



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR**  
**GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

**PEDRO HENRIQUE LIMA SILVA MORAIS**

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DO PADRÃO DE VENTOS DO SETOR  
OESTE DO OCEANO ATLÂNTICO EQUATORIAL**

**FORTALEZA**

**2013**

**PEDRO HENRIQUE LIMA SILVA MORAIS**

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DO PADRÃO DE VENTOS DO SETOR  
OESTE DO OCEANO ATLÂNTICO EQUATORIAL**

Monografia apresentada junto ao curso de Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, na área de Oceanografia Física, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

**FORTALEZA**

**2013**

**PEDRO HENRIQUE LIMA SILVA MORAIS**

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DO PADRÃO DE VENTOS DO SETOR  
OESTE DO OCEANO ATLÂNTICO EQUATORIAL**

Monografia apresentada junto ao curso de Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, na área de Oceanografia Física, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Antonio Geraldo Ferreira

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Maria Ozilea Bezerra Menezes

Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as oportunidades que Ele colocou em minha vida, e por todo o amadurecimento que ele me proporcionou ao longo dos meus 24 anos.

Aos meus pais, especialmente a minha mãe, Nele Maria, por todo o apoio e compreensão que me foram creditados. A minha irmã, Hellen, por todas as palavras de apoio e incentivo.

Ao meu orientador, professor Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira, por todo o aprendizado e paciência ao longo da elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso, que me fez enxergar com outros olhos a Pesquisa Científica.

A professora Dr. Oziléa Bezerra Menezes, por todas as oportunidades de bolsas e estágios desde início de minha graduação.

A cada um dos alunos da turma de Oceanografia 2010.1 por todos os momentos de amizade e companheirismo ao longo destes 4 anos.

A todos os funcionários do Instituto de Ciências do Mar – LABOMAR/UFC pela dedicação e convivência durante todo o período de minha graduação.

Finalmente, agradeço a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) através do projeto “TRANSAQUA – Gestão e Segurança da Navegação e do Transporte Aquaviário: Desenvolvimento Ambientalmente Sustentável de Sistemas Marítimos e Fluviais” pela estrutura computacional disponível para realização dos trabalhos.

“Eu não vou jamais deixar

Essa onda me levar

Se ainda tenho forças pra remar

Estrelas vão me guiar

O Sol me aquecer

A vida sempre terá

Razão de Ser” (Mário Soul)

## RESUMO

Os ventos são um forçante chave para aplicações oceanográficas, pois são um dos principais determinantes da circulação oceânica. Além disso, os ventos são fundamentais para o entendimento do fluxo de energia, massa e gases entre a atmosfera e os oceanos. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é determinar a variabilidade espaço-temporal do padrão de ventos na porção oeste do oceano Atlântico Equatorial (4°N–6.7°S, 52°W–32.3°W). Para tanto foram utilizados 25 anos (1987–2011) de dados de velocidade e direção de ventos provenientes do programa *Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind Vector (CCMP)*, programa derivado de medições coletadas por diversos satélites, estações meteorológicas e dados de modelagem numérica. Os dados possuem resolução espacial de 25 km e temporal de 5 dias. Neste projeto será utilizada a metodologia de análise harmônica para quantificar a variabilidade anual, inter e intra-anual dos dados. Na fase inicial do projeto, os resultados mostram que em geral os ventos são predominantemente de leste/sudeste com maiores intensidades (7-8 m/s) ocorrendo na região da plataforma continental adjacente aos estados do Ceará e Rio Grande do Norte. Os maiores desvios padrão (3-4 m/s) ocorrem na componente meridional do vento na região acima do Equador. O ano 1987 apresentou velocidades até 28% maiores do que a média e menores desvios nas componentes zonal e meridional na região que compreende os estados do Maranhão, Piauí e Ceará. Os ventos mais intensos ocorrem nos meses de julho, agosto e setembro, e predominantemente de sudeste em toda a região. De forma geral o CCMP representou de forma correta a variabilidade espaço temporal dos ventos da região, pois ao ser comparado com dados *in situ* provenientes do *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA)*, obteve-se uma boa correlação no comportamento das velocidades e direções ao longo do período de estudo.

**Palavras-chave:** CCMP. Padrão eólico. Projeto PIRATA. Ciclo anual.

## ABSTRACT

The winds are one forcing key 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 patterns in the western portion of the Equatorial Atlantic Ocean ( $4^{\circ}$  N -  $6.7^{\circ}$  S,  $52^{\circ}$  W -  $32.3^{\circ}$  W). For both 25 years (1987-2011) data of speed and direction of winds in the Cross - Calibrated Multi - Platform Ocean Surface Wind Vector (CCMP) program were used. Program derived from measurements collected by various satellites, weather stations and data from numerical modeling. Data hold time 5 days a spatial resolution of 25 km. In this project the methodology of harmonic analysis will be used to quantify the annual variability inter and intra-annual data. In the initial phase of the project, the results show that in general the winds are predominantly from the east / southeast with higher intensities (7-8 m / s) occurring in the continental shelf region adjacent to the states of Ceará and Rio Grande do Norte. The largest standard (3-4 m / s) deviations occur in the meridional component of the wind in the region above the equator. The year 1987 has presented speeds up to 28% higher than the average, and minor deviations in the zonal and meridional components in the region comprising the states of Maranhão, Piauí and Ceará. Stronger winds occur in the months of July, August and September, and predominantly from the southeast across the region. Overall CCMP represented correctly variability Timeline of winds in the area because when compared with in situ data from the Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA), we obtained a good correlation in the behavior of speeds and directions throughout the study period.

**Keywords:** CCMP. Wind pattern. PIRATA project. Annual cycle.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	- Área de estudo, compreendendo os estados do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte.....	15
Figura 2	- Disponibilidade no tempo dos conjuntos de dados de ventos de superfície provenientes dos satélites analisados pelo VAM.....	18
Figura 3	- Boia 4N38S do PIRATA.....	19
Figura 4	- Pontos determinados para extração de séries temporais na área de estudo.....	20
Figura 5	- Média e desvios-padrão para o período de 1987 a 2011 (m/s).....	25
Figura 6	- Média e desvios-padrão para o ano de 1987 (m/s).....	26
Figura 7	- Média e desvios-padrão para o ano de 1988 (m/s).....	27
Figura 8	- Média e desvios-padrão sazonais dos meses de janeiro, fevereiro e março de todos os anos (m/s).....	29
Figura 9	- Similar a figura 8, porém para os meses de abril, maio e junho...	30
Figura 10	- Similar a figura 8, porém para os meses de julho, agosto e setembro.....	31
Figura 11	- Similar a figura 8, porém para os meses de outubro, novembro e dezembro.....	32
Figura 12	- Intensidades (pontos vermelhos) das componentes zonal e meridional e ciclo anual ajustado (linha preta) para o ponto 1.....	33
Figura 13	- Similar a figura 12, porém para o ponto 2.....	34
Figura 14	- Similar a figura 12, porém para o ponto 3.....	34
Figura 15	- Similar a figura 12, porém para o ponto 4.....	35
Figura 16	- Similar a figura 12, porém para o ponto 5.....	35
Figura 17	- Similar a figura 12, porém para o ponto 6.....	36
Figura 18	- Similar a figura 12, porém para o ponto 7.....	36
Figura 19	- Similar a figura 12, porém para o ponto 8.....	37
Figura 20	- Similar a figura 12, porém para o ponto 9.....	37
Figura 21	- Coeficiente de determinação entre os dados CCMP e o ciclo anual (%)......	39
Figura 22	- Amplitude do ciclo anual (m/s) .....	40

Figura 23 - Fase do ciclo anual (dias) .....	42
Figura 24 - Variabilidade interanual e intranual no ponto 1.....	43
Figura 25 - Similar a figura 24, porém para o ponto 2.....	44
Figura 26 - Similar a figura 24, porém para o ponto 3.....	44
Figura 27 - Similar a figura 24, porém para o ponto 4.....	45
Figura 28 - Similar a figura 24, porém para o ponto 5.....	45
Figura 29 - Similar a figura 24, porém para o ponto 6.....	46
Figura 30 - Similar a figura 24, porém para o ponto 7.....	46
Figura 31 - Similar a figura 24, porém para o ponto 8.....	47
Figura 32 - Similar a figura 24, porém para o ponto 9.....	47
Figura 33 - Comparação das médias semanais de velocidades ao longo do tempo na componente U dos ventos.....	49
Figura 34 - Similar a figura 33, porém para a componente V.....	49
Figura 35 - Comparação da média de velocidades e desvios padrão mensais (CCMP 4 vs PIRATA 0N35W) .....	50
Figura 36 - Comparação da média de velocidades e desvios padrão mensais (CCMP 7 vs PIRATA 4N38W) .....	51
Figura 37 - Intensidades (pontos vermelhos) das componentes zonal e meridional e ciclo anual ajustado (linha preta) para a boia 0N35W.....	52
Figura 38 - Similar a figura 37, porém para a boia 4N38W.....	52
Figura 39 - Variabilidade inter-anual e intra-anual da boia PIRATA 0N35W...	54
Figura 40 - Similar a figura 38, porém para a boia PIRATA 4N38W.....	54
Figura 41 - Espectro de frequências para ponto CCMP 4 e PIRATA 0N35W.....	56
Figura 42 - Espectro de frequências para ponto 7 e PIRATA 4N38W.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Localização dos pontos determinados para análises.....	21
Tabela 2 -	Pontos e boias PIRATA comparados.....	23
Tabela 3 -	Valores de $R^2$ nas componentes U e V para cada ponto CCMP 4 e PIRATA 0N35W.....	53
Tabela 4 -	Similar a tabela 3, porém para ponto CCMP 7 e PIRATA 4N38W	53
Tabela 5 -	Coeficiente de Correlação entre as componentes U e V para cada ponto/boia (%).....	55

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Área de estudo.....	15
1.2	Objetivos.....	16
1.2.1	<i>Objetivos Específicos.....</i>	16
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	17
2.1	Banco de dados.....	17
2.1.1	<i>Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind Vector (CCMP).....</i>	17
2.1.2	<i>Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA).....</i>	19
2.2	Análise inicial dos dados.....	20
2.3	Caracterização do ciclo anual.....	20
2.4	Caracterização da variabilidade inter-anual e intra-anual.....	22
2.5	CCMP vs PIRATA.....	23
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
3.1	Estatísticas descritivas do CCMP.....	24
3.2	Caracterização do ciclo anual.....	33
3.3	Caracterização da variabilidade inter-anual e intra-anual.....	43
3.4	CCMP vs PIRATA.....	48
4	CONCLUSÃO.....	58
	REFERÊNCIAS .....	59

## 1 INTRODUÇÃO

A Circulação Atmosférica é forçada pelo aquecimento desigual da Terra, que aquece a região equatorial intensamente durante um longo período do dia, fazendo com que o ar aquecido se expanda, diminuindo sua densidade, e seja levado a grandes altitudes. Esse ar aquecido é levado em direção aos polos para manter o equilíbrio global de energia e umidade. Ao chegar nas latitudes de 30°, o ar já diminuiu sua temperatura o suficiente para aumentar a densidade novamente e descer em direção a superfície, formando duas células de circulação entre 30° N e 30° S, denominadas Células de Hadley (BJERKNES, 1966).

Ao chegarem à superfície em torno dos 30° a massa de ar tende a voltar para a zona de baixa pressão no Equador, mas devido ao efeito de Coriolis eles sofrem uma deflexão para a esquerda no hemisfério norte e para direita no hemisfério sul, formando os chamados ventos alísios. Os alísios no hemisfério norte sopram de nordeste para sudoeste, enquanto que os do hemisfério sul sopram do sudeste para o noroeste.

Dentro dos limites das Células de Hadley, existe um sistema que ocorre nas proximidades da linha do equador, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A ZCIT está inserida numa região onde ocorre a interação de características marcantes atmosféricas e oceânicas: i) zona de confluência dos Alísios (ZCA); ii) zona do cavado equatorial; iii) zona de máxima temperatura da superfície do mar; iv) zona de máxima convergência de massa; e v) zona da banda de máxima cobertura de nuvens convectivas, todas interagindo próximas à faixa equatorial (CARVALHO; OYAMA, 2013).

Apesar dessa interação as características não se apresentam ao mesmo tempo sobre a mesma latitude. No trabalho apresentado por Hastenrath e Lamb (1977) é mostrado que, durante os meses de verão no hemisfério norte (junho, julho e agosto), a ZCA aparece sobre o cavado equatorial e as regiões de máxima cobertura de nuvens, precipitação e convergência de massa são quase coincidentes, localizando-se a três graus ao sul da ZCA. Nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro a zona de máxima cobertura de nuvens, precipitação e convergência de massa localizam-se ao norte da ZCA.

A ZCIT possui um deslocamento norte-sul ao longo do ano, 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 (HASTENRATH; HELLER, 1977; CITEAU et al., 1998a, 1998b). Além dessa oscilação anual, a ZCIT apresenta oscilações com maiores frequências, com o período variando de semanas a dias. Análises estatísticas sugerem que há uma correlação bastante significativa entre os índices climáticos, como o El Niño (ENSO) e Dipolo do Atlântico, e a intensidade do vento sobre o nordeste brasileiro, principalmente nos meses de fevereiro a maio, correspondentes à quadra chuvosa (OLIVEIRA; COSTA, 2011).

Os ventos são um 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, os ventos são fundamentais para o entendimento do fluxo de energia (perda de calor latente pela evaporação), massa e gases entre a atmosfera e os oceanos. Num ponto de vista econômico, hoje em dia o potencial eólico da maioria dos estados do nordeste brasileiro está sendo aproveitado para geração de energia. Conhecer a variabilidade temporal dos ventos é o imprescindível para entender de que maneira a variabilidade climática sazonal e interanual podem influenciar a geração de energia eólica.

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 (JOYCE et al., 2004). A circulação no oceano Atlântico Equatorial apresenta sua dinâmica forçada pelos ventos alísios, que forçam correntes de leste (Correntes Norte e Sul Equatorial) Além disso, os ventos geram um empilhamento na borda oeste do oceano Atlântico, que força um gradiente de pressão na direção zonal dando origem a um sistema de contracorrentes de oeste (Contracorrentes Norte e Sul Equatorial) (STRAMMA, 1991).

A variabilidade dos padrões de velocidade e direção dos ventos acontece em uma escala espacial e temporal e é controlada significativamente pela distribuição sazonal de radiação solar. Apesar da importância dos ventos para a circulação oceânica, o seu monitoramento através de instrumentos de medição é

complicado nos oceanos, devido a sua grande variabilidade espacial. Isto demandaria, por exemplo, um grande número de boias oceânicas ou sensores instalados em navios, o que é economicamente inviável.

Uma das formas 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 (FERREIRA, 2005a).

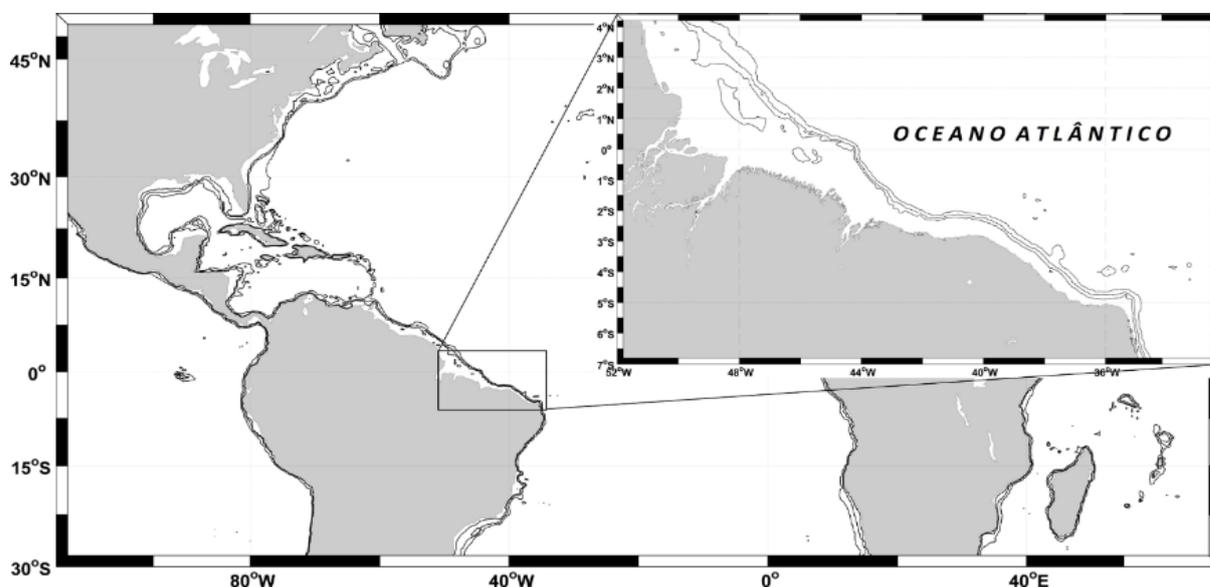
O SR apresenta uma série de vantagens como, por exemplo, análise sinótica em tempo real, altas resoluções espaciais e temporais, custo final baixo, aquisição de dados em locais de difícil acesso e rapidez com que são geradas as informações.

No presente trabalho foram utilizados vinte e cinco anos de dados provenientes de SR para estudar a variabilidade espaço-temporal do padrão de ventos na porção oeste do oceano Atlântico Equatorial. O trabalho está organizado nas seções: 1 INTRODUÇÃO, onde é apresentada uma introdução geral sobre o trabalho, descrição da área de estudo e determinação de objetivos; 2 MATERIAL E MÉTODOS, que descreve os bancos de dados utilizados e o procedimento de processamento das imagens; 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO, onde são apresentados os resultados do processamento de imagens e discussão de resultados encontrados (médias, análises harmônicas, análise espectrais, correlações); 4 CONCLUSÕES, onde as conclusões gerais sobre o estudo são apresentadas.

## 1.1 Área de estudo

O trabalho foi realizado levando em consideração a região que compreende a porção oeste do oceano Atlântico Equatorial (4°N–6.7°S, 52°W–32.3°W). Região essa que engloba também a plataforma continental dos estados brasileiros do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte (FIGURA 1), e é caracterizada pela presença de ventos alísios intensos e constantes durante grande parte do ano, com direções predominantes de leste/sudeste.

Figura 1 - Área de estudo, compreendendo os estados do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte.



Fonte: o autor.

O padrão de ventos na área de estudo está sujeito à variabilidade e tem uma intrínseca relação com os fenômenos meteorológicos, como o ENSO, tornando importante entender de que maneira a variabilidade climática sazonal e interanual podem influenciar este padrão.

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo principal estimar a variabilidade espaço-temporal do padrão de ventos na porção oeste do oceano Atlântico Tropical (4°N–6.7°S, 52°W–32.3°W) no período de 1987 a 2011, através de dados de velocidade e direção de ventos provenientes do programa Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind (CCMP).

### **1.2.1 Objetivos Específicos**

- Caracterizar o ciclo anual do padrão de ventos;
- Caracterizar a variabilidade inter-anual;
- Identificar os padrões de variabilidade intra-anual;
- Validar os dados de SR através da comparação com dados in situ de duas boias do projeto Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA).

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Banco de Dados

#### 2.1.1 *Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind Vector (CCMP)*

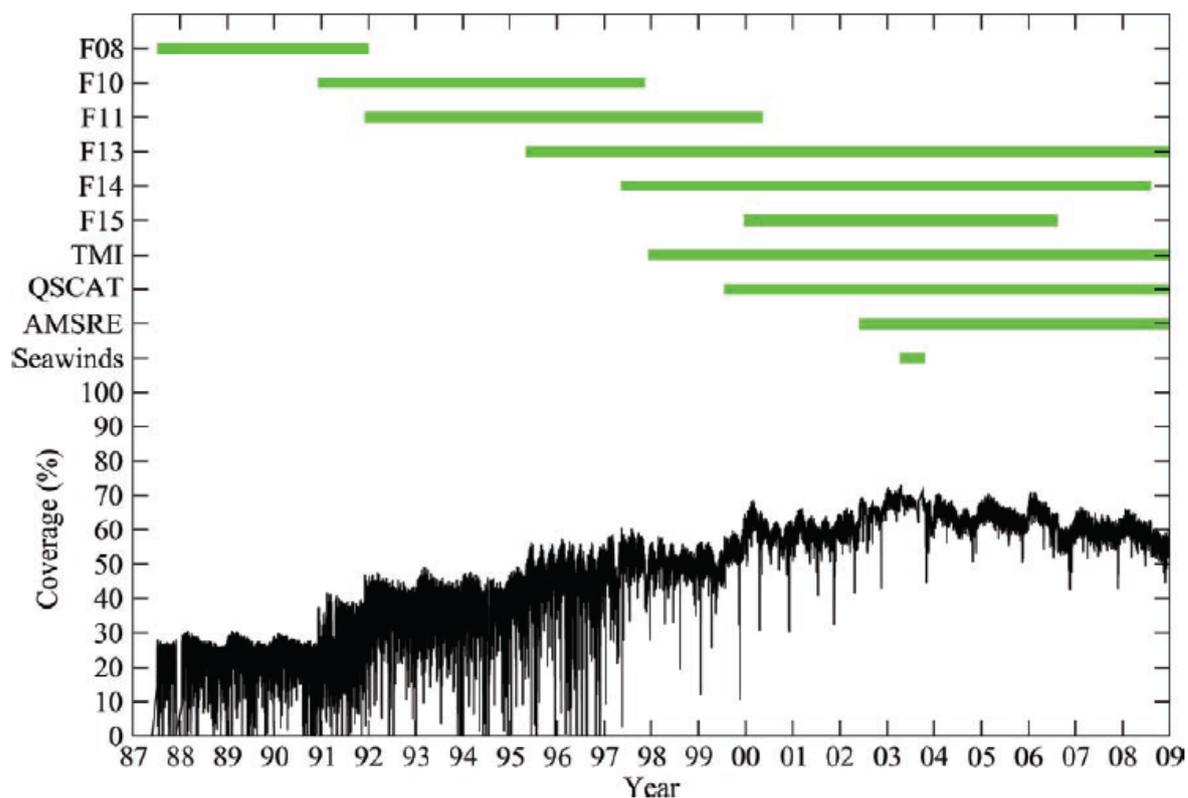
O produto de velocidade e direção de ventos para a região foi obtido a partir dos dados disponibilizados pelo CCMP em domínio público (<http://podaac-opensap.jpl.nasa.gov/opensap/allData/ccmp/>) pelo Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) do National Aeronautics and Space Administration (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, no período de julho de 1987 a dezembro de 2011 (vinte e cinco anos). O CCMP é produzido a partir da combinação de dados de múltiplas plataformas de SR, *dados in situ* e dados de reanálise através de um método de análise variacional (VAM).

O produto usa inicialmente os dados de direção e intensidade de ventos provenientes da reanálise ERA 40 do European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), que é chamado de First-look. Os dados *in situ* e de SR são usados para melhorar a qualidade e a resolução dos First-look através da técnica do VAM, produzindo o Late-look.

Os dados de SR são provenientes dos satélites SSM/I, SSMIS, AMSR-E, TRMM TMI, QuikSCAT, SeaWinds, WindSat (ATLAS et al., 2011) (FIGURA 2). Os dados *in situ* são provenientes de navios de oportunidades e boias oceanográficas espalhadas pelo globo, não está disponível na documentação do CCMP a origem espacial e temporal destes dados.

Figura 2 - Disponibilidade no tempo dos conjuntos de dados de ventos de superfície provenientes dos satélites analisados pelo VAM.



Fonte: Atlas (2011). Os instrumentos SSM / I são indicados por F08-F15. A percentagem da cobertura dos oceanos observados por estas missões, num período de 6 horas, é mostrada na parte inferior parte do gráfico.

Finalmente os dados Late-look são interpolados numa grade regular de 25 km a cada 5 dias, resultando num produto de resolução espacial e qualidade superior ao ECMWF (ATLAS *et al.*, 2011). O projeto CCMP foi criado com o intuito de prover um banco de dados ininterrupto e com resolução espacial regular entre os anos de 1987 e 2011 para aplicações em meteorologia e oceanografia, como por exemplo, modelagem numérica.

### **2.1.2 Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA)**

O programa Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic (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. (<http://goosbrasil.org/pirata/index.php>).

O PIRATA é resultado de cooperação internacional entre Brasil, França e Estados Unidos, que são responsáveis por todo o suporte logístico para continuidade das operações realizadas. O Brasil é responsável pelas boias do lado oeste da rede.

Na última seção de análises do presente trabalho, os dados de direção e intensidade de ventos das boias 0N35W e 4N38W (FIGURA 3) foram comparados com os dados do CCMP provenientes dos pontos de grade mais próximos as boias. Os instrumentos instalados nas boias PIRATA coletam dados de vento a uma altitude média de 3 metros da superfície. Como o CCMP fornece os dados a 10 m de altitude, os dados PIRATA foram corrigidos seguindo a metodologia proposta por Large e Pond (1981).

Figura 3 – Boia 4N38S do PIRATA



Fonte: o autor. Foto tirada a bordo do NHo Cruzeiro do Sul pertencente a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), comissão PIRATA EXTRA, em outubro de 2013.

## 2.2 Análise inicial dos dados

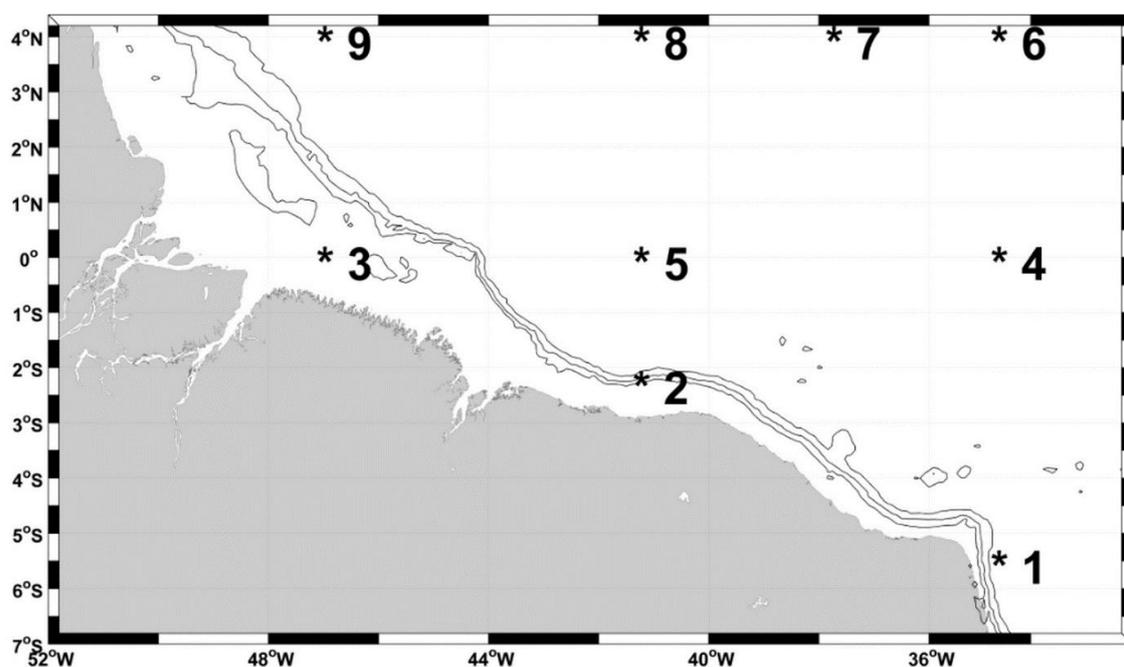
Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos através do PO.DAAC no formato Network Common Data Form (NetCDF). Primeiramente os dados foram convertidos para o ambiente Matlab, sendo 1788 imagens correspondentes aos 25 anos de dados médios de 5 dias.

Foi construída uma análise estatística para o CCMP, de caráter descritivo, para elaboração de mapas com valores médios de velocidade, direção e desvios-padrão nas componentes U e V dos ventos.

## 2.3 Caracterização do ciclo anual

Cada pixel da imagem foi tratado como uma série temporal independente e foi submetido a metodologia abaixo. Além disso foram determinados 9 pontos do CCMP que apresentam diferentes condições meteoceanográficas (FIGURA 4; TABELA 1) para extração de séries temporais e plotagem dos dados.

Figura 4 – Pontos determinados para extração de séries temporais na área de estudo.



Fonte: o autor.

Tabela 1 – Localização dos pontos determinados para análises.

Ponto	Latitude	Longitude
1	5.625° S	34.875° W
2	2.375° S	41.375° W
3	0.125° S	47.125° W
4	0.125° S	34.875° W
5	0.125° S	41.375° W
6	3.875° N	34.875° W
7	3.875° N	37.875° W
8	3.875° N	41.375° W
9	3.875° N	47.125° W

Fonte: o autor.

Para se caracterizar o ciclo anual dos dados de vento foi feita uma análise harmônica em cada série temporal a partir do método de mínimos quadrados (EMERY; THOMSON, 1998), através da equação:

$$x(t_n) = \bar{X} + \sum_{q=1}^M C_q \cos \left[ \left( \frac{2\pi}{T} \right) (t_n) - \varphi_q \right] + x_r(t_n) \quad (1)$$

Onde o termo  $x(t_n)$  é o vento (nas componentes U e V) medido num tempo  $t_n$ ,  $\bar{X}$  é média temporal de  $x$ ,  $C_q$  e  $\Phi_q$  são a amplitude e a fase para um harmônico com período  $T$ , e  $x_r(t_n)$  o resíduo. Este resíduo é constituído pelos outros sinais periódicos não detectados e pelo ruído de amostragem. Os tempos  $t_n$  variam de 1 (primeiro dado de amostragem) a 1788 (último dado de amostragem). Um harmônico foi analisado, correspondendo ao ciclo anual ( $T=365,25$  dias).

Com as amplitudes e fases do harmônico anual calculado ( $C_q$ ,  $\Phi_q$ ), construíram-se os mapas para região do ASE. Para determinar a representatividade do ciclo anual para 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 na equação 1, através da fórmula:

$$R^2 = \sum \frac{(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{(y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

Onde  $\hat{y}_i$  é o valor ajustado no instante  $i$ ,  $\bar{y}$  a média dos dados e  $y_i$  é o valor original no instante  $i$ . 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 das componentes U e V dos ventos que é explicada pelo modelo anual.

#### **2.4 Caracterização da variabilidade inter-anual e intra-anual**

Para determinar a contribuição inter-anual 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 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. O  $R^2$  entre a série filtrada e o resíduo R1 foi calculado para estimar o quanto da variância de R1 é explicada pela variabilidade inter-anual dos ventos.

A contribuição inter-anual (série filtrada) foi removida de R1 dando origem a um resíduo R2 que possui apenas a variabilidade intra-anual, 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 intra- anuais. Aqui também foi encontrado coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre os resíduos R1 e R2 com o intuito de se quantificar a variabilidade dos dados explicada pela componente intra-anual.

## 2.5 CCMP vs PIRATA

Foram comparados os dados dos pontos 4 e 7 do CCMP com os dados das boias do programa PIRATA , localizadas em 0N35W e 4N38W, que encontram-se dentro da área de estudo. Os pontos do CCMP localizam-se a uma distância aproximada de 19.6 Km das boias (TABELA 2).

Tabela 2 – Pontos e boias PIRATA comparados.

Ponto	Boia
4	0N35W
7	4N38W

Fonte: o autor.

Para validar os dados CCMP para a área de estudo, inicialmente comparou-se as médias e desvios padrão mensais das componentes U e V de cada ponto/boia. Foram comparados ainda os ciclos anual e os sinais inter-anuais e intra-anuais entre os dados CCMP e boias PIRATA. Em sequência foi realizada uma análise espectral para comparar o espectro de variância dos dados e finalmente, foi encontrado o coeficiente de correlação entre os pontos e as boias.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Estatísticas descritivas do CCMP

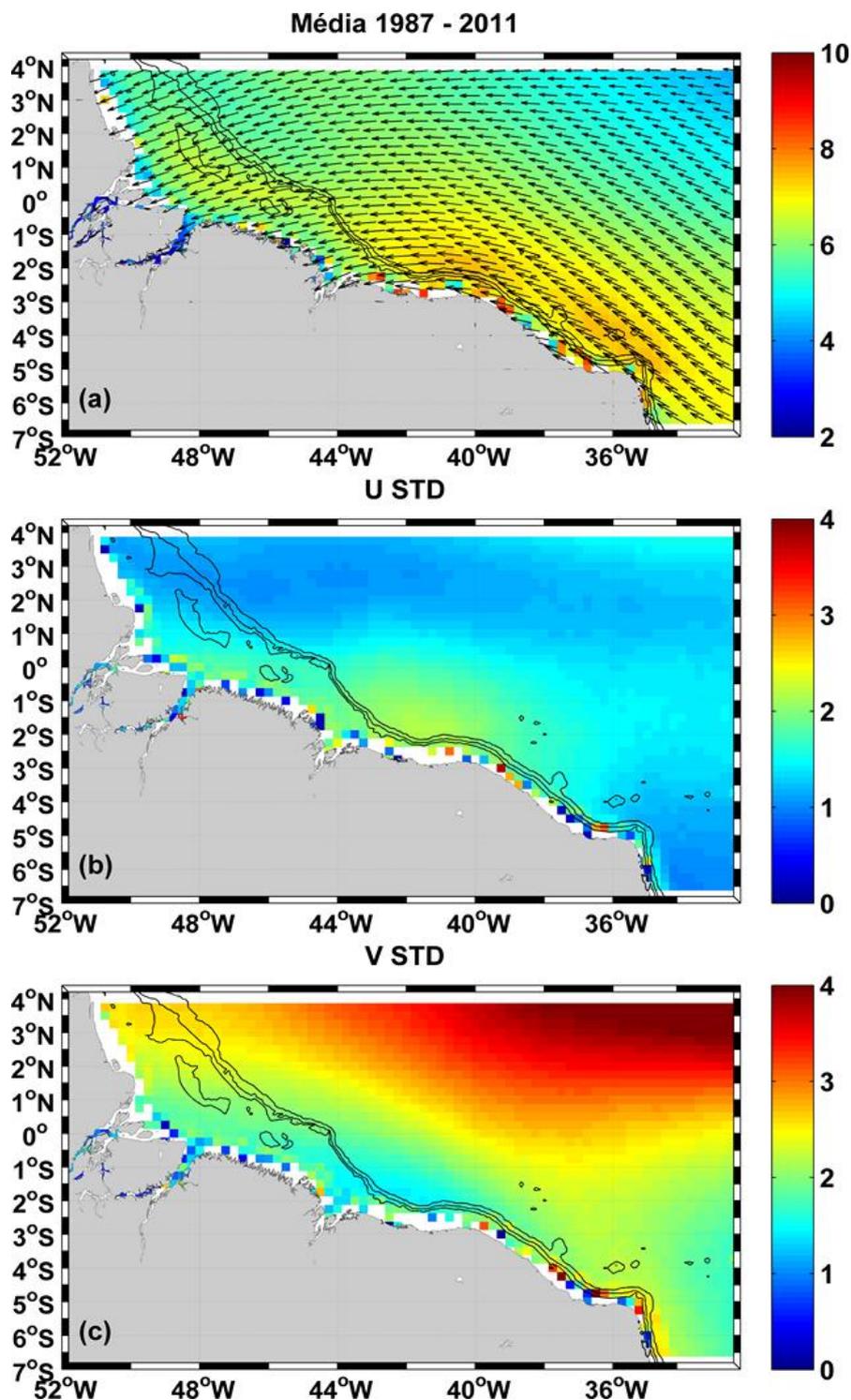
A média de todo o período de estudo – que aqui será tratada como climatológica - (FIGURA 5a) mostra que os ventos possuem direção predominante de leste/sudeste, com maiores intensidades (7-8 m/s) ocorrendo na região da plataforma continental adjacente aos estados do Ceará e Rio Grande do Norte. As menores intensidades (5 m/s) ocorrem na porção leste do domínio acima da linha do Equador.

Os maiores desvios padrão (3-4 m/s) ocorrem na componente meridional do vento (V) (figura 5c) na região acima do Equador, significando que a variabilidade da componente meridional é mais significativa que a componente zonal. No desvio padrão da componente zonal do vento (U) existe um máximo local entre as divisas dos estados do Ceará e Piauí que provavelmente é gerado por interferências topográficas da Serra da Ibiapaba, mas de forma geral o desvio padrão desta componente do vento é muito menor do que a componente meridional. Esta diferença é gerada pela migração sazonal da ITCZ que age principalmente sobre a componente meridional.

Como exemplos da variabilidade inter-anual dos dados são apresentadas as estatísticas descritivas dos anos de 1987 e 1988. A partir da análise das médias e desvios padrão pôde-se constatar que o ano de 1987 (FIGURA 6) apresentou valores até 28% maiores do que a média climatológica. O desvio padrão das componentes do vento deste ano é cerca de 50% menor do que o valor do que o valor climatológico. Em contrapartida, os menores valores médios (6 m/s) e maiores desvios padrão (3-4 m/s na componente V) foram observados no ano seguinte, 1988 (FIGURA 7). O ano de 1987 foi caracterizado por um evento forte de El Niño (AUSTRALIAN GOVERNMENT, 2013) e Dipolo Positivo (FUNCEME, 2013), fenômenos estes que levam a um deslocamento da ITCZ para o Norte (FERREIRA; MELLO, 2005b) e que favorecem o aumento do vento na região. Por outro lado o ano de 1988 foi caracterizado por um ano de La Niña e Dipolo Negativo o que favorece o deslocamento da ITCZ para o sul e uma diminuição da intensidade do

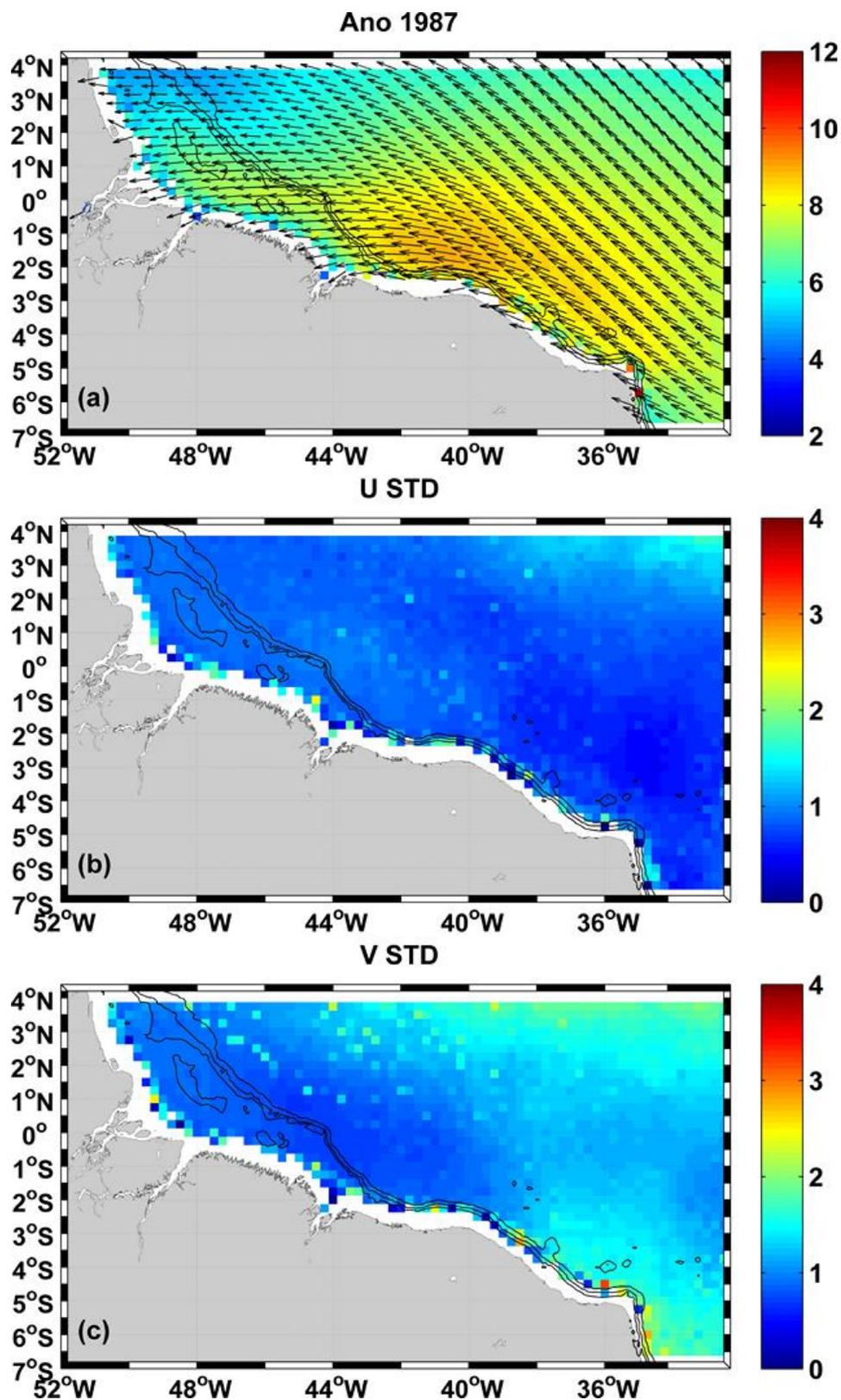
vento na região. A variabilidade inter-anual dos dados será discutida na subseção 3.3.

Figura 5 – Média e desvios-padrão para o período de 1987 a 2011 (m/s).



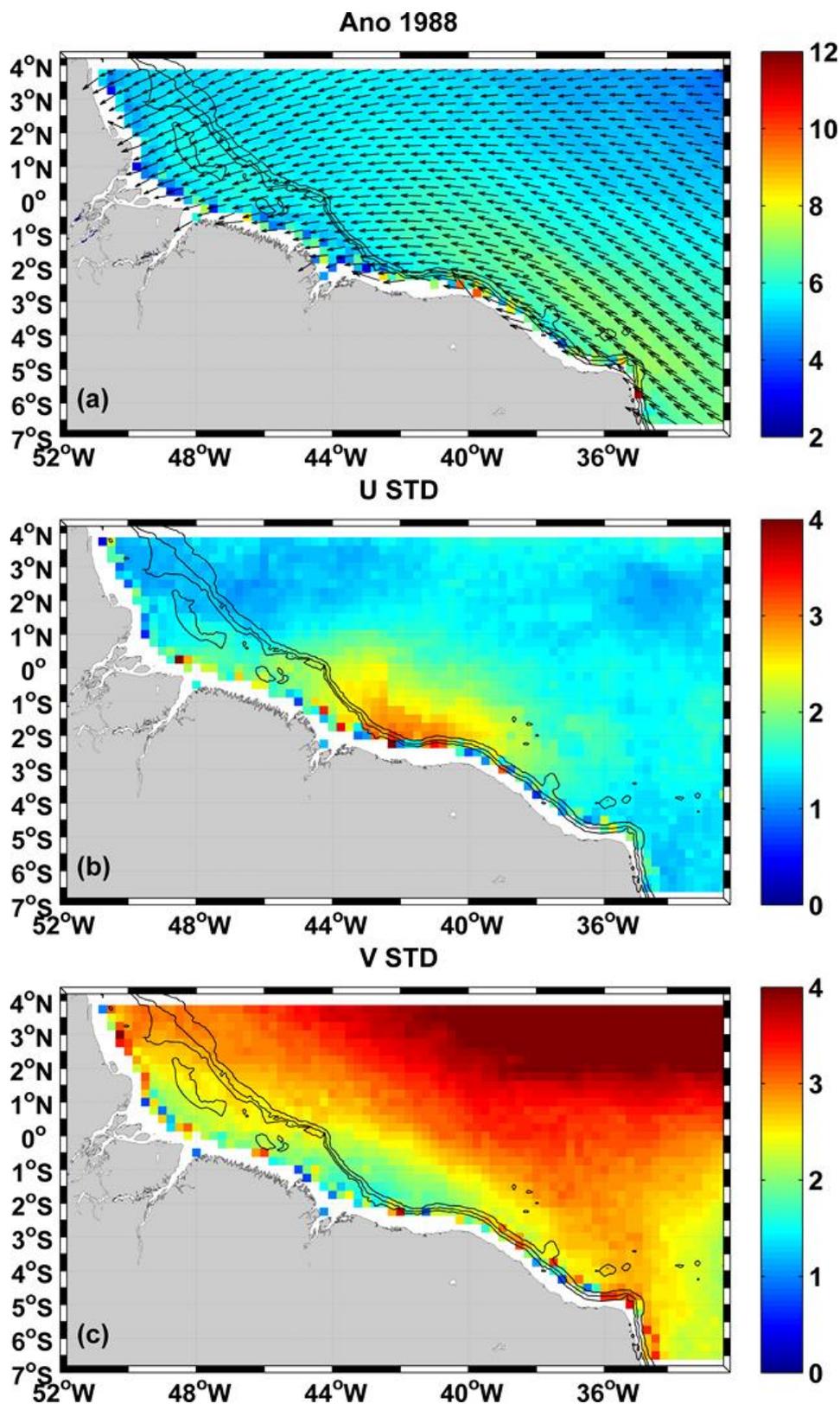
Fonte: o autor. (a) mostra as médias de velocidade e direção dos ventos, (b) o desvio padrão na componente U e (c) o desvio padrão na componente V. As setas na figura das médias demonstram a direção dos ventos, enquanto as cores de fundo a intensidade.

Figura 6 – Média e desvios-padrão para o ano de 1987 (m/s).



Fonte: o autor. (a) mostra as médias de velocidade e direção dos ventos, (b) o desvio padrão na componente U e (c) o desvio padrão na componente V. As setas na figura das médias demonstram a direção dos ventos, enquanto as cores de fundo a intensidade.

Figura 7 – Média e desvios-padrão para o ano de 1988 (m/s).



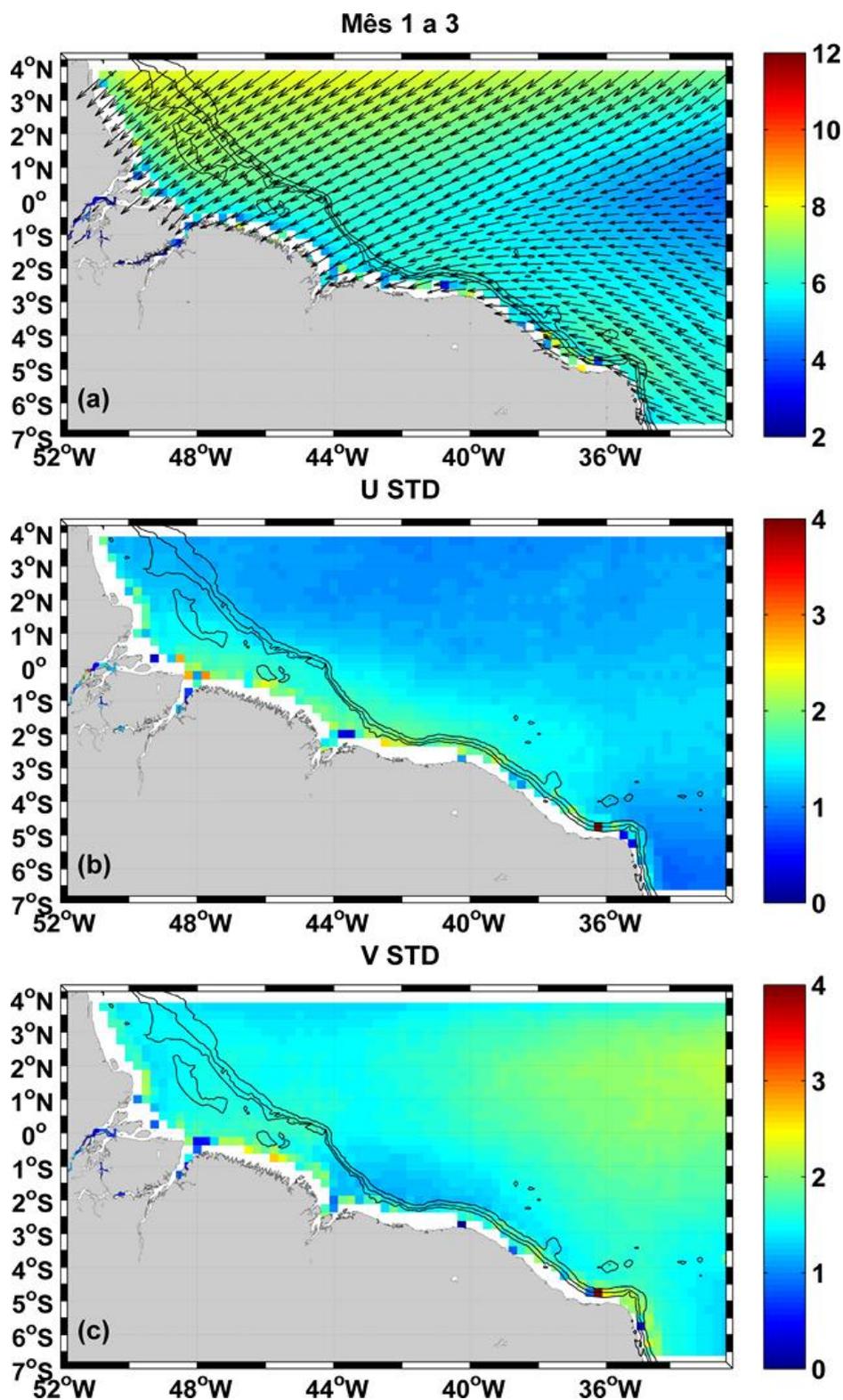
Fonte: o autor. (a) mostra as médias de velocidade e direção dos ventos, (b) o desvio padrão na componente U e (c) o desvio padrão na componente V. As setas na figura das médias demonstram a direção dos ventos, enquanto as cores de fundo a intensidade.

A análise da variabilidade sazonal (FIGURAS 8, 9, 10, 11) mostrou que os ventos são mais intensos (9-10 m/s) ao longo da plataforma continental do Ceará e Rio Grande do Norte nos meses de julho, agosto e setembro, com predominância na direção de sudeste. Ao longo do ano eles vão perdendo gradativamente sua intensidade e sua direção tende a ser de leste, com as menores intensidades (4-6 m/s) acontecendo nos meses de abril, maio e junho.

Os meses que apresentam menores desvios padrão (0-1 m/s), em toda a região, na componente V são julho, agosto e setembro, e os maiores (2-4 m/s), com máximo acima do Equador são nos meses de abril, maio e junho. Isto ocorre porque essa é a época de transição da ZCIT, onde a componente meridional V possui uma maior variabilidade do que a componente zonal U (RANA *et al.*, 2011).

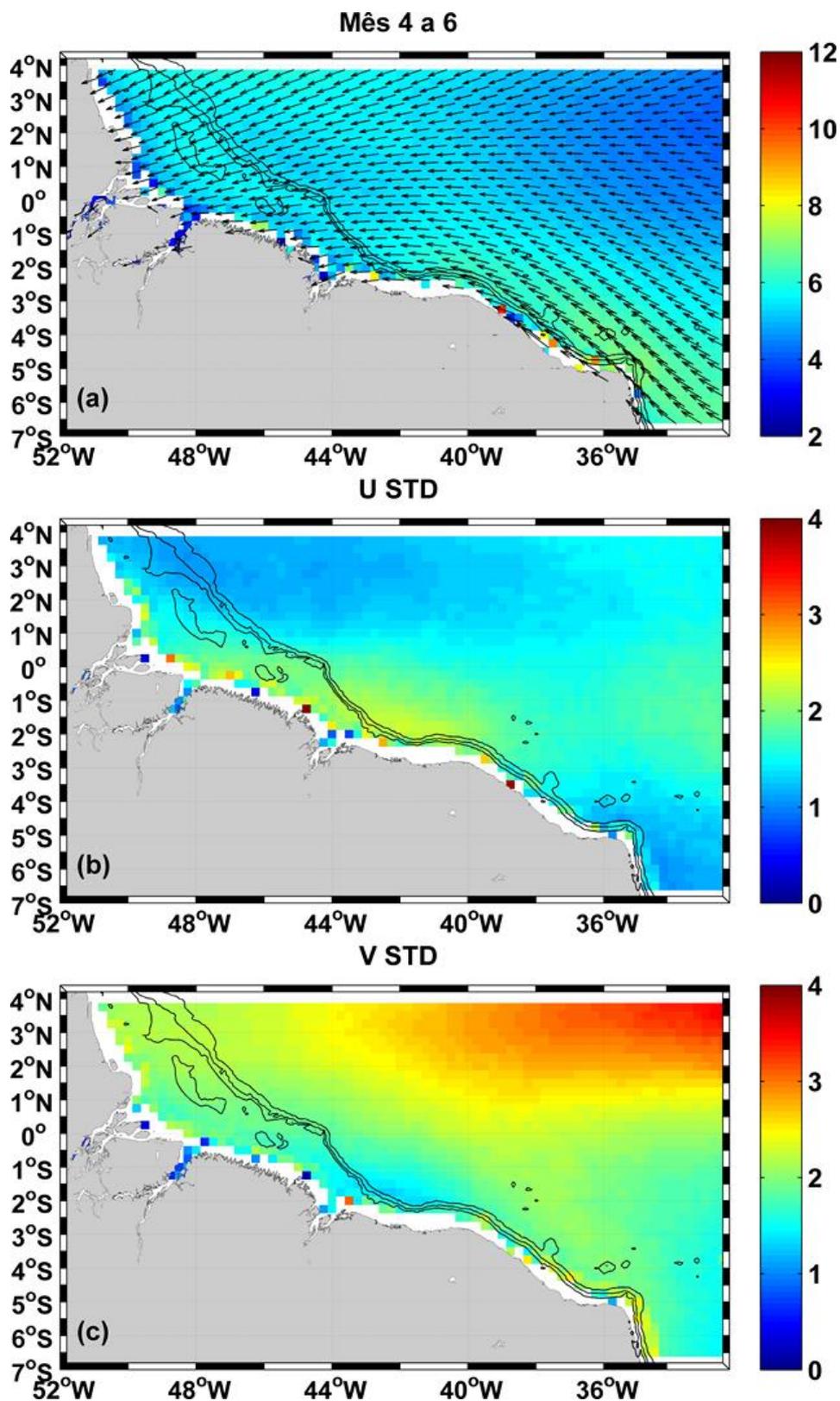
De acordo com Philander *et al.* (1996) isto ocorre devido ao deslocamento da ZCIT. Nos meses de julho, agosto e setembro a ZCIT está posicionada mais ao norte (inverno no hemisfério sul), fazendo com que a zona de confluência dos alísios esteja mais ao norte, ocasionando um fluxo de ventos com maior intensidade para noroeste no ASE. Os resultados encontrados corroboram os obtidos por Oliveira e Costa (2011), que utilizou o Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) para simular as condições de vento sobre o nordeste do brasileiro, em dois períodos distintos: julho a junho de 1973/74 e julho a junho de 1982/83.

Figura 8 – Média e desvios-padrão sazonais dos meses de janeiro, fevereiro e março de todos os anos (m/s).



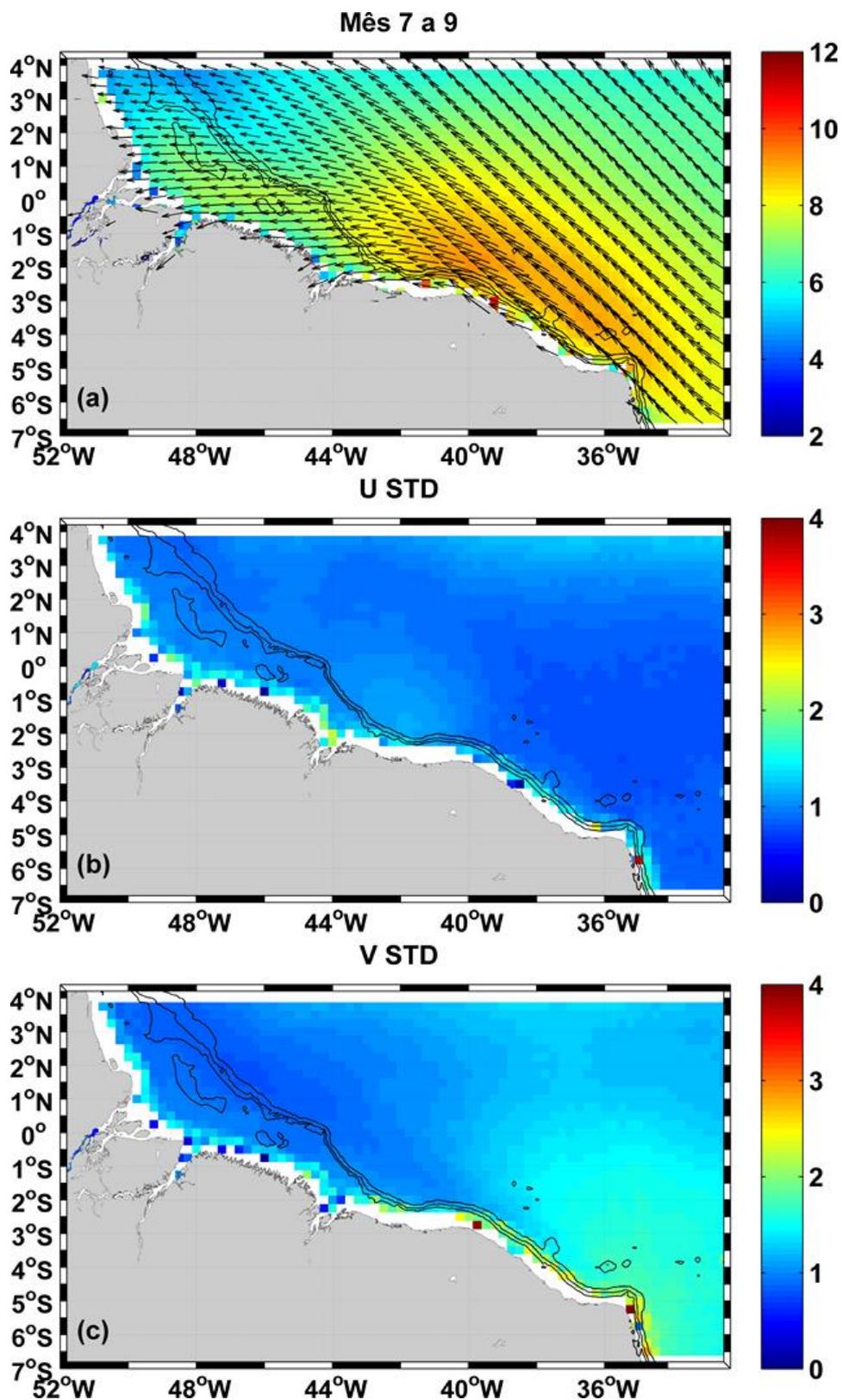
Fonte: o autor. (a) mostra as médias de velocidade e direção dos ventos, (b) o desvio padrão na componente U e (c) o desvio padrão na componente V. As setas na figura das médias demonstram a direção dos ventos, enquanto as cores de fundo a intensidade.

Figura 9 – Similar a figura 8, porém para os meses de abril, maio e junho.



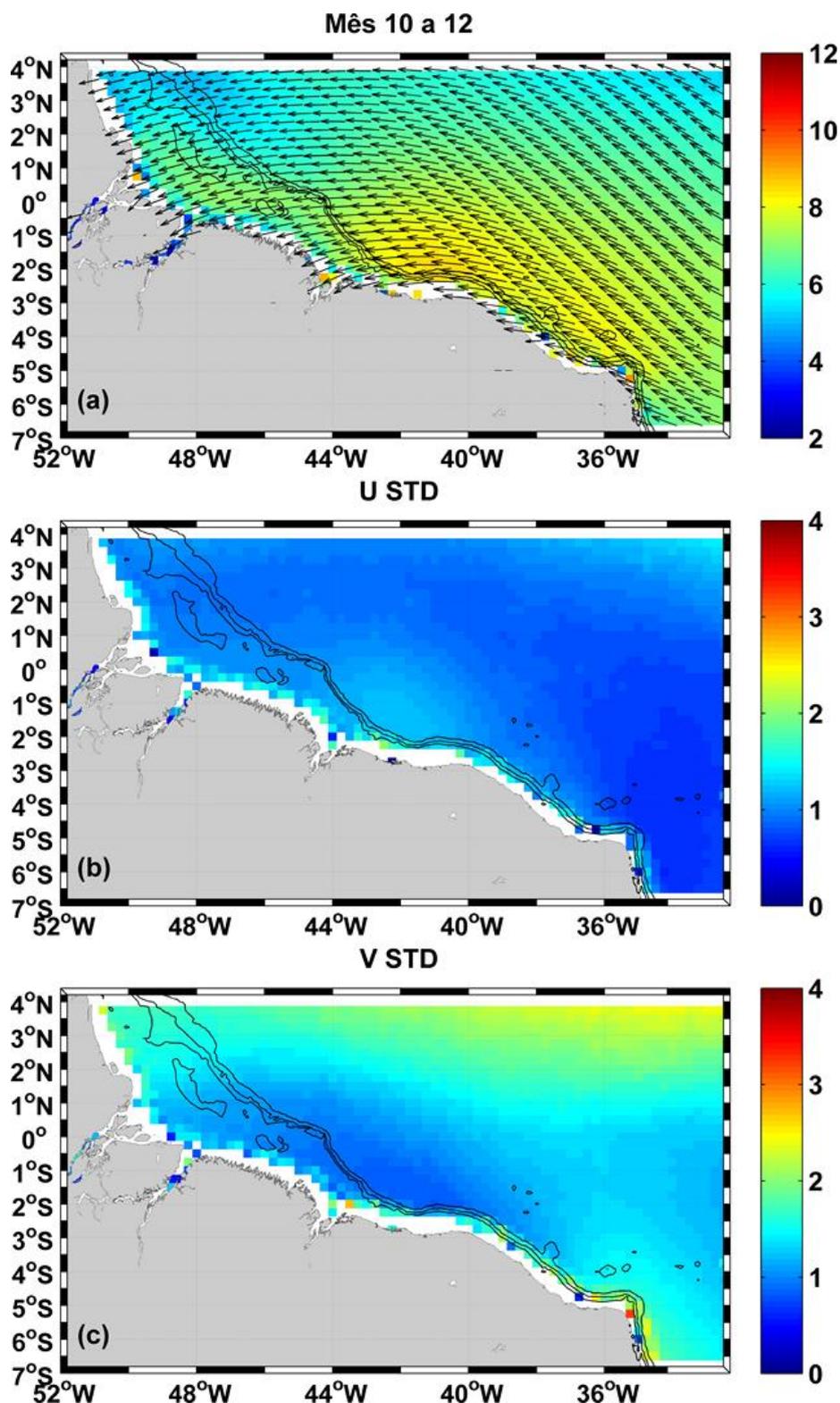
Fonte: o autor. (a) mostra as médias de velocidade e direção dos ventos, (b) o desvio padrão na componente U e (c) o desvio padrão na componente V. As setas na figura das médias demonstram a direção dos ventos, enquanto as cores de fundo a intensidade.

Figura 10 – Similar a figura 9, porém para os meses de julho, agosto e setembro.



Fonte: o autor. (a) mostra as médias de velocidade e direção dos ventos, (b) o desvio padrão na componente U e (c) o desvio padrão na componente V. As setas na figura das médias demonstram a direção dos ventos, enquanto as cores de fundo a intensidade.

Figura 11 – Similar a figura 10, porém para os meses de outubro, novembro e dezembro.



Fonte: o autor. (a) mostra as médias de velocidade e direção dos ventos, (b) o desvio padrão na componente U e (c) o desvio padrão na componente V. As setas na figura das médias demonstram a direção dos ventos, enquanto as cores de fundo a intensidade.

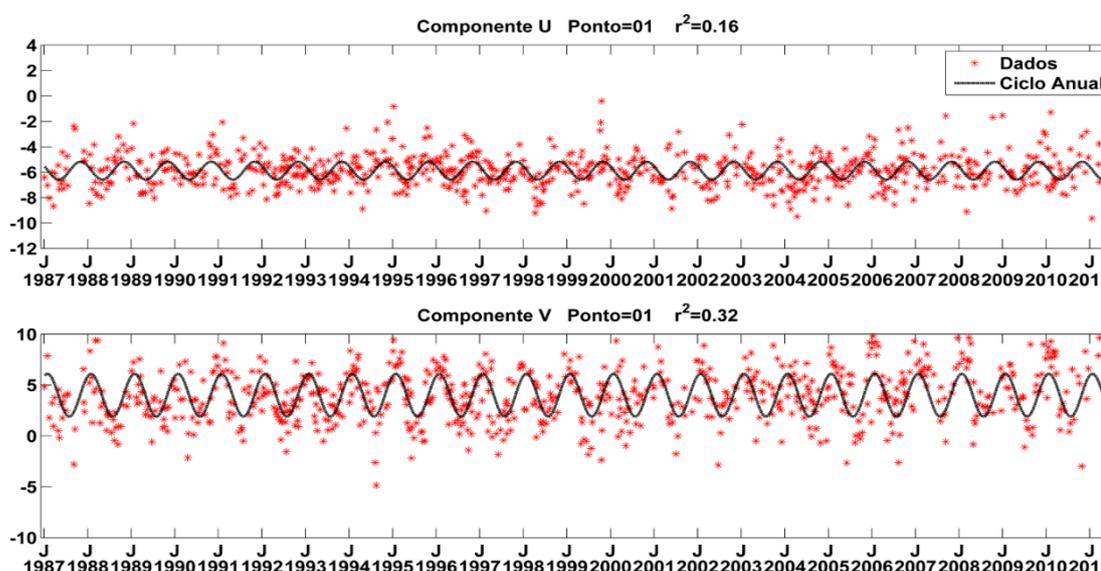
### 3.2 Caracterização do ciclo anual

Nas figuras 12 a 20 são apresentadas as séries temporais das duas componentes U e V dos ventos do CCMP (asteriscos vermelhos) e o ciclo anual ajustado, através de análise harmônica (curva preta), para os 9 pontos analisados. Os valores de  $R^2$  entre os dados e o ciclo anual são apresentados em cada figura e definem 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 aos dados na componente meridional, o que é corroborado quando se comparam os valores de  $R^2$  nestas duas componentes.

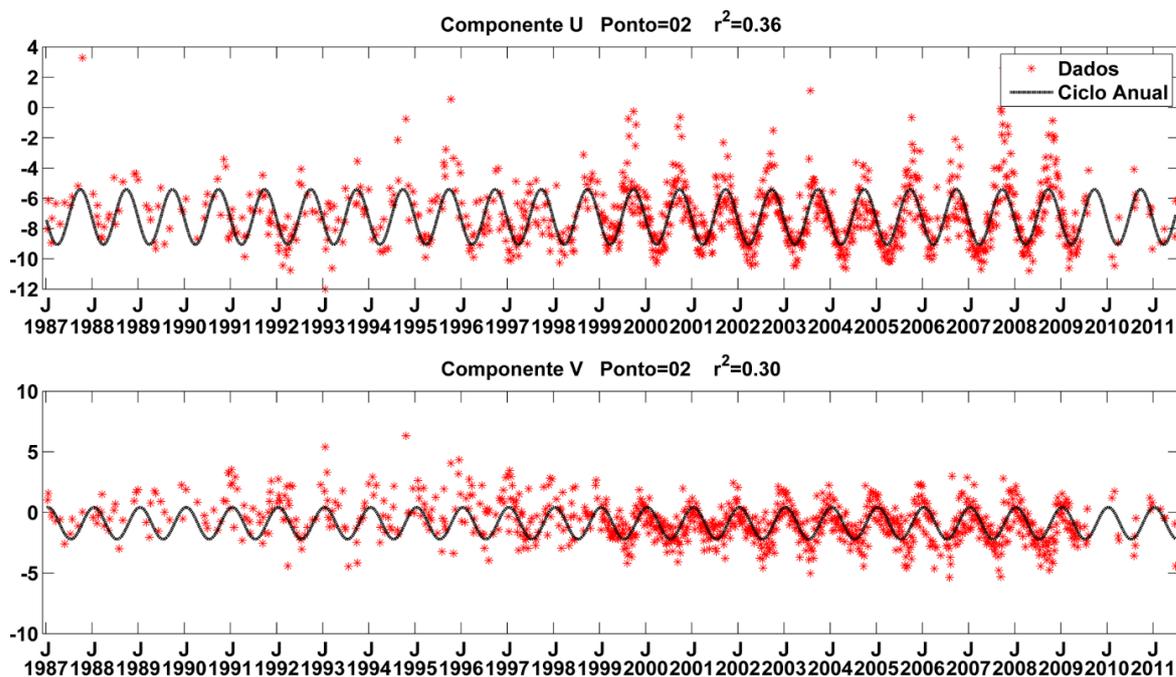
Os pontos com os maiores coeficientes de determinação na componente meridional (V) estão localizados próximos a região do Equador (pontos 6 a 9) e no ponto 5, localizado na porção central da área de estudo. Estes pontos apresentam valores de  $R^2$  próximos ou maiores que 0.4, porém esta mesma região apresenta os menores valores de  $R^2$  para a componente zonal (U) próximos a zero, mostrando que o ciclo anual não consegue explicar a variabilidade da componente zonal do vento nesta região.

Figura 12 - Intensidades (pontos vermelhos) das componentes zonal e meridional e ciclo anual ajustado (linha preta) para o ponto 1.



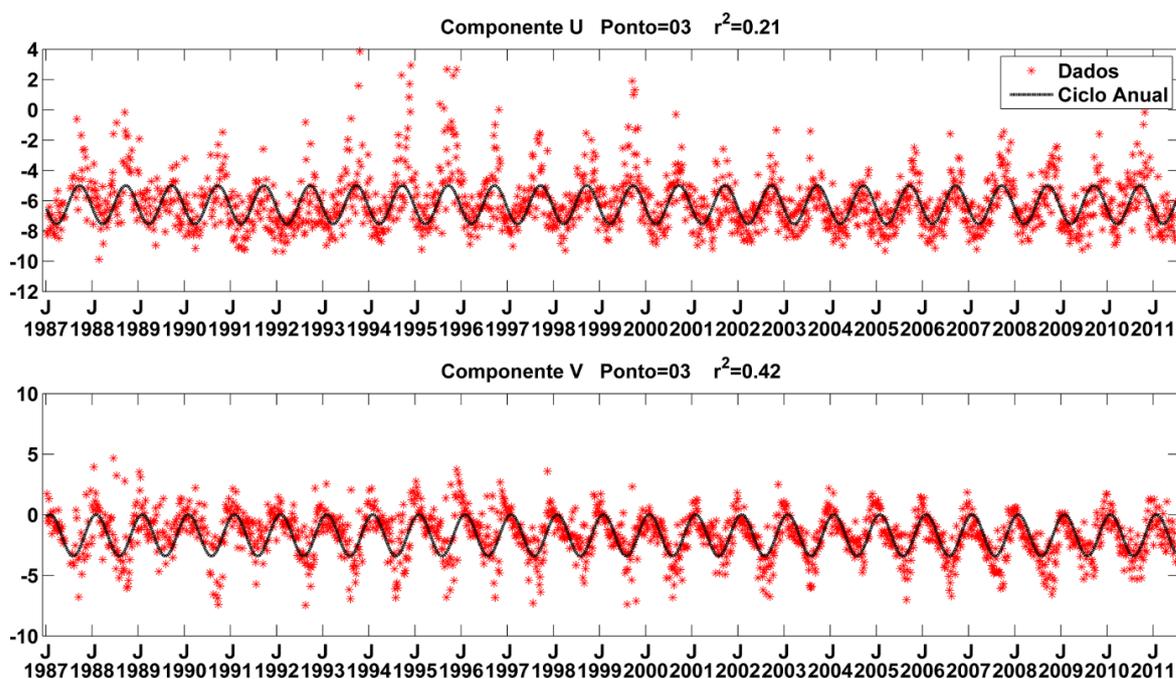
Fonte: o autor. Painel superior: componente U; Painel inferior: componente V. Os valores de  $R^2$  entre o ciclo anual e os dados são apresentados em cada figura.

Figura 13 - Similar a figura 12, porém para o ponto 2.



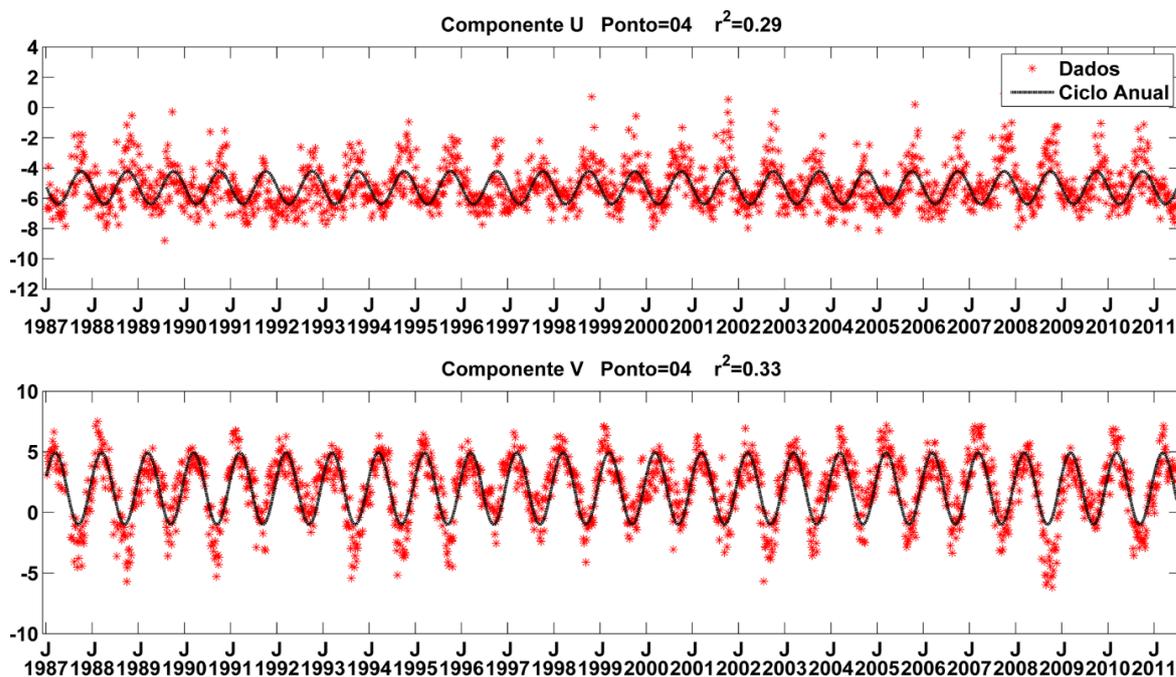
Fonte: o autor. Painel superior: componente U; Painel inferior: componente V. Os valores de  $R^2$  entre o ciclo anual e os dados são apresentados em cada figura.

Figura 14 - Similar a figura 12, porém para o ponto 3.



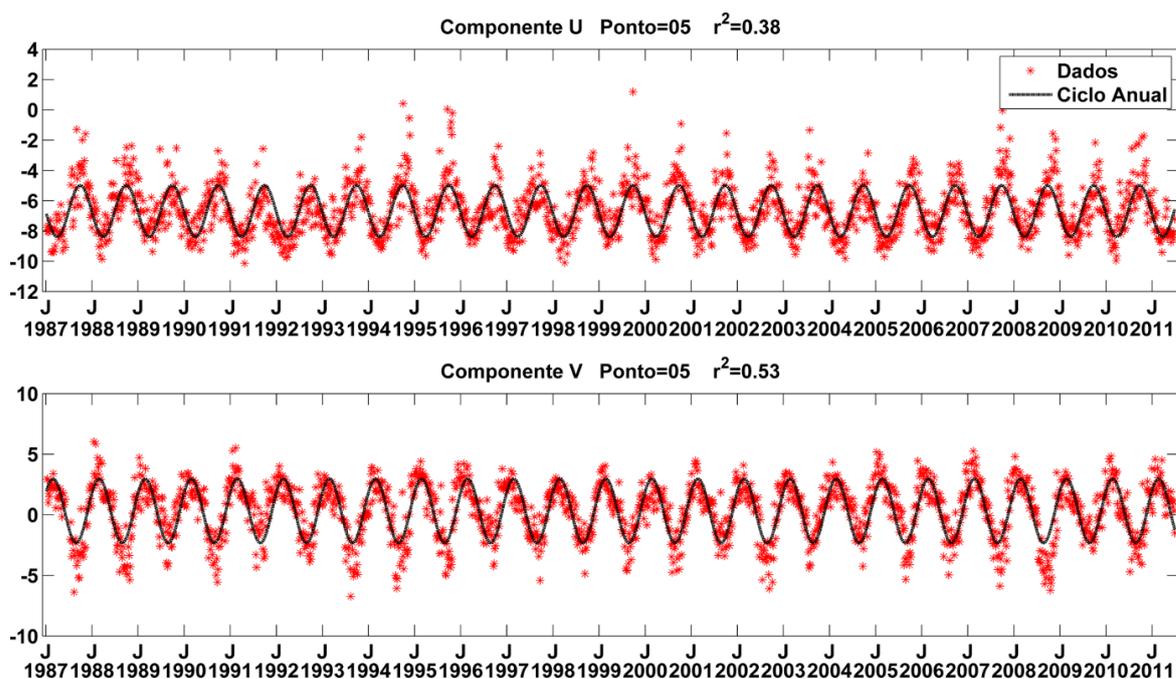
Fonte: o autor. Painel superior: componente U; Painel inferior: componente V. Os valores de  $R^2$  entre o ciclo anual e os dados são apresentados em cada figura.

Figura 15 - Similar a figura 12, porém para o ponto 4.



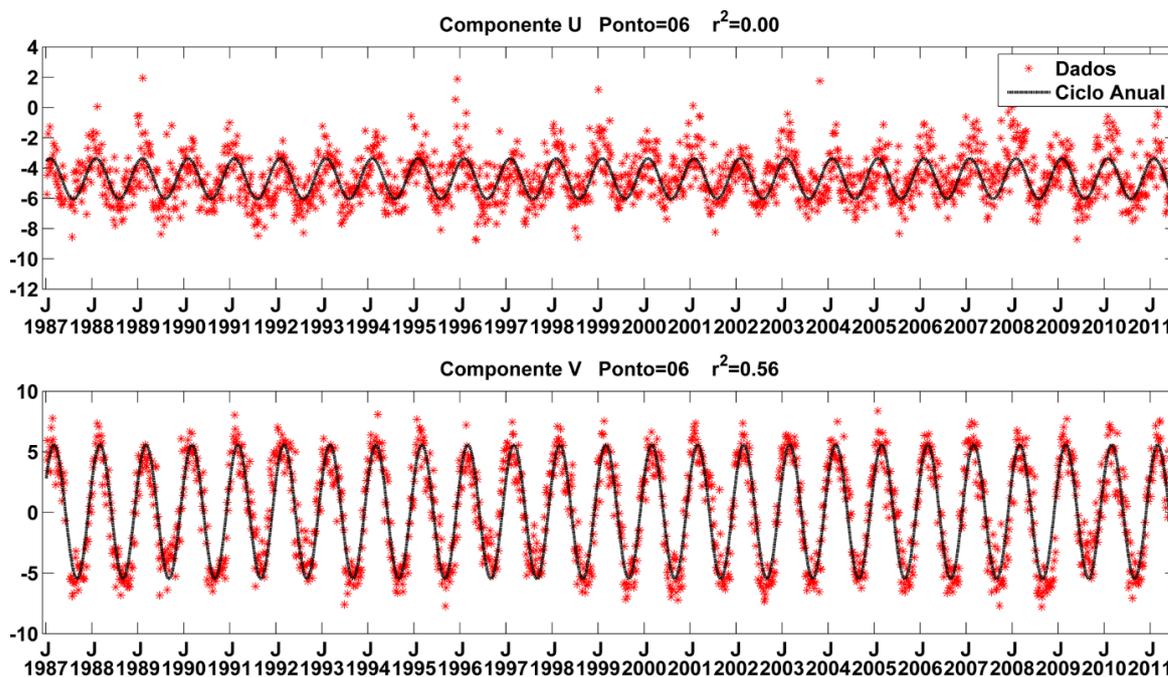
Fonte: o autor. Painel superior: componente U; Painel inferior: componente V. Os valores de  $R^2$  entre o ciclo anual e os dados são apresentados em cada figura.

Figura 16 - Similar a figura 12, porém para o ponto 5.



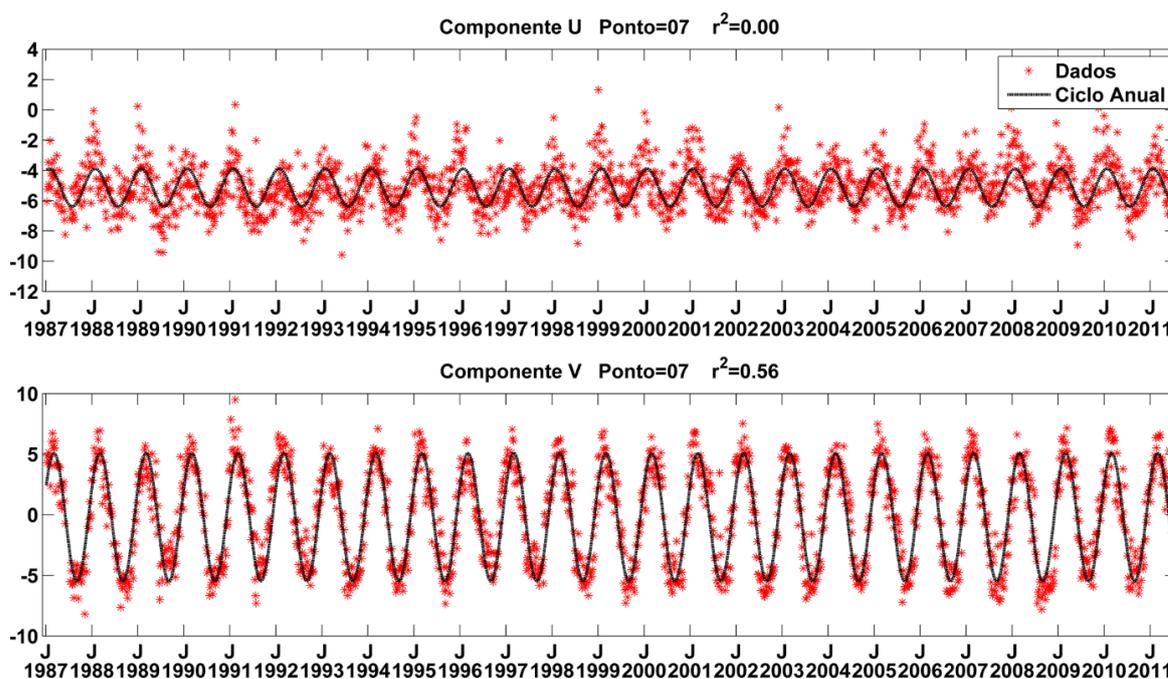
Fonte: o autor. Painel superior: componente U; Painel inferior: componente V. Os valores de  $R^2$  entre o ciclo anual e os dados são apresentados em cada figura.

Figura 17 - Similar a figura 12, porém para o ponto 6.



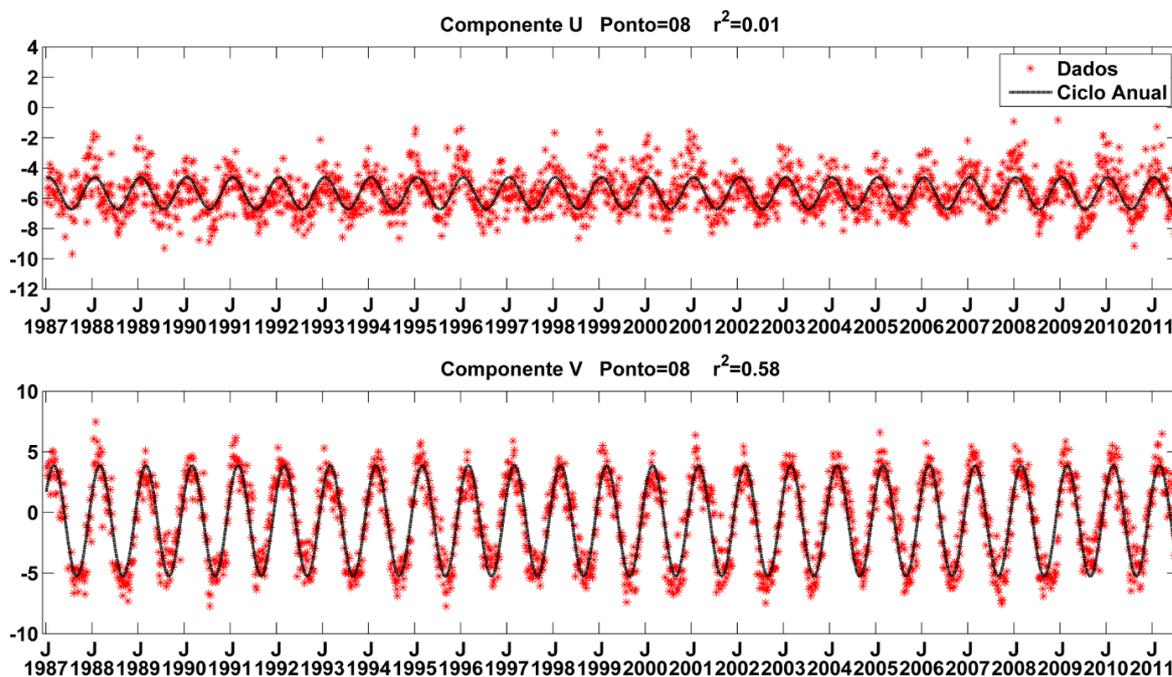
Fonte: o autor. Painel superior: componente U; Painel inferior: componente V. Os valores de  $R^2$  entre o ciclo anual e os dados são apresentados em cada figura.

Figura 18 - Similar a figura 12, porém para o ponto 7.



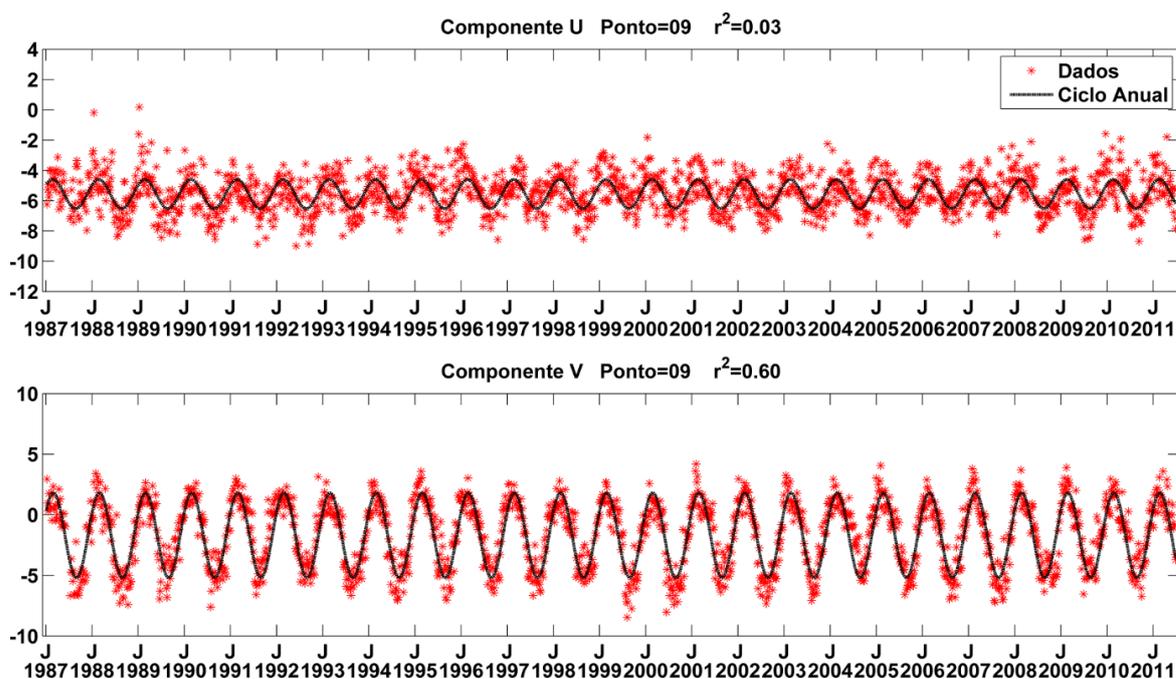
Fonte: o autor. Painel superior: componente U; Painel inferior: componente V. Os valores de  $R^2$  entre o ciclo anual e os dados são apresentados em cada figura.

Figura 19 - Similar a figura 12, porém para o ponto 8.



Fonte: o autor. Painel superior: componente U; Painel inferior: componente V. Os valores de  $R^2$  entre o ciclo anual e os dados são apresentados em cada figura.

Figura 20 - Similar a figura 12, porém para o ponto 9.



Fonte: o autor. Painel superior: componente U; Painel inferior: componente V. Os valores de  $R^2$  entre o ciclo anual e os dados são apresentados em cada figura.

Pelos resultados percebe-se ainda que a amplitude do ciclo anual aumenta em direção ao Equador em ambas as componentes, apresentando valores próximos a 2 e 2.5 m/s na região costeira (pontos 1 e 3) e 3 e 5 m/s na região equatorial (pontos 6-9) para as componentes zonal e meridional respectivamente.

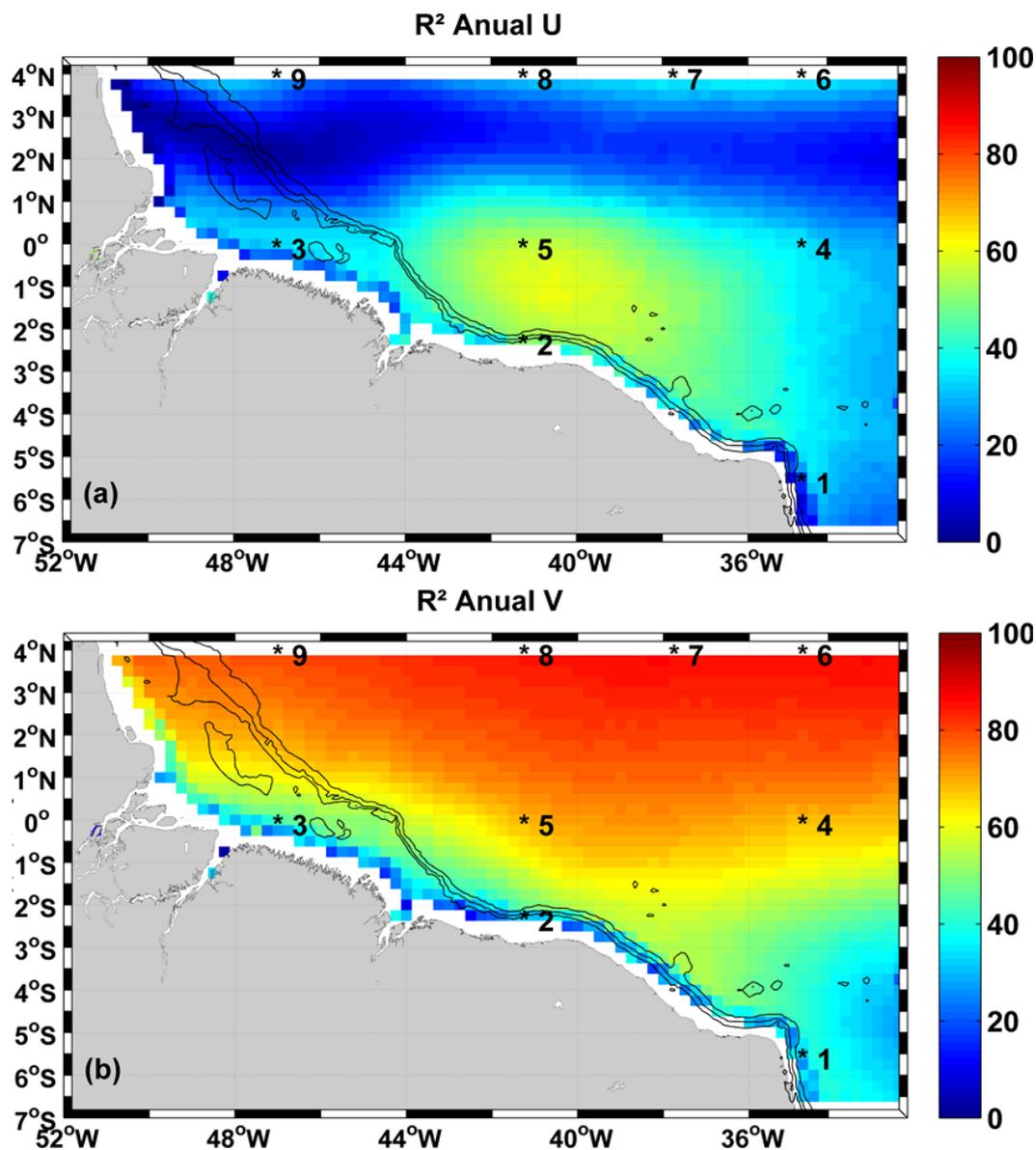
As velocidades máximas e mínimas em determinados anos são muito divergentes à curva ajustada para o ciclo anual, evidenciando que existe uma variabilidade intra-anual evidente no padrão de ventos.

No mapa dos coeficientes de correlação (FIGURA 21) entre os dados zonais dos ventos e o ciclo anual sugerido observa-se que na maior parte da região que este ciclo não consegue representar a variabilidade temporal dos dados (valores de  $R^2 < 30\%$ ). Porém a região central do mapa apresenta valores próximos que 60% indicando que esta região apresenta variabilidade anual. A razão para esta diferença não é clara.

Na componente V os valores de  $R^2$  são em geral maiores que 40 % chegando a região do Equador, evidenciando que o ciclo anual explica a maior parte da variabilidade desta componente.

A razão para esta diferença significativa nos valores de  $R^2$  nas componentes U e V é explicada, pois a maior parte da variabilidade temporal da componente V é controlada pelo deslocamento da ZCIT, que por si é forçado pela variações sazonais da insolação nos hemisférios. Esta variação sazonal possui um ciclo anual bem característico. Por outro lado a variabilidade da componente U é gerado por diferenças nos gradientes zonais de pressão/ aquecimento do Atlântico. Estes gradientes são controlados pela circulação oceânica que não possui um ciclo anual característico.

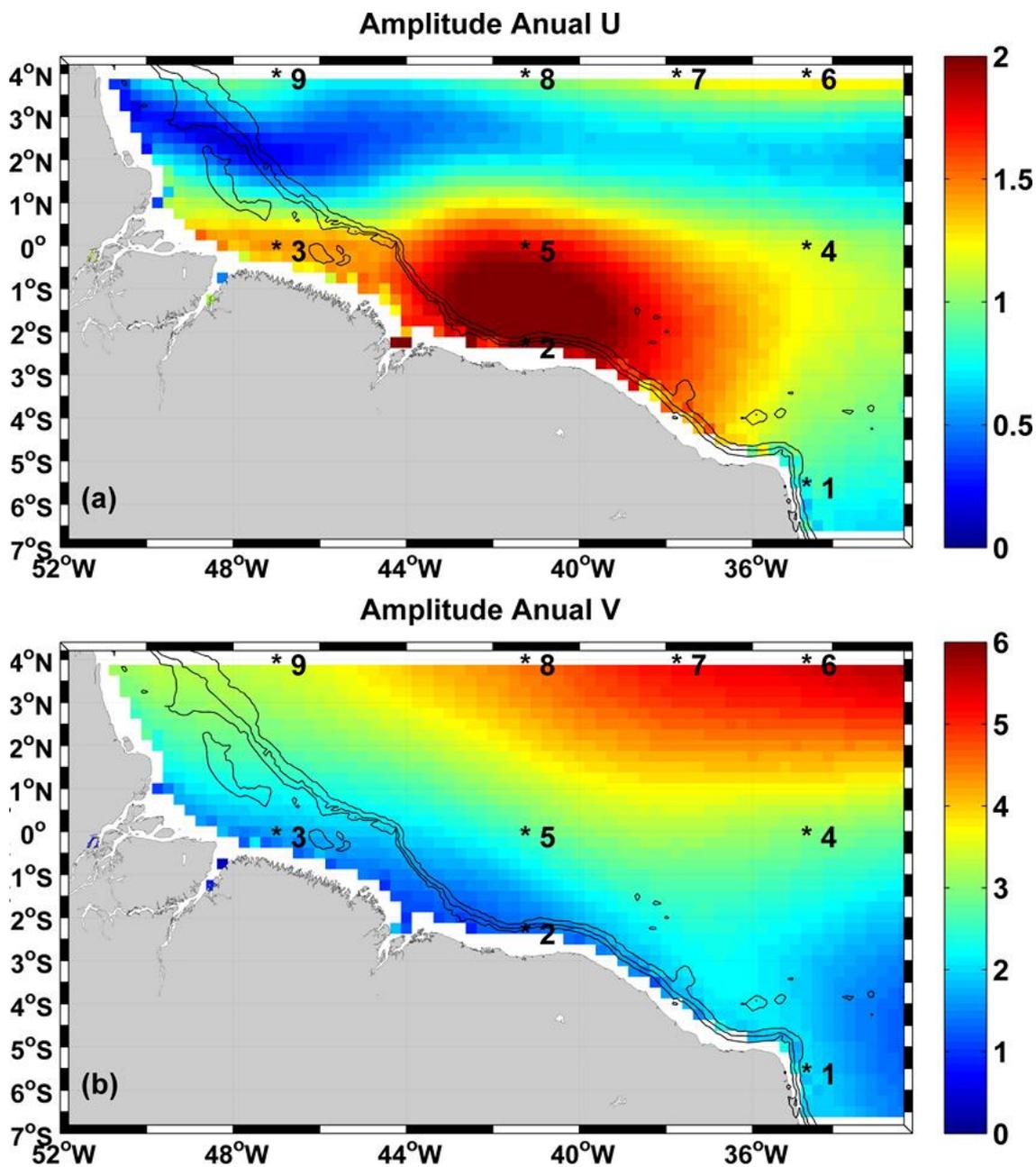
Figura 21 - Coeficiente de determinação entre os dados CCMP e o ciclo anual (%)



Fonte: o autor. (a) Componente U e (b) componente V. Os números representam os pontos escolhidos para extração das séries temporais

Na figura 22 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, porém na região central (ex. próximo ao ponto 5) existem valores relativamente altos próximos a 2 m/s. Estes valores baixos refletem a não adequação do modelo anual aos dados que é demonstrada pelos baixos valores de  $R^2$ .

Figura 22 - Amplitude do ciclo anual (m/s).



Fonte: o autor. (a) Componente U e (b) componente V. Os números representam os pontos escolhidos para extração das séries temporais

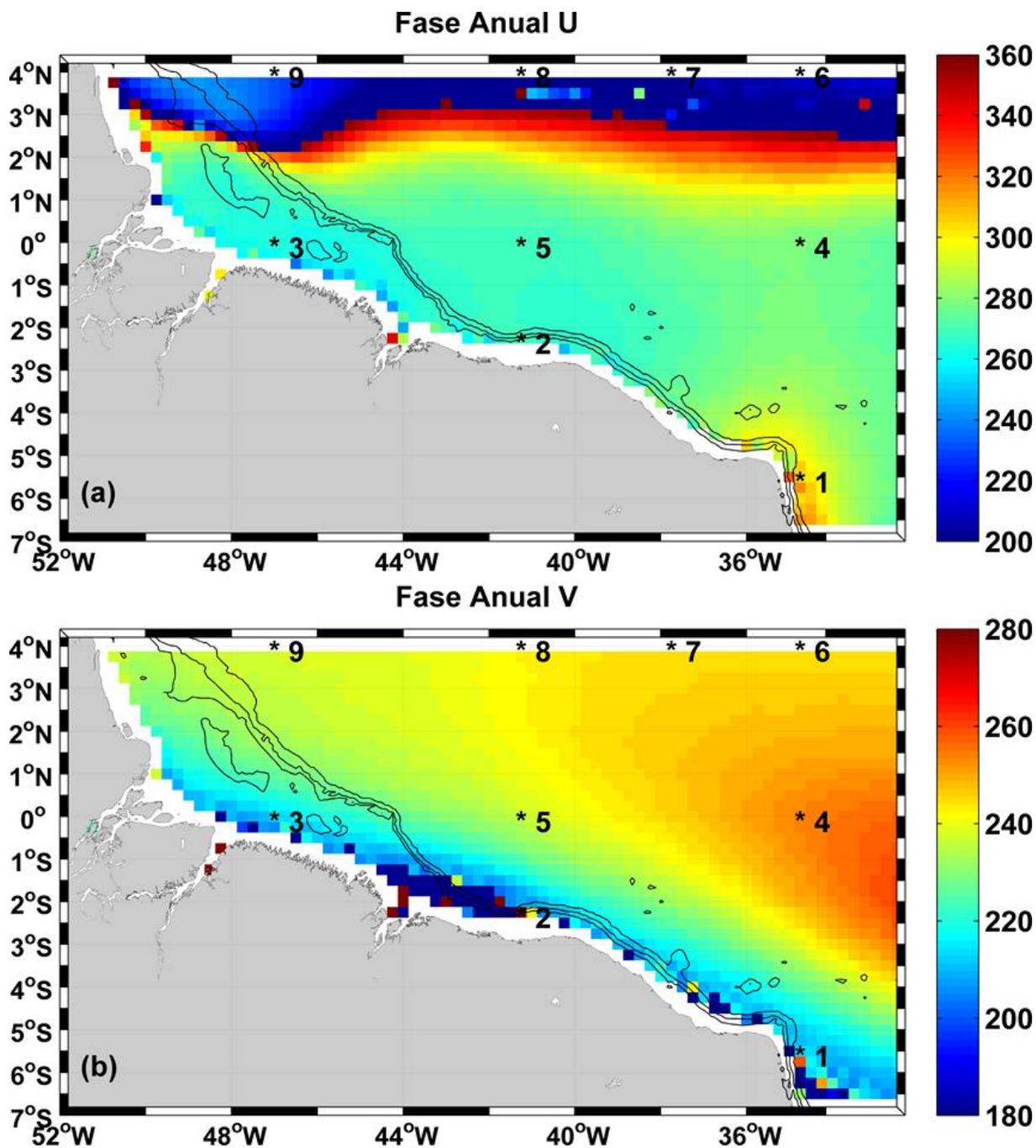
Diferente de U, na componente V foram observados valores mais significativos nos pontos 6 a 9, com amplitudes máximas de 6 m/s, na porção leste acima do Equador e amplitudes mínimas de 0-1 m/s nas plataformas continentais adjacentes aos estados do Maranhão, Piauí e Ceará. Isto ocorre porque a região

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.

Ao comparar o mapa de amplitudes do ciclo anual com o mapa de desvios padrão (FIGURA 5), percebem-se padrões similares, principalmente na região acima do Equador, onde se observou os maiores valores de desvio padrão e de amplitude do ciclo anual, para a componente V. Essa similaridade reforça os resultados do coeficiente de determinação calculados e a ideia de que o ciclo anual é o principal responsável pela variabilidade do padrão da componente V dos ventos na região. Servain, Picaud e Busalacchi (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.

Um mapa de fases associado ao ciclo anual, com referência ao dia 1 de janeiro, é apresentado na figura 23. Os valores máximos de velocidade dos ventos zonais e meridionais ocorrem por volta de 240 a 270 dias na maior parte da região, estes valores correspondem aos meses de agosto e setembro que é o mês que a ZCIT está mais deslocada para o norte e a região apresenta os maiores valores médios climatológicos de intensidade dos ventos (Figura 9).

Figura 23 - Fase do ciclo anual (dias)



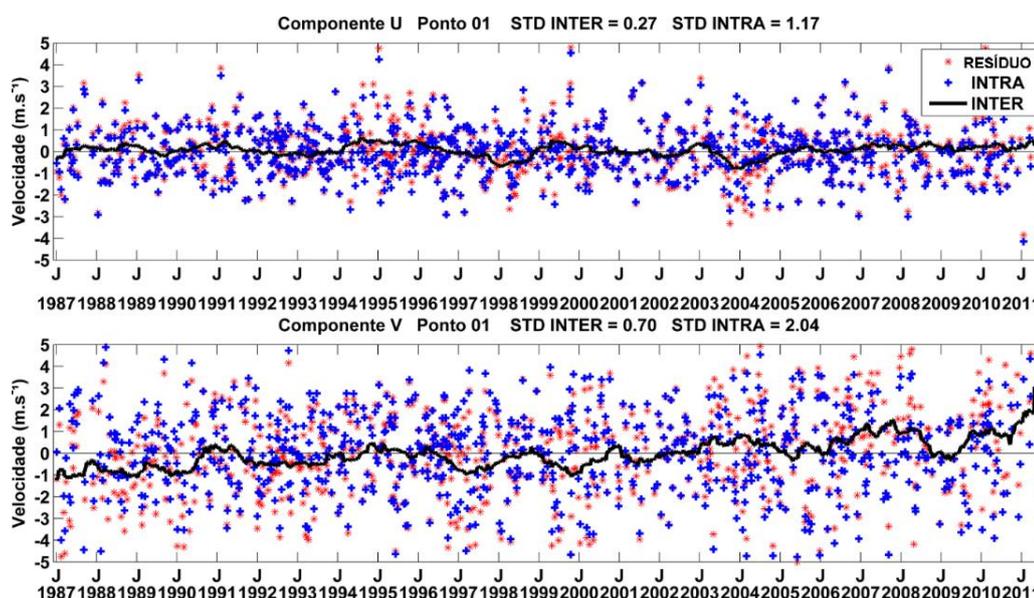
Fonte: o autor. a) Componente U e (b) componente V.

As fases próximas a plataforma continental da componente V e os valores da componente U acima de 2° N devem ser desprezados por terem um baixo valor de  $R^2$  e não terem um significado físico plausível.

### 3.3 Caracterização da variabilidade inter-anual e intra-anual

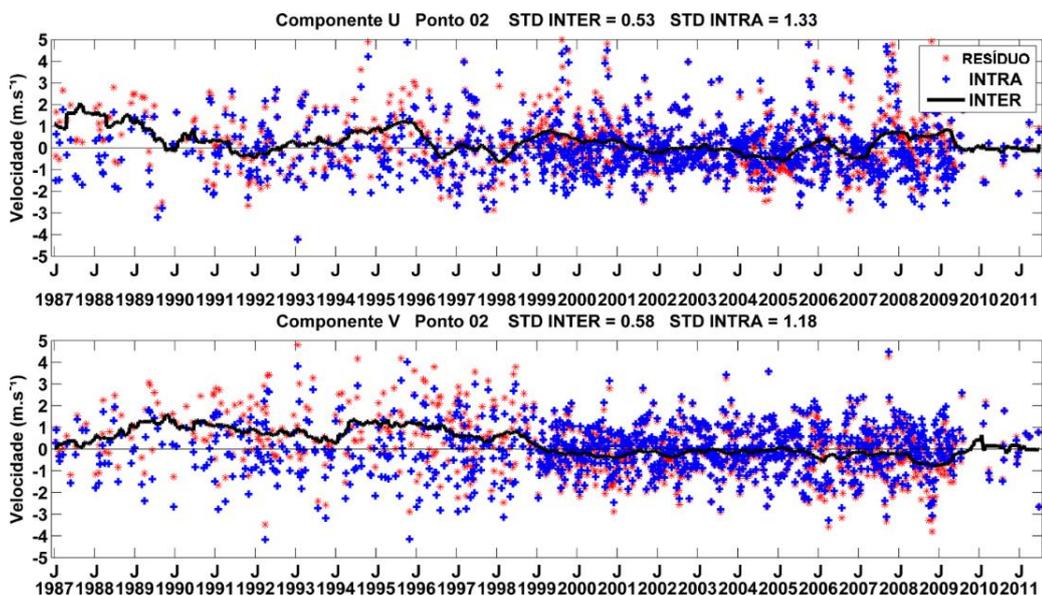
As figuras 24 a 32 exibem séries temporais da variabilidade, não determinística (resíduos), para os 9 pontos analisados. O ciclo determinístico (ciclo anual) foi subtraído dos dados originais, resultando num resíduo (R1), evidenciado por asteriscos vermelhos. A curva preta representa a variabilidade interanual dos ventos, calculada a partir do filtro de médias móveis de 365 dias dos dados residuais de R1. Os pontos azuis são a variabilidade intra-anual, correspondendo ao resíduo R1 menos a variabilidade inter-anual.

Figura 24 – Variabilidade inter-anual e intra-anual no ponto 1.



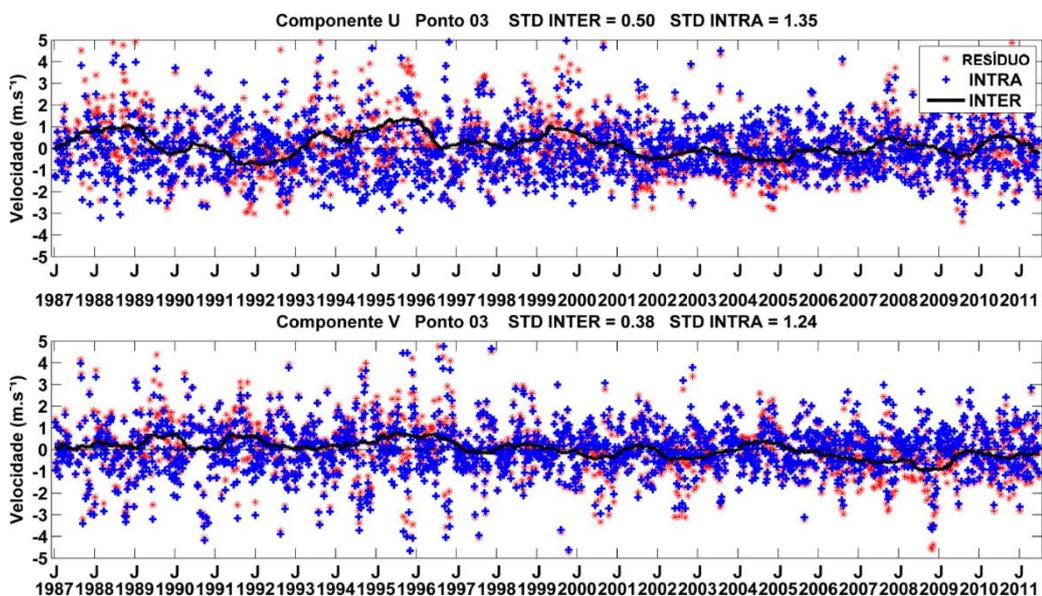
Fonte: o autor. Painel superior: componente U, com desvio padrão inter e intra-anual; Painel inferior: componente V, com desvio padrão inter e intra-anual. Os asteriscos vermelhos representam o R1. A curva preta representa a variabilidade interanual dos ventos, os pontos azuis são a variabilidade intra-anual.

Figura 25 – Similar a figura 24, porém para o ponto 2.



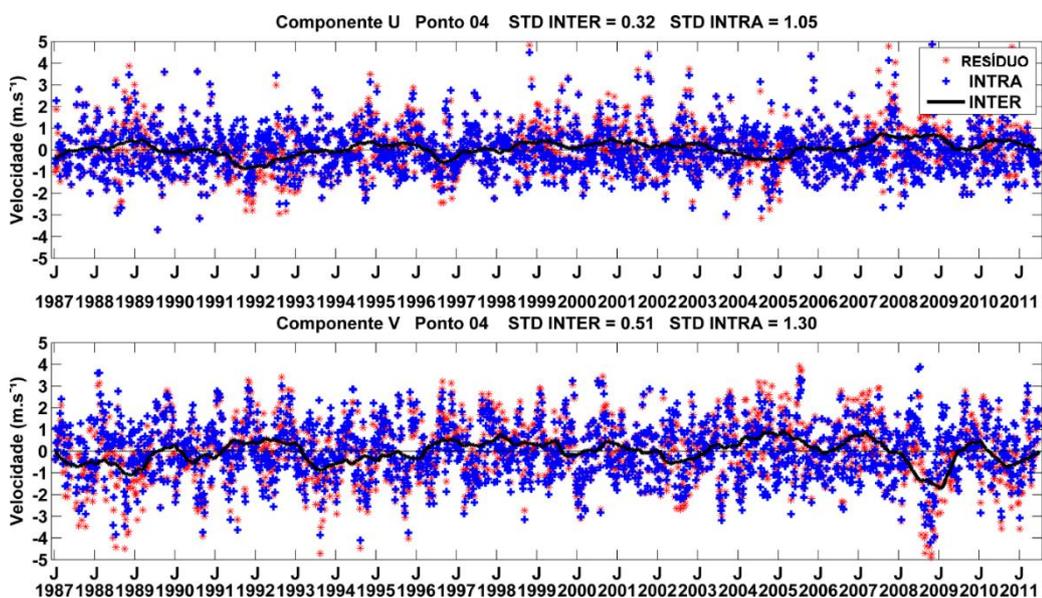
Fonte: o autor. Painel superior: componente U, com desvio padrão inter e intra-anual; Painel inferior: componente V, com desvio padrão inter e intra-anual. Os asteriscos vermelhos representam o R1. A curva preta representa a variabilidade interanual dos ventos, os pontos azuis são a variabilidade intra-anual.

Figura 26 – Similar a figura 24, porém para o ponto 3.



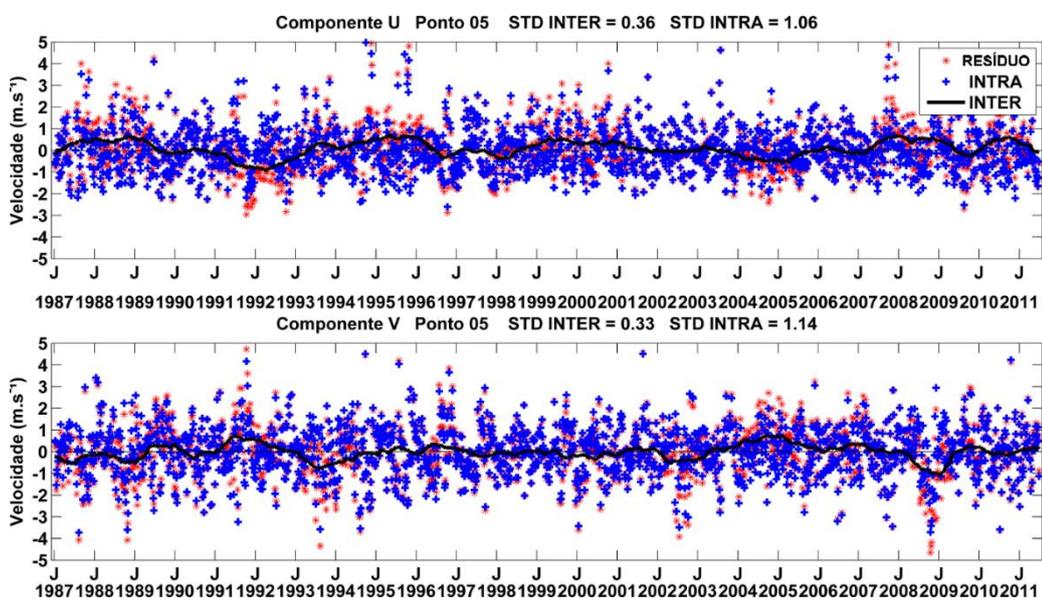
Fonte: o autor. Painel superior: componente U, com desvio padrão inter e intra-anual; Painel inferior: componente V, com desvio padrão inter e intra-anual. Os asteriscos vermelhos representam o R1. A curva preta representa a variabilidade interanual dos ventos, os pontos azuis são a variabilidade intra-anual.

Figura 27 – Similar a figura 24, porém para o ponto 4.



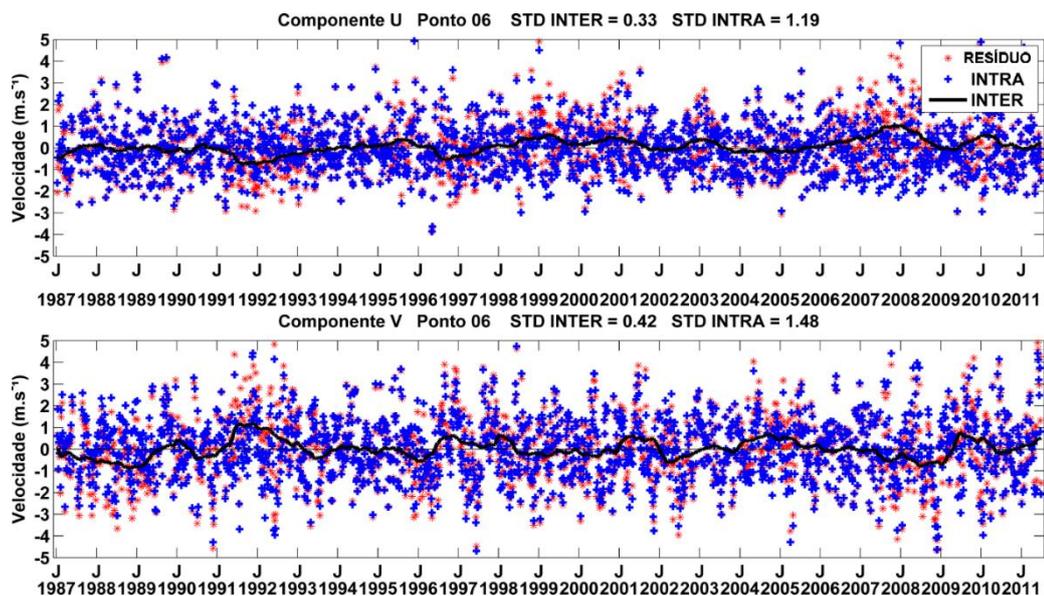
Fonte: o autor. Painel superior: componente U, com desvio padrão inter e intra-anual; Painel inferior: componente V, com desvio padrão inter e intra-anual. Os asteriscos vermelhos representam o R1. A curva preta representa a variabilidade interanual dos ventos, os pontos azuis são a variabilidade intra-anual.

Figura 28 – Similar a figura 24, porém para o ponto 5.



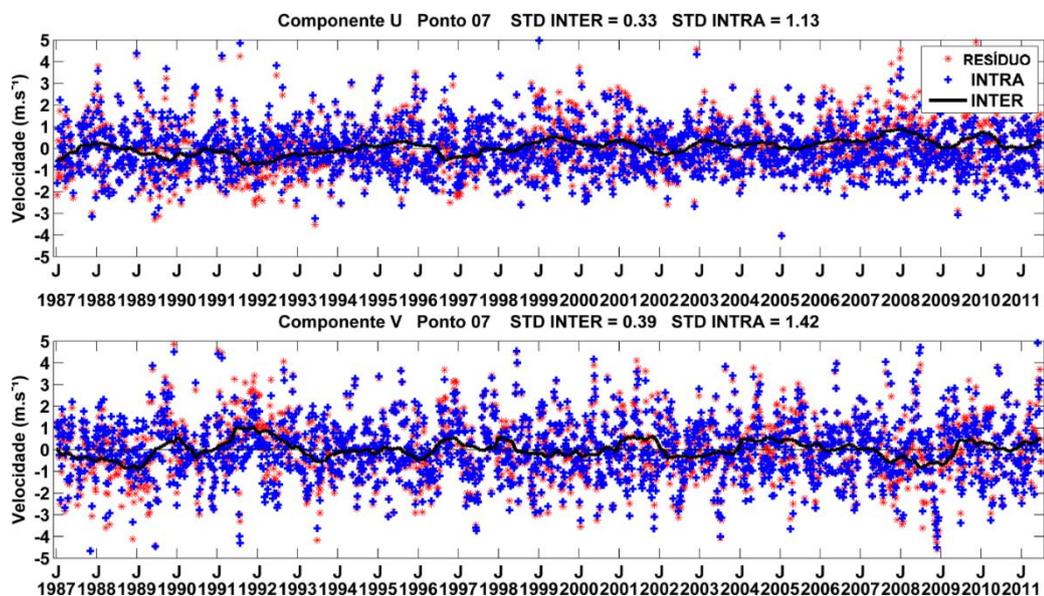
Fonte: o autor. Painel superior: componente U, com desvio padrão inter e intra-anual; Painel inferior: componente V, com desvio padrão inter e intra-anual. Os asteriscos vermelhos representam o R1. A curva preta representa a variabilidade interanual dos ventos, os pontos azuis são a variabilidade intra-anual.

Figura 29 – Similar a figura 24, porém para o ponto 6.



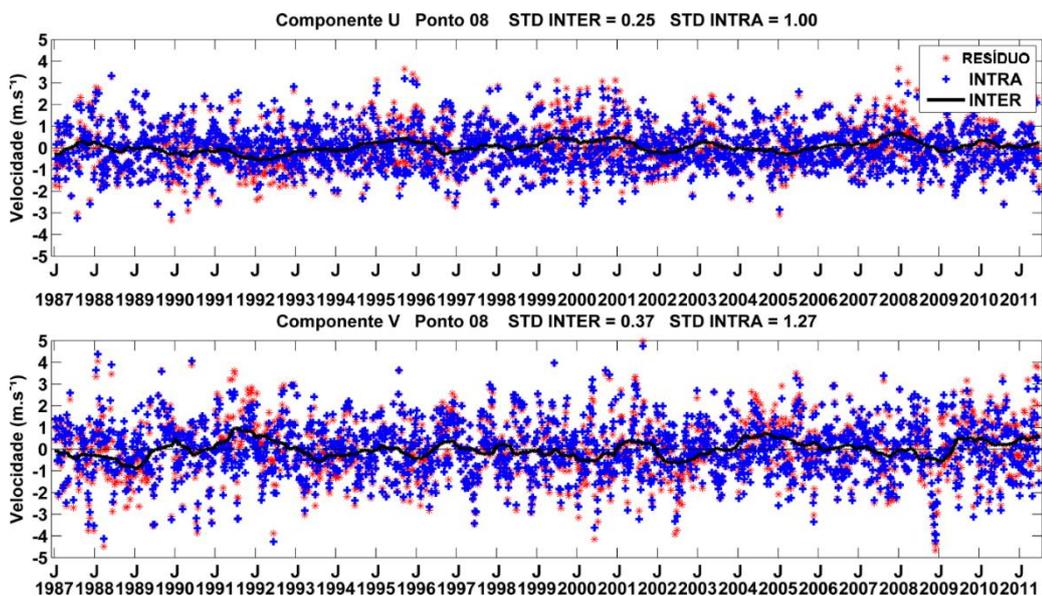
Fonte: o autor. Painel superior: componente U, com desvio padrão inter e intra-anual; Painel inferior: componente V, com desvio padrão inter e intra-anual. Os asteriscos vermelhos representam o R1. A curva preta representa a variabilidade interanual dos ventos, os pontos azuis são a variabilidade intra-anual.

Figura 30 – Similar a figura 24, porém para o ponto 7.



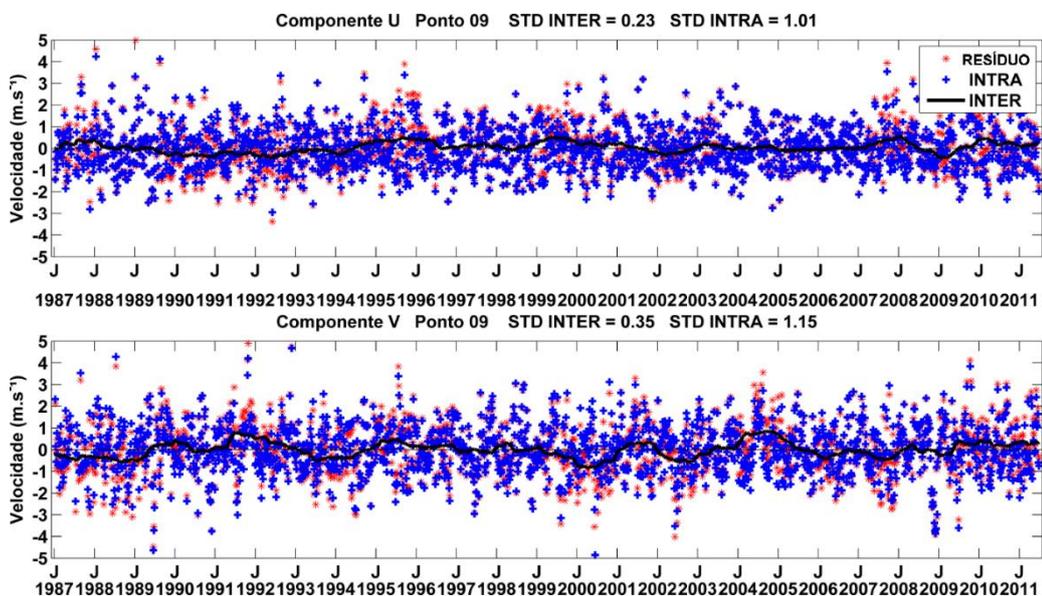
Fonte: o autor. Painel superior: componente U, com desvio padrão inter e intra-anual; Painel inferior: componente V, com desvio padrão inter e intra-anual. Os asteriscos vermelhos representam o R1. A curva preta representa a variabilidade interanual dos ventos, os pontos azuis são a variabilidade intra-anual.

Figura 31 – Similar a figura 24, porém para o ponto 8.



Fonte: o autor. Painel superior: componente U, com desvio padrão inter e intra-anual; Painel inferior: componente V, com desvio padrão inter e intra-anual. Os asteriscos vermelhos representam o R1. A curva preta representa a variabilidade interanual dos ventos, os pontos azuis são a variabilidade intra-anual.

Figura 32 – Similar a figura 24, porém para o ponto 9.



Fonte: o autor. Painel superior: componente U, com desvio padrão inter e intra-anual; Painel inferior: componente V, com desvio padrão inter e intra-anual. Os asteriscos vermelhos representam o R1. A curva preta representa a variabilidade interanual dos ventos, os pontos azuis são a variabilidade intra-anual.

A variabilidade intra-anual é visivelmente maior, em ambas as componentes, do que a variabilidade inter-anual em todo o período analisado. Nota-se que o sinal intra-anual é muito similar aos valores de  $R^2$ , principalmente na componente zonal, indicando que a variabilidade intra-anual explica a maior parte da variabilidade temporal desta componente dos ventos.

Em geral a variabilidade intra-anual cresce, na componente meridional, seguindo um padrão de oeste para leste, com valor máximo de 2,04 m/s no ponto 1 e valores mínimos de 1,2 e 1,15 m/s nos pontos 3 e 9, respectivamente. Já a variabilidade intra-anual na componente zonal tende a se manter constante com uma média de 1 m/s. Os pontos próximos à costa (1 a 5) possuem baixos valores de  $R^2$ , indicando que o maior responsável por explicar a variabilidade nestes pontos é a variância intra-anual.

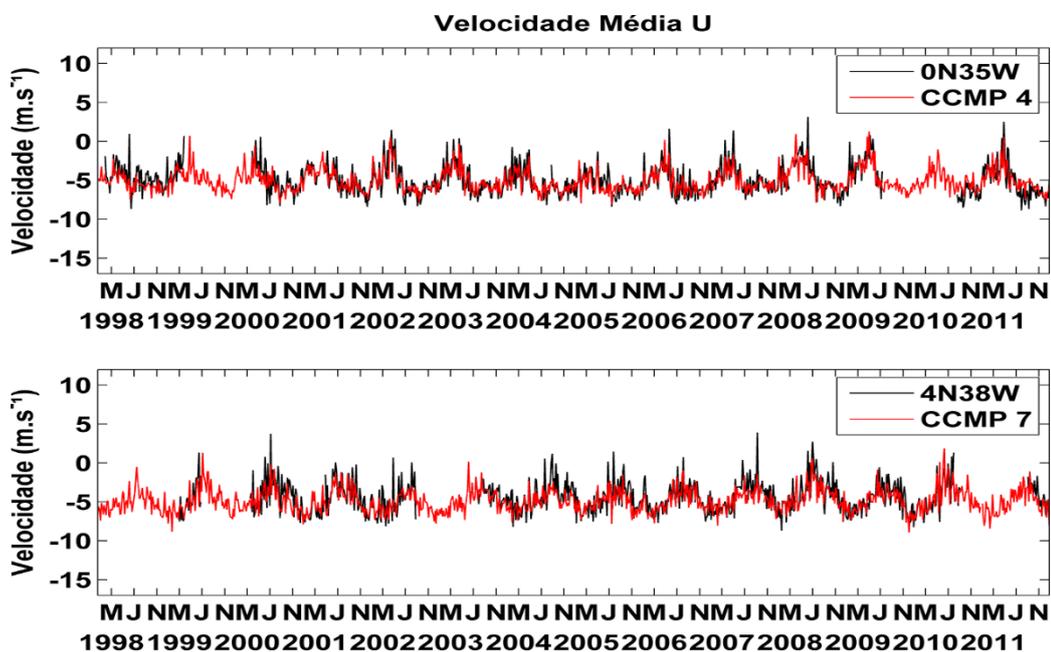
Nota-se que o ano de 1992 exibiu altos valores de variabilidade inter-anual para os pontos 6 a 9 (1-1,3 m/s). Este mesmo ano foi caracterizado por um evento forte de El Niño (AUSTRALIAN GOVERNMENT, 2013) e Dipolo Positivo (FUNCEME, 2013)

### **3.4 CCMP vs PIRATA**

Com o intuito de se validar os dados do CCMP nesta seção foram feitas algumas comparações entre os dados de dois pontos CCMP (4 e 7) com duas boias do projeto PIRATA (0N35W e 4N38W).

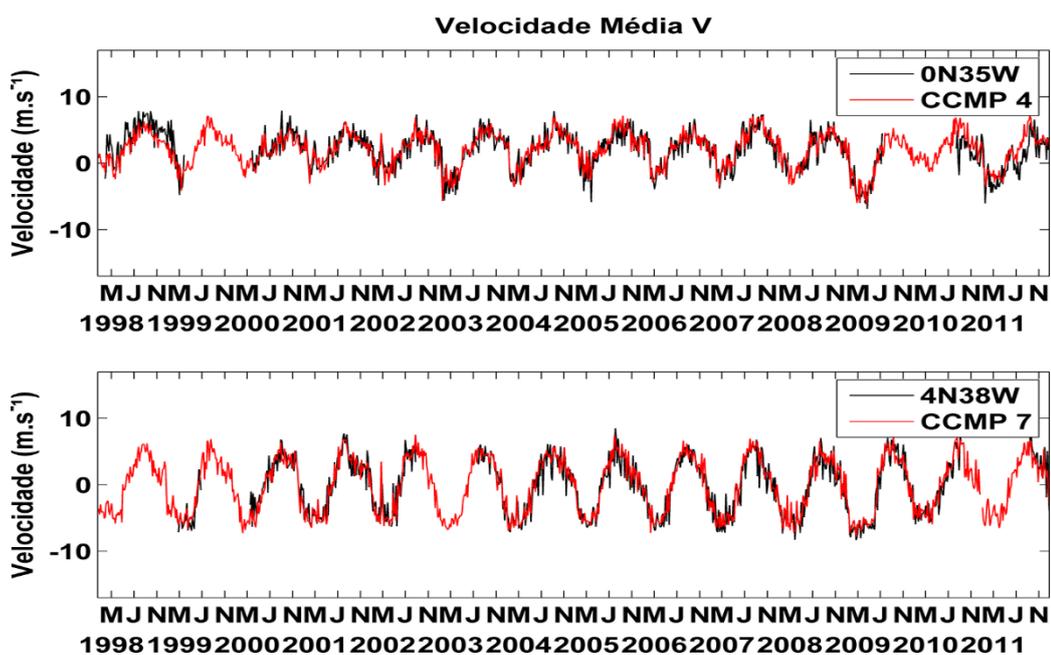
Inicialmente foi analisada as médias semanais de velocidades ao longo do período de observações, como mostrado nas figuras 33 e 34.

Figura 33 - Comparação das médias semanais de velocidades ao longo do tempo na componente U dos ventos.



Fonte: o autor. A linha vermelha representa o CCMP, a linha preta representa o PIRATA. O painel superior se refere ao CCMP 4/PIRATA 0N35W e o painel superior ao CCMP 7/PIRATA 4N38W.

Figura 34 – Similar a figura 33, porém para a componente V.

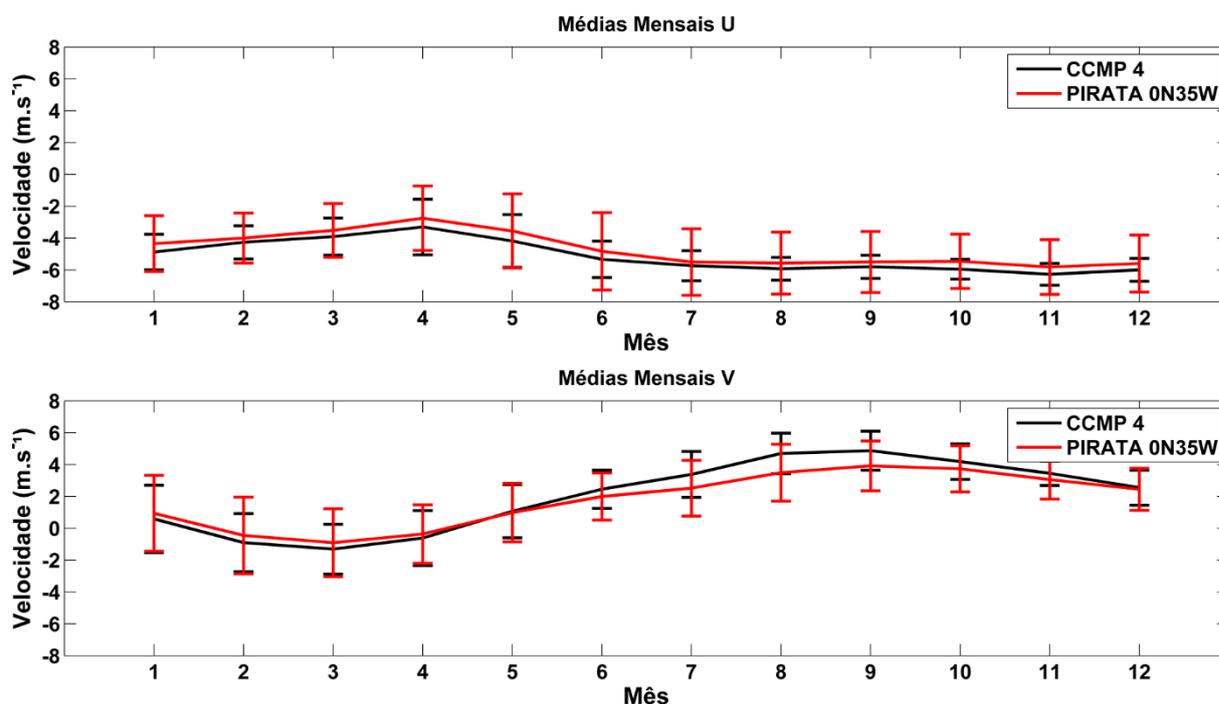


Fonte: o autor. A linha vermelha representa o CCMP, a linha preta representa o PIRATA. O painel superior se refere ao CCMP 4/PIRATA 0N35W e o painel superior ao CCMP 7/PIRATA 4N38W.

Esta primeira análise mostra que os dados do CCMP e os coletados *in situ* possuem uma boa adequação ao longo do tempo em ambas as componentes dos ventos, com a componente meridional ligeiramente melhor adequada. As lacunas existentes nos dados PIRATA não estão descritas na documentação do PIRATA, mas podemos presumir que tenham ocorrido devido a manutenção de sensores, que estão sujeitos a diversas avariações no período em que permanece fixo a boia.

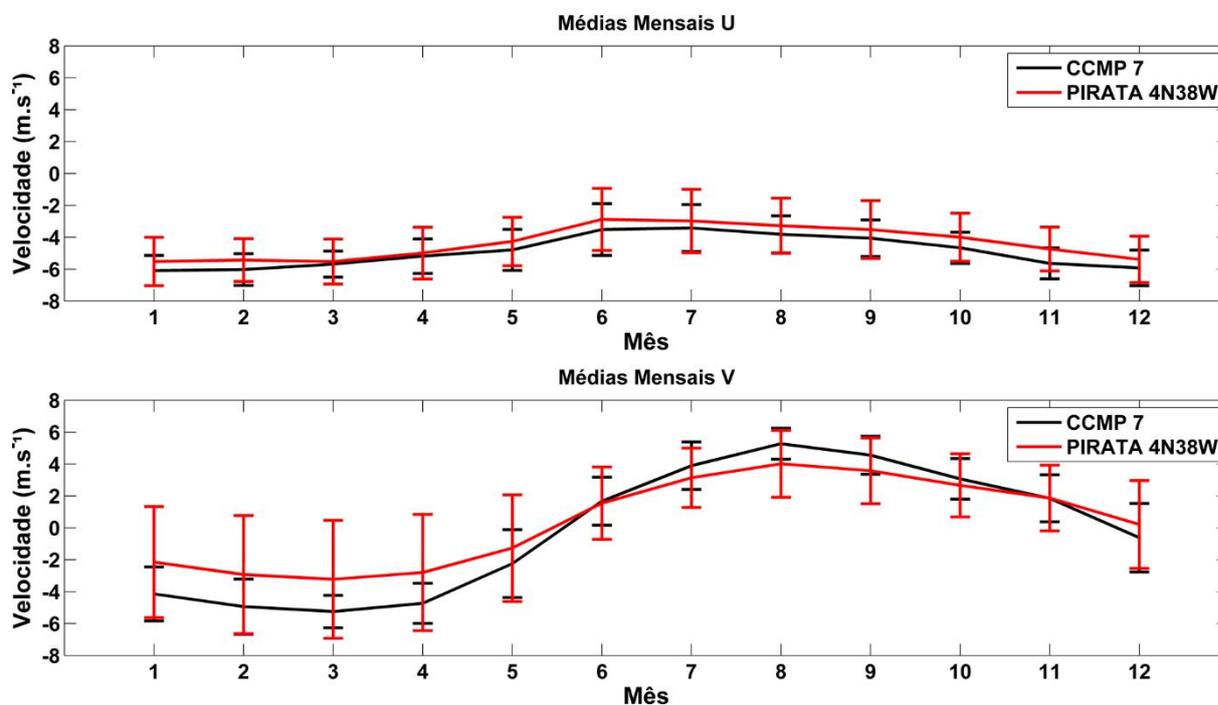
Em seguida foram comparadas as médias e desvios padrão climatológicos (FIGURAS 35 e 36) entre os pontos CCMP e as boias PIRATA correspondentes.

Figura 35 – Comparação da média de velocidades e desvios padrão mensais (CCMP 4 vs PIRATA 0N35W).



Fonte: o autor. A linha preta representa o CCMP, a linha vermelha representa o PIRATA. O painel superior refere-se a componente U, enquanto que o painel inferior refere-se a componente V.

Figura 36 – Comparação da média de velocidades e desvios padrão mensais (CCMP 7 vs PIRATA 4N38W).



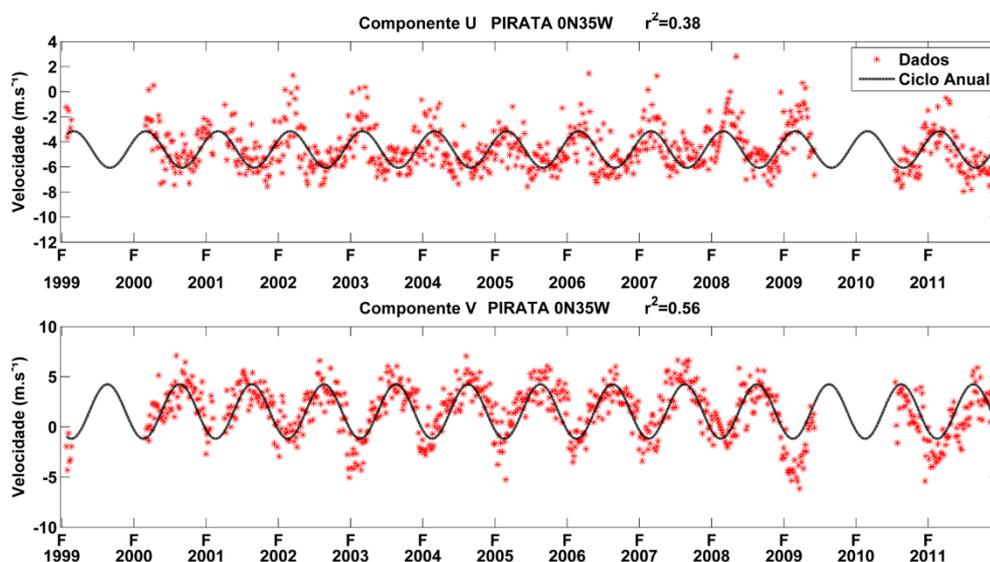
Fonte: o autor. A linha preta representa o CCMP, a linha vermelha representa o PIRATA. O painel superior refere-se a componente U, enquanto que o painel inferior refere-se a componente V.

As comparações mostram que os dados também possuem um comportamento semelhante em uma análise mês a mês, mas com uma leve diferença entre os dados do CCMP e PIRATA, com os valores CCMP subestimando os resultados do PIRATA na componente U. Na componente V, os dados CCMP subestimam os dados PIRATA nos primeiros meses do ano e superestima nos meses de junho a outubro. As maiores diferenças entre os valores estão na comparação do ponto CCMP 7 com a boia PIRATA 4N38W.

Os desvios padrão das boias PIRATA são predominantemente maiores que os do CCMP, isto ocorre porque os processos que representam a realidade sempre possuem maiores desvios padrão, pois estão sujeitos às variações do meio (eventos climatológicos extremos, entre outros).

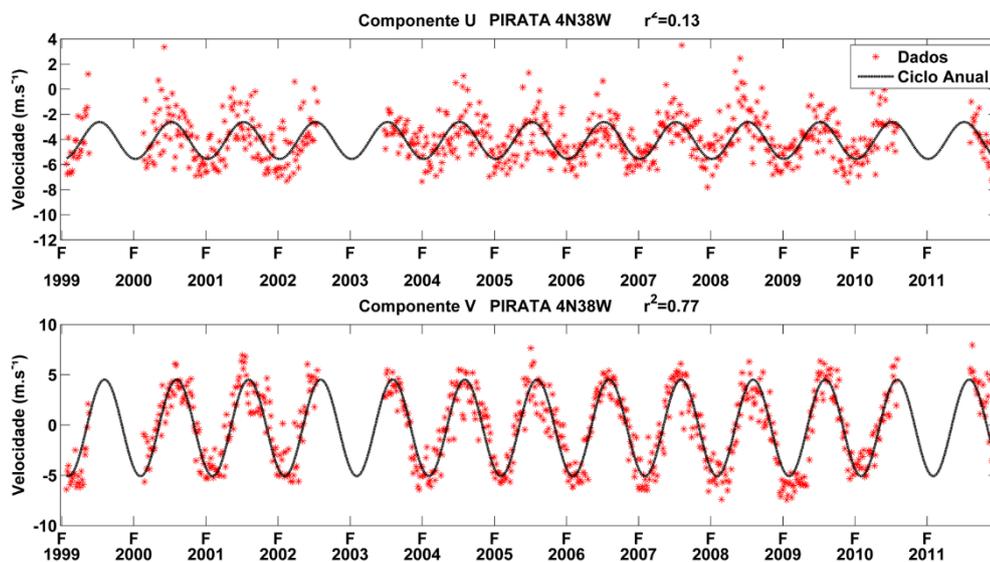
As figuras 37 e 38 mostram as séries temporais com o ciclo anual ajustado, através de análise harmônica, das boias PIRATA, com os seus respectivos valores de  $R^2$ .

Figura 37 - Intensidades (pontos vermelhos) das componentes zonal e meridional e ciclo anual ajustado (linha preta) para a boia 0N35W.



Fonte: o autor. Painel superior: componente U; Painel inferior: componente V. Os valores de  $R^2$  entre o ciclo anual e os dados são apresentados em cada figura.

Figura 38 - Similar a figura 37, porém para a boia 4N38W.



Fonte: o autor. Painel superior: componente U; Painel inferior: componente V. Os valores de  $R^2$  entre o ciclo anual e os dados são apresentados em cada figura.

A partir da comparação de cada boia com o seu ponto correspondente (FIGURAS 15 e 18), foi possível perceber que os valores de  $R^2$  são semelhantes para as componentes U e V, com os valores das boias PIRATA ligeiramente maiores (TABELAS 3 e 4).

Tabela 3 – Valores de  $R^2$  nas componentes U e V para cada ponto CCMP 4 e PIRATA 0N35W.

	<b>CCMP 4</b>	<b>PIRATA 0N35W</b>
Componente U	0.29 %	0.38 %
Componente V	0.33 %	0.56 %

Fonte: o autor.

Tabela 4 – Similar a tabela 3, porém para ponto CCMP 7 e PIRATA 4N38W.

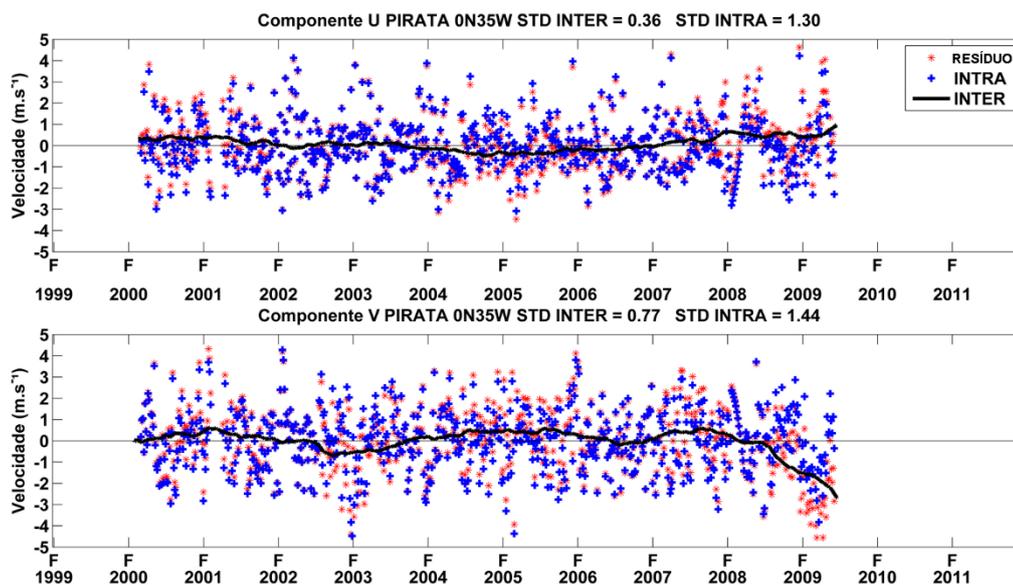
	<b>CCMP 7</b>	<b>PIRATA 4N38W</b>
Componente U	0.00 %	0.13 %
Componente V	0.56 %	0.77 %

Fonte: o autor.

A comparação dos valores de  $R^2$  do CCMP e boias PIRATA correspondentes mostra que o ciclo anual é capaz de explicar a variabilidade da componente V dos ventos. Para a componente U, fica evidente uma variabilidade intra-anual, já que o  $R^2$  apresentou valores menores que 0.3 %.

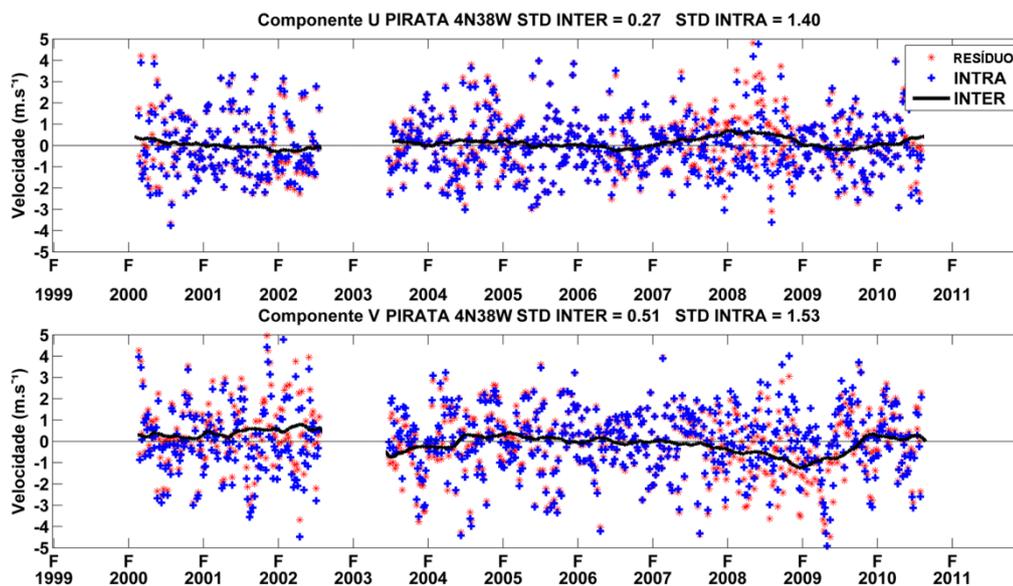
As figuras 39 e 40 exibem séries temporais da variabilidade, não determinística (resíduos), para as duas boias PIRATA analisadas. O ciclo determinístico (ciclo anual) foi subtraído dos dados originais, resultando num resíduo (R1), evidenciado por asteriscos vermelhos. A curva preta representa a variabilidade interanual dos ventos, calculada a partir do filtro de médias móveis de 365 dias dos dados residuais de R1. Os pontos azuis são a variabilidade intra-anual, correspondendo ao resíduo R1 menos a variabilidade inter-anual.

Figura 39 – Variabilidade inter-anual e intra-anual da boia PIRATA 0N35W.



Fonte: o autor. Painel superior: componente U, com desvio padrão inter e intra-anual; Painel inferior: componente V, com desvio padrão inter e intra-anual. Os asteriscos vermelhos representam o R1. A curva preta representa a variabilidade interanual dos ventos, os pontos azuis são a variabilidade intra-anual.

Figura 40 – Similar a figura 39, porém para a boia PIRATA 4N38W.



Fonte: o autor. Painel superior: componente U, com desvio padrão inter e intra-anual; Painel inferior: componente V, com desvio padrão inter e intra-anual. Os asteriscos vermelhos representam o R1. A curva preta representa a variabilidade interanual dos ventos, os pontos azuis são a variabilidade intra-anual.

Da mesma forma que para os pontos 4 e 7 do CCMP (FIGURAS 26 e 29), a variabilidade intra-anual é visivelmente maior, em ambas as componentes, do que a variabilidade inter-anual em todo o período analisado. Nota-se que o sinal intra-anual é muito similar aos valores de R1, principalmente na componente zonal, indicando que a variabilidade intra-anual explica a maior parte da variabilidade temporal desta componente dos ventos.

A lacuna sem dados da boia 4N38W, no período de 2002 a 2003 não está descrita na documentação do PIRATA.

A partir das análises das séries temporais analisadas (ciclo anual, variabilidades inter e intra-anual), fica claro que dados do CCMP são validados pelo dados *in situ* do projeto PIRATA.

A tabela 5 mostra os coeficientes de correlação entre os dados CCMP e os dados PIRATA. Os dados possuem uma boa correlação na componente V dos ventos e uma correlação média na componente U indicando que os dados do CCMP reproduzem de forma adequada a variabilidade dos ventos na região do Atlântico Equatorial. Porém este tipo de análise não mostra onde (quais períodos de variabilidade) estão as deficiências e qualidades do CCMP.

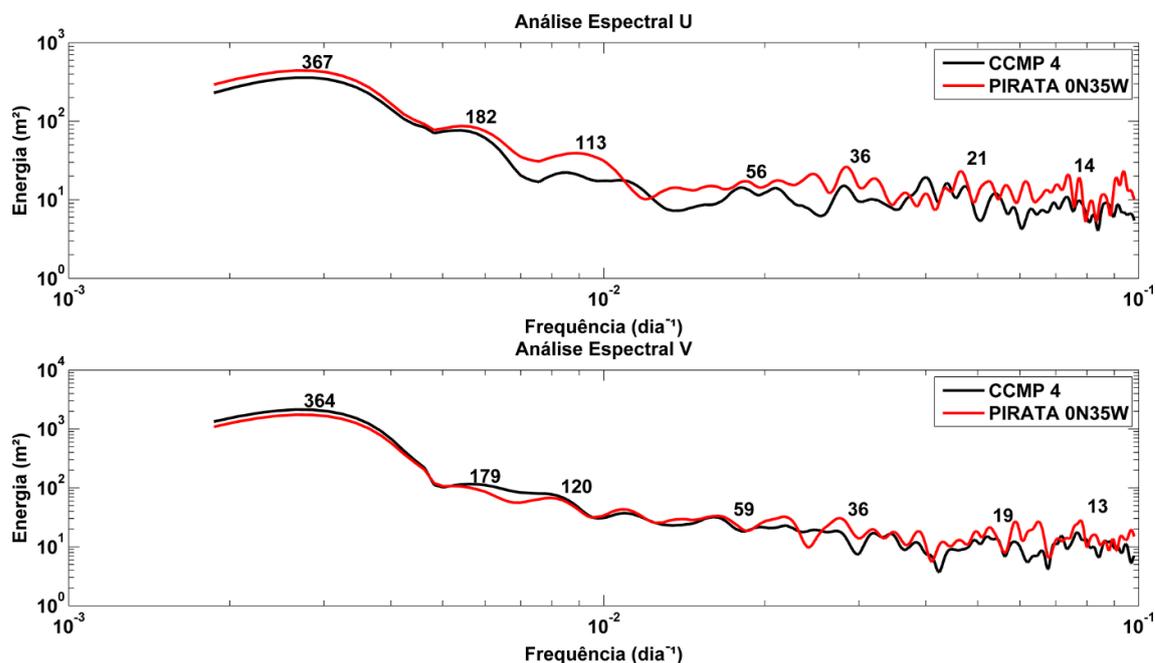
Tabela 5 – Coeficiente de Correlação entre as componentes U e V para cada ponto/boia (%).

	<b>Coeficiente de Correlação</b>
U CCMP 4 x U PIRATA 0N35W	0.55
V CCMP 4 x V PIRATA 0N35W	0.79
U CCMP 7 x U PIRATA 4N38W	0.55
V CCMP 7 x V PIRATA 4N38W	0.70

Fonte: o autor

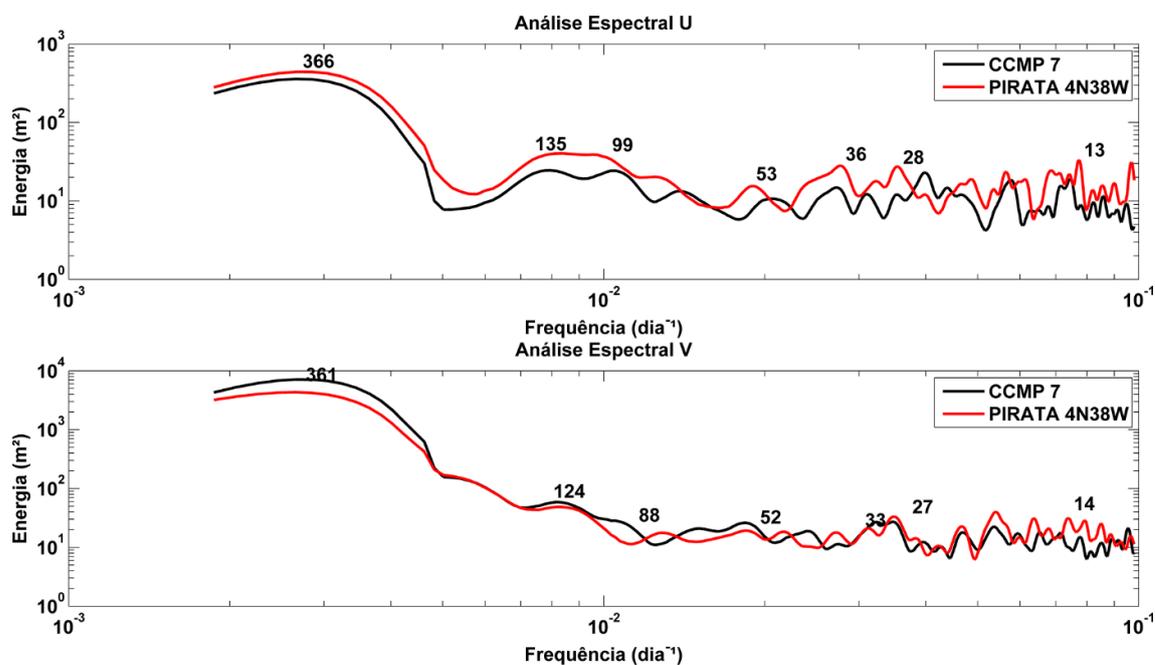
Assim, para verificar se os dados do CCMP são ou não representativos para a realidade, realizou-se uma análise espectral dos dados das boias PIRATA e os seus pontos CCMP correspondentes (FIGURAS 41 e 42) e comparou-se o espectro.

Figura 41 – Espectro de frequências para ponto CCMP 4 e PIRATA 0N35W.



Fonte: o autor. Painel superior representa a componente U e o painel inferior representa a componente V. A curva preta representa o espectro CCMP e a curva vermelha o espectro PIRATA.

Figura 42 – Espectro de frequências para ponto 7 e PIRATA 4N38W.



Fonte: o autor. Painel superior representa a componente U e o painel inferior representa a componente V. A curva preta representa o espectro CCMP e a curva vermelha o espectro PIRATA.

Através das análises observa-se que os dados do CCMP reproduzem bem a variabilidade de baixa frequência dos dados PIRATA, como pode ser observado nas frequências próximas a 360, 180 e 120 dias. Porém, de forma geral, os dados do CCMP não representam bem a variabilidade em altas frequências. Observa-se ainda que os espectros da componente meridional são mais semelhantes quando comparados com os da componente zonal.

## 4 CONCLUSÃO

A determinação da variabilidade espaço-temporal do padrão de ventos, na porção oeste do Oceano Atlântico Equatorial, em escalas anuais, inter-anuais e intra-anuais, foi obtida pela primeira vez com a utilização de 25 anos de dados CCMP disponíveis gratuitamente em domínio público.

O ciclo anual ficou bem definido, com valores significativos de  $R^2$  para a componente meridional (V) dos ventos, evidenciando que ele explica melhor a variabilidade nesta componente. A componente zonal não apresentou valores significativos de  $R^2$ , evidenciando uma variabilidade intra-anual para a região.

Em geral, os valores da variabilidade intra-anual foram superiores em todo o período analisado, evidenciando a representatividade do intra-anual para explicar a variabilidade do padrão de ventos.

O conjunto de dados do produto CCMP nos forneceu uma fonte de alta resolução espaço-temporal, que ajustada com o método pixel-a-pixel aqui apresentados, permitiu uma análise mais sucinta do que as previamente analisadas para a região.

A comparação com dados *in situ*, com as boias do projeto PIRATA, nos permitiu uma validação do método aplicado pelos sistemas de SR do CCMP, assim confirmando os benefícios de se utilizar técnicas de SR para regiões extensas no globo. Mas é importante salientar que a utilização de dados *in situ* sempre será mais representativa, pois mostra a realidade. A utilização de técnicas de SR é indicada para grandes análises espaço-temporal.

## REFERÊNCIAS

ATLAS, Robert et al. A Cross-Calibrated, Multiplatform Ocean Surface Wind Velocity Product for Meteorological and Oceanographic Applications. **American Meteorological Society**, p.157-174, fev. 2011.

AUSTRALIAN GOVERNMENT. **Southern Oscillation Index - 1985-1992**. Disponível em: <<http://www.bom.gov.au/climate/current/soi-1985-1992.shtml>>. Acesso em: 10 dez. 2013

BARNETT, T. P.. Interaction of the Monsoon and Pacific Trade Wind System at Interannual Time Scales Part I: The Equatorial Zone. **Monthly Weather Review**, v. 111, p.756-773, abr. 1983.

BJERKNES, J. A Possible Response of Atmospheric Hadley Circulation to Equatorial Anomalies of Ocean Temperature. **Tellus**, v. 18, p.820-829, 1966.

CARVALHO, Miguel Ângelo Vargas de; OYAMA, Marcos Daisuke. Variabilidade da largura e intensidade da Zona de Convergência Intertropical atlântica: Aspectos observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia** v. 28, n. 3, p.305-316, set. 2013.

CITEAU, J et al. Position de la Zone de Convergence a 28 N et température de surface de l'ocean. **Veille Climatique Satellitaire**, v. 21, p.3-7, 1998a.

CITEAU, J et al. The watch of ITCZ migrations over tropical Atlantic as an indicator in drought forecast over Sahelian area. **Ocean-Atmosphere Newsletter**, v. 45, p.1-3, 1998b.

FERREIRA, Antonio Geraldo. **Técnicas de Sensoriamento Remoto para Monitoramento Ambiental com Aplicações em Recursos Pesqueiros no Atlântico Tropical**. 2005. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Marinhas Tropicais, Departamento de Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005a.

FERREIRA, A G; MELLO, N G S. PRINCIPAIS SISTEMAS ATMOSFÉRICOS ATUANTES SOBRE A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL E A INFLUÊNCIA DOS OCEANO S PACÍFICO E ATLÂNTICO NO CLIMA DA REGIÃO. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, p.15-28, dez. 2005b.

FUNCEME. **Dipolo de TSM do Atlântico (1964-2013)**. Disponível em: <[http://www.funceme.br/produtos/manual/oceanografia/Campos\\_TSM/pirata/dipolo/dipole\\_servain.gif](http://www.funceme.br/produtos/manual/oceanografia/Campos_TSM/pirata/dipolo/dipole_servain.gif)>. Acesso em: 10 dez. 2013.

HASTENRATH, S; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. **Quartely Journal Of The Royal Meteorological Society**, v. 435, p.77-92, 1977.

HASTENRATH, S; LAMB, P. Climatic Atlas of the Tropical Atlantic and Eastern Pacific Oceans. **Quartely Journal Of The Royal Meteorological Society**, 177 p., 1977.

JOYCE, Terrence M. et al. Ocean Response and Feedback to the SST Dipole in the Tropical Atlantic. **Journal of Physical Oceanography**, v. 34, p.2525-2540, nov. 2004.

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, mar. 1981.

OLIVEIRA, Juliana Lima; COSTA, Alexandre Araújo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 1, p.53-66, mar. 2011.

PHILANDER, S G H et al. Why the ITCZ is mostly north of the equator. **Journal Of Climate**, v. 9, p.2958-2972, dez. 1996.

RANA, Arun et al. Trend analysis for rainfall in Delhi and Mumbai, India. **Springer**, 4 maio 2011

SERVAIN, Jacques; PICAUT, Joël; BUSALACCHI, Antonio J.. Chapter 16 Interannual and Seasonal Variability of the Tropical Atlantic ocean depicted by Sixteen years of Sea-Surface Temperature and wind stress. **Elsevier Oceanography Series**, v. 40, p.211-237, 1985.

SILVEIRA, Ilson C. A. da; MIRANDA, Luiz B. de; BROWN, Wendell S.. On the origins of the North Brazil Current. **Journal Of Geophysical Research: Oceans**, v. 99, n. 11, p.22501-22512, nov. 1994.

STRAMMA, Lothar. Geostrophic transport of the South Equatorial Current in the Atlantic. **Journal Of Marine Research**, v. 49, p.281-294, 1991.