



**Caracterização da Banda Dupla da Zona de
Convergência Intertropical (ZCIT) no Oceano Atlântico**
Characterization of the Double Band of the Intertropical
Convergence Zone (ITCZ) over the Atlantic Ocean

Thales Alves Teodoro¹; Michelle Simões Reboita¹ & Gustavo Carlos Juan Escobar²

¹Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Avenida BPS, 1303, 37500-903, Pinheirinho, Itajubá, MG, Brasil

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos,

Rodovia Presidente Dutra km 39, 12630-000, Cachoeira Paulista, SP, Brasil

E-mails: thales.teo@hotmail.com; reboita@gmail.com; gustavo.escobar@inpe.br

Recebido em: 08/02/2019 Aprovado em: 15/04/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_2_282_298

Resumo

Vários estudos têm documentado a presença da banda dupla (BD) da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) no oceano Pacífico, enquanto que no oceano Atlântico, mesmo sabendo-se da existência desse fenômeno, praticamente não há literatura. Diante disso, o presente estudo tem como objetivos: identificar a ocorrência da BD no oceano Atlântico Tropical nas estações de verão e outono, no período de 2010 a 2017; determinar composições de diferentes variáveis atmosféricas para dias com BD e para dias sem BD a fim de indicar diferenças entre composições e avaliar uma hipótese que tenta explicar o processo de formação das BDs no oceano Atlântico. Para identificar os casos de BD foram utilizadas as cartas sinóticas de superfície elaboradas pelo Grupo de Previsão do Tempo (GPT) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), imagens de satélite e dados da reanálise European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Re-Analysis (ERA-Interim). Entre os resultados têm-se que as BD são mais frequentes e duradouras nos meses de março e abril e que as duas bandas se distanciam em cerca de 4° de latitude. Nas composições dos casos de BD, as variáveis convergência de massa a 10 metros de altura e radiação de onda longa emergente são as que melhor destacam esse fenômeno. Na comparação das composições dos casos com e sem BD dessas variáveis, predominam anomalias negativas e estatisticamente significativas a sul do equador. A hipótese testada para explicar a formação das BD no oceano Atlântico Tropical foi parcialmente comprovada.

Palavras-chave: Atlântico Tropical; Composições; Variáveis Atmosféricas

Abstract

Several studies have documented the presence of double band (DB) of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) in the Pacific Ocean, while in the Atlantic Ocean, even though this phenomenon is known, there is practically no literature. Therefore, the purposes of this study are: to identify the occurrence of DB in the tropical Atlantic Ocean in the summer and autumn seasons, from 2010 to 2017; to perform a composition analysis to different atmospheric variables considering events with DB and events without DB in order to showing the difference between them and to evaluate a hypothesis that tries to explain the formation process of DB in the Atlantic Ocean. To identify the DB cases, the synoptic surface charts prepared by the Weather Prediction Group (GPT) of the Center for Weather Forecasting and Climate Studies of the National Institute of Space Research (CPTEC/INPE), satellite images and the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Re-Analysis (ERA-Interim) reanalysis were used. The results show that the DBs are more frequent and lasting in March and April and that the two bands are distant from each other in ~ 4° of latitude. In the DB composite, the variables 10-m mass convergence and outgoing longwave radiation represent better the DB than the other variables. In the comparison of the composites for events with and without DB of the quoted variables, there are statistically significant negative anomalies southward equator. The hypothesis tested to explain the formation of DB in the Tropical Atlantic Ocean was partially proven.

Keywords: Tropical Atlantic; Compositions; Atmospheric Variables



1 Introdução

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) origina-se em baixos níveis da atmosfera pela convergência dos ventos alísios de nordeste, oriundos do Hemisfério Norte (HN), com os ventos alísios de sudeste, provenientes do Hemisfério Sul (HS) (Asnani, 1993; Glickman, 2000). Em outras palavras, a ZCIT corresponde ao ramo ascendente da célula de circulação de Hadley (Asnani, 1993). A ZCIT também pode ser caracterizada como uma banda latitudinal de ocorrência de movimentos ascendentes, baixa pressão em superfície, nebulosidade e precipitação na região tropical (Krishnamurti *et al.*, 2013). Dessa forma, a ZCIT pode ser identificada tanto em imagens de satélite quanto em diferentes campos meteorológicos como: água precipitável, radiação de onda longa (ROL), velocidade vertical, convergência de massa em superfície, umidade na camada limite planetária, temperatura da superfície do mar (TSM), entre outros (Krishnamurti *et al.*, 2013). Outra característica da ZCIT é que sua posição coincide com as áreas oceânicas que possuem anomalias positivas de TSM, evidenciando o acoplamento oceano-atmosfera (Hastenrath, 1991; Asnani, 1993). Sobre as áreas oceânicas, a nebulosidade associada à ZCIT é mais bem configurada do que sobre o continente, uma vez que a convecção não sofre influência da orografia (Xavier *et al.*, 2000) e de efeitos da não homogeneidade da superfície.

A posição da ZCIT é dependente principalmente das estações do ano. Considerando a região do oceano Atlântico Equatorial, a ZCIT localiza-se mais a norte (aproximadamente 10°N) durante o inverno austral e posiciona-se mais a sul (em torno de 3°S) de fevereiro a abril (Hastenrath, 1991). Nesse oceano, Uvo (1989) verificou que o tempo de permanência da ZCIT, em sua posição mais austral, é determinante na quantidade de precipitação da estação chuvosa do norte do Nordeste Brasileiro (NEB). Segundo essa autora, os anos secos no norte do NEB ocorrem quando a ZCIT inicia sua migração para o norte no final de fevereiro ou início de março, enquanto em anos chuvosos, a ZCIT inicia sua migração para norte no final de abril ou início de maio. Dentre os estados nordestinos que mais recebem a influência da ZCIT estão: norte e centro do Mara-

não e Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte e sertões da Paraíba e Pernambuco (Melo *et al.*, 2009; Reboita *et al.*, 2016).

Desde a década de 1960 vem sendo documentada uma característica peculiar da ZCIT no oceano Pacífico (Hubert *et al.*, 1969; Musk, 1976; Waliser & Gautier, 1993; Lietzke *et al.*, 2001; Zhang, 2001; Hwang & Frierson, 2013; Bischof & Scheneider, 2016): a presença de uma segunda banda de nebulosidade, que é denominada de banda dupla (BD) da ZCIT. O nome BD é usado para fazer referência à presença de uma banda de nuvens secundária que se posiciona ao sul da banda de nebulosidade principal que é a ZCIT.

Na literatura, até o momento, não há uma explicação clara para a formação da banda secundária. De acordo com Lietzke *et al.* (2001), a formação de BD da ZCIT no oceano Pacífico equatorial leste parece estar associada com a presença de uma “língua” estreita de águas frias cruzando águas mais quentes. Já Bischoff & Schneider (2016) sugerem que a ZCIT tem sensibilidade a pequenas mudanças no *input* de energia líquida equatorial o que pode modular a resposta da ZCIT a mudanças no fluxo de energia atmosférico equatorial e favorecer a formação de bandas duplas. Por outro lado, estudos que investigam a causa dos modelos atmosféricos superestimarem a ocorrência de BD da ZCIT sugerem que (a) a ressurgência costeira, assim como os vórtices oceânicos são preditores das bandas duplas (Richter, 2015) e (b) que em situação de perturbação positiva na precipitação, o calor latente associado com a precipitação favorece a convergência mais intensa dos ventos em superfície em direção à região de precipitação. A mudança no padrão dos ventos induz uma anomalia negativa do rotacional do vento a sul da região de precipitação devido à alteração na direção dos ventos alísios de sudeste, o que também promove o bombeamento de Ekman fazendo aflorar águas mais frias na subsuperfície. Isso causa um gradiente meridional no nível do mar e, portanto, um gradiente de pressão no oceano que se dirige a leste da corrente de contorno sul equatorial. Quando essa corrente advecta águas quentes para leste, uma anomalia positiva de TSM se forma afastada da anomalia de

precipitação inicial, o que contribui para a formação da BD da ZCIT (Zhang *et al.*, 2007).

No oceano Atlântico, um dos primeiros estudos a documentar a existência de BD da ZCIT foi o de Uvo (1989). Essa autora identificou que a banda secundária acompanha o deslocamento latitudinal da banda principal e que a distância entre as duas bandas pode variar de 1° até 10° de latitude. Além disso, Uvo (1989) relatou que a formação de BD sobre o oceano Atlântico Oeste ocorre geralmente nos primeiros meses do ano (fevereiro, março e abril) e que os anos em que a BD permaneceu por mais de dois dias foram os anos com os maiores registros pluviométricos sobre o norte do NEB.

O estudo da BD da ZCIT sobre o oceano Atlântico ficou estagnado até o início da década de 2010, quando Penna *et al.* (2013) realizaram uma análise estatística da ocorrência dessas bandas nas estações do verão e outono entre 2009 a 2012. Para tanto, utilizaram os registros de BD das cartas sinóticas do Grupo de Previsão do Tempo (GPT) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). Entre os resultados, Penna *et al.* (2013) mostraram que as bandas duplas no outono foram mais duradouras, sendo que abril é o mês preferencial de ocorrência desse sistema.

Considerando a influência que a BD da ZCIT possui na estação chuvosa do norte do NEB (março e abril) e a escassez de estudos sobre esse sistema no oceano Atlântico, o presente trabalho tem como objetivos: (a) validar a metodologia de identificação de BD da ZCIT utilizada pelo GPT-CPTEC-INPE sobre o oceano Atlântico nos meses de verão e outono austral no período de 2010 a 2017; (b) realizar uma análise estatística descritiva da ocorrência das BD; (c) determinar composições de diferentes variáveis atmosféricas para dias com BD e para dias sem BD a fim de indicar diferenças entre os campos atmosféricos e (d) testar uma hipótese (apresentada na Seção 2.4) a fim de explicar as causas de formação das BD no oceano Atlântico. O estudo restringiu-se às estações do verão e outono, pois nas demais a ZCIT se encontra no HN e muitas vezes sai do domínio das cartas sinóticas do GPT/CPTEC.

2 Material e Métodos

2.1 Identificação da Banda Dupla da ZCIT

Para computar a ocorrência de BD da ZCIT no oceano Atlântico, foram utilizados dois procedimentos: (1) o registro dos casos identificados nas cartas sinóticas de superfície elaboradas pelo GPT/CPTEC no período de 2010 a 2017, uma vez que essas contêm o traçado ilustrativo de duas faixas quando da ocorrência de BD da ZCIT (Figura 1) e (2) a reaplicação da metodologia usada pelo GPT (que está registrada no manual de práticas operacionais do GPT/CPTEC de uso interno desse centro e é brevemente descrita no parágrafo seguinte) para confirmar a existência dos casos de BD, mas através de dados da reanálise *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Re-Analysis (ERA-Interim; Dee et al., 2011)* que é um conjunto de dados diferente do usado no centro operacional (análises do *Global Forecast System – GFS*). Outro diferencial do estudo é que se identificou a posição longitudinal ocupada pela BD em toda a extensão do oceano Atlântico, já que as cartas do GPT/CPTEC limitam-se a 25° W.

A metodologia empregada pelo GPT/CPTEC para identificar a BD consiste na análise visual dos campos meteorológicos de água precipitável, umidade relativa média entre os níveis de 850 e 700 hPa, velocidade vertical em 500 hPa e linhas de corrente e convergência de massa em 925 hPa obtidas da análise do GFS. Além dessas variáveis, são analisadas as imagens de satélite no canal do infravermelho e precipitação convectiva prevista pelo modelo GFS com 6 horas de antecedência. Nesses campos, é realizada a busca por regiões com máximos de água precipitável, umidade, precipitação, presença de movimentos ascendentes e convergência dos ventos em baixos níveis em duas bandas paralelas na região de estudo. É importante mencionar que a ZCIT (seja a banda principal, a BD ou ambas) nem sempre aparece configurada concomitantemente em todas as variáveis citadas, inclusive na imagem de satélite (exemplo na Figura 2), pois a ZCIT pode estar presente com pouca atividade e sem nebulosidade significativa. Por isso, ressalta-se que não é suficiente utilizar apenas imagem de satélite para a identificação desse sistema.

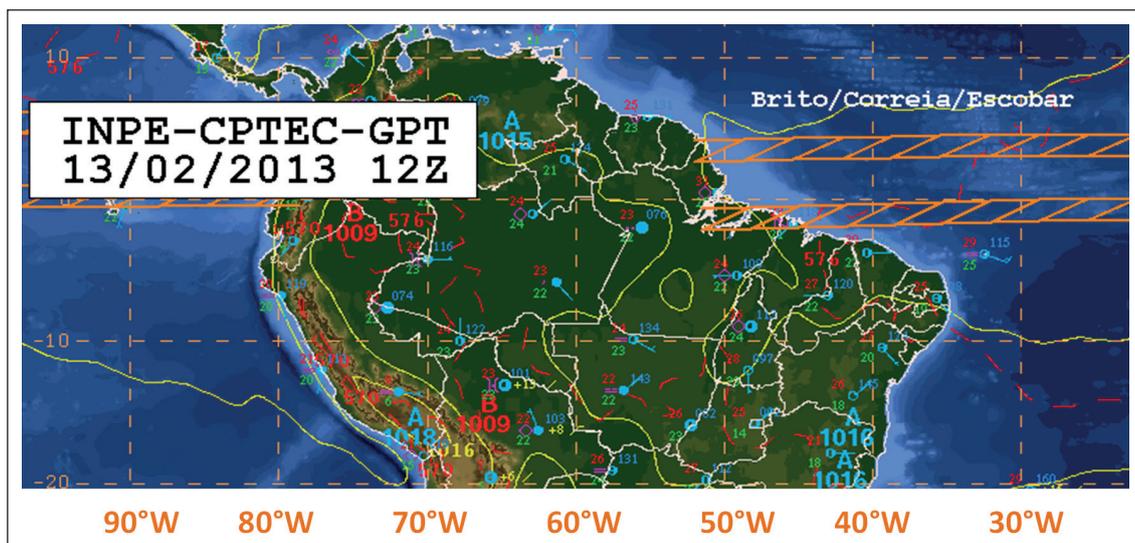
Como as cartas sinóticas do GPT/CPTEC têm seu limite norte em 12°N, e uma vez que a ZCIT pode ocupar posições ao norte dessa latitude durante o inverno austral, este estudo se restringiu apenas na identificação de BD entre os meses de dezembro a maio, já que é entre esses meses que a ZCIT se encontra próxima de sua posição mais austral e pode afetar o Brasil. Durante o processo de identificação das bandas duplas, as bandas de nebulosidade da ZCIT foram classificadas em: banda principal (BP) e banda dupla (BD), sendo que a BP se refere à banda já existente e a BD, a que se forma ao sul da principal.

Para a validação da ocorrência de BD registradas nas cartas sinóticas e obtenção do posicionamento e extensão da BP e da BD, foram construídos mapas (20°S-10°N e 60°W-10°W) com as mesmas variáveis atmosféricas analisadas pelo GPT, mas usando a reanálise ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011): água precipitável, umidade relativa média entre os níveis de 850 e 700 hPa, velocidade vertical em 500 hPa, linhas de corrente em 925 hPa (componente zonal e meridional do vento) e convergência de massa em 925 hPa. Os dados da ERA-Interim possuem resolução espacial de 0,75° de latitude por 0,75° de longitude e frequência temporal de 6 horas. Também foram analisadas a precipitação diária e imagens de satélite. A precipitação foi obtida do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP; Adler *et al.*, 2003), com resolução espacial de 1° x 1° de lat/lon. As imagens de satélite, geradas a partir de dados de temperatura de brilho do topo das nuvens no canal infravermelho, foram obtidas do *The*

National Climatic Data Center (NCDC, Knapp, 2014) – *Gridded Satellite Data* com resolução de 0,07° de latitude por longitude. Após a elaboração dos mapas, a análise foi realizada de forma visual e não com métodos automáticos.

As Figuras 1 a 3 são utilizadas para exemplificar o método de identificação das BD da ZCIT. Na Figura 1 é mostrada uma situação de BD registrada na carta sinótica no dia 13 de fevereiro de 2013 às 12 Z pelo GPT/CPTEC. Já na Figura 2 tem-se a imagem de satélite mostrando a nebulosidade da BP (4°N) e da BD (1°S). Na carta sinótica (Figura 1) não se tem como avaliar a extensão total das duas bandas uma vez que a carta é restrita a cerca de 25° W. Por isso, são analisados os campos meteorológicos no domínio mostrado na Figura 3. Embora a imagem de satélite (Figura 2) e a precipitação (Figura 3C) só indiquem sinal da BD até cerca de 35°W, as variáveis umidade relativa (Figura 3B) e convergência de massa em 925 hPa (Figura 3D) mostram de forma mais clara a presença da BD até cerca de 20°W. Os demais campos atmosféricos tiveram menos sensibilidade em registrar o caso em análise. É importante ressaltar que nem sempre a umidade relativa e a convergência de massa em 925 hPa são as variáveis que melhor indicam a presença da BD. Em algumas situações, a água precipitável tem melhor indicação, em outros a precipitação, etc.; portanto, não há uma única variável guia para o estudo da BD. Além disso, como destacado por Krishnamurti *et al.* (2013), a localização da BP e da BD nem sempre aparece na mesma posição nas diferentes variáveis atmosféricas analisadas.

Figura 1
Exemplo de ocorrência de banda dupla da ZCIT no oceano Atlântico no dia 13 de fevereiro de 2013 às 12 Z. Fonte: CPTEC-INPE.



Caracterização da Banda Dupla da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) no Oceano Atlântico

Thales Alves Teodoro; Michelle Simões Reboita & Gustavo Carlos Juan Escobar

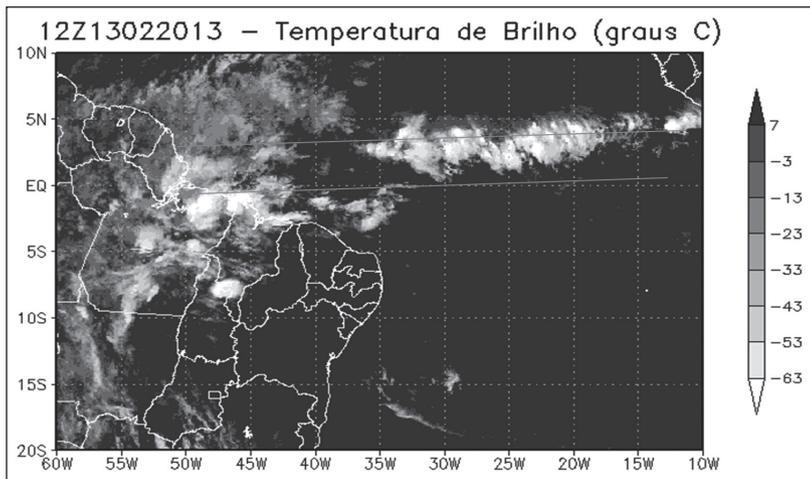


Figura 2 Imagem de satélite com dados de temperatura de brilho ($^{\circ}\text{C}$, tons de cinza) ilustrando a banda dupla da ZCIT no dia 13/02/2013 às 12 UTC. A posição da BP e da BD foi traçada em todo o domínio devido à identificação nos campos atmosféricos (umidade relativa e convergência de massa em 925 hPa) mostrados na Figura 3.

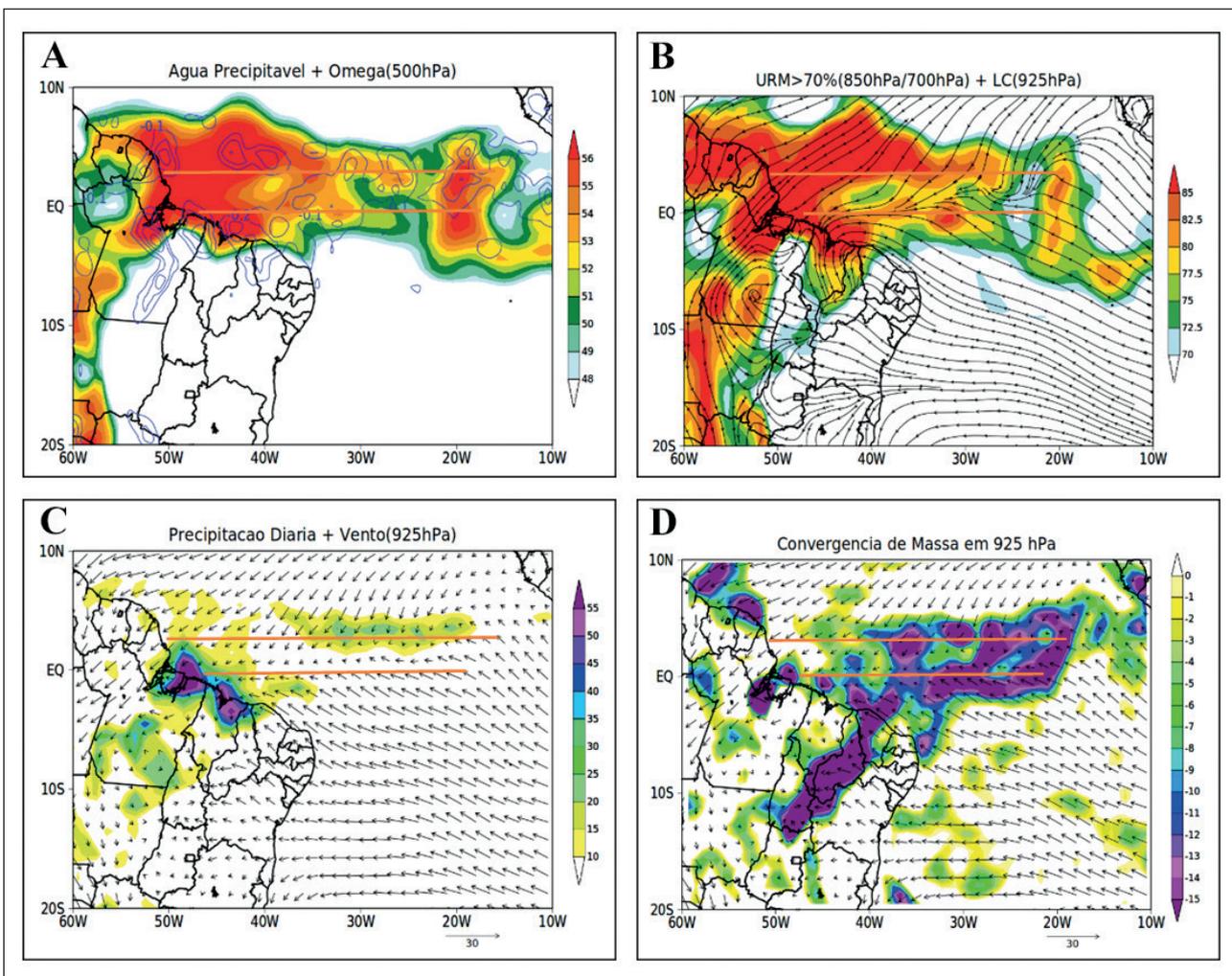


Figura 3 Campos meteorológicos no dia 13/02/2013 às 12 Z: A. água precipitável (kg m^{-2}) e movimento vertical em 500 hPa (Pa s^{-1}); B. umidade relativa média entre os níveis de 850 e 700 hPa (%) e linhas de corrente em 925 hPa (m s^{-1}); C. precipitação (mm dia^{-1}) e vento em 925 hPa (m s^{-1}); D. convergência de massa (10^3 kg s^{-1}) e vento em 925 hPa (m s^{-1}). A posição da BP e BD é indicada pelas linhas laranjas, sendo que a BD ocorre a sul da BP. A posição das linhas foi definida com base, principalmente, nas variáveis umidade relativa e convergência de massa em 925 hPa.

As posições latitudinais e longitudinais da BP e da BD foram obtidas nos horários sinóticos das 00 Z e 12 Z durante todo o tempo de vida da BD. Esse intervalo de tempo foi utilizado, pois a ZCIT não apresenta grandes variações de posicionamento entre os horários sinóticos. Com base nas posições latitudinal e longitudinal da BP e da BD, foi computada a extensão/comprimento de cada banda.

2.2 Estatística Descritiva

A partir da obtenção das informações das datas de aparecimento e desaparecimento de cada caso de BD, assim como das posições latitudinais e longitudinais tanto da BP como da BD, foram computados os totais anuais e mensais de ocorrências de BD e a extensão/comprimento das bandas. Também foi calculado o tempo de vida médio das BD.

2.3 Análise de Composição

A identificação da BD nas variáveis atmosféricas mencionadas na Seção 2.1 não é tarefa fácil, pois nem todas as variáveis mostram claramente e concomitantemente as bandas duplas. Em alguns casos, uma variável é mais sensível do que outra à identificação do sistema. Tendo em vista essa dificuldade, propõe-se aqui, verificar, do ponto de vista climatológico, se há diferenças nos campos meteorológicos dos dias com BD em relação aos sem BD e de ambos em relação à média do período. As médias dos dias com e sem BD, o que também é chamado de composições, foram calculadas com dados diários das 12 Z. Além disso, foi computada a média climatológica dessas variáveis no período de 1998 a 2017. Embora, a média computada aqui inclua apenas 20 anos (1998-2017) de dados, a mesma será chamada de média climatológica para facilitar a redação dos resultados. As composições e climatologia foram calculadas somente para o período de março a maio (estação do outono), que é a estação do ano com maior frequência das BD, como será mostrado nos resultados.

As composições foram calculadas para as variáveis água precipitável, precipitação, umidade relativa média entre 850 e 700 hPa, velocidade vertical

em 500 hPa, ROL emergente, TSM, componentes zonal e meridional do vento a 10 metros de altura e em 925 hPa e convergência de massa a 10 metros de altura e em 925 hPa (embora tenha sido feito o cálculo para esses dois níveis, por serem muito similares e por motivo de brevidade, foram incluídas aqui apenas as figuras do nível de 10 metros de altura). A maioria das variáveis foram obtidas da reanálise ERA-Interim. Os dados de ROL foram obtidos da *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) of Daily Outgoing Longwave Radiation (OLR), Version 1.2* (Lee, 2014) e possuem resolução espacial de 1 grau. Já os dados de TSM foram obtidos do *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* com resolução espacial de 0,25° de latitude por 0,25° de longitude (Reynolds *et al.*, 2007).

A fim de verificar se as diferenças (anomalias) entre a composição dos dias com BD e a climatologia, dos dias sem BD e a climatologia e entre as composições (com BD menos sem BD) possuíam significância estatística, foi calculado o teste t de diferenças de médias com confiança de 95% ($\alpha=0,05$). Esse teste encontra-se descrito em detalhes em Stevenson (2001). Para representar as áreas que possuem diferenças com significância estatística foram utilizados pontilhados. Por tanto, os pontilhados nas Figuras 6 a 12 representam as áreas com diferenças estatisticamente significantes ao nível de 95% de confiança.

2.4 Hipótese para Formação da Banda Dupla

Como a hipótese a ser testada leva em consideração o transporte de Ekman, aqui serão apresentados inicialmente os conceitos envolvidos nesse transporte. O transporte de Ekman é resultado da interação do vento com a superfície oceânica, onde ocorre transferência de *momentum* da atmosfera para o oceano (Brown *et al.*, 2001). Nesse transporte, assume-se que o vento em superfície (no caso do presente estudo, os ventos alísios) transporta massas d'água com um desvio à direita do seu sentido no HN e à esquerda no HS, devido ao efeito de Coriolis. O vento ao mover a massa d'água superficial coloca as camadas subjacentes em movimento através do transporte de energia da superfície em direção

ao fundo oceânico, sendo que cada camada abaixo se move numa velocidade inferior e direção mais à direita daquela lâmina d'água que a colocou em movimento. Com isso, em camadas oceânicas mais profundas, o escoamento poderá ter 90° de diferença em relação ao vento na superfície oceânica.

Uma vez que os mecanismos que sustentam o aparecimento de bandas duplas da ZCIT ainda não estão esclarecidos, foi testada uma hipótese que tenta explicar o aparecimento da BD no oceano Atlântico. A hipótese é que nos dias da ocorrência de BD, os ventos alísios de sudeste estão mais intensos se comparados com os dias sem a presença da BD; esses ventos favoreceriam o transporte de Ekman, que por sua vez impulsionaria o transporte das águas oceânicas equatoriais mais quentes em direção aos polos, estimulando, assim, a ressurgência de águas mais profundas e frias na região equatorial. A atividade convectiva iria ocorrer, portanto, sobre duas regiões de TSMs mais aquecidas, uma a norte e outra a sul da região de ressurgência, caracterizando a BP e a BD da ZCIT, conforme o modelo sugerido na Figura 4. Para testar a hipótese, foram analisadas as variáveis: magnitude e direção do vento a 10 metros da superfície e TSM.

3 Resultados

3.1 Características Médias

Foram identificadas 50 ocorrências de BD entre 2010 e 2017 (Tabela 1) e não ocorreram discrepâncias entre as análises realizadas com os dados da ERA-Interim e as cartas sinóticas do GPT. O ano

com maior frequência desses eventos foi 2011 (10 casos), representando 20% do total dos casos no período em estudo (Tabela 1). Dentre os meses analisados, o mês de dezembro foi o único em que não se identificaram casos de BD, enquanto que os meses de fevereiro, março e abril foram os de maior frequência, concordando com as análises de Uvo (1989) e Penna *et al.* (2013).

É interessante ressaltar que os meses de maior frequência de BD são os mesmos em que ocorrem os máximos de precipitação sobre o norte do NEB (março e abril; Uvo, 1989), o que é um indicativo da importância da BD para a chuva sobre tal região.

Meses	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Total Mensal
Dez	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jan	-	1	-	1	-	-	-	-	2
Fev	-	2	2	2	-	1	1	1	9
Mar	1	2	2	3	2	3	2	1	16
Abr	5	3	1	1	1	4	1	3	19
Mai	1	2	-	-	1	-	-	-	4
Total	7	10	5	7	4	8	4	5	50

Tabela 1 Número de ocorrências de bandas duplas da ZCIT no oceano Atlântico entre 2010 e 2017.

As BD dos meses de março e abril são mais duradouras (7,1 e 4,6 dias de tempo de vida médio, respectivamente) enquanto as do mês de maio possuem menor tempo de vida (média de 1,9 dias), conforme indica a Tabela 2. Em termos da distribuição de frequência do tempo de vida das BD (Tabela 3),

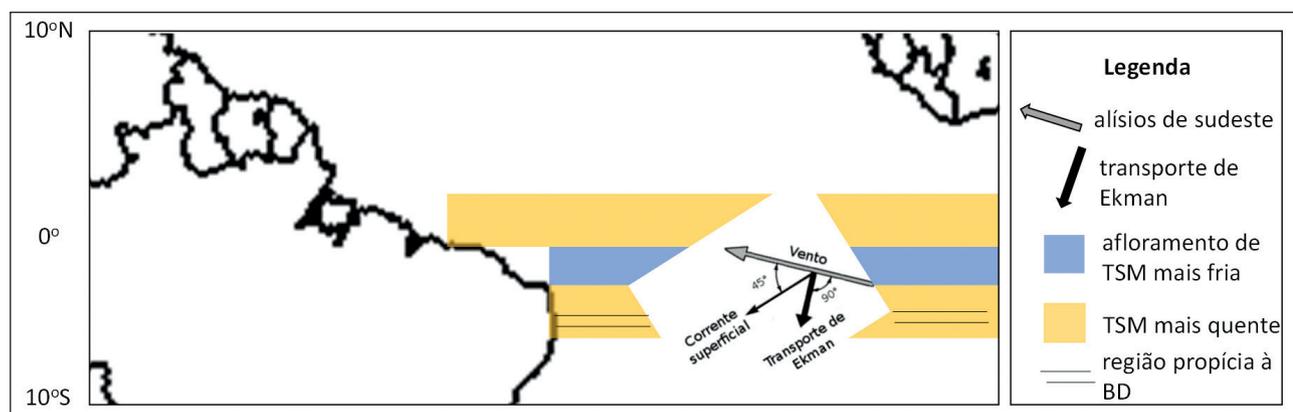


Figura 4 Representação ilustrativa da hipótese a ser testada para a ocorrência de BD.

as com tempo de vida entre 12 e 84 horas ocorrem com maior frequência (correspondendo a 54% dos casos), enquanto as com tempo de vida maior do que 376 horas se mostram pouco frequentes.

Meses	Tempo de Vida Médio (horas)	Tempo de Vida Médio (dias)
Dez	-	-
Jan	81	3,4
Fev	95	3,9
Mar	171	7,1
Abr	110	4,6
Mai	45	1,9

Tabela 2 Tempo de vida médio mensal das bandas duplas da ZCIT no oceano Atlântico entre 2010 a 2017.

Tempo de Vida Horas	Nº de Casos
12 < t ≤ 84	27
85 < t ≤ 157	11
158 < t ≤ 230	4
231 < t ≤ 303	3
304 < t ≤ 376	3
377 < t ≤ 449	1
450 < t ≤ 522	1

Tabela 3 Distribuição de frequência do tempo de vida (em horas) das bandas duplas.

Com relação à posição das BP e BD, a Figura 5 mostra a posição dessas bandas bem como a posição média (cor azul). Além disso, é mostrada a posição média climatológica da BP nos dias sem

a ocorrência de BD (cor preta) considerando todo o período de estudo, 2010 a 2017 (março a maio). De modo geral, próximo à costa da América do Sul (AS), a posição média latitudinal da BP nos dias com registro de BD é 2°N (linha azul), enquanto a da BD é 2°S (linha azul). Portanto, a BP e BD encontram-se distanciadas em cerca de 4° de latitude.

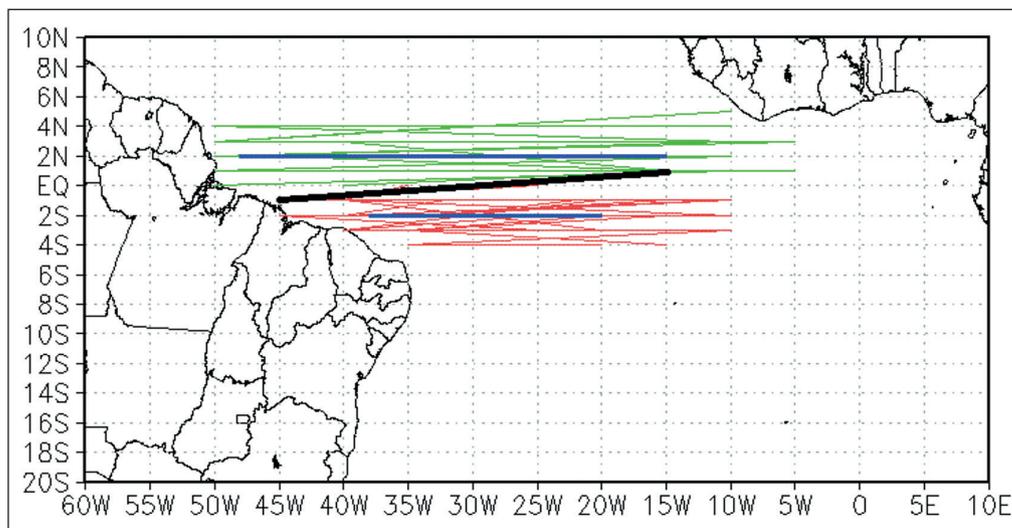
A BP nos dias de BD, em geral, estende-se da longitude 48°W a 15°W, o que corresponde a cerca de 3667 km. Já a BD estende-se entre as longitudes de 38°W e 20°W, possuindo comprimento aproximado de 2000 km.

3.2 Composições das Variáveis Atmosféricas

Aqui serão mostradas a composição dos dias com BD, a composição dos dias sem BD, a diferença dessas composições em relação ao campo climatológico do outono e a diferença entre a composição dos dias com e sem BD. As composições e a climatologia foram determinadas somente para o período de março a maio (outono), uma vez que é a estação do ano com maior frequência de casos de BD. Regiões com diferenças estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% são indicadas nas figuras.

Considerando a variável água precipitável, não há um sinal claro caracterizando a BD na composição dos dias com BD (Figura 6A), entretanto, comparando-se essa composição com a climatologia fica evidente que há mais água precipitável a sul do

Figura 5 Posição das bandas principal (verde) e dupla (vermelho) da ZCIT, bem como de suas posições médias (em azul). A linha na cor preta representa a posição média da BP (ou posição climatológica da ZCIT) nos dias em que não há presença de BD.



Caracterização da Banda Dupla da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) no Oceano Atlântico

Thales Alves Teodoro; Michelle Simões Reboita & Gustavo Carlos Juan Escobar

equador nos dias com BD (Figura 6C). Esse sinal também é mostrado na diferença das composições dos dias com e sem BD e é estatisticamente signi-

ficativo (Figura 6E). Os mesmos padrões descritos ocorrem no campo da umidade relativa média entre os níveis de 850 e 700 hPa (figuras não mostradas).

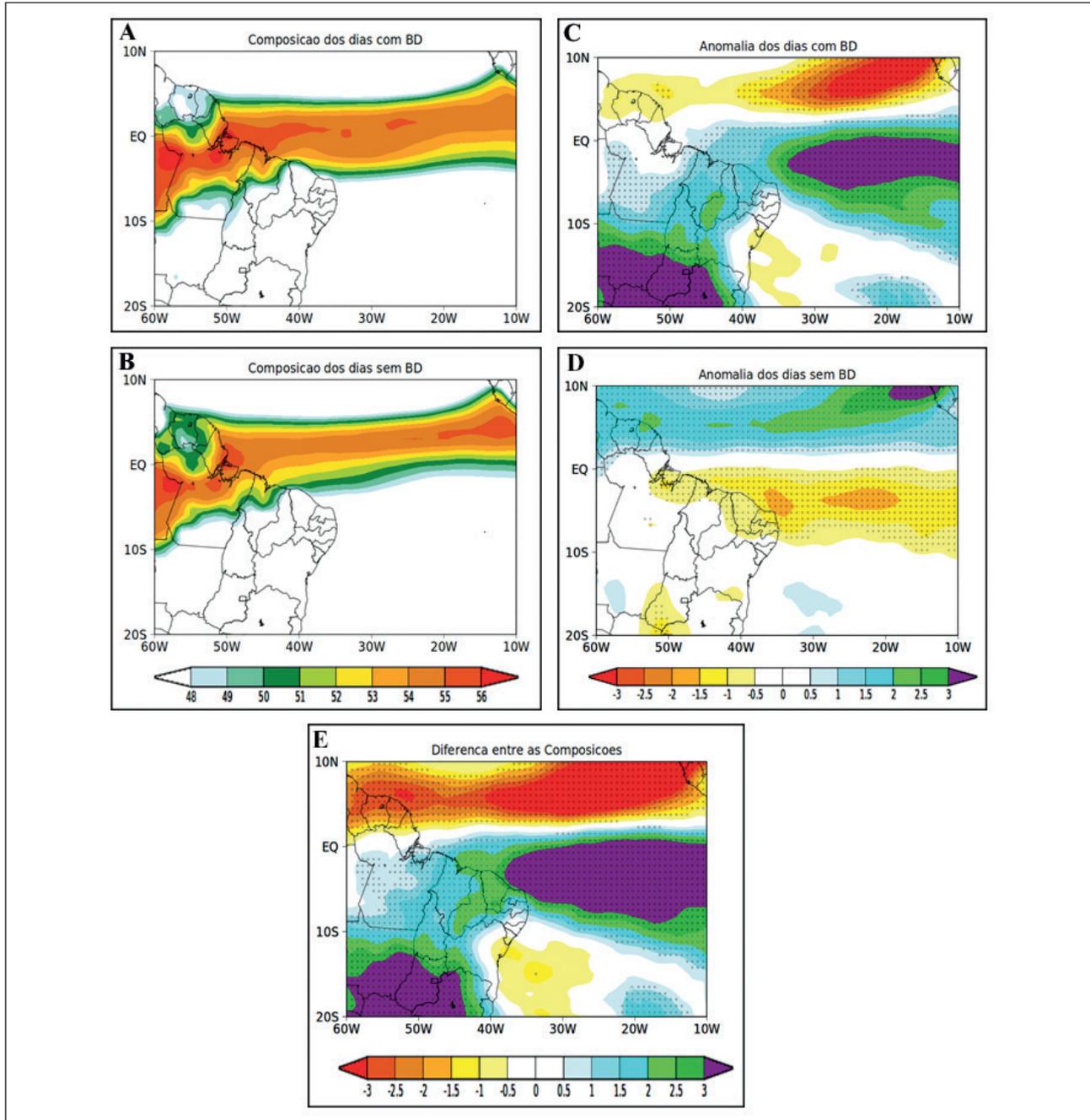


Figura 6 Campo de água precipitável (kg m^{-2}) sobre o oceano Atlântico Tropical: A. composição dos dias de banda dupla identificados na estação de outono; B. composição dos dias sem banda dupla identificados na estação de outono; C. diferença entre a composição dos dias com banda dupla e a média climatológica da estação do outono; D. diferença entre a composição dos dias sem banda dupla e a média climatológica da estação do outono; E. diferença entre a composição dos dias com banda dupla e composição dos dias sem banda dupla. Os pontilhados em C, D e E representam, respectivamente, as áreas que possuem diferenças estatisticamente significativas (nível de 95% de confiança) entre a composição dos dias com BD e a climatologia, dos dias sem BD e a climatologia e entre as composições (com BD menos sem BD).

A composição da velocidade vertical em 500 hPa nos dias com BD (Figura 7A), embora não mostre duas bandas distintas de movimentos ascendentes intensos (valores negativos), apresenta uma região mais ampla de movimentos ascendentes do que a composição dos dias sem BD (Figura 7B). Os mo-

vimentos ascendentes mais intensos também são visualizados no campo das diferenças entre essas composições uma vez que aparecem valores negativos que são significativos entre o equador e cerca de 2° S (Figura 7E), que é a região da posição média da BD conforme a Figura 5.

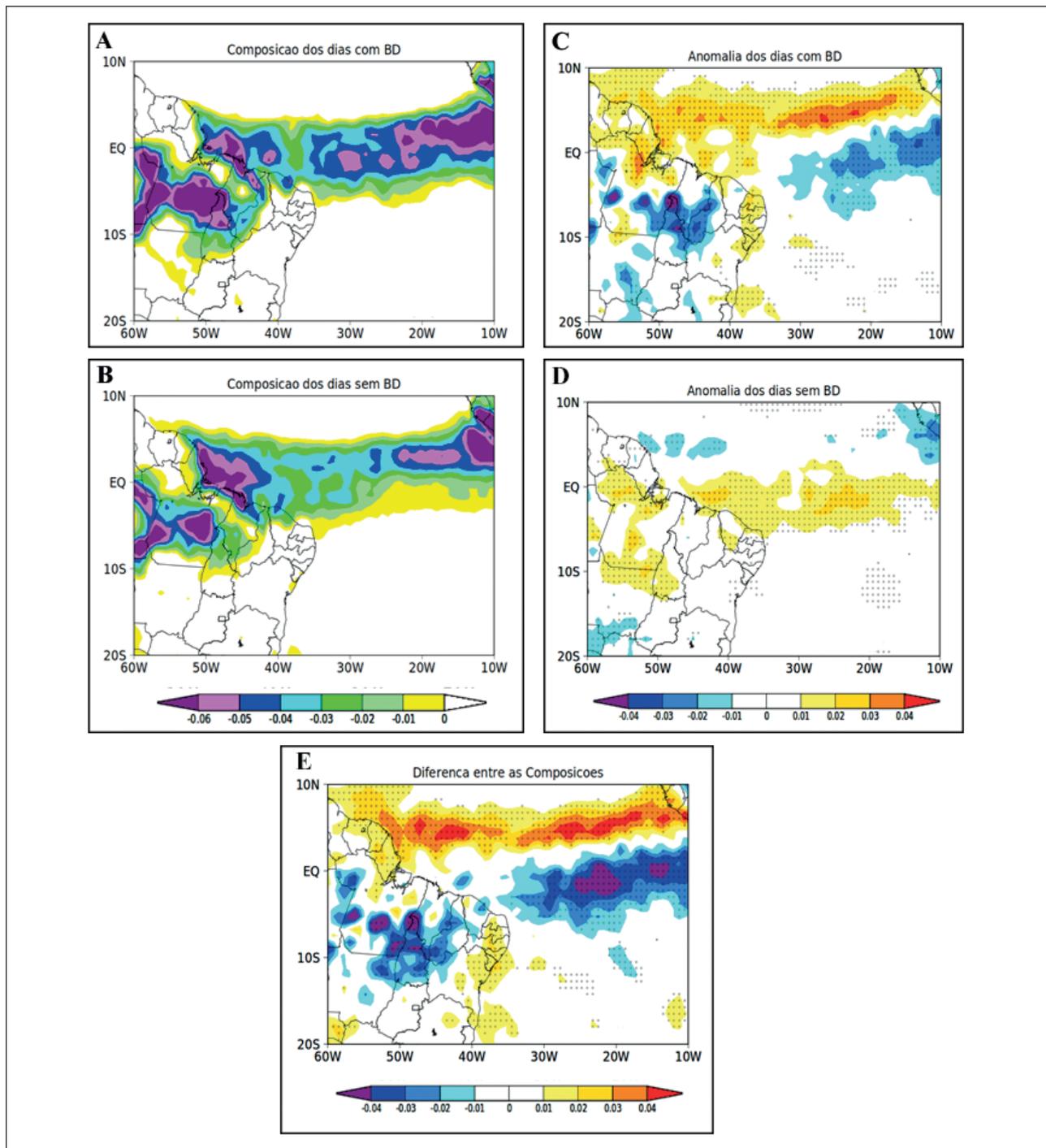


Figura 7 Similar à Figura 6, mas para o campo de movimento vertical em 500 hPa (Pa s^{-1}) sobre o oceano Atlântico Tropical.

O campo da precipitação em dias de BD (Figura 8A) se diferencia daquele sem BD (Figura 8B) por mostrar um núcleo mais expandido latitudinalmente (2°N e 5°S) com maiores valores de precipitação. Isso também se reflete nas anomalias (que são estatisticamente significativas), pois nos episódios de BD há mais precipitação numa ampla faixa que se estende do litoral do nordeste do Brasil em direção à África (Figura 8C). Já no campo de anomalia

dos dias sem BD é registrado, na mesma região citada, déficit de precipitação (Figura 8D). A diferença entre as composições com e sem BD também mostra valores positivos de precipitação ao sul do equador (Figura 8E) no mesmo setor em que predominam diferenças positivas de água precipitável (Figura 6E) e negativas de movimento vertical (Figura 7E). Esse resultado indica que nos dias com BD há mais umidade e instabilidade ao sul do equador.

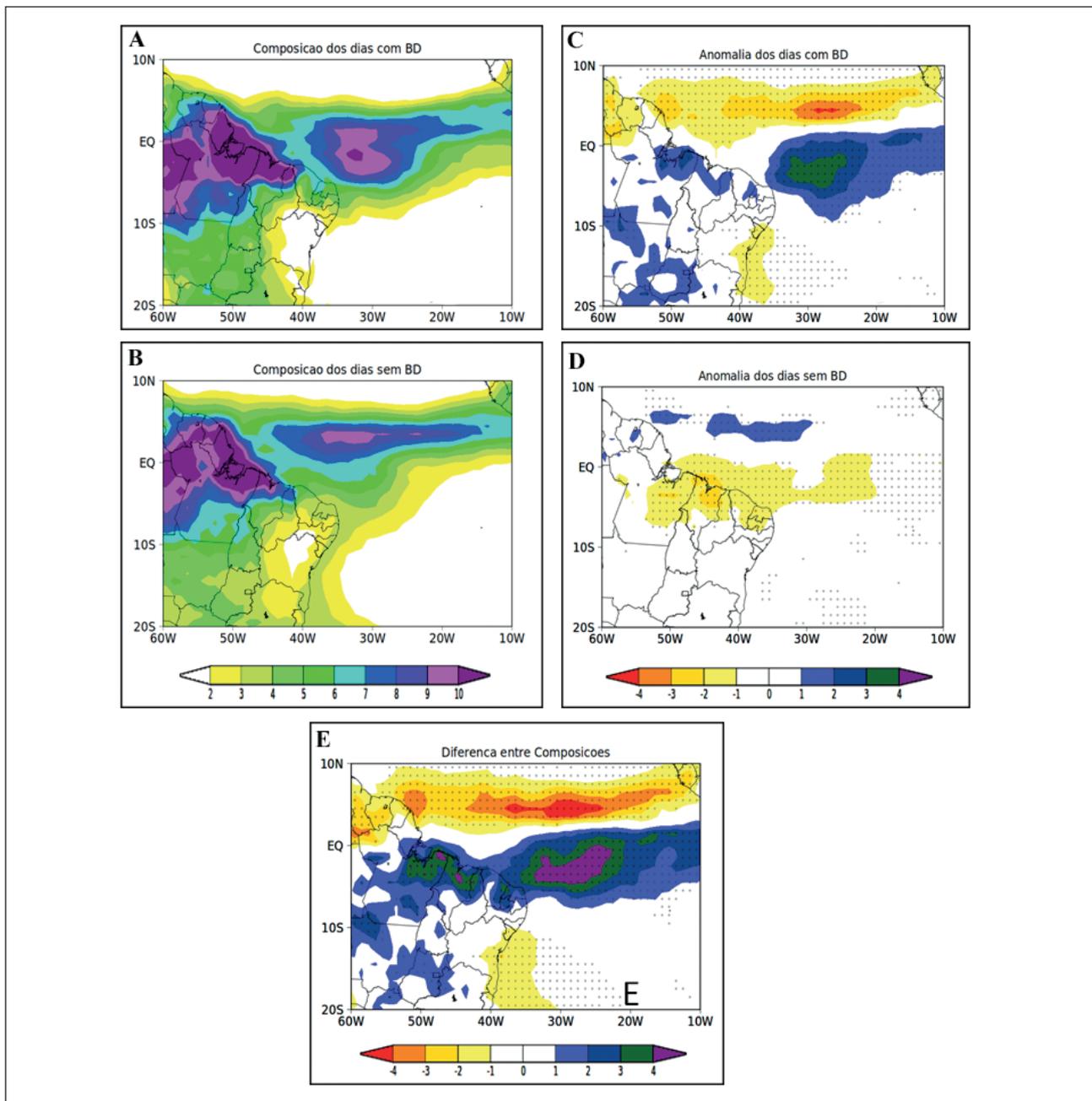


Figura 8 Similar à Figura 6, mas para o campo de precipitação (mm dia⁻¹) sobre o oceano Atlântico Tropical.

Uma das variáveis que melhor indica a presença de BD é a convergência de massa calculada com o vento a 10 metros acima da superfície (Figura 9). A convergência de massa é indicada por valores negativos e a divergência por valores positivos. Na Figura 9A há duas faixas com máximos de convergência na região tropical indicando a posição das bandas da ZCIT. Na composição dos dias sem BD (Figura 9B) aparece somente uma banda de convergência de massa a cerca de 2-3° N. Embora as anomalias da convergência de massa nos dias com e sem

BD indicam predomínio de convergência (valores negativos) em locais similares no oceano tropical, a diferença mais interessante ocorre em termos da direção do vento: há ventos anômalos do quadrante norte entre o oceano Atlântico Tropical norte e sul nos dias com BD (Figura 9C) e de quadrante sul nos dias sem BD (Figura 9D). Quando é calculada a diferença entre as composições também predominam ventos de quadrante norte (Figura 9E), o que é um indicativo de que os alísios de nordeste estejam mais intensos nos dias com BD.

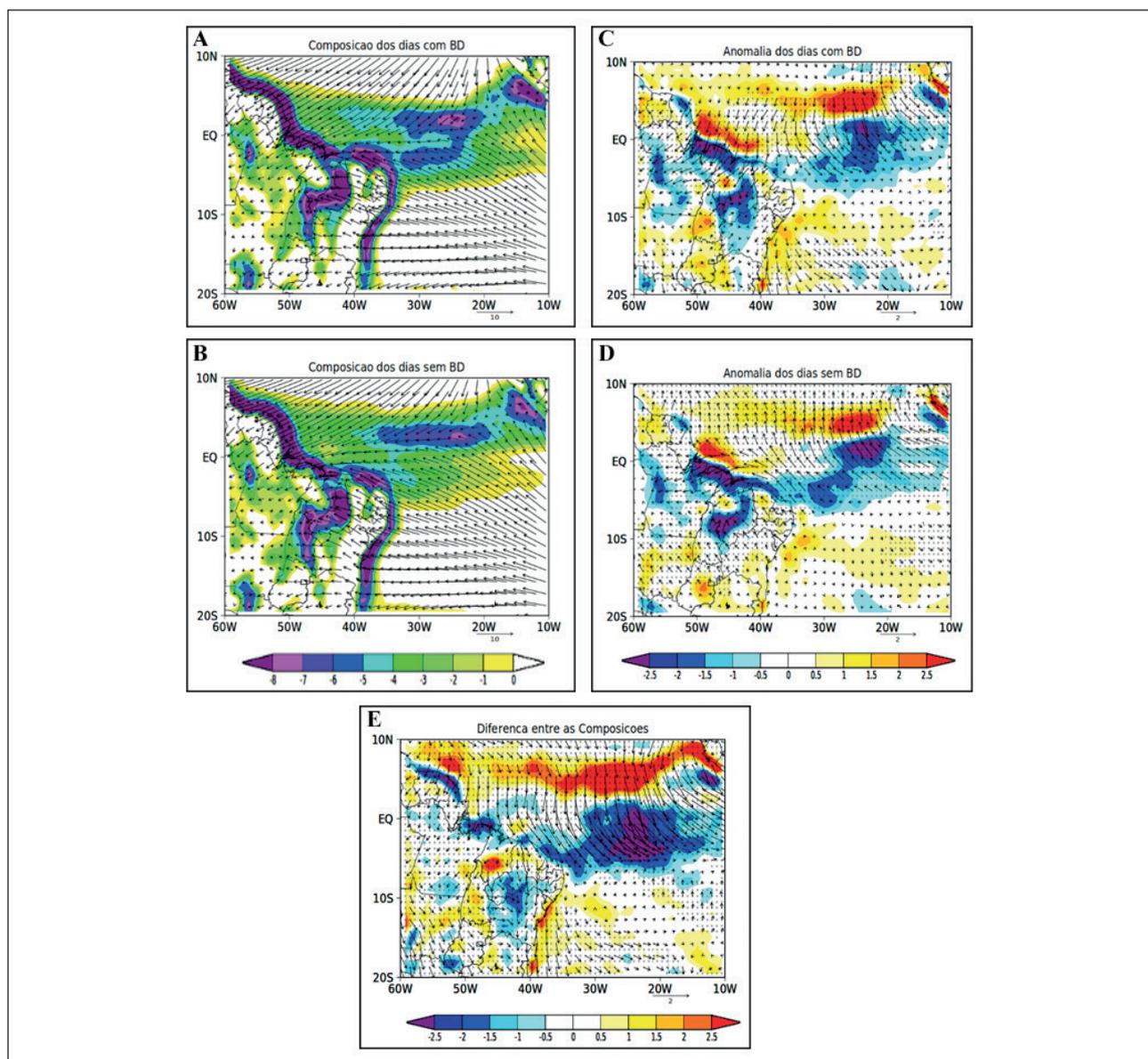


Figura 9 Similar à Figura 6, mas para o campo de convergência de massa (10^5 kg s^{-1}) e direção do vento a 10 metros da superfície sobre o oceano Atlântico Tropical.

Outra variável que também fornece um bom indicativo da presença das duas bandas da ZCIT é a ROL (Figura 10). Na composição dos dias com BD (Figura 10A) há sinal de duas faixas com menores valores de ROL indicando que o fluxo de radiação de onda longa emergente diminui, devido à maior nebulosidade. Esse padrão não é mostrado na composição dos dias sem BD (Figura 10B). Além disso, as anomalias de ROL dos dias sem BD (Figura 10D) mostram valores positivos (mais energia deixando a atmosfera) e estatisticamente significativos na região preferencial de ocorrência da BD (cerca de 2° S). Em termos de diferença entre as composições,

ao sul do equador predominam diferenças negativas, indicando maior nebulosidade nessa região quando na ocorrência de BD (Figura 10E).

Por fim ressalta-se que, em termos climatológicos, a presença da BD no oceano Atlântico é menos evidente do que na análise de horários sinóticos individuais, fato que pode ser devido à suavização dos padrões atmosféricos no cálculo da média já que as duas bandas apresentam variação em localização conforme mostrado na Figura 5. Além disso, a posição média registrada numa variável atmosférica pode diferir de outras.

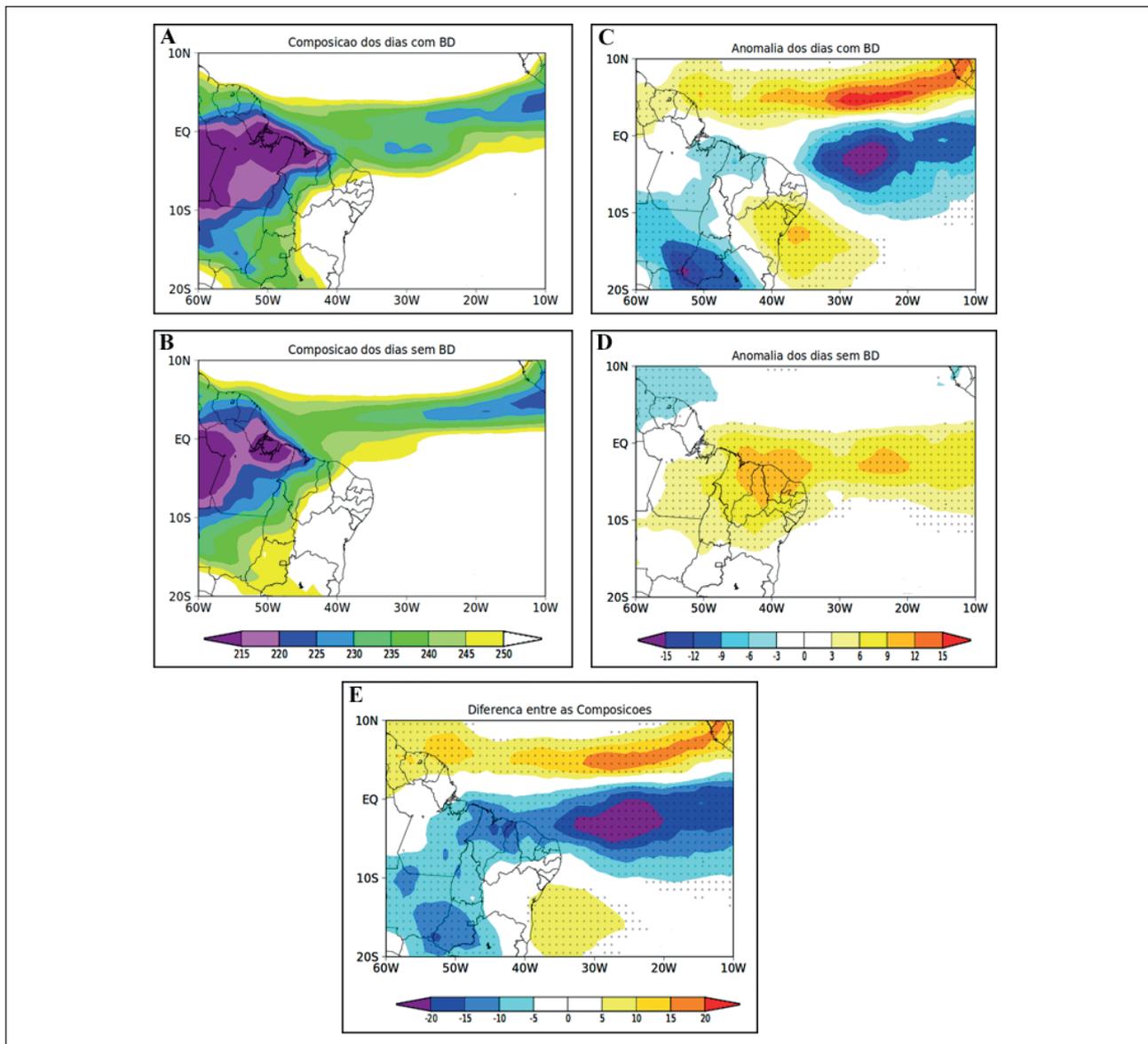


Figura 10 Similar à Figura 6, mas para o campo de ROL ($W m^{-2}$) sobre o oceano Atlântico Tropical.

3.3 Análise da Hipótese de Formação da Banda Dupla

A anomalia da direção e intensidade dos ventos nos casos de BD (Figura 11C) mostra que há ventos anômalos do quadrante norte entre 5°N e 5°S, por todo o oceano tropical, e anomalia positiva e estatisticamente significativa de intensidade do vento em torno de 2°N a 5°N, que é indicativo de ventos alísios de nordeste mais intensos. Por outro lado, a anomalia dos casos sem BD (Figura 11D) mostra entre 5°N e 5°S ventos anômalos de quadrante sul. Portanto,

esses resultados são opostos à hipótese sugerida na Seção 2.4. A hipótese era de que os ventos alísios de sudeste em dias de BD estariam mais intensos do que na climatologia, de modo a impulsionar o transporte de Ekman e, conseqüentemente, o transporte das águas em direção ao polo sul, favorecendo o afloramento de águas mais frias na região equatorial e acúmulo de águas mais quentes na região da BD (que seria importante para a formação dessa). Entretanto, a Figura 11 sugere que em parte a hipótese está correta, isto é, há ventos superficiais que podem auxiliar o acúmulo de águas mais quentes em direção

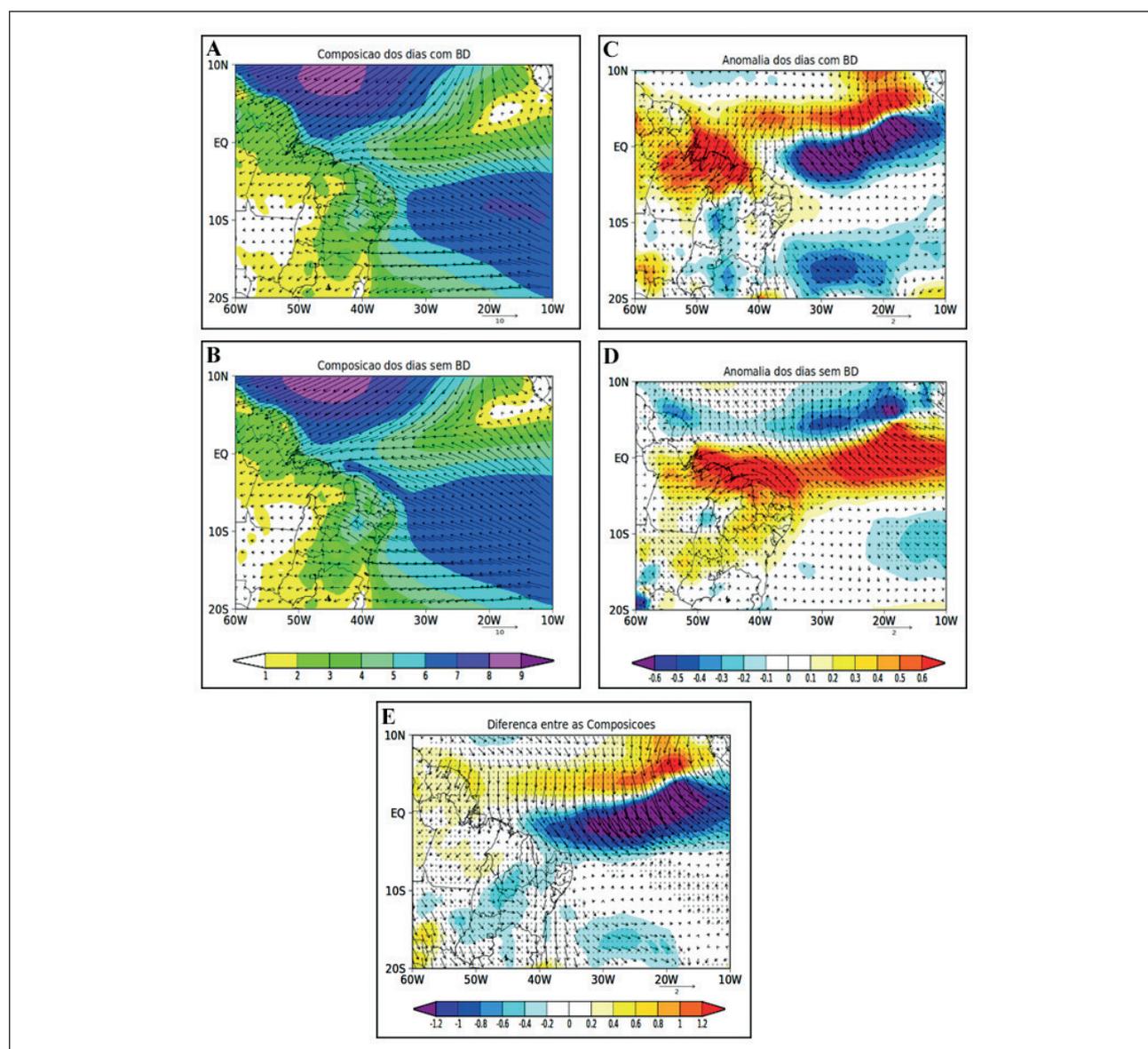


Figura 11 Similar à Figura 6, mas para o campo de magnitude do vento (m s⁻¹) e direção do vento a 10 metros da superfície sobre o oceano Atlântico Tropical.

a latitudes mais austrais, mas não são os alísios de sudeste e, sim, os de nordeste que contribuem para isso. Como as águas superficiais é que devem ser transportadas, talvez o transporte de Ekman ainda não tenha grande impacto de forma que sejam os alísios de nordeste mais importantes para favorecer a BD.

Com relação à TSM, embora as composições não revelem padrões distintos entre os casos com e sem BD (Figura 12A e B), a diferença entre essas

composições mostra um setor com águas mais quentes na região da posição média da BD (Figura 12E), o que ajuda a confirmar parte da hipótese. Em suma, a hipótese inicial falha em sugerir que os ventos alísios de sudeste são importantes para a formação da BD. Ressalta-se que além dos ventos alísios de nordeste, outros processos físicos devem ocorrer concomitantemente para a formação da BD o que indica a necessidade de estudos adicionais para uma melhor compreensão desse fenômeno no Atlântico Tropical.

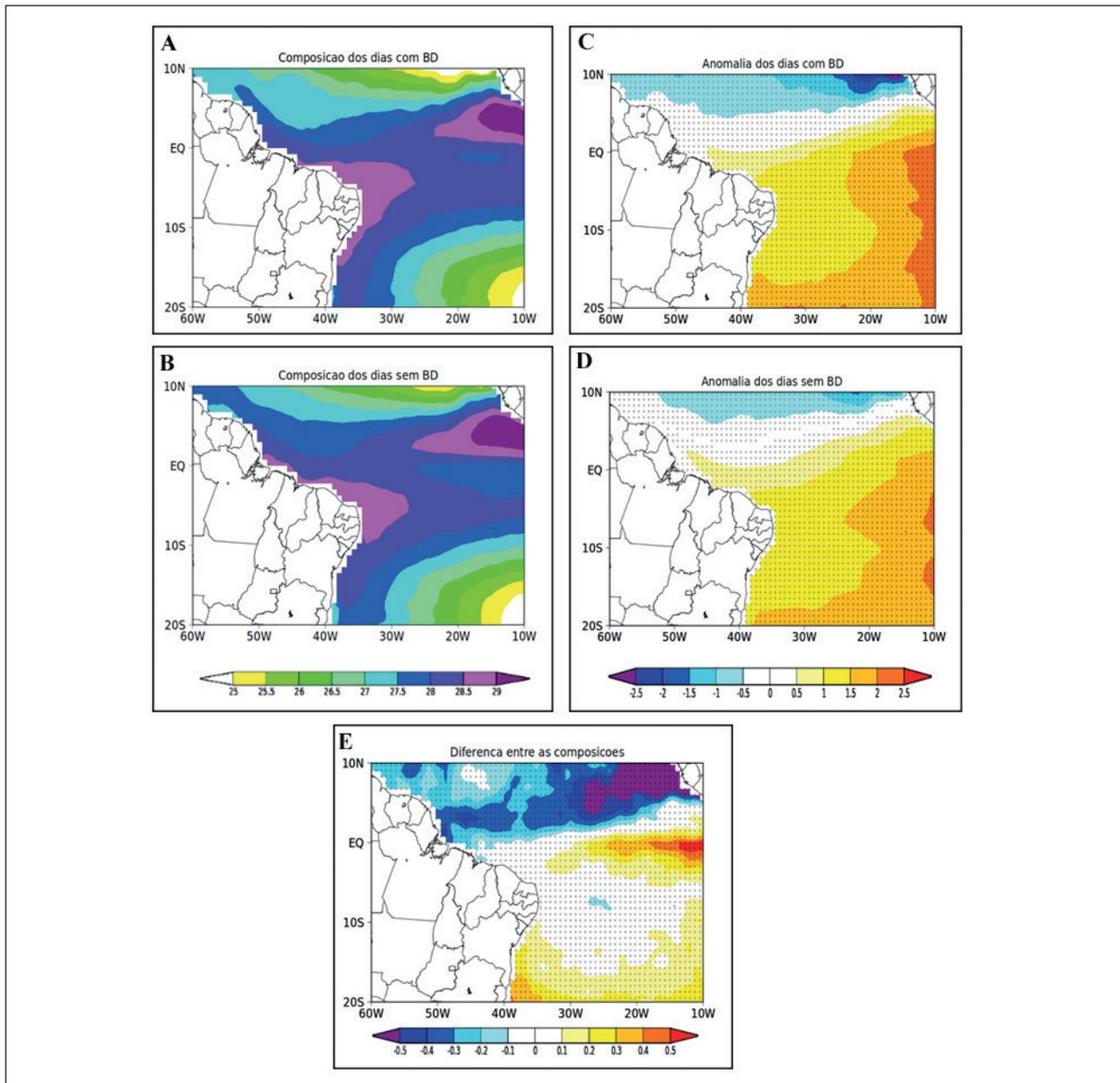


Figura 12 Similar à Figura 6, mas para o campo da TSM (°C) sobre o oceano Atlântico Tropical.

4 Conclusões

Este estudo identificou a ocorrência de BD da ZCIT no oceano Atlântico entre janeiro a maio de 2010 a 2017. As BD são mais frequentes e duradouras nos meses de março e abril. A posição média latitudinal da BP é de cerca de 2°N, enquanto a da BD é 2°S.

Tanto em campos sinóticos horários quanto em médias climatológicas, a BD é um evento que não possui registro simultâneo em diferentes variáveis atmosféricas. Em termos climatológicos, a convergência de massa a 10 metros de altura e a ROL emergente indicaram a configuração de BD. Embora nas composições dos dias com BD algumas variáveis atmosféricas não indiquem claramente a BD, as anomalias tanto em relação à climatologia quanto aos dias sem BD mostram sinal intenso da variável em análise ao sul do equador, o que indica uma diferença nos campos atmosféricos em situação de ocorrência e não ocorrência de BD.

Com relação à hipótese de formação da BD, foi inicialmente sugerido que a transferência de *momentum* dos ventos alísios de sudeste para o oceano e, conseqüentemente, o transporte de Ekman podiam contribuir para o acúmulo de águas mais quentes a sul da região preferencial da ZCIT, levando à formação da BD. A hipótese não foi totalmente contemplada, pois verificou-se predomínio de ventos anômalos de quadrante norte nos dias com BD, enquanto ventos anômalos de quadrante sul nos dias sem BD. Assim, os ventos alísios de nordeste é que parecem contribuir para o transporte de águas superficiais mais quentes para as latitudes da BD. De fato, a diferença entre as composições dos dias com e sem BD mostraram águas mais quentes na região da BD, o que pode ser um fator importante para a convecção. Embora não se tenha esclarecido totalmente a causa da BD, os resultados obtidos nesse estudo são úteis para quem trabalha em ambientes operacionais de previsão do tempo. Por fim destaca-se que este estudo contribui para o conhecimento da BD da ZCIT no Atlântico, uma vez que tal assunto é escasso na literatura.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao CPTEC/INPE, ERA-Interim, GPCP, NCDC e NOAA pelos dados utilizados no estudo e ao CNPq pelo suporte financeiro.

6 Referências

- Adler, R.F.; Huffman, G.J.; Chang, A.; Ferraro, R.; Xie, P.; Janowiak, J.; Rudolf, B.; Schneider, U.; Curtis, S.; Bolvin, D.; Gruber, A.; Susskind, J. & Arkin, P. 2003. The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present). *Journal Hydrometeor*, 4: 1147-1167.
- Asnani, G.C. 1993. *Tropical Meteorology*. Pune, Nobel Printers, 603p.
- Brown, E.; Colling, A.; Park, D.; Phillips, J.; Rothery, D. & Wright, J. 2001. *Ocean Circulation*. New York, Elsevier. 286p.
- Bischoff, T. & Schneider, T. 2016. The Equatorial Energy Balance, ITCZ Position, and Double-ITCZ Bifurcations, *Journal of Climate*, 29: 2997-3013.
- Dee, D.P.; Uppala, S.M.; Simmons, A.J.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S.; Andrae, U.; Balmaseda, M.A.; Balsamos, G.; Bauer, P.; Bechtold, P.; Beljaars, A.C.M.; Van den Berg, L.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Delsol, C.; Dragani, R.; Fuentes, M.; Geer, A.J.; Haimberger, L.; Healy, S.B.; Hersbach, H.; Hólm, E.V.; Isaksen, I.; Kållberg, P.; Köhler, M.; Matricardi, M.; McNally, A.P.; Monge-Sanz, B.M.; Morcrette, J.J.; Park, B.K.; Peubey, C.; Rosnay, P.; Tavolato, C.; Thépaut, J.N. & Vitart, F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137: 553-597.
- Glickman, T.S. 2000. *Meteorology Glossary*. Boston, American Meteorological Society, 855p.
- Hastenrath, S. 1991. *Climate Dynamics of Tropics*. Dordrecht, Kluwer, 488p.
- Hwang, Y.T. & Frierson, D. 2013. Link between the double-Intertropical Convergence Zone problem and cloud biases over the Southern Ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(13): 4935-4940.
- Hubert, L.F.; Krueger, A.F. & Winston, J.S. 1969. The Double Intertropical Convergence Zone - Fact or Fiction? *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26: 771-773.
- Knapp, K.R. 2014. NOAA Climate Data Record (CDR) of Gridded Satellite Data from ISCCP B1 (GridSat-B1) Infrared Channel Brightness Temperature, Version 2. NOAA's CDR Program.
- Krishnamurti, T.N.; Stefanova, L. & Misra, V. 2013. *Tropical Meteorology - An Introduction*. New York, Springer, 423p.
- Lee, H.T. 2014. Climate Algorithm Theoretical Basis Document (C-ATBD): Outgoing Longwave Radiation (OLR) - Daily. NOAA's Climate Data Record (CDR) Program.
- Lietzke, C.E.; Deser, C. & Haar, T.H.V. 2001. Evolutionary Structure of the Eastern Pacific Double ITCZ Based on Satellite Moisture Profile Retrievals. *Journal of Climate*, 14: 743-751.
- Melo, A.B.C.; Cavalcanti, I.F.A. & Souza, P.P. 2009. Zona de

Caracterização da Banda Dupla da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) no Oceano Atlântico

Thales Alves Teodoro; Michelle Simões Reboita & Gustavo Carlos Juan Escobar

- Convergência Intertropical do Atlântico. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J. & DIAS, M. A.F.S. *Tempo e Clima no Brasil*. Editora Oficina de Textos, p. 25-41.
- Musk, L.F. 1976. Rainfall variability and the Walker cell in the equatorial Pacific Ocean. *Weather*, 31: 34-47.
- Penna, A.C.; Reis, C.; Gouveia, C.; Dias, C.; Porto, F.; Barros, K.; Santos, L.F.; Reboita, M.S.; Pereira, R.; Vilela, R.; Ferreira, R.; Santos, T. & Lopes, V. 2013. Estudo das Características da Banda Dupla da ZCIT no Oceano Atlântico. In: SEMINÁRIO DE RECURSOS NATURAIS, 8, Itajubá, 2013. Resumos expandidos, Itajubá, UNIFEI, p.1-4.
- Richter, I. 2015. Climate model biases in the eastern tropical oceans: causes, impacts and ways forward. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6(3): 345-358.
- Reboita, M.S.; Rodrigues, M.; Armando, R.P.; Freitas, C.; Martins, D. & Miller, G. 2016. Causas da semiaridez do sertão nordestino. *Revista Brasileira de Climatologia*, 19: 254-277.
- Reynolds, R.W.; Smith, T.M.; Liu, C.; Chelton, D.B.; Casey, K.S. & Schlax, M.G. 2007. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *Journal of Climate*, 20: 5473-5496.
- Stenvenson, W.J. 2001. *Estatística aplicada à administração*. São Paulo, Harbra, 498p.
- Uvo, C.B. 1989. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua Relação com a Precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Dissertação de Mestrado, 91p.
- Waliser, D.E. & Gautier, C. 1993. A satellite-derived climatology of the ITCZ. *Journal of Climate*, 6: 2162-2174.
- Xavier, T.M.B.S.; Xavier, A.F.S.; Dias, P.L.S. & Dias, M.A.F.S. 2000. A Zona de Convergência Intertropical - ZCIT e suas relações com a chuva no Ceará (1964-98). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 15: 27- 43.
- Zhang, C. 2001. Double ITCZs. *Journal of Geophysical Research*, 106: 785-792.
- Zhang, X.; Lin, W. & Zhang, M. 2007. Toward understanding the double Intertropical Convergence Zone pathology in coupled ocean-atmosphere general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, 112: 1-7.