canal infravermelho, que são imagens de satélite contendo informações de temperatura de brilho do topo de nuvens no canal infravermelho, do período de 2000 a 2015 com a finalidade de investigar o ciclo diário da temperatura de brilho do topo de nuvens, concomitantes com os dados de superfície da estação meteorológica automática instalada no Centro de Estudos Costeiros Modesto Rodrigues (UFPA, latitude de $0^{\circ}39'55''S$ e longitude de $47^{\circ}17'05''W$), na Vila de Cuiarana do município de Salinópolis, região nordeste do Estado do Pará. A metodologia empregada consistiu em: i) analisar os dados de satélites através de perfis verticais do ciclo diário anual e sazonal do número total de pixels de temperatura de brilho do topo de nuvens em toda a troposfera e em 11 camadas ($-85^{\circ}C < T_b < 18^{\circ}C$) a cada $10^{\circ}C$, exceto a camada 1 que tem $3^{\circ}C$ de intervalo ($15^{\circ}C < T_b < 18^{\circ}C$), a partir de $15^{\circ}C$, sobre a mesorregião do nordeste paraense e em 100 grades de $0,0015^{\circ} \times 0,0015^{\circ}$ de latitude e longitude para o período de 2000 a 2015; e ii) analisar o ciclo diário anual e sazonal de diversas variáveis meteorológicas, com enfoque na precipitação, obtidas pela estação meteorológica instalada em Cuiarana para o período de 2012 a 2015. Os resultados mostraram que no ciclo diário da temperatura de brilho do topo de nuvens, a camada 2 apresenta uma configuração similar à observada no ciclo diário anual da precipitação em Cuiarana, no qual foram encontrados máximos durante o período noturno e início do período matutino, além de mínimos no período vespertino. As camadas situadas entre a baixa e a alta troposfera (3 a 6; $-35^{\circ}C < T_b < 5^{\circ}C$) têm elevados números de pixels de T_b do topo de nuvens, indicando que as nuvens são mais numerosas e profundas. As camadas superiores (7, 8 e 9), com temperaturas mais baixas ($-65^{\circ}C < T_b < -35^{\circ}C$) estão associadas a existência de nuvens de grande desenvolvimento vertical (cumulonimbus). No ciclo diário anual da precipitação, foram observados máximos durante o período noturno, principalmente, com valores de 0,3 mm/30min durante às 02:00, 03:30 e 23:00 hora local (HL), o que coincide com os valores máximos observados no ciclo diário anual do número total de pixels de temperatura de brilho do topo de nuvens. Portanto, conclui-se que a precipitação noturna é mais intensa.

Palavras-chave: Temperatura de brilho do topo de nuvens. Precipitação. Cuiarana.

ABSTRACT

This study used satellite data in the infrared channel, which satellite images containing cloud top brightness temperature information in the infrared channel, the period from 2000 to 2015 in order to investigate the daily cycle of the top brightness temperature clouds, concomitant with the surface data of automatic weather station installed on Coastal Studies Center Modesto Rodrigues (UFPA, latitude $0^{\circ}39'55''\text{S}$ and longitude $47^{\circ}17'05''\text{W}$) in Cuiarana of Village, country of Salinópolis, northeastern Pará. The methodology consisted of: i) analyze the satellite data through vertical profiles of annual and seasonal daily cycle of the total number of pixels of cloud top brightness temperature throughout the 11 and troposphere layers ($-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) to 10°C , except that the layer 1 has the range of 3°C ($15^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$), from 15°C on the middle region of northeastern Pará and 100 bars of $0,0015^{\circ} \times 0,0015^{\circ}$ from latitude and longitude for the period 2000 to 2015; and ii) examine the annual and seasonal daily cycle of various meteorological variables, focusing on precipitation, obtained by the weather station installed in Cuiarana for the period 2012 to 2015. The results showed that the daily cycle of the top cloud brightness temperature, layer 2 has a configuration similar to that observed in the annual cycle of daily rainfall in Cuiarana, which were found maximum during the night and early morning period, and minimum in the evening. The layers situated between the low and high altitude troposphere (3 to 6; $-35^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 5^{\circ}\text{C}$) have high numbers of pixels in the top Tb clouds, indicating that the clouds are more numerous and deep. The upper layers (7, 8 and 9), with lower temperatures ($-65^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -35^{\circ}\text{C}$) are associated with the existence of large vertical development clouds (cumulonimbus). In the annual cycle of daily precipitation were observed maximum during the night, especially with 0,3 mm/30min values in at 02:00, 03:30 and 23:00 local time (HL), which coincides with the maxima observed in the annual daily cycle the total number of pixels of brightness temperature of the cloud top. Therefore, it is concluded that the night precipitation is more intense.

Key words: Brightness temperature of the top of clouds. Rainfall. Cuiarana.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Topografia do setor nordeste paraense	19
Figura 02 - Região de estudo com 100 grades plotadas e o número total de pixels de temperatura de brilho do topo de nuvens no canal infravermelho em toda a troposfera	20
Figura 03 - Cobertura espacial proporcionada pelos satélites GOES-15 (direita) e GOES-13 (esquerda)	27
Figura 04 - Localização do ponto fixo em relação à Terra dos satélites GOES West (esquerda) e GOES East (direita), e cobertura espacial dos radiômetros	28
Figura 05 - Médias da precipitação estimada pelo TRMM-PR (escala vertical) e da precipitação medida por estações do INMET (valores em preto) e da ANA (valores em vermelho)	30
Figura 06 - Ciclo diário anual (linha cinza) e sazonal (linha verde) da precipitação (painéis da esquerda), da temperatura do ar (painéis do centro) e da umidade relativa do ar (painéis da direita)	32
Figura 07 - Ciclo diário anual (linha cinza) e sazonal (linha verde) da velocidade média do vento (painéis da esquerda), da componente zonal (painéis do centro) e da componente meridional (painéis da direita)	34
Figura 08 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente ao período de 2000 a 2015.....	37
Figura 09 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente aos totais sazonais de DJF do período de 2000 a 2015	40
Figura 10 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente aos totais sazonais de MAM do período de 2000 a 2015	41
Figura 11 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente aos totais sazonais de JJA do período de 2000 a 2015	42
Figura 12 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente aos totais sazonais de SON do período de 2000 a 2015	43
Figura 13 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente ao período de 2012 a 2015.....	45
Figura 14 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente aos totais sazonais de DJF do período de 2012 a 2015	48

Figura 15 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente aos totais sazonais de MAM do período de 2012 a 2015	49
Figura 16 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente aos totais sazonais de JJA do período de 2012 a 2015	50
Figura 17 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente aos totais sazonais de SON do período de 2012 a 2015	51
Figura 18 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens na camada 1	52
Figura 19 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens na camada 2	53
Figura 20 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens entre as camadas 4 e 8	54
Figura 21 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera referente aos totais sazonais de DJF do período de 2000 a 2015.....	55
Figura 22 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera referente aos totais sazonais de MAM do período de 2000 a 2015	56
Figura 23 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera referente aos totais sazonais de JJA do período de 2000 a 2015	57
Figura 24 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera referente aos totais sazonais de SON do período de 2000 a 2015	58
Figura 25 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera e a sua porcentagem distribuída em 11 camadas no período de 2000 a 2015	60
Figura 26 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera e a sua porcentagem distribuída em 11 camadas referente aos totais sazonais de DJF do período de 2000 a 2015.....	62
Figura 27 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera e a sua porcentagem distribuída em 11 camadas referente aos totais sazonais de MAM do período de 2000 a 2015.....	63
Figura 28 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera e a sua porcentagem distribuída em 11 camadas referente aos totais sazonais de JJA do período de 2000 a 2015.....	64
Figura 29 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera e a sua porcentagem distribuída em 11 camadas referente aos totais sazonais de SON do período de 2000 a 2015.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	- Agência Nacional de Águas
CERES	- Cloud and the Earth's Radiant Energy System
DJF	- Dezembro, Janeiro e Fevereiro
GOES	- Geostationary Operational Environmental Satellite
HL	- Hora Local
IDL	- Interactive Data Language
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia
IR	- Infravermelho
JAXA	- Japan Aerospace Exploration
JJA	- Junho, Julho e Agosto
lat.	- Latitude
LI	- Linhas de Instabilidade
LIS	- Lightning Imaging Sensor
long.	- Longitude
m	- Metro
MAM	- Março, Abril e Maio
mm	- Milímetro
NASA	- National Aeronautics and Space Administration
NESDIS	- National Environmental Satellite Data and Information Service
NOAA	- National Oceanic and Atmospheric Administration
OMM	- Organização Meteorológica Mundial
PR	- Precipitation Radar
s	- Segundo
SCM	- Sistema Convectivo de Mesoescala
SON	- Setembro, Outubro e Novembro
TMI	- TRMM Microwave Imager
TRMM	- Tropical Rainfall Measuring Mission
UFPA	- Universidade Federal do Pará
VIS	- Visible and Infrared Scanner
ZCIT	- Zona de Convergência Intertropical
°C	- Grau Celsius
%	- Porcentagem

LISTA DE SÍMBOLOS

- PRP - precipitação, mm
- Tb - temperatura de brilho do topo de nuvens, °C
- Temp. - temperatura do ar, °C
- u - componente zonal do vento, m/s
- UR - umidade relativa do ar, %
- v - componente meridional do vento, m/s
- v_H - velocidade do vento, m/s
- VVel - velocidade média do vento, m/s
- φ_{MET} - direção do vento, °

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	REVISÃO DA LITERATURA	15
3.1	AS ESCALAS DE MOVIMENTO ATMOSFÉRICO	15
3.2	IMPORTÂNCIA DA PRECIPITAÇÃO E RELAÇÃO COM OS DADOS DE SATÉLITES.....	15
3.3	SISTEMAS METEOROLÓGICOS ATUANTES NO NORDESTE PARAENSE	16
3.4	CICLO DIÁRIO DA PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO TROPICAL.....	17
4	MATERIAIS E MÉTODOS	18
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	18
4.2	FONTE DOS DADOS.....	20
4.2.1	Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)	20
4.2.2	Agência Nacional de Águas (ANA)	21
4.2.3	Centro de Estudos Costeiros Modesto Rodrigues (UFPA)	22
4.2.4	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)</i>	22
4.2.5	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES)</i>	22
4.3	METODOLOGIA.....	22
4.3.1	Precipitação	22
4.3.2	Variáveis Meteorológicas	23
4.3.3	Temperatura de Brilho do Topo de Nuvens (Tb)	23
4.4	TROPICAL RAINFALL MEASURING MISSION.....	24
4.4.1	Principais Instrumentos Abordo do Satélite TRMM	24
4.4.1.1	<i>Precipitation Radar (PR)</i>	25
4.4.1.2	<i>TRMM Microwave Imager (TMI)</i>	25
4.4.1.3	<i>Visible and Infrared Scanner (VIS)</i>	25
4.4.1.4	<i>Lightning Imaging Sensor (LIS)</i>	25
4.4.1.5	<i>Cloud and the Earth's Radiant Energy System (CERES)</i>	26
4.5	GEOSTATIONARY OPERATIONAL ENVIRONMENTAL SATELLITE.....	26
4.5.1	<i>Satélites GOES-15 e GOES-13</i>	26

4.5.1.1 Principais Instrumentos Abordo dos Satélites GOES.....	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
5.1 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO E DO CICLO DIÁRIO DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS EM CUIARANA.....	29
5.2 CICLO DIÁRIO DO NÚMERO DE PIXELS DA TEMPERATURA DE BRILHO DO TOPO DE NUVENS NO CANAL INFRAVERMELHO	35
6 CONCLUSÕES	66
REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

Existem diversos estudos que investigam o ciclo diário de precipitação e de temperatura de brilho do topo de nuvens nos trópicos, por exemplo, fato devido o ciclo diário ser uma característica importante no clima destas regiões. Todavia, este tipo de estudo não é comum no Brasil, principalmente, na região Norte do Brasil, que não dispõe de uma rede pluviométrica com longas séries de dados temporais que permitam descrever o ciclo diário da precipitação e da temperatura de brilho do topo de nuvens.

Neste contexto, o processamento dos dados digitais das imagens de satélites, como a temperatura de brilho do topo de nuvens (CONTI, 2002), possibilita analisar no espaço e no tempo as áreas de atividade convectiva (ANABOR, 2004), o que permite inferir a distribuição de nebulosidade e precipitação nessas áreas (BARBOSA; CAVALCANTI, 2000), além de servirem como uma forma alternativa para suprir as faltas na rede de dados pluviométricos da região amazônica (SILVA; FREITAS; GIELOW, 2011).

Por isso, este estudo tem por objetivo investigar através de informações de temperatura de brilho do topo de nuvens (T_b) no canal infravermelho (IR), o ciclo diário da temperatura de brilho do topo de nuvens na região nordeste do Estado do Pará, e as relações com a precipitação ocorrida no período de 2012 a 2015 na estação meteorológica automática instalada no Centro de Estudos Costeiros Modesto Rodrigues (UFPA, latitude de $0^{\circ}39'55''S$ e longitude de $47^{\circ}17'05''W$), na Vila de Cuiarana do município de Salinópolis, região nordeste do Estado do Pará.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo foi investigar o ciclo diário da temperatura de brilho do topo de nuvens, que é uma característica fundamental do clima na região tropical, para fornecer contribuições importantes para o entendimento acerca da variabilidade diária de precipitação na região nordeste paraense, sobretudo, na Vila de Cuiarana do município de Salinópolis-PA.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste estudo foram: (1) compreender a distribuição espacial e temporal dos sistemas de tempo atuantes na região de estudo; (2) entender a relação entre o ciclo diário da temperatura de brilho do topo de nuvens com a precipitação ocorrida no período de 2012 a 2015 na estação localizada na Vila de Cuiarana do município de Salinópolis-PA; e (3) através dos resultados gerados neste estudo, contribuir para o aperfeiçoamento de modelos climáticos regionais, que são ferramentas importantes para a previsão do tempo. Desta forma, este estudo terá uma consequência positiva para a sociedade.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 AS ESCALAS DE MOVIMENTO ATMOSFÉRICO

A escala de um fenômeno atmosférico refere-se às suas dimensões espaciais e temporais típicas. A escala temporal representa o tempo que o ar leva para percorrer toda a estrutura do fenômeno e a escala espacial se refere à área de influência do fenômeno atmosférico. Os fenômenos com grande (pequena) escala espacial estão associados à grande (pequena) escala de tempo. A escala de Orlandi (1975), que é uma das escalas de classificação dos fenômenos meteorológicos mais utilizadas na meteorologia, classifica os fenômenos atmosféricos em microescala (com dimensões horizontais típicas até 2 km de extensão), em mesoescala (com dimensões horizontais típicas de 2 a 2000 km de extensão), e em macroescala (com dimensões horizontais típicas maiores que 2000 km).

3.2 IMPORTÂNCIA DA PRECIPITAÇÃO E RELAÇÃO COM OS DADOS DE SATÉLITES

A precipitação é amplamente reconhecida como a variável climatológica mais importante na região tropical, sendo essencial para o planejamento das atividades humanas e desenvolvimento local (AMANAJÁS; BRAGA, 2012), e também é considerada uma das variáveis meteorológicas mais difíceis de serem medidas, principalmente, devido a carência de uma boa cobertura de pluviômetros em regiões de difícil acesso. Tendo em vista as dificuldades de acesso a dados pluviométricos, as imagens de satélite têm se constituído como uma excelente ferramenta para obtenção destes dados (COLLISCHONN *et al.*, 2007). Deste modo, os satélites meteorológicos vêm, alternativamente, contribuindo para o aprimoramento do conhecimento acerca da variabilidade diária da precipitação.

De acordo com Silva Neto (2014), um satélite meteorológico permite a extração de valiosas informações da atmosfera, de uma vasta área em curtos intervalos de tempo, o que possibilita uma alta amostragem temporal e grande cobertura espacial. Isso permite o acompanhamento da passagem de sistemas atmosféricos e nebulosidades, principalmente, através do canal infravermelho (ANABOR, 2004). Nesse contexto, os dados de temperatura de brilho do topo de nuvens provenientes do canal infravermelho são ótimas ferramentas para monitorar sistemas precipitantes, inferir a presença de precipitação em regiões convectivas, e relacionar com a intensidade da precipitação. Todavia, a relação entre a temperatura do topo de

nuvens e as taxas de precipitação varia com o tipo de precipitação (convectiva ou estratiforme), a estação do ano, o local e as condições atmosféricas (AVILA, 2006).

3.3 SISTEMAS METEOROLÓGICOS ATUANTES NO NORDESTE PARAENSE

O regime pluviométrico no interior da Bacia Amazônica não é homogêneo e apresenta uma grande variabilidade espacial e temporal, associada à influência de diferentes sistemas de mesoescala, escala sinótica e macro escala (MOLION, 1987; ROCHA, 2001).

Segundo Marengo e Hastenrath (1993), o sistema meteorológico responsável pela modulação da variabilidade pluviométrica na Amazônia é a Zona de convergência Intertropical (ZCIT), que corresponde à região de confluência dos ventos alísios de sudeste provenientes do Hemisfério Sul com os de nordeste provenientes do Hemisfério Norte e é caracterizada por intensa atividade convectiva. De acordo com Reboita *et al.* (2010), a ZCIT pode atuar de duas formas indiretas no norte do Brasil: através de aglomerados convectivos que se formam ao longo dela e que ao se propagarem para oeste atingem a bacia Amazônica, e através da interação com Linhas de Instabilidade (LI), que de acordo com Cohen *et al.*¹ (1989 apud REBOITA *et al.*, 2010), contribuem com 45% da precipitação durante o período chuvoso no leste do Pará. Estas linhas se formam devido a interação entre os alísios com a circulação da brisa marítima, sendo que algumas destas linhas propagam-se para o interior do continente e se regeneram durante a propagação para oeste, enquanto que outras dissipam-se próximo à costa atlântica (COHEN, 1995).

Da mesma forma, o Estado do Pará é caracterizado por uma alta variabilidade pluviométrica decorrente da atuação de diferentes sistemas atmosféricos (MENEZES; FERNANDES; ROCHA, 2015). A mesorregião do nordeste paraense apresenta valores de precipitação anual maiores que 2000 mm/ano, sendo o mês de março o mais chuvoso, com valores acumulados de precipitação acima de 400 mm, e os meses de setembro e outubro os menos chuvosos para a região (ALBUQUERQUE *et al.*, 2010; LOPES; SOUZA; FERREIRA, 2013). Outros estudos (MORAES *et al.*, 2005; TEIXEIRA, 2010) apontam que a faixa litorânea paraense apresenta totais pluviométricos que podem chegar até 2400 mm/ano, sendo, portanto, uma das regiões mais precipitantes da Amazônia brasileira. Mota (2003), observou que os

¹ COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS, M. A. F.; NOBRE, C. A. Aspectos climatológicos das linhas de instabilidade na Amazônia. *Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática*, v. 4, p. 34-40, 1989.

Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) são um dos principais moduladores da distribuição espacial e temporal da precipitação nesta região. Segundo Houze Junior (2004), os SCMs são tempestades convectivas que se formam quando nuvens convectivas se organizam em um único sistema com vastas estruturas cirriforme que cobrem grandes áreas de precipitação contínua.

3.4 CICLO DIÁRIO DA PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO TROPICAL

O ciclo diário da precipitação é uma importante característica dos climas tropicais. Na sua classificação, há dois modelos de variações de precipitação na região tropical. O ciclo diário do tipo “oceânico” e o ciclo diário do tipo "continental". Segundo Yang e Smith (2006), o ciclo diário oceânico é caracterizado por uma precipitação máxima que ocorre no final da noite e início da manhã, e o ciclo diário continental tem como aspecto um pico máximo no final da tarde. Todavia, as características regionais, tal como topografia e circulação do tipo brisa marítima e terrestre modulam a variabilidade diária da precipitação (KOUSKY, 1980).

Devido a importância deste conhecimento, existem estudos sobre o ciclo diário da precipitação e nebulosidade para todas as regiões dos trópicos (JANOWIAK; ARKIN; MORRISSEY, 1994; YANG; SLINGO, 2001; YANG; KUO; SMITH, 2008), para sub-regiões dos trópicos (MOTA, 2003), e para algumas cidades dentro da região tropical (FERREIRA; SOUZA; MORAES, 2013).

Yang e Smith (2006), que estudaram a variabilidade diária da precipitação tropical através de dados do Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), concluíram que os principais mecanismos moduladores do ciclo diário de precipitação, tanto do tipo continental quanto do tipo marítimo, são válidos somente para a grande escala, contudo, na escala local e microescala, é comum a ocorrência de outros fatores que contribuam para o mesmo resultado. Isto foi corroborado por Silva (2013), que estudou o ciclo diário e semidiário da precipitação na costa norte do Brasil, e identificou que o nordeste paraense apresenta amplitudes acima de 1 mm/h, tratando-se, portanto, de uma região em que os mecanismos de brisa e convecção local atuam sinergeticamente conforme proposto por Yang e Smith (2006).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

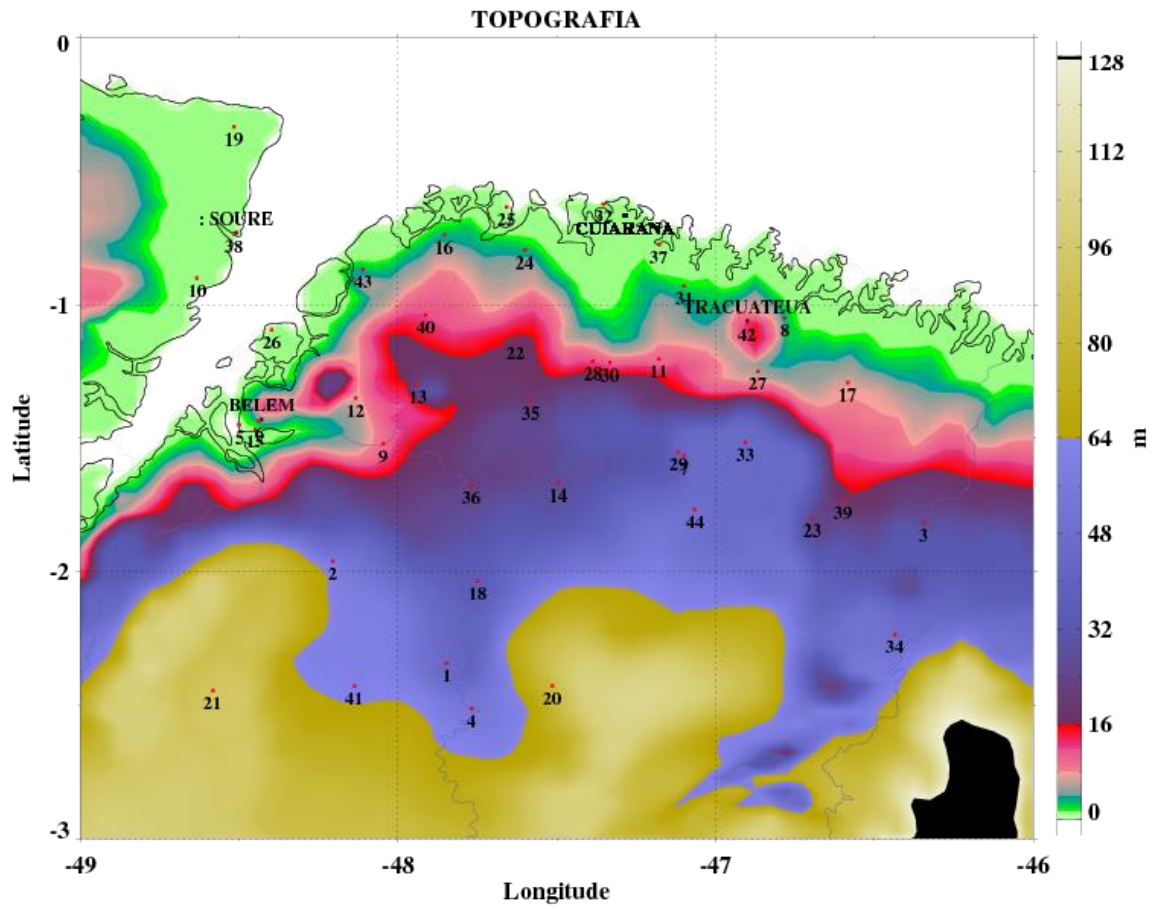
A região de estudo compreende um quadrante localizado no Estado do Pará (latitudes de 0,27°S a 0,57°S e longitudes de 47,5°W a 47,0°W), no qual foram plotadas 100 grades com a finalidade de detalhar as informações geradas por satélites. O Centro de Estudos Costeiros Modesto Rodrigues (UFPA, latitude de 0°39'55''S e longitude de 47°17'05''W, e 11 metros de altitude), localizado na Vila de Cuiarana do município de Salinópolis, é o local onde foi dado um enfoque especial ao estudo.

A Vila de Cuiarana é uma área rural com baixa densidade populacional, distante 500 metros de rios e a aproximadamente 4 km do Oceano Atlântico. O município de Salinópolis tem precipitação acumulada anual estimada na faixa de 2850 a 3250 mm de acordo com a normal climatológica do Brasil de 1961-1990 (INMET), e faz parte da mesorregião do nordeste paraense. A mesorregião do nordeste paraense é formada por 49 municípios distribuídos em cinco microrregiões e tem uma área total de 83.074,047 km² (FALESI *et al.*, 2010).

A Figura 01 apresenta a topografia da mesorregião do nordeste paraense, da região metropolitana de Belém e de parte da mesorregião do Marajó, onde são destacados vários pontos correspondentes à localização das estações meteorológicas utilizadas neste estudo. Observa-se que a altitude decresce do continente em direção ao litoral.

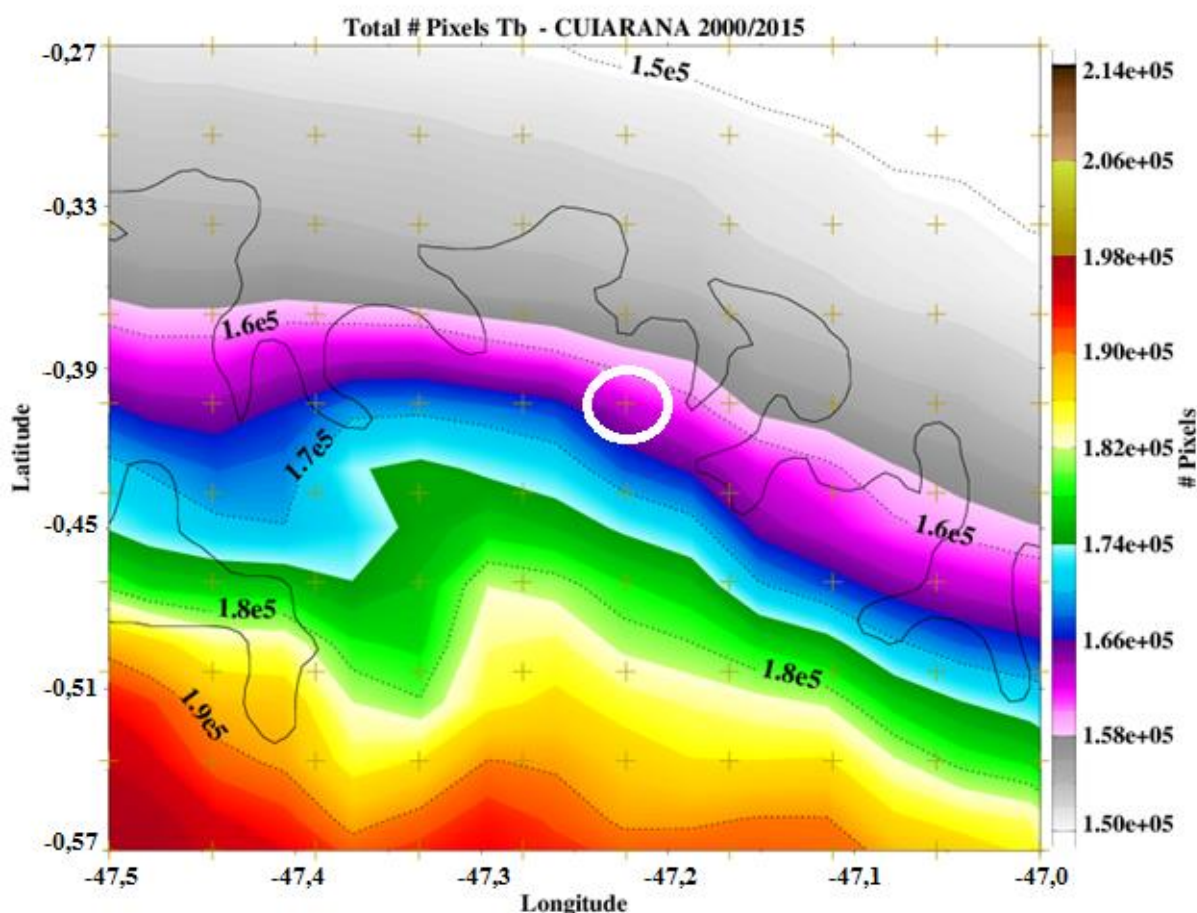
A Figura 02 apresenta as 100 grades plotadas dentro da região de estudo, sendo que a grade central é a mais próxima de Cuiarana (latitude de 0°39'55''S e longitude de 47°17'05''W), e está destacada por um círculo branco. Cada grade corresponde a uma área de 0,0015° x 0,0015° de latitude e longitude.

Figura 01 - Topografia do setor nordeste paraense.



Fonte: Do autor.

Figura 02 - Região de estudo com 100 grades plotadas e o número total de pixels de temperatura de brilho do topo de nuvens no canal infravermelho em toda a troposfera.



Fonte: Do autor.

4.2 FONTE DOS DADOS

4.2.1 Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

Foram utilizados dados pluviométricos das seguintes estações meteorológicas convencionais: Belém (lat. 1,43°S; long. 48,43°W), Soure (lat. 0,73°S; long. 48,52°W) e Tracuateua (lat. 1,07°S; long. 46,9°W), referente ao período de 1998 a 2012. Também foi utilizada a normal climatológica de precipitação no Brasil do INMET (1961-1990). A normal climatológica abrange 414 estações meteorológicas de superfície em operação durante o período entre 01 de janeiro de 1961 a 31 de dezembro de 1990.

4.2.2 Agência Nacional de Águas (ANA)

Foram utilizados dados de precipitação das seguintes estações pluviométricas: 1) Acampamento Mendes Junior (lat. 2°20'36''S; long. 47°50'49''W); 2) Acará (lat. 1°57'40''S; long. 48°12'23''W); 3) Alto Bonito (lat. 1°49'03''S; long. 46°20'38''W); 4) Badajós (lat. 2°30'46''S; long. 47°46'05''W); 5) Belém - Embrapa/Ipagro (lat. 1°27'S; long. 48°30'W); 6) Belém - INMET (lat. 1°26'06''S; long. 48°26'16''W); 7) Bom Jardim (lat. 1°34'S; long. 47°06'W); 8) Bragança (lat. 1°03'S; long. 46°47'W); 9) Bujaru (lat. 1°31'16''S; long. 48°02'46''W); 10) Câmara (lat. 0°54'S; long. 48°38'W); 11) Capanema (lat. 1°12'13''S; long. 47°10'41''W); 12) Caraparu (lat. 1°21'S; long. 48°08'W); 13) Castanhal (lat. 1°17'51''S; long. 47°56'22''W); 14) Colônia Santo Antônio (lat. 1°40'02''S; long. 47°29'47''W); 15) CPATU (lat. 1°28'S; long. 48°27'W); 16) Curuçá (lat. 0°44'15''S; long. 47°51'13''W); 17) Emborai (lat. 1°17'30''S; long. 46°35'01''W); 18) Fazenda Juará (lat. 2°02'08''S; long. 47°45'02''W); 19) Fazenda Livramento (lat. 0°20'S; 48°31'W); 20) Fazenda São Raimundo (lat. 2°25'42''S; long. 47°30'51''W); 21) Fazenda Urucure (lat. 2°26'44''S; long. 48°34'57''W); 22) Igarapé-Açu (lat. 1°07'57''S; long. 47°37'42''W); 23) Japiim (lat. 1°47'56''S; long. 46°41'48''W); 24) Magalhães Barata (lat. 0°47'40''S; long. 47°35'59''W); 25) Maruda (lat. 0°38'01''S; 47°39'30''W); 26) Mosqueiro (lat. 1°05'39''S; long. 48°23'55''W); 27) Nova Mocajuba (lat. 1°15'S; long. 46°52'W); 28) Nova Timboteua (lat. 1°12'40''S; 47°23'11''W); 29) Ourem (lat. 1°33'06''S; long. 47°07'02''W); 30) Peixe Boi (lat. 1°13'S; long. 47°20'W); 31) Primavera (lat. 0°55'46''S; long. 47°05'58''W); 32) Salinópolis (lat. 0°37'23''S; long. 47°21'13''W); 33) Santa Luzia do Pará (lat. 1°30'58''S; long. 46°54'22''W); 34) Santa Maria do Gurupi - Cigana (lat. 2°14'07''S; long. 46°26'08''W); 35) Santa Maria do Pará (lat. 1°21'35''S; long. 47°34'57''W); 36) São Domingos do Capim (lat. 1°40'39''S; long. 47°46'12''W); 37) São João de Pirabas (lat. 0°46'29''S; long. 47°10'39''W); 38) Soure - Ilha de Marajó (lat. 0°44'S; long. 48°31'W); 39) Tararua - Ponte (lat. 1°43'59''S; long. 46°35'56''W); 40) Terra Alta (lat. 1°02'19''S; long. 47°54'48''W); 41) Tome-Açu (lat. 2°25'42''S; long. 48°08'14''W); 42) Tracuateua (lat. 1°04'S; long. 46°54'W); 43) Vigia (lat. 0°52'05''S; 48°06'37''W); 44) Vila Santa Luzia (lat. 1°46'S; 47°04'W), referente ao período de 1998 a 2012.

4.2.3 Centro de Estudos Costeiros Modesto Rodrigues (UFPA)

Foram utilizados dados meteorológicos provenientes da estação meteorológica automática instalada no Centro de Estudos Costeiros Modesto Rodrigues. As variáveis meteorológicas escolhidas foram: a precipitação acumulada, a temperatura e a umidade relativa do ar, e a direção e velocidade do vento, disponíveis em intervalos de 30 minutos para o período de 2012 a 2015.

4.2.4 *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM)

Foram utilizados dados de precipitação estimada pelo *Precipitation Radar* (PR) a bordo do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) referente ao período de 1998 a 2012 sobre o setor nordeste paraense.

4.2.5 *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES)

Os dados de satélites utilizados, que são imagens de satélite contendo informações de temperatura de brilho do topo de nuvens (Tb) no canal infravermelho, são provenientes do programa *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), têm resolução espacial (pixels) de 4 km por 4 km e temporal de 30 minutos, disponíveis desde janeiro de 2000. Os pixels são elementos de resolução do terreno, aos quais encontram-se associados os valores de energia emitida pelos alvos neles contidos. O valor atribuído a um pixel corresponde à soma dos valores de energia emitida pelos elementos que o compõem (COSTA, 1996). Portanto, o número de pixels é diretamente proporcional à energia emitida por nuvens e superfície terrestre.

4.3 METODOLOGIA

4.3.1 Precipitação

Os dados pluviométricos obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Agência Nacional de Águas (ANA) serviram para a criação de médias referente ao período de 1998 a 2012. O preenchimento de falhas não foi realizado, pois só foram contabilizados os dados correspondentes a dias com ocorrência de precipitação.

Os dados de precipitação estimada pelo *Precipitation Radar* (PR) a bordo do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM, KUMMEROW *et al.*, 1998; NESBITT; ZIPSER; CECIL, 2000) foram utilizados para o cálculo de uma média referente ao período de 1998 a 2012.

A partir das médias calculadas, foi realizada uma comparação entre a média de precipitação estimada pelo PR, os valores anuais da precipitação medida nas estações pluviométricas do INMET e da ANA, e a média anual de precipitação da estação meteorológica em Cuiarana.

4.3.2 Variáveis Meteorológicas

A partir das variáveis meteorológicas obtidas pela estação meteorológica instalada em Cuiarana, foi analisado o ciclo diário anual e sazonal da precipitação acumulada, da temperatura do ar e da umidade relativa do ar para o período de 2012 a 2015; e por meio dos dados de velocidade e direção do vento, foi calculado o ciclo diário anual e sazonal da velocidade média do vento (VVel) e das componentes zonal e meridional do vento, respectivamente, “u” e “v”, para o período supracitado. A componente zonal, a componente meridional e a velocidade média do vento, respectivamente, foram calculadas através das seguintes expressões:

$$u = -|v_H| \times \text{seno} \left[\frac{\pi}{180} \times \varphi_{MET} \right] \quad (1)$$

$$v = -|v_H| \times \text{cosseno} \left[\frac{\pi}{180} \times \varphi_{MET} \right] \quad (2)$$

$$VVel = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3)$$

Onde, “ v_H ” é a velocidade do vento e “ φ_{MET} ” é a direção do vento.

4.3.3 Temperatura de Brilho do Topo de Nuvens (Tb)

Os dados de satélites foram analisados através do perfil vertical do ciclo diário anual e sazonal do número total de pixels em toda a troposfera e em 11 camadas ($-85^\circ\text{C} < \text{Tb} < 18^\circ\text{C}$) a cada 10°C , exceto a camada 1 que tem 3°C de intervalo ($15^\circ\text{C} < \text{Tb} < 18^\circ\text{C}$), a partir de 15°C ,

sobre a mesorregião do nordeste paraense e em 100 grades de $0,0015^\circ \times 0,0015^\circ$ de latitude e longitude, para os seguintes períodos: i) 2000 a 2015 e ii) 2012 a 2015. As grades foram realçadas em cores diferentes para facilitar a identificação, onde: a grade central é destacada em preto; as grades plotadas em cores quentes correspondem às regiões oceânicas; e as grades plotadas em cores frias são correspondentes às regiões continentais. Após isso, foi empregada uma metodologia que consistiu em identificar os tipos de nebulosidades através de suas temperaturas de brilho do topo de nuvens (JANOWIAK; JOYCE; YAROSH, 2001; YANG; SMITH, 2006).

Complementarmente, para o aprofundamento das informações de satélites, foram analisados: i) o número total de pixels de Tb do topo de nuvens em diferentes camadas da troposfera e seus respectivos totais sazonais para o período de 2000 a 2015; e ii) o número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera e a sua porcentagem distribuída em 11 camadas e seus respectivos totais sazonais para o período de 2000 a 2015.

4.4 TROPICAL RAINFALL MEASURING MISSION

O *Tropical Rainfall Measuring* (TRMM) é um satélite de órbita senoidal criado através de uma missão conjunta entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), agência norte americana de exploração aeroespacial, e a *Japan Aerospace Exploration* (JAXA), agência japonesa de exploração aeroespacial, com o objetivo de compreender a precipitação tropical. O TRMM foi lançado em novembro de 1997, com uma altura orbital de 350 km e um ângulo de precessão de 35° , ou seja, cobria as latitudes entre 35°N a 35°S . Em 2001, para economizar combustível e aumentar o tempo de vida do satélite, a sua altura orbital foi elevada para 400 km e o ângulo de precessão passou a ser 40° , compreendendo as latitudes entre 40°N a 40°S . O TRMM produziu mais de 17 anos de dados científicos, e, oficialmente, chegou ao fim em 15 de abril de 2015 (RE-ENTRY, 2016).

4.4.1 Principais Instrumentos Abordo do Satélite TRMM

O satélite TRMM possuía cinco instrumentos abordo: o *Precipitation Radar* (PR), o *TRMM Microwave Imager* (TMI), o *Visible and Infrared Scanner* (VIS), o *Lightning Imaging Sensor* (LIS) e o *Cloud and the Earth's Radiant Energy System* (CERES), que operou somente durante o período de janeiro a agosto de 1998 e março de 2000.

4.4.1.1 *Precipitation Radar (PR)*

O *Precipitation Radar (PR)* é um radar meteorológico abordo no satélite TRMM. O PR tem uma resolução horizontal de aproximadamente 3,1 milhas (cinco quilômetros) e uma largura de faixa de 154 milhas (247 quilômetros). O seu objetivo é fornecer perfis verticais de chuva e de neve da superfície até a uma altura de cerca de 12 milhas (20 quilômetros), obter medições quantitativas de precipitações e melhorar a precisão na estimativa de precipitação através do uso combinado do PR e dos sensores TMI e VIS (NASA, 2015).

4.4.1.2 *TRMM Microwave Imager (TMI)*

O *TRMM Microwave Imager (TMI)* é um radiômetro de micro-ondas em nove canais passivos, projetado para fornecer informações quantitativas de precipitação sobre uma ampla faixa sob o satélite TRMM. O TMI é capaz de quantificar o conteúdo de vapor d'água e gelo em nuvens, a intensidade da precipitação e os tipos de precipitação (estratiforme ou convectiva) (NASA, 2015).

4.4.1.3 *Visible and Infrared Scanner (VIS)*

O *Visible and Infrared Scanner (VIS)* é um espectroradiômetro que detecta a radiação emitida pela Terra em cinco bandas espectrais, que variam entre os comprimentos de onda nos canais visível e infravermelho (0,63 a 12 micrômetros). A intensidade da radiação nas várias bandas espectrais pode ser usada para determinar o brilho (visível e infravermelho próximo) ou a temperatura (infravermelho) da fonte (superfície terrestre ou topos de nuvens) (NASA, 2015).

4.4.1.4 *Lightning Imaging Sensor (LIS)*

O *Lightning Imaging Sensor (LIS)* é um instrumento que detecta relâmpagos sobre a região tropical do globo. O LIS é constituído por um sistema de elementos ópticos e eletrônicos, incluindo um gerador de imagens ópticas capaz de localizar os raios através dos brilhos momentâneos causados por descargas elétricas dentro de nuvens. O LIS detecta todos os tipos de raios (intra-nuvem, nuvem-nuvem, nuvem-ar, nuvem-solo), pois os pulsos ópticos produzidos pelas descargas elétricas são visíveis do espaço (NASA, 2015).

4.4.1.5 *Cloud and the Earth's Radiant Energy System (CERES)*

O CERES mede a energia radiativa emitida e refletida pela superfície terrestre, pela atmosfera e pelos seus constituintes. Os dados do CERES podem ser utilizados para estudar as trocas de energia entre o sol, a atmosfera, a superfície terrestre, as nuvens e no espaço (NASA, 2015).

4.5 *GEOSTATIONARY OPERATIONAL ENVIRONMENTAL SATELLITE*

O *Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES)* é a nomenclatura de um conjunto de satélites operados pelo *National Environmental Satellite Data and Information Service (NESDIS)*, que é um departamento da *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, a agência de meteorologia e oceanografia dos Estados Unidos da América. O programa GOES surgiu da necessidade de se manter um monitoramento contínuo de sistemas atmosféricos e introduzir uma melhoria nas observações de dados atmosféricos e oceânicos. O primeiro satélite GOES foi lançado em 1975 e, em seguida, um segundo satélite geoestacionário foi lançado em 1977. Atualmente, os Estados Unidos estão operando o GOES-15 e o GOES-13. Além disso, o GOES-12 está parcialmente operacional, abrangendo a América Central e do Sul para evitar interrupções de dados durante as operações de varreduras rápidas do GOES-13. E o GOES-14 está sendo armazenado em órbita como um substituto para qualquer caso de falha do GOES-15 ou GOES-13 (NOAA's, 2015).

O programa GOES fornece monitoramento atmosférico contínuo. Os satélites circulam a Terra em uma órbita geoestacionária, o que significa que orbitam o plano equatorial da Terra a uma velocidade correspondente a rotação da Terra. Isto permite que os satélites estejam em órbita ao longo de uma posição fixa em relação à Terra, fornecendo um acompanhamento constante sobre os sistemas atmosféricos. A altura geoestacionária é de cerca de 35.800 km (22.300 milhas) acima da Terra.

4.5.1 Satélites GOES-15 e GOES-13

O GOES-15 (ou GOES-West) está posicionado a 135° W de longitude do equador, cobrindo parte da América do Norte e o Oceano Pacífico. Enquanto que o GOES-13 (ou GOES-East) está posicionado a 75° W de longitude do equador, monitorando as Américas e a maior

parte do Oceano Atlântico (NOAA's, 2015). A Figura 03 apresenta a cobertura sobre a face da Terra proporcionada por cada satélite.

Figura 03 - Cobertura espacial proporcionada pelos satélites GOES-15 (direita) e GOES-13 (esquerda).



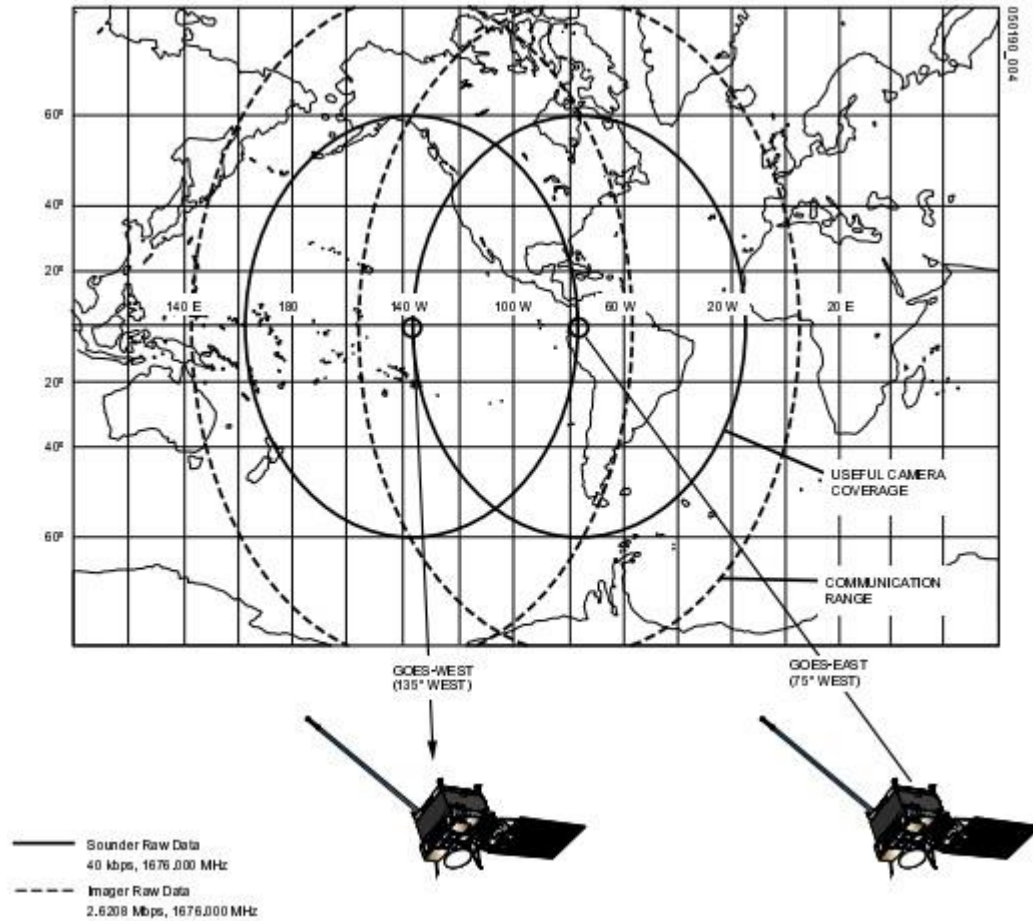
Fonte: Adaptado da NOAA (2015).

4.5.1.1 Principais Instrumentos Abordo dos Satélites GOES

Os instrumentos primários do programa GOES são o *Imager* e o *Sounder*. O *Imager* é um radiômetro que detecta a energia emitida e a energia solar refletida da superfície da Terra e da atmosfera em cinco canais de comprimento de onda. No canal infravermelho (IR), o *Imager* detecta a energia emitida por nuvens e pela superfície terrestre, fornecendo assim, a temperatura de brilho do topo de nuvens (GOES N DATA BOOK, 2015).

O *Sounder* é um radiômetro projetado para captar a energia térmica e energia solar refletida da superfície da Terra e da atmosfera em 19 canais, proporcionando dados para determinar perfis verticais de temperatura e umidade, temperatura da superfície e distribuição de ozônio (GOES N DATA BOOK, 2015). A Figura 04 apresenta a localização do ponto fixo em relação à Terra dos satélites GOES West e GOES East, bem como a cobertura espacial do *Imager* e do *Sounder*, na qual é possível observar que o *Imager* cobre uma área muito maior em relação ao *Sounder*.

Figura 04 - Localização do ponto fixo em relação à Terra dos satélites GOES West (esquerda) e GOES East (direita), e cobertura espacial dos radiômetros. A linha contínua é referente à área coberta pelo *Sounder*. A linha pontilhada é referente à área coberta pelo *Imager*.



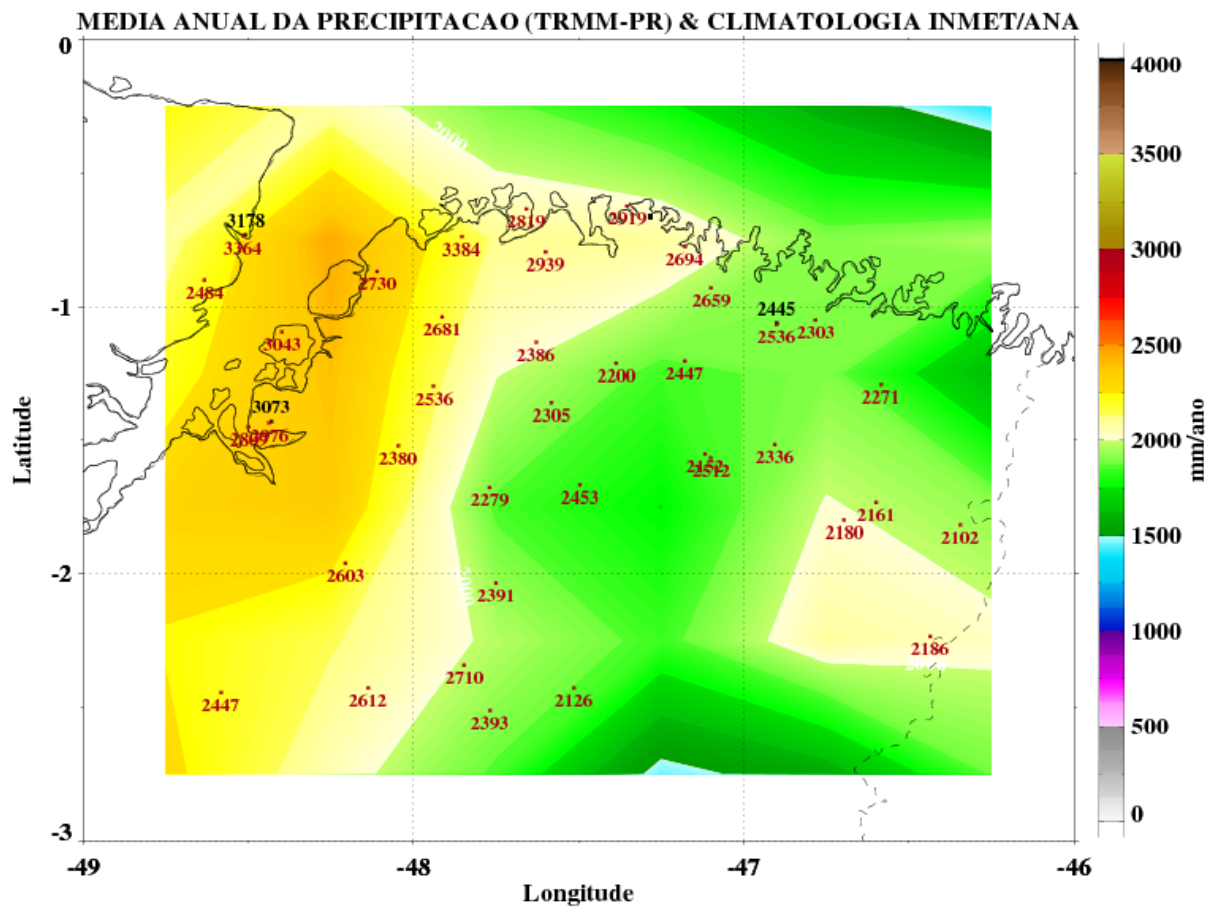
Fonte: Adaptado do GOES N Data Book (2015).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO E DO CICLO DIÁRIO DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS EM CUIARANA

A Figura 05 apresenta as médias da precipitação estimada pelo TRMM-PR e da precipitação medida por estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Agência Nacional de Águas (ANA), referente ao período de 1998 a 2012. As estações meteorológicas apresentadas na Figura 5 possuem médias pluviométricas superiores à 2000 mm anuais, e a estação meteorológica convencional de Salinópolis tem média de 2919 mm/ano, expressivamente superior à média de 1892 mm/ano em Cuiarana (2012-2015). De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM), uma estação meteorológica é representativa das condições atmosféricas de um local até um raio de 150 km. A Vila de Cuiarana está localizada a aproximadamente 9 km da estação pluviométrica de Salinópolis, ou seja, está sob a área de abrangência desta estação. Com base nesta premissa, é possível que a média de precipitação de Cuiarana esteja subestimada, visto que a série de dados desta região ainda é curta.

Figura 05 - Médias da precipitação estimada pelo TRMM-PR (escala vertical) e da precipitação medida por estações do INMET (valores em preto) e da ANA (valores em vermelho).



Fonte: Do autor.

A Figura 06 apresenta o ciclo diário anual e sazonal da precipitação acumulada, da temperatura do ar e da umidade relativa do ar em Cuiarana, referente ao período de 2012 a 2015. Observa-se que o ciclo diário anual da precipitação apresenta máximos de 0,3 mm/30min durante às 02:00, 03:30 e 23:00 hora local (HL). Durante o período vespertino, há uma fluatuabilidade entre 0,1 mm/30min e 0,2 mm/30min. E são registrados valores acima de 0,2 mm/30min durante todo o período matutino.

As médias das composições sazonais foram de 562 mm, 1063 mm, 271 mm e 27 mm, respectivamente nos meses de dezembro a fevereiro (DJF), março a maio (MAM), junho a agosto (JJA) e setembro a novembro (SON).

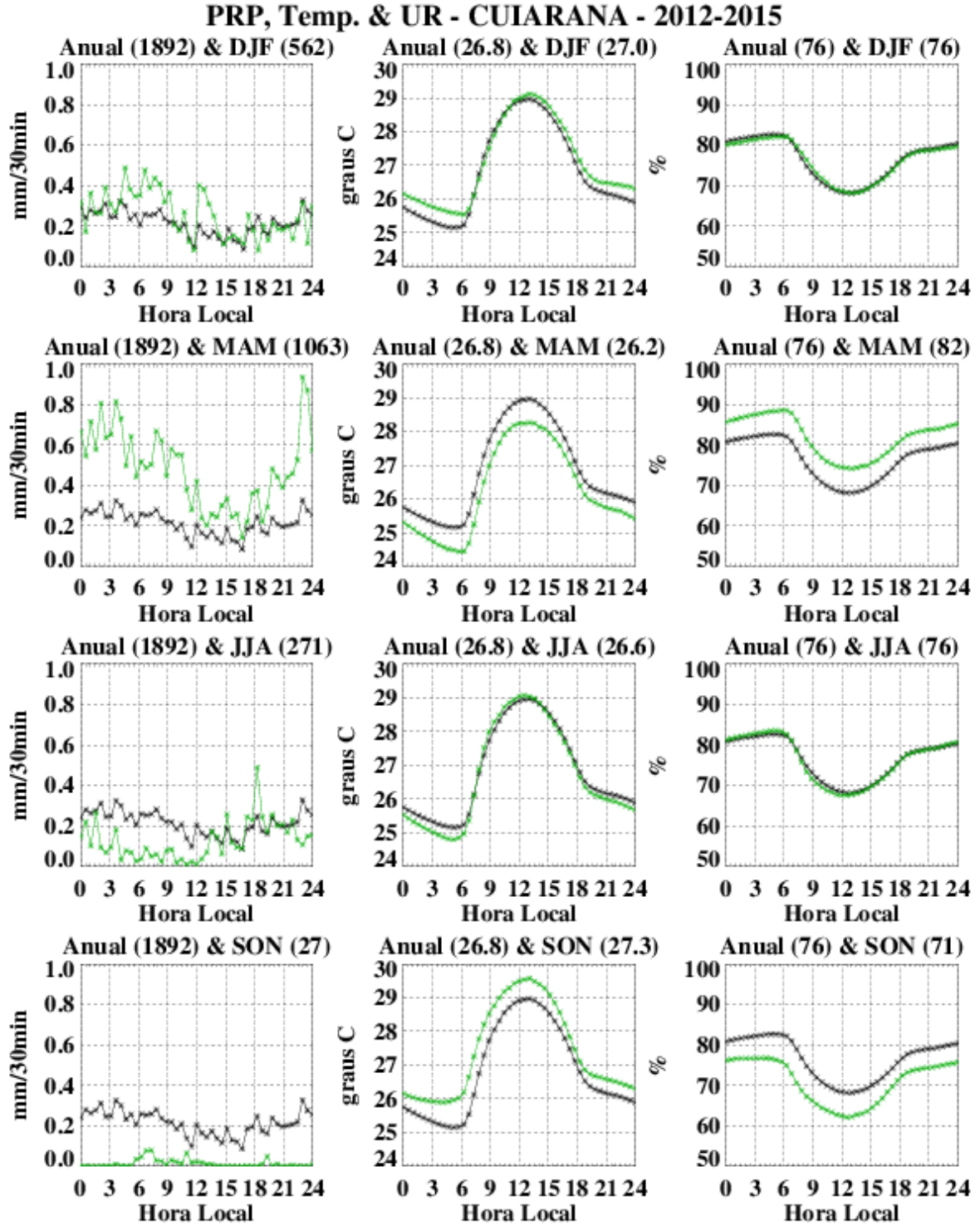
Durante o trimestre de DJF, o ciclo diário da precipitação é mais intenso durante o fim do período noturno e em todo o período matutino, com máximos de 0,5 mm/30min às 03:30 e 06:30 HL. No período vespertino, há um máximo de 0,4 mm/30min às 12:00 HL. E os valores

mínimos de precipitação chegam a 0,1 mm/30min durante às 12:00 e 18:00 HL. No período de MAM, o ciclo diário da precipitação é superior ao anual em todas as horas do dia, além de possuir um comportamento semelhante ao anual. Isto indica que toda a flutuabilidade presente no ciclo anual de precipitação é profundamente influenciada pela contribuição do trimestre de MAM. Durante os meses de JJA, o ciclo diário da precipitação é inferior ou próximo do anual em quase todas as horas do dia, com exceção das 18:00 HL, quando é registrado um pico de 0,5 mm/30min. No trimestre de SON, o ciclo diário da precipitação é totalmente inferior ao anual e os maiores valores de precipitação ocorrem durante o período matutino, embora, não ultrapassem 0,1 mm/30min.

O ciclo diário anual da temperatura do ar tem os mínimos de 25,2°C às 03:00 e 06:00 HL e os máximos de 28,9°C às 12:00 e 13:00 HL, ou seja, há uma amplitude de 4°C observada durante o dia. A média anual de temperatura do ar foi de 26,8°C, e as médias sazonais foram de 27,0, 26,2, 26,6 e 27,3°C respectivamente nos meses de dezembro a fevereiro (DJF), março a maio (MAM), junho a agosto (JJA) e setembro a novembro (SON).

No ciclo diário anual da umidade relativa do ar, o período entre 19:00 e 6:00 HL foi identificado como o mais úmido e o período de 09:00 a 15:00 HL como o menos úmido. A média anual da umidade relativa do ar foi de 76%, e as médias sazonais foram de 82% para o trimestre de março a maio (MAM), de 71% para o trimestre de setembro a novembro (SON) e de 76% para os meses de dezembro a fevereiro (DJF) e junho a agosto (JJA).

Figura 06 - Ciclo diário anual (linha cinza) e sazonal (linha verde) da precipitação (painéis da esquerda), da temperatura do ar (painéis do centro) e da umidade relativa do ar (painéis da direita).

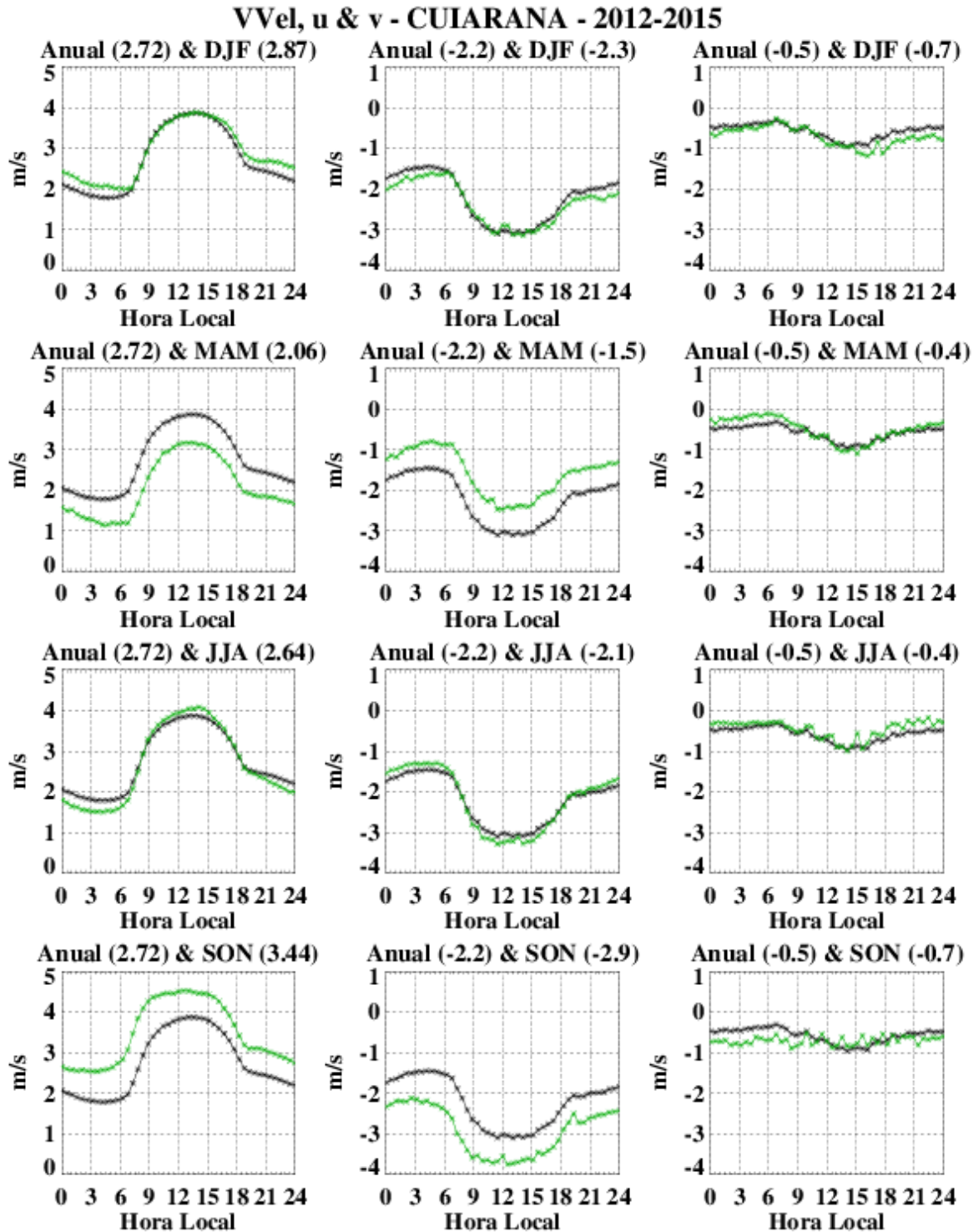


Fonte: Do autor.

A Figura 07 apresenta o ciclo diário anual e sazonal da velocidade média do vento e das componentes zonal e meridional em Cuiarana referente ao período de 2012 a 2015. O ciclo diário anual da velocidade média do vento apresenta valores entre 2,5 e 4,0 m/s durante os períodos matutino e vespertino, e valores entre 1,8 e 2,5 m/s durante o período noturno. A média anual da velocidade média do vento foi de 2,72 m/s, e as médias sazonais foram de 2,87, 2,06, 2,64 e 3,44 m/s respectivamente nos meses de dezembro a fevereiro (DJF), março a maio (MAM), junho a agosto (JJA) e setembro a novembro (SON).

No ciclo diário anual das componentes do vento, observa-se que a componente zonal oscila entre -1,8 a -3,0 m/s e a componente meridional oscila entre -0,3 a -0,8 m/s, indicando que o vento tem direção de leste e de norte, respectivamente. Consequentemente, identificou-se que durante o dia o vento é predominantemente de leste, porém, ao final da tarde e durante a noite é possível observar um enfraquecimento nas componentes do vento, em todas as quatro estações.

Figura 07 - Ciclo diário anual (linha cinza) e sazonal (linha verde) da velocidade média do vento (painéis da esquerda), da componente zonal (painéis do centro) e da componente meridional (painéis da direita).



Fonte: Do autor.

5.2. CICLO DIÁRIO DO NÚMERO DE PIXELS DA TEMPERATURA DE BRILHO DO TOPO DE NUVENS NO CANAL INFRAVERMELHO

A Figura 08 apresenta os perfis verticais do ciclo diário do número total de pixels de T_b do topo de nuvens a cada 30 minutos nas 100 grades plotadas na região de estudo referente ao período de 2000 a 2015. Observa-se que a grade central do total de toda a troposfera ($-85^{\circ}\text{C} < T_b < 18^{\circ}\text{C}$) tem valores mínimos no período entre 12:00 e 15:00 HL, e valores máximos durante o período de 20:00 a 05:00 HL. Os valores máximos de número de pixels observados durante o período noturno coincidem com a média anual de precipitação mais intensa (0,3 mm/hora) observada em Cuiarana.

A camada 1 ($15^{\circ}\text{C} < T_b < 18^{\circ}\text{C}$) corresponde ao número de pixels em um intervalo da atmosfera próximo da superfície terrestre. Foram observados elevados números de pixels com valores máximos noturnos e valores mínimos vespertinos, principalmente, nas grades continentais.

A camada 2 ($5^{\circ}\text{C} < T_b < 15^{\circ}\text{C}$) é a mais numerosa da troposfera na quantidade de pixels de T_b , e por isso, corresponde aos topos de nuvens quentes da baixa troposfera. A camada 2 apresenta máximos durante os períodos noturno e matutino, e mínimos vespertinos. Esta configuração é similar à observada no ciclo diário da precipitação em Cuiarana, no qual foram encontrados máximos durante o período noturno e início do período matutino, além de mínimos no período vespertino. Com base nestas informações, é possível inferir que a maior parte da precipitação diurna em Cuiarana é resultado da contribuição de nuvens baixas.

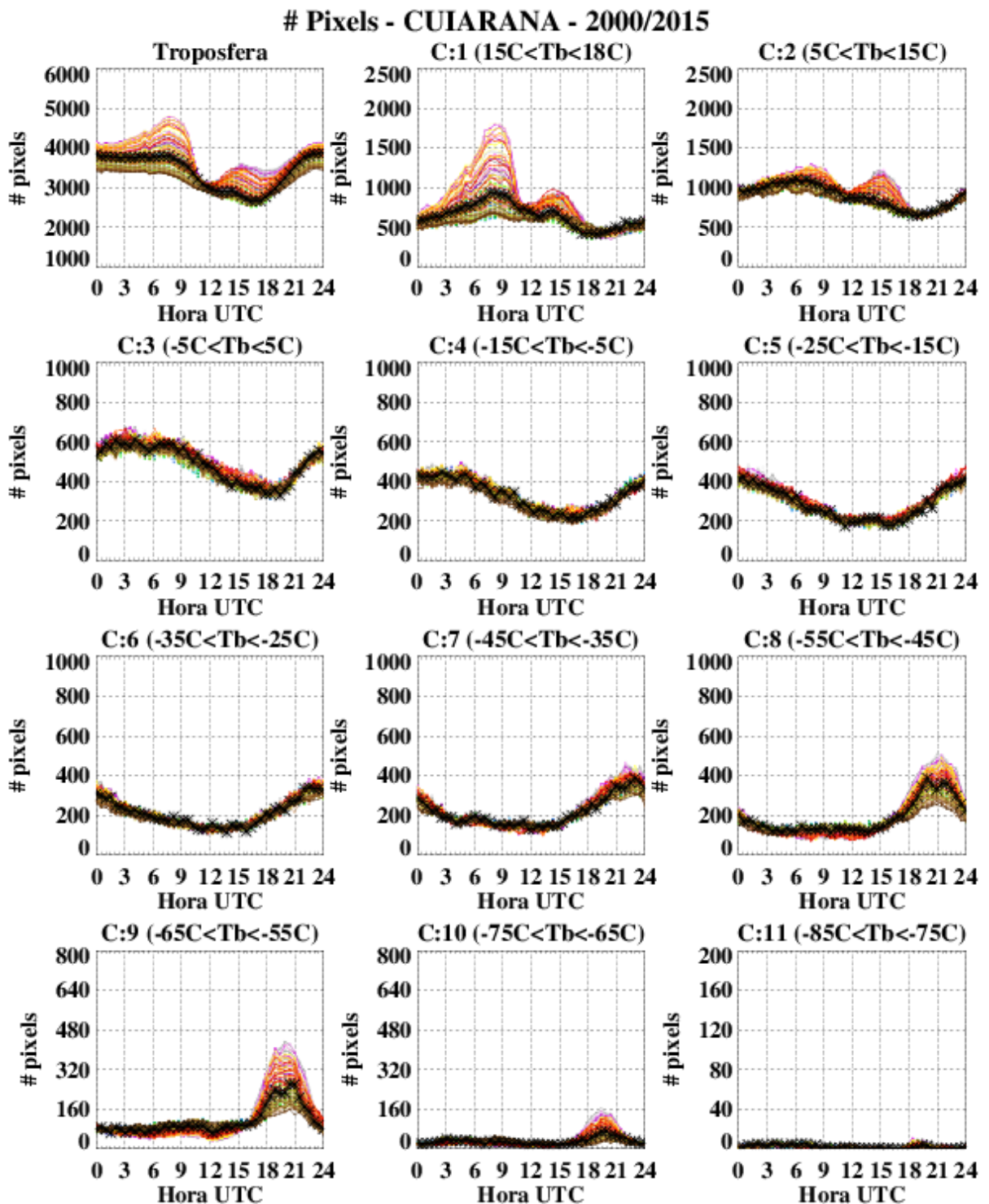
As camadas situadas entre a baixa e a alta troposfera (3 a 6; $-35^{\circ}\text{C} < T_b < 5^{\circ}\text{C}$) têm elevados números de pixels de T_b do topo de nuvens, indicando que as nuvens são mais numerosas e profundas. As características observadas nestas camadas apontam a existência de nuvens médias, principalmente, durante o período noturno.

As camadas superiores (7, 8 e 9), com temperaturas mais baixas ($-65^{\circ}\text{C} < T_b < -35^{\circ}\text{C}$), têm dois picos do número de pixels de T_b entre 16:00 e 20:00 HL, enquanto que nos outros horários os valores são baixos. Estes valores elevados de número de pixel na alta troposfera representam valores baixos de T_b , o que indica a existência de topos frios no fim do período vespertino e durante as primeiras horas da noite. Como a precipitação noturna em Cuiarana é mais intensa, inclusive, com um pico às 23:00 HL, é possível confirmar que grande parte dos topos frios observados nas camadas (7, 8 e 9) estão associados a existência de nuvens de grande

desenvolvimento vertical (cumulonimbus), que costumam gerar grandes quantidades de precipitação.

A camada 10 ($-75^{\circ}\text{C} < T_b < -65^{\circ}\text{C}$) tem um pequeno pico de número de pixels por volta das 17:00 HL. Esta camada pode estar associada às nuvens altas cirrus, que possuem uma grande emissividade e temperaturas de brilho frias. E a camada 11 ($-85^{\circ}\text{C} < T_b < -75^{\circ}\text{C}$) não registra número de pixels.

Figura 08 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente ao período de 2000 a 2015.



Fonte: Do autor.

As Figuras 09 a 12 apresentam os perfis verticais do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens a cada 30 minutos nas 100 grades plotadas na região de estudo referente aos totais sazonais do período de 2000 a 2015. Na Figura 09, referente ao trimestre de dezembro a fevereiro (DJF), a grade central do total de toda a troposfera ($-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) tem valores mínimos no período entre 18:00 e 21:00 HL, e valores máximos a partir de 23:00 HL até o fim do período matutino. As camadas 1 e 2 ($5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) têm as maiores contribuições de pixels de Tb do topo de nuvens, principalmente, entre o período de 01:00 a 15:00 HL. As camadas intermediárias (3, 4 e 5; $-25^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 5^{\circ}\text{C}$) têm elevados números de pixels, indicando que as nuvens são mais numerosas e profundas. As características observadas nestas camadas apontam a existência de nuvens médias, principalmente, durante o período noturno. Nas camadas localizadas entre a baixa e a alta troposfera (6, 7 e 8; $-55^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -25^{\circ}\text{C}$), é possível observar um aumento do número de pixels no fim do período vespertino. A camada 9 ($-65^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -55^{\circ}\text{C}$) tem um máximo entre 15:00 e 18:00 HL. A camada 10 ($-75^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -65^{\circ}\text{C}$) ainda registra alguns pixels provenientes do pico observado na camada anterior. E a camada 11 ($-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -75^{\circ}\text{C}$) não registra número de pixels.

Na Figura 10, relativa ao trimestre de março a maio (MAM), a grade central do total de toda a troposfera ($-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) é a mais numerosa dentre todas as composições sazonais, além de ter uma configuração similar à dos meses de DJF. A camada 1 ($15^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) tem máximos entre 03:00 e 12:00 HL. A camada 2 ($5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 15^{\circ}\text{C}$) é a mais numerosa da troposfera, e tem máximos noturnos e matutinos, e mínimos vespertinos. As camadas entre a baixa e a alta troposfera (3 a 7; $-45^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 5^{\circ}\text{C}$) têm elevados números de pixels de Tb do topo de nuvens, indicando que as nuvens são mais numerosas e profundas. As características observadas nestas camadas apontam a existência de nuvens médias, principalmente, durante o período noturno. Nas camadas mais altas (8, 9 e 10; $-75^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -45^{\circ}\text{C}$), são observados máximos entre 15:00 e 18:00 HL. E a camada 11 ($-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -75^{\circ}\text{C}$) não registra número de pixels.

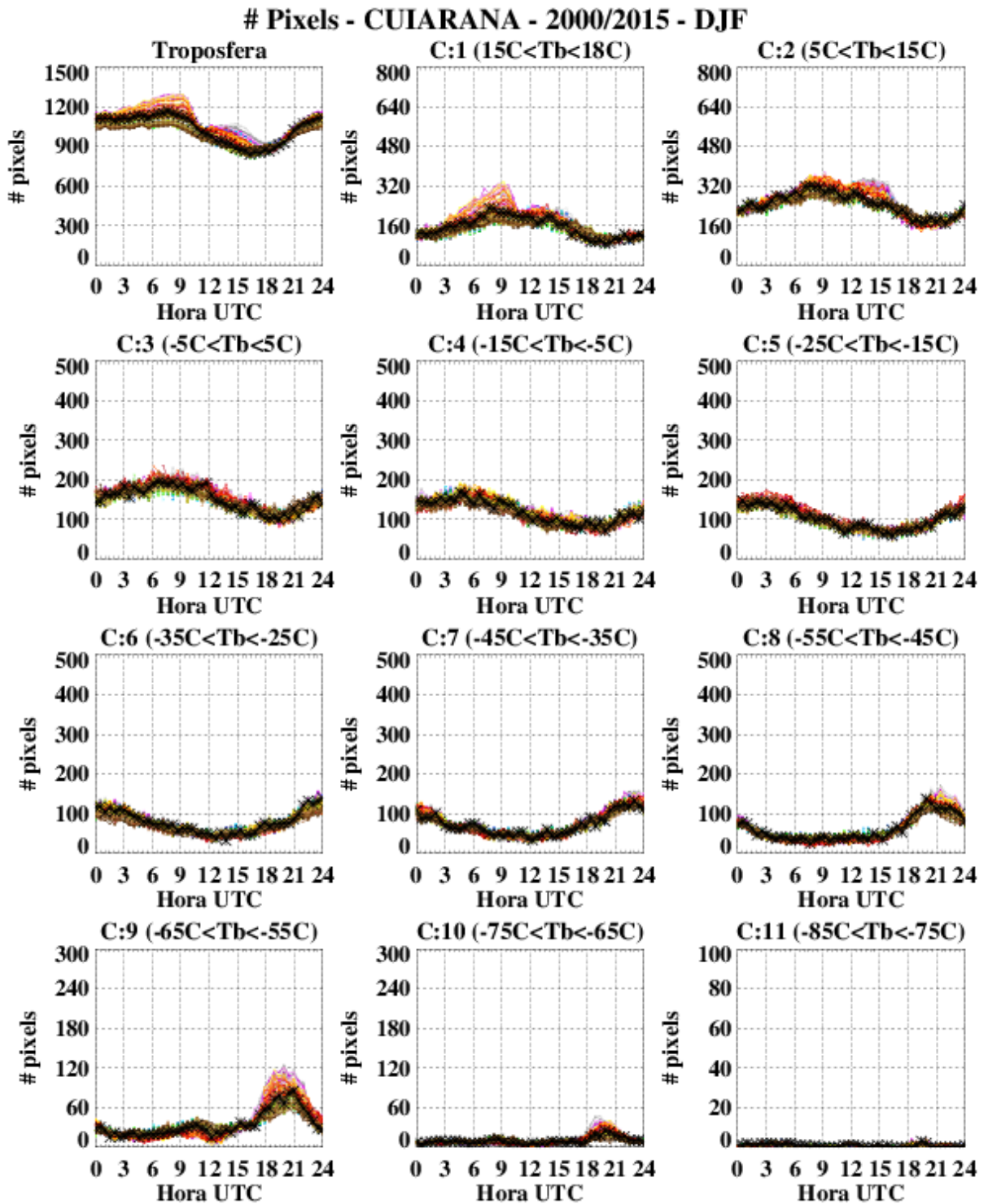
Os resultados das composições sazonais dos meses de dezembro a fevereiro (DJF) e de março a maio (MAM) indicam que a precipitação pluviométrica da estação de Cuiarana tem a maior contribuição proveniente de nuvens oceânicas quentes na metade do período noturno e em todo o período matutino, associadas com a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

Na Figura 11, correspondente ao trimestre de junho a agosto (JJA), a grade central do total de toda a troposfera ($-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) tem valores mínimos no período entre 10:00 e 14:00 HL, e valores máximos durante o período de 19:00 a 03:00 HL. A camada 1 ($15^{\circ}\text{C} < \text{Tb}$

$< 18^{\circ}\text{C}$) tem máximos entre o fim do período noturno e início do período matutino, um pico secundário às 12:00 HL e mínimos no período vespertino. A camada 2 ($5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 15^{\circ}\text{C}$) tem uma curva mais suave e um pico nas grades oceânicas entre 12:00 e 15:00 HL. Na camada 3 ($-5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 5^{\circ}\text{C}$), há uma redução significativa do número de pixels. As camadas seguintes (4 a 9; $-65^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -5^{\circ}\text{C}$) são caracterizadas por valores baixos e um pico observado entre o final da tarde e início da noite. E as camadas superiores (10 e 11; $-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -65^{\circ}\text{C}$) não registram número de pixels. Estes resultados indicam que a contribuição de nuvens baixas, observada pelo maior número de pixels durante o período matutino, é a grande responsável pela maior parte da precipitação que ocorre em Cuiarana durante estes meses do ano. E a contribuição de nuvens com topos frios é menor, indicando que há somente alguns casos de convecção profunda, associada a aglomerados convectivos e a SCM, como as LI, por exemplo.

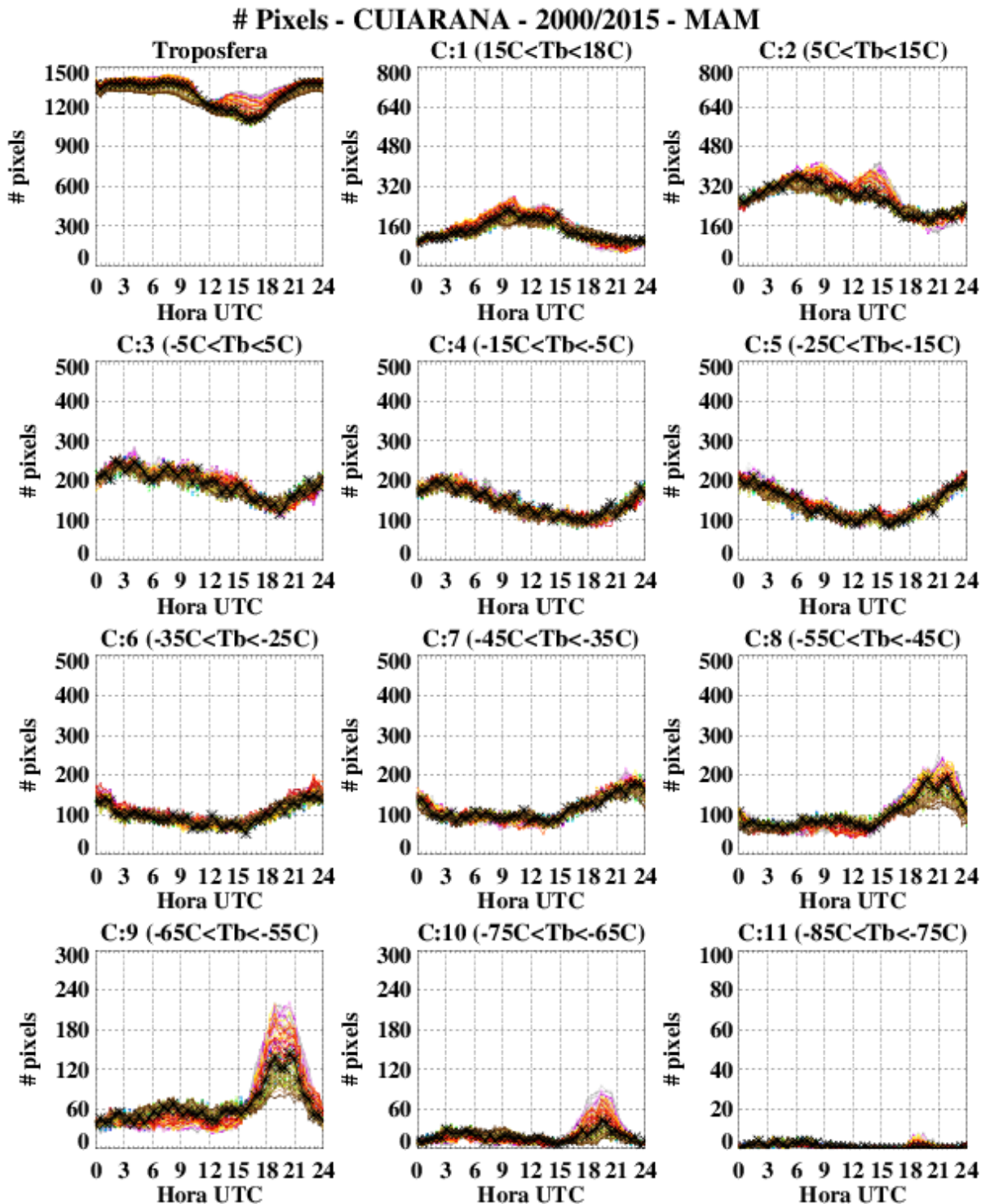
Na Figura 12, concernente ao trimestre de setembro a novembro (SON), a grade central do total de toda a troposfera ($-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) é a menos numerosa dentre todas as composições sazonais. As camadas 1 e 2 ($5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) têm contribuições de pixels de Tb do topo de nuvens mais relevantes entre toda a troposfera, com máximos noturnos e matutinos, principalmente, nas grades continentais. Isto indica que a nebulosidade destas camadas é proveniente da convecção local gerada por fatores locais, como o aquecimento superficial do continente, a alta umidade da região e os sistemas locais de brisas. As camadas situadas entre a baixa e a alta troposfera (3 a 9; $-65^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 5^{\circ}\text{C}$) têm baixos números de pixels. Na camada 9, em especial, é possível identificar um pequeno pulso às 18:00 HL, provavelmente, decorrente da presença de nuvens cirrus. Estes resultados indicam que a precipitação registrada na estação de Cuiarana durante este período do ano é decorrente, principalmente, de nuvens baixas geradas pela convecção local.

Figura 09 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente aos totais sazonais de DJF do período de 2000 a 2015.



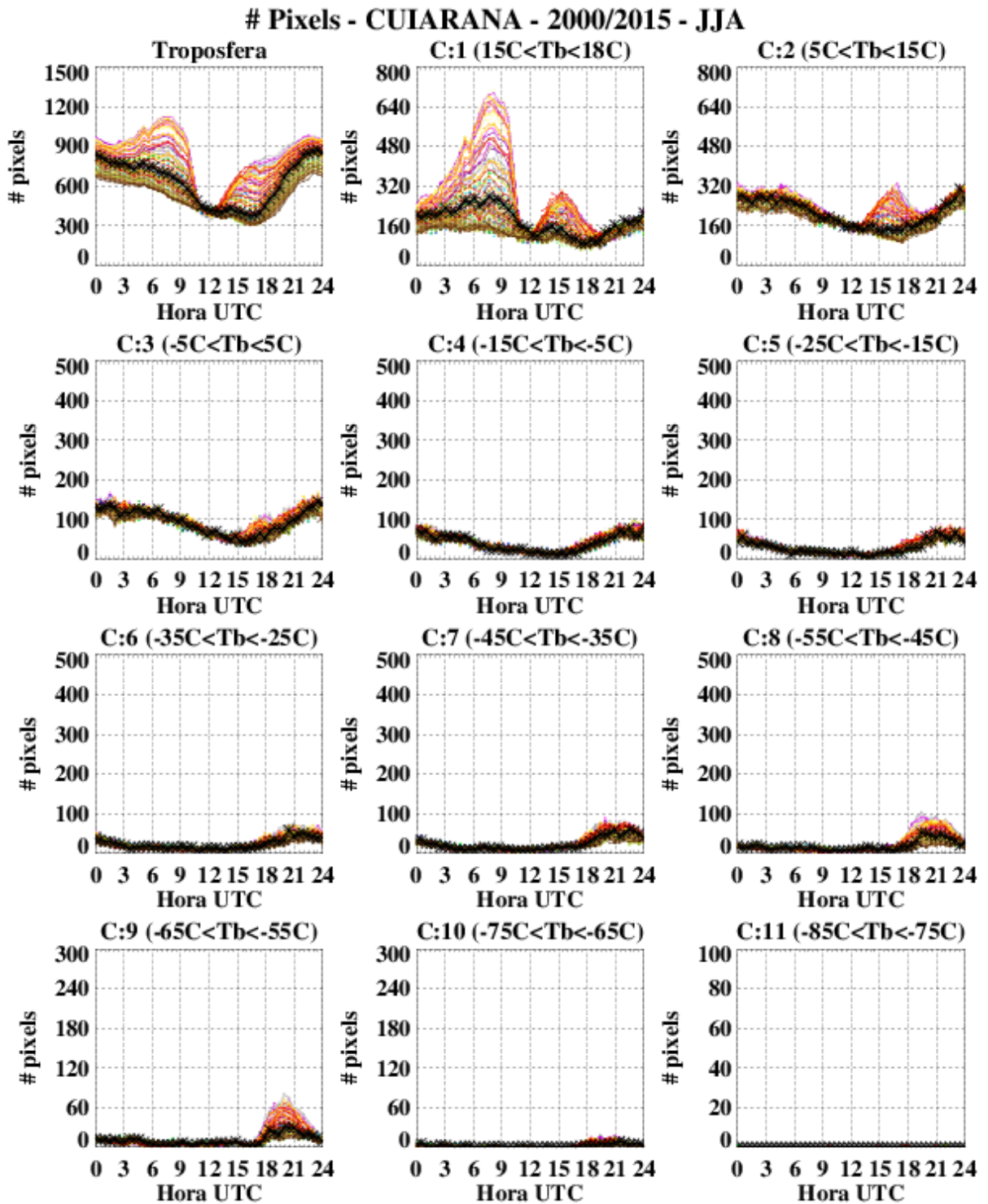
Fonte: Do autor.

Figura 10 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente aos totais sazonais de MAM do período de 2000 a 2015.



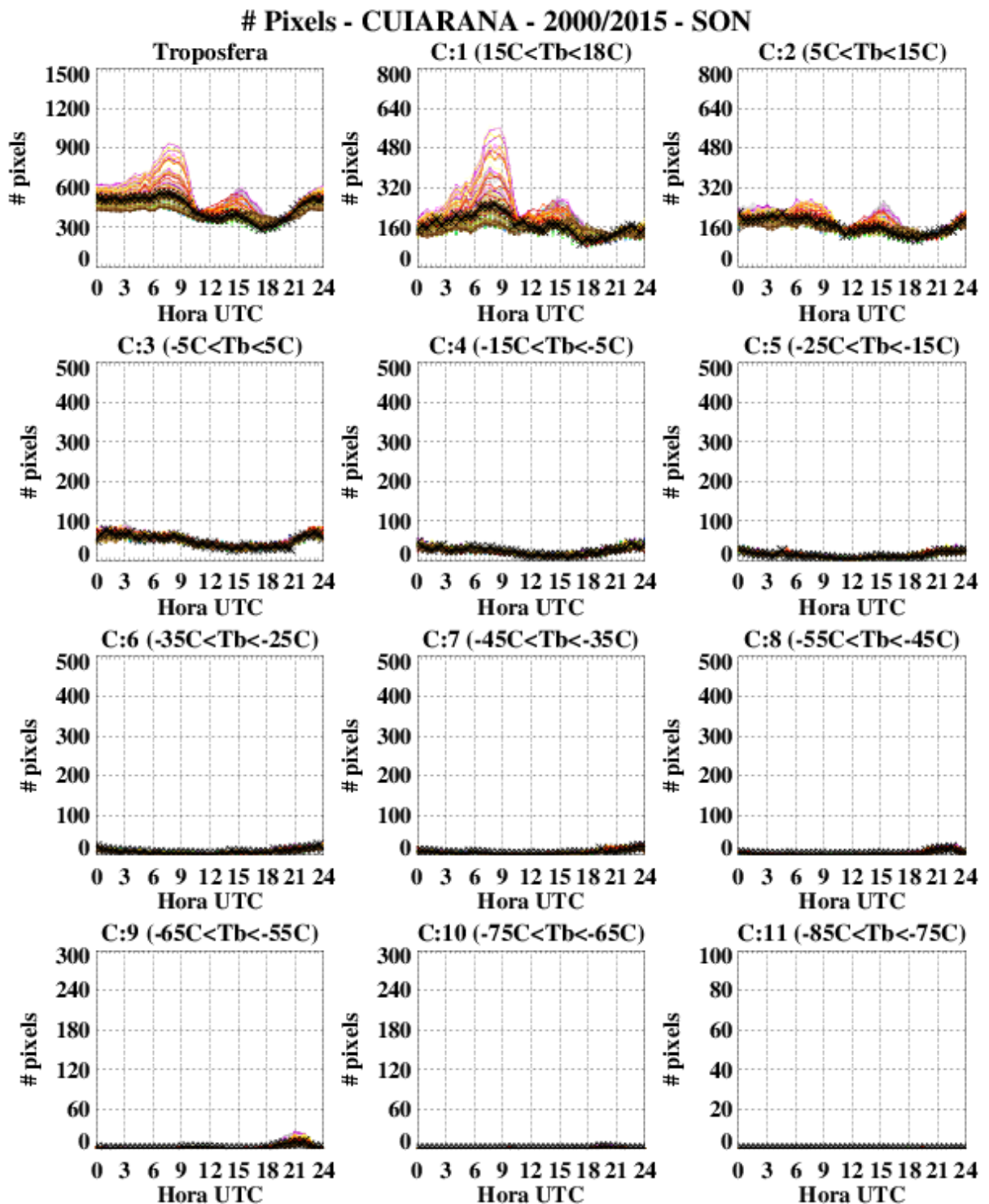
Fonte: Do autor.

Figura 11 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente aos totais sazonais de JJA do período de 2000 a 2015.



Fonte: Do autor.

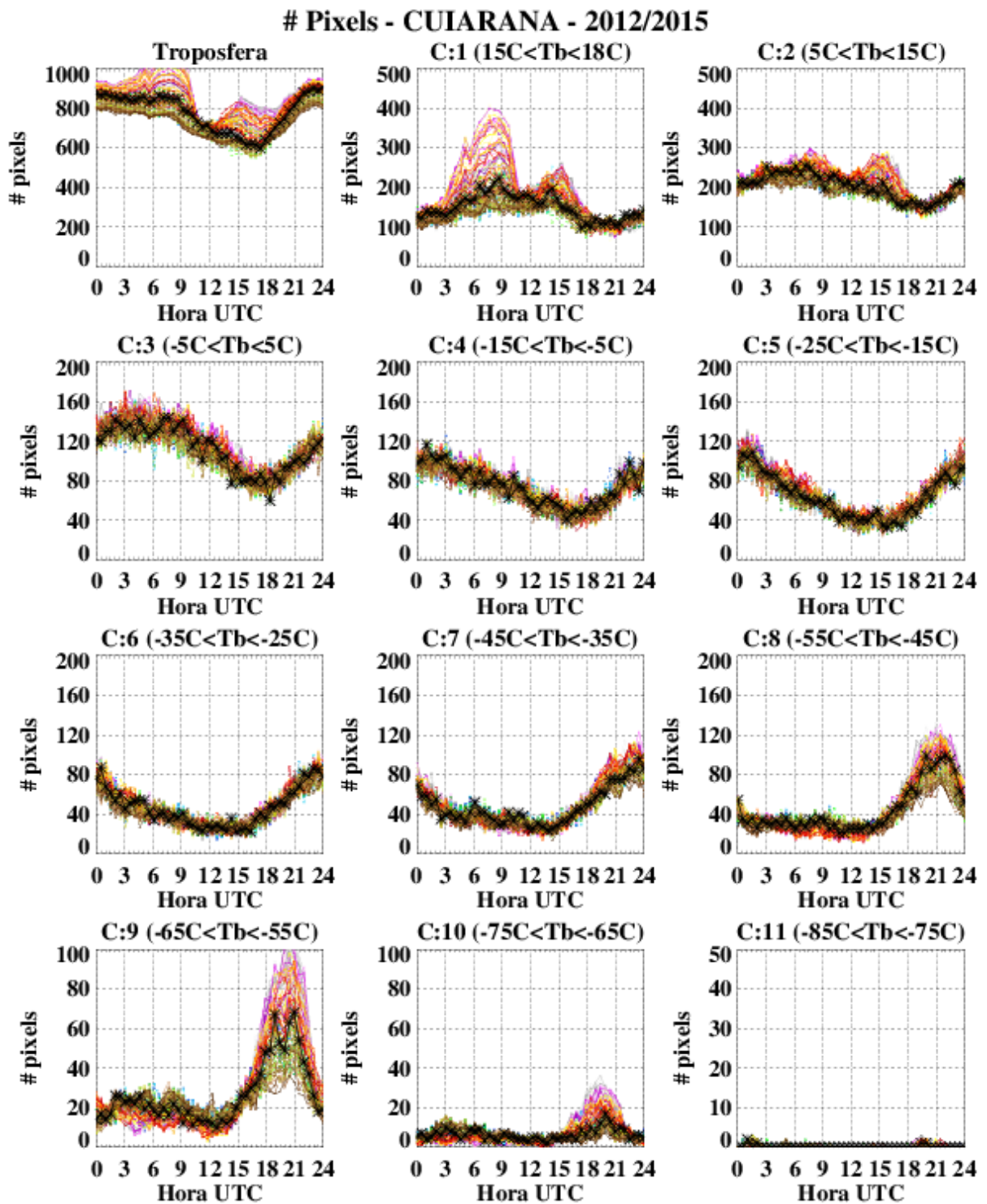
Figura 12 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente aos totais sazonais de SON do período de 2000 a 2015.



Fonte: Do autor.

A Figura 13 apresenta o perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens a cada 30 minutos nas 100 grades plotadas na região de estudo referente ao período de 2012 a 2015. Observa-se que a grade central do total de toda a troposfera ($-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) tem valores mínimos no período entre 12:00 e 15:00 HL, e valores máximos durante o período noturno até às 06:00 HL. A camada 1 ($15^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) tem elevados números de pixels no fim do período noturno e em todo o período matutino, além de mínimos no término da tarde e início da noite. A camada 2 ($5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 15^{\circ}\text{C}$) é a mais numerosa da troposfera na quantidade de pixels de Tb, e é caracterizada por pouca variabilidade diurna. A camada 3 ($-5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 5^{\circ}\text{C}$) é caracterizada por uma curva mais suave do que a camada anterior, e também por números de pixels elevados. As camadas situadas entre a baixa e a alta alta troposfera (4 a 7; $-45^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -5^{\circ}\text{C}$) têm valores de números de pixels que decrescem durante o dia, e crescem a partir de 15:00 HL. As camadas altas (8 e 9; $-65^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -45^{\circ}\text{C}$), têm dois picos do número de pixels de Tb observados entre 16:00 e 20:00 HL, enquanto que nos outros horários os valores são baixos. A camada 10 ($-75^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -65^{\circ}\text{C}$) é a menos numerosa da troposfera e apresenta um pequeno pico no fim do período vespertino. E a camada 11 ($-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -75^{\circ}\text{C}$) não registra número de pixels. Estes resultados são semelhantes em termos qualitativos com as análises realizadas para o período de 2000 a 2015.

Figura 13 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente ao período de 2012 a 2015.



Fonte: Do autor.

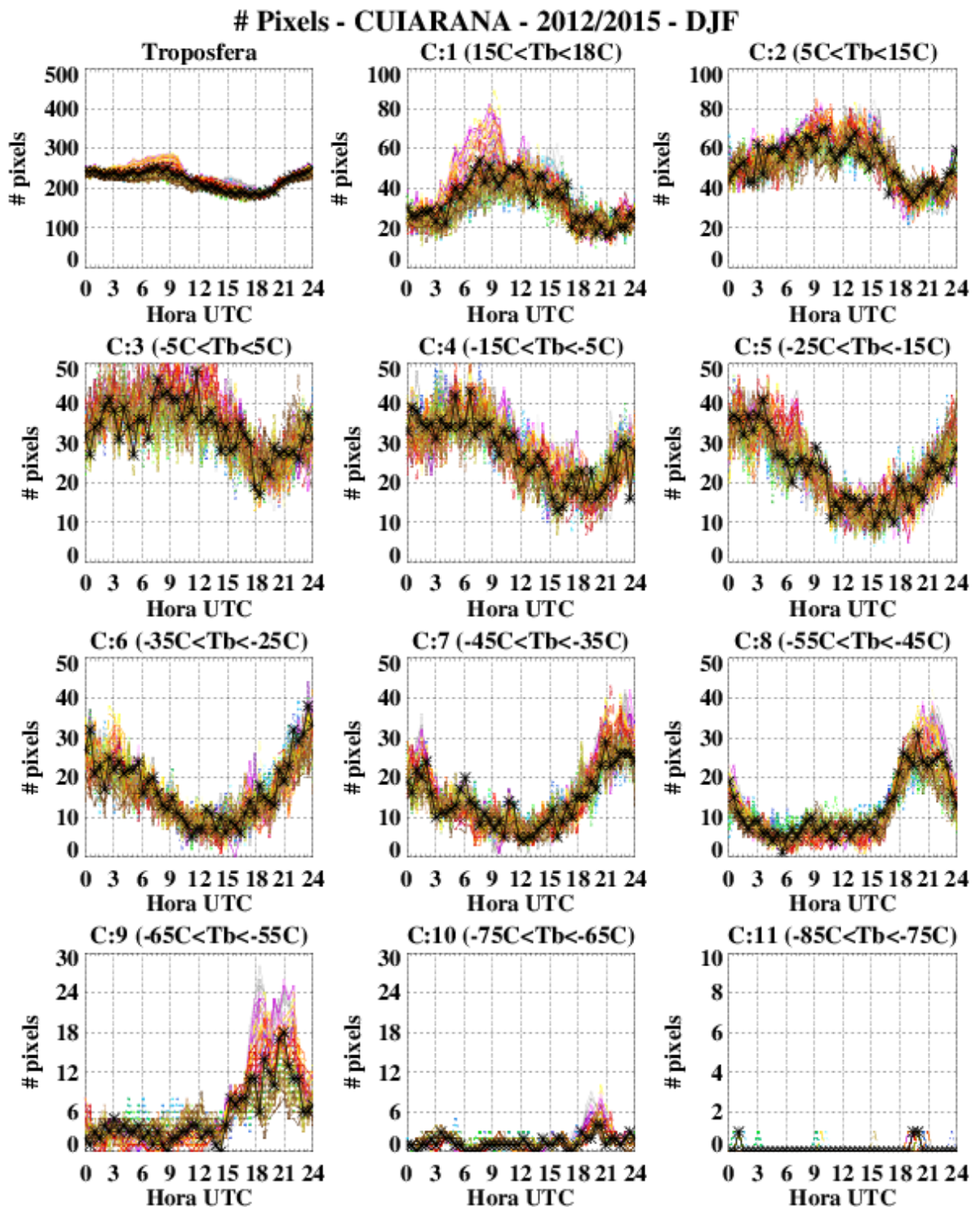
As Figuras 14 a 17 apresentam os perfis verticais do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens a cada 30 minutos nas 100 grades plotadas na região de estudo referente aos totais sazonais do período de 2000 a 2015. Na Figura 14, referente ao trimestre de dezembro a fevereiro (DJF), a grade central do total de toda a troposfera ($-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) tem valores mínimos no período vespertino, e valores máximos entre 21:00 HL e 06:00 HL. A camada 1 ($15^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) tem máximos durante o fim do período noturno e em todo o período matutino, e mínimos vespertinos. A camada 2 ($5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 15^{\circ}\text{C}$) é a mais numerosa da troposfera e tem um comportamento similar ao observado da camada 1. As camadas intermediárias (3 e 4; $-15^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 5^{\circ}\text{C}$) têm máximos entre o início do período noturno e o término do período matutino, além de mínimos vespertinos. Nas camadas entre a baixa e a alta troposfera (5, 6, 7 e 8; $-55^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -15^{\circ}\text{C}$), é possível observar um aumento do número de pixels no fim do período vespertino. A camada 9 ($-65^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -55^{\circ}\text{C}$) tem um máximo entre 12:00 e 18:00 HL. A camada 10 ($-75^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -65^{\circ}\text{C}$) ainda registra alguns pixels provenientes do pico observado na camada anterior. E a camada 11 ($-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -75^{\circ}\text{C}$) registra alguns pulsos de número de pixels. Estes resultados indicam que a maior contribuição da precipitação neste período é decorrente de nuvens quentes, que são predominantes durante parte do período noturno, e em todo o período matutino.

Na Figura 15, relativa ao trimestre de março a maio (MAM), a grade central do total de toda a troposfera ($-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) é a mais numerosa dentre todas as composições sazonais, além de ter uma configuração similar à dos meses de DJF. A camada 1 ($15^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) mínimos vespertinos e máximos entre 03:00 e 12:00 HL. A camada 2 ($5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 15^{\circ}\text{C}$) tem uma configuração semelhante à observada na camada 1, e também é a mais numerosa da troposfera. A camada 3 ($-5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 5^{\circ}\text{C}$) tem altos valores de números de pixels, e é caracterizada por picos no período noturno e matutino, além de mínimos no período vespertino. Esta camada numerosa indica a ocorrência de nuvens quentes e profundas sobre a região. As camadas situadas entre a baixa e alta troposfera (4 a 7; $-45^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -5^{\circ}\text{C}$) têm elevados números de pixels de Tb do topo de nuvens, indicando que as nuvens são mais numerosas e profundas. Nas camadas mais altas (8 e 9; $-65^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -45^{\circ}\text{C}$), são observados máximos entre 15:00 e 18:00 HL. A camada 10 ($-75^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -65^{\circ}\text{C}$) ainda registra pixels correspondentes aos máximos observados na camada 9. E a camada 11 ($-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -75^{\circ}\text{C}$) registra alguns pulsos dispersos de número de pixels. Os resultados indicam um aumento do número de pixels com a mesma configuração no ciclo diário referente ao trimestre anterior.

Na Figura 16, correspondente ao trimestre de junho a agosto (JJA), a grade central do total de toda a troposfera ($-85^{\circ}\text{C} < T_b < 18^{\circ}\text{C}$) tem valores mínimos no período entre 09:00 e 15:00 HL, e valores máximos durante o período de 18:00 a 06:00 HL. A camada 1 ($15^{\circ}\text{C} < T_b < 18^{\circ}\text{C}$) tem valores elevados durante grande parte do dia, com exceção dos horários de 08:00 e 15:00 HL, quando são registrados dois mínimos. A camada 2 ($5^{\circ}\text{C} < T_b < 15^{\circ}\text{C}$) tem máximos no período noturno e mínimos durante o período da manhã e da tarde. Na camada 3 ($-5^{\circ}\text{C} < T_b < 5^{\circ}\text{C}$), há uma redução muito significativa do número de pixels no período vespertino. Esta configuração aponta uma diminuição ou ausência de nuvens convectivas no período da tarde. As camadas seguintes (4 a 9; $-65^{\circ}\text{C} < T_b < -5^{\circ}\text{C}$) são caracterizadas por valores baixos e um pico observado entre o final da tarde e início da noite. A camada 10 ($-75^{\circ}\text{C} < T_b < -65^{\circ}\text{C}$) registra alguns pulsos de pixels, principalmente, entre 15:00 e 18:00 HL. E a camada 11 ($-85^{\circ}\text{C} < T_b < -75^{\circ}\text{C}$) não registra número de pixels. Estes resultados indicam que a maior contribuição de números de pixels é proveniente de nuvens baixas, principalmente, durante o fim do período noturno e início do período matutino. Como no período noturno não ocorre aquecimento na superfície terrestre, e, portanto, não há convecção gerada por fatores locais, é muito provável que as nuvens baixas sejam provenientes de sistemas de mesoescala, o que corrobora com os resultados observados nos respectivos totais sazonais referentes ao período de 2000 a 2015.

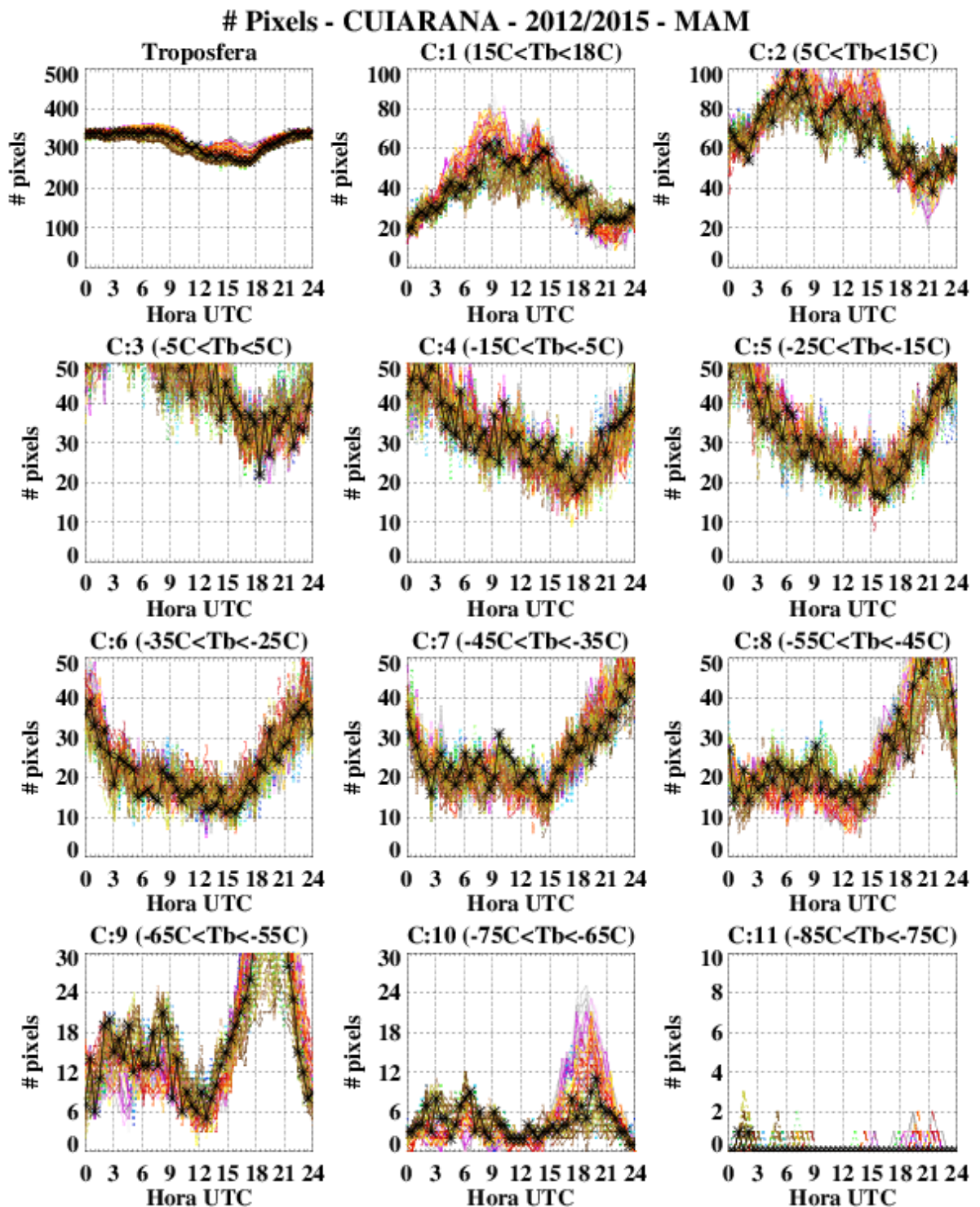
Na Figura 17, concernente ao trimestre de setembro a novembro (SON), a grade central do total de toda a troposfera ($-85^{\circ}\text{C} < T_b < 18^{\circ}\text{C}$) é a menos numerosa dentre todas as composições sazonais. As camadas 1 e 2 ($5^{\circ}\text{C} < T_b < 18^{\circ}\text{C}$) têm as maiores contribuições de pixels de T_b do topo de nuvens em toda a troposfera, e são caracterizadas por pouca variabilidade diurna. As camadas situadas entre a baixa e a alta troposfera (3 a 9; $-65^{\circ}\text{C} < T_b < 5^{\circ}\text{C}$) têm baixos números de pixels. Na camada 9, em específico, é possível identificar um pequeno pulso entre 18:00 e 21:00 HL, provavelmente, decorrente da presença de nuvens cirrus. Neste período, a contribuição do número de pixels é predominantemente dada por nuvens baixas, geradas pela convecção local produzida a partir do aquecimento da superfície terrestre.

Figura 14 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente aos totais sazonais de DJF do período de 2012 a 2015.



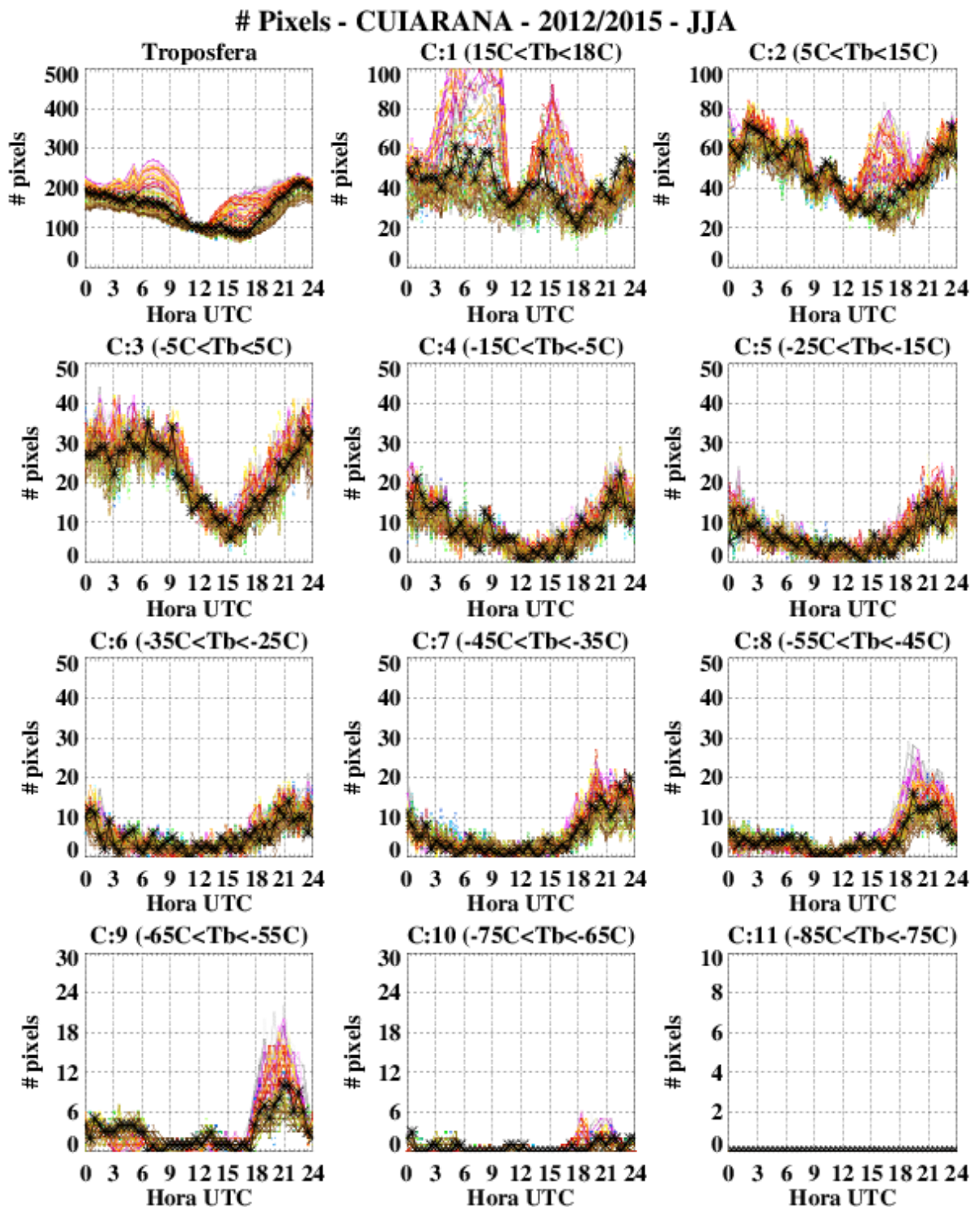
Fonte: Do autor.

Figura 15 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente aos totais sazonais de MAM do período de 2012 a 2015.



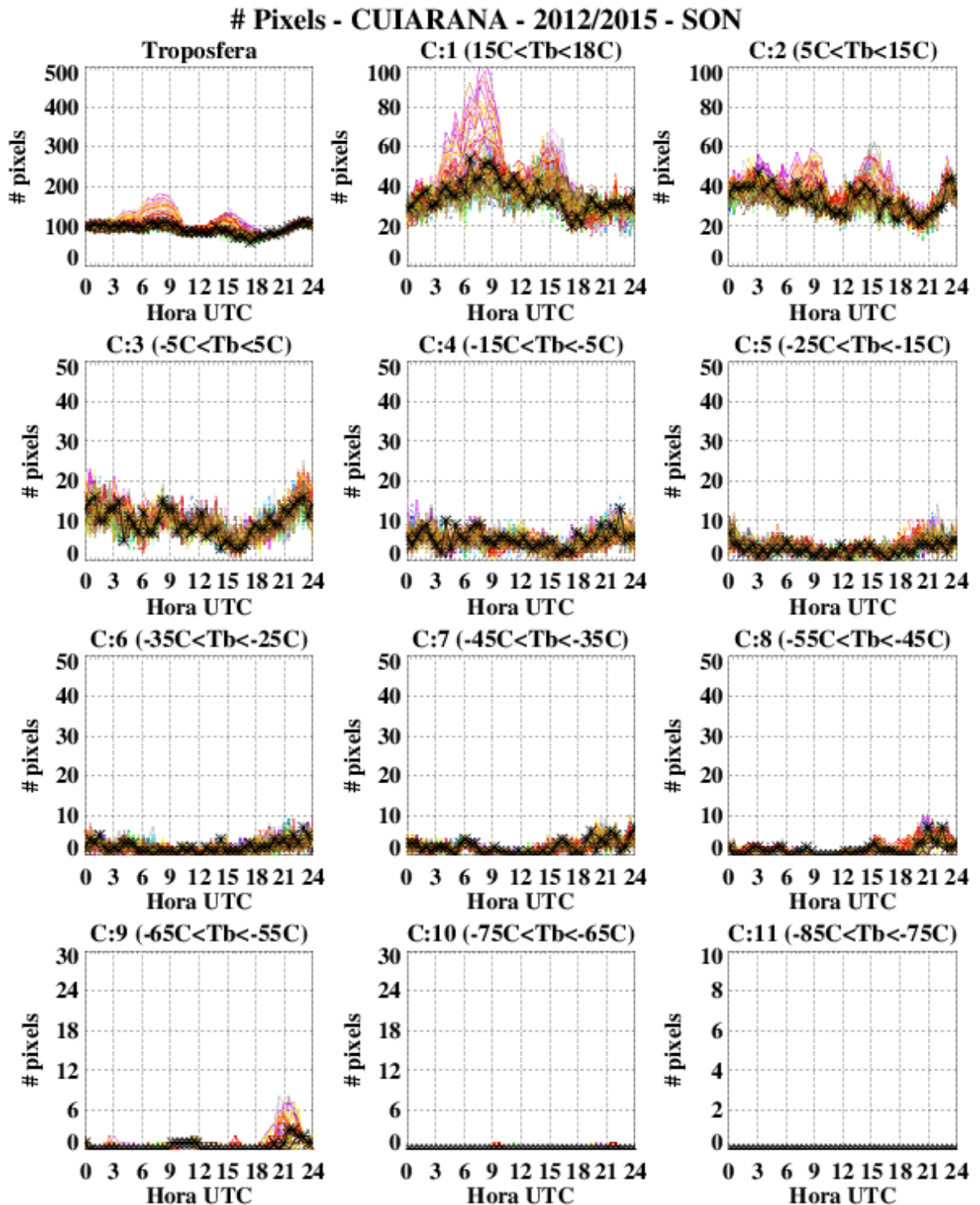
Fonte: Do autor.

Figura 16 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente aos totais sazonais de JJA do período de 2012 a 2015.



Fonte: Do autor.

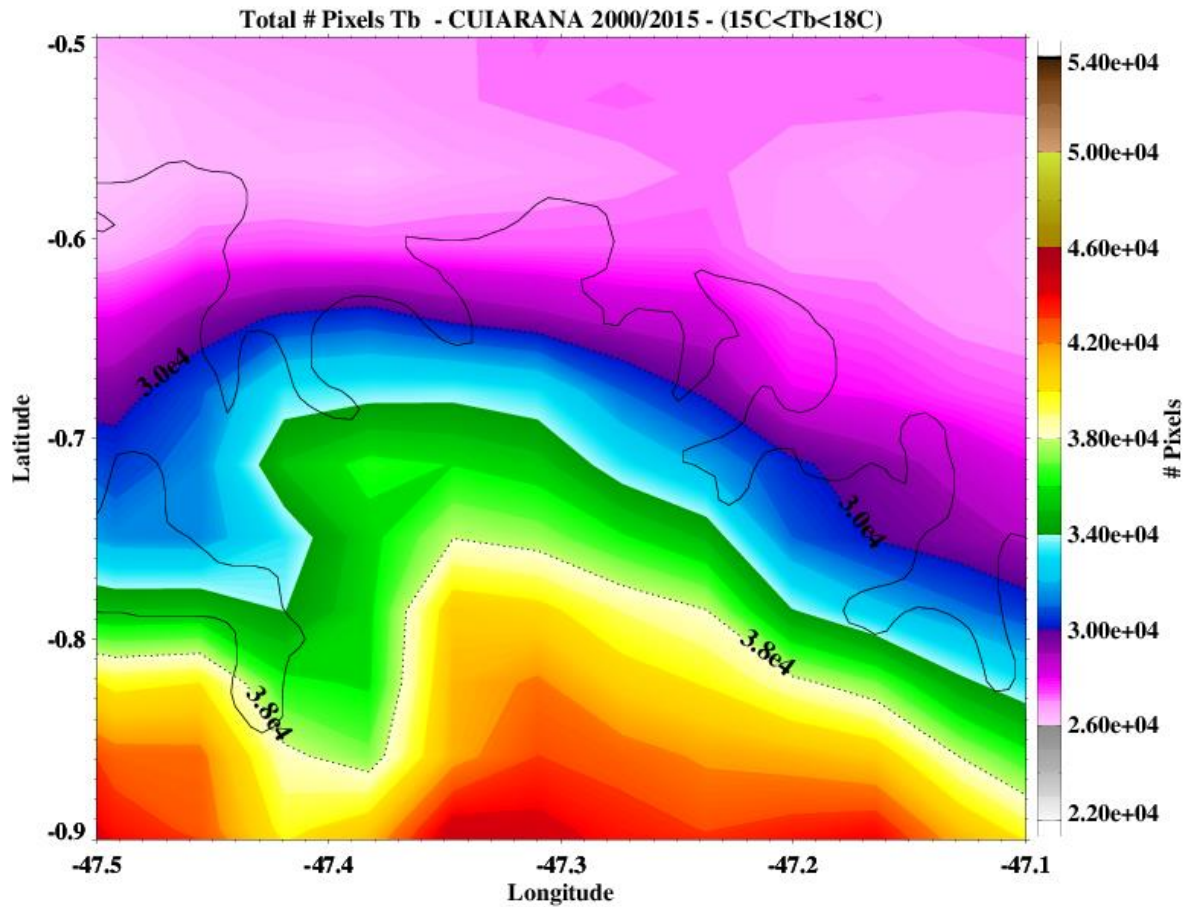
Figura 17 - Perfil vertical do ciclo diário do número total de pixels de Tb do topo de nuvens referente aos totais sazonais de SON do período de 2012 a 2015.



Fonte: Do autor.

A Figura 18 apresenta o número total de pixels de Tb do topo de nuvens da camada 1 ($15^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) na região de estudo referente ao período de 2000 a 2015. Observa-se um aumento progressivo em forma de diversas faixas longitudinais com números totais de pixels que decrescem do continente em direção ao oceano, e que seguem um contorno provocado pela geografia do continente, com destaque à presença da Baía de Maracanã na porção oeste do quadrante.

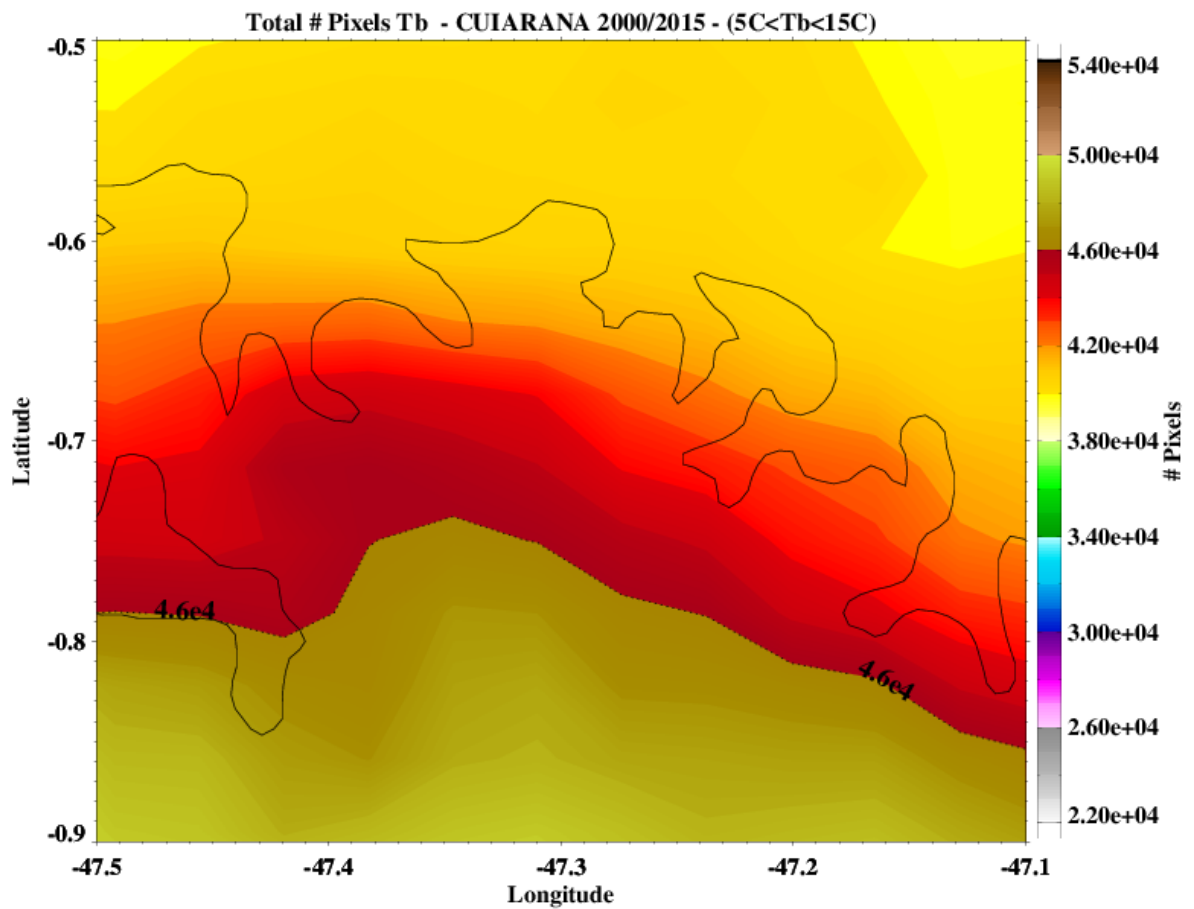
Figura 18 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens na camada 1.



Fonte: Do autor.

A Figura 19 apresenta o número total de pixels de Tb do topo de nuvens na camada 2 ($5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 15^{\circ}\text{C}$) na região de estudo referente ao período de 2000 a 2015. Observa-se uma completa homogeneidade de pixels sobre o Oceano Atlântico e em parte da porção continental. Como esta camada está mais afastada da superfície terrestre, a variação observada nos contornos de pixels está mais suavizada.

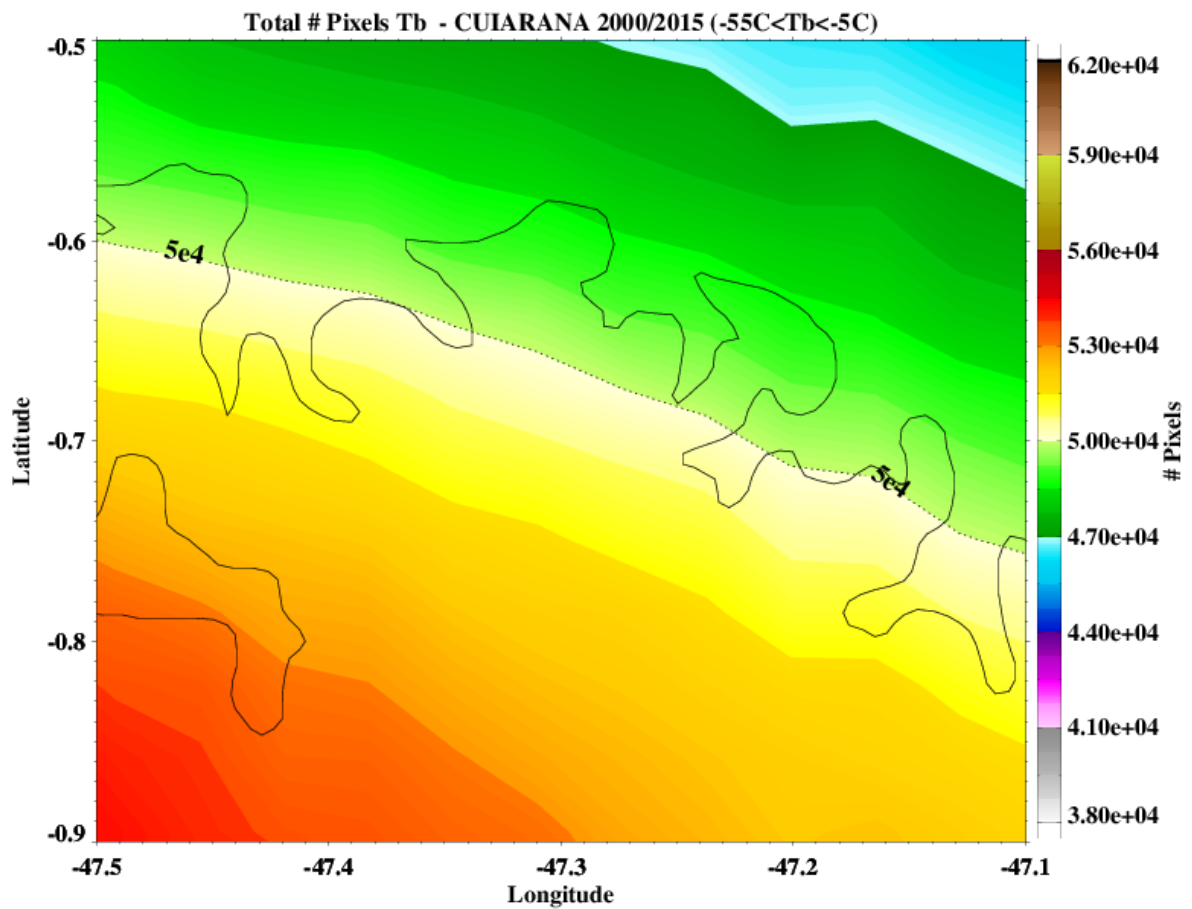
Figura 19 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens na camada 2.



Fonte: Do autor.

A Figura 20 apresenta o número total de pixels de Tb do topo de nuvens entre as camadas 4 e 8 ($-55^{\circ} < Tb < -5^{\circ}$) na região de estudo referente ao período de 2000 a 2015. A configuração observada nesta camada é a mesma das camadas anteriores, com a exceção de que os contornos de pixels estão mais espaçados. Isto indica que a atmosfera vai se tornando homogênea conforme aumenta a distância da superfície terrestre.

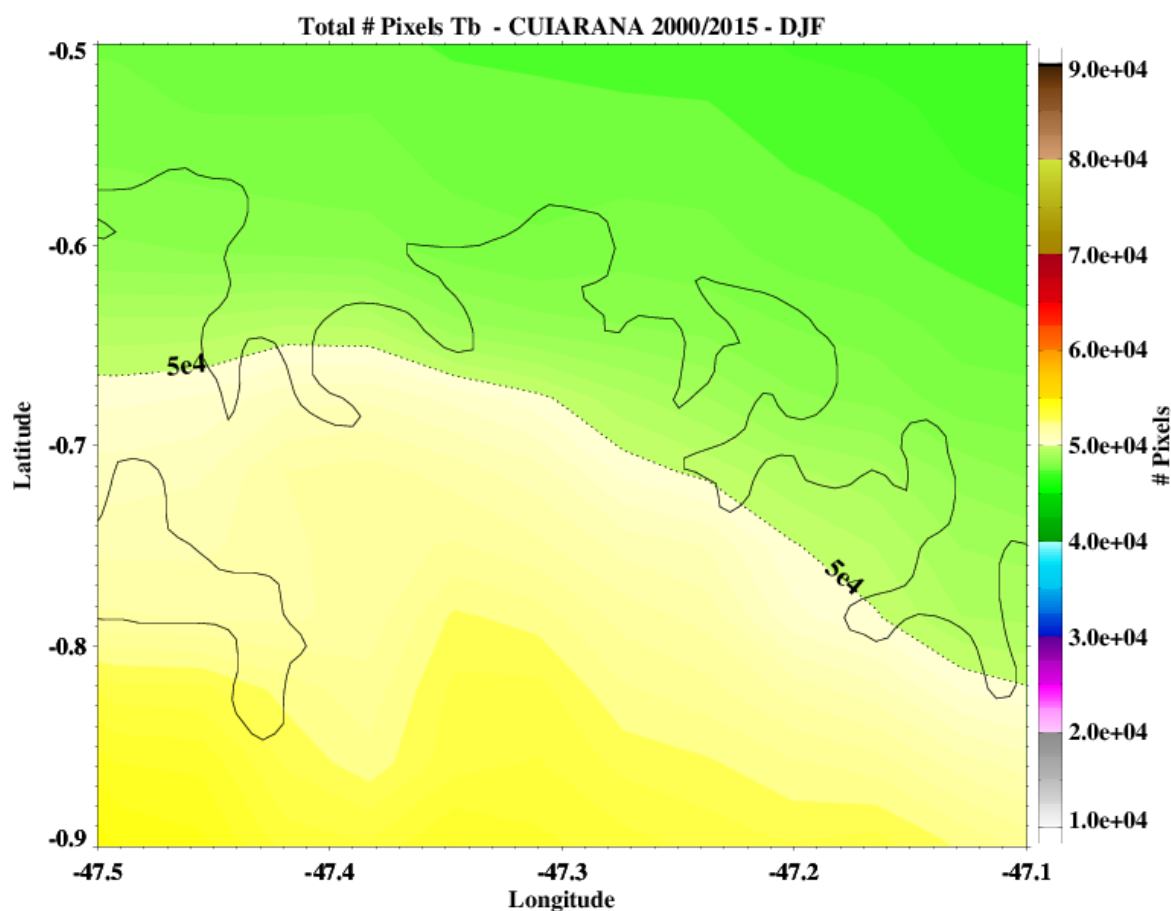
Figura 20 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens entre as camadas 4 e 8.



Fonte: Do autor.

A Figura 21 apresenta o número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera na região de estudo referente aos totais sazonais dos meses de dezembro a fevereiro do período de 2000 a 2015. Observa-se três distintas regiões de número de pixels, uma mais numerosa no interior do continente, uma menos numerosa sobre o oceano, e a uma de transição sobre a parte continental próxima de rios.

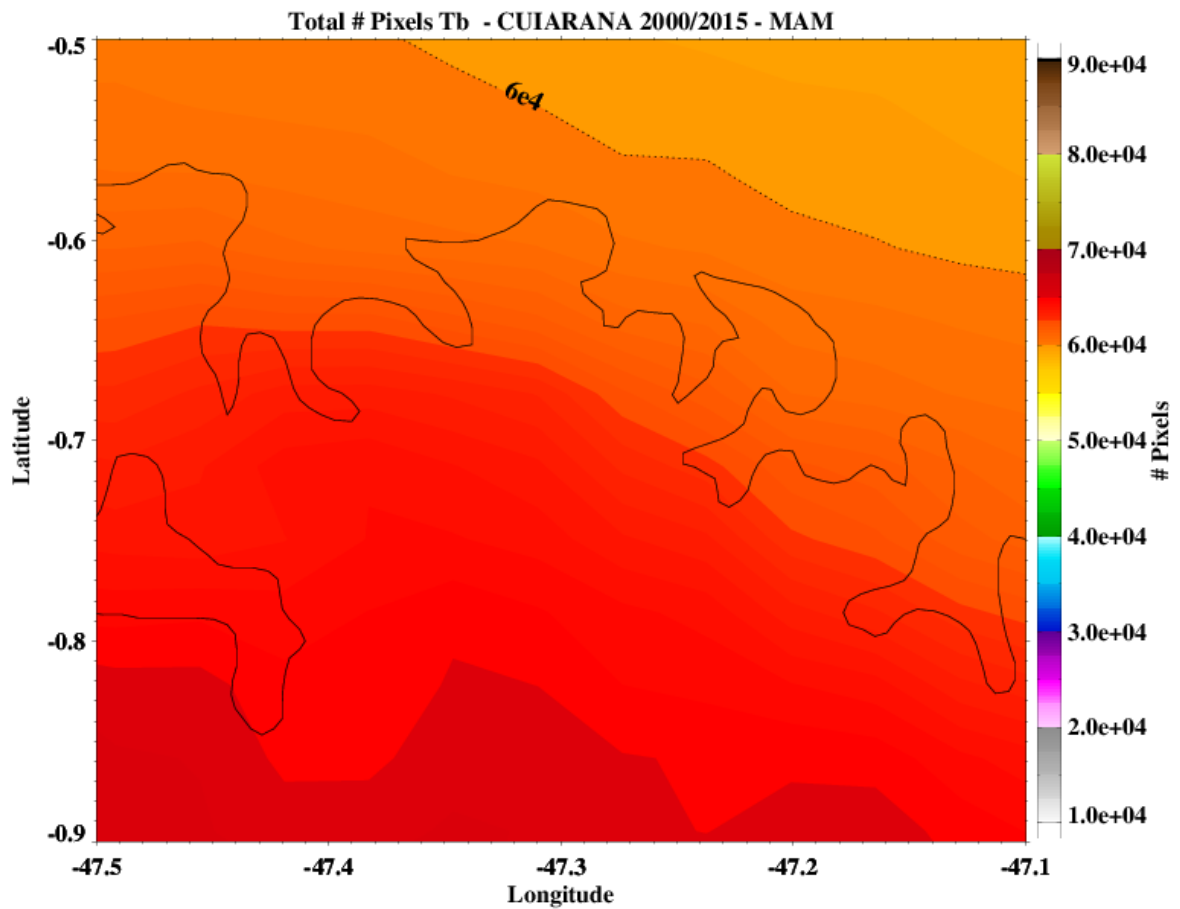
Figura 21 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera referente aos totais sazonais dos meses de dezembro a fevereiro.



Fonte: Do autor.

A Figura 22 apresenta o número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera na região de estudo referente aos totais sazonais dos meses de março a maio do período de 2000 a 2015. Neste trimestre, é possível observar um elevado número de pixels tanto no continente quanto no oceano. Estes valores máximos durante o período chuvoso, ocorrem devido a faixa de nebulosidade da ZCIT presente neste período.

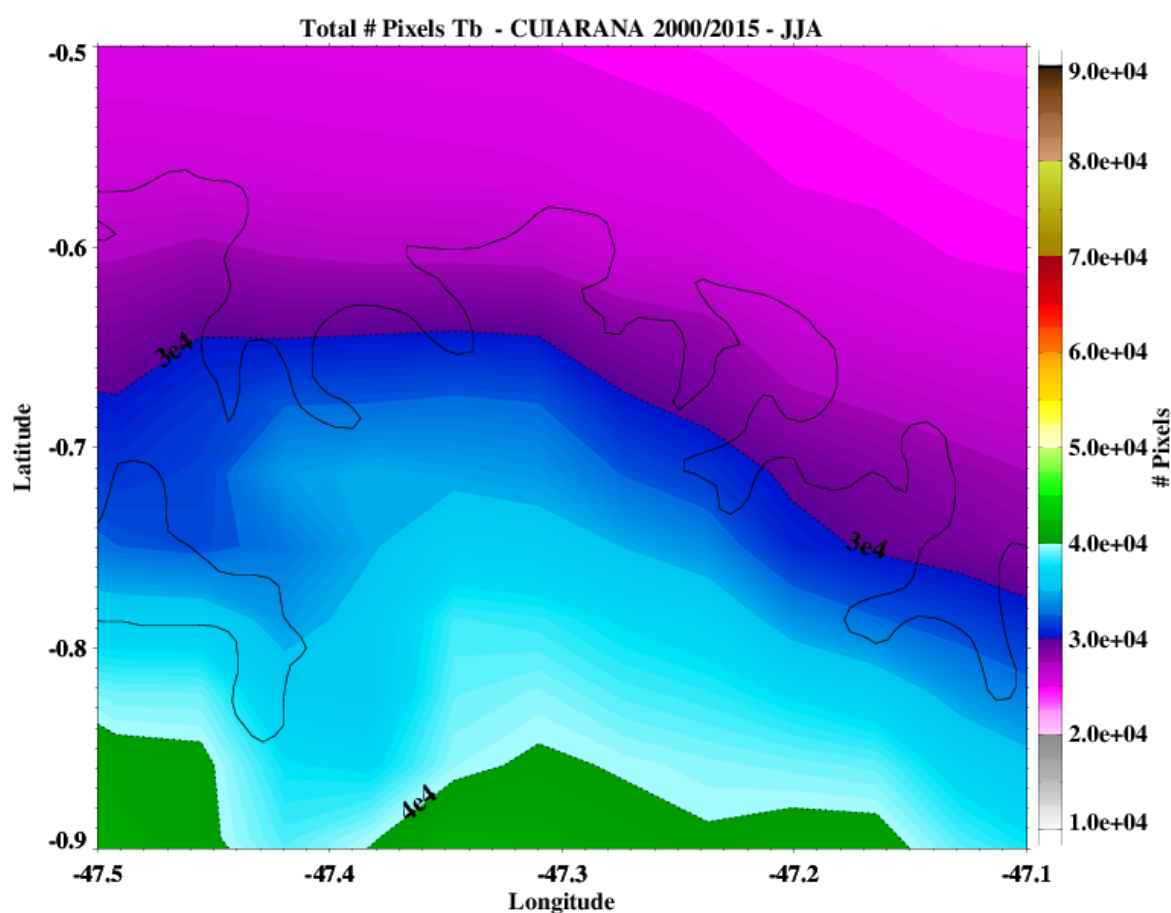
Figura 22 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera referente aos totais sazonais dos meses de março a maio.



Fonte: Do autor.

A Figura 23 apresenta o número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera na região de estudo referente aos totais sazonais dos meses de junho a agosto do período de 2000 a 2015. Observa-se uma diminuição significativa do número de pixels em relação ao trimestre anterior. Ou seja, a ausência da forte nebulosidade característica do período chuvoso é perceptível através do número de pixels.

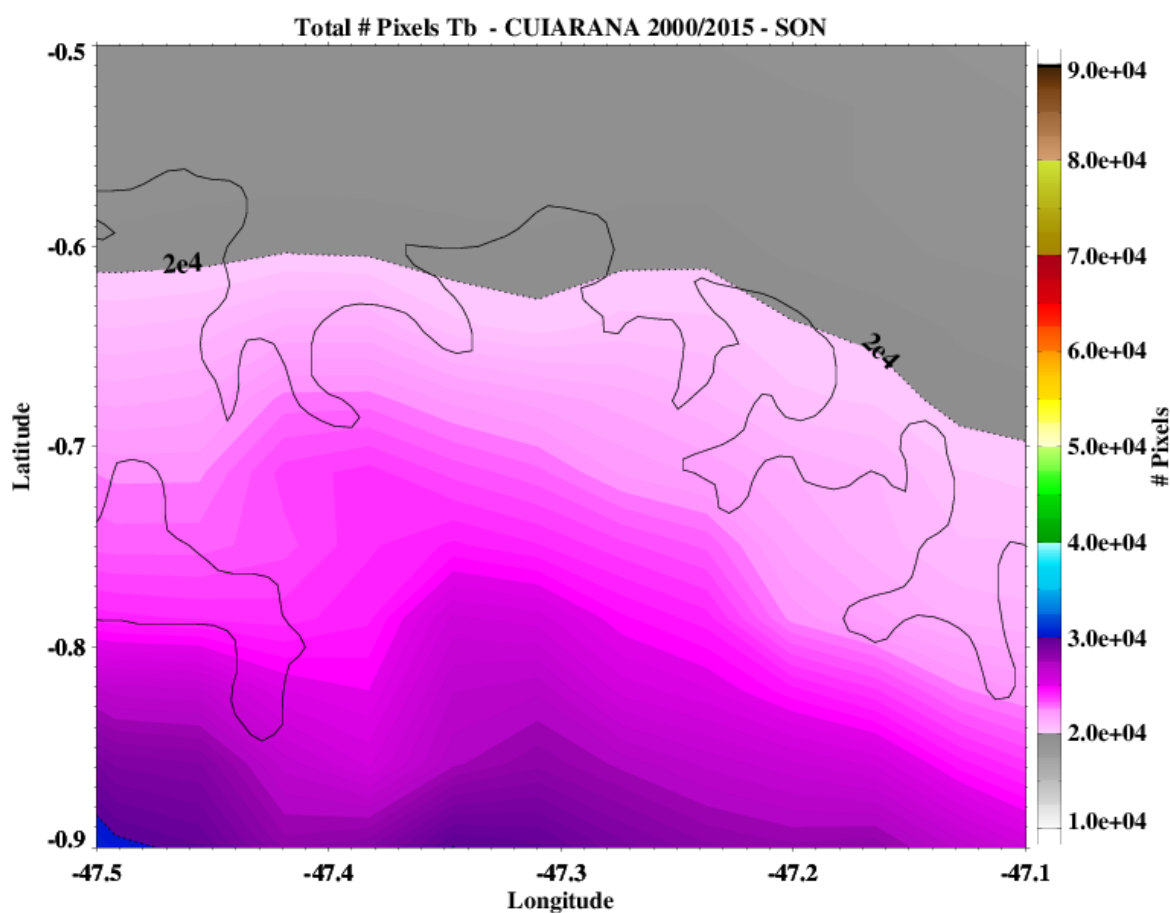
Figura 23 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera referente aos totais sazonais dos meses de junho a agosto.



Fonte: Do autor.

A Figura 24 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera na região de estudo referente aos totais sazonais dos meses de setembro a novembro do período de 2000 a 2015. Neste trimestre, é possível observar os menores valores de números de pixels, tanto no continente quanto no oceano, dentre todas as composições sazonais. Isto ocorre devido à ausência de nebulosidade, que além de contribuir com a emissão de energia infravermelha, também retêm parte do que é emitido pela Terra durante a noite.

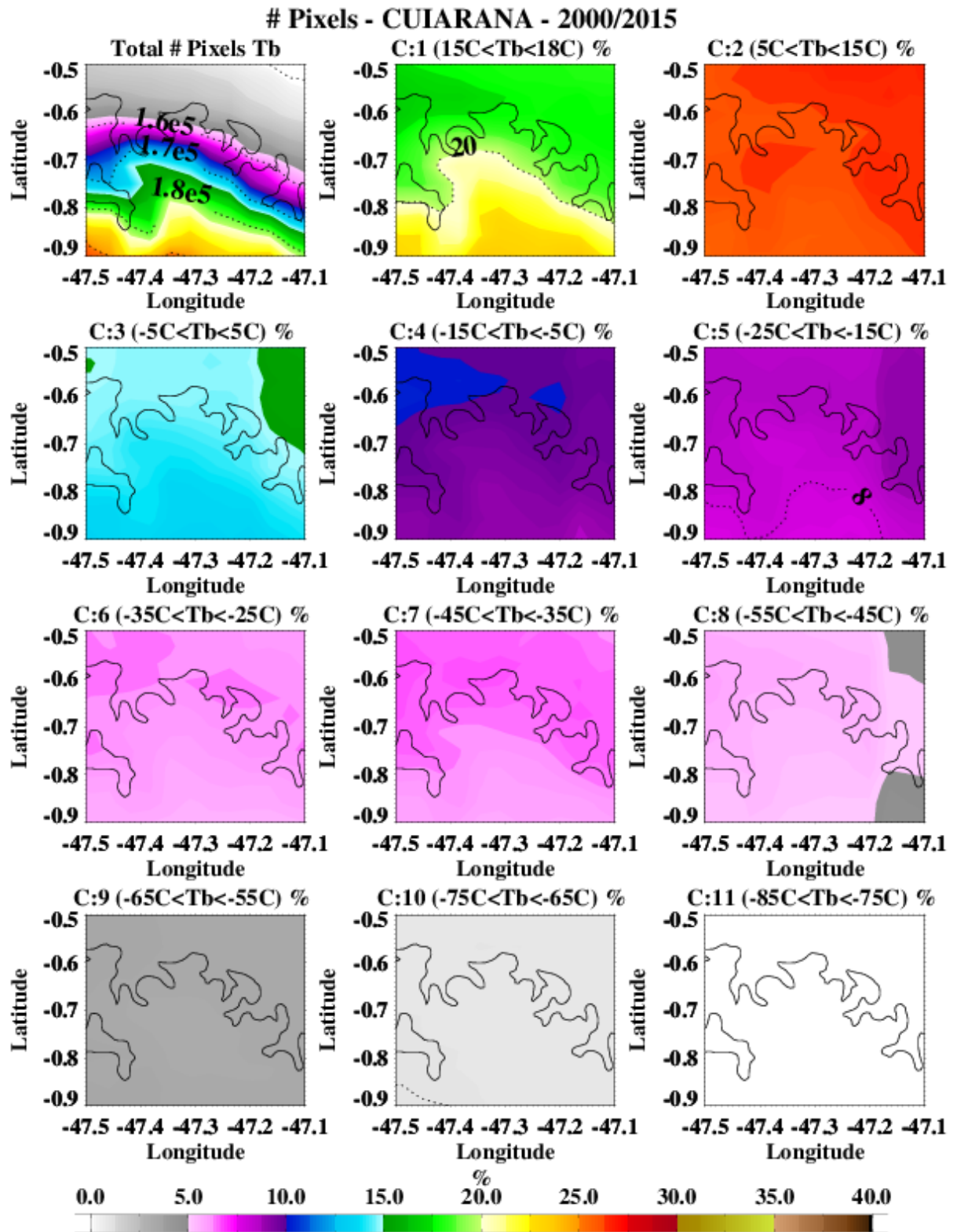
Figura 24 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera referente aos totais sazonais dos meses de setembro a novembro.



Fonte: Do autor.

A Figura 25 apresenta o número total de pixels de T_b do topo de nuvens da troposfera e a sua porcentagem distribuída em 11 camadas na região de estudo referente ao período de 2000 a 2015. A camada 1 ($15^{\circ}\text{C} < T_b < 18^{\circ}\text{C}$) tem entre 20% e 22% do número total de pixels sobre o continente, e tem entre 16% e 18% do número total de pixels sobre o litoral e o oceano. A camada 2 ($5^{\circ}\text{C} < T_b < 15^{\circ}\text{C}$) tem entre 26% e 27% do número total de pixels. A camada 3 a camada 3 ($-5^{\circ}\text{C} < T_b < 5^{\circ}\text{C}$) têm entre 12% e 15% do número total de pixels. A camada 4 ($-15^{\circ}\text{C} < T_b < -5^{\circ}\text{C}$) tem entre 9% e 10% do número total de pixels. A camada 5 ($-25^{\circ}\text{C} < T_b < -15^{\circ}\text{C}$) tem entre 8% e 9% do número total de pixels. As camadas 6 a 8 ($-55^{\circ}\text{C} < T_b < -25^{\circ}\text{C}$) têm entre 4% e 6% do número total de pixels. As camadas 9 e 10 ($-75^{\circ}\text{C} < T_b < -55^{\circ}\text{C}$) tem menos de 5% do total de pixels. E a camadas 11 ($-85^{\circ}\text{C} < T_b < -75^{\circ}\text{C}$) não registra número de pixels.

Figura 25 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera e a sua porcentagem distribuída em 11 camadas no período de 2000 a 2015.



Fonte: Do autor.

As Figuras 26 a 29 apresentam o número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera e a sua porcentagem distribuída em 11 camadas na região de estudo referente aos totais sazonais do período de 2000 a 2015.

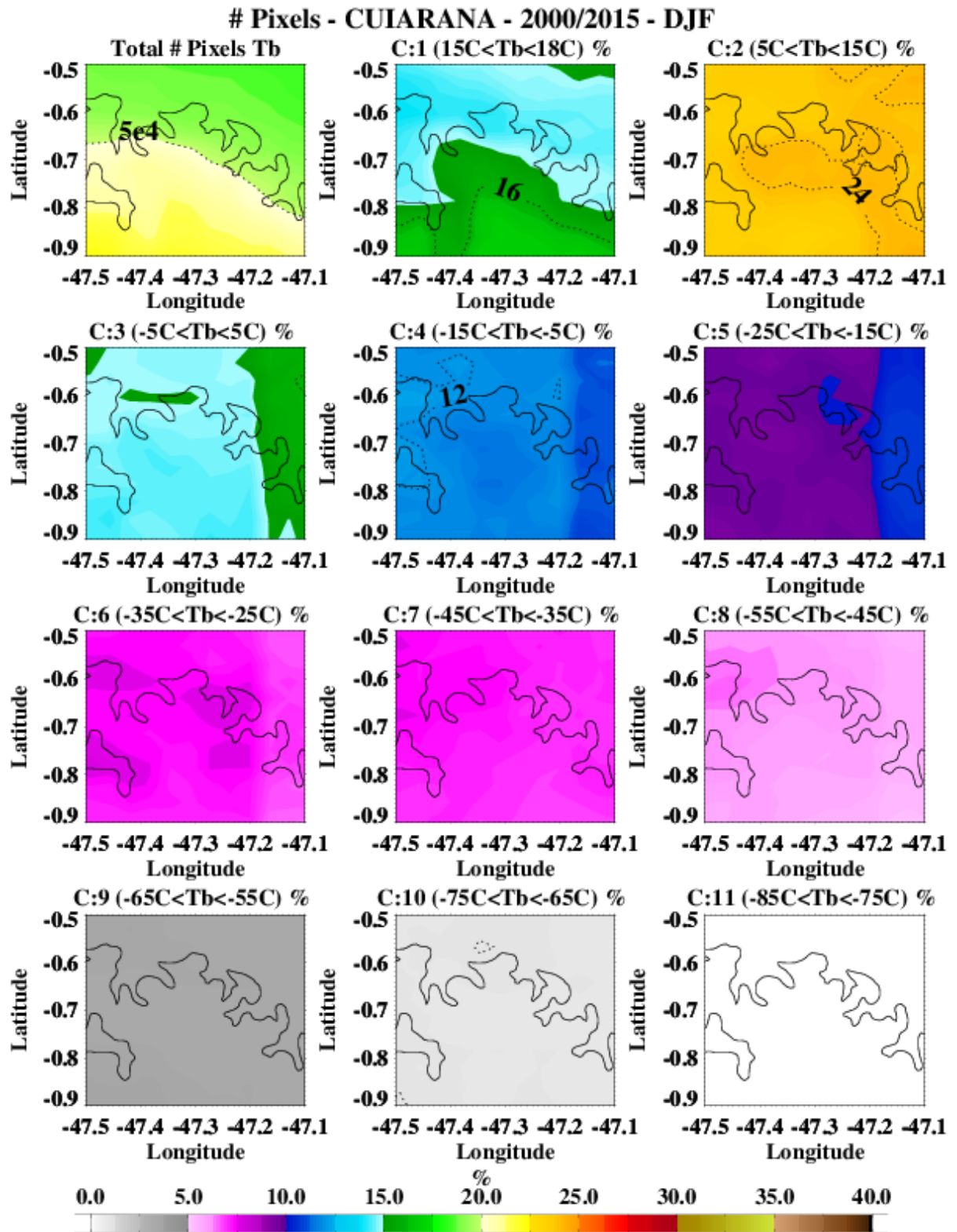
Na Figura 26, referente ao trimestre de dezembro a fevereiro (DJF), a camada 1 ($15^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) e a camada 3 ($-5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 5^{\circ}\text{C}$) têm entre 15% e 16% do número total de pixels. A camada 2 ($5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 15^{\circ}\text{C}$) tem 24% do total de pixels. A camada 4 ($-15^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -5^{\circ}\text{C}$) tem 12% do total de pixels. A camada 5 ($-25^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -15^{\circ}\text{C}$) tem entre 10% e 12% do número total de pixels. As camadas 6 a 8 ($-55^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -25^{\circ}\text{C}$) têm entre 6% e 7% do número total de pixels. As camadas 9 e 10 ($-75^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -55^{\circ}\text{C}$) tem menos de 5% do total de pixels. E a camadas 11 ($-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -75^{\circ}\text{C}$) não registra número de pixels.

Na Figura 27, relativa ao trimestre de março a maio (MAM), a camada 1 ($15^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) tem 11% do número total de pixels, mesma porcentagem das camadas 4 e 5 ($-25^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -5^{\circ}\text{C}$). A camada 2 ($5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 15^{\circ}\text{C}$) tem 22% do total de pixels. A camada 3 ($-5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 5^{\circ}\text{C}$) tem entre 15% e 16% do número total de pixels. As camadas 6 a 8 ($-55^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -25^{\circ}\text{C}$) têm entre 7% e 10% do número total de pixels. A camada 9 ($-65^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -55^{\circ}\text{C}$) tem 6% do total de pixels. A camada 10 ($-75^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -65^{\circ}\text{C}$) tem menos de 5% do total de pixels. E a camadas 11 ($-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -75^{\circ}\text{C}$) não registra número de pixels.

Na Figura 28, correspondente ao trimestre de junho a agosto (JJA), a camada 1 ($15^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) tem distintas regiões com porcentagens diferentes de pixels de Tb: o Oceano Atlântico, com 24% do total de pixels; o litoral do continente, com 28% do total de pixels; uma faixa continental longitudinal próxima do litoral, com 32% do total de pixels; e o interior do continente, que tem entre 36% e 37% do número total de pixels. A camada 2 ($5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 15^{\circ}\text{C}$) tem 32% do total de pixels. A camada 3 ($-5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 5^{\circ}\text{C}$) tem uma região predominantemente oceânica com 16% de pixels e uma região predominantemente continental com 15% de pixels. As camadas 4 e 5 ($-25^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -5^{\circ}\text{C}$) têm entre 5 e 7% do número total de pixels. As camadas 6 a 9 ($-25^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -65^{\circ}\text{C}$) têm menos de 5% do total de pixels. E as camadas 10 e 11 ($-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -65^{\circ}\text{C}$) não registram número de pixels.

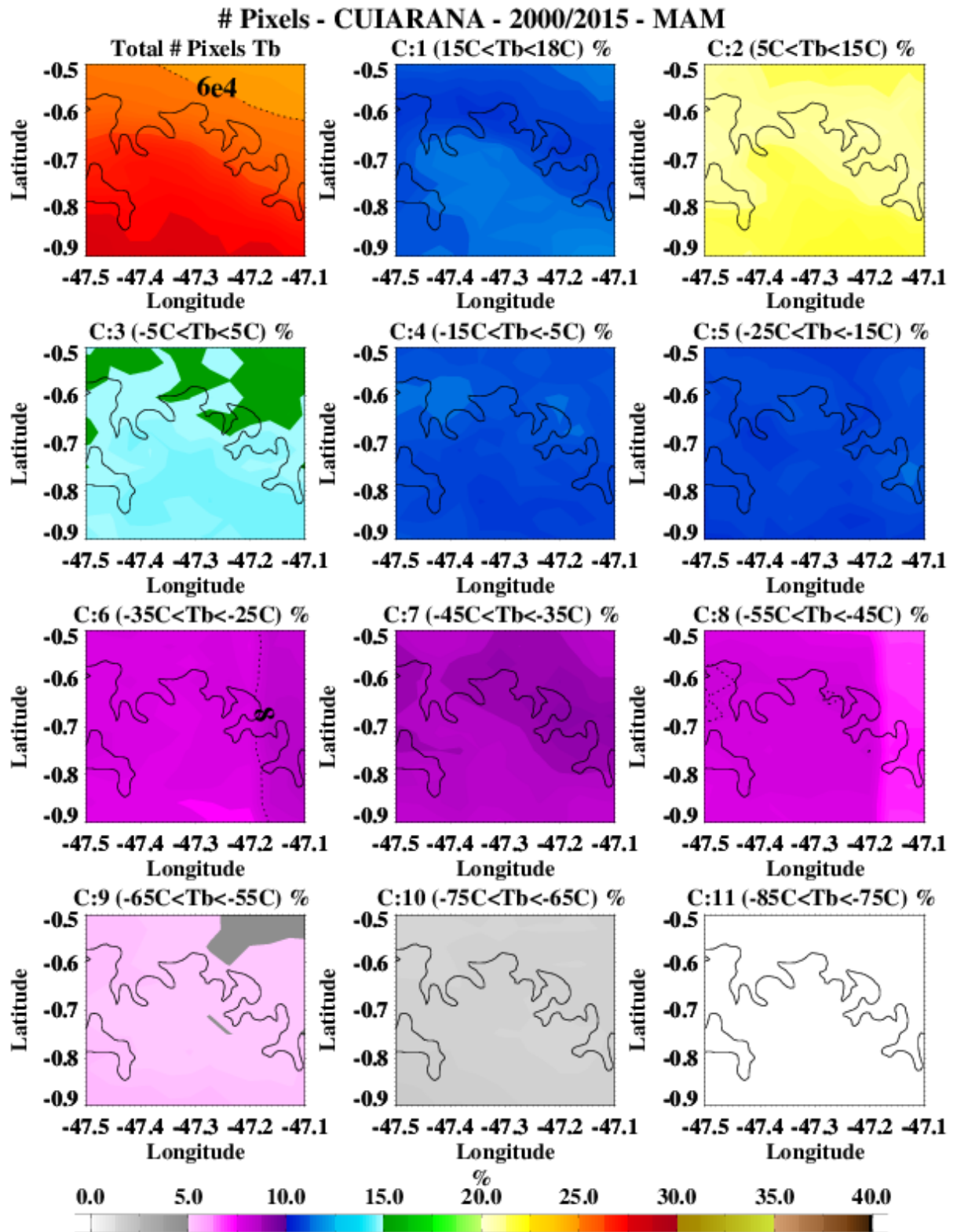
Na Figura 29, concernente ao trimestre de setembro a novembro (SON), as camadas 1 e 2 ($5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 18^{\circ}\text{C}$) têm contribuições de pixels de Tb do topo de nuvens mais relevantes entre toda a troposfera, com porcentagens de 36% sobre o oceano, e porcentagens acima de 40% sobre o continente. A camada 3 ($-5^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < 5^{\circ}\text{C}$) tem aproximadamente 12% do total de pixels em toda a região. As camadas 4 a 9 ($-65^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -5^{\circ}\text{C}$) têm menos de 6% do total de pixels. E as camadas 10 e 11 ($-85^{\circ}\text{C} < \text{Tb} < -65^{\circ}\text{C}$) não registram número de pixels.

Figura 26 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera e a sua porcentagem distribuída em 11 camadas referente aos totais sazonais de DJF do período de 2000 a 2015.



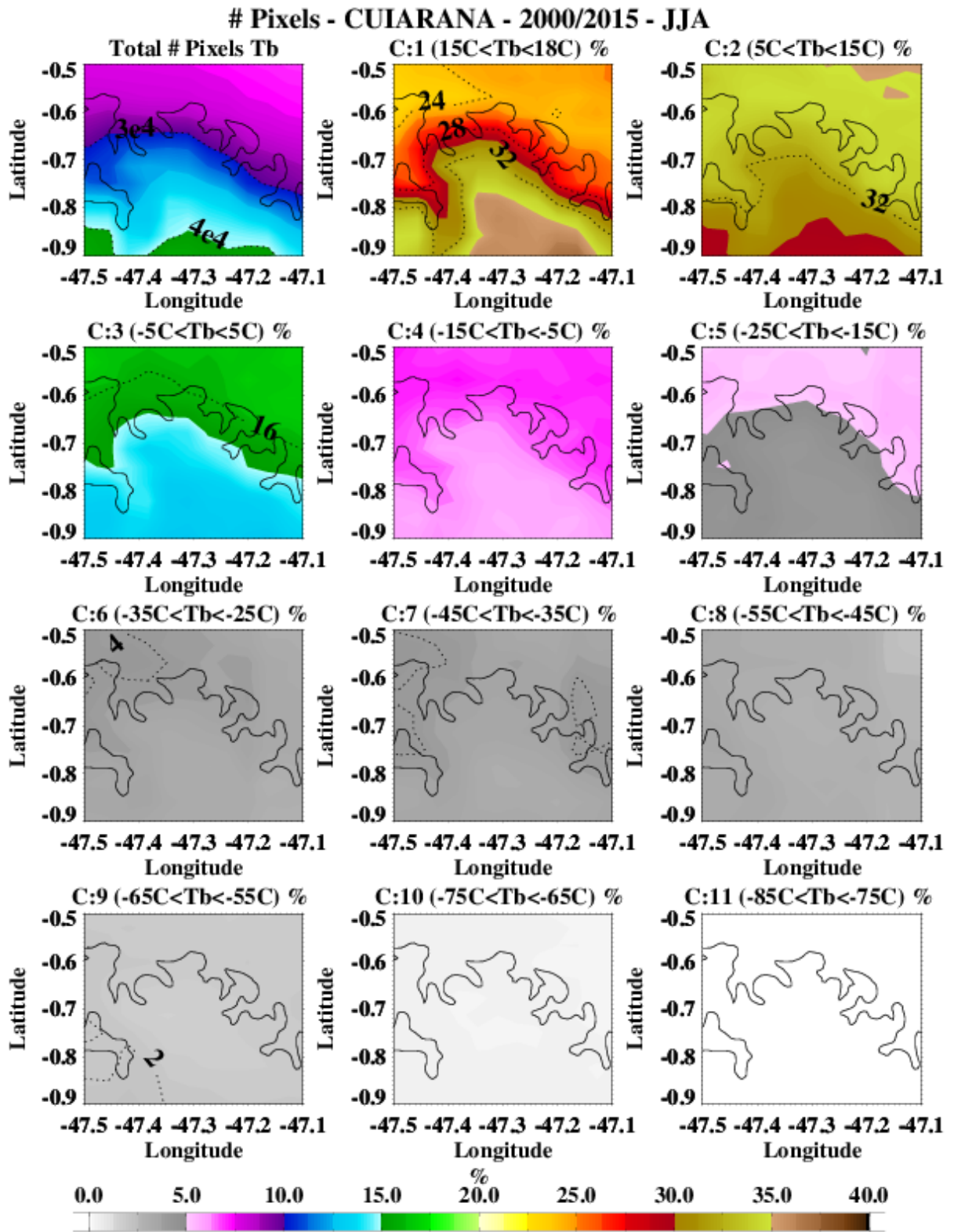
Fonte: Do autor.

Figura 27 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera e a sua porcentagem distribuída em 11 camadas referente aos totais sazonais de MAM do período de 2000 a 2015.



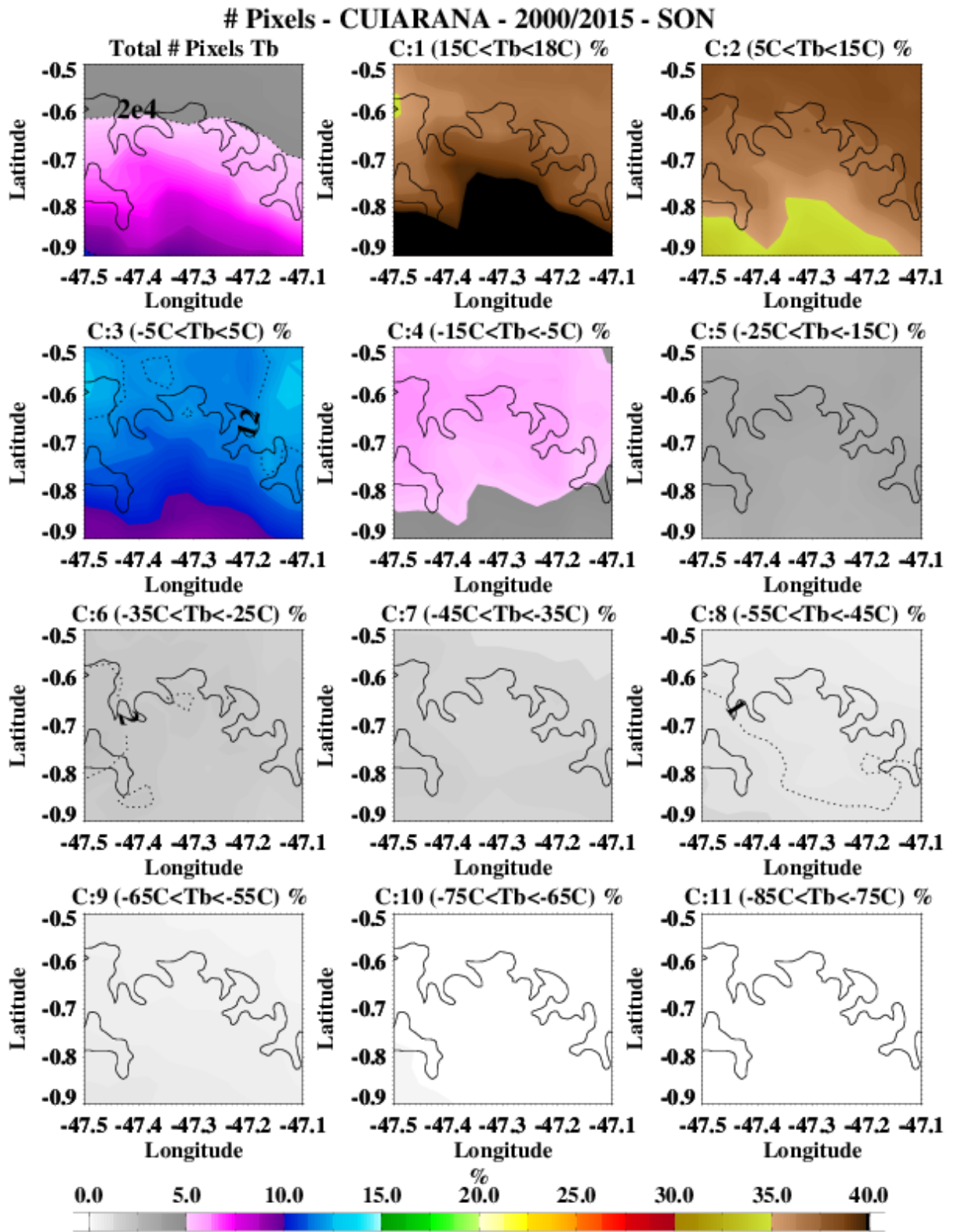
Fonte: Do autor.

Figura 28 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera e a sua porcentagem distribuída em 11 camadas referente aos totais sazonais de JJA do período de 2000 a 2015



Fonte: Do autor.

Figura 29 - Número total de pixels de Tb do topo de nuvens da troposfera e a sua porcentagem distribuída em 11 camadas referente aos totais sazonais de SON do período de 2000 a 2015



Fonte: Do autor.

6 CONCLUSÕES

Em relação ao ciclo diário anual e sazonal das variáveis meteorológicas medidas em Cuiarana:

1) a precipitação noturna é mais intensa. Logo, o ciclo diário de precipitação em Cuiarana é do tipo marítimo, conforme a classificação proposta por Yang, Kuo e Smith (2008). Sazonalmente, o período chuvoso corresponde ao trimestre de março a maio (MAM) e o período seco corresponde ao trimestre de setembro a novembro (SON);

2) nos meses de março a maio (MAM), a temperatura do ar é inferior à média anual, possivelmente, devido a nebulosidade presente neste período impede que parte da radiação solar incida sobre a superfície terrestre. E no trimestre de setembro a novembro (SON), a temperatura do ar é maior do que a média anual, provavelmente, a ausência de nuvens, que possam absorver ou refletir a radiação solar, é o principal fator para o aumento da temperatura do ar;

3) o período entre 19:00 e 6:00 HL foi identificado como o mais úmido, conseqüentemente, este intervalo de tempo é bastante favorável para o ar atingir a saturação, o que pode contribuir para a geração de precipitação noturna. Nas análises das composições sazonais, os resultados corroboram com os de Moraes *et al.* (2005), que investigaram a variabilidade da precipitação no Estado do Pará e encontraram valores mais elevados de umidade relativa do ar no trimestre mais chuvoso (MAM), em consequência das temperaturas menores desse período, e valores menores no trimestre seco (SON), em decorrência das temperaturas maiores desse período;

4) os valores mínimos da velocidade do vento no período noturno em contraste com os valores máximos no período matutino e vespertino indicam que a atuação da brisa terrestre ocorre durante a noite e na virada para o dia, e a atuação da brisa marítima a partir das primeiras horas do dia, em todas as quatro estações do ano. Isto significa que a região de Cuiarana recebe influência de características regionais, tal como as circulações de brisas, marítima e terrestre, que de acordo com Kousky (1980), modulam a variabilidade diária da precipitação. Nas análises das composições sazonais, a velocidade do vento é menor no trimestre de MAM devido a nebulosidade que serve como barreira, impedindo a passagem do vento, e maior durante o trimestre de SON, já que a nebulosidade é menor;

5) o ciclo diário das componentes do vento revelou que a predominância de ventos de leste durante o dia e o enfraquecimento durante a noite, confirmam a existência de sistemas locais de brisas.

Em relação ao ciclo diário anual e sazonal do número total de pixels de Tb do topo de nuvens:

1) a ocorrência de nuvens baixas e médias é predominante durante o período noturno e matutino, enquanto que a ocorrência de nuvens com topos frios é maior no período noturno. Estes valores máximos de número de pixels observados durante o período noturno coincidem com a precipitação mais intensa (0,3 mm/hora) observada em Cuiarana;

2) as composições sazonais do ciclo diário apresentam contribuições mais expressivas de pixels de Tb do topo de nuvens nos meses mais chuvosos de dezembro a fevereiro (DJF) e de março a maio (MAM). Durante este semestre, os resultados indicam que a precipitação pluviométrica da estação de Cuiarana tem a maior contribuição proveniente de nuvens oceânicas quentes na metade do período noturno e em todo o período matutino, associadas com a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT);

3) as composições sazonais do ciclo diário apresentam contribuições menos expressivas de pixels de Tb's do topo de nuvens nos meses menos chuvosos de junho a agosto (JJA) e de setembro a novembro (SON), decorrentes da nebulosidade gerada pela convecção local, sistemas locais de brisas, e de pontuais SCM;

4) durante os trimestres de DJF e MAM, as nuvens altas cirrus, que possuem uma grande emissividade e temperaturas de brilho frias, são geralmente formadas pela convecção profunda. Já nos trimestres de JJA e SON, as nuvens cirrus não estão associadas à precipitação. Ou seja, os topos de nuvens com baixas temperaturas de brilho nem sempre estão associados com a ocorrência de precipitação, pois nem toda nuvem brilhante ou com topo frio que possui refletância baixa no canal infravermelho, está efetivamente produzindo precipitação. Por isso, foi necessário comparar as análises de Tb com os dados de precipitação para confirmar se os topos frios registrados no canal infravermelho realmente estavam produzindo precipitação;

5) o ciclo diário do número de pixels varia de acordo com a camada da troposfera e com a grade. De uma forma geral, as grades localizadas no interior do continente possuem um número de pixels maior em relação às grades localizadas perto do litoral ou sobre o Oceano Atlântico. Esta configuração típica é decorrente de alguns fatores, como por exemplo, o alto calor específico da água, a nebulosidade maior no continente do que no oceano, a topografia da região e a presença de corpos d'água;

6) a similaridade entre as séries temporais estudadas atesta que os valores totais de números de pixels são bem representativos para a região de estudo. Ou seja, apesar destes dados

não fazerem parte de uma climatologia, eles oferecem diagnósticos que são válidos para a região de estudo.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, M. F.; SOUZA, E. B.; OLIVEIRA, M. C. F.; SOUZA JÚNIOR, J. A. Precipitação nas mesorregiões do Estado do Pará: climatologia, variabilidade e tendência nas últimas décadas (1978-2008). *R. bras. Climatol.*, v. 6, p. 151-168, jun. 2010.
- AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C. Padrões espaço-temporal pluviométricos na Amazônia Oriental utilizando análise multivariada. *R. bras. Meteorol.*, v. 27, n. 4, p. 423-434, dez. 2012.
- ANABOR, V. *Análise descritiva dos sistemas convectivos de escala meso- α através de imagens de satélite GOES-8*. 2004. 78 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- AVILA, A. M. H. *Estimativa de precipitação em regiões tropicais utilizando imagens do satélite GOES 12*. 2006. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- BARBOSA, E. B. M.; CAVALCANTI, I. F. A. Variabilidade interanual e sazonal da atividade convectiva sobre a América do Sul utilizando dados digitais de imagens de satélite. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15., 2000. Rio de Janeiro. *Anais...* Disponível em: <<http://www.cbmet.com/>>. Acesso em: 11 nov. 2015.
- COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS, M. A. F.; NOBRE, C. A. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: A case study. *Mon. Wea. Rev.*, v. 123, p. 3163-3174, nov. 1995.
- COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai superior. *R. bras. Cartogr.*, n.º. 59/01, p. 93-99, abr. 2007.
- COSTA, S. M. F. *Metodologia alternativa para o estudo do espaço metropolitano, integrando as tecnologias de SIG e sensoriamento remoto - aplicação à Área Metropolitana de Belo Horizonte*. 1996. 200f. Tese (Doutorado em Informação Espacial) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- CONTI, G. N. *Estimativa de precipitação através de técnicas de sensoriamento remoto: estudo de caso para o Rio Grande do Sul*. 2002. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- FALESI, L. A.; SANTANA, A. C.; HOMMA, A. K. O.; GOMES, S. C. Dinâmica do mercado de frutas da mesorregião Nordeste Paraense no período de 1985-2005: produção e preços. *Teoria e Evidência Econômica*, v. 16, n. 35, p. 306-326, jul./dez. 2010.
- FERREIRA, D. B. S.; SOUZA, E. B.; MORAES, B. C. Ciclo horário da precipitação no leste da Amazônia durante o período chuvoso. *R. bras. Climatol.*, v. 13, p. 74-86, jul./dez. 2013.
- GOES N Data Book. Disponível em: <http://goes.gsfc.nasa.gov/text/GOES-N_Databook/databook.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2015.

HOUZE JUNIOR, R. A. Mesoscale Convective Systems. *Rev. Geophys.*, v. 42, p. 1-43, dez. 2004.

JANOWIAK, J. E.; ARKIN, P. A.; MORRISSEY, M. An examination of the diurnal cycle in oceanic tropical rainfall using satellite and in situ data. *Mon. Wea. Rev.*, v. 122, p. 2296–2311, out. 1994.

JANOWIAK, J. E.; JOYCE, R. J.; YAROSH, Y. A real-time global half-hourly pixel-resolution infrared dataset and its applications. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 82, n. 2, p. 205-218, fev. 2001.

KOUSKY, V. E. Diurnal rainfall variation in northeast Brazil. *Mon. Wea. Rev.*, v. 108, p. 488-408, abr. 1980.

KUMMEROW, C.; BARNES, W.; KOZU, T.; SHIUE, J.; SIMPSON, J. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, v. 15, p. 809–817, jun. 1998.

LOPES, M. N. G.; SOUZA, E. B.; FERREIRA, D. B. S. Climatologia regional da precipitação no Estado do Pará. *R. bras. Climatol.*, v. 12, p. 84-102, jan./jul. 2013.

MARENGO, J.; HASTENRATH, S. Case studies of extreme climatic events in the Amazon basin. *J. Climate*, v.6, n.4, p. 617-627, abr. 1993.

MENEZES, F. P.; FERNANDES, L. L.; ROCHA, E. J. P. O uso da estatística para regionalização da precipitação no Estado do Pará, Brasil. *R. bras. Climatol.*, v. 16, p. 64-71, jan./jul. 2015.

MOLION, L. C. B. Climatologia dinâmica da região amazônica: mecanismos de precipitação. *R. bras. Meteorol.*, v. 2, p. 107-117, jun. 1987.

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 Amaz.*, v. 35, n. 2, p. 207-214, jun. 2005.

MOTA, G. V. *Characteristics of rainfall and precipitation features defined by the tropical rainfall measuring mission over South América*. 2003. 215 f. Tese (Doctor of Philosophy) - Department of Meteorology, University of Utah, Salt Lake City, 2003.

NASA - Tropical Rainfall Measuring [online]. Disponível em: <<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 14 dez. 2015.

NESBITT, S. W.; ZIPSER, E. J.; CECIL, D. J. A census of precipitation features in the tropics using TRMM: radar, ice scattering, and lightning observations. *J. Climate*, v. 13, p. 4087-4106, dez. 2000.

NOAA's Geostationary and Polar-Orbiting Weather Satellites [online]. Disponível em: <<http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/genlsatl.html>>. Acesso em: 14 dez. 2015.

ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 56, p. 527–530, mai. 1975.

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

RE-ENTRY and Risk Assessment for the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) NASA Orbital Debris Program Office [Update on 4 June 2015] [online]. Disponível em: <http://trmm.gsfc.nasa.gov/publications_dir/TRMM_Reentry_Risk_Assessment_FINAL_2015_0604.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2016.

ROCHA, E. J. P. *Balanço de umidade e influências de condições de contorno superficiais sobre a precipitação da Amazônia*. 2001. 210 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 2001.

SILVA, C. M. S. Ciclo diário e semidiário de precipitação na costa norte do Brasil. *R. bras. Meteorol.*, v. 28, n. 1, p. 34-42, mar. 2013.

SILVA, C. M. S.; FREITAS, S. R.; GIELOW, R. Ciclo diário da precipitação estimada através de um radar banda S e pelo algoritmo 3B42_V6 do projeto TRMM durante a estação chuvosa de 1999 no sudoeste da Amazônia. *R. bras. Meteor.*, v. 26, n. 1, p. 95-108, mar. 2011.

SILVA NETO, C. P. *Abordagem descritiva de topo de sistemas convectivos baseada em combinações de diferenças de temperatura de canais do Meteosat-9 e modelo numérico*. 2014. 126 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.

TEIXEIRA, V. A. *Características e distribuição das descargas atmosféricas e dos sistemas precipitantes produtores de raios na Amazônia Oriental*. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

YANG, S.; KUO, K. S.; SMITH, E. A. Persistent nature of secondary diurnal modes of precipitation over oceanic and continental regimes. *J. Climate*, v. 21, p. 4115-4131, ago. 2008.

YANG, G. Y.; SLINGO, J. The diurnal cycle in the Tropics. *Mon. Wea. Rev.*, v. 129, p. 784-801, abr. 2001.

YANG, S.; SMITH, E. A. Mechanisms for diurnal variability of global tropical rainfall observed from TRMM. *J. Climate*, v. 19, p. 5190-5226, out. 2006.