



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Cachoeira Paulista, 18 de novembro de 2025.

Parecer Técnico
nº 032/2025

Ciclone Tropical Yaku - Peru - 03/2023

Este Parecer Técnico tem o objetivo de acompanhar a destreza das rodadas em caráter experimental do MONAN em relação ao ciclone com características tropicais Yaku, atuante no mês de março de 2023 e que resultou em chuvas intensas, deslizamentos, danos materiais e mortes no Peru e Equador. As figuras e scripts utilizados na elaboração deste parecer foram utilizados no estudo de caso do fenômeno apresentado durante o curso da Organização Meteorológica Mundial (OMM).

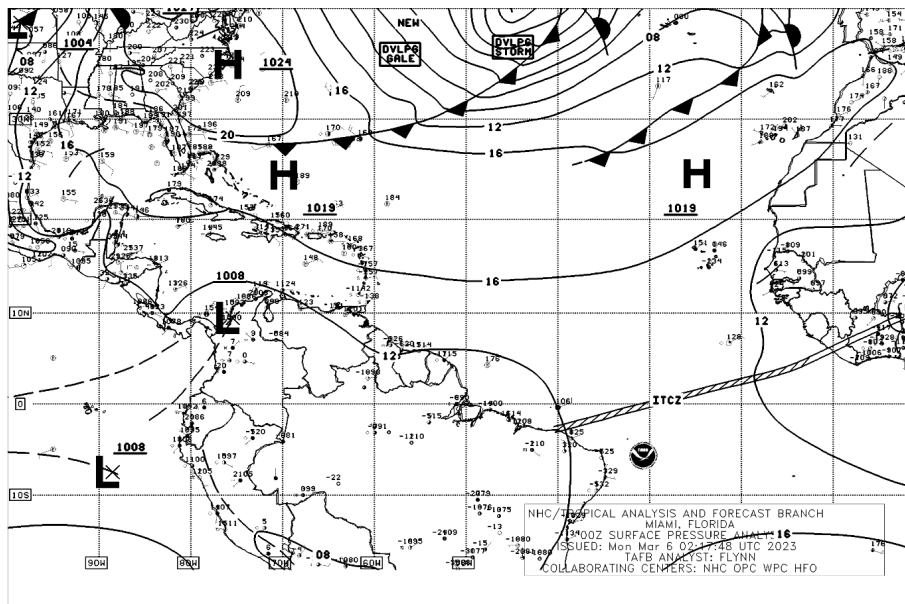
Introdução

Um ciclone com características tropicais se formou no Oceano Pacífico, próximo a costa do Peru e Equador no dia 06/03/2023 (Figura 1-2a). Este ciclone, se aproximou da costa durante a primeira quinzena de março (Figura 1-2b) e se dissipou a partir do dia 20/03/2023 (Figura 1-2c). Mais informações a respeito do ciclo de vida do ciclone podem ser encontradas em: <https://cimss.ssec.wisc.edu/satellite-blog/archives/51190>. A atuação do ciclone contribuiu para a ocorrência de chuvas generalizadas, intensas e constantes em áreas que, climatologicamente, costumam registrar baixos volumes de chuva anuais (Figura 3).

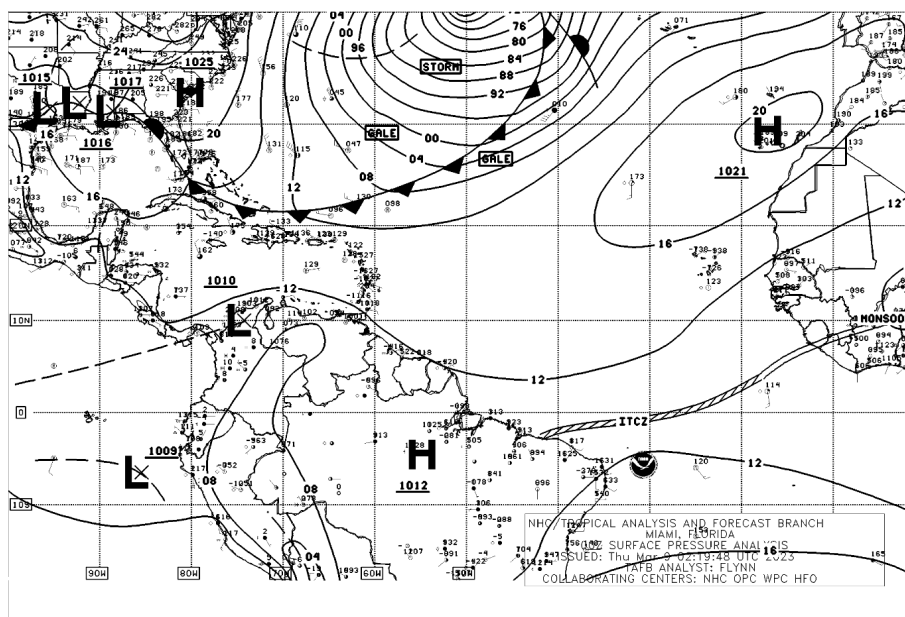


MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

a)



b)





MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

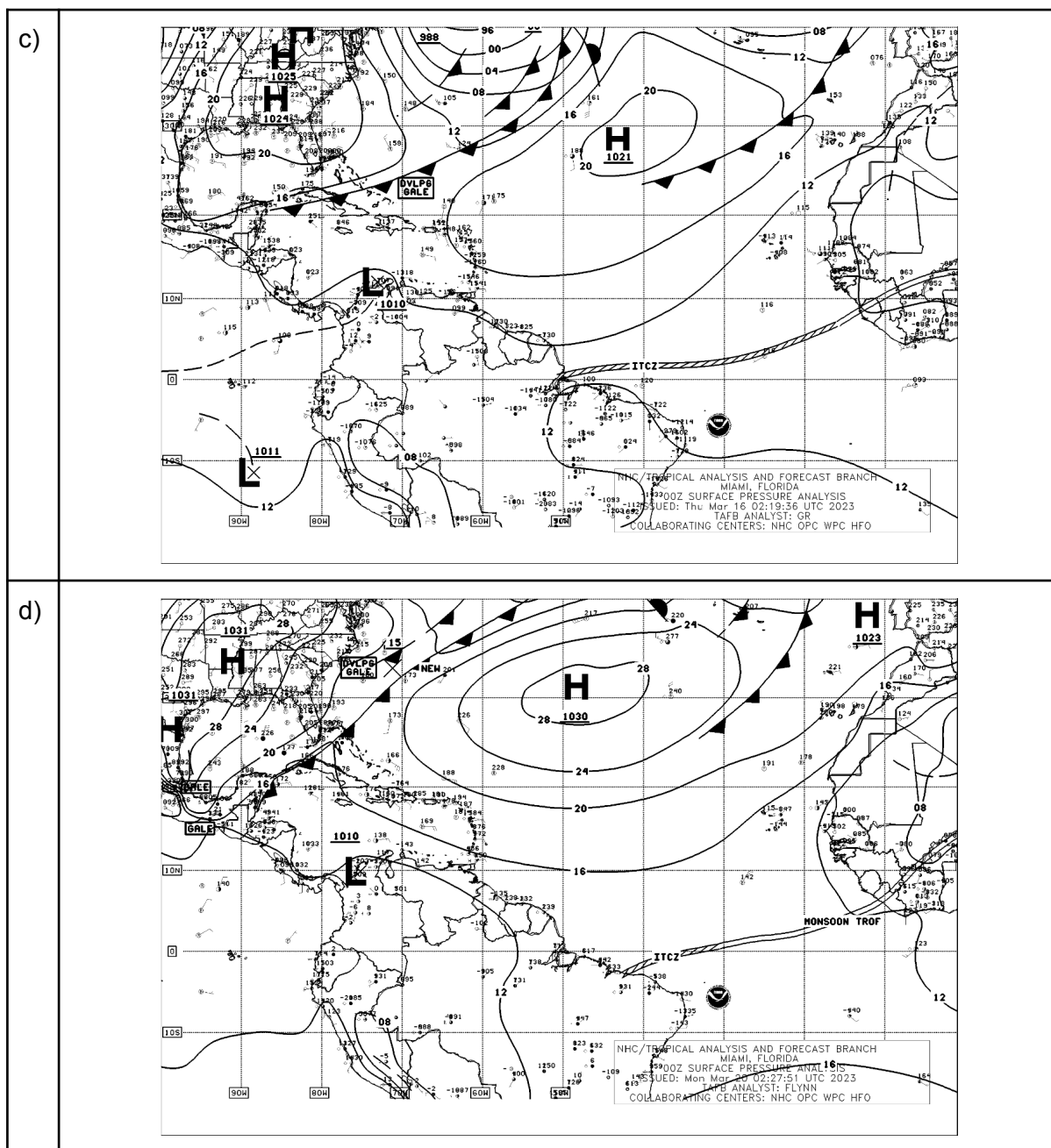
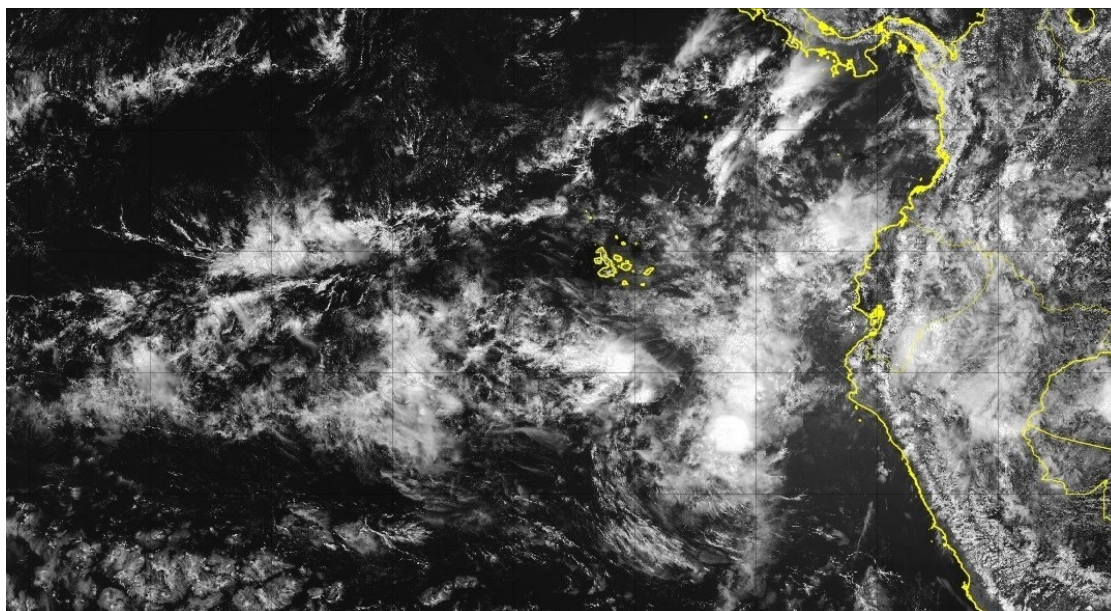


Figura 1: Análise sinótica de superfície do National Hurricane Center para: a) 02:17UTC do dia 06/03/2023; b) 02:19UTC do dia 09/03/2023; c) 02:19UTC do dia 16/03/2023 e, d) 02:27UTC do dia 20/03/2023. Fonte: extraída e adaptada de: <https://cimss.ssec.wisc.edu/satellite-blog/archives/51190>.

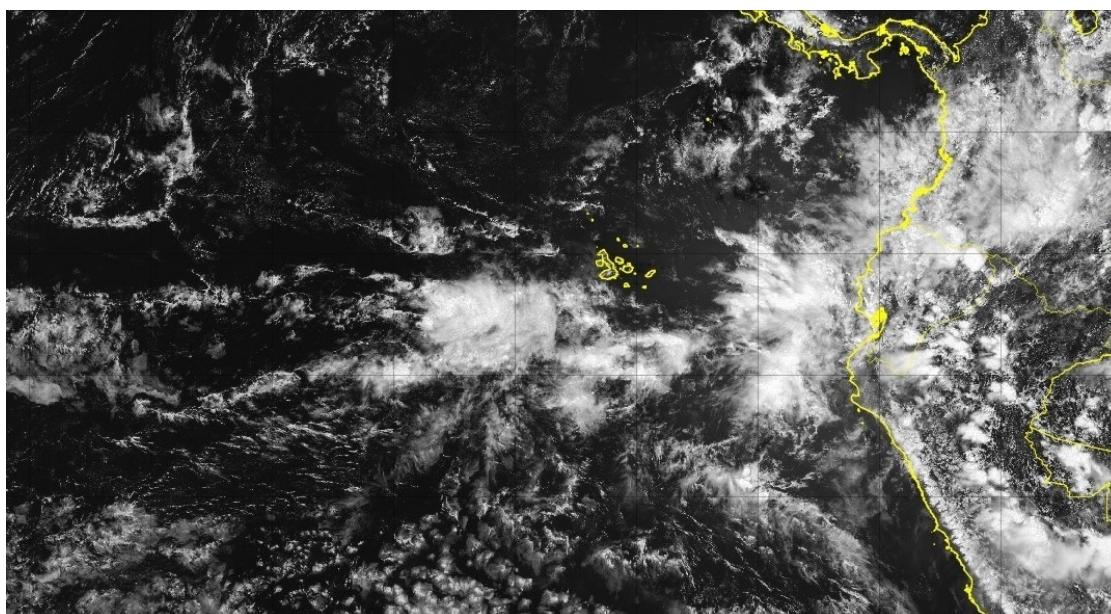


MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

a)



b)





MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

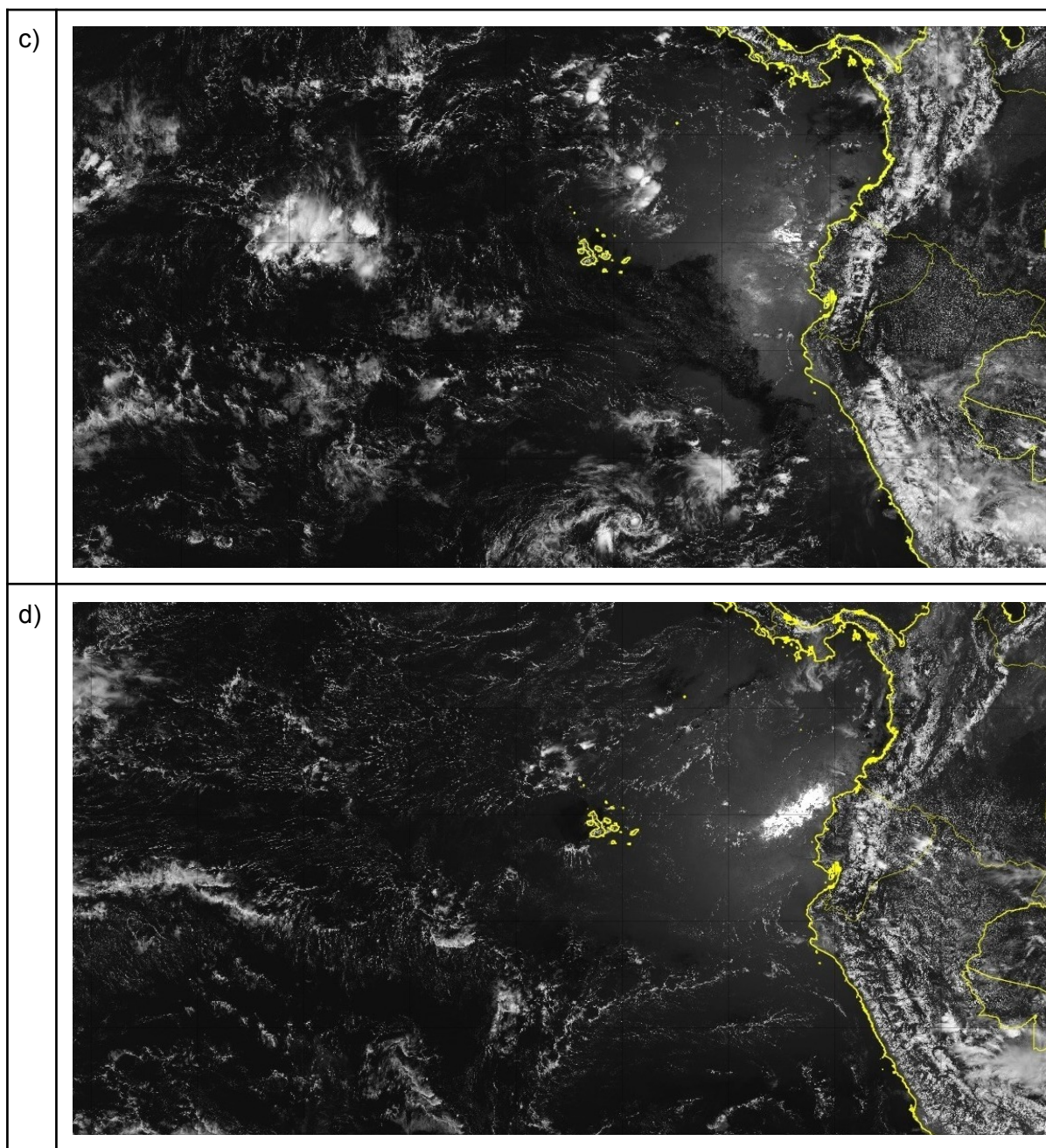
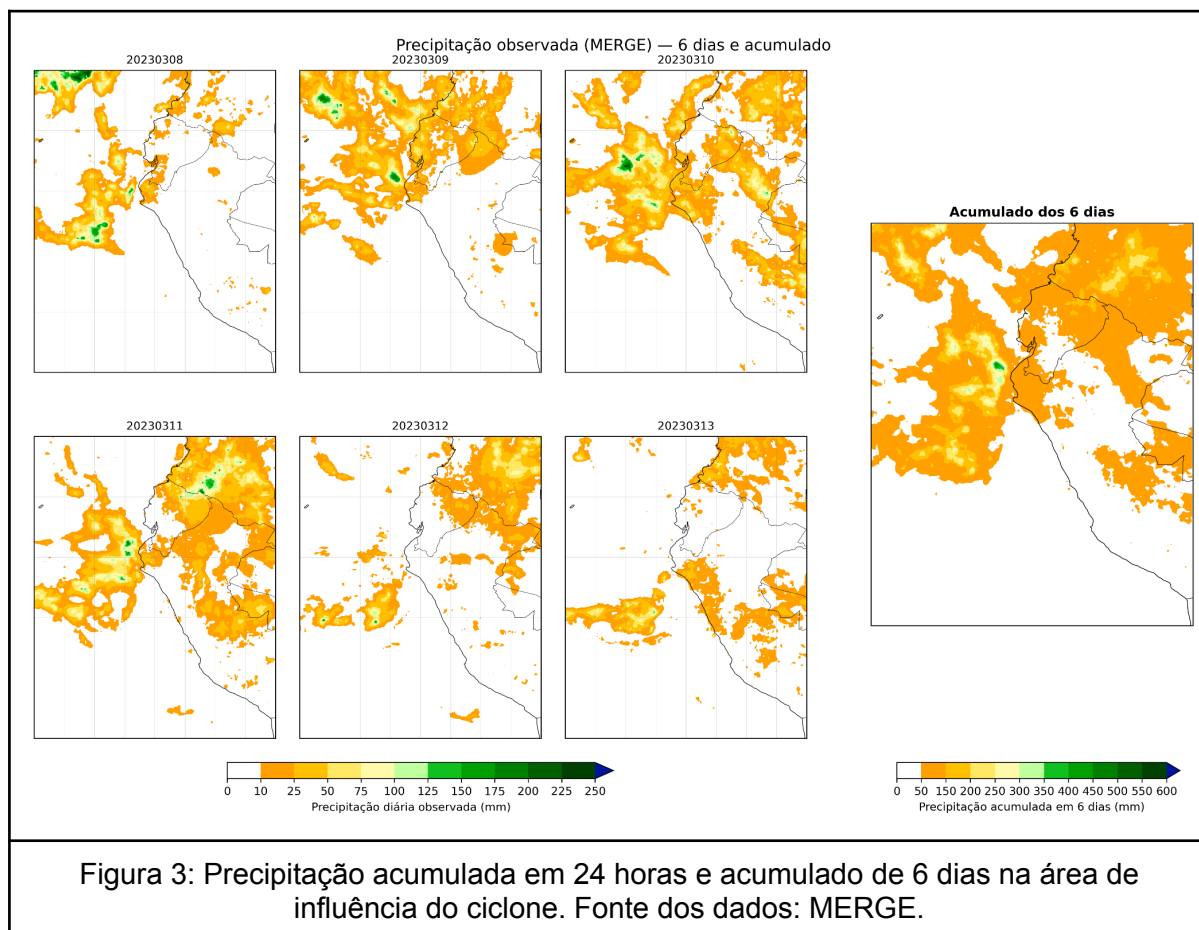


Figura 2: Imagem de satélite do canal visível para: a) 18:00UTC do dia 06/03/2023; b) 18:00UTC do dia 09/03/2023; c) e d) 18:00UTC do dia 20/03/2023. Fonte: extraída e adaptada de: <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes16.formulario.logic>.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



A análise da estrutura vertical do ciclone entre os dias 09 e 12 de março de 2023 (Figura 4) demonstra um ciclone raso com circulação ciclônica fechada em superfície e baixos níveis na atmosfera, um núcleo com temperaturas ligeiramente mais elevadas e com uma área com maior umidade relativa observada próxima ao centro do ciclone. Em médios e altos níveis da atmosfera, a circulação encontra-se menos organizada e os mínimos de vorticidade relativa em níveis médios e a divergência em altos níveis característicos de um sistema tropical também não são observados. Em termos de evolução temporal, nota-se que o ciclone atingiu seu ápice no dia 11 com mínimos de vorticidade relativa próximos ao centro e maior divergência observada em altos níveis. A partir do dia 12, há uma diminuição da umidade em baixos níveis, a vorticidade em nível médio se enfraquece e a divergência cessa em altos níveis.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

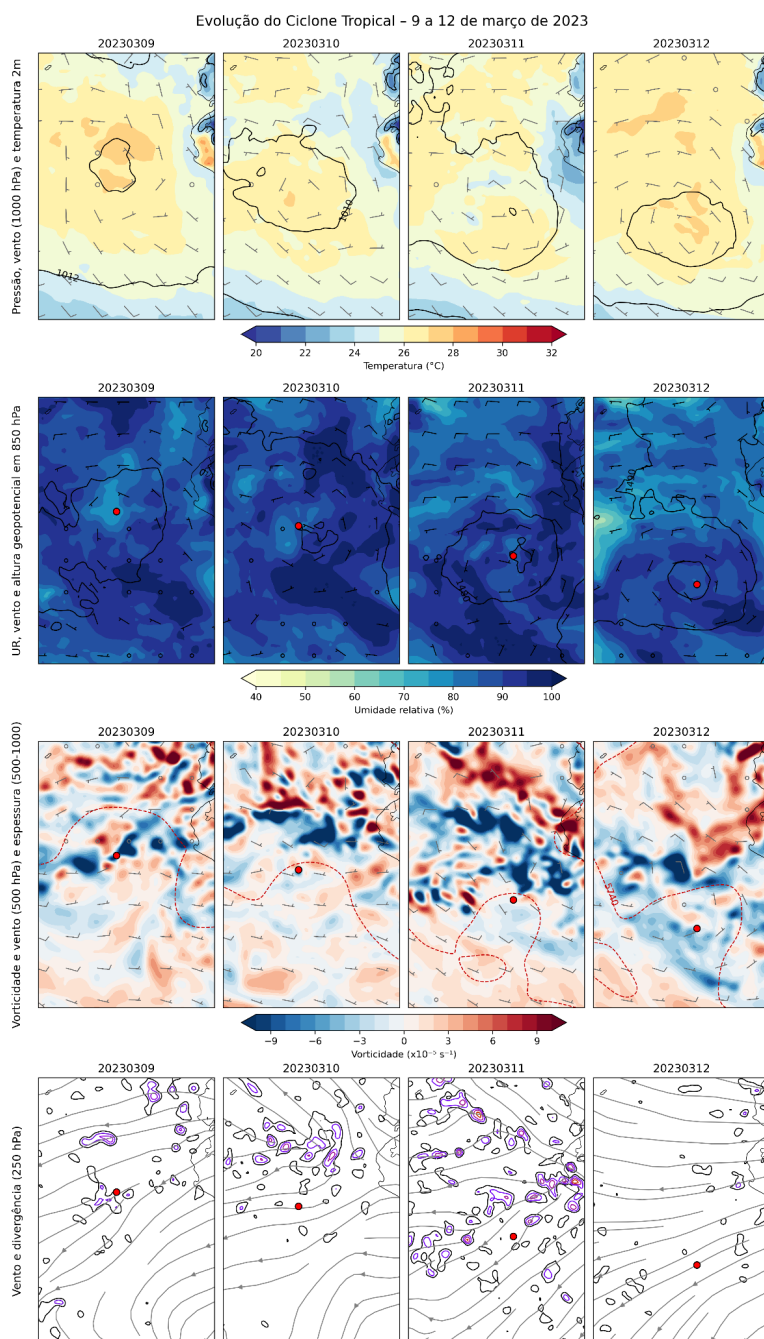
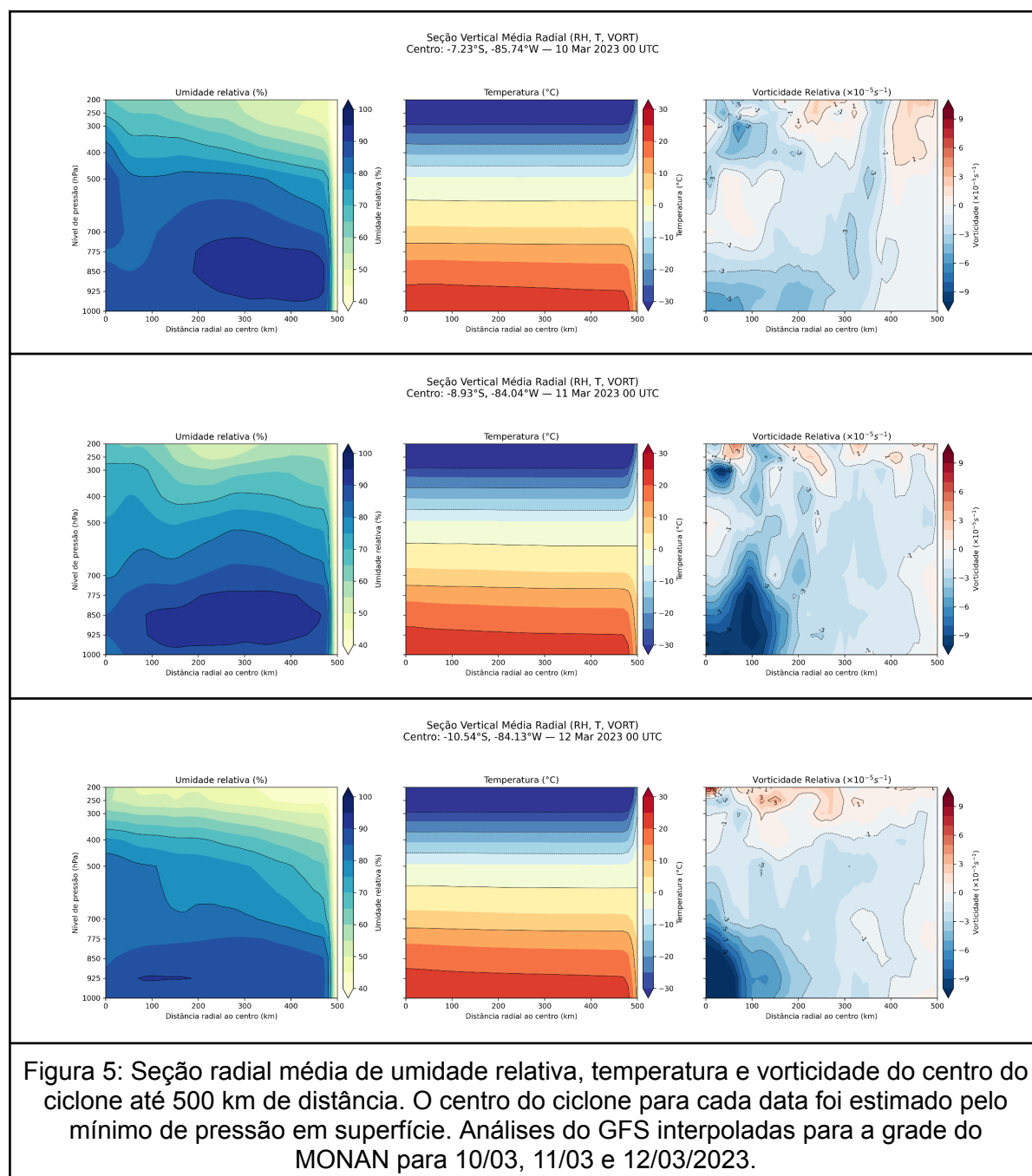


Figura 4: Pressão ao nível médio do mar, temperatura a 2 metros, e vento em 1000 hPa; Umidade Relativa, altura geopotencial e vento em 850 hPa; Vorticidade e vento em 500 hPa e espessura (500-1000); Vento e divergência em 250 hPa. O ponto vermelho indica o posicionamento do mínimo de pressão em superfície. Análises do GFS interpoladas para a grade do MONAN para 09/03, 10/03, 11/03 e 12/03/2023.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Na Figura 5 é apresentada uma seção radial vertical média do centro do ciclone até 500 km de distância para os dias 10, 11 e 12 de março de 2023 que complementam a discussão apresentada na Figura 4. Nota-se que o núcleo mais quente do ciclone fica confinado às camadas mais baixas da atmosfera, o máximo de rotação ciclônica no dia 11/03 e, a partir do dia 12 a diminuição do conteúdo de umidade ao redor do ciclone.





MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Materiais e métodos

Visando a replicabilidade deste estudo de caso durante o curso da OMM, optamos por utilizar como referência dados facilmente acessíveis na rede do CPTEC. Por isso, para os campos atmosféricos, as análises do GFS interpoladas para a grade do MONAN foram utilizadas em vez de dados de reanálise, que seriam o mais indicado. Para a precipitação, utilizamos os dados do MERGE, em detrimento de estações de superfície ou outras fontes de precipitação mais adequadas para esta área da América do Sul.

A avaliação do ciclone tropical foi estruturada em três componentes principais, combinando análise subjetiva e métricas objetivas:

- **Campos Atmosféricos:** A avaliação ocorreu de forma subjetiva, focando em destacar os principais padrões associados à estrutura e à atuação do ciclone.
- **Trajatória Prevista:** Além da estimativa visual do deslocamento, foram acrescentadas as estimativas de **erro de posicionamento** segregadas por data de previsão e por horizonte de previsão.
- **Precipitação:** Além do **viés das previsões** em relação ao produto MERGE, foram calculados o **Critical Success Index (CSI)** e o **erro de posição** entre os centros de gravidade da precipitação observada e prevista.

Para o CSI, utilizou-se o **limiar de 10 mm**, calculado pela seguinte equação:

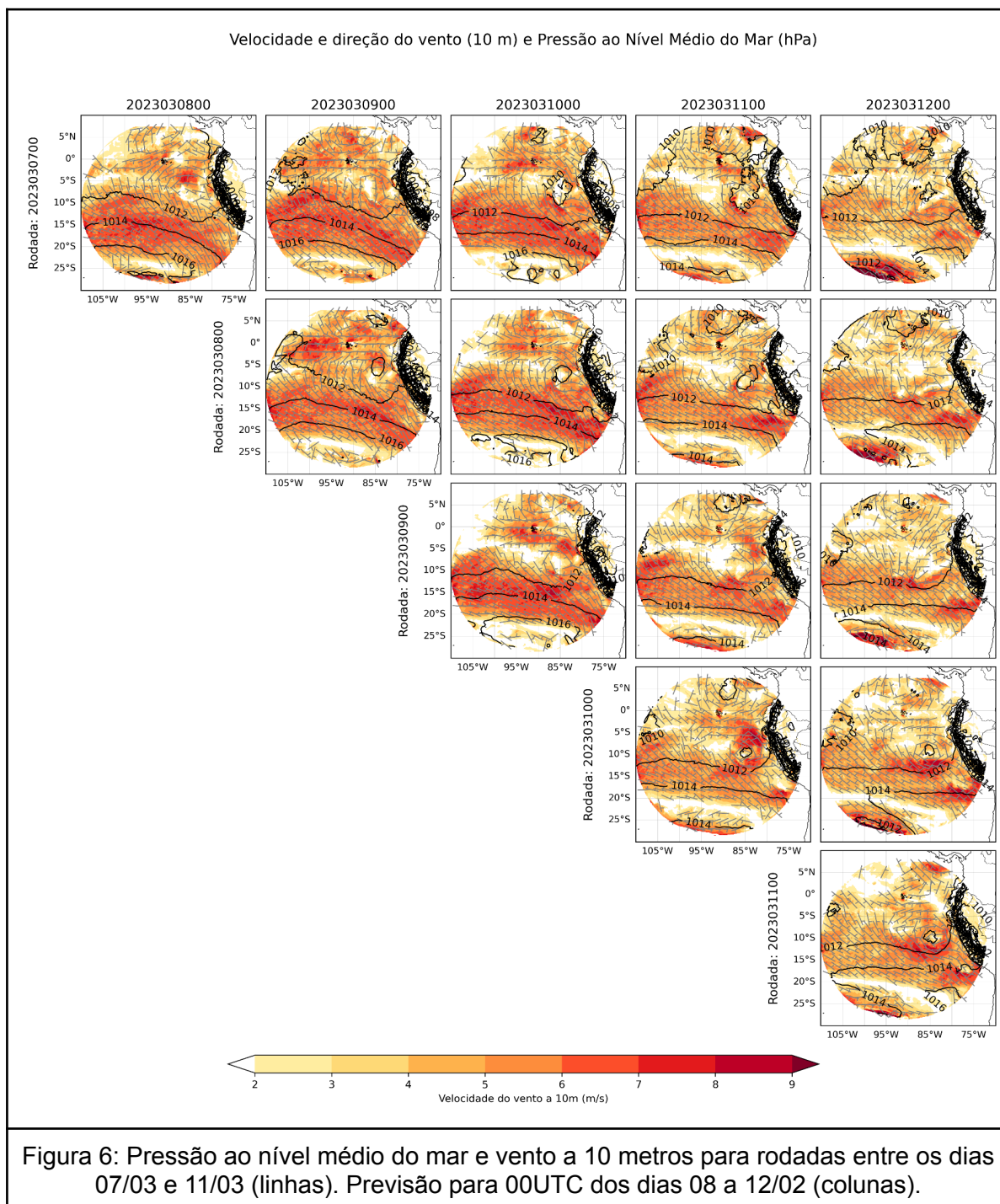
- $CSI = \text{acertos} / (\text{acertos} + \text{omissões} + \text{falso alarme})$

Previsões do MONAN

As Figuras 6, 7, 8 e 9 apresentam as previsões do MONAN para algumas variáveis chaves no estudo e avaliação deste evento. Na Figura 6, nota-se que ainda que o modelo não tenha indicado uma isóbara fechada no campo de pressão ao nível médio do mar, na maior parte das previsões o modelo previa a circulação ciclônica associada ao sistema com exceção da previsão para 12/03 nas rodadas dos dias 08 e 09. A Figura 7 serve de complemento a análise da Figura 6 com a adição da circulação e a vorticidade relativa em baixos níveis da atmosfera. Neste caso, nota-se que a rodada do dia 09/03 não indicava uma circulação ciclônica organizada em baixos níveis da atmosfera para nenhuma das três datas de previsão avaliadas. As previsões de água precipitável, omega em 500 hPa e vento em 850 hPa (Figura 8) demonstram que o modelo conseguiu prever a maior disponibilidade de água precipitável nos dias 09 e 10 próximo a costa da América do Sul combinada também com um escoamento perpendicular ao continente o que contribuiu para a intensificação dos movimentos ascendentes e para maiores volumes de chuva como observados na Figura 3.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS





MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Vorticidade (Cores) e Vento (Barbelas) em 850 hPa; Pressão ao Nível Médio do Mar (Isolinhas)
Localização de ciclone extraída das análises (Círculo Vermelho)

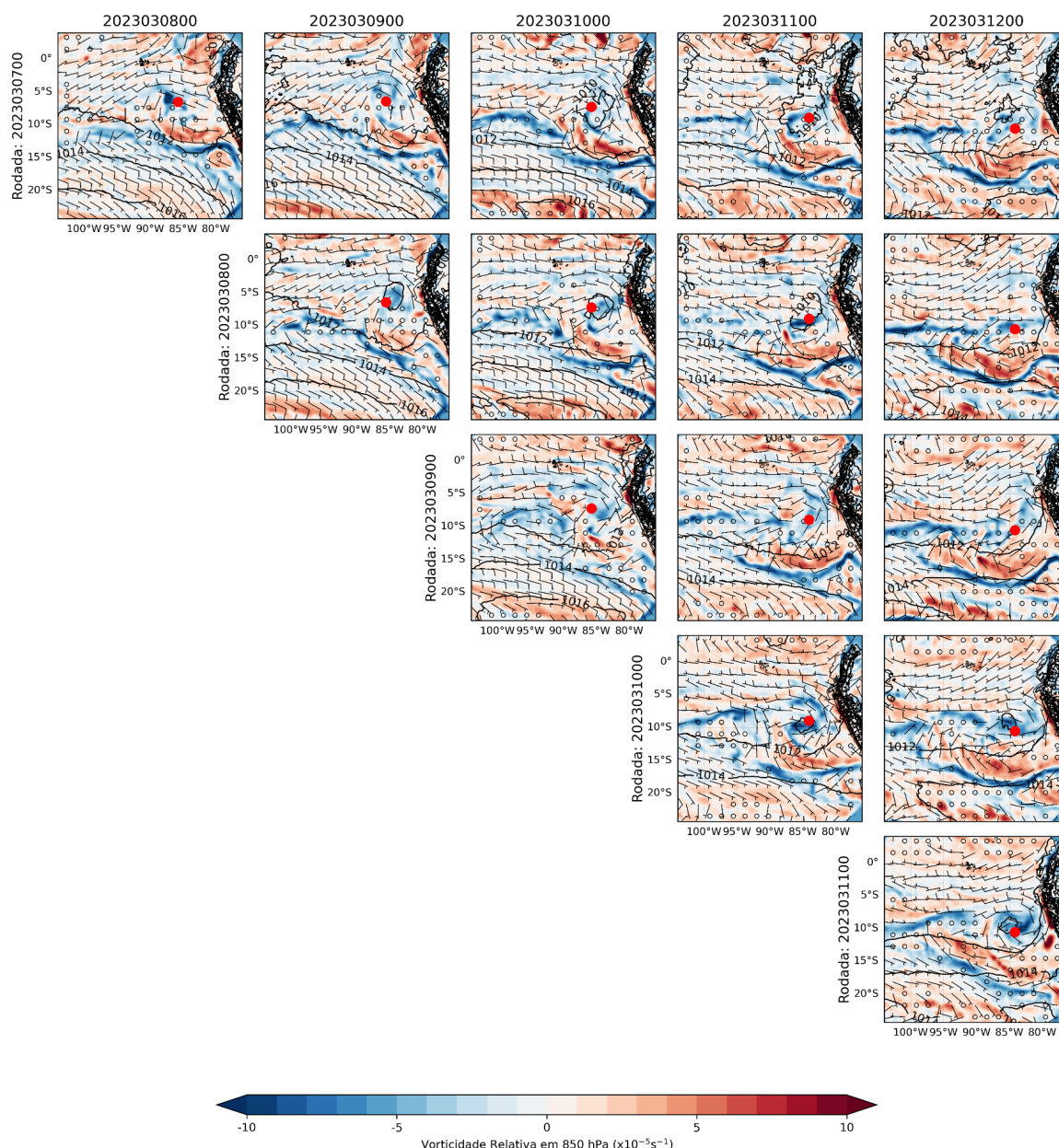
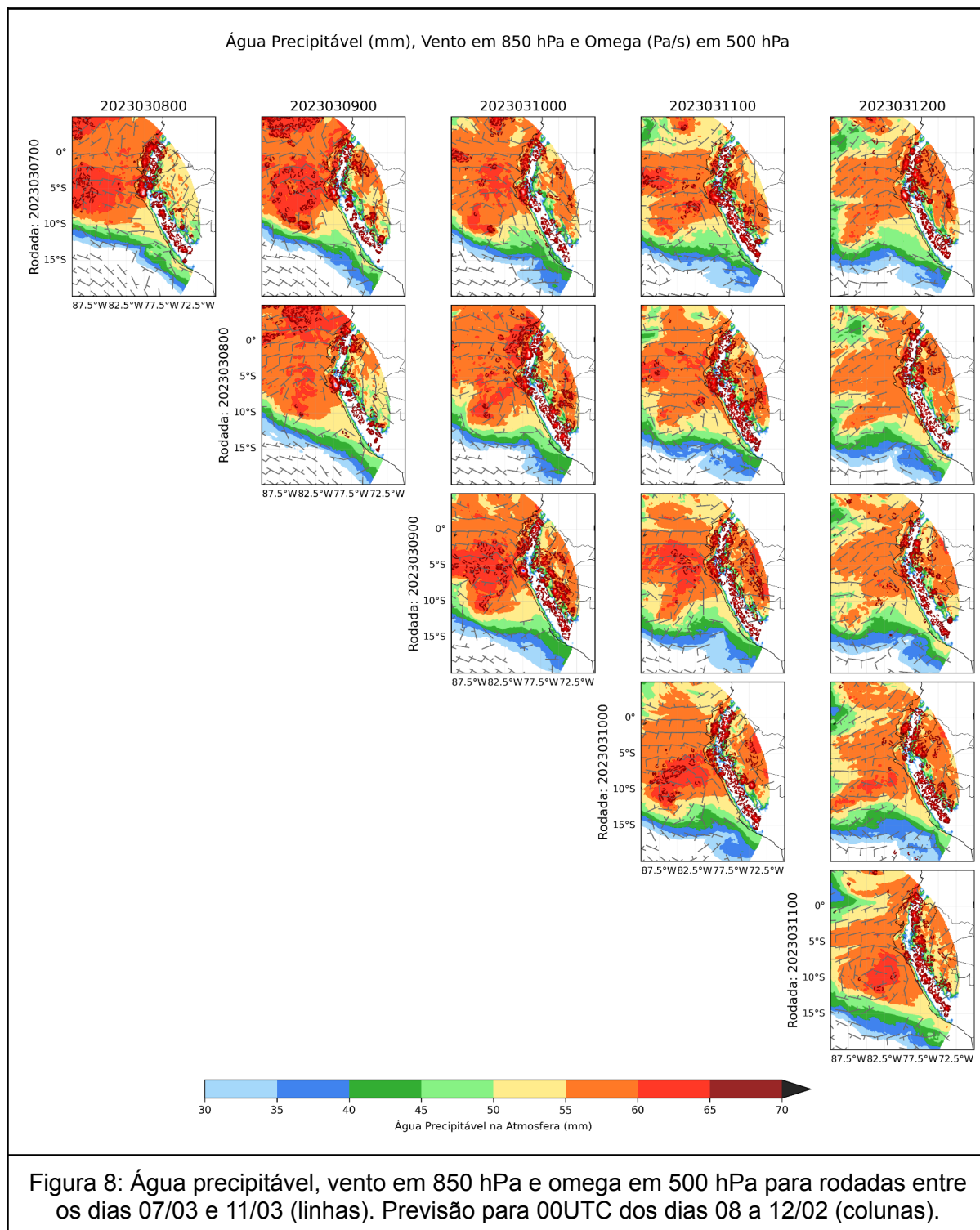


Figura 7: Pressão ao nível médio do mar, vorticidade relativa e vento em 850 hPa para rodadas entre os dias 07/03 e 11/03 (linhas). Previsão para 00UTC dos dias 08 a 12/03 (colunas). O ponto vermelho indica a posição do ciclone estimada pelo mínimo de pressão em superfície nas análises das respectivas datas.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS





MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

A Figura 8 apresenta as previsões das rodadas dos dias 07 a 10 para 00UTC do dia 11/03/2025 data na qual, pela análise da Figura 4, estima-se que o ciclone atingiu o seu maior nível de desenvolvimento. Para as 4 previsões avaliadas, nota-se que, ainda que o modelo indicasse a presença do ciclone e uma circulação ciclônica fechada em superfície com um núcleo mais quente associado, nos demais níveis atmosféricos ele não conseguiu representar a estrutura vertical do ciclone. Em 850 hPa, nota-se que a circulação ciclônica e a umidade relativa encontravam-se menos concentradas em torno do ciclone quando comparado com a Figura 4. Destaca-se, também, que apenas na previsão do dia 10/03 havia uma área homogênea de altura geopotencial próxima ao centro do ciclone. Em médios e altos níveis, nota-se que o centro do ciclone estava distante das áreas de maior influência do campo de vorticidade relativa em 500 hPa e das regiões com maior divergência em altos níveis.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

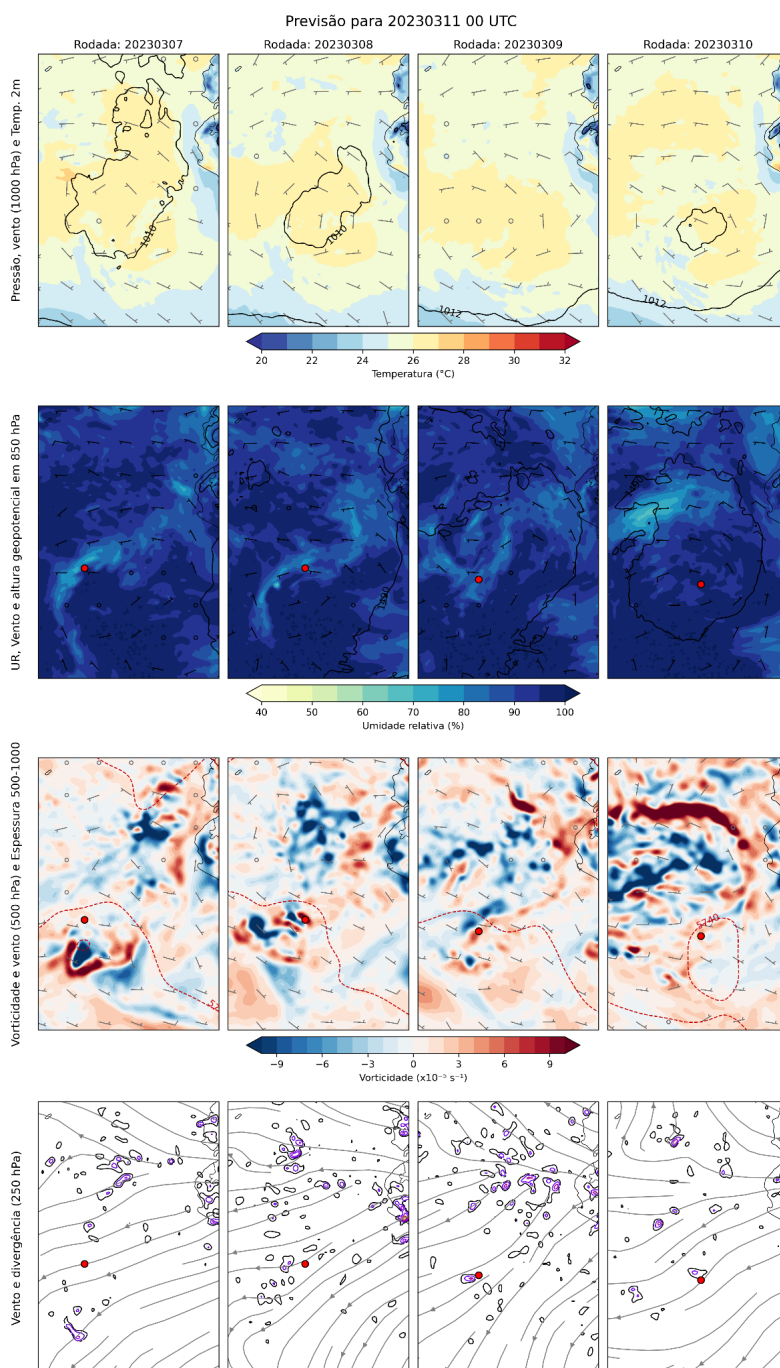
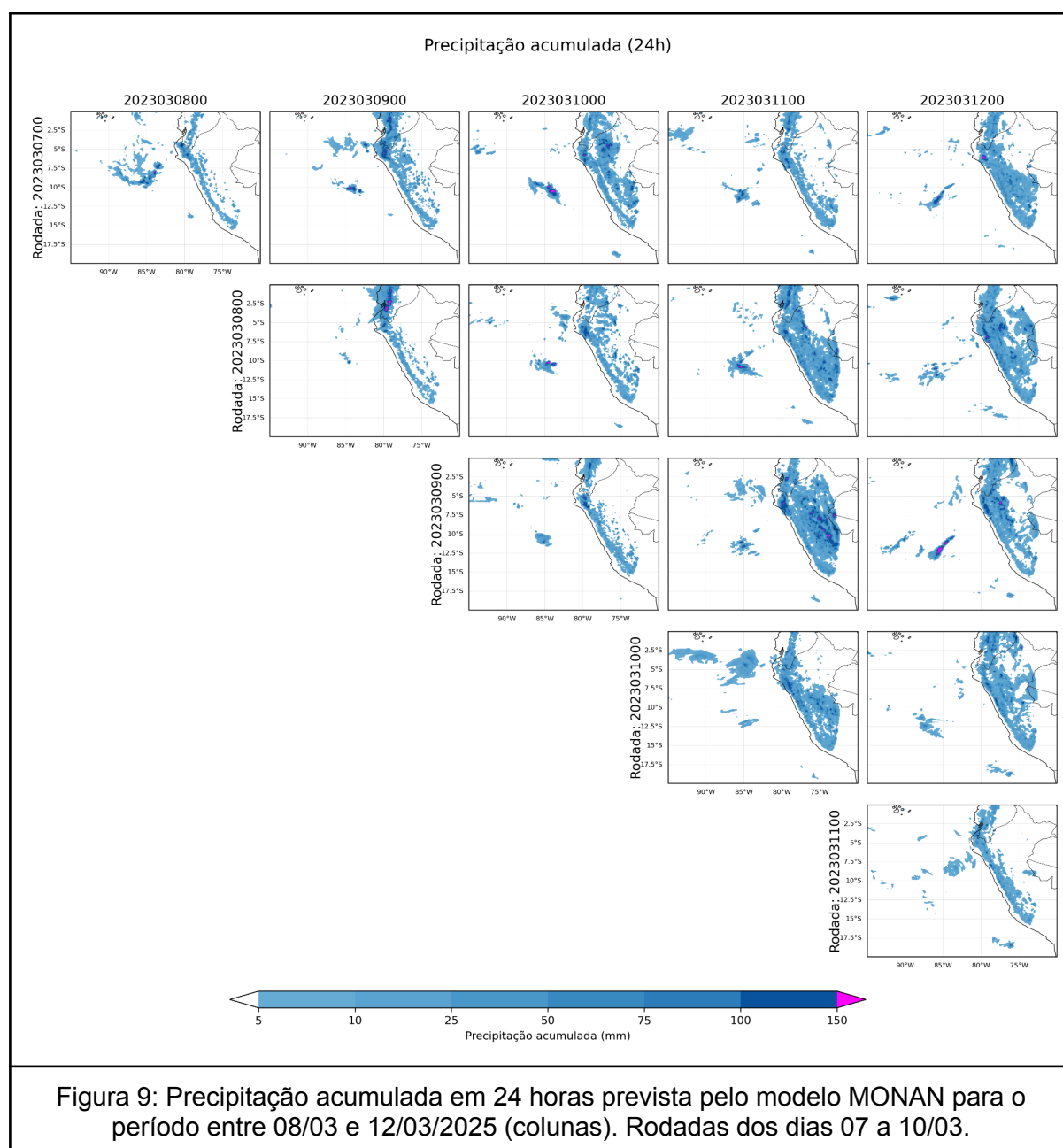


Figura 8: Pressão ao nível médio do mar, temperatura a 2 metros, e vento em 1000 hPa; Umidade Relativa, altura geopotencial e vento em 850 hPa; Vorticidade e vento em 500 hPa e espessura (500-1000); Vento e divergência em 250 hPa. Previsões para 00 UTC do dia 11/03 para rodadas do MONAN de 07/03/, 08/03, 09/03 e 10/03.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Ainda que visualmente o modelo tenha indicado previsões discrepantes de posicionamento e estrutura do ciclone, as previsões de precipitação para o período de estudo indicavam o potencial de acumulados elevados na região litorânea do Peru e do Equador (Figura 9). De uma forma geral, o as rodadas do modelo indicavam o período entre os dias 10 e 11/03 como mais favoráveis a precipitações intensas e generalizadas.

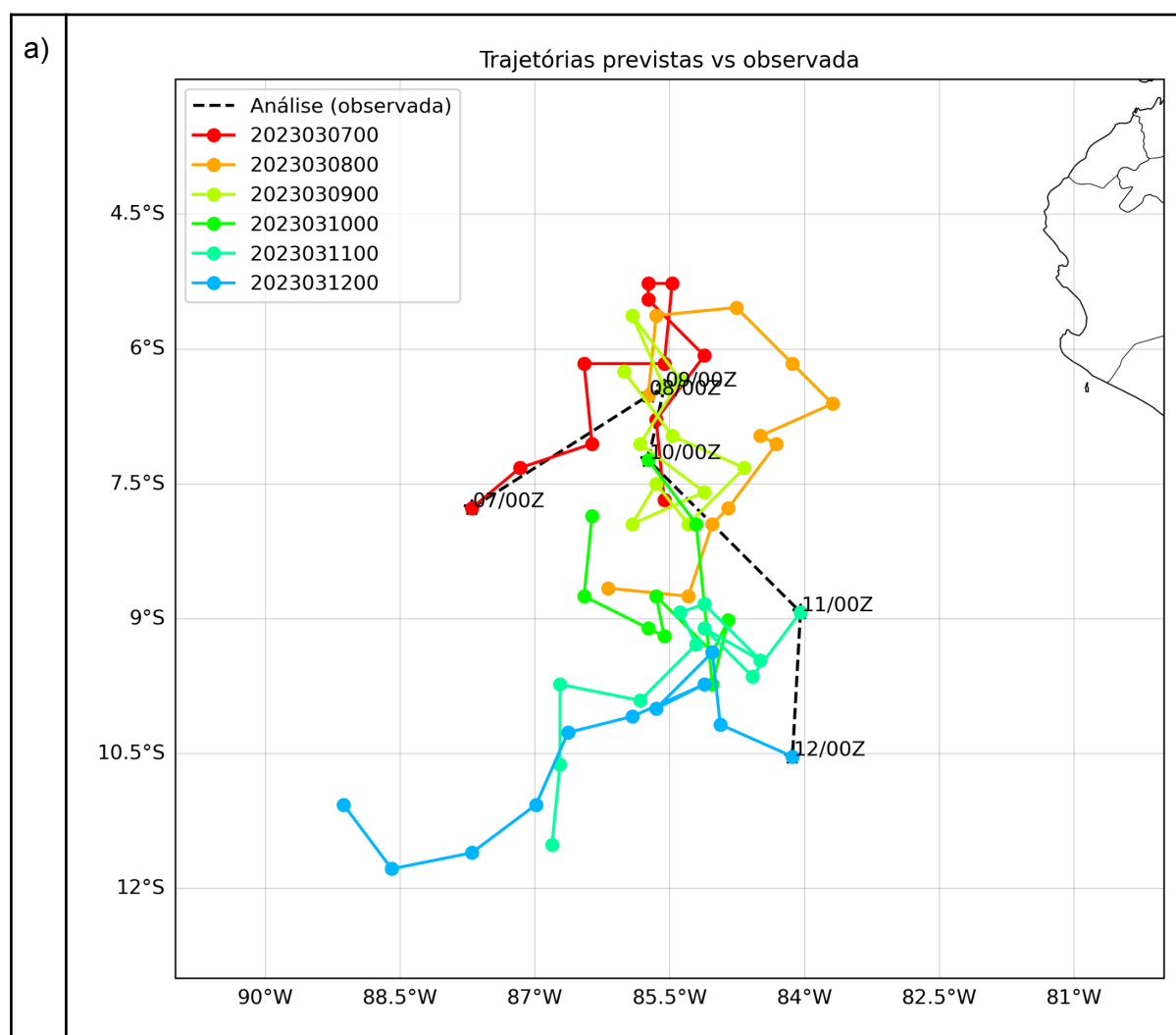




MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

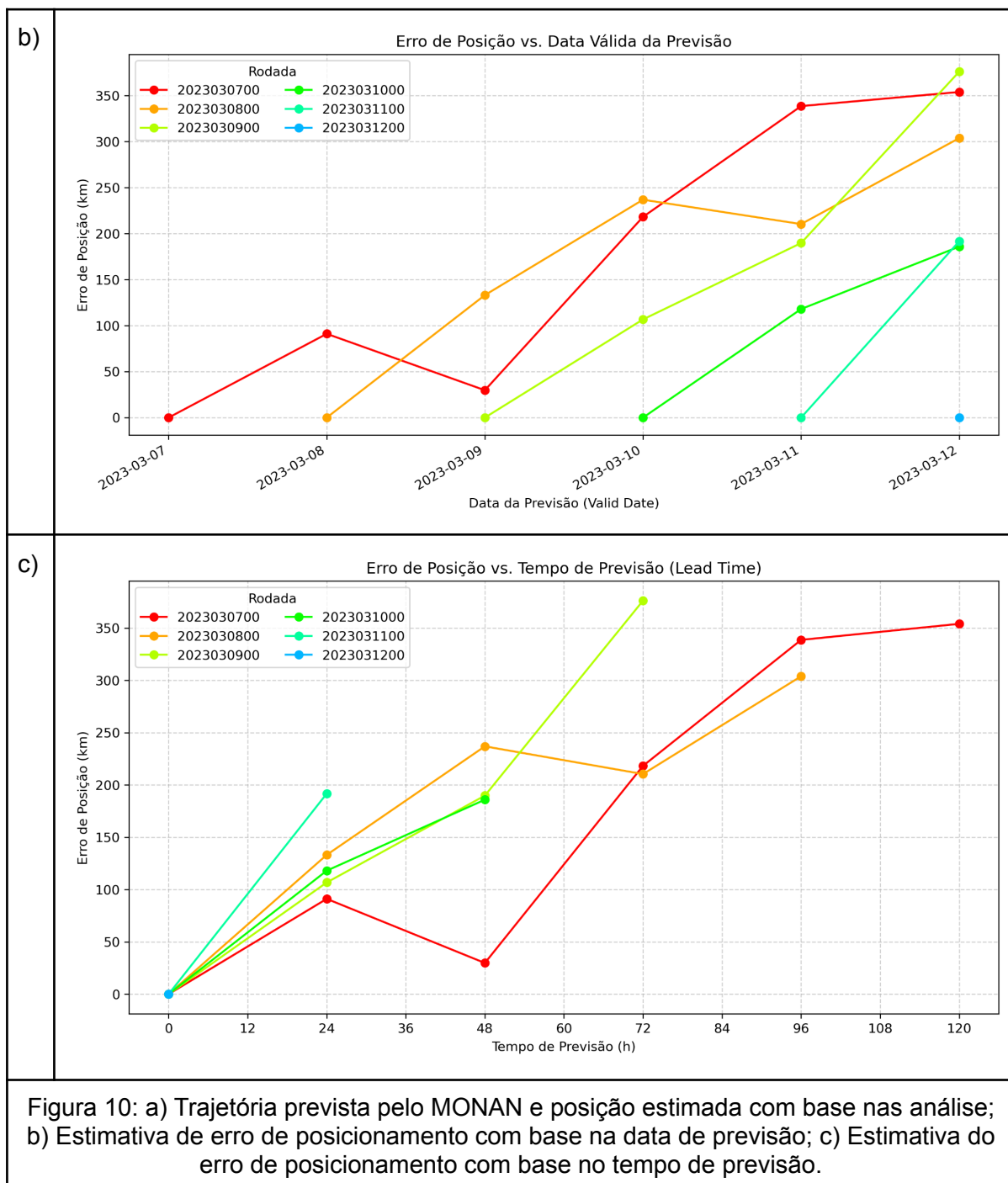
Avaliação das previsões

A Figura 10 apresenta as avaliações da previsão de posicionamento do ciclone nas rodadas do MONAN entre os dias 07 e 12/03/2023. De uma forma geral, o modelo apresentou bom desempenho ao estimar o deslocamento do ciclone (Figura 10a). Destaca-se a rodada do dia 07/03 que apresentou os menores erros de posição (menores que 400 km em todas as previsões) e a que melhor indicou a trajetória estimada do ciclone com base nas análises (Figura 11a). Por outro lado, a rodada do dia 08/03 apresentou piores resultados já que indicava o deslocamento do ciclone mais próximo a costa a partir do dia 09/03 (Figura 11a) e nos dias 09 e 10 apresentou um erro de posicionamento maior que a rodada prévia (Figura 11b).





MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

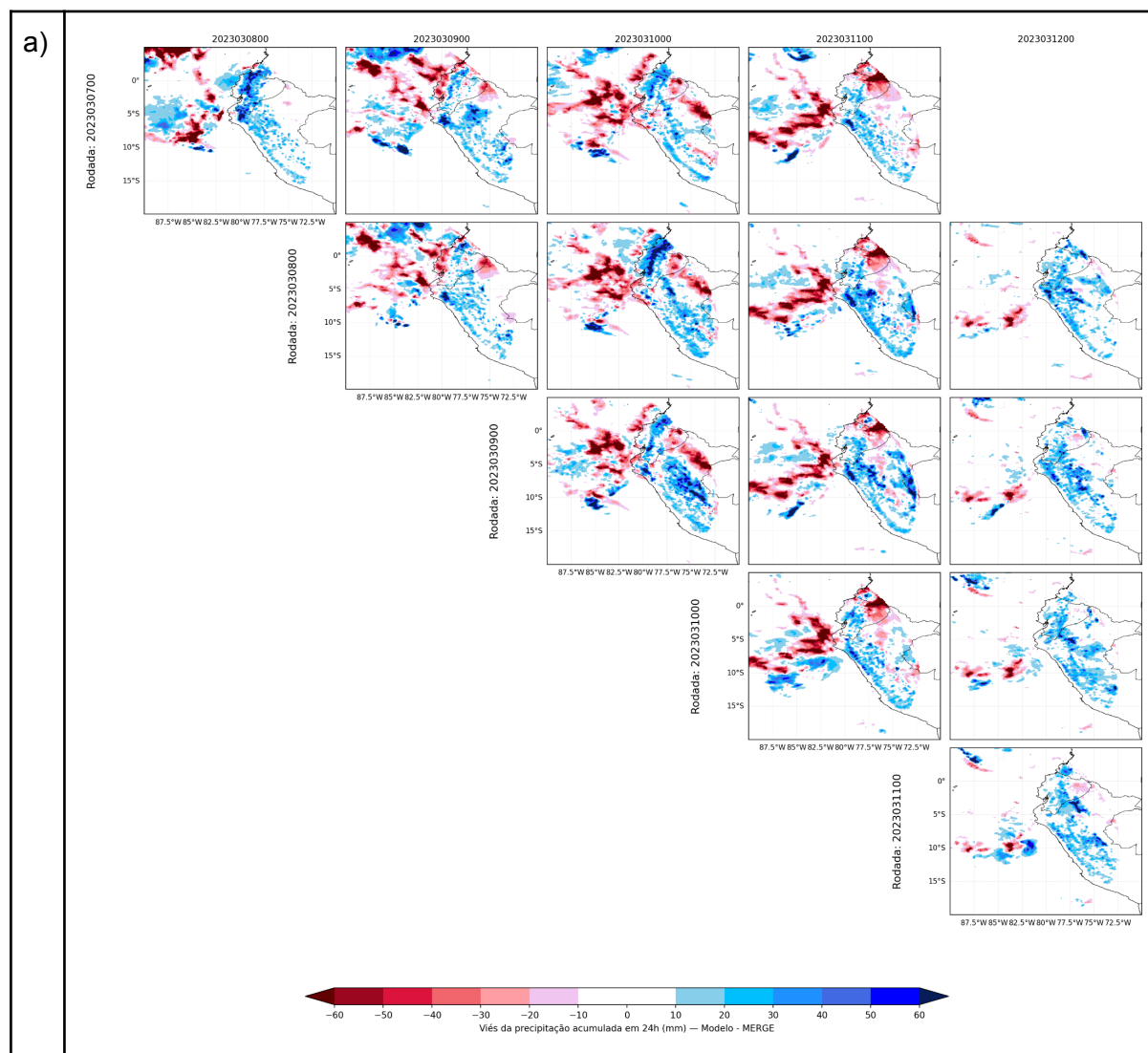


A Figura 11 apresenta algumas métricas de avaliação das previsões de precipitação acumulada em 24 horas durante o evento. Nota-se, de uma forma geral, que o modelo apresentou uma tendência de subestimar (superestimar) a precipitação na região oceânica



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

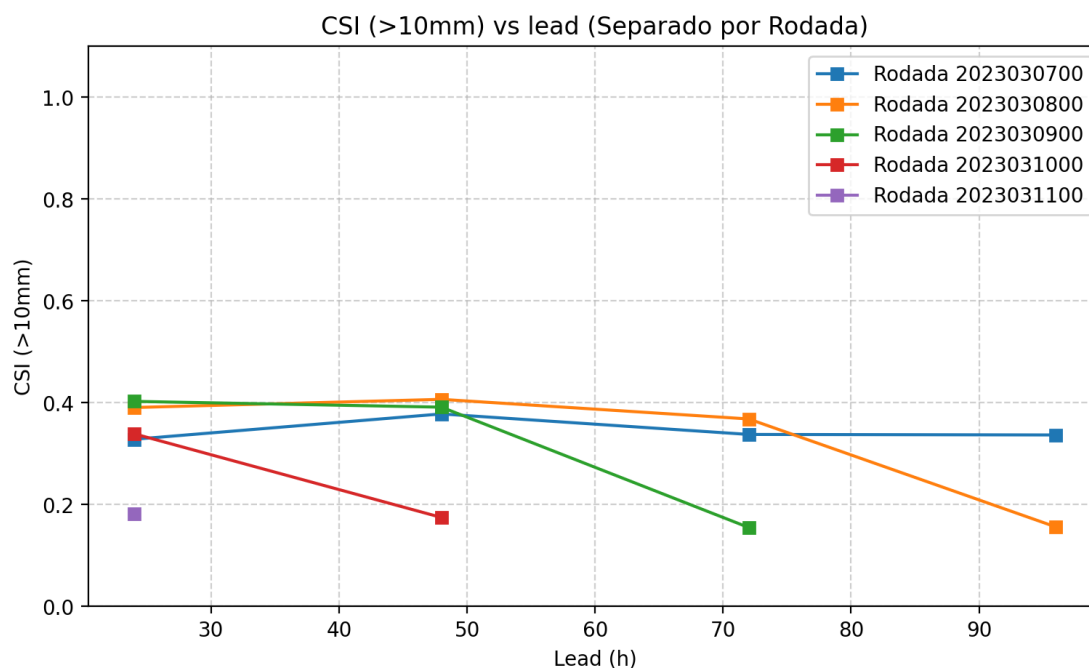
(continental) (Figura 11a). Ressalta-se que o erro na previsão de posicionamento do ciclone na rodada do dia 08 (Figura 10a) resultou em maior superestimativa da precipitação sobre o Equador, especialmente, no dia 10/03 (Figura 11a). Os baixos valores observados na métrica de Critical Success Index (Figura 11b) indicam que os erros observados nas previsões sobre o continente e oceano (Figura 11a) influenciaram nessa métrica, embora ela seja mais útil para comparar diferentes configurações do modelo ou modelos diferentes. Por fim, a estimativa do erro de posicionamento do centro de gravidade da precipitação (Figura 11c) também é influenciada pelo erro no posicionamento do ciclone e, como pode-se observar, a rodada do dia 08/03 apresentou um elevado erro a medida que houve incremento no horizonte de previsão.





MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

b)



c)

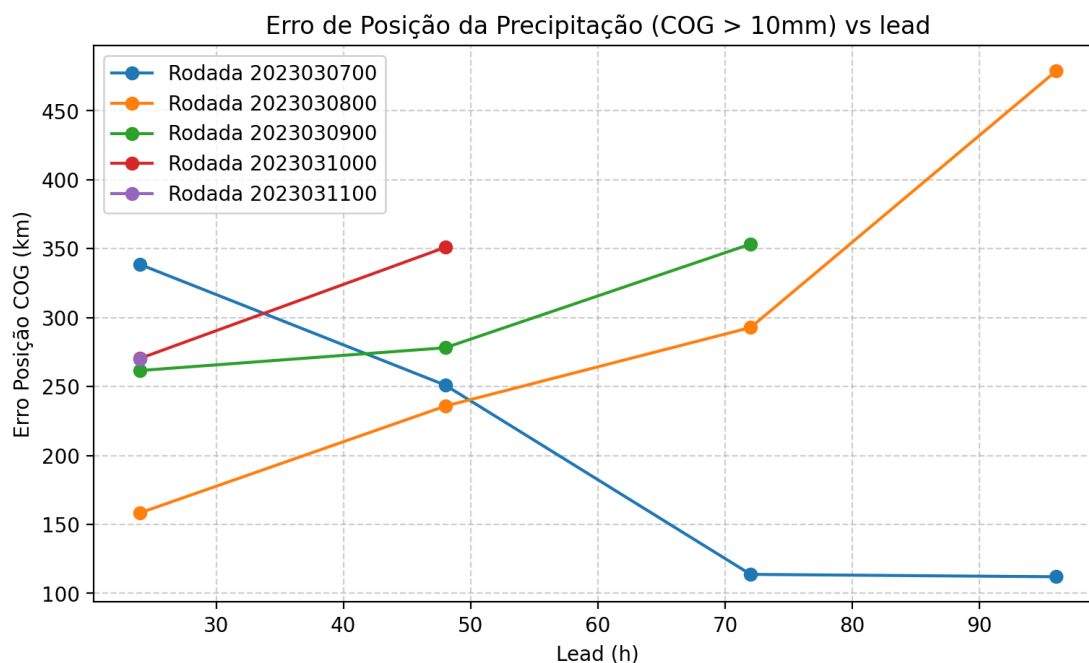


Figura 11: a) Viés de precipitação acumulada; b) Critical Success Index (CSI) para precipitações maiores que 10 mm; c) Estimativa do erro de posição do Centro de Gravidade da Precipitação (COG).



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Conclusão

Neste parecer, foi avaliada a capacidade do MONAN rodado de forma experimental para um ciclone de características tropicais formado na costa oeste da América do Sul em março de 2023 e que foi responsável por valores extremos de precipitação na costa do Peru e Equador. Os maiores volumes de chuva ocorreram entre os dias 09 e 11/03 e a análise da estrutura vertical do fenômeno demonstrou que o ciclone apresentava circulação ciclônica apenas em baixos níveis da atmosfera, sem grande desenvolvimento vertical. Ao longo do parecer foram avaliadas de forma subjetiva as previsões do MONAN para rodadas dos dias 07/03 a 12/03 dos campos de pressão ao nível médio do mar, água precipitável, vento e da estrutura vertical do ciclone. De forma mais objetiva, tendo como referências as análises do modelo e os dados de precipitação do MERGE, foram avaliadas a previsão de trajetória do ciclone e da precipitação acumulada. De uma forma geral o modelo apresentou bom desempenho tanto nas previsões de estrutura do ciclone como no deslocamento. Para a precipitação, destaca-se negativamente a tendência observada de superestimativa dos volumes de chuva sobre o continente e subestimativa da precipitação na área oceânica de atuação do ciclone.

Diogo Alessandro Arsego
Tecnologista - SIAPE: 1268922
Divisão de Previsão de Tempo e Clima - DIPTC
Coordenação-Geral de Ciências da Terra - CGCT
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI