

Variabilidade espaço-temporal do padrão de ventos do setor oeste do oceano Atlântico Sul Equatorial

Pedro Henrique Lima Silva Morais ¹
Carlos Eduardo Peres Teixeira ²

¹ Universidade de São Paulo - USP/IOUSP
Praça do Oceanográfico, 191 - 05508-120 - São Paulo - SP, Brasil
ocpmorais@gmail.com

² Universidade Federal do Ceará - UFC/LABOMAR
Av. da Abolição, 3207 - 60165-081 - Fortaleza - CE, Brasil
ocecept@gmail.com

Abstract. The winds are one key forcing for oceanographic applications, as they are a major determinant of ocean circulation. In addition, the winds are key to understanding the flow of energy, mass and gases between the atmosphere and oceans. In this sense, the objective of this study is to determine the spatial and temporal variability of the wind in the western portion of the Equatorial Atlantic Ocean (4° N - 6.7° S, 52° W - 32.3° W). Twenty-five years (1987-2011) of wind speed and direction from the Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind Vector (CCMP) with 5 days temporal and 25 km spatial resolution were used. The CCMP is derived from measurements collected by various satellites, weather stations and data from numerical modeling. In this project the methodology of harmonic analysis will be used to quantify the annual variability inter and intrannual data. Overall CCMP represented correctly variability timeline of winds in the area because when compared with in situ data from the PIRATA project, we obtained a good correlation in the behavior of speeds and directions throughout the study period. Based on the results, we can infer that the annual cycle is mainly responsible for the variability of the pattern of meridional winds in the region. As for zonal wind, the adjustment of the annual model is not satisfactory with small values of R². Considering the values of intrannual variability are larger than annual, it is concluded that these are the main periods of variability of zonal winds in the region.

Palavras-chave: ccmp, padrão eólico, projeto pirata, ciclo anual, ciclo intranual, ciclo intranual.

1. Introdução

Os ventos são forçante chave para aplicações oceanográficas, pois são um dos principais determinantes na formação de ondas, correntes de superfície e processos de ressurgência costeira e equatorial. Além disso, são fundamentais para o entendimento do fluxo de energia (perda de calor latente pela evaporação), massa e gases entre a atmosfera e os oceanos.

Diversos trabalhos indicam uma clara relação entre a variabilidade do campo de ventos e o transporte zonal do sistema de correntes e contracorrentes oceânicas em escalas sazonais à interanuais. Por exemplo, a circulação no oceano Atlântico Equatorial apresenta dinâmica forçada pelos ventos alísios, além disso, os ventos geram um empilhamento na borda oeste do oceano Atlântico Equatorial, que força um gradiente de pressão na direção zonal dando origem a um sistema de contracorrentes, de acordo com Stramma (1991).

A variabilidade dos padrões de velocidade e direção dos ventos acontece em uma larga escala espacial e temporal, controlada significativamente pela distribuição sazonal de radiação solar. Por exemplo, em uma escala anual a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que controla o sistema de ventos alísios, possui um deslocamento norte-sul, alcançando sua posição mais ao norte (cerca de 8° N) durante o verão do Hemisfério Norte, e a sua posição mais ao sul (1° N) durante o mês de abril, como descrevem Hastenrath e Heller (1977). Além dessa oscilação anual, a ZCIT apresenta oscilações com menores frequências - com período variando de semanas a anos - e correlação significativa com índices climáticos, como o Índice de Oscilação Sul (ENSO) e Dipolo do Atlântico.

Apesar da importância dos ventos para a circulação oceânica, o seu monitoramento através de instrumentos é complicado nos oceanos, devido a sua grande variabilidade espacial. Isto

demandaria, um grande número de boias oceânicas ou sensores instalados em navios, o que é economicamente inviável.

Uma forma de se solucionar este problema de monitoramento é a utilização de técnicas de Sensoriamento Remoto (SR). Sensores de espalhamento, do tipo escaterômetros, medem a rugosidade da superfície dos oceanos a partir de pulsos de microondas em direção à superfície, sobre certo ângulo e determinada frequência. A partir do retorno do sinal é estimada, com grande precisão, a direção e velocidade dos ventos sobre o oceano, como descreve Ferreira (2005).

O objetivo deste trabalho é validar o conjunto de dados de vento, proveniente de técnicas de SR, para a região do Oceano Atlântico Equatorial e com base no mesmo estudar sua variabilidade espaço-temporal.

2. Metodologia de Trabalho

O trabalho foi realizado para a região que compreende a porção oeste do oceano Atlântico Equatorial (4°N–6.7°S, 52°W– 32.3°W), englobando a plataforma continental dos estados brasileiros do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, caracterizada pela presença de ventos alísios intensos e constantes durante grande parte do ano, com direções predominantes de leste/sudeste.

2.1. Banco de Dados

O produto de velocidade e direção de ventos usado neste trabalho foi obtido a partir dos dados disponibilizados pelo CCMP em domínio público pelo *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC)* do *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*.

O CCMP é um banco de dados de direção e intensidade dos ventos, a 10 metros de altitude, com resolução temporal de 5 dias e espacial de 25 km, que cobrem o período de julho de 1987 a dezembro de 2011. O CCMP é produzido a partir da combinação de dados de múltiplas plataformas de sensoriamento remoto combinados com dados *in situ* e dados de reanálise através do método de análise variacional.

Os dados de sensoriamento remoto são provenientes dos satélites SSM/I, SSMIS, AMSR-E, TRMM TMI, QuikSCAT, SeaWinds, WindSat, de acordo com Atlas et al. (2011). Os dados *in situ* são provenientes de navios de oportunidades e boias oceanográficas espalhadas pelo globo.

Foram utilizados os dados de direção e intensidade de ventos da boia 0N35W do programa PIRATA para validação dos dados do CCMP, para isso utilizou-se os dados provenientes do ponto de grade mais próximo. O programa PIRATA é uma rede de observação *in situ* composta por um conjunto de 21 boias fundeadas ao longo do oceano Atlântico Tropical que monitoram variáveis meteoceanográficas, como temperatura e salinidade ao longo da coluna d'água, ventos, radiação solar, umidade relativa, precipitação e temperatura do ar. Os instrumentos instalados nas boias PIRATA coletam dados de vento a uma altitude média de 3 metros da superfície do mar. Como o CCMP fornece os dados a 10 m de altitude, os dados PIRATA foram corrigidos, seguindo método proposto por Large e Pond (1981).

2.2 Análise dos dados

Foram determinados 9 pontos, como visto na Figura 1, do CCMP que apresentam diferentes condições meteoceanográficas para extração de séries temporais e plotagem dos dados. Cada pixel da imagem foi tratado como uma série temporal independente e foi submetido a metodologia abaixo.

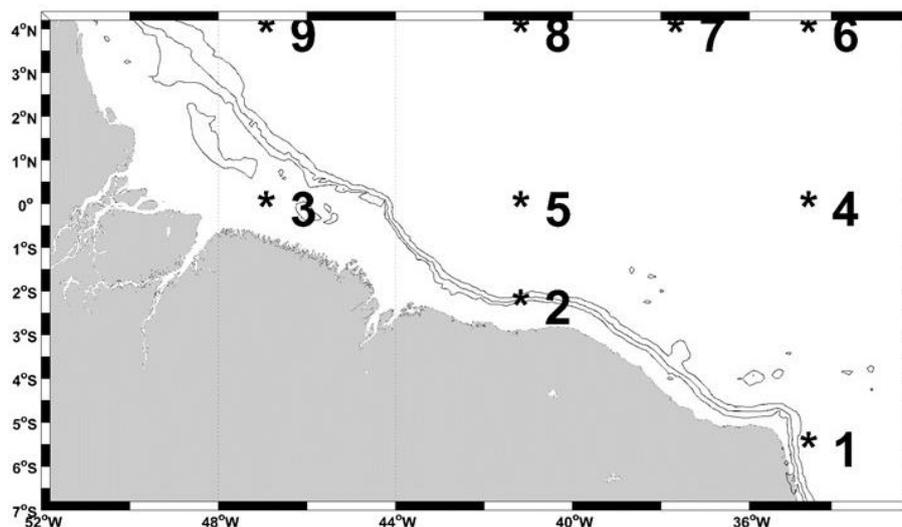


Figura 1. Pontos determinados para extração de séries temporais na área de estudo. Fonte: o autor.

Para se caracterizar o ciclo anual, foi realizada uma análise harmônica em cada série temporal a partir do método de mínimos quadrados, descrito por Emery e Thompson (1998).

Com as amplitudes e fases do harmônico anual calculado, construíram-se os mapas para região do Atlântico Sul Equatorial. Para determinar a representatividade do ciclo anual em explicar a variância temporal dos dados do CCMP, foi calculado o coeficiente de determinação (R^2) entre os dados originais de ventos e o ciclo anual calculado. Posteriormente, foi criado um mapa sintético de R^2 , com limites entre 0 e 1 (correlação), com seus valores expressos na forma de porcentagem. O R^2 nos fornece a variância total dos componentes U e V dos ventos que é explicada pelo modelo anual.

Para determinar a contribuição interanual da variabilidade total dos ventos, inicialmente o ciclo anual (componente determinista) foi extraído dos dados originais gerando um resíduo R1 não determinístico. Este resíduo foi filtrado pelo método de médias móveis com janela de 365 dias, com o objetivo de isolar os períodos de variabilidade interanuais, ou seja, sinais com frequências menores que 1 ano. O desvio padrão da série filtrada foi utilizado como uma estimativa para definir a amplitude da variabilidade interanual dos ventos.

A contribuição interanual (série filtrada) foi removida de R1 dando origem a um resíduo R2 que possui apenas a variabilidade intranual, ou seja, sinais com frequências maiores do que 1 ano. O desvio padrão deste resíduo R2 foi usado como uma estimativa da amplitude da variabilidade dos ventos em escalas intranuais.

Esta metodologia foi usada com por outros autores para análise de dados de temperatura da superfície do mar, por Teixeira et al. (2009) e cor da superfície do mar, por Garcia et al. (2004); Galvão e Teixeira (este volume), porém não é de nosso conhecimento o uso com dados de ventos.

3. Resultados e Discussão

A comparação das médias e desvios padrões mensais climatológicos dos dados do ponto 4 do CCMP e da boia 0N35W do PIRATA, mostram que os dados comportam-se de maneira semelhante, mas com leve diferença nos dados do CCMP, que superestimam os valores da componente zonal (U) do vento coletados na boia PIRATA. Na componente meridional (V), os dados CCMP subestimam os dados PIRATA nos primeiros meses do ano e superestima nos meses de junho a outubro, como podemos observar na Figura 2.

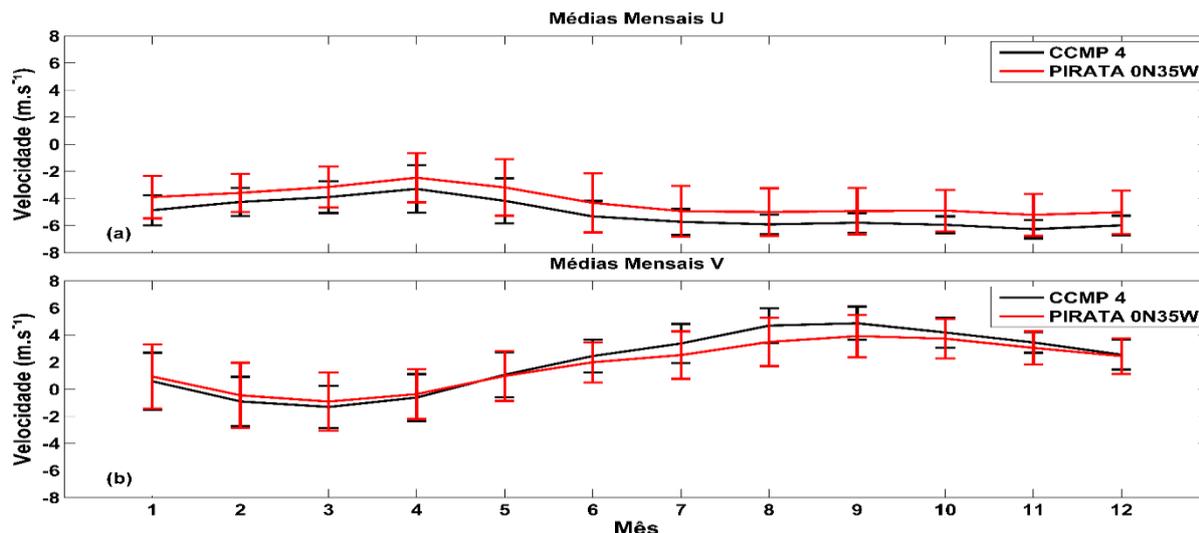


Figura 2. Comparação da média de velocidades e desvios padrão mensais climatológicos das componentes zonal (U) e meridional do vento provenientes do CCMP 4 e PIRATA 0N35W.

Com o intuito validar a variabilidade temporal dos dados do CCMP, comparou-se o seu espectro de frequências com os da boia PIRATA (Figura 3). Foi possível observar que os dados do CCMP foram representativos em relação à variabilidade de baixa frequência (360, 180 e 120 dias) dos dados PIRATA. Porém, de forma geral, os dados do CCMP não representam bem a variabilidade em altas frequências (períodos menores do que 30 dias). Observa-se ainda que os espectros da componente meridional são mais semelhantes quando comparados com os da componente zonal do vento.

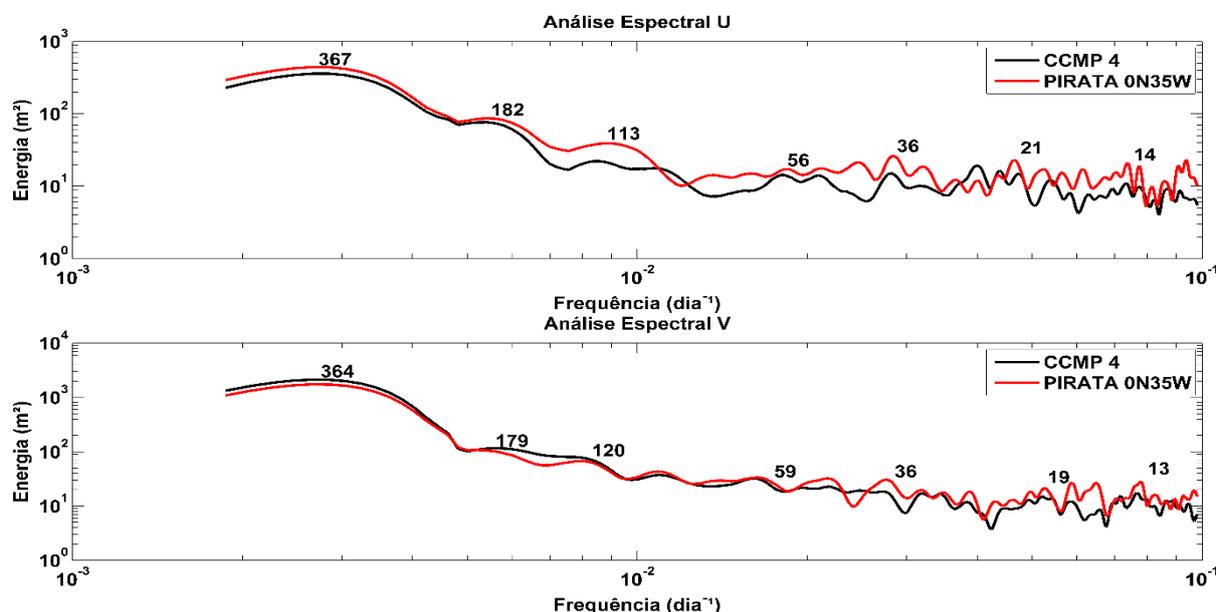


Figura 3. Espectro de frequências para ponto CCMP 4 e PIRATA 0N35W. Os números na figura representam os períodos de variabilidade mais energéticos (dias).

Após a validação dos dados do CCMP, realizou-se a análise da variabilidade temporal dos ventos na região. Na Figura 4 é mostrado o ajuste da série temporal das componentes U e V dos ventos do CCMP 4 (asteriscos vermelhos) e do ciclo anual ajustado, através de análise harmônica (curva preta). O valor de R² entre os dados e o ciclo anual é apresentado na figura e

define o quão representativo é este ciclo para explicar a variabilidade total de cada componente do vento.

Visivelmente percebe-se que existe um melhor ajuste do ciclo anual da componente V, o que é corroborado quando se comparam os valores de R^2 nestas duas componentes. Em ambas as componentes é visível um ciclo anual na intensidade dos ventos com maiores intensidades ocorrendo no segundo semestre dos anos. Também observa-se que a componente meridional é mais intensa que a zonal e que a última sempre possui valores negativos, características típicas dos ventos alísios.

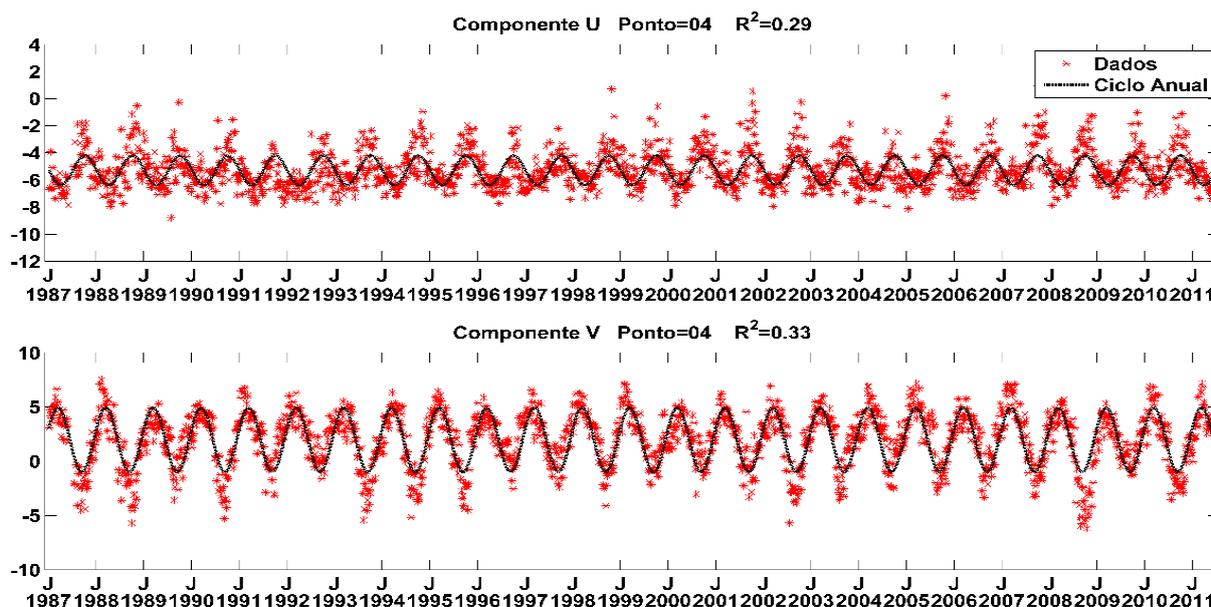


Figura 4. Intensidades (pontos vermelhos) dos componentes zonal e meridional dos ventos provenientes da CCMP e ciclo anual ajustado (linha preta) através da análise harmônica para o ponto 4 (m/s).

No mapa dos coeficientes de determinação (R^2), Figura 5, entre os dados da componente U dos ventos e o ciclo anual sugerido, observa-se que na maior parte da região, este ciclo não representa de forma correta a variabilidade temporal (valores de $R^2 < 30\%$). Porém a região central do mapa apresenta valores próximos de 60 %, indicando que a região apresenta variabilidade anual. Já na componente V os valores de R^2 são, em geral, maiores que 60 %, evidenciando que o ciclo anual explica a maior parte da variabilidade. Na componente V os menores valores ocorrem na região mais ao sul do domínio, sujeitas a influência remota de frentes frias e instabilidades causadas por ondas de leste.

A razão para esta diferença significativa nos valores de R^2 , nas componentes U e V, deve-se à diferentes forçantes da variabilidade temporal. Para a componente V, a variabilidade é controlada pelo deslocamento da ZCIT, forçado pela variações sazonais da insolação nos hemisférios, com ciclo anual bem definido. A variabilidade na componente U é gerada por diferenças nos gradientes zonais de pressão/aquecimento do Atlântico, que são controlados pela circulação oceânica, onde o ciclo anual não é bem definido.

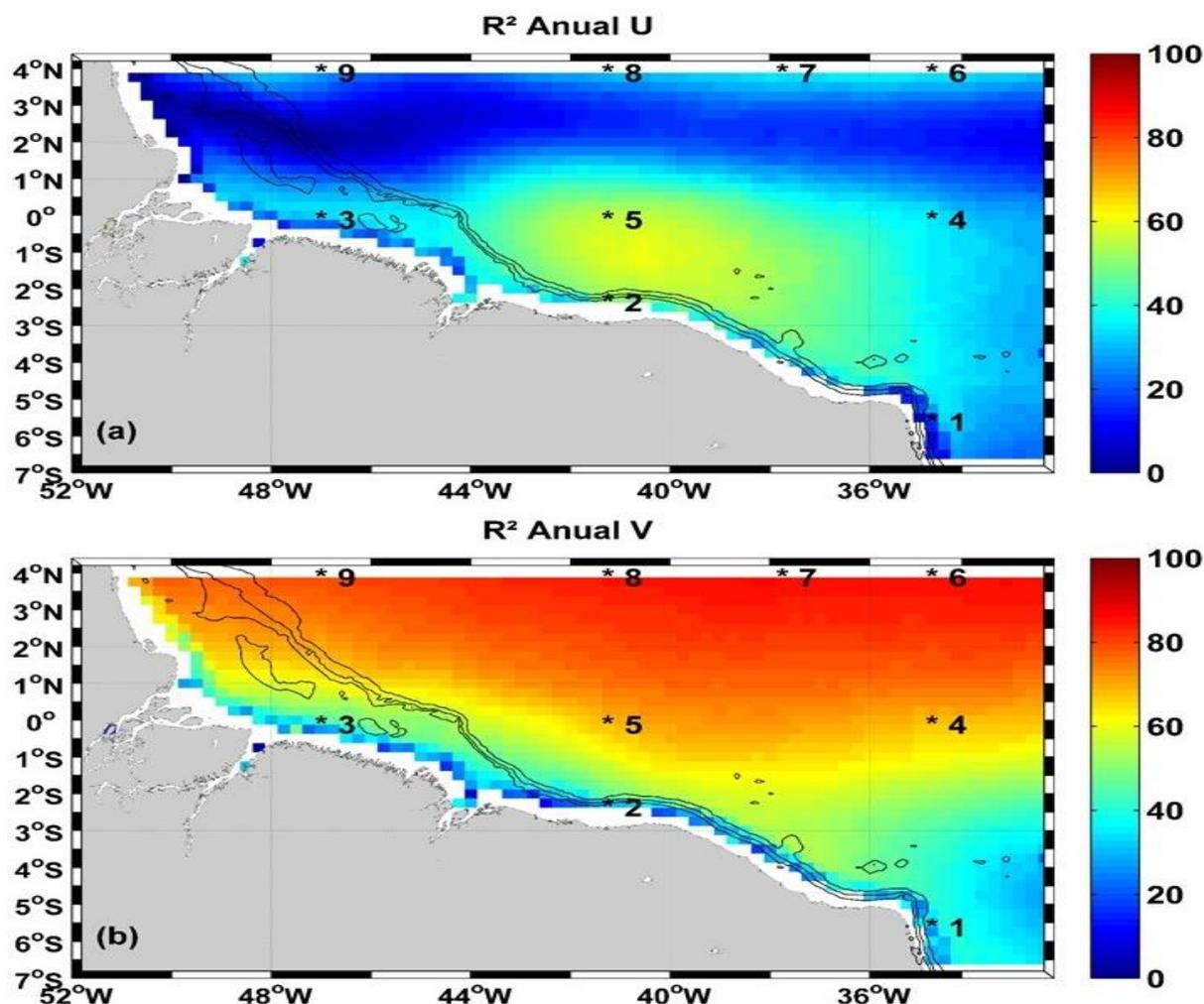


Figura 5. Coeficiente de determinação (R^2) entre os dados CCMP e o ciclo anual (%) para as componentes zonal e meridional do vento.

Na Figura 6 é apresentado o mapa das amplitudes do ciclo anual de cada componente do vento. Foram observados baixos valores para amplitude da componente U na maior parte da região, entretanto na região central existem valores relativamente altos próximos a 2 m/s. A grande maioria de valores baixos refletem a não adequação do modelo anual aos dados, demonstrada pelos baixos valores de R^2 , como visto na Figura 4.

Diferente de U, na componente V foram observadas maiores amplitudes do vento, com valores máximas de 6 m/s, na porção leste acima do Equador e amplitudes mínimas de 0-1 m/s nas plataformas continentais adjacentes aos estados do Maranhão, Piauí e Ceará. Isto ocorre porque a região mais ao norte do domínio é mais exposta as variações sazonais da posição da ZCIT, que é a controladora do ciclo anual da componente meridional.

Na tabela 1, são apresentadas as amplitudes da variabilidade inter e intranual com base nos desvios padrões dos resíduos. De forma geral a variabilidade intranual é maior, em ambas as componentes, do que a variabilidade interanual em todo o período analisado. Em geral a variabilidade intranual cresce, na componente meridional, seguindo um padrão de oeste para leste, com valor máximo de 2 m/s no ponto 1 e valores mínimos de 1.2 e 1.1 m/s nos pontos 3 e 9, respectivamente. Já a variabilidade intranual na componente zonal tende a se manter constante com uma média de 1 m/s.

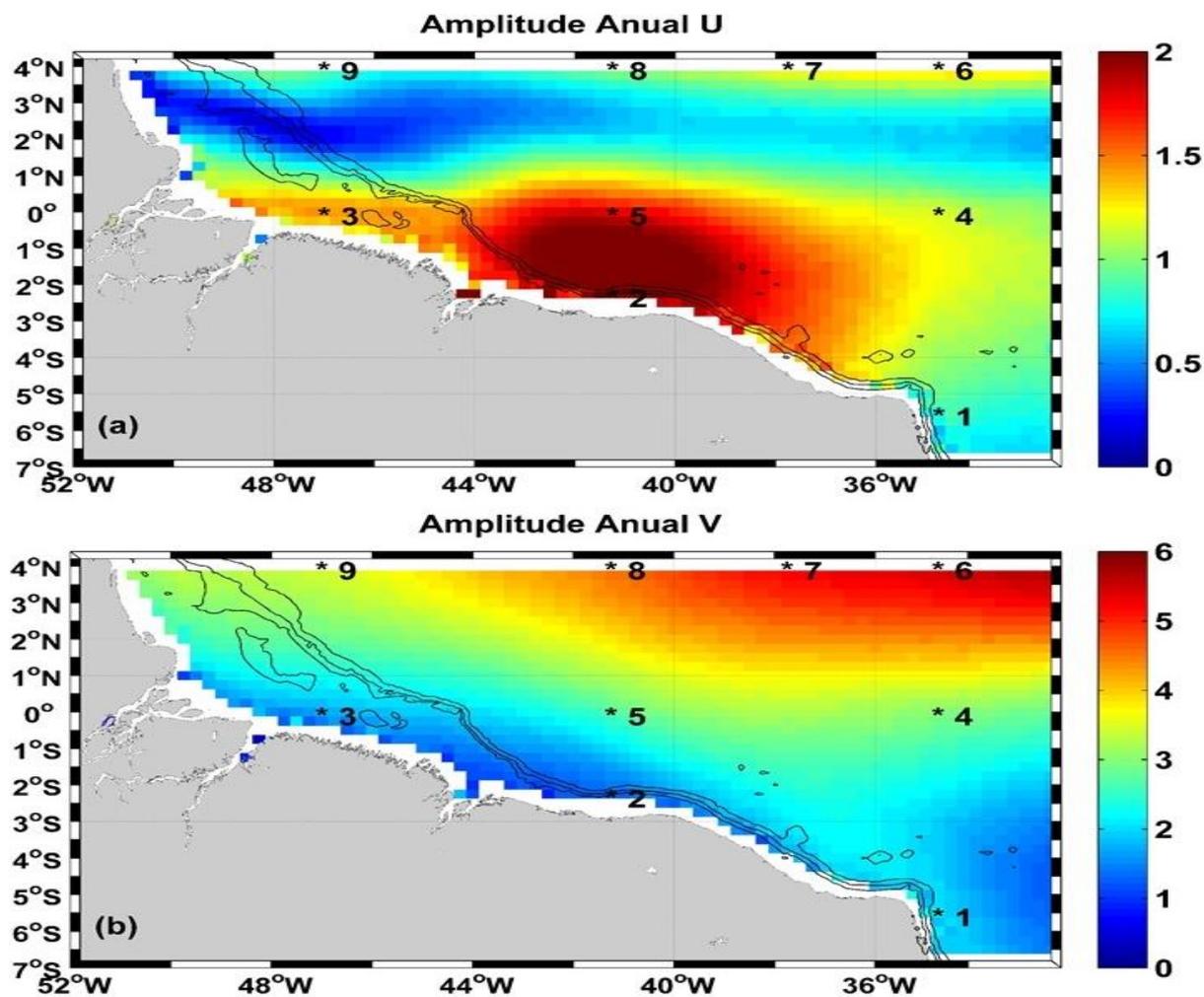


Figura 6. Amplitude do ciclo anual (m/s) para as componentes zonal e meridional do vento provenientes dos dados CCMP com base nos resultados da análise harmônica.

Tabela 1. Valores da amplitude d variabilidade inter e intranual dos pontos indicados na Figura 1. As amplitudes foram obtidas através do desvio padrão dos resíduos inter e intranuais (m/s).

Ponto	Interanual		Intranual	
	U	V	U	V
1	0.3	0.7	1.2	2.0
2	0.5	0.6	1.3	1.2
3	0.5	0.4	1.3	1.2
4	0.3	0.5	1.0	1.3
5	0.4	0.3	1.1	1.1
6	0.3	0.4	1.2	1.5
7	0.3	0.4	1.1	1.4
8	0.2	0.4	1.0	1.3
9	0.2	0.4	1.0	1.1

4. Conclusões

Com base na comparação das médias, desvio e do espectro dos dados do CCMP e PIRATA pode-se concluir que os dados da CCMP representam de forma correta a variabilidade

dos ventos na região do oceano Atlântico Equatorial, porém deve-se ter em vista que os dados CCMP superestimam a componente zonal do vento e não representam de forma correta a variabilidade temporal em baixas frequências.

Com base nos resultados, é possível inferir que o ciclo anual é o principal responsável pela variabilidade do padrão da componente meridional dos ventos na região. Já para componente zonal do vento, o ajuste do modelo anual não foi satisfatório com valores pequenos de R^2 . Haja vista os valores de variabilidade intranual serem maiores que os anuais conclui-se que estes são os principais períodos de variabilidade da componente zonal do vento na região.

Servain et al. (1985) ao analisar dados mensais de vento coletados por navios de oportunidade no Atlântico Tropical entre 1964 e 1979 também observou que a componente meridional do vento apresenta uma variabilidade anual demarcada, o que não ocorre na componente zonal.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processo 483850/2012-8 e 474755/2011-8), a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) projeto TRANSAQUA CT-AQUAVIÁRIO 01/2010.

Referências Bibliográficas

Atlas, R. et al. A Cross-calibrated, Multiplatform Ocean Surface Wind Velocity Product for Meteorological and Oceanographic Applications. **American Meteorological Society**, v. 92, n. 2, p.157-174, 2001.

Emery, W. J.; Thompson, R. E. **Data analysis methods in physical oceanography**. Universidade de Michigan: Elsevier, 1998. 634 p.

Ferreira, A. G. **Técnicas de sensoriamento remoto para monitoramento ambiental com aplicações em recursos pesqueiros no atlântico tropical**. 2005. 171 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas e Tropicais) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

Galvão, P.; Teixeira, C. E. P. Variabilidade espaço-temporal da concentração de clorofila-a no Oceano Atlântico Equatorial baseados nos dados do sensor MODIS-AQUA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 17., 2015, João Pessoa. **Anais...** (este volume).

Garcia, C. A.; Sarma, Y. V. B.; Mata, M. M.; Garcia, V. M. Chlorophyll variability and eddies in the Brazil-Malvinas Confluence region. **Deep-Sea Research**, vol. 51, n. 1-3, p. 159-172, 2004.

Hastenrath, S; Heller, L. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 435, p. 77-92, 1977.

Large, W, G; Pond, S. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. **Journal Of Physical Oceanography**, v. 11, n. 3, p.324-336, 1981.

Stramma, L. Geostrophic transport of the south equatorial current in the Atlantic. **Journal of Marine Research**, v. 49, p. 281-294, 1991.

Servain, J.; Picaut, J.; Busalacchi, A. J. Chapter 16 Interannual and Seasonal Variability of the Tropical Atlantic ocean depicted by Sixteen years of Sea-Surface Temperature and wind stress. In: Nihoul, J. C. J. **Coupled Ocean-Atmosphere Models**. Ediora Elsevier, 1985. cap. 16, p. 211-237.

Teixeira, C. E. P.; Mata, M. M.; Lentini, C. A. D.; Garcia, C. A. E.; Campos E. J. D. On the temporal variability of the sea surface temperature in the Southwestern Atlantic based on the analysis of Pathfinder AVHRR/NOAA images. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 1, p. 1-10, 2009.