


Artigo

## Evolução da Estrutura Térmica de um Ciclone Tropical e sua Transição Extratropical: Caso Talim

Lorena Bezerra da Rocha<sup>1</sup> , Michelle Simões Reboita<sup>2</sup>, Lívia Márcia Mosso Dutra<sup>1</sup>,  
Bruno César Capucin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.*

<sup>2</sup>*Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil.*

Recebido em: 15 de Janeiro de 2020 - Aceito em: 29 de Junho de 2020

### Resumo

A comunidade científica por muito tempo considerou a existência de apenas dois tipos de ciclones de escala sinótica em superfície, tropicais e extratropicais, com base nas características de gênese e local de atuação desses sistemas. A metodologia do *Cyclone Phase Space* (CPS) desenvolvida por Hart, no início da década de 2000, deixou evidente que não há apenas os dois tipos mencionados, mas que existe um *continuum*, de forma que os ciclones podem evoluir de um tipo a outro. Diante desse contexto, o objetivo do estudo é descrever a evolução sinótica da transição do ciclone Talim, que teve gênese como ciclone tropical e decaiu como ciclone extratropical. Esse sistema se desenvolveu no oeste do oceano Pacífico Norte no dia 10 de setembro de 2017. Através do CPS, foram definidas quatro fases no ciclo de vida do Talim: a de ciclone tropical, início da transição para extratropical, fim da transição e fase de ciclone extratropical. A fase de transição foi marcada pelo início da interação do sistema tropical com uma região com baroclinia, enquanto que o término da transição ocorreu quando o sistema adquiriu um núcleo frio e sistemas frontais associados.

**Palabras-clave** *Cyclone Phase Space*, análise sinótica, transição extratropical, oceano Pacífico Norte.

## Thermal Structure Evolution of a Tropical Cyclone and its Extratropical Transition: Talim Case

### Abstract

The scientific community has long considered the existence of only two types of surface synoptic scale cyclones, tropical and extratropical, based on their genesis area. The Cyclone Phase Space (CPS) methodology developed by Hart in the early 2000s made it clear that these are not the only existing types of cyclone, but instead there is a continuum, and therefore cyclones can evolve from one type to another. Given this context, the objective of this study is to describe the synoptic evolution of the transition of cyclone Talim, which had genesis as a tropical cyclone and decayed as an extratropical cyclone. This system developed in the west of the North Pacific Ocean on September 10, 2017. Through the CPS, four phases of Talim's life cycle were selected: tropical cyclone, beginning of extratropical transition, end of transition and extratropical cyclone phase. The transition phase was marked by the beginning of the interaction of the tropical system with a baroclinic region, while the end of the transition occurred when the system acquired a cold core and had frontal systems associated.

**Keywords:** Cyclone Phase Space, synoptic analysis, extratropical transition, North Pacific ocean.

### 1. Introdução

No início do século XX os ciclones extratropicais ganharam atenção através dos estudos desenvolvidos na escola norueguesa de Bjerknes (Bjerknes, 1919; Bjerknes e Solberg, 1922). Em meados do mesmo século, come-

çaram os avanços no conhecimento dos ciclones tropicais (Gray, 1968). Uma breve descrição dos dois tipos de ciclones pode considerar que os ciclones extratropicais (CEs) possuem núcleo frio, ventos que aumentam de intensidade com a altura e nebulosidade assimétrica. Esses sistemas se formam preferencialmente em latitudes

médias, devido à presença de gradientes horizontais de temperatura em superfície (baroclinia) e, também, pela influência de ondas no escoamento em médios e altos níveis da atmosfera. Retomando as ideias da escola norueguesa (Bjerknes, 1919 e Bjerknes e Solberg, 1922), a formação dos CEs está associada à Teoria da Frente Polar, que seria o resultado da interação de massas de ar polar e tropical; de forma que pode-se dizer que esses ciclones são associados a sistemas frontais. Os ciclones tropicais (CTs) possuem núcleo quente, ventos mais intensos em baixos níveis da atmosfera e aparência simétrica na nebulosidade (Elsberry, 1995; Evans *et al.*, 2017). Esses sistemas se formam sobre os oceanos tropicais e subtropicais com processo de gênese associado à interação de uma anomalia de vorticidade relativa ciclônica em superfície com a evaporação dos oceanos e, conseqüente, liberação de calor latente de parcelas úmidas de ar que ascendem na atmosfera e condensam (Stull, 2017). Como essas parcelas, ao ascender, divergem, acabam reduzindo o peso na coluna atmosférica, contribuindo, assim, para a diminuição da pressão em superfície (Gray, 1968). De acordo com o *National Hurricane Center* (NHC, s/d), CTs que atingem ventos superiores a  $119 \text{ km h}^{-1}$  ( $32 \text{ m s}^{-1}$ ) são denominados de furacão na bacia do Atlântico Norte e Pacífico Leste, e de tufão no Pacífico Oeste. Ao encontrarem áreas que não são fontes de energia térmica, como águas mais frias e regiões continentais, os CTs enfraquecem ou começam a evoluir para sistemas híbridos (subtropicais), que podem ainda chegar ao estágio de extratropical. Quando um ciclone evolui da categoria de tropical para extratropical é dito que o sistema teve transição extratropical (TE; Evans e Hart, 2003; Zarzycki *et al.*, 2017). Com relação à estrutura termodinâmica dos ciclones, nos extratropicais o núcleo frio é inclinado com altura em direção ao ar frio e torna-se alinhado na vertical quando o sistema atinge o estágio de oclusão (Ahrens, 2012; Stull, 2017; Reboita *et al.*, 2017a-b). Já os ciclones tropicais apresentam núcleo quente em relação ao ambiente ao seu redor e sem inclinação vertical, se estendendo de baixos níveis até próximo à estratosfera (Ahrens, 2012; Stull, 2017; Reboita *et al.*, 2017a-b). Quanto aos ciclones subtropicais, esses apresentam núcleo quente em baixos níveis e frio em altos níveis, além disso, a intensidade desses núcleos é menor do que a dos ciclones tropicais e extratropicais (Reboita *et al.*, 2017a-b; Reboita *et al.*, 2019).

Com relação aos ciclones híbridos, também chamados de subtropicais, esses podem ter gênese híbrida ou ser o estágio de um ciclone tropical (extratropical) em transição extratropical (tropical). Os ciclones subtropicais possuem núcleo frio em altos níveis, como os ciclones extratropicais, e quente em baixos níveis, como os ciclones tropicais (Evans e Guishard, 2009; Reboita *et al.*, 2019). Para uma descrição detalhada dos três tipos de ciclones, recomendam-se os estudos de Reboita *et al.* (2017a-b), enquanto para uma revisão da literatura sobre

ciclones subtropicais (CSs), o trabalho de da Rocha *et al.* (2019).

Até o início do século XXI, a comunidade científica classificava os ciclones em apenas extratropical e tropical, embora o estudo de Gray (1968) já mencionava a existência de ciclones com características intermediárias entre esses dois tipos e os chamava de subtropical. A mudança nesse paradigma ocorre com a introdução da metodologia do *Cyclone Phase Space* (CPS) por Hart (2003). O CPS mostra que ciclo de vida de um ciclone é um “continuum”, pois pode ter gênese como CE, passar por um estágio intermediário (chamado de híbrido ou subtropical) e chegar ao estágio de CT, ou vice-versa. Em outras palavras, um ciclone pode ter gênese numa categoria e decair em outra. Para caracterizar a evolução dos ciclones, o CPS utiliza de três parâmetros que descrevem a estrutura dinâmica e termodinâmica dos ciclones (Hart, 2003; Gan e Seluchi, 2009): a diferença de espessura da camada 600-900 hPa em dois semicírculos que constituem a região do ciclone; o vento térmico na baixa troposfera (600-900 hPa) e o vento térmico na alta troposfera (300-600 hPa).

De acordo com Jones *et al.* (2003), alguns CTs que se deslocam para latitudes mais altas perdem suas características tropicais e evoluem para um CE, caracterizando uma TE, que pode ser descrita em termos da interação do ciclone com um ambiente baroclínico (Harr e Elsberry, 2000). Evans e Hart (2003) mencionam que o aumento da assimetria de um CT é o elemento chave para detectar o início de uma transição (o que pode ser medido pelo CPS), mas que muitos CTs podem começar a transição para CE e nunca conseguem chegar a essa categoria (isto é, podem não chegar a ter núcleo frio tanto em altos como em baixos níveis). Esses mesmos autores examinaram a evolução e estrutura térmica de 61 ciclones tropicais em TE ocorridos no Atlântico Norte no período de 1979 a 1993 a fim de obter critérios quantitativos para a definição do início e fim da TE com o auxílio do CPS. O início da TE ocorre quando a tempestade se torna assimétrica, o que é medido pelo parâmetro de espessura do CPS entre os níveis de 600-900 hPa; já o fim da transição é identificado quando o ciclone adquire núcleo frio em baixos níveis, o que é obtido através do vento térmico também entre os níveis de 600-900 hPa (Evans e Hart, 2003). Os limiares obtidos pelos autores são apresentados na seção 2.2 do presente estudo.

A literatura sobre metodologias para a classificação da TE não é extensa. Além do método do CPS, encontram-se os métodos de: (a) análise da evolução da frontogênese de um ciclone (Harr e Elsberry, 2000) e (b) identificação do surgimento de uma onda no campo de altura geopotencial em 500 hPa (Demirci *et al.*, 2007). Kofron *et al.* (2010) revisaram as metodologias dos autores previamente citados (frontogênese, altura geopotencial em 500 hPa e CPS) através do estudo de 82 ciclones tropicais no Atlântico Norte e no oeste do Pacífico Norte. Ao inves-

tigar a trajetória, e definir o momento exato de TE, concluíram que todos os métodos possuem desvios em relação ao momento em que a TE ocorre. Entretanto, o CPS consegue capturar o momento exato da TE em 66 dos 82 casos, o que mostra uma boa performance do método.

Alguns estudos fizeram uma síntese da ocorrência de TEs em diferentes bacias oceânicas no globo (mas não possuem o mesmo período de estudo) e obtiveram que, em média, 46% dos CTs transicionam para CE no Atlântico Norte (Hart e Evans, 2001), 27% no oeste do Pacífico Norte (Klein *et al.*, 2000) e 10% no setor a oeste da Austrália (Foley e Hanstrum, 1994). O estudo de CTs com TE é de extrema importância, visto que a fase extratropical também gera ventos fortes e precipitação intensa, podendo causar grandes prejuízos e fatalidades. Um exemplo disso foi a TE do furacão Sandy, que ocorreu em 2012 e afetou o leste dos Estados Unidos. O período de transição foi caracterizado por uma tempestade violenta que atingiu a região de *New Jersey* a *Rhode Island*, em decorrência do forte gradiente de pressão no lado norte do ciclone (Galarneau *et al.*, 2013).

Considerando o oceano Pacífico Norte, a frequência dos CTs por ano em sua porção oeste é bem maior do que em outras bacias oceânicas (Kitabatake, 2011), além de ser uma região em que se desenvolvem ciclones muito intensos. No oeste desse oceano, um caso de TE facilmente identificado em imagens de satélite foi o ocorrido entre os dias 10 e 21 de setembro de 2017. Esse sistema foi denominado de tufão Talim, nome internacional dado pela Agência Meteorológica do Japão (AMJ), e Lannie, nome local concedido pela Administração de Serviços Atmosféricos, Geofísicos e Astronômicos das Filipinas (PAGASA, em filipino), quando o sistema atingiu a *Philippine Area of Responsibility* (PAR) (Mangosing, 2017). O Talim atingiu alguns países como Taiwan, leste da China, Filipinas e Japão. Como consequência, algumas áreas do sudoeste do Japão tiveram voos cancelados e serviços ferroviários interrompidos (Livemint, 2017), com perda estimada em mais de 750 milhões de dólares no Japão, além da ocorrência de 5 mortes (Benfield, 2018); na China, o governo emitiu alertas para que mais de 200 mil pessoas

evacuassem as províncias de *Fujian* e *Zhejiang* (Xinhua, 2017).

Ao longo do seu ciclo de vida, o Talim se deslocou de um ambiente barotrópico para um baroclínico de forma que apresentou transição de sistema tropical para extratropical. Diante desse contexto, o objetivo do estudo é caracterizar a TE do ciclone com a metodologia do CPS e descrever as características sinóticas ao longo do seu ciclo de vida. Esse estudo justifica-se pelo fato do tufão Talim ser considerado um bom exemplo meteorológico do processo de TE, servindo de modelo conceitual para previsores de tempo e para estudantes da área. Além disso, é uma complementação do estudo de Reboita *et al.* (2017b), pois enquanto esses autores apresentam a descrição de quatro ciclones (dois extratropicais, um subtropical e um tropical) que não sofrem transição, o presente estudo descreve uma TE.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Dados

Os dados para a análise sinótica, cálculo dos parâmetros do CPS e *track* do ciclone, foram obtidos da reanálise ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). A Tabela 1 mostra a descrição de todos os dados utilizados.

As variáveis consideradas para este estudo foram: pressão atmosférica ao nível médio do mar, componentes horizontais do vento em 27 níveis de pressão (1000 a 100 hPa) e a 10 m, além da temperatura do ar e geopotencial em 27 níveis de pressão (1000 a 100 hPa) nos horários sinóticos (0000, 0600, 1200 e 1800 Z). Foram também utilizados dados diários de fluxo de calor latente e sensível do projeto *Objectively Analyzed air-sea Heat Fluxes* (OAFlux), a fim de mostrar a intensidade dessa variável no ciclo de vida do tufão Talim. Para a análise da Temperatura da Superfície do Mar (TSM), usou-se dados de anomalia diária e média diária de alta resolução da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

**Tabela 1** - Descrição dos dados utilizados.

Dados	Resolução espacial	Resolução temporal	Referência
ERA5 ( <a href="https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5">https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5</a> )	0,25° × 0,25°	6 horas	Hersbach e Dee (2016)
OAFlux ( <a href="http://oafux.whoi.edu/data.html">http://oafux.whoi.edu/data.html</a> )	0,5° × 0,5°	1 dia	Yu <i>et al.</i> (2008)
GridSat-B1 ( <a href="https://www.ncdc.noaa.gov/gridsat/">https://www.ncdc.noaa.gov/gridsat/</a> )	0,07° × 0,07°	6 horas	Knapp <i>et al.</i> (2014)
TRMM-3B42 v7 ( <a href="https://disc2.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/TRMM_L3/TRMM_3B42/">https://disc2.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/TRMM_L3/TRMM_3B42/</a> )	0,25° × 0,25°	6 horas	Huffman <i>et al.</i> (2007)
Himawari-8 ( <a href="https://seg-web.nict.go.jp/wfdb_osndisk/shareDirDownload/bDw2maKV?lang=em">https://seg-web.nict.go.jp/wfdb_osndisk/shareDirDownload/bDw2maKV?lang=em</a> )	0,01° × 0,01°	10 minutos	Bessho <i>et al.</i> (2016)
NOAA OISST v2 ( <a href="https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html#detail">https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html#detail</a> )	0,25° × 0,25°	1 dia	Reynolds <i>et al.</i> (2007)

A nebulosidade associada ao Talim foi inferida através da temperatura de brilho obtida pelo canal infravermelho (próximo a 11  $\mu\text{m}$ ) do *Gridded Satellite* (Grid-Sat-B1); esse conjunto de dados fornece registro de alta qualidade de medições globais de satélites geoestacionários para o *Climate Data Record* (CDR) e é disponibilizado pela NOAA (Tabela 1). Para a precipitação, utilizou-se a versão 7 do produto *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) *Multi-satellite Precipitation Analysis* (TMPA). Também foram utilizadas imagens com cores reais do satélite geoestacionário, *Himawari-8*, produzida através da combinação de três canais do visível do sensor *Advanced Himawari Imager* (AHI) (Murata *et al.*, 2018).

## 2.2. Cyclone Phase Space (CPS)

Para analisar a evolução da estrutura térmica do Talim e identificar seu período de transição foi usada a metodologia do CPS (Hart, 2003). Entretanto, antes da aplicação da metodologia, deve-se obter o *track* do ciclone, isto é, a posição (latitude e longitude) do sistema em cada tempo do seu ciclo de vida. No presente estudo, a posição do ciclone foi obtida através da identificação do mínimo de pressão central a cada 6 horas. Uma vez identificada visualmente, em cada passo de tempo, a área do ciclone em mapas de pressão ao nível médio do mar, essa área foi informada num *script* em linguagem GrADS que também utilizou uma função de busca de valores mínimos na área. Com essa informação e usando dados de altura geopotencial e componentes horizontais do vento, foram calculados os três parâmetros do CPS.

O primeiro parâmetro é o da simetria térmica, B, que é determinado na camada de 600-900 hPa. Para isso é calculada a média da diferença de altura geopotencial, em um raio de 500 km a partir do centro do ciclone, entre os lados direito e esquerdo do sistema, que é definido com base em seu deslocamento:

$$B = h(\overline{Z_{600 \text{ hPa}} - Z_{900 \text{ hPa}}}|_R - \overline{Z_{600 \text{ hPa}} - Z_{900 \text{ hPa}}}|_L) \quad (1)$$

em que Z é a altura geopotencial dos níveis de 600 e 900 hPa, os índices R e L indicam os lados direito e esquerdo, respectivamente, da tempestade, h refere-se ao valor de +1 para o HN e -1 para o HS. Para CTs,  $B < 10$ , enquanto que para CEs,  $B > 10$  (Tabela 2). A interpretação física do parâmetro B está associada com a termodinâmica

do ciclone. Um ciclone tropical não possui frentes, de forma que a espessura da camada na região do ciclone terá pouca variação, fazendo com que B seja muito pequeno e, portanto, tem-se um sistema simétrico. Isso já não ocorre no caso dos ciclones extratropicais, uma vez que, no lado da massa de ar frio, a camada é menos espessa e, no lado da massa de ar quente, mais espessa. Logo, a diferença da espessura entre esses lados fornece um valor grande e tem-se um sistema assimétrico.

O segundo e terceiro parâmetro indicam as características térmicas do núcleo dos ciclones através de uma aproximação do vento térmico que é calculada entre duas camadas: uma entre 600-900 hPa ( $-V_T^L$ ) e outra entre 300-600 hPa ( $-V_T^U$ ). Para determinar esses parâmetros, é necessário calcular a perturbação da altura geopotencial do ciclone ( $\Delta Z$ ), dada pela Eq. (2).

$$\Delta Z = Z_{\text{MAX}} - Z_{\text{MIN}} \quad (2)$$

em que  $Z_{\text{MAX}}$  é a altura geopotencial máxima em um nível de pressão dentro do raio de 500 km da tempestade e  $Z_{\text{MIN}}$  é a altura geopotencial mínima. A estrutura vertical do ciclone (núcleo frio *versus* quente) é definida pela derivada de  $\Delta Z$ , aplicada para duas camadas troposféricas:

$$\frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln(p)} \Big|_{900 \text{ hPa}}^{600 \text{ hPa}} = -|V_T^L| \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln(p)} \Big|_{600 \text{ hPa}}^{300 \text{ hPa}} = -|V_T^U| \quad (4)$$

Na Eq. (4), o limite de 300 hPa foi determinado, uma vez que níveis acima poderiam incluir a estratosfera. Para a interpretação desses dois termos começa-se lembrando a definição de vento térmico, que é a diferença vetorial do vento geostrófico em dois níveis de pressão. Uma vez que o geostrófico pode ser calculado em função da altura geopotencial, basta calcular a variação da altura geopotencial numa dada distância (no caso, o raio de 500 km), e na sequência a diferença entre o nível mais acima e o mais abaixo. Visto que em um ciclone tropical os máximos gradientes horizontais de pressão ocorrem perto da superfície e diminuem com a altura (ou seja, os ventos nos ciclones tropicais são mais intensos em superfície), a diferença

**Tabela 2** - Critérios utilizados para a identificação dos estágios do ciclone pela metodologia do CPS de acordo com Hart (2003), Gozzo *et al* (2014) e Evans e Hart (2003).

Parâmetros	Tropical	Extratropical	Subtropical	Início - TE	Fim - TE
	Evans e Hart (2003)		Gozzo <i>et al.</i> (2014)	Evans e Hart (2003)	
B	< 10	> 10	< 25	> 10	-
$-V_T^L$	> 0	< 0	> -50	-	< 0
$-V_T^U$	> 0	< 0	< -10	-	< 0

entre o nível acima e o abaixo implicará num valor negativo; mas, como há o sinal negativo na frente dos termos do lado direito nas Eqs. (3) e (4), em um CT, ambos  $-V_T^L$  e  $-V_T^U$  devem ser maiores do que zero. Já nos ciclones extratropicais, os máximos gradientes horizontais de pressão ocorrem em níveis mais elevados da atmosfera, de forma que os ventos se intensificam com a altura. Seguindo o mesmo raciocínio do caso do CT, em um CE ambos  $-V_T^L$  e  $-V_T^U$  devem ser negativos (Tabela 2). No caso dos ciclones subtropicais (híbridos) cuja estrutura térmica em baixos níveis é similar à de CT e, em altos níveis, similar à de CE, Gozzo *et al.* (2014) determinaram os seguintes limiares para identificação desses sistemas:  $B < 25$ ,  $-V_T^L > -50$  e  $-V_T^U < -10$  (Tabela 2).

Para caracterizar a fase de TE, que pode ser considerada como uma fase híbrida, o presente estudo segue Evans e Hart (2003), que definem o início da transição como o momento em que o parâmetro de simetria do CPS passa a ser maior do que 10 ( $B > 10$ ), e o fim da transição como o tempo anterior ao que o parâmetro do vento térmico em baixos níveis passa a ser negativo ( $-V_T^L < 0$ ), o que implica na existência de uma tempestade de núcleo frio, com ventos menos intensos em baixos níveis. Evans e Hart (2003) utilizam apenas o parâmetro  $-V_T^L$  para caracterizar o final da transição, uma vez que, segundo os autores, a troposfera superior torna-se fria antes da inferior. Logo, basta avaliar apenas o referido parâmetro.

### 2.3. Análises

A primeira seção dos resultados mostra as características básicas do tufão Talim (trajetória e intensidade). A gênese do Talim foi considerada quando a pressão ao nível médio do mar apresentou a primeira isóbara fechada (1200 Z do dia 10 de setembro de 2017). A trajetória é baseada na posição geográfica da menor pressão central ao longo do ciclo de vida do sistema. Embora o Talim tenha ocorrido no oceano Pacífico oeste, utilizou-se a escala Saffir-Simpson para fornecer uma visão geral da intensidade do sistema com base na reanálise ERA5. Nesta escala, a intensidade do sistema é definida pelos ventos sustentados, uma média da medição de ventos em 10 m

pelo período de 1 minuto; essa definição é utilizada por centros como NHC, *Central Pacific Hurricane Center* e *Joint Typhoon Warning Center* (JTWC). Neste trabalho, considerou-se apenas a intensidade do vento registrada no horário sinótico em análise. A máxima intensidade foi identificada numa área com raio de 250 km a partir do centro do ciclone. O valor obtido foi comparado com a Tabela 3 para classificação do sistema.

A etapa seguinte foi a identificação do período de TE com a metodologia de Evans e Hart (2003), apresentada na Tabela 2. Com base nessa classificação foi realizada a análise sinótica. Tal análise englobou o período de 10 a 21 de setembro de 2017. A gênese do sistema foi registrada no dia 10, pois foi quando ocorreu a primeira isóbara fechada no campo de pressão atmosférica ao nível médio do mar (Gan e Rao, 1991). Desse modo, para estudar a evolução do ciclone e sua transição extratropical, cinco estágios foram considerados: gênese, maturidade (CT), fase da TE, fase de CE e decaimento do sistema. O estágio de ciclogênese ocorreu às 1200 Z do dia 10 de setembro, momento em que a primeira isóbara do sistema fechou. A data de maturidade foi definida no período em que o tubo de vortacidade estava mais intenso, em 14 de setembro às 0600 Z. As datas dos três últimos estágios foram selecionadas no período em que o sistema apresentou características bem definidas de cada fase. Assim, a fase de TE foi considerada em 17 de setembro às 1200 Z, enquanto a fase de CE foi definida para 18 de setembro às 1800 Z e decaimento, 21 de setembro às 0000 Z.

Além das variáveis obtidas da ERA5, foram calculadas as variáveis secundárias: advecção horizontal de temperatura do ar (850 hPa), espessura da camada (500-1000 hPa), vortacidade relativa ciclônica, desvios zonais de temperatura e altura geopotencial e cisalhamento vertical do vento (250-850 hPa). Assim, para cada estágio, analisou-se os seguintes campos espaciais:

- Pressão atmosférica ao nível médio do mar, espessura da camada em 500-1000 hPa e intensidade do vento em 250 hPa acima de 30 m  $s^{-1}$ ;
- Cisalhamento vertical do vento (250-850 hPa) e fluxo diário de calor latente;

**Tabela 3** - Escala Saffir-Simpson.

Categoria	Pressão Central (mb)	Ventos mph (m s <sup>-1</sup> )	Danos
Depressão Tropical (DT)	≥ 1005	≤ 38 (< 17)	–
Tempestade Tropical (TT)	1004-995	39-73 (17-32)	–
1	994-980	74-95 (33-42)	Mínimo
2	979-965	96-110 (43-49)	Moderado
3	964-945	111-130 (50-58)	Vasto
4	944-920	131-155 (59-69)	Devastador
5	< 920	> 155 (> 69)	Catastrófico

Fonte: Adaptado de Craig e Woolf (2013) e NHC (s/d).

- Advecção horizontal de temperatura do ar em 850 hPa e altura geopotencial em 500 hPa;
- Anomalia diária de TSM e componentes zonal e meridional do vento em 700 hPa;
- Temperatura de brilho do topo de nuvens e pressão atmosférica ao nível médio do mar;
- Precipitação e componentes zonal e meridional do vento a 10 m;
- Perfil vertical da intensidade do vento meridional;
- Perfil vertical da vorticidade relativa ciclônica;
- Perfil vertical do desvio zonal da temperatura do ar e altura geopotencial.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Características básicas do tufão Talim

Na [Tabela 4](#) e [Fig. 1](#) é apresentado o *tracking* do Talim. Tal tabela também mostra a pressão central, a

intensidade máxima do vento a 10 m e os três parâmetros do CPS ( $B$ ,  $-V_T^L$  e  $-V_T^U$ ). O Talim teve sua gênese em 10 de setembro de 2017 às 1200 Z com pressão central de 1001,7 hPa e decaimento em 21 de setembro às 1200 Z. Portanto, teve duração de 12 dias ([Tabela 4](#)). O sistema apresentou a máxima intensidade do vento a 10 m em 13 de setembro às 0600 Z com  $31,2 \text{ m s}^{-1}$  e, posteriormente, a sua intensidade diminuiu, devido à aproximação com o continente.

Usando a escala Saffir-Simpson ([Tabela 3](#); [Craig e Woolf, 2013](#)) e a intensidade do vento da reanálise ERA5, o Talim foi classificado como Tempestade Tropical (TT; 17 a  $32 \text{ m s}^{-1}$ ) desde a sua gênese até o dia 14 de setembro às 1800 Z. Já Gutro (2017) informou que o tufão Talim iniciou seu ciclo de vida como TT no dia 09 de setembro às 1500 Z, evoluindo para CT em 12 de setembro às 0000 Z. O JTWC reportou que o vento máximo sustentado do sistema estava próximo a  $61,7 \text{ m s}^{-1}$  no dia 14 de setembro às 0000 Z ([Bushnell e Falvey, 2017](#)). Com essa

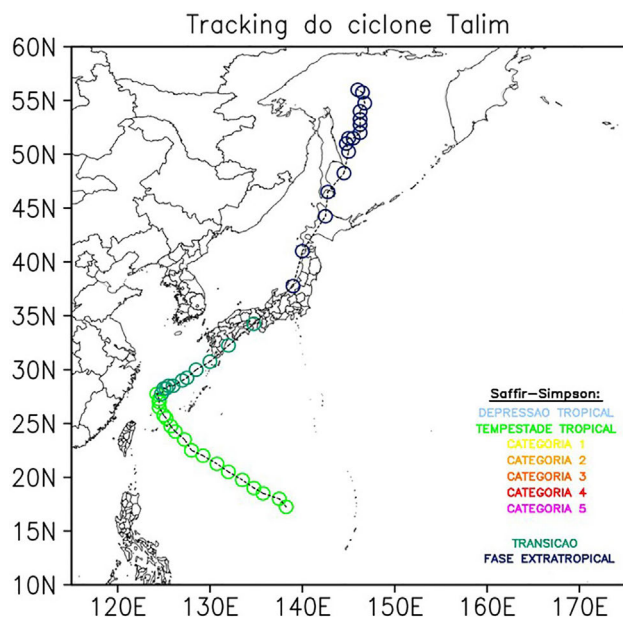
**Tabela 4** - Informações básicas, a partir de dados da reanálise ERA5, do ciclone Talim em cada horário sinótico do seu ciclo de vida: hora, data, latitude, longitude e pressão central do sistema, intensidade máxima do vento a 10 m (medida num raio de 250 km a partir do centro),  $B$ ,  $-V_T^L$  e  $-V_T^U$  e categoria do sistema na escala Saffir-Simpson de acordo a máxima intensidade do vento a 10 m.

Hora	Data	Latitude Central (°)	Longitude Central (°)	Pressão Central (hPa)	Máxima Intensidade do Vento a 10 m ( $\text{m s}^{-1}$ )	B	$-V_T^L$	$-V_T^U$	Categoria
12 Z	10/09	17,25	138,25	1001,7	18,0	3,55	46,92	35,08	TT
18 Z	10/09	18	137,5	996,7	20,1	3,55	55,27	45,69	TT
00 Z	11/09	18,5	135,75	999,2	19,3	9,13	60,79	32,41	TT
06 Z	11/09	19	134,75	995,0	19,5	8,6	65,71	36,04	TT
12 Z	11/09	19,75	133,5	994,9	18,7	3,56	54,83	52,78	TT
18 Z	11/09	20,5	132	991,3	20,5	6,5	56,16	78,19	TT
00 Z	12/09	21,25	130,75	988,4	21,4	5,12	88,19	77,60	TT
06 Z	12/09	22	129,25	981,4	20,5	5,13	119,17	119,99	TT
12 Z	12/09	22,5	128	975,4	22,9	6,14	128,77	157,85	TT
18 Z	12/09	23,5	127,25	970,4	21,6	1,98	163,10	203,51	TT
00 Z	13/09	24,25	126,25	967,3	25,7	5,75	128,01	216,12	TT
06 Z	13/09	24,75	125,75	960,5	31,2	1,62	168,93	229,15	TT
12 Z	13/09	25,5	125,25	956,7	28,9	1,61	199,8	283,76	TT
18 Z	13/09	25,75	125	957,0	28,2	0,89	199,33	264,93	TT
00 Z	14/09	26,5	124,5	955,7	29,1	-5,45	233,8	261,34	TT
06 Z	14/09	27	124,5	952,3	25,3	-3,8	230,32	284,39	TT
12 Z	14/09	27,25	124,5	954,3	20,1	-4,12	233,76	258,45	TT
18 Z	14/09	27,75	124,25	957,7	26,2	-0,75	260,18	245,64	TT
00 Z	15/09	27,75	124,75	965,2	21,7	13,22	230,46	215,42	TE
06 Z	15/09	28,25	125	961,9	26,1	12,14	258,72	223,32	TE
12 Z	15/09	28,25	125,25	966,2	12,8	14,12	221,06	214,14	TE
18 Z	15/09	28,5	125,5	967,1	15,8	15,49	211,17	216,22	TE
00 Z	16/09	28,5	126	971,5	25,3	12,3	220,41	165,14	TE
06 Z	16/09	29	127	970,4	26,2	18,52	177,12	136,79	TE
12 Z	16/09	29,25	127,5	974,4	21,2	13,12	116,14	159,57	TE
18 Z	16/09	30	128,5	974,6	22,8	17,61	126,71	135,16	TE
00 Z	17/09	30,75	130	976,4	18,2	21,79	101,59	79,22	TE
06 Z	17/09	32,25	132	976,2	16,9	32,76	43,55	8,61	TE

(continua)

Tabela 4 - continua

Hora	Data	Latitude Central (°)	Longitude Central (°)	Pressão Central (hPa)	Máxima Intensidade do Vento a 10 m ( $m s^{-1}$ )	B	-VTL	-VTU	Categoria
12 Z	17/09	34,25	134,75	979,4	9,3	49,73	1,92	-68,76	TE
18 Z	17/09	37,75	139	979,4	9,3	42,46	-35,25	-135,22	CE
00 Z	18/09	41	140	979,5	8,7	67,06	-47,53	-211,86	CE
06 Z	18/09	44,25	142,5	976,7	14,2	77,89	-59,81	-119,08	CE
12 Z	18/09	46,5	142,75	972,7	8,7	54,82	-2,15	-32,02	CE
18 Z	18/09	48,25	144,5	972,8	15,4	24,66	55,51	36,07	CE
00 Z	19/09	50,25	145	974,8	17,3	12,56	60,83	68,31	CE
06 Z	19/09	51	144,75	976,0	13,1	2,02	44,03	79,06	CE
12 Z	19/09	51,5	145	979,5	10,7	5,38	23,26	90,5	CE
18 Z	19/09	51,5	145,5	981,9	7,3	6,14	-6,08	61,86	CE
00 Z	20/09	52	146,25	984,9	11,3	7,95	-12,3	41,49	CE
06 Z	20/09	52,75	146,25	986,2	9,0	3,34	3,94	20,42	CE
12 Z	20/09	53,25	146,25	988,9	7,6	0,53	22,12	18,87	CE
18 Z	20/09	54	146,25	989,9	8,3	1,32	35,31	-15,56	CE
00 Z	21/09	54,75	146,75	991,2	9,6	4,24	26,71	-39,56	CE
06 Z	21/09	55,75	146,5	991,8	9,4	5,43	47,19	-36,46	CE
12 Z	21/09	56	146	994,4	5,8	1,97	48,45	-39,11	CE



**Figura 1** - Trajetória do Talim baseada no menor valor da pressão ao nível médio do mar no centro do sistema e classificação da intensidade do sistema baseada na intensidade do vento a 10 m seguindo a escala Saffir-Simpson.

informação, o sistema chegou até a categoria 4 pela escala Saffir-Simpson (Tabela 3). Nota-se, portanto, que o presente estudo tem diferença em termos de intensidade. Diferenças na intensidade dos ciclones entre dados de reanálises e registros feitos por órgãos responsáveis por monitorar as bacias oceânicas têm sido documentadas (Silva et al., 2018). Além disso, Souza e Reboita (2020) compararam a intensidade dos ventos a 10 m de altura em ciclones registrados em diferentes conjuntos de dados e

observaram que essa variável é bem distinta entre as diferentes bases de dados. Entretanto, os autores não puderam concluir qual é a base de dados mais realística devido à ausência de dados observados.

A Fig. 1 mostra a trajetória do ciclone Talim com a classificação através da escala Saffir-Simpson. A trajetória registrada pela ERA5 é similar a reportada pelo JTWC em sua página 33 (Bushnell e Falvey, 2017). O sistema tem gênese em 17,25 °N como TT e se move em direção ao polo, inicialmente indo para noroeste e depois para nordeste, até alcançar 56 °N. Ao longo da trajetória, o sistema atinge parte das Filipinas e Japão como TT da escala Saffir-Simpson. Ao se deslocar para latitudes mais altas em direção ao continente, o sistema atinge regiões com intenso gradiente horizontal de temperatura em superfície, iniciando o processo de transição extratropical.

### 3.2. Fases do Talim

As fases do Talim (Fig. 2) foram definidas a partir dos limiares do CPS apresentados na Tabela 2. Os valores obtidos dos parâmetros do CPS possuem suavização a partir do código original feito por Hart. O ciclone tem gênese como tropical no dia 10 de setembro às 1200 Z e essa característica se mantém até dia 14 de setembro às 1800 Z, visto que  $B < 10$  (Fig. 2a), caracterizando um sistema simétrico. De acordo com Evans e Hart (2003), os parâmetros do vento térmico devem ser positivos para indicar um sistema de núcleo quente, o que também é mostrado na Fig. 2b.

O começo da fase de TE do Talim ocorre no dia 15 de setembro às 0000 Z, quando o parâmetro de simetria (B) do ciclone torna-se maior do que 10 m (Fig. 2a; Tabela 2), indicando a interação com um ambiente mais

baroclínico (Harr e Elsberry, 2000). O término da transição ocorre no dia 17 de setembro às 1200 Z, pois no horário seguinte o  $-V_T^L$  já apresenta valor negativo, caracterizando um ciclone de núcleo frio. A Fig. 2b também está de acordo com a afirmação de Evans e Hart (2003) de que o  $-V_T^U$  se torna negativo antes do  $-V_T^L$ .

O estágio de CE é caracterizado pela presença de assimetria no sistema ( $B > 10$ ) e núcleo frio, o qual inicia em 17 de setembro às 1800 Z com término em 19 de setembro às 0000 Z, quando o parâmetro B volta a ser menor que 10 m. Essa característica é indicativa da fase de oclusão dos ciclones extratropicais, pois como o núcleo tende a ficar todo frio, o parâmetro B tende a ser pequeno (portanto, o estágio de oclusão de um CE pode ser confundido com um CT). O ciclone perdura até o dia 21 de setembro às 1200 Z.

Com base nos resultados da Fig. 2, selecionou-se um horário dentro de cada fase do Talim a fim de caracterizar visualmente o padrão adquirido pelo sistema durante o seu ciclo de vida (Fig. 3). No estágio de CT existe um padrão

simétrico em sua nebulosidade (Fig. 3a) e o sistema não está embebido num ambiente baroclínico, uma vez que não há frentes associadas (Fig. 3c). Os ventos mais intensos ficam confinados em uma pequena área afastada do centro do ciclone, que é denominada *eyewall*, juntamente com áreas de intensa precipitação (figura não mostrada), que podem causar muita destruição e inundações quando atingem o continente (Fig. 3a-b).

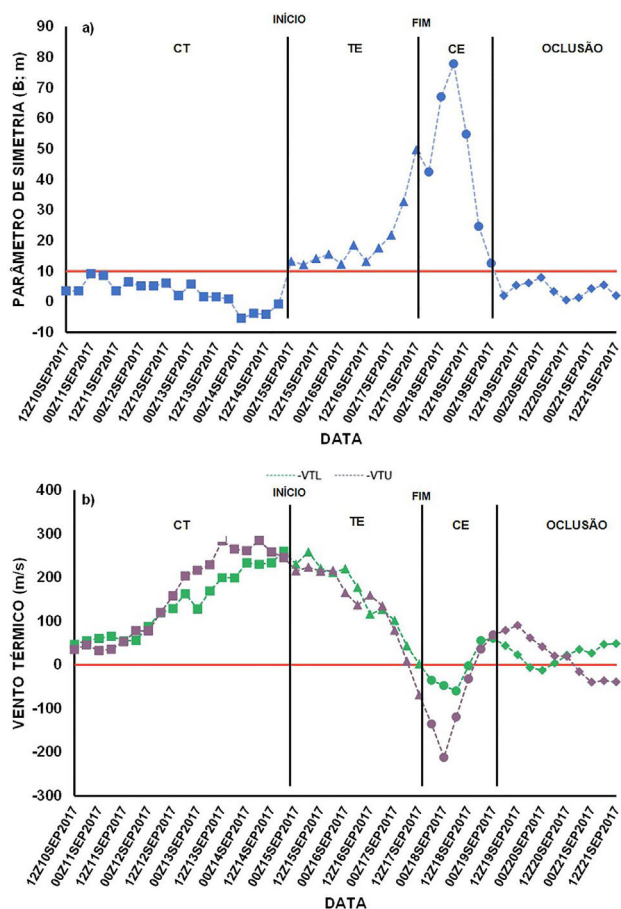
No estágio híbrido (TE) ocorre a desconfiguração do padrão simétrico da nebulosidade (Fig. 3d), como já observado por Reboita *et al.* (2017a) na análise de outro evento ciclônico, que mencionam que a aparência da nebulosidade nas imagens de satélite é variável. Além disso, o sistema começa a ter maior dimensão horizontal (Fig. 3e-f). Na fase extratropical, o ciclone tem padrão de vírgula, tanto na imagem de satélite quanto no campo de vento a 10 m de altura (Fig. 3g-h), indicando a presença de frentes fria e quente devido ao ambiente com gradientes horizontais de temperatura. O padrão vírgula da nebulosidade mostrado na imagem de satélite está relacionado com o escoamento nos ciclones, conforme a teoria das esteiras transportadoras, em que a esteira transportadora de ar quente e úmido em baixos níveis ascende em direção a frente fria atingindo médios e altos níveis, e a convecção contribui para formação da vírgula (Dacre *et al.*, 2012; Carlson, 1980). Na fase de decaimento do sistema, o padrão da nebulosidade é variável (Fig. 3j) e, também, há menor dimensão horizontal do sistema (Fig. 3k); isso ocorre em virtude da redução dos gradientes horizontais de temperatura no estágio de oclusão (Fig. 3l).

### 3.3. Análise sinótica

O diagnóstico do sistema foi feito com o objetivo de descrever e explicar as características dos estágios de gênese, maturidade da fase tropical, sistema híbrido, extratropical e decaimento (Figs. 4, 5 e 6). Na Fig. 4, têm-se campos sinóticos para avaliar a evolução do Talim, que se desloca em direção ao continente. Já a Fig. 5 apresenta a anomalia diária de TSM e vento em 700 hPa, além da nebulosidade do sistema e precipitação. Por fim, a Fig. 6 mostra os perfis verticais de intensidade do vento meridional, vorticidade relativa ciclônica e desvio zonal da temperatura e altura geopotencial, considerando uma seção cruzando a latitude central do sistema.

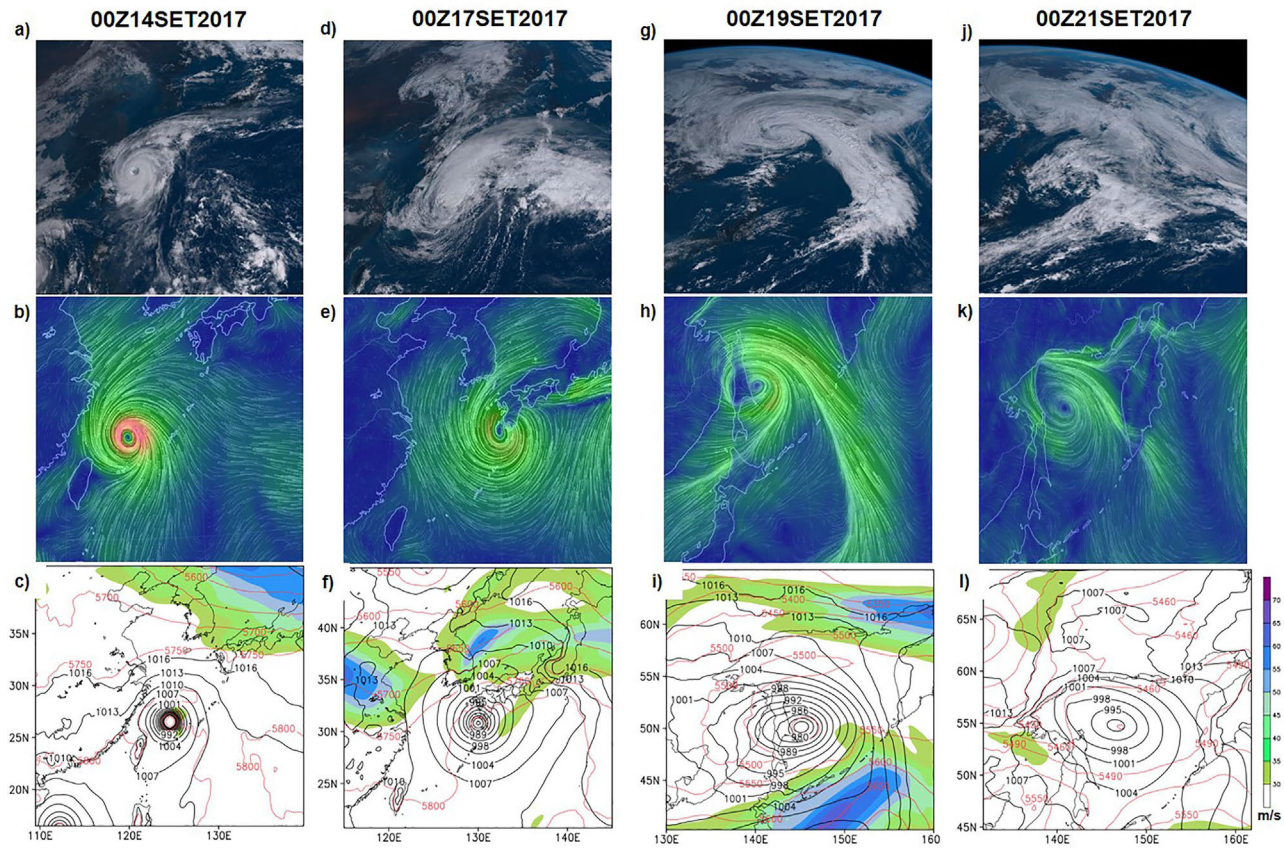
#### 3.3.1. Ciclogênese (TT; 12Z10SET2017)

A gênese de um CT está relacionada à evaporação sobre a superfície oceânica, presença de uma anomalia de vorticidade relativa ciclônica em superfície, que pode ter diferentes origens (COMET, 2016; Gray, 1968), e fraco cisalhamento vertical do vento. No caso em estudo, na região de gênese a TSM estava em torno de 30 °C, com uma anomalia positiva de 0,5 °C (Fig. 5a). O valor da TSM é superior ao limiar de 26 °C necessário para a gênese de CTs conforme a literatura (Rodgers *et al.*, 2000).



**Figura 2** - Diagramas dos parâmetros B (a),  $-V_T^L$  e  $-V_T^U$  (b) calculados para o tufão Talim. Os símbolos em forma de quadrado representam a fase de CT; os triângulos, a de TE; os círculos, a de CE e os losangos representam a fase de oclusão/decaimento do sistema. As fases do ciclone também estão indicadas por linhas verticais pretas.

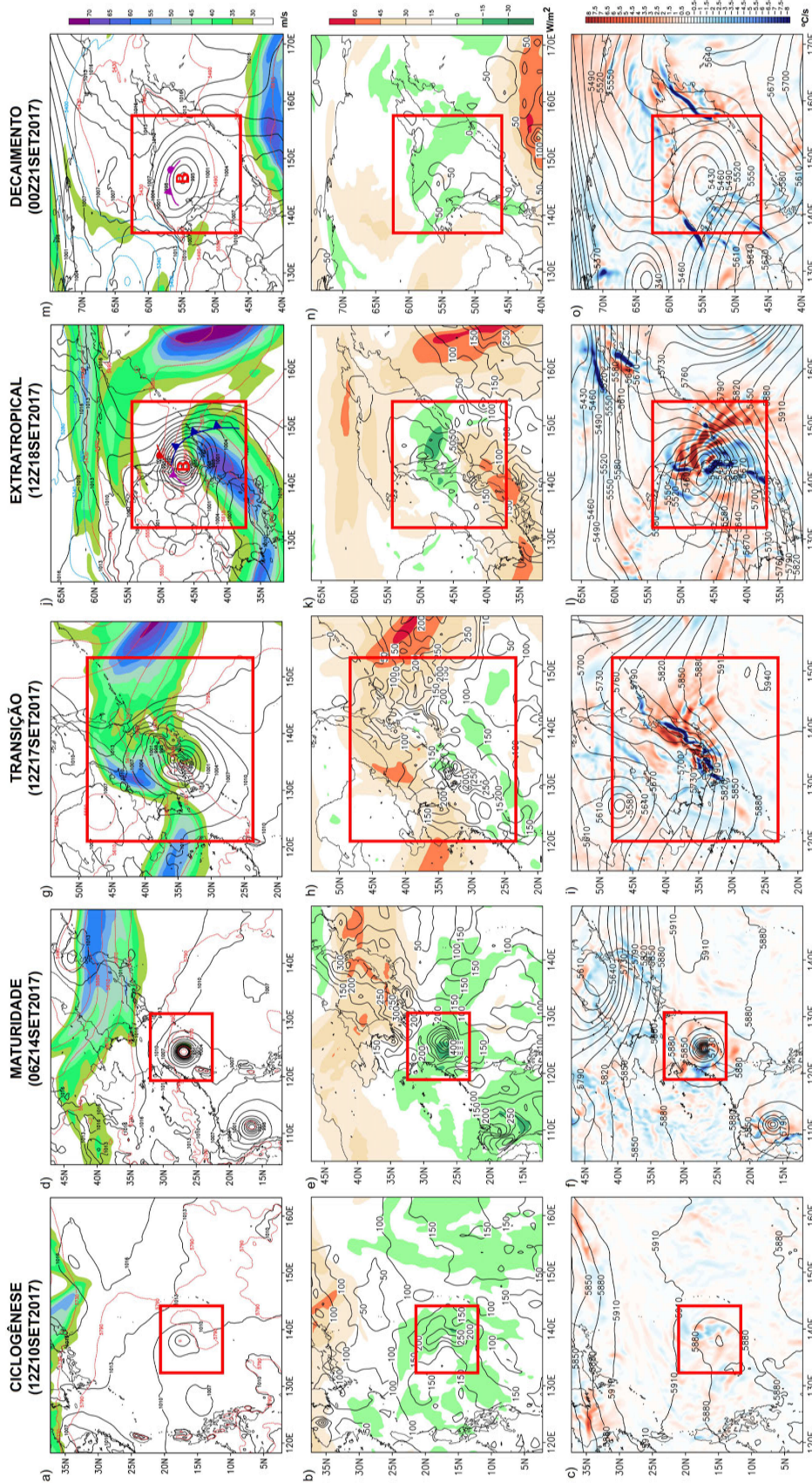




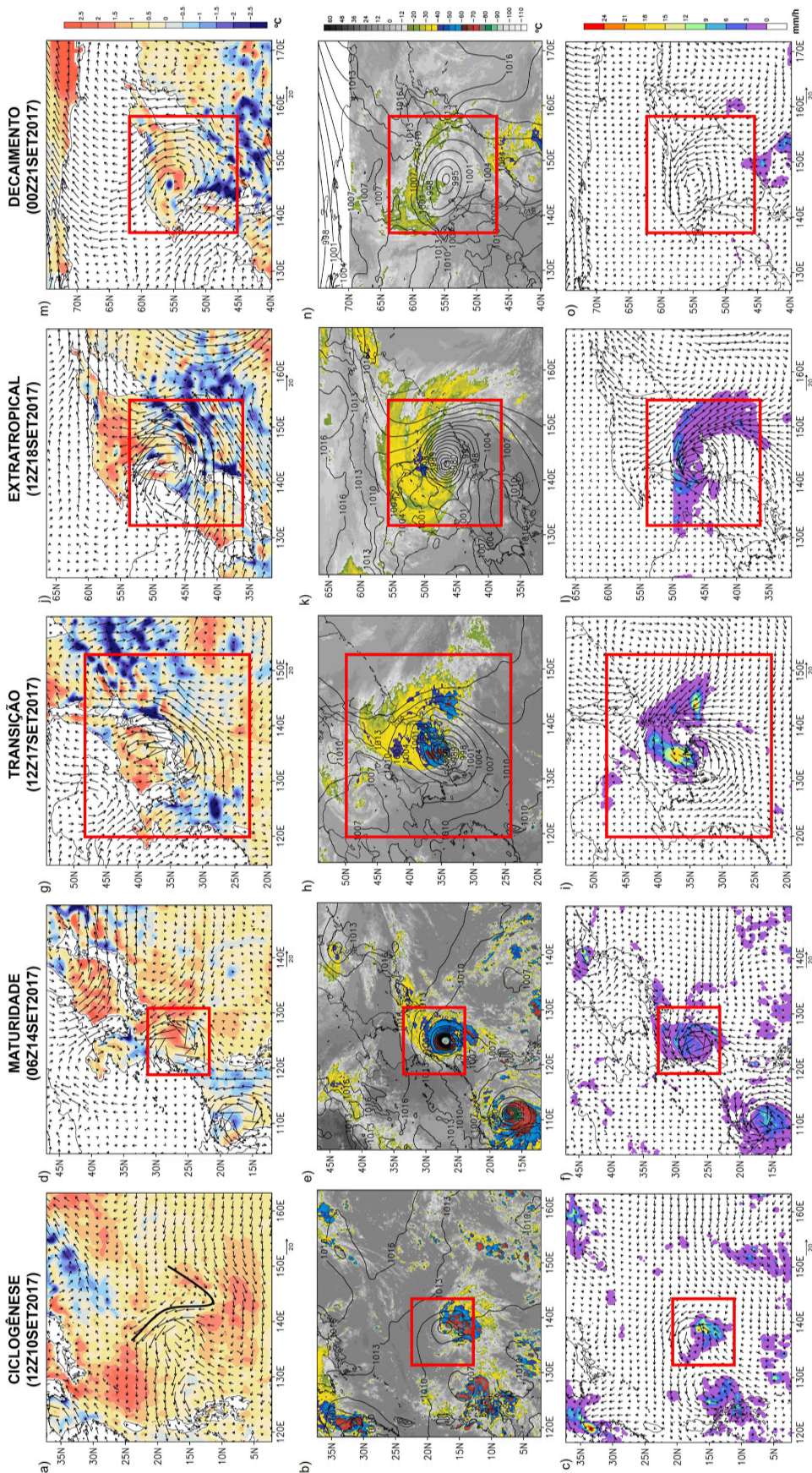
**Figura 3** - Fases do ciclo de vida do ciclone Talim, entre os dias 14 a 21 de setembro de 2017. No painel superior tem-se imagens no canal visível do satélite Himawari-8. No painel central tem-se a circulação atmosférica a 10 m de altura obtida da análise do *Global Forecast System* (GFS) no visualizador *earth.nullschool*. No painel inferior há o campo de pressão atmosférica ao nível do mar (hPa; linhas pretas), espessura da camada 500-1000 hPa (m; linhas pontilhadas vermelhas) e intensidade do vento a 250 hPa ( $\text{m s}^{-1}$ ; preenchido). Fase de CT em 00Z14SET2017 (a-b-c); fase de ciclone híbrido (TE) em 00Z17SET2017 (d-e-f); fase de CE em 00Z19SET2017 (g-h-i) e sistema em decaimento em 00Z21SET2017 (j-k-l).

Nos ventos em 700 hPa havia um padrão de onda, o que pode contribuir para convergência (Fig. 5a) e fraca vorticidade relativa ciclônica em superfície (Fig. 6b), servindo como um ambiente dinamicamente favorável para o ciclone (Reboita *et al.*, 2017b). A Fig. 4b indica que o cisalhamento vertical do vento estava fraco ( $< 10 \text{ m s}^{-1}$ ), o que está de acordo com diferentes estudos de ciclones tropicais, entre eles o de Paterson *et al.* (2005). Valores menores do que  $10 \text{ m s}^{-1}$  são favoráveis à intensificação de CTs, uma vez que permitem a organização da convecção, facilitando seu alinhamento vertical. Em superfície não havia gradiente de temperatura (Fig. 4a). Com relação à evaporação, essa variável está sendo representada através do fluxo de calor latente do oceano para a atmosfera. Valores positivos do fluxo indicam que a atmosfera está ganhando energia, que é importante para a instabilidade e redução da pressão em superfície. No período da gênese havia fluxo de calor latente de  $150$  a  $250 \text{ W m}^{-2}$  (Fig. 4b) e anomalia positiva de  $120 \text{ W m}^{-2}$  considerando a média climatológica do mês de setembro. Os fluxos de calor latente estão de acordo com os valores

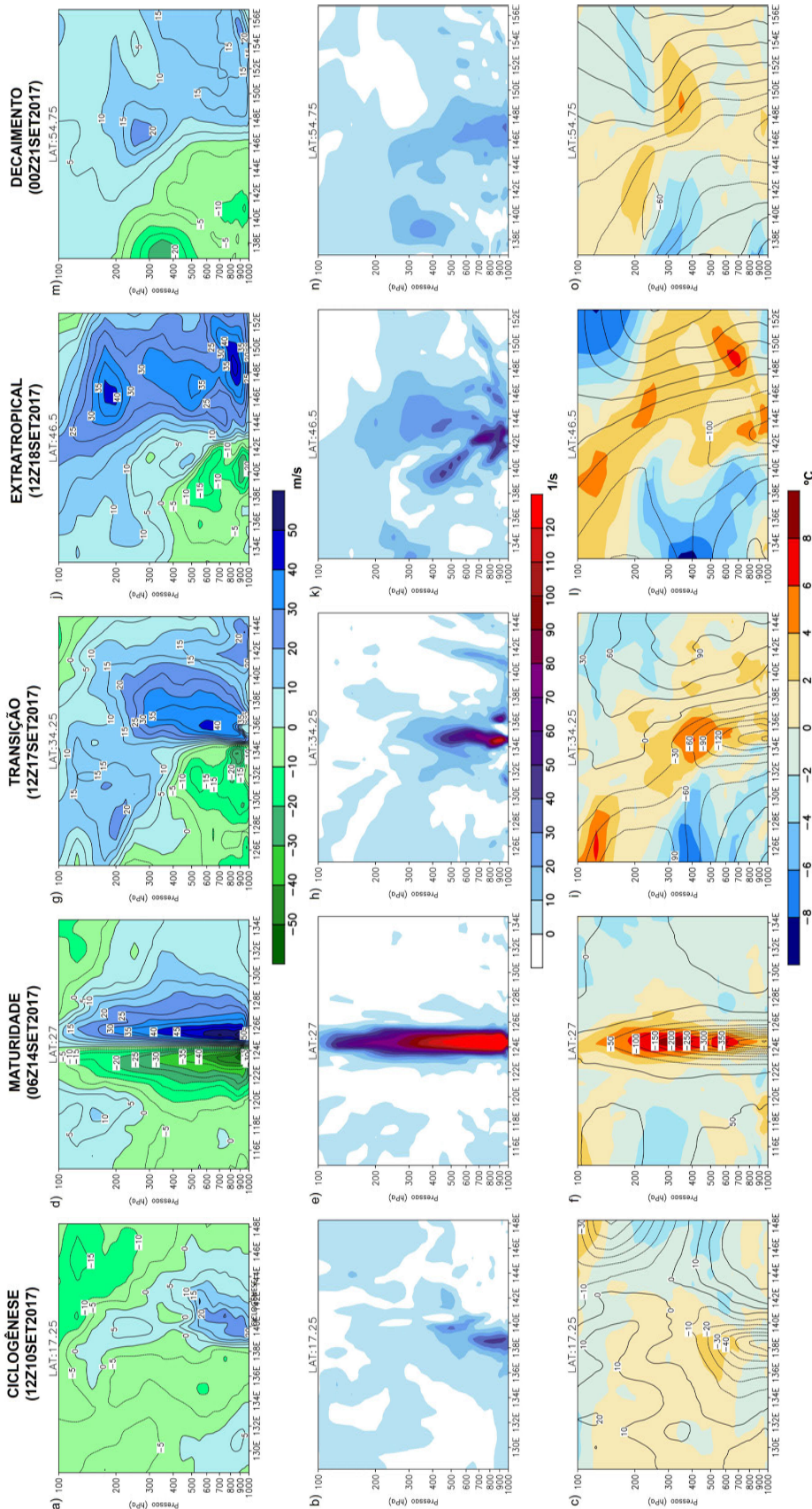
relatados na literatura para CTs no oceano Pacífico Norte (Gao *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2014), tornando-se uma variável importante para a ciclogênese, sua ausência pode impactar na intensificação do sistema. A segunda variável de transferência de calor para a atmosfera é o fluxo de calor sensível, que atingiu  $5 \text{ W m}^{-2}$  na região de gênese do Talim (figura não mostrada). A nebulosidade do sistema ainda não era simétrica, com temperatura de brilho de  $-90 \text{ }^\circ\text{C}$ , indicando nuvens espessas que causaram bastante chuva na região (Fig. 5b-c). Pelo desvio zonal de temperatura (Fig. 6c), o ciclone possuía um núcleo quente, e seu desvio de altura geopotencial era negativo, reforçando-o como um sistema de baixa pressão. Nesse horário, o sistema já estava aprofundado na atmosfera, atingindo médios níveis, como pode ser visto no campo de altura geopotencial em 500 hPa (Fig. 4c). Através da Fig. 6a é mostrado que o ciclone possui ventos mais intensos em superfície e, também, o sentido do giro do ciclone, já que o vento meridional é positivo no lado direito e negativo no lado esquerdo, indicando o seu giro anti-horário, característica do movimento ciclônico no HN (Holton, 2004).



**Figura 4** - Campos sinóticos para a análise do tufão Talim. O painel superior é a pressão atmosférica ao nível do mar (hPa; linhas em preto), espessura da camada 500-1000 hPa (m; linhas pontilhadas em vermelho) e intensidade do vento em 250 hPa ( $m s^{-1}$ ; preenchido). O painel central mostra o cisalhamento vertical do vento 250-850 hPa ( $m s^{-1}$ ; preenchido) e o fluxo diário de calor latente ( $W m^{-2}$ ; linhas em preto). O terceiro painel é a advecção de temperatura do ar em 850 hPa ( $^{\circ}C s^{-1}$ ; preenchido) e altura geopotencial em 500 hPa (m; linhas em preto). Estágio de ciclogênese em 12Z10SET2017 (a-b-c); fase de CT em 06Z14SET2017 (d-e-f); fase de transição em 12Z17SET2017 (g-h-i); fase de CE em 12Z18SET2017 (j-k-l) e sistema em decaimento em 00Z21SET2017 (m-n-o).



**Figura 5** - Padrão de nebulosidade e precipitação para análise do tufão Talim. O painel superior é a anomalia diária de TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ; preenchido) e componentes do vento a 700 hPa ( $\text{m s}^{-1}$ ; vetor). No painel central há temperatura de brilho do canal infravermelho ( $^{\circ}\text{C}$ ; preenchido) e pressão atmosférica ao nível do mar (hPa; linhas em preto). O painel inferior é a precipitação do sistema ( $\text{mm h}^{-1}$ ; preenchido) e componentes do vento a 10 m ( $\text{m s}^{-1}$ ; vetor). O corte nas imagens de satélite acontece, pois só existem dados até  $70^{\circ}$ , enquanto que o corte da precipitação ocorre em  $50^{\circ}$ . Estágio de ciclogênese em 12Z10SET2017 (a-b-c); fase de CT em 06Z14SET2017 (d-e-f); fase de transição em 12Z17SET2017 (g-h-i); fase de transição em 12Z18SET2017 (j-k-l) e sistema em decaimento em 00Z21SET2017 (m-n-o).



**Figura 6** - Perfis verticais para a análise do tufão Talim. O painel superior é a intensidade do vento meridional ( $m s^{-1}$ , preenchido e contorno) centrada no ciclone. O painel central é o perfil vertical de vortacidade relativa ciclônica ( $\times 10^{-5} s^{-1}$ , preenchido), apenas com valores positivos já que os campos são para o HN. O painel inferior mostra o desvio zonal de temperatura ( $^{\circ}C$ , preenchido) e o desvio zonal de altura geopotencial (m; linhas em preto). Estágio de ciclogênese em 12Z10SET2017 (a-b-c); fase de CT em 06Z14SET2017 (d-e-f); fase de transição em 12Z17SET2017 (g-h-i); fase de CE em 12Z18SET2017 (j-k-l) e sistema em decaimento em 00Z21SET2017 (m-n-o).

### 3.3.2. Maturidade (TT; 06Z14SET2017)

A fase de maturidade do Talim foi definida como o horário em que o sistema apresentou vorticidade relativa ciclônica mais intensa (Fig. 6e), o qual ocorreu no dia 14 de setembro de 2017 às 0600 Z. Nesse estágio, o ciclone possuía taxa de precipitação em torno de  $9 \text{ mm h}^{-1}$  em, aproximadamente,  $30^\circ \text{ N}$  (Fig. 5f). Como as isóbaras estavam mais próximas (Fig. 4d), significando que o sistema estava mais profundo e que o gradiente horizontal de pressão era mais intenso, os ventos em superfície estavam mais fortes (Fig. 5f) e bem configurados em termos de circulação ciclônica. A TSM no centro do Talim estava mais alta, com anomalia positiva de  $2^\circ \text{ C}$  (Fig. 5d), impulsionando a intensificação do ciclone e evaporação da água do oceano, com fluxo intenso de calor latente excedendo  $400 \text{ W m}^{-2}$  (Fig. 4e). O cisalhamento vertical do vento continuou fraco (Fig. 4e), contribuindo para que o sistema mantivesse seu ciclo de vida, com ventos mais intensos em baixos níveis. A imagem de satélite mostra que havia nuvens com topos mais frios em sua periferia, enquanto que em seu centro não havia nenhuma nuvem (Fig. 5e), devido aos movimentos subsidentes que acontecem nessa região e, assim, mantêm o “olho” do ciclone e a configuração simétrica da nebulosidade. Há uma intensificação no núcleo do sistema até altos níveis, sendo observado na Fig. 6f, uma vez que o desvio zonal de temperatura se torna mais positivo e há um maior desvio zonal negativo da altura geopotencial. Além disso, o perfil vertical de vorticidade relativa ciclônica (Fig. 6e) apresenta um tubo sem inclinação com a altura, indicando uma característica de CT. O vento meridional é mais intenso em todo o perfil vertical, caracterizando bem o giro anti-horário do ciclone (Fig. 6d).

### 3.3.3. Transição (CS; 12Z17SET2017)

O estágio de transição ocorreu no dia 17 de setembro de 2017 às 1200 Z, quando o sistema interagiu com uma onda baroclínica em 500 hPa (Fig. 4i). A partir desse estágio, características de CE começaram a aparecer: linhas de espessura atravessavam o centro do sistema (indicando a presença de gradiente horizontal de temperatura) e haviam jatos em altos níveis sobre o ciclone (Fig. 4g). Verificou-se, também, a presença de advecção horizontal de ar frio a oeste do sistema e quente a leste (Fig. 4i), que foi propiciada pelo giro anti-horário do ciclone. Nesse estágio, ainda havia fluxo de calor latente do oceano para a atmosfera (Fig. 4h) e o cisalhamento vertical já estava bem mais intenso, contribuindo para mudar as características físicas do ciclone. Por exemplo, o perfil vertical de vorticidade relativa ciclônica já estava enfraquecido (Fig. 6h) em relação às fases anteriores, mas ainda sem inclinação com a altura, e o desvio zonal de temperatura do ar (Fig. 6i) mostrava que o sistema era caracterizado por um lado mais frio a oeste, embora ainda predominasse um núcleo

quente, porém bem menos intenso que na fase prévia. Pela intensidade da componente meridional (Fig. 6g), na transição, os ventos mais intensos ocorreram em superfície e níveis médios.

### 3.3.4. Extratropical (12Z18SET2017)

O sistema já possui um padrão de virgula na nebulosidade (Fig. 5k), indicando as características frontais e de assimetria. O CE possui maior dimensão horizontal que o CT, e também a sua região de atuação possui gradiente horizontal de temperatura (Fig. 4j). É interessante mencionar que o diâmetro dos CTs não excede a 1000 km, enquanto que o de um ciclone extratropical é em média 3000 km (Reboita *et al.*, 2017a); portanto, CTs são menores do que CEs. No campo de advecção horizontal de temperatura do ar, é possível observar o ramo da frente fria com a advecção de ar frio sobre o continente e a de ar quente sobre o oceano (Fig. 4l). O perfil de vorticidade relativa ciclônica (Fig. 6k) perdeu a intensidade e parece se fragmentar em uma parte com inclinação para oeste com a altura e outra que se mantém mais alinhada na vertical. Já no perfil de desvio zonal da temperatura (Fig. 6l), é mais evidente a separação entre os lados frio e quente do ciclone, o que é uma característica da sua baroclinia.

### 3.3.5. Decaimento (00Z21SET2017)

Na fase de decaimento, o ciclone perdeu intensidade e características, uma vez que o gradiente horizontal de temperatura enfraqueceu (Fig. 4m). Não havia mais nuvens com topo frio no sistema (Fig. 5n), a vorticidade relativa ciclônica (Fig. 6n) e o vento em superfície enfraquecem comparados ao estágio anterior (Fig. 5o). O gradiente de pressão do ciclone diminuiu, visto que suas isóbaras estavam mais distantes do que em estágios anteriores, e o ciclone estava ocluso, já que os jatos de altos níveis não mais cruzavam o sistema em superfície (Fig. 4n). Outra característica da oclusão de um CE é a pouca inclinação do núcleo do sistema com a altura (Fig. 6n). Nessa fase os CEs tendem a apresentar uma característica mais barotrópica (maiores detalhes sobre o estágio de oclusão de CEs podem ser encontrados em Reboita *et al.*, 2017 a-b).

## 4. Considerações Finais

Esse estudo teve como objetivo descrever os estágios do ciclo de vida do Talim. O ciclone foi classificado como TT até fazer sua transição para CE, de acordo com os dados da reanálise. No entanto, por dados registrados pelo JTWC, o Talim evoluiu de TT para a categoria 4 da escala Saffir-Simpson no dia 14 de setembro às 0900 Z, e logo após, passou por uma TE. Os estágios do ciclo de vida do Talim foram definidos com a metodologia do CPS. Assim, foram definidas as datas dos estágios de gênese, maturidade da fase tropical, transição extratropical, CE e

decaimento. Com base nessa informação, foi realizada a análise sinótica para os estágios mencionados:

- Ciclone tropical: surge devido à anomalia positiva de TSM, intenso fluxo de calor latente do oceano para a atmosfera, vorticidade relativa ciclônica em superfície, fraco cisalhamento vertical do vento e presença de onda em 700 hPa, que ajudará na convergência de massa para a formação do ciclone;
- Maturidade: nesse estágio o sistema continua sobre TSM elevada e intenso fluxo de calor latente, além de possuir padrão simétrico na nebulosidade; há o aparecimento do olho do ciclone, desvio zonal positivo de temperatura do ar, desvio zonal negativo de altura geopotencial, e tubo de vorticidade relativa ciclônica sem inclinação;
- Transição extratropical: mudança de CT para um sistema híbrido (CS) por causa da sua interação com uma onda baroclônica em 500 hPa. O sistema apresenta um padrão de nebulosidade variável, porém tende a uma aparência mais simétrica. A partir desse momento o ciclone já apresenta características de CE, com lado frio a oeste e quente a leste;
- Ciclone extratropical: o sistema tem um padrão de virgula na nebulosidade, é caracterizado por sistema frontal no campo de advecção de temperatura do ar a 850 hPa, maior atuação do gradiente horizontal de temperatura, e inclinação para oeste no perfil vertical de vorticidade relativa ciclônica. No seu decaimento, o sistema perdeu sua intensidade e características, visto que o gradiente horizontal de temperatura diminuiu, e o ciclone passa a se localizar no lado polar dos jatos em altos níveis.

Desse modo, o estudo de CTs em TE é de grande importância, devido aos potenciais grandes impactos que esses sistemas podem trazer à sociedade. Recomenda-se, para trabalhos futuros, verificar a possibilidade de transições extratropicais e tropicais em projeções do clima futuro.

## Agradecimento

Os autores agradecem ao CNPQ (projeto 420262/2018-0) pelo apoio financeiro.

## Referências

- AHRENS, C.D. **Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment**. 9. ed. Brooks: Cengage Learning, 2012.
- BENFIELD, A. **Companion Volume to Weather, Climate & Catastrophe Insight: Additional Data to Accompany the 2017 Annual Report**. Londres: AON. 2018. Disponível em <http://thoughtleadership.aonbenfield.com/Documents/20180124-ab-if-annual-companion-volume.pdf>, acesso em 13 de ago. de 2019.

- BESSHO, K.; DATE, K.; HAYASHI, M.; IKEDA, A.; IMAI, T.; INOUE, H.; KUMAGAI, Y.; MIYAKAWA, T.; MURATA, H.; OHNO, T.; OKUYAMA, A.; OYAMA, R.; SASAKI, Y.; SHIMAZU, Y.; SHIMOJI, K.; SUMIDA, Y.; SUZUKI, M.; TANIGUCHI, H.; TSUCHIYAMA, H.; UESAWA, D.; YOKOTA, H.; YOSHIDA, R. An Introduction to Himawari-8/9: Japan's New-Generation Geostationary Meteorological Satellites. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 94, n. 2, p. 151-183, 2016.
- BJERKNES, J. On the structure of moving cyclones. **Geophysiske Publikasjoner**, v. 47, n. 2, p. 95-99, 1919.
- BJERKNES, J.; SOLBERG, H. Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. **Geophysiske Publikasjoner**, v. 3, n. 1, p. 1-18, 1922.
- BUSHNELL, J.M.; FALVEY, R.J. **Annual Tropical Cyclone Report 2017**. Hawaii: Joint Typhoon Warning Center, 133 p., 2017. Disponível em <https://www.metoc.navy.mil/jtwc/products/atcr/2017atcr.pdf>, acesso em 08 de nov. de 2019.
- CARLSON, T.N. Airflow Through Midlatitude Cyclones and the Comma Cloud Pattern. **Monthly Weather Review**, v. 108, n. 10, p. 1498-1509, 1980.
- CHEN, S.; LI, W.; LU, Y.; WEN, Z. Variations of latent heat flux during tropical cyclones over the South China Sea. **Meteorological Applications**, v. 21, n. 3, p. 717-723, 2014.
- COMET. Tropical cyclones. In: **Introduction to Tropical Meteorology**. 2. ed. Florida: COMET. Disponível em [https://www.meted.ucar.edu/training\\_module.php?id=868#XY4ukGZ7lrQ](https://www.meted.ucar.edu/training_module.php?id=868#XY4ukGZ7lrQ), 2019.
- CRAIG, A.W.; WOOLF, M.H. **Assessment of Tropical Cyclone Risk in the Pacific Region: Technical Report**. Canberra: Geoscience Australia. 2013. Disponível em <https://www.pacificclimatechange.net/document/assessment-tropical-cyclone-risk-pacific-region-technical-report>, acesso em 11 de set. de 2019.
- DA ROCHA, R.P.; REBOITA, M.S.; GOZZO, L.F.; DUTRA, L.M.M.; DE JESUS, E.M. Subtropical cyclones over the oceanic basins: a review. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1436, n. 1, p. 138-156, 2019.
- DACRE, H.F.; HAWCROFT, M.K.; STRINGER, M.A.; HODGES, K.I. An extratropical cyclone atlas: a tool for illustrating cyclone structure and evolution characteristics. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 10, p. 1497-1502, 2012.
- DEMIRCI, O.; TYO, J.S.; RITCHIE, E.A. Spatial and spatio-temporal projection pursuit techniques to predict the extratropical transition of tropical cyclones. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 2, p. 418-425, 2007.
- ELSBERRY, R.L. Recent advancements in dynamical tropical cyclone track predictions. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 56, n. 1-2, p. 81-99, 1995.
- EVANS, C.; WOOD, K.M.; ABERSON, S.D.; ARCHAMBAULT, H.M.; MILRAD, S.M.; BOSART, L.F.; CORBOSIERO, K.L.; DAVIS, C.A.; DIAS PINTO, J.R.; DOYLE, J.; FOGARTY, C.; GALARNEAU JR, T.J.; GRAMS, C.M.; GRIFFIN, K.S.; GYAKUM, J.; HART, R.E.; KITABATAKE, N.; LENTINK, H.S.; MCTAGGART-COWAN, R.; PERRIE, W.; QUINTING, J.F.D.; REYNOLDS, C.A.;

- RIEMER, M.; RITCHIE, E.A.; SUN, Y.; ZHANG, F. The extratropical transition of tropical cyclones. Part I: Cyclone evolution and direct impacts. **Monthly Weather Review**, v. 145, n. 11, p. 4317-4344, 2017.
- EVANS, J.L.; GUISHARD, M.P. Atlantic Subtropical Storms. Part I: Diagnostic Criteria and Composite Analysis. **Monthly Weather Review**, v. 137, n. 7, p. 2065-2080, 2009.
- EVANS, J.L.; HART, R.E. Objective indicators of the life cycle evolution of extratropical transition for Atlantic tropical cyclones. **Monthly Weather Review**, v. 131, n. 5, p. 909-925, 2003.
- FOLEY, G.R.; HANSTRUM, B.N. The capture of tropical cyclones by cold fronts off the west coast of Australia. **Weather and Forecasting**, v. 9, n. 4, p. 577-592, 1994.
- GALARNEAU, T.J.; DAVIS, C.A.; SHAPIRO, M.A. Intensification of Hurricane Sandy (2012) through extratropical warm core occlusion. **Monthly Weather Review**, v. 141, n. 12, p. 4296-4321, 2013.
- GAN, M.A.; RAO, V.B. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 5, p. 1293-1302, 1991.
- GAN, M.A.; SELUCHI, M.E. Ciclones e ciclogênese. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; DIAS, M.A.F.; JUSTI DA SILVA, M.G.A. (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, p. 111-125, 2009.
- GAO, S.; JIA, S.; WAN, Y.; LI, T.; ZHAI, S.; SHEN, X. The role of latent heat flux in tropical cyclogenesis over the Western North Pacific: Comparison of developing versus non-developing disturbances. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 7, n. 2, p. 28, 2019.
- GOZZO, L.F.; DA ROCHA, R.P.; REBOITA, M.S.; SUGAHARA, S. Subtropical Cyclones over the Southwestern South Atlantic: Climatological Aspects and Case Study. **Journal of Climate**, v. 27, n. 22, p. 8543-8562, 2014.
- GRAY, W.M. **Global View Of The Origin Of Tropical Disturbances And Storms**. Fort Collins: Department of Atmospheric Science, 1968. Disponível em [https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/107/0114\\_Blue-book.pdf](https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/107/0114_Blue-book.pdf), acesso em 06 de jun. de 2019.
- GUTRO, R. **NASA Tracking Tropical Storm Talim in Philippine Sea**. Washington D.C.: NASA. Disponível em <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/talim-philippine-sea/>, acesso em 09 de jun. de 2019.
- HARR, P.A.; ELSBERRY, R.L. Extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific. Part I: Evolution of structural characteristics during the transition process. **Monthly Weather Review**, v. 128, n. 8, p. 2613-2633, 2000.
- HART, R.E.; EVANS, J.L. A climatology of the extratropical transition of Atlantic tropical cyclones. **Journal of Climate**, v. 14, n. 4, p. 546-564, 2001.
- HART, R.E. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. **Monthly Weather Review**, v. 131, n. 4, p. 585-616, 2003.
- HERSBACH, H.; DEE, D. ERA5 reanalysis is in production. **ECMWF Newsletter**, n. 147, 2016.
- HOLTON, J.R. **An Introduction to Dynamic Meteorology**. 5. ed. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004. Disponível em [http://www.dca.ufcg.edu.br/DCA\\_download/An%20Introduction%20to%20Dynamic%20Meteorology.pdf](http://www.dca.ufcg.edu.br/DCA_download/An%20Introduction%20to%20Dynamic%20Meteorology.pdf), acesso em 17 de set. de 2019.
- HUFFMAN, G.J.; ADLER, R.F.; BOLVIN, D.T.; GU, G.; NELKIN, E.J.; BOWMAN, K.P.; HONG, Y.; STOCKER, E.F.; WOLFF, D.B. The TRMM multi-satellite precipitation analysis: quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. **Journal of Hydro-meteorology**, v. 8, n. 1, p. 38-55, 2007.
- JONES, S.C.; HARR, P.A.; ABRAHAM, J.; BOSART, L.F.; BOWYER, P.J.; EVANS, J.L.; HANLEY, D.E.; HANSTRUM, B.N.; HART, R.E.; LALAURETTE, F.; SINCLAIR, M.R.; SMITH, R.K.; THORNCROFT, C. The extratropical transition of tropical cyclones: Forecast challenges, current understanding, and future directions. **Weather and Forecasting**, v. 18, n. 6, p. 1052-1092, 2003.
- KITABATAKE, N. Climatology of extratropical transition of tropical cyclones in the western North Pacific defined by using cyclone phase space. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, v. 89, n. 4, p. 309-325, 2011.
- KLEIN, P.M.; HARR, P.A.; ELSBERRY, R.L. Extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones: An overview and conceptual model of the transformation stage. **Weather and Forecasting**, v. 15, n. 4, p. 373-395, 2000.
- KNAPP, K.R.; NOAA CDR PROGRAM. **NOAA Climate Data Record (CDR) of Gridded Satellite Data from ISCCP B1 (GridSat-B1) Infrared Channel Brightness Temperature, Version 2**. Asheville: NOAA National Centers for Environmental Information, 2014. Disponível em <https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00829>, acesso em 06 de jun. de 2019.
- KOFRON, D.E.; RITCHIE, E.A.; TYO, J.S. Determination of a consistent time for the extratropical transition of tropical cyclones. Part I: Examination of existing methods for finding "ET time". **Monthly Weather Review**, v. 138, n. 12, p. 4328-4343, 2010.
- LIVEMINT. **Typhoon Talim Slams Japan, Hundreds of Flights Grounded**. Disponível em <https://www.livemint.com/Politics/s0eTyRYVnX3ZdpXLua5weJ/Typhoon-Talim-slams-Japan-hundreds-of-flights-grounded.html>, acesso em 09 de jun. de 2019.
- MONGOSING, F. Typhoon 'Lannie' enters PAR. **INQUIRER.net**. Disponível em <https://newsinfo.inquirer.net/929649/lannie-talim-tropical-storm-par-pagasa-weather-forecast>, acesso em 09 de jun. de 2019.
- MURATA, H.; SAITOH, K.; SUMIDA, Y. True color imagery rendering for Himawari-8 with a color reproduction approach based on the CIE XYZ color system. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, n. 96b, p. 211-238, 2018.
- NATIONAL HURRICANE CENTER (NHC). **Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale**. Disponível em <https://twitter.com/taylormalandra/status/1177014083520016384>, acesso em 12 de set. de 2019.
- PATERSON, L.A.; HANSTRUM, B.N.; DAVIDSON, N.E.; WEBER, H.C. Influence of Environmental Vertical Wind

- Shear on the Intensity of Hurricane-Strength Tropical Cyclones in the Australian Region. **Monthly Weather Review**, v. 133, p. 3644-3660, 2005.
- REBOITA, M.S.; DA ROCHA, R.P.; OLIVEIRA, D.M. Key features and adverse weather of the named subtropical cyclones over the southwestern South Atlantic Ocean. **Atmosphere**, v. 10, n. 1, p. 6-21, 2019.
- REBOITA, M.S.; GAN, M.A.; ROCHA, R.P.; CUSTÓDIO, I.S. Ciclones em superfície nas latitudes austrais: Parte I – Revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 171-186, 2017a.
- REBOITA, M.S.; GAN, M.A.; ROCHA, R.P.; CUSTÓDIO, I.S. Ciclones em superfície nas latitudes austrais: Parte II – Estudo de casos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 509-542, 2017b.
- REYNOLDS, R.W.; SMITH, T.M.; LIU, C.; CHELTON, D.B.; CASEY, K.S.; SCHLAX, M.G. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 20, n. 22, p. 5473-5496, 2007.
- RODGERS, E.; OLSON, W.; HALVERSON, J.; SIMPSON, J.; PIERCE, H. Environmental forcing of supertyphoon Paka's (1997) latent heat structure. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, n. 12, p. 1983-2006, 2000.
- SILVA, B.A.; LEITE, R.R.M.; REBOITA, M.S. Tufões Haiyan e Haima: Características durante a formação, maturação e dissipação. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 3, p. 37-53, 2018.
- SOUZA, C.A.; REBOITA, M.S. Intensidade do vento de dois ciclones tropicais obtida por diferentes conjuntos de dados. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 1, p. 67-75, 2020.
- STULL, R.B. **Practical Meteorology: Na Algebra-Based Survey of Atmospheric Science**. Vancouver: University of British Columbia, 2017. Disponível em [https://www.eoas.ubc.ca/books/Practical\\_Meteorology/](https://www.eoas.ubc.ca/books/Practical_Meteorology/), acesso em 03 de abr. de 2020.
- XINHUA. **Over 200,000 evacuated as Typhoon Talim approaches**. chinadaily.com.cn. 13 de set. de 2017. Disponível em [http://www.chinadaily.com.cn/china/2017-09/13/content\\_31950309.htm](http://www.chinadaily.com.cn/china/2017-09/13/content_31950309.htm), acesso em 09 de jun. de 2019.
- YU, L.; JIN, X.; WELLER, R.A. **Multidecade Global Flux Datasets From The Objectively Analyzed Air-Sea Fluxes (Oaflux) Project: Latent And Sensible Heat Fluxes, Ocean Evaporation, And Related Surface Meteorological Variables**. Oaflux Project Technical Report (OA-2008-01), 64 p., 2008. Disponível em [http://oaflux.whoi.edu/pdfs/OAFlux\\_TechReport\\_3rd\\_release.pdf](http://oaflux.whoi.edu/pdfs/OAFlux_TechReport_3rd_release.pdf), acesso em 08 de jun. de 2019.
- ZARZYCKI, C.M.; THATCHER, D.R.; JABLONOWSKI, C. Objective tropical cyclone extratropical transition detection in high-resolution reanalysis and climate model data. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 9, n. 1, p. 130-148, 2017.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.