



**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA
TERRA**

THAÍS LOBATO SARMENTO

**AVALIAÇÃO CRUZADA DE MÚLTIPLAS PLATAFORMAS DE DADOS DE VENTO
SOBRE O OCEANO ATLÂNTICO TROPICAL**

Niterói-RJ

2020

THAÍS LOBATO SARMENTO

**AVALIAÇÃO CRUZADA DE MÚLTIPLAS PLATAFORMAS DE DADOS DE VENTO
SOBRE O OCEANO ATLÂNTICO TROPICAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Hidrografia.

Orientador: *Dr. rer. nat.* André Luiz Belém
Co - Orientadora: *Dr^a* Noele Franchi Leonardo

Niterói, RJ
2020

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S246a Sarmiento, Thaís Lobato
Avaliação Cruzada de Múltiplas Plataformas de Dados de Vento sobre o Oceano Atlântico Tropical / Thaís Lobato Sarmiento ; André Luiz Belém, orientador ; Noele Franchi Leonardo, coorientadora. Niterói, 2020.
216 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGDOT.2020.m.14350388788>

1. Hidrografia. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Modelagem Numérica. 4. Meteorologia. 5. Produção intelectual. I. Belém, André Luiz, orientador. II. Leonardo, Noele Franchi, coorientadora. III. Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDD -

THAÍS LOBATO SARMENTO

**AVALIAÇÃO CRUZADA DE MÚLTIPLAS PLATAFORMAS DE DADOS DE VENTO
SOBRE O OCEANO ATLÂNTICO TROPICAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Hidrografia.

Aprovada em 18 de junho de 2020.

BANCA EXAMINADORA



Prof. André Luiz Belém, Orientador, *Dr.rer.nat.*
Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente/O2-UFF



Oc. Noele Franchi Leonardo, Co - Orientadora, Dr^a.
Programa de Pós-Graduação em Dinâmica do Oceanos e da Terra/O2-UFF



Marcio Cataldi (Jul 24, 2020 21:08 ADT)

Prof. Marcio Cataldi, Dr.
Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente/LAMMOC-UFF



Prof. Edilson Marton, Dr.
Departamento de Meteorologia/UFRJ

Niterói, RJ

2020

Aos meus pais, que não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos meus pais, Izabel e Carlos Alberto e meu irmão Raphael, obrigada por todas as orações pela minha vida, por me incentivarem nessa caminhada e por todos os sacrifícios que fizeram para que eu pudesse chegar até aqui. Vocês são as minhas referências. Amo vocês!

À minha família. Agradeço por sempre orarem por mim, por entenderem meus momentos de ausência para me dedicar aos estudos e por me incentivarem nessa jornada. Amo vocês!

Ao “querido mestre” André Belém, por todas as horas dedicadas aos meus projetos! Obrigada pelos conselhos e orientações, por confiar em mim para tocar tantas coisas no laboratório, por me incentivar a ser uma pesquisadora cada dia melhor e a buscar sempre a excelência!

À minha co-orientadora Dr^a Noele por aceitar esse desafio repentino! Tenho certeza que essa parceria renderá bons frutos!

Aos amigos do Observatório Oceanográfico que de alguma forma contribuíram para este trabalho. Um agradecimento especial para os meus queridos alunos de Iniciação Científica Lucca e Júlia, não só por me ajudarem nas pesquisas e confecção dos gráficos apresentados neste trabalho, mas também por me permitirem co-orientar vocês ao longo desses anos e me ajudarem a me tornar uma professora e uma pesquisadora melhor! Desejo todo sucesso do mundo na carreira de vocês!

Aos amigos do LAMMOC, em especial os do projeto Barco-Escola. Foi um prazer participar desse projeto tão maravilhoso com vocês! Foram momentos incríveis que me mostraram o real papel e o poder transformador da educação. Agradeço também ao professor Cataldi pelos conselhos e ensinamentos transmitidos desde a graduação.

A todos os envolvidos no Projeto PIRATA-BR que tive a oportunidade de conhecer e conviver. Em especial, agradeço ao Prof. Paulo Nobre pela oportunidade de integrar por dois anos o projeto. Agradeço também a Prof^a. Letícia Cotrim, o Prof. Ronald Buss e Paulo Arlino por todos os ensinamentos compartilhados. Vocês foram essenciais para minha formação.

À Marinha do Brasil, em especial à tripulação do Navio de Pesquisa Hidroceanográfico Vital de Oliveira por todo suporte e comprometimento dedicados em prol da pesquisa.

Ao Prof. Edilson e toda a turma de dinâmica da atmosfera. Agradeço pelo carinho que me receberam e pelos ensinamentos compartilhados. Eles foram essenciais para melhorar a qualidade deste trabalho.

À minha “irmã mais velha”, Luthiene Dalanhese que mesmo causando na minha vida, sempre me oferece palavras de incentivo e carinho, momentos divertidos e leves. Agradeço também pelo privilégio que é ser tia da bebê mais fofinha desse mundo! Vocês são as florezinhas mais delicadas do meu jardim!

À minha “irmã do meio”, companheira de aventuras, Yaci Alvarez por tudo que me ensinou nesses anos. Obrigada por cuidar de mim, por todos os conselhos, broncas, conversas e lanches em meio as madrugadas de trabalho. Você é um exemplo de profissional para mim. Que venham muitos embarques para nós!

Às amigas mais chegadas que irmãs Rafaela Brittz e Natália Mila, agradeço por todos os anos de amizade e por sempre se fazerem presentes em todos os momentos da minha vida. Tenho muito orgulho das pessoas e profissionais que vocês se tornaram! Que possamos estar juntas ainda por muitos anos. Amo vocês!

Às “Seriadoras”, Rebeca, Melina, Siena e Babi. Obrigada pelos momentos leves e descontraídos, pelas conversas sempre divertidas e os conselhos em momentos de crise!

À querida amiga Bruna Tschaffon, por me ajudar com minhas inúmeras dúvidas de português, por revisar parte deste texto, por me incentivar a continuar seguindo em frente nos momentos de desânimo e por sempre orar por mim.

Ao meu querido PG. Obrigada pelas incansáveis orações, pelas palavras de sabedoria e ensinamentos compartilhados. É uma alegria ser igreja com vocês!

Aos amigos de perto e de longe que de alguma forma acompanharam essa saga. Momentos felizes ao lado de vocês certamente tornaram esses anos mais leves e divertidos! Agradeço de coração!

E é a Deus o meu maior agradecimento. A Ele toda honra, toda glória e todo o louvor!

“Há coisas muito melhores por vir do que aquelas que deixamos para trás”.

C. S. Lewis

RESUMO

Embora a atmosfera e o oceano funcionem como um sistema acoplado, medir o vento sobre o oceano e integrar a série temporal resultante em campos de escala sinótica é um desafio. Uma das questões principais é o número limitado de observações *in situ* sobre os oceanos, especialmente aquelas obtidas por boias meteoceanográficas. Dados de modelos são uma alternativa utilizada, mas eles dependem dos campos forçantes que podem ser inconsistentes quando uma parametrização global é usada. Outra solução amplamente utilizada são os dados de sensoriamento remoto. Atualmente, satélites usam uma variedade de instrumentos para medir o vento, fornecendo uma cobertura global, mas com baixa consistência em algumas escalas temporais. Este estudo, focado no oceano Atlântico Tropical, compara observações *in situ* do vento sobre o oceano com alta resolução temporal das boias PIRATA (*Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic*), observações diárias dos satélites ASCAT e QuikSCAT e também dados horários da reanálise ERA5 do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). A avaliação cruzada é baseada em estatísticas para cada boia, compreendendo diagramas de Taylor, visando comparação diária (satélite x boia) e caracterização espacial dos campos horários (modelo x boia). A correlação entre os dados das boias e dos satélites foi considerada estatisticamente superior para a velocidade do vento, embora a comparação entre boia e o ERA5 tenham sido melhores em geral (> 0.7 na maioria dos casos). Além disso, a significância estatística espacial foi coincidente entre todos os bancos de dados, o que pode indicar que os processos físicos durante a calibração podem ter maior relevância nessa região, principalmente ao converter o vento para a altura padrão de 10 m (ex.: fluxo de calor). A análise de componentes principais (PCA) foi usada para investigar os elementos do oceano e atmosfera que poderiam influenciar nas diferenças entre os dados da boia e da reanálise. A PCA mostrou que a diferença da velocidade do vento entre PIRATA e ERA5 pode ser bem explicada por uma combinação das variações temperatura da superfície do mar (TSM), temperatura do ar (airT), densidade da superfície do mar (SSD) e umidade relativa (rh). Ao combinar todos os dados das boias, a sazonalidade se mostrou como uma variável importante. Embora o número de boias não seja grande, é clara a necessidade de levar em consideração a cobertura espacial, a fim de reduzir o impacto dos processos físicos locais nos dados de modelos e satélites em escala sinótica.

Palavras-chave: Interação oceano-atmosfera. PIRATA. ERA5. Satélites.

ABSTRACT

Although the atmosphere and the ocean work as a coupled system, measuring the wind over the ocean and integrating the resulting time series to synoptic fields proved to be a challenge. One of the main issues is the limited amount of *in situ* observations over the oceans, especially those obtained by marine buoys. Model data are mostly used, but they rely on physics and mesoscale forcing fields which can be inconsistent when global parameterization are used. Another widely used solution is the remote sensing data. Nowadays, satellite systems use a variety of instruments to measure the wind providing a global coverage, but with low consistency in some temporal scales. This study, focused on the Tropical Atlantic Ocean, compares near-surface *in situ* observations of marine wind with high temporal resolution obtained from the PIRATA buoys (Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic), daily satellite observations (ASCAT and QuikSCAT gridded data) and ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) hourly model global reanalysis (ERA5) data. The cross-evaluation is based on statistics for each buoy comprising Taylor diagrams aiming attention at cross-daily check (satellite vs buoy) and spatial characterization of hourly fields (model vs buoy). The correlation between buoy data and satellite was considered statistically stronger for wind speed, although between *in situ* buoy and ERA5 model data was overall better (> 0.7 in most cases). Moreover, spatial statistical significance was coincident between all databases, which might indicate that physical processes during calibration may have stronger relevance in these regions, especially when converting buoy level wind to the 10 m standard height (eg. heat fluxes). Principal Component Analysis (PCA) was used to investigate the ocean-atmosphere elements that could most influence in the differences between buoy and reanalysis data. PCA showed that wind speed difference between PIRATA and ERA5 can be well explained by a combination of the variations on sea surface temperature (TSM), air temperature (airT), sea surface density (SSD) and relative humidity (rh). When combining all buoy sites data, the seasonality appeared as an important variable. Although the number of *in situ* buoys is not large, the need to take the spatial coverage into account is clear, in order to reduce the impact of the local physical processes on the synoptic field data of models and satellites.

Keywords: Air-sea interaction. PIRATA. ERA5. Satellites.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático de zonas de alta e baixa pressão atmosférica e o deslocamento do ar devido a essas diferenças.	23
Figura 2 - Esquema simplificado do modelo de circulação geral da atmosfera	25
Figura 3 - Esquema simplificado da circulação de Walker, com maior ênfase na célula do Pacífico.....	26
Figura 4 – Idealização do: (a) vento médio; (b) ondas; (c) turbulência	27
Figura 5 - A) Lançamento de boia PIRATA do modelo T-Flex na XVIII Comissão PIRATA-BR. B) Cronograma para substituição das boias ATLAS pelo modelo T-Flex.	36
Figura 6 - Satélite QuikSCAT.	39
Figura 7 – A) Ilustração dos satélites MetOp e da amplitude do feixe de aquisição dos dados. B) Exemplo da área imageada em 1 dia pelo Metop-A.....	41
Figura 8 – Esquema simplificado dos processos que ocorrem no oceano superior e são acoplados através das interações entre o vento, correntes e ondas.	47
Figura 9 - Esquema dos principais componentes para a compreensão da variabilidade tropical do Atlântico.	48
Figura 10 - Esquema simplificado das correntes no Atlântico Tropical.....	50
Figura 11 - Área de estudo.....	52
Figura 12 - Linha de pesca enrolada ao cabo eletromecânico da linha de fundeio de uma das boias PIRATA do transecto 38°W.	52
Figura 13 - Exemplo de um diagrama de Taylor.	58
Figura 14 - Comparação entre métodos para converter $U(z)$ em U_{10} , em que o método 1, em azul, é o proposto por Benshop (1996) e o método 2, em vermelho, proposto por Young (1999), para a boia 19S34W.....	62

- Figura 15 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da (A) boia PIRATA 19S34W, (B) do ASCAT e QuikSCAT e (C) e do ERA5, na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. 64
- Figura 16 – A) Média mensal da diferença, em m/s, para cada um dos pontos de grade onde existem boias PIRATA entre as variáveis de vento fornecidas pelo ERA5, velocidade do vento neutro a 10m e velocidade do vento a 10m. B) Comparação entre os dados mensais, em m/s, de vento neutro e não neutro do ERA5. 66
- Figura 17 - Série histórica (janeiro/1979 – setembro/2019) dos dados do ERA5 para a região de estudo..... 68
- Figura 18 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento das boias 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W do projeto PIRATA.. 70
- Figura 19 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento do ERA5 a partir de setembro de 1997 nos pontos 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W 71
- Figura 20 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento do QuikSCAT de 1999 a 2009, nos pontos 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W. 72
- Figura 21 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento do ASCAT de 2009 a 2019, nos pontos 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W. 73
- Figura 22 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento, das boias PIRATA nas posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W e o satélite QuikSCAT 75
- Figura 23 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento das boias PIRATA nas posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W e o satélite ASCAT (Metop-A)..... 76
- Figura 24 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e QuikSCAT nas posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W, de 1998 a 2009, em vermelho, e seus respectivos desvios padrão, em cinza. 79

Figura 25 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e ASCAT nas posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W, de 2009 a 2019, em vermelho, e seus respectivos desvios padrão, em cinza.	80
Figura 26 - Correlação (R) das variáveis do vento u, em azul, v em vermelho e wspd, em amarelo, entre as boias PIRATA 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W e o ERA5 nas mesmas posições geográficas por hora do dia.	82
Figura 27 - Raiz do erro quadrático médio centralizado (CRMSE) das variáveis do vento u, em azul, v em vermelho e wspd, em amarelo, entre as boias PIRATA 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W e o ERA5 nas mesmas posições geográficas por hora do dia.....	83
Figura 28 - Desvio Padrão (STD) de cada uma das variáveis do vento das boias PIRATA 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W e o ERA5 nas mesmas posições geográficas por hora do dia.....	84
Figura 29 - Distribuição das diferenças de velocidade do vento entre o PIRATA – ERA5 em uma estimativa da função de densidade de probabilidade, onde a área de cada barra é o número relativo de observações.....	86
Figura 30 – Variação mensal das diferenças na velocidade do vento PIRATA – ERA5 e seus respectivos desvios padrão para as posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W.....	88
Figura 31 - Número de amostras disponíveis por mês para as posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W.....	89
Figura 32 - Resumo dos principais coeficientes (KP, KL, AEC e CAEC) levados em consideração para a escolha do número de componente principais.	91
Figura 33 - Scree plot das posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no primeiro modelo de PCA proposto.	92
Figura 34 - Score Plot para o primeiro modelo de PCA proposto para as posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W.....	94

Figura 35 - Loading Plot das posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W para o primeiro modelo de PCA proposto.	96
Figura 36 – Scree plot das posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no segundo modelo de PCA proposto.	99
Figura 37 - Score Plot para o segundo modelo de PCA proposto para as posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W.....	101
Figura 38 - Loading Plot das posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W para o segundo modelo de PCA proposto.	102
Figura 39 - Scree plot para auxiliar na escolha do número de componentes para as PCA's que utilizam dados de todas as boias do PIRATA. Nela são apresentadas respectivamente o (A) primeiro, o (B) segundo e o (C) terceiro modelo de PCA propostos por esse trabalho.....	104
Figura 40 - Score Plot utilizando dados de todas as boias do projeto PIRATA. Nela são apresentadas respectivamente o (A) primeiro, o (B) segundo e o (C) terceiro modelo de PCA propostos por esse trabalho.....	105
Figura 41 - Loading Plot utilizando dados de todas as boias do projeto PIRATA. Nela são apresentadas respectivamente o (A) primeiro, o (B) segundo e o (C) terceiro modelo de PCA propostos por esse trabalho.....	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais diferenças entre os satélites QuikSCAT e ASCAT (Metop - A).	42
Quadro 2 - Visão geral das características e recursos inovadores do ERA5 em comparação com o ERA-Interim	45
Quadro 3 – Hora utilizada para realizar as comparações entre cada uma das boias PIRATA e os satélites ASCAT e QuikSCAT (QSCAT).....	77
Quadro 4 - Resumo estatístico baseado nos índices da melhor hora selecionada a partir dos diagramas de Taylor, levando em consideração todos as variáveis de vento (u, v e wspd) e todas as boias PIRATA.....	77
Quadro 5 - Resumo da PCA 1 com os índices em cada uma das componentes por variável e o percentual de explicação (EV) de cada componente para cada posição geográfica estudada	98
Quadro 6 - Resumo da PCA 2 com os índices em cada uma das componentes por variável e o percentual de explicação (EV) de cada componente para cada posição geográfica estudada	103
Quadro 7 - Principais vantagens e desvantagens em relação a resolução temporal e espacial, além das principais influencias físicas que atuam nas bases de dados utilizadas por este trabalho.	111

LISTA DE ABREVIATURAS

Para consistência com o referencial teórico e o desenvolvimento do trabalho, algumas abreviaturas foram mantidas na língua estrangeira, e seu significado nesta lista está em itálico.

AEC – *Average Eigenvalue Criteria*: Critério do Autovalor Médio

airT – Temperatura do Ar

AMM – *Atlantic Meridional Mode*: Modo Meridional do Atlântico

AMOC – *Atlantic Meridional Overturning Circulation*

ASCAT – *Advanced Scatterometer*

AT – Atlântico Tropical

AZM – *Atlantic Zonal Mode*: Modo Zonal do Atlântico

C3S – *Copernicus Climate Change Service*

CAEC – *Corrected Average Eigenvalue Criteria*: Critério do Autovalor Médio Corrigido

CLA – Camada Limite Atmosférica

CLAM – Camada Limite Atmosférica Marinha

CRMA – Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico

CRMSE – *Centered Root Mean Square Error*: Erro Quadrático Médio Centralizado

cSEC – *Central South Equatorial Current*: Corrente Sul Equatorial (ramo central)

DiMAS – Dinâmica Meridional do oceano-atmosfera no Atlântico Sul

ECMWF – *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

ENOS – *El Niño* Oscilação Sul

ESA – *European Space Agency*: Agência Espacial Europeia

EUC – *Equatorial Undercurrent*: Subcorrente Equatorial

EUMETSAT – *European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites*

FCDR – *Fundamental Climate Data Record*: Registro de Dados Climáticos Fundamentais

HN – Hemisfério Norte

HS – Hemisfério Sul

IEA – *International Energy Agency*: Agência Internacional de Energia

IFS – *Integrated Forecast System*: Sistema Integrado de Previsão

JPL – *Jet Propulsion Lab*

LEO – *Low Earth Orbit: Órbita Terrestre Baixa*

METOP – *Meteorological Operational Satellites: Satélites Polares Meteorológicos Operacionais*

NDBC – *National Data Buoy Center*

NECC – *North Equatorial Counter Current: Contracorrente Equatorial do Norte*

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

nSEC – *Northern South Equatorial Current: Corrente Sul Equatorial (ramo norte)*

OAN – *Oscilação do Atlântico Norte*

PCA – *Principal Components Analysis: Análise de Componentes Principais*

PIRATA – *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic*

PMEL – *Pacific Marine Environmental Laboratory*

PNBOIA – *Programa Nacional de Boias*

RAMA – *Research Moored Array for African-Asian-Australian Monsoon Analysis and Prediction*

Re – *Número de Reynolds*

Ref – *Referência*

rh – *Relative Humidity: Umidade relativa*

SEC – *South Equatorial Current: Corrente Sul Equatorial*

SECC – *South Equatorial Counter Current: Contracorrente Equatorial do Sul*

SSD – *Sea Surface Density: Densidade da Superfície do Mar (sigma-theta)*

sSEC – *Southern South Equatorial Current: Corrente Sul Equatorial (ramo sul)*

STD – *Standard Deviation: Desvio Padrão*

TAV – *Tropical Atlantic Variability: Variabilidade do Atlântico Tropical*

TAO – *Tropical Atmosphere Ocean*

TOGA – *Tropical Ocean Global Atmosphere*

TSM – *Temperature da Superficial do Mar*

wspd – *Velocidade do Vento*

ZCIT – *Zona de Convergência Intertropical*

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	viii
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE QUADROS	xvii
1 INTRODUÇÃO	20
2 BASE TEÓRICA	23
2.1 FUNDAMENTAÇÃO	23
2.1.1 Aspectos gerais sobre o vento e circulação atmosférica	23
2.1.2 Interface Oceano - Atmosfera	29
2.2 PLATAFORMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE VENTO	33
2.2.1 Boias.....	34
2.2.1.1 Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA)	35
2.2.2 Satélites.....	37
2.2.2.1 Quick Scatterometer (QuikSCAT)	39
2.2.2.2 Advanced Scatterometer (ASCAT)	40
2.2.3 Reanálises.....	42
2.2.3.1 ERA5.....	43
2.2.4 Comparações preliminares entre algumas das plataformas de aquisição de dados de vento sobre o oceano	46
2.3 O ATLÂNTICO TROPICAL	47
2.4 OBJETIVOS	53
3 MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS	54
3.2 ANÁLISES CLIMATOLÓGICAS E DE SÉRIES TEMPORAIS	56
3.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	56
3.3.1 Diagrama de Taylor.....	57
3.3.2 Análise de Componentes Principais (PCA).....	59

4	RESULTADOS.....	61
	PARTE I - Caracterização da área e avaliação das diferenças entre as plataformas de aquisição de dados.	61
4.1	ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS.....	61
4.2	ANÁLISE CLIMATOLÓGICA.....	67
4.3	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	74
	PARTE II - Dinâmica: o que influencia as diferenças nos dados de vento?	85
4.4	DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS.....	85
4.5	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS.....	90
5	DISCUSSÕES.....	108
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	114
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116
	APÊNDICE ALFA – GRÁFICOS E INFORMAÇÕES GERAIS.....	125
	APÊNDICE BRAVO – RESUMO DA POSIÇÃO 0N0W.....	126
	APÊNDICE CHARLIE – RESUMO DA POSIÇÃO 0N10W.....	132
	APÊNDICE DELTA – RESUMO DA POSIÇÃO 0N23W.....	138
	APÊNDICE ECHO – RESUMO DA POSIÇÃO 0N35W.....	144
	APÊNDICE FOXTROT – RESUMO DA POSIÇÃO 4N23W.....	146
	APÊNDICE GOLF – RESUMO DA POSIÇÃO 4N38W.....	152
	APÊNDICE HOTEL – RESUMO DA POSIÇÃO 6S8E.....	158
	APÊNDICE INDIA – RESUMO DA POSIÇÃO 6S10W.....	164
	APÊNDICE JULIETT – RESUMO DA POSIÇÃO 8N38W.....	170
	APÊNDICE KILO – RESUMO DA POSIÇÃO 8S30W.....	172
	APÊNDICE LIMA – RESUMO DA POSIÇÃO 10S10W.....	178
	APÊNDICE MIKE – RESUMO DA POSIÇÃO 12N23W.....	180
	APÊNDICE NOVEMBER – RESUMO DA POSIÇÃO 12N38W.....	186
	APÊNDICE OSCAR – RESUMO DA POSIÇÃO 14S32W.....	192
	APÊNDICE PAPA – RESUMO DA POSIÇÃO 15N38W.....	198

APÊNDICE QUEBEC – RESUMO DA POSIÇÃO 19S34W	204
APÊNDICE ROMEO – RESUMO DA POSIÇÃO 20N38W.....	205
APÊNDICE SIERRA – RESUMO DA POSIÇÃO 21N23W.....	211

1 INTRODUÇÃO

A atmosfera e o oceano funcionam como um sistema acoplado. Além disso, as duas partes deste sistema estão ligadas por circuitos de retroalimentação complexos, alguns dos quais reforçam uma mudança, e outros que anulam quaisquer alterações (TRUJILLO; THURMAN, 2011). Dentre os elementos físicos mais importantes na interação entre o ar e o mar está o vento. Os processos conduzidos por essas interações variam em escalas locais, regionais até globais, assim como em diversas escalas temporais (de segundos a décadas).

A interação do vento com a superfície dos oceanos gera um estresse sobre a superfície do oceano, que impulsiona muita das correntes marinhas de superfície, além de atuar como forçante de ondas e das tempestades. Além disso, os ventos também regulam as trocas de fluxos e energia entre a camada ar e mar, mantendo assim, o clima global e regional (KENT; FANGOHR; BERRY, 2013). Ondas e tempestades são alguns dos elementos que impactam diretamente as atividades humanas, tanto em alto mar como em áreas costeiras.

Áreas costeiras são ambientes naturalmente dinâmicos e estão constantemente se adaptando em resposta às forçantes naturais (BIO *et al.*, 2015). As populações residentes nessas áreas são particularmente vulneráveis aos processos costeiros resultantes da interação ar e mar, como o vento, ondas, erosão praial, variações do nível do mar, ressacas, tempestades, enchentes, dispersão de poluentes, entre outros.

Dados apresentados na Conferência dos Oceanos de 2017, promovida pelas Nações Unidas mostraram que aproximadamente 40% da população mundial vive a menos de 100 km de distância da linha de costa, sendo 10% da população total, aproximadamente 600 milhões de pessoas, vivendo em áreas com uma elevação de menos de 10 m acima do nível do mar. Este número representa uma parcela bastante significativa da população mundial que vive em áreas particularmente vulneráveis a fenômenos climáticos.

Alta resolução espacial e temporal e observações sinóticas dos ventos, ondas da superfície e correntes são vitais para entender a interação entre esses elementos, o que permite o desenvolvimento de previsões aprimoradas, que por sua vez são necessários para orientar estratégias de adaptação e mitigação de impactos, e aumentar a resiliência a riscos naturais e mudanças ambientais (VILLAS BÔAS *et al.*, 2019).

Além dos fatores climáticos e sociais, o vento é também uma importante fonte de energia. O mercado de geração de energia em alto mar cresceu aproximadamente 30% ao ano entre 2010 e 2018, segundo dados do relatório de 2019 da Agência Internacional de Energia (IEA). Entretanto essa forma de geração de energia somente representa 0.3% do total de energia mundial segundo o mesmo relatório, o que mostra que este é um mercado com muito potencial de expansão, o que aumenta a demanda por mais estudos relacionados a essa variável.

As diferentes atividades dos seres humanos têm o potencial de forçar os componentes do sistema terrestre acima de seus estados críticos, levando-os a modos de operação qualitativamente diferentes, implicando em impactos em grande escala tanto nos sistemas humanos como nos ecológicos (LENTON *et al.*, 2008). Conforme destacado no trabalho de Campos e Guedes Soares (2016), são necessários dados com duração mínima de 10 anos para fazer estimativas confiáveis de condições extremas. Sendo assim, o grande desafio relacionado às mudanças do clima é determinar se a variabilidade observada excede a natural e ainda determinar se esta mudança pode ser atribuída a forçantes específicas (KNUTSON *et al.*, 2010), o que mais uma vez reforça a necessidade de constante monitoramento do sistema terrestre.

Todas as aplicações apresentadas anteriormente têm como elemento comum e indispensável a necessidade de dados de boa qualidade. Entretanto, em muitos casos, séries temporais de longa duração raramente estão disponíveis em um local específico de interesse, ou a resolução espacial de uma única plataforma de aquisição de dados não é suficiente para suprir as necessidades dos estudos. Integrar diferentes plataformas se torna, portanto, uma das alternativas mais viáveis para que estudos mais completos possam ser realizados.

Para diversas aplicações é comum o uso de resultados de modelos numéricos no lugar de dados observados. Todavia, dados de modelagem só são confiáveis à medida que a física dos modelos e os campos forçantes também o são (VINOOTH; YOUNG, 2011). A previsão de ondas é muito sensível à qualidade dos campos de vento que as forçam. Da mesma forma, modelos de derramamento de óleo, de dispersão de poluentes no oceano, entre outros, dependem grandemente da qualidade dos campos de vento inseridos.

Integrar diferentes plataformas de aquisição de dados de vento em uma única base de dados é uma outra opção, entretanto, essa não é uma tarefa simples. Cada plataforma possui as suas particularidades quanto a frequência na obtenção dos dados, altura em que eles são medidos entre outros fatores, que em diversos casos impedem uma simples comparação ou utilização destes de forma conjunta, sem que antes os mesmos passem por algum outro processo de validação e calibração.

Este trabalho busca, portanto, com foco no oceano Atlântico Tropical (AT), investigar as principais diferenças nas bases de dados de vento, assim como os principais fatores que podem influenciar em tais diferenças. O Atlântico Tropical é uma área de especial interesse climático, econômico e social e por esta razão, ele será o foco do presente estudo. Nessa região a circulação oceânica é altamente influenciada pelos processos de interação entre o oceano e a atmosfera. É também uma região com um padrão de ventos muito característico o qual gera a faixa zonal de convergência conhecida como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), região de conhecida convecção atmosférica profunda, forte precipitação e baixa velocidade média do vento (YU; JIN; WELLER, 2006).

O presente trabalho está vinculado ao projeto DiMAS (Dinâmica Meridional do oceano-atmosfera no Atlântico Sul), cujo objetivo principal é determinar a variabilidade meridional na dinâmica do acoplamento oceano-atmosfera, além de aprofundar o conhecimento sobre os modos e variabilidade do sistema de correntes (Sul Equatorial, norte do Brasil e do Brasil).

2 BASE TEÓRICA

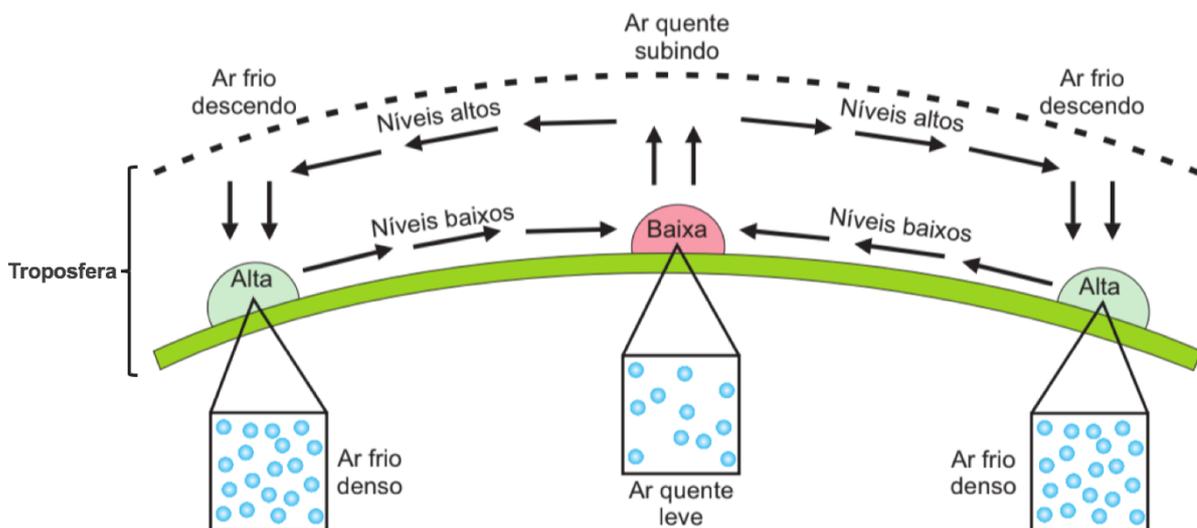
2.1 FUNDAMENTAÇÃO

2.1.1 Aspectos gerais sobre o vento e circulação atmosférica

A atmosfera é um fluido cuja circulação e escoamento estão estruturados de forma complexa. O sol é o principal agente que coloca a atmosfera em movimento (GILL, 1982). A radiação proveniente do sol chega a superfície da Terra nos mais diferentes ângulos de incidência. Ela também é absorvida em diferentes quantidades em função dos mais diversos tipos de cobertura da superfície terrestre e pela passagem dessa radiação pela própria atmosfera (ex.: reflexão e difusão). Esses fenômenos fazem com que a superfície terrestre se aqueça de forma desigual.

O aquecimento desigual da superfície faz com que se criem então zonas de alta pressão (movimento subsidente do ar e divergente em superfície) e zonas de baixa pressão (movimento ascendente do ar e convergente em superfície). O ar quente, por ser mais leve, tende a subir, formando zonas de convecção. Outra parcela de ar mais fria então ocupa esse espaço, e assim por diante, mantendo fluxo sempre das regiões de alta pressão para regiões de baixa pressão, conforme mostrado na Figura 1. As componentes horizontais da velocidade do deslocamento de ar de uma região para a outra é o que é denominado de vento (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Figura 1 - Desenho esquemático de zonas de alta e baixa pressão atmosférica e o deslocamento do ar devido a essas diferenças.



Fonte: Rodrigues (2015) (modificada pela autora).

No entanto, o movimento horizontal do ar de um ponto de maior a outro de menor pressão, não ocorre de forma totalmente retilínea. Os escoamentos de grande escala são defletidos pela força de Coriolis. Coriolis de forma simplificada é o nome dado a força aparente existente devido ao movimento de rotação da Terra e que deflete o movimento do vento para a direita no Hemisfério Norte (HN) e para a esquerda no Hemisfério Sul (HS). O efeito de Coriolis é máximo nos polos e mínimo no Equador. Além disso, quanto maior a velocidade do vento, mais o movimento será defletido (AHRENS, 2015). É importante ressaltar também que a força de Coriolis afeta apenas a direção do movimento e não a sua velocidade, e seu efeito pode ser negligenciado para movimentos que ocorrem em escalas de tempo muito menores do que o período de rotação da Terra (HOLTON, 2004).

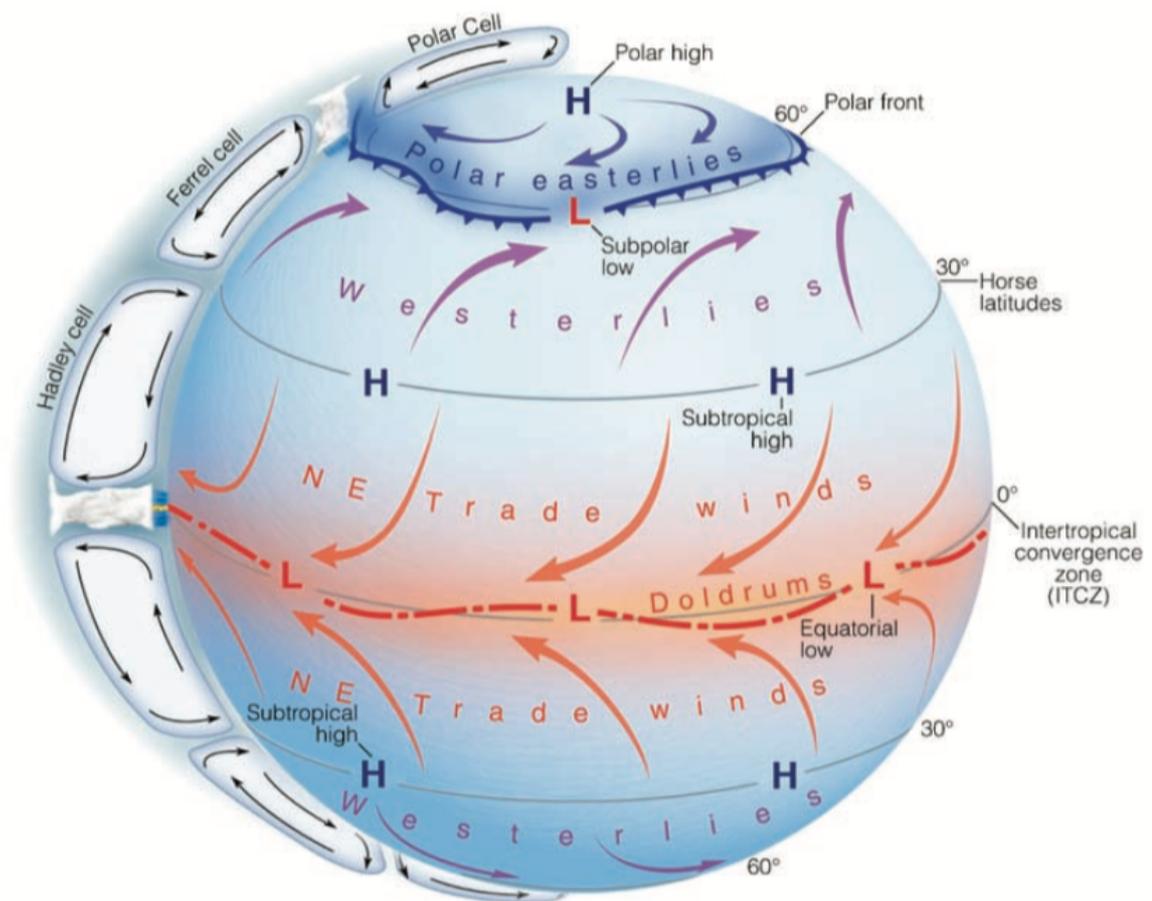
De forma mais específica, quando a força de Coriolis é balanceada pela taxa de variação da velocidade no tempo, o resultado é uma velocidade de rotação no sentido horário no HN e anti-horário no HS, com velocidade constante. Essas oscilações livres, geralmente chamadas de oscilações inerciais, são comumente observadas no oceano superior como resposta a um evento de vento. Por outro lado, quando a força de Coriolis é equilibrada por uma força externa persistente como um gradiente de pressão em grande escala, por exemplo, a velocidade média é perpendicular à força externa. Esse equilíbrio geostrófico é característico da circulação em grande escala em torno de anomalias de pressão na atmosfera e no oceano (PRICE, 2003).

O aquecimento desigual da superfície do globo terrestre como um todo gera um excesso de energia na região equatorial, enquanto as regiões polares têm um déficit. Regiões continentais também aquecem de forma diferenciada se comparadas aos oceanos. O excesso de calor é redistribuído na atmosfera, através da movimentação do ar. O padrão médio do vento na troposfera em escala global é dado por um modelo chamado de circulação geral da atmosfera.

A circulação geral atmosférica pode ser descrita por um modelo que compreende 3 células em cada hemisfério, denominadas como; célula de Hadley, que têm seu ramo ascendente no Equador e descendente a cerca de 30° de latitude; a célula de Ferrel, cujo ramo descendente se localiza a aproximadamente 30° de latitude e ascendente em torno de 60° de latitude; e a célula polar. Este padrão cria regiões

de alta e baixa pressão em superfícies bem específicas ao redor do globo, o que por sua vez gera ventos com características também bem específicas, como os ventos alísios (*Trade winds*), que são ventos úmidos, que ocorrem em baixas latitudes, nas zonas subtropicais; e os ventos de oeste (*Westerlies*), prevalentes em médias latitudes indo de oeste para leste (AHRENS, 2015). Um esquema simplificado do modelo de circulação geral da atmosfera pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema simplificado do modelo de circulação geral da atmosfera. Os ventos alísios (*trade winds*), os de oeste (*westerlies*) e os polares de leste (*polar easterlies*), e as áreas de alta (H) e baixa (L) pressão representadas na figura são referentes à superfície da Terra. Com legenda em inglês, estão indicadas as células de Hadley (*Hadley cell*), de Ferrel (*Ferrel cell*) e Polar (*Polar cell*), a Zona de Convergência Intertropical (ITCZ – *Intertropical Convergence Zone*), a frente polar (*Polar Front*) e a latitude dos cavalos (*Horse latitudes*).

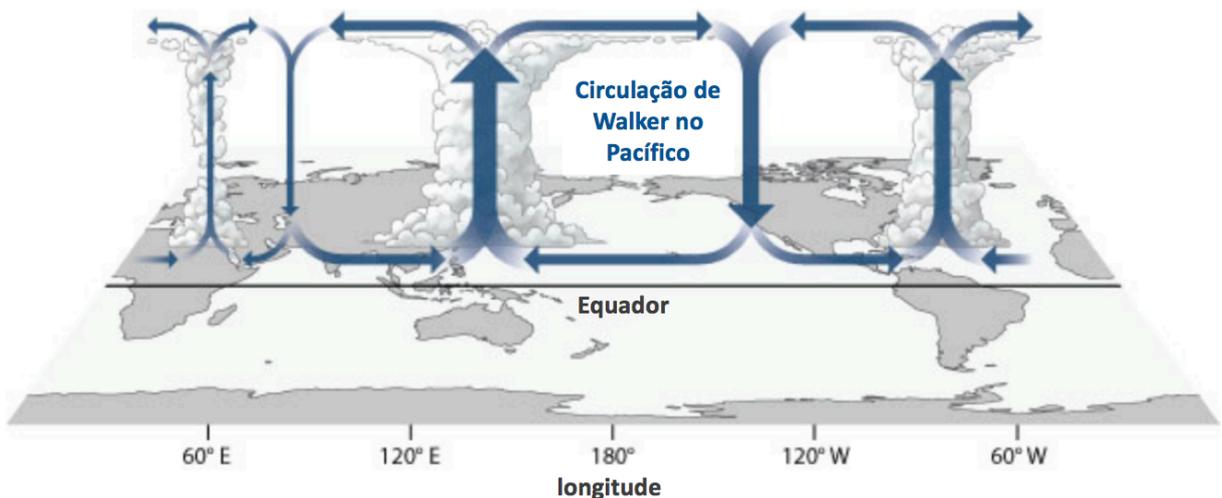


Fonte: Ahrens e Henson (2018)

Além do esquema de circulação geral da atmosfera, existe uma circulação zonal particularmente importante no Equador, denominada circulação de Walker

(Figura 3). Essa circulação foi descrita por Walker e Bliss em 1932, e ocorre devido ao aquecimento que acontece de forma diferencial no continente e no oceano, que por sua vez resulta em variações de pressão (VAREJÃO-SILVA, 2006). Enfraquecimento ou fortalecimento dos alísios, associados a anomalias na temperatura superficial do mar (TSM) do Pacífico Equatorial e anomalias de pressão, que modificam em parte o padrão "normal" da circulação de Walker estão associados a fenômenos conhecidos como *El Niño* e *La Niña*. Enfraquecimento dos alísios, associados a anomalias positivas dos valores de TSM junto à costa do Peru, e valores negativos próximos à costa da Austrália caracterizam eventos de *El Niño* e a situação inversa caracteriza o fenômeno oposto, chamado de *La Niña* (Philander, 1990).

Figura 3 - Esquema simplificado da circulação de Walker, com maior ênfase na célula do Pacífico.



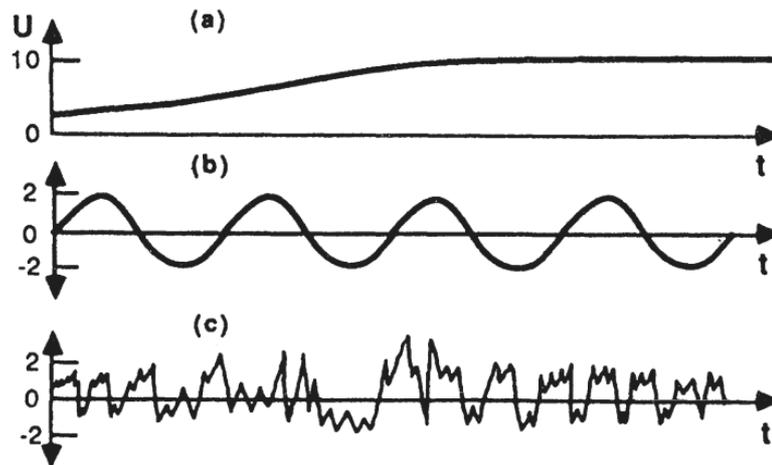
Fonte: National Oceanic and Atmospheric Administration Climate.gov (modificada e traduzida pela autora). Disponível em: <https://www.climate.gov/news-features/blogs/ens0/walker-circulation-ens0-atmospheric-buddy>. Último acesso em: 08/01/2020.

Propriedades locais da superfície podem influenciar de forma significativa o regime de vento de uma região. A camada limite atmosférica (CLA) é a parte da troposfera (primeira camada da atmosfera) na qual o campo de escoamento é fortemente influenciado pela interação direta desta com a superfície e responde às forçantes da atmosfera (ex.: arrasto por atrito, evaporação e transpiração, transferência de calor e modificação de fluxo induzida pelo terreno) em uma escala de poucas horas ou menos (STULL, 1988). Sendo assim, mudanças na ocupação do

solo, ou na superfície do oceano por exemplo, tem efeito direto sobre a velocidade do vento perto da superfície. Em latitudes médias, a CLA tem a espessura de cerca de um quilômetro e, portanto, contém cerca de 10% da massa da atmosfera (HOLTON, 2004).

O vento ainda pode ser dividido em três grandes categorias: vento médio, turbulência e ondas (Figura 4); e todos eles podem existir dentro da CLA. Na CLA, o transporte de umidade, calor, momento e poluentes são dominados na horizontal pelo vento médio (por processo de advecção) e na vertical pela turbulência (STULL, 1988).

Figura 4 – Idealização do: (a) vento médio; (b) ondas; (c) turbulência. Na realidade, ondas ou turbulência são frequentemente sobrepostas a um vento médio. U é o componente do vento na direção x .



Fonte: Stull (1988)

A turbulência pode ser definida de forma generalizada como flutuações irregulares que ocorrem em movimentos fluidos. Um critério utilizado para definir se um escoamento é laminar ou turbulento é o número de Reynolds (Re). O número de Reynolds é uma relação entre a força inercial e a força viscosa, conforme descrito na equação (1), onde V é a velocidade característica do escoamento, L a largura da seção por onde passa o escoamento e ν é a viscosidade do fluido. A turbulência ocorre quando o termo de inércia domina o termo viscoso (elevado Re) (AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, 2012a).

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (1)$$

Entretanto, o número de Reynolds por si só não é capaz de sozinho identificar a natureza do escoamento, uma vez que o mesmo apenas identifica as forças mecânicas atuando sobre ele. O número de Richardson (Ri) por sua vez, é utilizado para determinar a relação entre os termos turbulentos de origem térmica e dinâmica que atuam no fluido (CATALDI, 2002). O número de Richardson (Ri) é calculado pela equação (2), onde θ_v é a temperatura potencial virtual, z é a altura, g é a aceleração da gravidade e U e V são as componentes do vento (STULL, 1988).

$$Ri = \frac{\left(\frac{g}{\theta_v}\right) \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z}}{\left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial z}\right)^2} \quad (2)$$

O número crítico de Richardson, Ri_C , é de aproximadamente 0.25 e o fluxo é dinamicamente instável e turbulento quando $Ri < Ri_C$ (AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, 2012b). Em casos de estabilidade (Ri positivo) o empuxo age contra a energia cinética turbulenta. Em contrapartida, em uma CLA instável (Ri negativo), a convecção relacionada com a turbulência de origem térmica se mantém. Em condições de uma CLA neutra, o número de Richardson é igual a zero e, portanto, tanto os efeitos térmicos quanto os efeitos de empuxo podem ser ignorados (CATALDI, 2002).

A camada limite atmosférica marinha (CLAM) funciona como interface onde o oceano e a atmosfera trocam constantemente informações na forma de fluxos como água, gases e energia na forma de momento e calor, sendo o vento, junto com as correntes e as ondas de superfície alguns dos principais moduladores desses fluxos (VILLAS BÔAS *et al.*, 2019). Esses fluxos são turbulentos e dependem de termos não lineares e variáveis, o que significa que erros aleatórios em variáveis *bulk*¹ podem causar erros significativos mesmo em campos médios em grande escala (BOURASSA

¹ O termo *bulk* se refere a grandezas que são obtidas de forma aparente, ou seja, em relação a uma outra. A premissa básica do conceito de parametrizações *bulk* é relacionar os fluxos da camada superficial aos perfis logarítmicos das quantidades médias. Os fluxos podem então ser determinados a partir do vento médio, temperatura e umidade em uma única altura, introduzindo coeficientes de transferência *bulk* de calor, umidade e momento (BAUM, 2004).

et al., 2013). Os fluxos turbulentos, especialmente os de energia, serão melhor descritos na seção 2.1.2.

2.1.2 Interface Oceano - Atmosfera

A força da atmosfera na superfície subjacente pode ser exercida de duas maneiras diferentes; como força exercida sobre as irregularidades na superfície associadas às diferenças de pressão entre as irregularidades, ou por tensão viscosa, aquela que se deve ao movimento relativo das partículas de fluido e a viscosidade (propriedade física que caracteriza a resistência de um fluido ao escoamento). As irregularidades sobre as quais as forças são exercidas podem variar em tamanho, desde cadeias de montanhas como os Andes, até lâminas de grama e ondas na superfície do oceano. Quando as irregularidades são pequenas o suficiente (como é o caso do oceano), a força associada por unidade de área adicionada ao estresse viscoso é chamada de estresse superficial, ou tensão do vento, sendo essa transferência de momento na interface ar – mar responsável em grande parte por impulsionar a circulação do oceano superior (GILL, 1982).

Kara *et al.* (2007), ressaltam que essa tensão exercida pelo vento (τ) é tipicamente obtida a partir de parametrizações do tipo *bulk* que estimam fluxos turbulentos a partir de dados meteorológicos e é, entre outros fatores, importante para modelagem, previsão dos oceanos e estudos climáticos. Ela pode ser calculada segundo a equação (3), onde ρ_a é a densidade do ar, C_D é o coeficiente de arrasto e U_{10} a velocidade do vento medido a 10 m de altura.

$$\tau = \rho_a C_D U_{10}^2 \quad (3)$$

Entretanto, nem sempre o vento é medido a 10 m de altura (ex.: boias, navios e plataformas). A velocidade do vento é normalmente assumida na camada limite atmosférica, por analogia com o fluxo de fluido sobre a parede sólida, ou seja, velocidade aumentando de forma aproximadamente logarítmica com a altura (equação 4, onde u_* é a velocidade de atrito na parede). A grande diferença com a parede sólida, no entanto, é que a rugosidade da superfície adjacente se dá por conta das ondas geradas pelo vento, que são móveis e crescem, e conforme elas crescem, elas estão mudando o próprio vento que as está gerando (BABANIN; MCCONOCHIE;

CHALIKOV, 2018). A variação de um perfil log depende muito da estabilidade atmosférica, sendo assim, o cálculo do ajuste de altura requer conhecimento da estratificação do ar perto da superfície, para fornecer uma estimativa da velocidade do vento de 10 m (a velocidade do vento que teria sido medida se o sensor estivesse realmente a 10 m de altura).

$$\vec{U}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (4)$$

A estabilidade ou instabilidade atmosférica referem-se à estratificação do ar perto da superfície, sendo assim, uma estratificação estável reduzirá a mistura (e o estresse superficial) e uma estratificação instável aumentará a mistura. Quando falamos sobre estabilidade do ar, nos referimos a uma condição de equilíbrio, de forma simplificada, quando a diferença de temperatura entre o ar próximo à superfície e o ar em camadas superiores é relativamente pequena (AHRENS; HENSON, 2018). Se a estabilidade atmosférica é desconhecida, um ajuste aproximado pode ser feito assumindo que a estratificação da atmosfera é neutra (equação 4). Esta abordagem fornece uma aproximação para a velocidade do vento a 10 m dependente da estabilidade (KENT; FANGOHR; BERRY, 2013). Em muitos casos, especialmente com observações provenientes de sensoriamento remoto, não é possível determinar a estratificação atmosférica antes de considerar um ajuste de uma observação pontual na superfície.

Existem dois conceitos principais de atmosfera neutra. O mais comumente utilizado é o de Geernaert e Katsaros (1986), que diz que a velocidade equivalente do vento neutro é a velocidade média do vento que seria observada se houvesse estratificação atmosférica neutra. Nessa definição, assumimos que todos os parâmetros atmosféricos são mantidos constantes. Liu e Tang (1996) afirmam que, para ventos moderados e fortes em mar aberto, quando a produção de cisalhamento domina a produção de turbulência, o efeito da estratificação atmosférica é geralmente pequeno, mas a condição exatamente neutra da atmosfera é rara. Os mesmos autores, portanto, calculam a velocidade do vento usando o comprimento de tensão e rugosidade consistente com a estratificação atmosférica observada, mas definindo o termo de estratificação atmosférica no perfil log-vento modificado igual a zero. Entretanto, medições precisas do estresse superficial próximo à água são muito mais

difíceis e custosas do que as observações da velocidade do vento, e por esta razão, esta é uma definição pouco utilizada.

O coeficiente de arrasto (C_D) é outra variável complexa em relação ao cálculo de transferência de momento. O coeficiente de arrasto é, em princípio, uma função não linear da velocidade do vento, estabilidade atmosférica e estado do mar (PRAVEEN KUMAR *et al.*, 2012). Perto da superfície do oceano, a velocidade do vento tipicamente diminui com a altura devido ao arrasto exercido na atmosfera pelo oceano (KENT; FANGOHR; BERRY, 2013). Kara, Hurlburt e Wallcraft (2005) ressaltam que o uso de um C_D impreciso no cálculo da tensão do vento (e outros coeficientes de troca nos cálculos de fluxo de calor sensível e latente) podem resultar em sérios erros (da ordem de 5 - 25%). Os mesmos autores demonstram que ignorar os efeitos do fluxo de vapor de água na parametrização do C_D por exemplo, pode resultar em um valor de tensão de vento que é 6 vezes menor do que seu valor real em velocidades de vento muito baixas, especialmente em regiões tropicais. É importante destacar que variações no vapor d'água além de influenciar diretamente nos fluxos na interface oceano-atmosfera, também mudam a viscosidade do meio e por isso essa variável exerce um papel importante nas parametrizações. Esses efeitos são minimizados quando calculados parâmetros em escalas climatológicas, entretanto, especialmente em escalas de tempo menores é necessária uma parametrização que leve em conta a estabilidade da atmosfera no cálculo.

O estresse do vento (τ) representa um tensor de considerável importância para a atmosfera e uma força motriz de grande importância para o oceano. Ele produz uma resposta imediata na camada mais superior do oceano, que geralmente possui uma profundidade entre 10 e 100 m, chamada de transporte de Ekman. Por ser diretamente dependente do vento, mudanças súbitas desse parâmetro podem causar oscilações no transporte de Ekman, assim como variações espaciais desse parâmetro resultam diretamente em variações espaciais do transporte e, portanto, convergências e divergências (GILL, 1982).

O equilíbrio de forças na camada superficial do oceano se dá entre a força de atrito que transporta o momento para baixo e a força de Coriolis. Devido ao atrito, a energia transmitida pelo vento como velocidade diminui com a profundidade, até o atrito ter dispersado completamente o momento transferido pelo vento. A força de

Coriolis por sua vez, atua perpendicularmente ao movimento da água, se opondo ao estresse do vento. Se as flutuações de períodos menores que um dia são eliminadas, verifica-se que a componente de transporte gerado pelo vento integrado nessa parcela de água é direcionada perpendicularmente ao estresse médio do vento, a direita no HN e a esquerda no HS. Como o parâmetro de Coriolis é inexistente no Equador (se anula a força centrípeta), esses processos só ocorrem a partir de cerca de 2° de latitude (TOMCZAK; GODFREY, 2002).

Além do fluxo de momento, os fluxos de calor sensível e latente entre o oceano e a atmosfera são vitais para o balanço energético do planeta e também têm efeitos sobre a estabilidade da CLA. O fluxo de calor sensível é aquele gerado pela diferença de temperatura entre o oceano e a atmosfera. Além da diferença de temperatura, este fluxo é influenciado diretamente pela velocidade do vento; ventos mais fortes e grandes diferenças de temperatura resultam em altos fluxos de calor sensível (SATO, 2009), uma vez que o vento contribui para a perda de calor e consequente manutenção de um maior diferencial de temperatura. Em média esse fluxo é do oceano para a atmosfera, com calor sendo cedido da camada mais superficial da água para o ar (SWART *et al.* 2019).

O fluxo de calor latente, por sua vez, é aquele associado a mudanças de fase da água, neste caso, evaporação e precipitação. O fluxo de calor por evaporação é a maior componente de perda de calor nos oceanos, e, uma vez que o estado médio da atmosfera é não saturado, ou seja, a umidade relativa é menor do que (matematicamente) 100%, existe uma tendência de o oceano contribuir para o aumento da umidade do ar (SATO, 2009). A mesma autora ainda afirma que fluxo de calor latente também é diretamente afetado pela velocidade do vento; ventos fortes e ar seco propiciam maior evaporação de água do que ventos fracos combinados com umidade relativa próxima a 99%.

Os fluxos de calor sensível e latente também podem ser calculados por fórmulas *bulk*. São elas as equações (5) e (6) respectivamente, nas quais, ρ é a densidade, U_{10} a velocidade do vento medido a 10 m de altura, C_P é o calor específico da água, C_H o coeficiente de troca turbulenta de calor sensível em função da estabilidade e da altura, t_s é a temperatura superficial do mar, θ a temperatura potencial do ar, L_E é o calor latente de evaporação, C_E o coeficiente de troca de calor

latente em função da estabilidade e da altura e q_s e q_a são respectivamente as umidades específicas na superfície do mar e do ar.

$$Q_S = \rho C_P C_H U_{10} (t_s - \theta) \quad (5)$$

$$Q_L = \rho L_E C_E U_{10} (q_s - q_a) \quad (6)$$

Liu, Katsaros e Businger já em 1979 discutiam que alguns parâmetros nas fórmulas dos fluxos de calor, como C_H e C_E , são menos conhecidos se comparados ao C_D , por exemplo, e muitas vezes são tratados como constantes. Swart *et al.* (2019) ainda afirmam que o fluxo do momento (estresse do vento) é melhor determinado em um sentido climatológico do que os fluxos de calor, porque além de ser uma função com um menor número de variáveis, estas são determinadas com mais facilidade e são razoavelmente bem estimadas a partir de observações de satélite.

Nas ciências da natureza, as descobertas e entendimento da física vem, não apenas de experimentos e modelagem, como também da observação dos fenômenos da natureza. Sendo assim, plataformas para aquisição de dados *in situ* sempre foram primordiais na ciência. Além disso, o advento de plataformas de sensoriamento remoto vem contribuindo positivamente nos últimos anos para o aumento da observação da natureza.

2.2 PLATAFORMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE VENTO

Dados de vento sobre o oceano podem ser obtidos por plataformas que medem diretamente essa variável *in situ*, como boias, navios e plataformas de petróleo; por meio de sensoriamento remoto, com o uso de equipamentos como altímetros e escaterômetros; e também podem ser derivados de modelos numéricos. Neste trabalho foram utilizados dados provenientes de boias, escaterômetros e de reanálise. Os próximos tópicos dessa sessão, portanto, descrevem e caracterizam as plataformas de aquisição de dados de vento utilizadas por este trabalho.

2.2.1 Boias

Embora as medições da velocidade do vento possam inicialmente ser consideradas como a realidade em superfície, há dificuldades consideráveis em fazer medições de longo prazo a partir de boias, incluindo proximidade com a superfície do mar, movimentos de boia induzidos por ondas e o efeito de abrigo² causado por elas, limitações de energia, além dos impactos causados por mudanças na instrumentação e na estrutura da boia durante os períodos de registro de dados (KENT; FANGOHR; BERRY, 2013).

A elevação de 10 m é rotineiramente aceita como altura padrão³, de maneira que as medições realizadas pelas boias precisam ser transformadas para esta altura de referência, geralmente com a suposição de um perfil de camada limite logarítmica e uma suposta rugosidade superficial ou coeficiente de arrasto. Esse processo, por sua natureza, introduz incerteza sobre a forma do perfil da camada limite e o valor do coeficiente de arrasto (ZIEGER; BABANIN; YOUNG, 2014). Em condições mais extremas, quando o mastro do anemômetro está dentro da Camada Limite da Onda ou mesmo abaixo das cristas de onda, o equilíbrio das tensões turbulentas muito próximas da superfície é modificado pelas ondas de superfície, portanto, tais extrapolações podem introduzir vieses ainda mais significativos (BABANIN; MCCONOCHIE; CHALIKOV, 2018).

Grandes programas internacionais são responsáveis pelo entendimento da física e dos processos da natureza. No oceano tropical existe um esforço multinacional para fornecer dados em tempo real para pesquisas e previsões climáticas. Esse esforço teve início com o *Tropical Ocean Global Atmosphere* (TOGA), que durou de 1985 a 1994 e teve como um dos maiores feitos, a implantação do sistema de medição *in situ Tropical Atmosphere Ocean* (TAO/TRITON) no Pacífico, cujo foco de estudos é o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) (MCPHADEN *et al.*, 1998), e encontra-

² Quando o mar se torna completamente desenvolvido, ou seja, o estado do mar em que se desenvolveram as ondas máximas correspondentes à força do vento atuante, espera-se que as ondas tenham um impacto de primeira ordem na troca de momento. Mesmo que não impactem fortemente a forma do perfil de vento, as ondas impactam fortemente as condições no limite inferior do perfil de vento (ex.: o comprimento da rugosidade) (Edson *et al.*, 2013).

³ A elevação de 10 m é a altura média no oceano quando o escoamento sai do regime turbulento para o laminar. Entretanto, para que essa altura pudesse ser determinada com precisão, seriam necessários experimentos que ainda não foram desenvolvidos, especialmente em situações de mar totalmente desenvolvido (PIERSON JUNIOR, 1990).

se em funcionamento até hoje. Atualmente, segundo o *Pacific Marine Environmental Laboratory* (PMEL), além do TAO, o oceano equatorial é também monitorado através do *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA) no Atlântico, que busca estudar principalmente o dipolo inter-hemisférico, eventos quentes equatoriais e atividade de furacões no Atlântico; e o *Research Moored Array for African-Asian-Australian Monsoon Analysis and Prediction* (RAMA) no oceano Índico, cujo principais eventos observados incluem as monções, o dipolo do oceano Índico e a variabilidade intrassazonal desse oceano.

Tendo em vista que a região foco do presente estudo é o oceano Atlântico tropical, será apresentado a seguir uma caracterização mais detalhada do programa PIRATA, cujos dados foram utilizados neste trabalho.

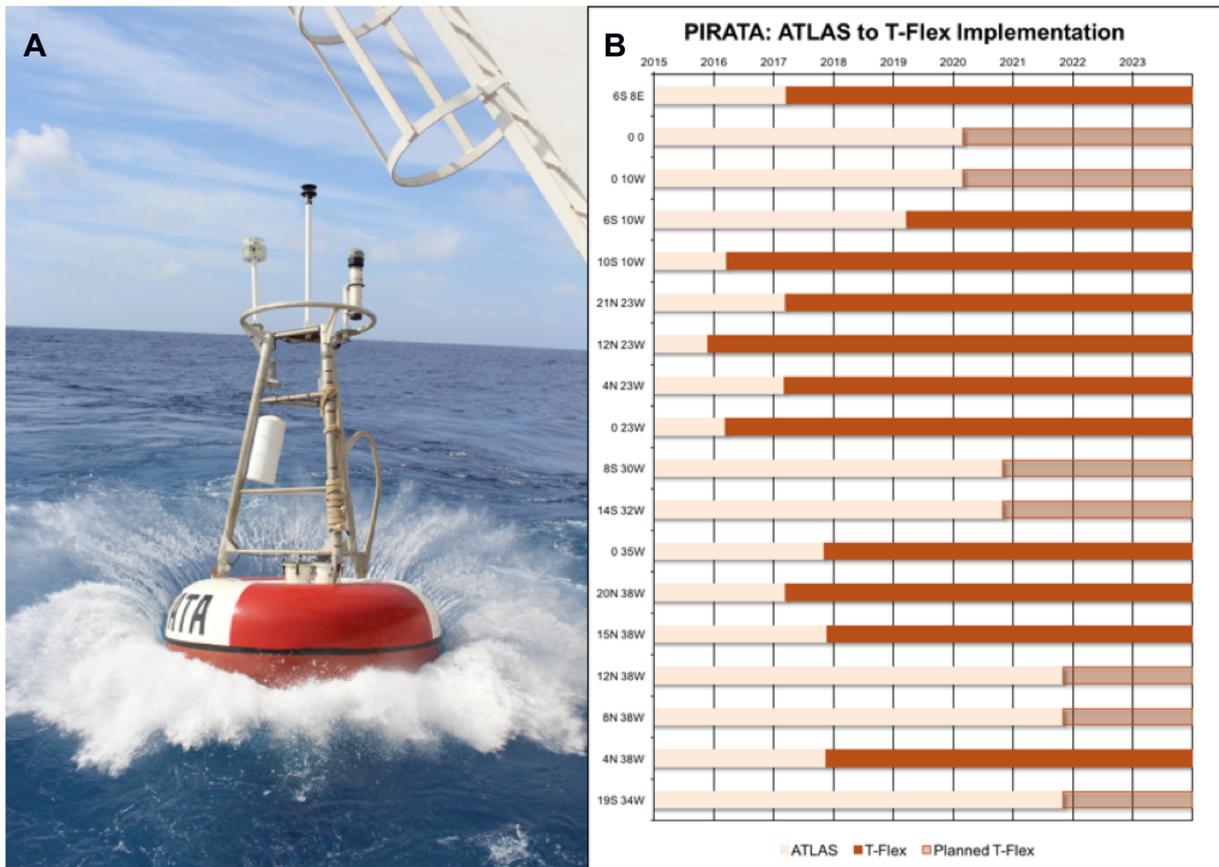
2.2.1.1 Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA)

O PIRATA é um programa iniciado em 1997, desenvolvido como uma rede de observação multinacional pelo Brasil, França e Estados Unidos com o intuito de melhorar o nosso conhecimento e compreensão da variabilidade oceano-atmosfera no oceano Atlântico tropical (BOURLÈS *et al.*, 2008). O PIRATA consiste em uma rede de boias fundeadas que fornecem dados meteorológicos e oceanográficos transmitidos em tempo real para tratar de questões científicas fundamentais, bem como das necessidades da sociedade (BOURLÈS *et al.*, 2019). Atualmente, são 18 posições geográficas contempladas pelo projeto, todas em alto mar, longe dos efeitos de turbulência causados pelo continente, onde em princípio deveriam ter boias funcionando de forma contínua.

As boias do projeto PIRATA são dos modelos ATLAS e T-Flex (Figura 5A), sendo que o primeiro modelo vem sendo, desde 2015, gradualmente substituído pelo segundo, conforme cronograma mostrado na Figura 5B. A principal diferença entre as boias, segundo Freitag, Mcphaden e Connell (2018), é que a unidade de controle eletrônico da ATLAS (CPU, memória, baterias e transmissor) é montada na torre, enquanto que na T-Flex é montada na boia para melhor proteção contra vandalismo e os elementos do tempo. Os dois modelos de boia medem a velocidade do vento à 4 m de altura e a temperatura e a umidade relativa do ar à 3 m de altura; entretanto, ocorreram modificações em alguns instrumentos na T-Flex, o que resultou em

melhorias na precisão e aumento da frequência de aquisição dos dados. O anemômetro, de forma mais específica, foi trocado por um modelo sônico.

Figura 5 - A) Lançamento de boia PIRATA do modelo T-Flex na XVIII Comissão PIRATA-BR. B) Cronograma para substituição das boias ATLAS pelo modelo T-Flex.



Fonte: A) Foto do arquivo pessoal da autora (2018). B) PMEL – NOAA. Disponível em: <https://www.pmel.noaa.gov/gtmba/pirata-t-flex-implementation>. Último acesso em: 25 de julho de 2019.

Freitag, Mcphaden e Connell (2018) ainda descrevem em seu trabalho o processo de testes e comparações realizadas entre os dois modelos de boias. Foram implantados oito pares de teste ATLAS/T-Flex entre março de 2011 e dezembro de 2015, quatro na região do RAMA e quatro na região do PIRATA. Nesse estudo, as diferenças médias dos vários sensores ATLAS e T-Flex foram convertidas em uma única métrica, onde um valor de $\sqrt{2}$ ou menos indicava que as diferenças estavam dentro das precisões esperadas do sensor. A média e o erro médio quadrático atenderam ao critério para todos os tipos de sensores. Em relação especificamente

aos dados de vento, em todos os pontos de teste, o vento característico foi considerado moderado, com médias entre 5 e 7 m/s. O erro médio entre as duas boias não foi maior que 4.2% para a velocidade e 7° em média na direção do vento. Os coeficientes de correlação, tanto para velocidade como para direção do vento foram 0.99 ou 1 em todos os casos. Todas essas métricas demonstram que a troca das boias não diminuirá a qualidade dos dados, mantendo a consistência da série desses programas de monitoramento.

2.2.2 Satélites

Os escaterômetros são sensores de micro-ondas ativos, ou seja, que trabalham na faixa de 3×10^{11} a 3×10^9 Hz e possuem sua própria fonte de radiação eletromagnética (DPI/INPE, 2006), usados para determinar a velocidade e direção do vento sobre a água. À medida que o satélite avança em sua órbita, o escaterômetro mede a força dos sinais retornados, denotados σ_0 , de cada local em vários ângulos diferentes (LIU; TANG, 1996), e que varia com a velocidade do vento, direção do vento em relação ao azimute da antena, ângulo de incidência, polarização e frequência utilizada pelo radar (CHELTON; FREILICH, 2005). Estes retroespalhamentos são usados para determinar a direção do vento e a velocidade equivalente do vento neutro a 10 m.

Apesar de a taxa de amostragem de satélites em pontos específicos poder ser baixa devido as suas faixas orbitais⁴ (CAMPOS; GUEDES SOARES, 2016), os dados de vento medidos usando escaterômetros podem fornecer uma ampla gama de dados homogêneos para a velocidade e direção do vento na superfície do mar, e com um tempo de revisita relativamente rápido (KAMEDA; KUTSUWADA, 2017), especialmente quando levamos em conta a sua cobertura espacial. Essa densidade temporal, contudo, não é suficiente para estudos que necessitam de escalas menores que a diária. Além disso, devido a acurácia dos sensores, os dados oriundos de satélite são menos confiáveis quando próximas a costa (KAMEDA & KUTSUWADA, 2017) devido ao efeito de mascaramento que a terra exerce (sinal retornado é muito

⁴ Os satélites apresentados nessa sessão estão em orbitas polares do tipo baixa, ou seja, próximas da Terra (~800 km), em inglês *Low Earth Orbit* (LEO), que permite uma resolução espacial mais fina, porém faz com que o equipamento passe por um mesmo ponto apenas 2 vezes por dia (exceto nos polos).

maior que o do oceano) (CÁCERES-SOTO *et al.* 2020), o que também limita a sua utilização. Outra grande desvantagem desses esforços que usam produtos de dados de satélite é o seu tempo de vida limitado, já que a maioria das missões de satélite dura cerca de 10 anos ou menos (PRAVEEN KUMAR *et al.*, 2012).

Os escaterômetros respondem às características da superfície, que são uma função do estresse superficial do vento. Assim, os ventos do escaterômetro são ajustados de maneira consistente com a observação do estresse. Esses ventos, denominados ventos neutros equivalentes, são calibrados para estimar a tensão correta com uma densidade do ar e um coeficiente de arrasto neutro (aquele determinado assumindo que a atmosfera é neutra) (DUKHOVSKOY *et al.*, 2017). Os valores do vento do escaterômetros são ventos neutros em um nível de referência de 10 m.

A principal vantagem desses sensores é que a radiação de micro-ondas emitida ou refletida da superfície da Terra e das camadas inferiores da atmosfera é apenas minimamente influenciada por nuvens não precipitantes (WINTERFELDT, 2008). Entretanto, nem escaterômetros nem sensores de micro-ondas passivos podem recuperar o vento na presença de chuva, e chuva não detectada pode resultar em grandes vieses nas medições. As medições dos escaterômetros são mais afetadas na banda chamada de “Ku” (ex. QuikSCAT - 13.4 GHz) do que na banda chamada de “C” (ex. ASCAT - 5.255 GHz, ERS1 e ERS2 - 5.3 GHz), fato este que é compensado pela maior sensibilidade direcional e de velocidade do vento do retroespalhamento da banda Ku. Quando há chuva, o retroespalhamento de banda Ku é afetado pelas gotas de chuva que modificam a rugosidade da superfície do mar e também pelos efeitos da dispersão e absorção causados pelas gotas de chuva na atmosfera (CHELTON; FREILICH, 2005).

A seguir estão detalhadas algumas das principais missões de satélites equipados com escaterômetros⁵:

⁵ As missões apresentadas no texto foram aquelas utilizadas pelo presente trabalho. Outras missões importantes como os satélites europeus ERS-1 e ERS-2 não serão descritas.

2.2.2.1 Quick Scatterometer (QuikSCAT)

Uma das missões mais bem-sucedidas e amplamente utilizadas é o QuikSCAT, cuja órbita sincronizada ao sol permitiu que ele amostrasse 90% do oceano global diariamente (SCHLAX; CHELTON; FREILICH, 2001). Segundo o *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), o satélite QuikSCAT (Figura 6), onde o escaterômetro *SeaWinds* foi instalado, foi lançado em julho de 1999, originalmente planejado como uma missão de 3 anos de “recuperação rápida”, para suprir a repentina falha de outro satélite. A missão superou as expectativas e celebrou seu aniversário de 10 anos, tendo sido encerrada em novembro de 2009 devido a uma falha mecânica. O satélite em questão continua em órbita, sem, entretanto, enviar dados científicos como os de vento.

Figura 6 - Satélite QuikSCAT.



Fonte: JPL - NASA. Disponível em: <https://podaac.jpl.nasa.gov/QuikSCAT>. Último acesso em: 23 de julho de 2019.

O QuikSCAT está a uma altura orbital de 803 km. Esse satélite utiliza uma antena de varredura cônica de feixe duplo que amostra toda a gama de ângulos de azimute durante cada revolução. Medições instantâneas de retroespalhamento são obtidas em ângulos de incidência fixos de 46° e 54° , e cada medição de σ_0 é elíptica com dimensões do eixo maior de 35 km e do menor de 25 km (CHELTON; FREILICH,

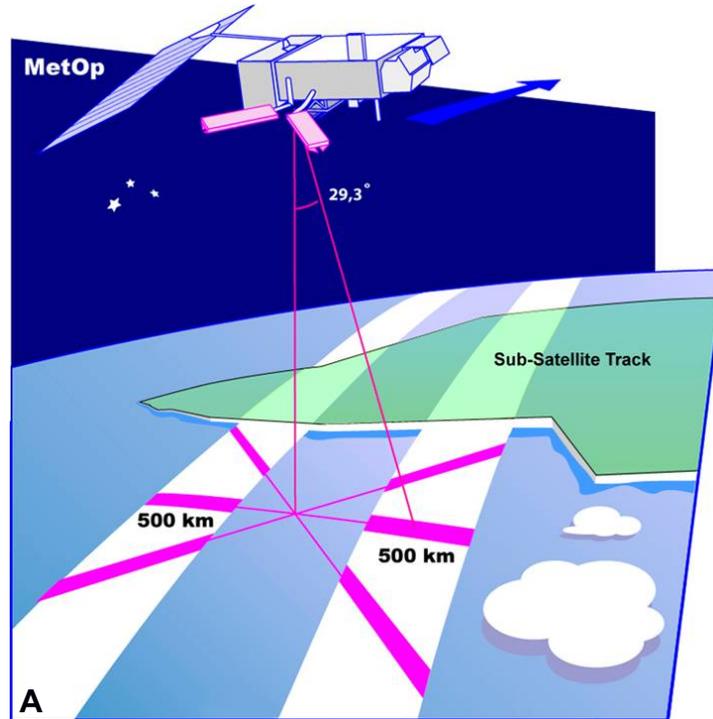
2005), o que permite amostragens de 25 x 25 km ou 12.5 x 12.5 km dependendo da polarização.

2.2.2.2 *Advanced Scatterometer (ASCAT)*

O *Advanced SCATterometer (ASCAT)* é um dos instrumentos transportados a bordo dos satélites polares Meteorológicos Operacionais (Metop), lançados pela Agência Espacial Europeia (*European Space Agency - ESA*) e operados pela Organização Europeia de Exploração de Satélites Meteorológicos (*European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites - EUMETSAT*) (SAF; EUMETSAT, 2018). O Metop-A, primeiro de uma série de 3 satélites foi lançado em 19 de outubro de 2006, o Metop-B foi lançado em 17 de setembro de 2012 e o Metop-C em 7 de novembro de 2018, o que faz que a EUMETSAT esteja operando simultaneamente três *Metop-Satellites* espaçados cerca de 120° em torno de sua órbita, fato este que deve continuar até 2022, quando espera-se que o Metop-A seja retirado de órbita (EUMETSAT, 2018).

Os satélites são equipados com dois conjuntos de três antenas que são usados para gerar feixes de radar em um ângulo de 45° para a frente, para os lados e para trás em relação à direção de voo do satélite, em ambos os lados da projeção da via terrestre do satélite. Esses feixes imageiam faixas de aproximadamente 500-550 km de largura, separadas por cerca de 700 km, à medida que o satélite se move ao longo de sua órbita, e cada uma fornece observações sequenciais do coeficiente de retroespalhamento de cada ponto de interesse em uma grade elíptica de 25 ou 12,5 km, sendo as três direções necessárias para resolver a ambiguidade da direção do vento (SAF; EUMETSAT, 2018). O desenho esquemático desse arranjo pode ser observado na Figura 7A e um exemplo da área imageada em um dia pela passagem do ASCAT pode ser observada na Figura 7B. Além disso, as principais características do Metop-A em comparação com o QuikSCAT foram resumidas no Quadro 1.

Figura 7 – A) Ilustração dos satélites MetOp e da amplitude do feixe de aquisição dos dados. B) Exemplo da área imageada em 1 dia pelo Metop-A.



Fonte: EUMETSAT. Disponível em:
<https://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Metop/MetopDesign/ASCAT/index.html>. Último acesso em: 23 de julho de 2019.

Quadro 1 – Principais diferenças entre os satélites QuikSCAT e ASCAT (Metop - A).

	QuikSCAT	ASCAT (Metop - A)
Agência Responsável	NASA	ESA
Período de Operação	ago/1999 - nov/2009	maio/2007 - presente
Altura Orbital	803 km	837 km
Banda	Ku (13.4 GHz)	C (5.255 GHz)
Inclinação	98.616°	98.7°
Faixas (swath)	1800 km	2 de 550 km
Polarização	HH/VV	VV
Período orbital	14.25 orbitas / dia	14.21 orbitas / dia
Horário local Equador (LTAN) (nó ascendente)	6:00 ± 30 min	21:30
Repetição do ciclo orbital	4 dias / 57 órbitas	29 dias / 412 órbitas
Grade	12.5 x 12.5 ou 25 x 25 km	12.5 x 12.5 ou 25 x 25 km

2.2.3 Reanálises

Reanálises são uma alternativa interessante para análises das variações do vento. Elas têm a vantagem de alta resolução de tempo-espaco, longa duração e grandes domínios de grade. Elas incorporam observações de uma ampla gama de plataformas, enquanto implementam modelos avançados de previsão numérica do tempo e técnicas de assimilação de dados para consistência, melhorando sua homogeneidade (CAMPOS; GUEDES SOARES, 2016), mas esses mesmos produtos têm incertezas inerentes que derivam de simplificações dos modelos, dos procedimentos de assimilação de dados, assim como de incertezas observacionais (RAMON *et al.*, 2019).

Em relação aos dados de vento, Praveen Kumar *et al.* (2012) destacam que um dos grandes benefícios de reanálises é que estas tiram vantagem de qualquer informação relevante, como a pressão através da relação geostrófica, para estimar a velocidade do vento. As reanálises ainda usam um sistema de assimilação de dados que reúne os dados, *in situ* e de sensoriamento remoto, com o modelo de maneira estatisticamente ideal (BORSCHKE; KAISER-WEISS; KASPAR, 2016). Entretanto, muitas fontes de erros e incertezas podem emergir de todo o processo, uma vez que o erro na modelagem do vento depende de muitas variáveis distintas, por exemplo, o

sistema meteorológico, a intensidade, a latitude e a localização, a estação e o próprio modelo, em diferentes escalas temporais e espaciais (CAMPOS; GUEDES SOARES, 2016).

Dentre as diferentes reanálises atualmente disponíveis, devido a facilidade na obtenção dos dados, somados a sua melhor performance quando comparados a outros produtos (ex.: BELMONTE RIVAS; STOFFELEN, 2019, RAMON *et al.* 2019, TAVARES *et al.* 2020), o ERA5 foi a reanálise escolhida para ser utilizada neste trabalho⁶ e será caracterizada a seguir.

2.2.3.1 ERA5

As reanálises do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) são muito populares e utilizadas em diversos estudos (ex. CAMPOS; GUEDES SOARES, 2016, KARA *et al.* 2007, PRAVEEN KUMAR *et al.* 2012, SWART *et al.* 2019, YOUNG; DONELAN, 2018), sendo o ERA-Interim uma das mais amplamente utilizadas; todavia, tal reanálise foi descontinuada em agosto de 2019. Em seu lugar foi lançado o ERA5, que, segundo Hersbach *et al.* (2019) representa uma mudança gradual na qualidade geral e no nível de detalhe das reanálises.

O ERA5 é baseado na assimilação de dados 4D-Var⁷ (*hybrid incremental 4-dimensional variational data assimilation*) usando o Ciclo 41r2⁸ do Sistema Integrado de Previsão (IFS), que já estava operacional no ECMWF desde 2016. Assim, o ERA5 se beneficia de uma década de desenvolvimentos relacionados à física de modelos, dinâmica de núcleo e assimilação de dados, se comparado ao ERA-Interim. Ele possui uma resolução horizontal de 31 km ($\sim 0.25^\circ$), 137 níveis de pressão e frequência horária, desde 1979 até o presente, com previsão de expansão da reanálise até 1950, expansão essa que tem lançamento previsto para meados de 2020. Esse aumento considerável na resolução do ERA5 permite que muito mais detalhes sejam representados no espaço e no tempo (produção horária) (HERSBACH *et al.*, 2018).

⁶ Comparar as diferentes reanálises como o NCEP2, ERA-Interim, CFSR, entre outras não está no escopo deste trabalho.

⁷ Para mais informações: <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2016/16666-part-ii-data-assimilation.pdf>

⁸ Uma descrição mais detalhada sobre o ciclo do modelo pode ser consultada no site: <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/meteorology/new-model-cycle-brings-higher-resolution>

Belmonte Rivas e Stoffelen (2019) destacam em seu trabalho que, quando comparados ao ASCAT, os ventos do ERA5 apresentam melhores resultados se comparados ao ERA-Interim, tanto em termos de erro médio quadrático como também em termos de ventos médios e transientes e divergente do vento. Entretanto, o mesmo trabalho destaca que ambas as reanálises são caracterizadas por ventos zonais médios excessivos, com fluxos médios em direção ao polo muito fracos nas latitudes médias e ventos alísios muito fracos no equador em relação aos dados de satélite (diferenças sistemáticas de até 0.5 m/s nas componentes médias). Ramon *et al.* (2019) também comparou o vento em superfície desta reanálise a outras, como o ERA-Interim e NCEP *Reanalysis* 1; e Tavares *et al.* (2020) comparou essa mesma reanálise, o CFSR e o MERRA2 a dados de boias do Programa Nacional de Boias (PNBOIA). Ambos os trabalhos demonstraram estatisticamente que o ERA5 apresentou resultados mais satisfatórios quando comparados aos demais produtos. A melhor performance do ERA5 justifica, portanto, a sua utilização no presente trabalho.

As principais diferenças entre o ERA-Interim e o ERA5 estão apresentadas na Quadro 2.

Quadro 2 - Visão geral das características e recursos inovadores do ERA5 em comparação com o ERA-Interim. FCDR significa Registro de Dados Climáticos Fundamentais.

	ERA - Interim	ERA5
Disponível publicamente agora até o final de 2018 até o outono de 2019	1979 - em diante até o meio de 2019 (final)	2000 - em diante 1979 - 1999 1950-1978
Disponibilidade atrás do tempo real	2-3 meses	2-3 meses (produto final) 2-5 dias (ERA5T)
Ciclo do modelo	31r2 (2006)	41r2 (2016)
Assimilação de dados atmosféricos janela para 0, 12 (UTC)	12h 4D-Var (15day-1,03], (03,15]	12h 4D-Var ensemble (21day-1,09], (09,21]
Input do modelo (radiação e superfície)	como em operações, SST e gelo marinho inconsistentes	apropriado para clima, ex., evolução de gases de efeito estufa aerosols, TSM e gelo marinho
Resolução Espacial Ondas oceânicas Resolução interna do loop	79km (TL255) 60 níveis até 10Pa 1 grau TL95, TL159	31km (TL639) 137 níveis até 1 Pa 0.36 grau TL95, TL159, TL255
Modelo Terra - Superfície Assimilação de dados de umidade do solo Assimilação de dados de neve	TESSEL 1D-OI Cressman	HTESSEL SEKF 2D-OI
Estimativa da Incerteza	nenhuma	a partir do ensemble do 4D-Var, 10 membros a 64km (TL319) TL127, loops internos no TL159 ondas oceânicas 1 grau
Frequência da saída	6 horas para análises 3 horas para forecast	horário (incerteza 3 horas)
Parâmetros de saída		lista estendida (ex.: vento a 100m)
Observações extras FCDRs reprocessados	segundo o ERA-40, GTS alguns	instrumentos mais recentes muitos mais
Modelo de Transferência radioativa	RTTOV v7 assimilação em céu claro	RTTOV v11 assimilação parcialmente em todo o céu
Var BC Correções Radiossondas	radiâncias somente RAOBCORE	estendido para ozônio, pressão superficial RISE
Produto dedicado a terra	79km, HTESSEL	9km, HTESSEL

Fonte: Hersbach *et al.* (2018) (traduzido pela autora).

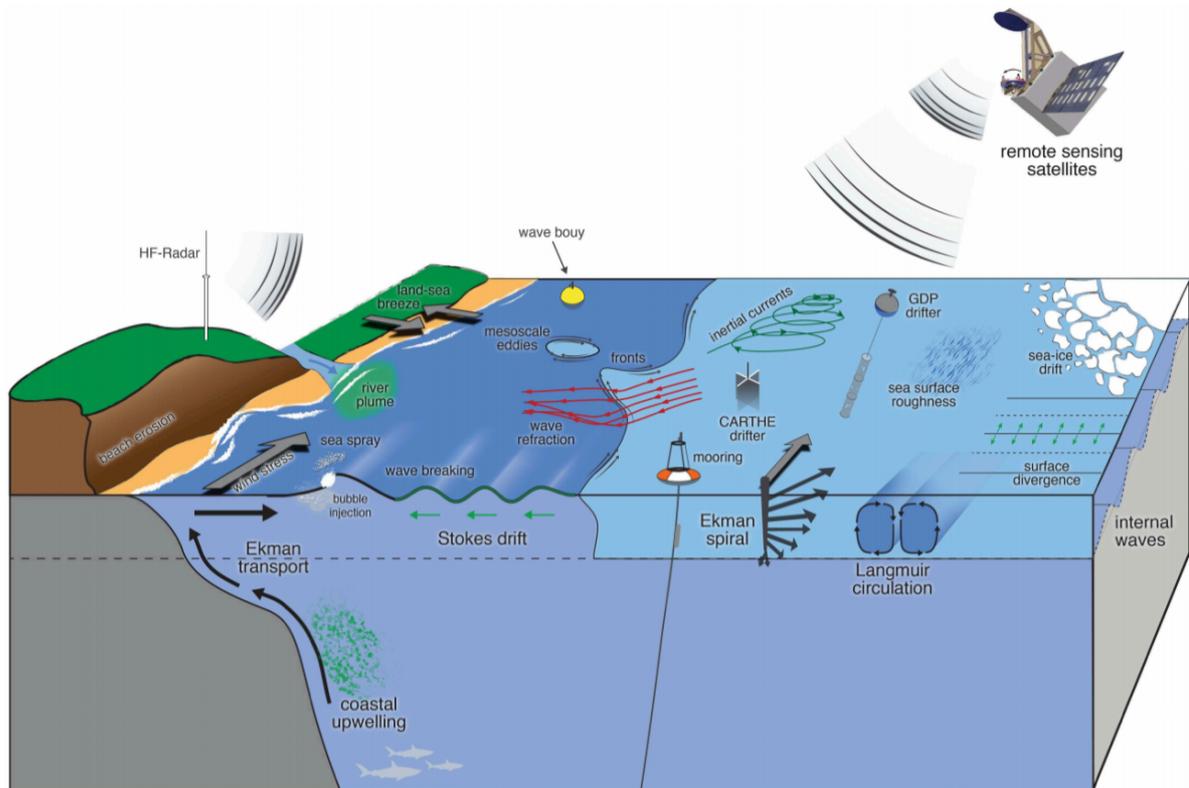
2.2.4 Comparações preliminares entre algumas das plataformas de aquisição de dados de vento sobre o oceano

Os dados provenientes das boias e das reanálises apresentam velocidades de vento referentes à Terra (um ponto fixo, como um ponto de grade), dependentes da estabilidade, ajustadas a um nível de referência de 10 m; os satélites, por outro lado, medem velocidades neutras equivalentes relativas à superfície que é móvel, ajustadas (geralmente assumindo um perfil logarítmico) para um nível de referência de 10 m (CHELTON; FREILICH, 2005, KENT; FANGOHR; BERRY, 2013). Sendo assim, a comparação direta destas duas medidas pode incorrer em erro. O maior problema reside nos ajustes baseados na estabilidade atmosférica, além de que o processo de correção dos dados para a altura padrão de 10 m por si só, já adiciona possíveis erros devido a incerteza sobre a forma do perfil da camada limite e o valor do coeficiente de arrasto (ZIEGER; BABANIN; YOUNG, 2014). Kent, Fangohr e Berry (2013), também destacam as incertezas no ajuste para a estabilidade, como a diferença entre o perfil de vento neutro e o real. No entanto, os mesmos salientam que essas incertezas são menores do que os vieses causados quando esses efeitos são negligenciados.

Outro fator importante a ser levado em consideração é a distância da costa em que os dados são medidos. Os dados de satélites medidos por escaterômetros tem uma menor acurácia quando próximos da costa (KAMEDA; KUTSWADA, 2017). Portanto, dados a menos de 50 km da costa em geral não são utilizados com o propósito de validação de campos de vento. Young, Sanina e Babanin (2017), destacam que além da proximidade da costa, o tamanho das amostras pode influenciar nos resultados. Entretanto, esses autores utilizaram uma base de dados com um número maior de boias de diferentes modelos e em diferentes localidades. Sendo assim, os desvios podem ser uma indicação da precisão da calibração do anemômetro nas boias, ou efeitos da distorção do fluxo em torno de diferentes modelos de boias, ou até mesmo efeito da correção da camada limite. Em conjunto de dados mais homogêneos quanto a localização e modelo de boia utilizado, essas diferenças podem não ser tão significativas.

A Figura 8 apresenta as principais plataformas de aquisição de dados de vento sobre o oceano assim como alguns dos principais processos físicos que ocorrem nessa interface e alguns dos quais podem influenciar de alguma forma na medição dos dados de vento e nos fluxos entre essas superfícies.

Figura 8 – Esquema simplificado dos processos que ocorrem no oceano superior e são acoplados através das interações entre o vento, correntes e ondas. Diversos componentes do sistema de observação também estão ilustrados, incluindo plataformas *in situ* (flutuadores de superfície e boias) e plataformas de sensoriamento remoto (radar de alta frequência e satélites).



Fonte: Villas Bôas *et al.* (2019).

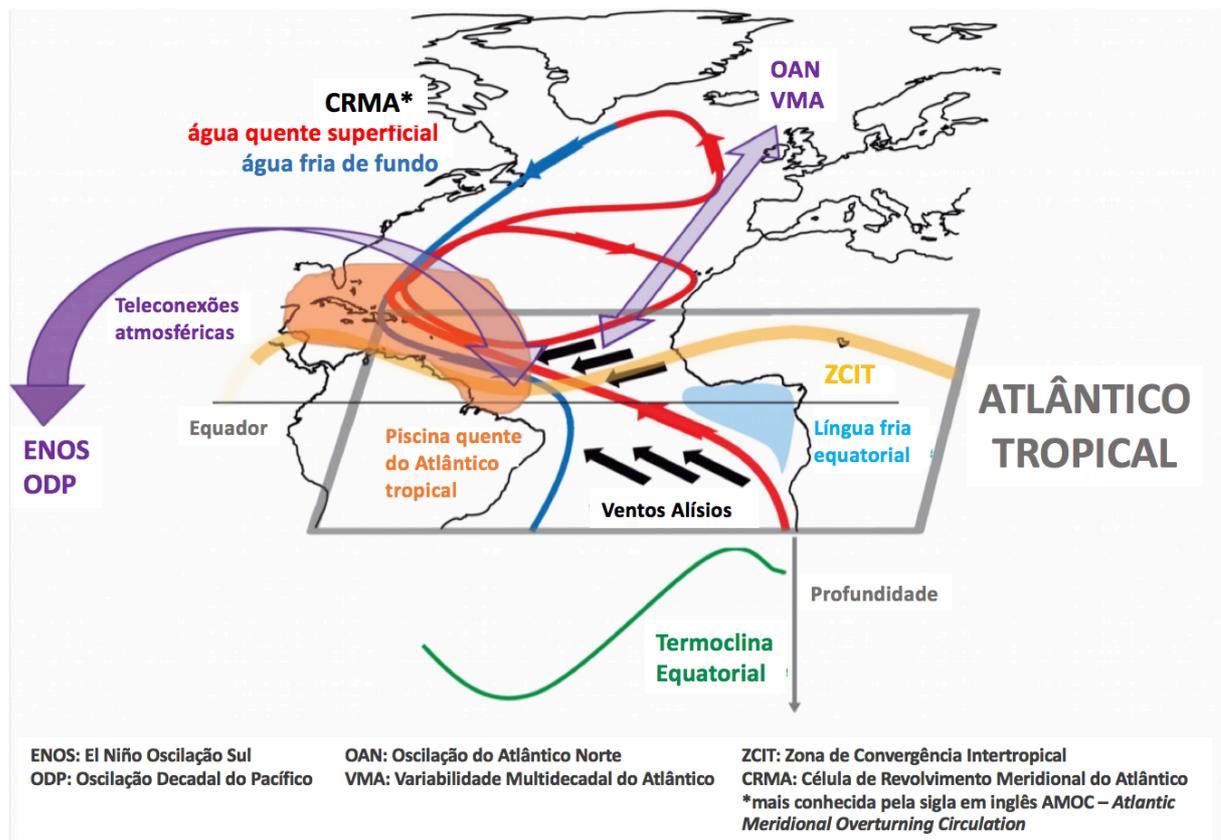
2.3 O ATLÂNTICO TROPICAL

A região equatorial é caracterizada por intensas trocas de massa, energia e momento entre o oceano e a atmosfera. A variabilidade desse sistema no Atlântico tropical, nas diversas escalas de tempo (intrassazonais a multidecadais), influenciam fortemente nas variações regionais das chuvas e, conseqüentemente, apresentam impacto sobre as economias das áreas continentais adjacentes (BOURLÈS *et al.*, 2008). Esta é também uma região que funciona não apenas como um divisor geográfico, mas também como uma região extremamente importante no que tange a processos inter-hemisféricos, como fluxo de calor e água doce.

Em uma escala temporal mais distendida, diversos fenômenos com alto impacto social como secas, inundações, ciclones estão diretamente ligados à variabilidade do Atlântico Tropical (TAV - *Tropical Atlantic Variability*). A TAV, como

mostrado na Figura 9, envolve os diversos fenômenos oceânicos e atmosféricos, além do acoplamento e das interações entre eles, principalmente flutuações na intensidade e direção preferencial dos ventos alísios, temperatura superficial do mar e chuvas, além de forçantes externas significativas como o *El Niño* Oscilação Sul e a oscilação do Atlântico Norte (OAN) (FOLTZ *et al.*, 2019). Ela é ainda dividida na literatura em dois modos, o zonal (AZM - *Atlantic Zonal Mode*) (NOBRE; SRUKLA, 1996), também conhecido como o *El Niño* do Atlântico, que é associado a anomalias de TSM próximas ao equador, atingindo o pico na costa da África; e o meridional (AMM - *Atlantic Meridional Mode*) ou dipolo do Atlântico Tropical, caracterizado por um gradiente norte-sul de TSM e anomalias de vento (STRAMMA; SCHOTT, 1999).

Figura 9 - Esquema dos principais componentes para a compreensão da variabilidade tropical do Atlântico, como os ventos alísios, a zona de convergência intertropical (ZCIT), A célula de revolvimento meridional do Atlântico (AMOC), além de diversos índices climáticos importantes para a variabilidade como a ODP e o ENOS.



Fonte: Foltz *et al.* (2019) (modificada e traduzida pela autora).

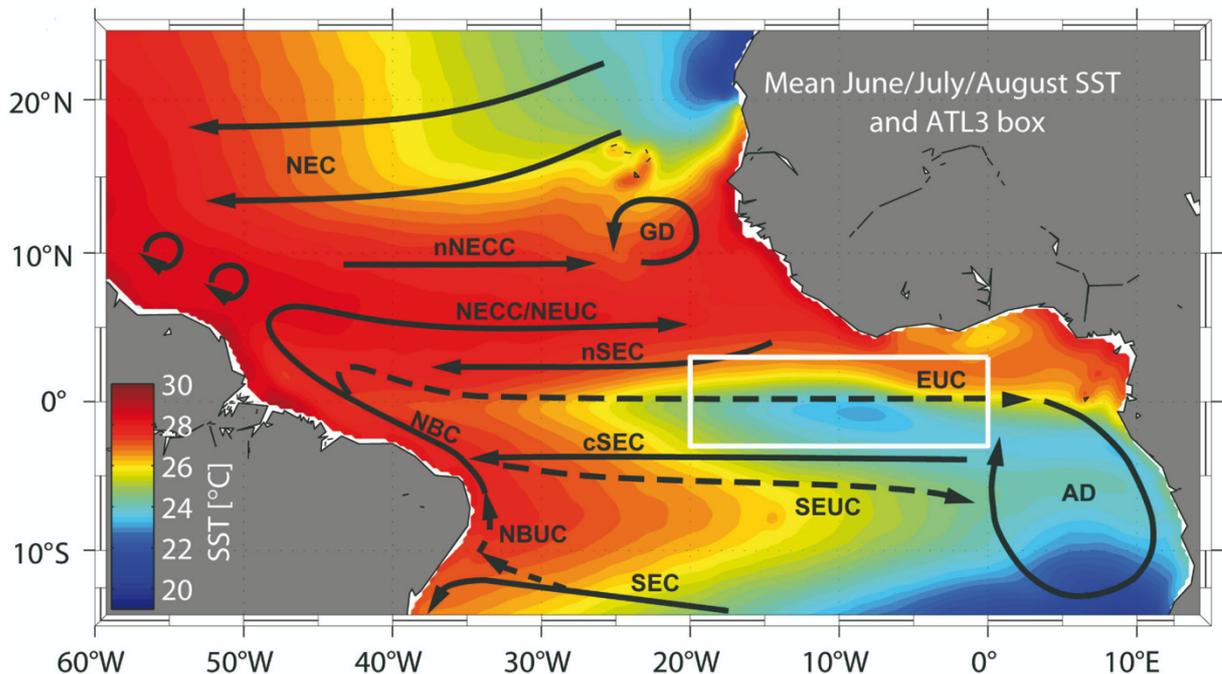
Historicamente o oceano Pacífico é mais estudado por conta dos eventos ENOS, que segundo Zebiak (2013), representam a maior contribuição única para a variabilidade climática interanual a nível mundial. Entretanto, a importância do Atlântico Tropical não pode ser desprezada. Essa é uma região onde ocorrem processos importantes como trocas inter-hemisféricas de calor; formação dos grandes furacões e tempestades tropicais que impactam de forma severa o golfo do México, Caribe e Estados Unidos, entre outros processos.

Do ponto de vista atmosférico, o AT é predominantemente governado pela ação dos ventos alísios. Os ventos alísios, no Hemisfério Sul, se estendem da alta subtropical, região de alta pressão em escala sinótica, acompanhada de ventos com giro anticiclônico, ao Equador. São um tipo de vento contínuo de nordeste no Hemisfério Norte e de sudeste no Hemisfério Sul, que convergem na Zona de Convergência Intertropical, zona esta de baixa pressão em superfície (AHRENS, 2015). A ZCIT não ocorre exatamente sobre o Equador, mas sim deslocada em alguns graus de latitude para o norte. A posição média da ZCIT pode variar um pouco dependendo da métrica utilizada para marcá-la, entretanto, todas a colocam ao norte do equador. Marshall *et al.* (2014), situam a precipitação média zonal com um máximo em aproximadamente 5°N. A ZCIT migra de forma sazonal, alternando em direção ao hemisfério de maior aquecimento e acompanhando o movimento do sol ao longo do ano em uma estreita faixa de nuvens convectivas bem definida (AIMOLA; MOURA, 2016).

A circulação oceânica superficial no AT responde fortemente à forçante eólica dos ventos alísios, que, como já descrito anteriormente, tem uma grande variação sazonal. De 10°N a 10°S a circulação no oceano superior é quase zonal. O escoamento superficial dominante é o para oeste, com o nome de Corrente Sul Equatorial (SEC - *South Equatorial Current*). O ramo sul da SEC (sSEC), que é a porção norte do giro subtropical do Atlântico Sul, quando chega à costa da América do Sul, se divide em Corrente Norte do Brasil e Corrente do Brasil. Os ramos central (cSEC) e norte (nSEC) da SEC abrangem do Equador até aproximadamente 5-7°N de latitude. A parte equatorial da SEC é delimitada ao norte pelo fluxo leste da Contracorrente Equatorial do Norte (NECC - *North Equatorial Counter Current*); que por sua vez limita a circulação tropical, separando-a da nSEC, que é a porção sul do giro subtropical do Atlântico Norte. A aproximadamente 7-8°S entre a sSEC e a cSEC

existe uma Contracorrente Equatorial do Sul (SECC) sazonal, associada a ZCIT no hemisfério sul. A SECC termina na costa da África, onde é acompanhada pelo fluxo de ressurgência da Subcorrente Equatorial (EUC - *Equatorial Undercurrent*) (STRAMMA; SCHOTT, 1999; TALLEY, *et al.* 2011). Um esquema simplificado dessas correntes pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - Esquema simplificado das correntes no Atlântico Tropical. SEC refere-se à corrente sul equatorial; nSEC, cSEC e sSEC referem-se aos ramos norte, central e sul dessa mesma corrente, respectivamente; NEC a corrente norte equatorial; NECC a contracorrente norte equatorial; NBC a corrente norte do Brasil. As linhas tracejadas representam correntes em subsuperfície. A barra de cores representa a média de junho, julho e agosto de 1998-2009 da temperatura da superfície do mar (SST). GD e AD são os domos da Angola e de Guiné, respectivamente. A caixa branca delimita a região ATL3, utilizada para descrever o modo de variabilidade zonal (AZM).



Fonte: Brandt *et al.* (2011).

Além da circulação gerada pelo vento, a circulação termohalina também tem papel fundamental no clima. Essa circulação, governada por mudanças na densidade da água do mar, é muito mais lenta se comparada à circulação gerada pelo vento, porém atua em um volume dimensionalmente maior do que a circulação dirigida pelo vento, que se restringe às camadas superficiais. No Atlântico, a conexão desses dois tipos de circulação através da célula de revolvimento meridional do Atlântico (CRMA, mais conhecida pela sigla em inglês, AMOC - *Atlantic Meridional Overturning*

Circulation). Ela é responsável por transportar calor para o Hemisfério Norte, e possui um significativo impacto sobre os fluxos de carbono e nutrientes para o oceano profundo (FRAJKA-WILLIAMS *et al.*, 2019). Muitos estudos indicam que a AMOC é um dos principais gatilhos para mudanças climáticas em escalas geológicas (LIU *et al.*, 2017, PEDRO *et al.*, 2018). A AMOC tem como característica principal um fluxo para norte de água quente próximo à superfície, que esfria e afunda na região polar do Atlântico Norte e depois retorna em profundidade para o sul como uma corrente de contorno profunda. Mais especificamente na região tropical, Marshall *et al.* (2014), Aimola e Moura (2016) e Pedro *et al.* (2018), mostraram como a posição da ZCIT pode ser influenciada pela AMOC, principalmente pelo seu fluxo de calor e impacto sobre o fluxo de massa.

Os pontos de observação no Atlântico Tropical que serão utilizados neste estudo estão destacados na Figura 11. Além disso, o número de anos de operação de cada boia PIRATA está destacado em azul e o percentual de dados de alta frequência (10 em 10 minutos) recuperados em vermelho, sendo ambos referentes aos dados de vento (velocidade e direção). Historicamente as boias PIRATA são denominadas pela combinação da posição zonal e meridional e é assim que as boias serão denominadas neste trabalho. Com exceção da boia 6S8E, na costa da África, o percentual de recuperação de dados é alto (acima de 60%), considerando que são dados medidos *in situ* e estão sujeitos a uma série de impactos como vandalismo por barcos pesqueiros (Figura 12).

Figura 11 - Área de estudo. Os pontos em vermelho representam a posição de projeto das boias do programa PIRATA, os números em azul, os anos de operação da boia, e, em preto, o percentual de dados de alta frequência recuperados para esta.

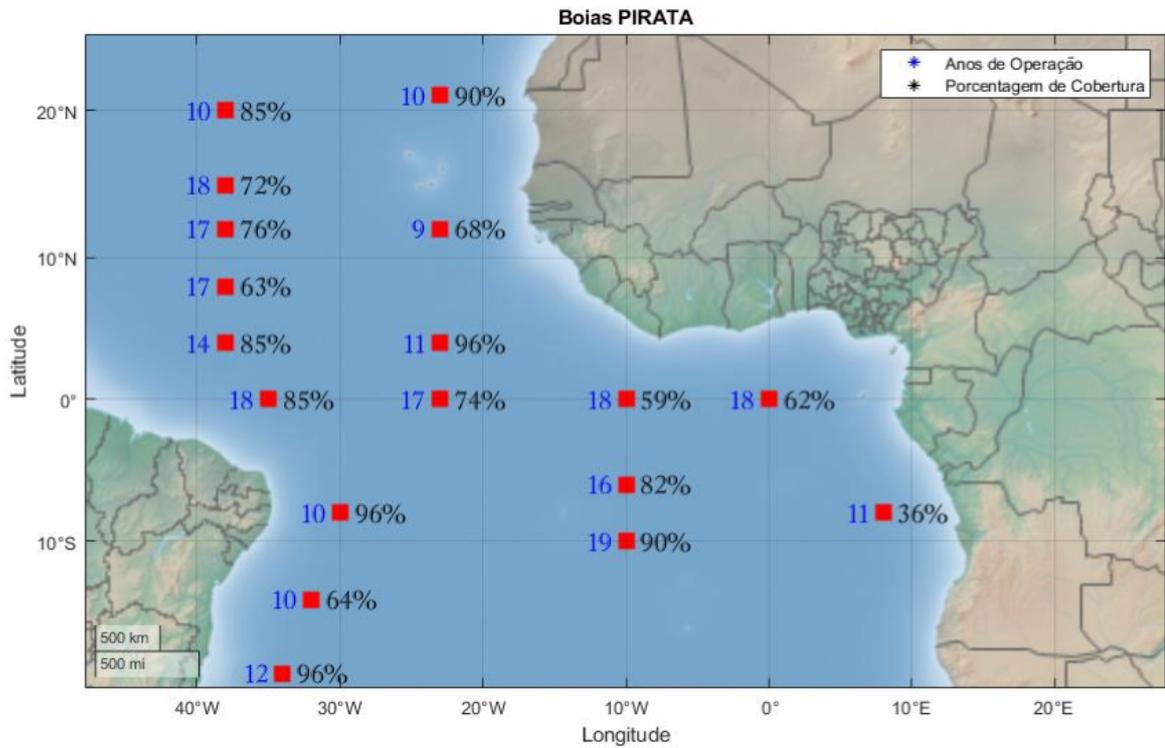


Figura 12 - Linha de pesca enrolada ao cabo eletromecânico da linha de fundeio de uma das boias PIRATA do transecto 38°W. Barcos de pesca frequentemente usam as boias como pontos de ancoragem em alto mar, o que pode danificar equipamentos e a própria estrutura da boia.



Fonte: Foto do arquivo pessoal da autora (2018).

2.4 OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo investigar e comparar de forma sistemática dados de vento próximo à superfície do oceano, facilmente acessíveis e disponíveis online, provenientes de diferentes plataformas de aquisição de dados no Atlântico Tropical, quanto a sua velocidade, componentes e distribuição de frequência, salientando as principais vantagens e deficiências de cada método.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar estatisticamente as variações entre os diferentes métodos de aquisição de dados de vento sobre o oceano (correlação, desvio padrão, erro médio, distribuição de frequência).
- Verificar quais são os fatores e variáveis que mais influenciam na diferença entre os dados observados por boias e os dados de reanálise do ERA5 pelo método de análise de componentes principais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

Os dados de alta frequência das boias do PIRATA podem ser obtidos por meio do site⁹ do PMEL, laboratório este que está vinculado a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Esses são resultados pontuais disponíveis em um arranjo de 18 boias, em que os dados de vento estão disponíveis com uma frequência máxima de um dado a cada 10 min, e são medidos a uma altura (z) de 4 m acima do nível do mar. Desse modo, sob a suposição de que os dados devem representar condições neutras na atmosfera e estaticamente estáveis, todos os dados de boia foram convertidos para uma altura de 10 m acima do nível do mar, utilizando as condições para um perfil logarítmico proposto por Benschop (1996) e utilizado em trabalhos como Thomas, Kent e Swail (2005) (Equação 7). Esta metodologia, no entanto, foi proposta com o uso de valores médios para o Mar do Norte, e que não refletem as condições encontradas no Atlântico Tropical. Na Equação 7, z representa a altura em que o dado é medido (em metros) e U a velocidade do vento, a 10 m e também na altura z .

$$\frac{U(z)}{U(10)} = \frac{\ln \frac{z}{0.0016}}{8.7403} \quad (7)$$

Sendo assim, uma segunda metodologia proposta por Young (1999), também assumindo um perfil logaritmo da atmosfera, foi empregada de forma que ambas pudessem ser comparadas e que o impacto dessa escolha pudesse ser melhor investigado. Esta foi uma metodologia utilizada em trabalhos como Ribal e Young (2019), Zieger, Vinoth e Young (2009), para comparar dados de altímetro e boias no oceano global. Neste método, U_{10} é calculado segundo a Equação (8), na qual k é a constante de Von Kármán, C_D é o coeficiente de arrasto, U_z a velocidade do vento na altura z e z_0 , o comprimento de rugosidade. Neste trabalho serão considerados, $k=0.4$, $C_D = 1.2 \cdot 10^{-3}$ e $z_0 = 9.7 \times 10^{-5}$ m, valores estes condizentes com os trabalhos já citados anteriormente nesta seção. Young, Sanina e Babanin (2017) ainda mostraram que os valores medidos de C_D podem se espalhar por uma ordem de magnitude, contudo

⁹ Dados disponíveis em: <https://www.pmel.noaa.gov/tao/drupal/disdel/>

essas diferentes suposições tiveram pouco impacto nas calibrações finais da velocidade do vento por satélite.

$$U_{10} = U_z \sqrt{\frac{\kappa^2}{C_D} \frac{1}{\ln \frac{z}{z_0}}} \quad (8)$$

A diferença percentual entre os dois métodos foi calculada utilizando a Equação (9), onde $wspd10_1$ é a velocidade do vento a 10 m calculada pelo método 1 e $wspd10_2$ a velocidade do vento a 10 m calculada pelo método 2, ambas em m/s:

$$Diff = \frac{wspd10_1 - wspd10_2}{wspd10_1} \times 100 \quad (9)$$

Além dos dados de vento, também foram utilizados dados das boias PIRATA referentes à temperatura superficial do mar (TSM) e densidade da superfície do mar (SSD) derivada da temperatura e da salinidade, medidos a 1 m de profundidade, temperatura do ar (airT), e umidade relativa do ar (rh), medidos a 3 m de altura. Essas variáveis foram escolhidas para auxiliar neste estudo por serem parâmetros inseridos nas fórmulas *bulk*, importantes para o cálculo da transferência de energia entre o oceano e a atmosfera.

Os dados das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento dos satélites ASCAT (Metop-A) e QuikSCAT foram adquiridos em formato netcdf no banco de dados da NOAA¹⁰. Este banco de dados fornece uma maneira simples e consistente de baixar dados científicos em grade em formatos de arquivo comuns (ex.: netcdf, .mat, .txt). Apesar de estar disponível em formato de grade, com o intuito de diminuir o gasto computacional, foi feito o *download* apenas dos dados do satélite nos pontos de grade mais próxima à posição de projeto das boias PIRATA.

Os dados satelitais representam o vento neutro a uma altura de 10 m e possuem frequência diária. De forma mais precisa, os dados satelitais utilizados neste trabalho representam o dado composto de 1 dia (*1 - day composite*), ou seja, uma combinação das trajetórias do satélite a cada dia. Este dado, no entanto, não apresenta o horário de aquisição para cada ponto de grade. Como a trajetória satelital

¹⁰ Dados disponíveis em: <https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/index.html>.

é variável a cada dia, os pontos de grade desses dados correspondem a uma combinação de diferentes órbitas e diferentes horários de passagem, todos os dias, tornando impossível uma comparação direta com as boias PIRATA (dados de 10 em 10 minutos). Ainda assim, por meio de análises estatísticas que serão descritas na seção 3.3, foi possível estabelecer o melhor horário para realizar a comparação entre essas plataformas.

Os dados da reanálise ERA5, por sua vez são disponibilizados por meio do *Copernicus Climate Change Service (C3S)* (2017), possuem resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ e cobrem o período de 1979 a 2020. De forma semelhante aos dados satelitais, buscando diminuir o custo computacional, foram selecionadas as componentes do vento (u e v) neutro e não neutro a 10 m de altura, com resolução horária, de 1979 e 2019, de pequenas áreas quadradas com 1° (111 km aprox.) de lado e tendo como centro a posição geográfica de cada uma das boias PIRATA.

3.2 ANÁLISES CLIMATOLÓGICAS E DE SÉRIES TEMPORAIS

A fim de verificar a consistência dos dados de todas as plataformas selecionadas, séries temporais são apresentadas ao longo do trabalho. Além disso, a apresentação clássica de dados de velocidade e direção do vento das boias PIRATA são apresentados no formato “rosa dos ventos”, no intuito de comparação direta com a climatologia da região apresentadas por outros trabalhos.

3.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A raiz do erro quadrático médio centralizado (*CRMSE - Centered Root Mean Square Error*), calculada por meio da equação (10), está relacionada com a confiabilidade da medida considerando a mudança ao longo do tempo em que o vento é obtido em diferentes plataformas. Esta medida está relacionada a um erro aleatório com base nos valores de estimativa, sendo que sua pequena magnitude indica alta confiabilidade. O coeficiente de correlação (R), por sua vez, descreve a similaridade com relação às mudanças ocorridas nos campos, e foi calculado por meio da equação (11) (KAMEDA; KUTSWADA, 2017). O coeficiente de correlação e o *CRMSE*

forneem informações estatísticas que são complementares entre si, e quantificam a correspondência entre duas séries de dados (TAYLOR, 2001). Entretanto, para uma caracterização mais completa dos campos, os desvios padrões (*STD*), ou seja, suas variações internas, calculadas pela equação (12), também devem ser fornecidas, de forma a quantificar o *CRMSE* comparativamente com a variabilidade interna (*STD*). Nas equações 10, 11 e 12, y_m e y_0 são variáveis genéricas.

$$CRMSE = \frac{\sqrt{((y_m - \bar{y}_m) - (y_0 - \bar{y}_0))^2}}{\sqrt{(y_0 - \bar{y}_0)^2}} \quad (10)$$

$$R = \frac{(y_m - \bar{y}_m)(y_0 - \bar{y}_0)}{(\sqrt{(y_m - \bar{y}_m)^2})(\sqrt{(y_0 - \bar{y}_0)^2})} \quad (11)$$

$$STD = \frac{\sqrt{(y_m - \bar{y}_m)^2}}{\sqrt{(y_0 - \bar{y}_0)^2}} \quad (12)$$

As estatísticas acima apresentadas, foram utilizadas nas comparações entre as boias e os satélites através dos diagramas de Taylor (seção 3.3.1.1), assim como entre as boias e a reanálise ERA5. Os dados do ERA5 estão disponíveis com resolução horária, sendo assim, para comparar estatisticamente os dados dessa reanálise aos das boias, também foram utilizados os dados das boias com a mesma resolução temporal e nos períodos de tempo onde existissem dados de ambas as plataformas sendo comparadas.

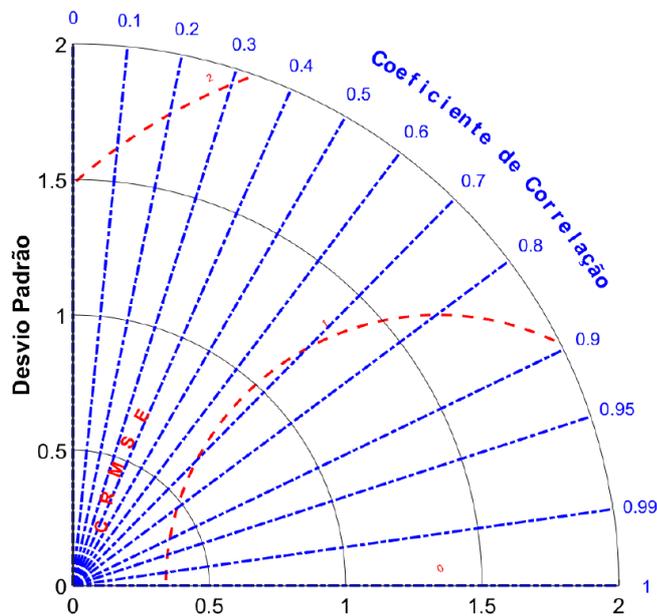
3.3.1 Diagrama de Taylor

O diagrama de Taylor é uma metodologia matemática projetada para indicar graficamente qual das várias representações aproximadas de um sistema ou processo é mais realista com um referencial. Neste caso, assumimos que a boia do projeto PIRATA, ou seja, a observação, é o referencial real, enquanto que as plataformas orbitais (satélite) e resultados de modelos são amostras a serem comparadas com o real. Neste diagrama, o coeficiente de correlação e erro quadrático médio entre os dois campos, juntamente com a razão dos desvios padrão dos dois padrões, são todos indicados por um único ponto em um gráfico 2-D. Juntas, essas estatísticas fornecem

um breve resumo do grau de correspondência padrão, permitindo avaliar com precisão como um modelo simula o sistema natural (TAYLOR, 2001).

A Figura 13 mostra a aparência de um diagrama de Taylor para permitir sua melhor interpretação. A situação ideal (quando as observações de modelos e satélites sejam idênticas ao observado pela boia) seria onde o coeficiente de correlação é igual a 1, o erro quadrático médio igual a 0 e o desvio padrão da observação da plataforma orbital seja igual ao desvio padrão das observações reais, ou seja, o ponto deve ficar o mais próximo possível do eixo x.

Figura 13 - Exemplo de um diagrama de Taylor, em que as linhas em preto representam o desvio padrão, as linhas em azul, o coeficiente de correlação, e as em vermelho, o erro médio quadrático.



O diagrama de Taylor foi utilizado para investigar o melhor horário do dia para comparar os dados de satélite (diário) e as observações horárias das boias. Neste caso específico, apesar da boia ser considerada a realidade em solo, o dado satelital foi utilizado como referência (Ref) para comparação, uma vez que o mesmo tem uma menor resolução temporal (dado diário).

Foram selecionados os períodos de tempo em que os dados fossem coincidentes (dia, mês e ano). Os dados da boia foram separados por hora do dia e as estatísticas básicas (descritas na seção 3.3) foram calculadas. Sendo assim, tendo o satélite como referência, foram plotados no Diagrama de Taylor 24 pontos, referentes às horas do dia em que os dados das boias são medidos. Esse

procedimento foi repetido para cada uma das componentes (u e v) do vento e a velocidade em cada uma das 18 posições geográficas do projeto PIRATA e para cada um dos satélites, resultando em um total de 108 diagramas. Os gráficos foram analisados um a um e os resultados foram compilados em forma de quadro (ver seção 4.3). Posteriormente, foram plotadas as diferenças entre boia e satélite ao longo do tempo para a hora identificada como sendo a mais coincidente entre as duas plataformas.

3.3.2 Análise de Componentes Principais (PCA)

Com o objetivo de investigar quais outros fatores externos podem influenciar na variação das diferenças entre os dados de vento das diferentes plataformas, foi aplicada uma análise de componentes principais (PCA - *Principal Component Analysis*). Como o vento tem papel fundamental na transferência de energia e fluxos entre o oceano e a atmosfera (conforme descrito no capítulo 2), variações nessa medida podem levar a conclusões equivocadas. Da mesma forma, não levar em conta os fluxos na interface oceano - atmosfera podem levar a desvios nas medições do vento.

A PCA tem por objetivo reduzir a dimensionalidade de um conjunto de dados que consiste em um grande número de variáveis inter-relacionadas, obtendo um pequeno número de combinações lineares (componentes principais), que não são correlacionados e são ordenados de forma que as primeiras componentes retenham a maior parte da variação presente em todas as variáveis originais (JOLLIFFE, 2002). De forma resumida, a componente principal consiste no cálculo dos autovalores e correspondentes autovetores de uma matriz de covariância, ou de correlação, entre variáveis a serem analisadas. As componentes principais definem novos eixos que têm importância e um significado, o que é chamado de propriedade do eixo principal (BRO; SMILDE, 2014). A primeira componente explica o maior percentual da variação, a segunda o segundo maior, a terceira componente o terceiro percentual e assim por diante.

O pacote utilizado para fazer esta análise foi o desenvolvido por Ballabio (2015) para ser utilizado com uma *toolbox* do *Matlab*. As variáveis investigadas pela análise, ou variáveis preditoras, foram a temperatura superficial do mar (TSM), a temperatura do ar (airT), a densidade da superfície do mar (SSD) e a umidade relativa (rh), e a

variável de interesse, também chamada de variável de resposta utilizada foi o resultado da diferença entre a velocidade do vento da boia PIRATA e a do ERA5. É importante ressaltar que as diferenças entre as observações da boia e do ERA5 foram calculadas com base na velocidade do vento neutro a 10 m (ERA5) e o vento observado pela da boia corrigido para a altura de 10 m. Essa operação foi realizada para cada um dos pontos de grade estudados.

Os dados foram organizados de forma que esta análise fosse realizada apenas quando todas as variáveis existissem em um mesmo espaço de tempo. Devido ao grande número de amostras (dados utilizados nas análises de componentes principais), com o fim de minimizar o gasto computacional, a análise de componentes principais foi aplicada para apenas 10% dos dados de cada boia, selecionados de forma aleatória. A proporção de dados a cada mês do ano foi mantida, uma vez que, por ser um dado observacional, a proporção de dados mês a mês poderia ser variável. Esta validação foi realizada manualmente com a análise de histogramas de frequência dos dados.

Por se tratarem de variáveis com diferentes escalas e unidades (ex.: neste trabalho, a umidade relativa varia de 40 a 100% e a temperatura do ar de 17 a 39°C), buscando tornar as variáveis mais comparáveis e seguindo a recomendação presente no artigo de Bro e Smilde (2014), a função *autoscaling* foi utilizada, a qual consiste na divisão das variáveis pelos desvios padrões correspondentes. Além disso, também foi utilizada a ferramenta de validação cruzada chamada de *Venetian Blinds* para estimar o número ideal de componentes. A ideia dessa técnica é deixar de fora parte dos dados e depois estimar esses dados a partir dos dados restantes a fim de evitar ajustes excessivos que levam a modelos muito otimistas.

4 RESULTADOS

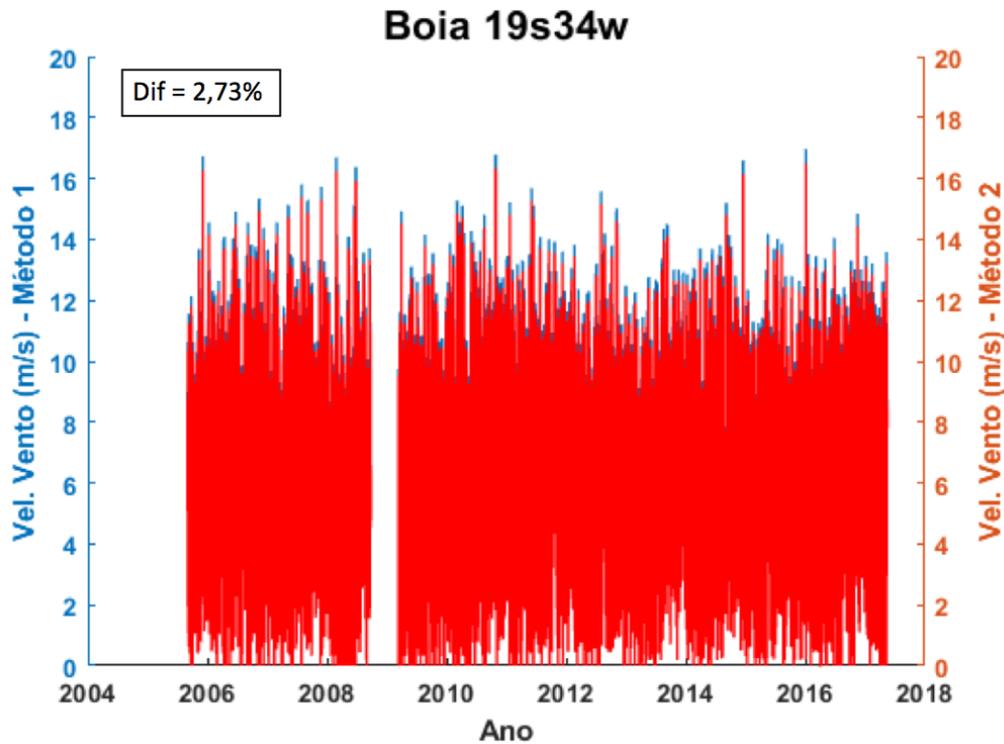
Todos os resultados apresentados nessa seção irão se referir a no máximo 4 posições geográficas onde existem boias PIRATA (8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W). Embora os estudos de validação nesta dissertação sejam limitados a um conjunto seletivo de boias, um relatório separado com os principais gráficos gerados para todos os 18 pontos do projeto PIRATA consta como apêndice a este texto. A escolha das boias que teriam seus resultados apresentados neste capítulo foi baseada em critérios geográficos, climatológicos e estatísticos, melhor descritos na seção 4.2. Ademais, onde era pertinente e foi possível, os gráficos foram apresentados de forma a manter a distribuição espacial relativa de cada ponto de grade, ou seja, 8N38W, 0N35W e 19S34W em uma coluna a esquerda da página e 10S10W alinhado a 0N35W em uma coluna a direita.

PARTE I - Caracterização da área e avaliação das diferenças entre as plataformas de aquisição de dados.

4.1 ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS

A primeira análise realizada foi entre os dois métodos apresentados no capítulo anterior para converter o vento de 4 m para 10 m. O método proposto por Young (1999) apresentou um percentual de redução de 2.73% (Figura 14) se comparado a Benschop (1996). Todavia, como essa opção de correção da camada limite é consistente com as calibrações anteriores realizadas utilizando altímetros e para o oceano global, este foi então o método escolhido para a conversão dos dados. Dessa maneira, todos os resultados apresentados nesta seção em que o U_{10} das boias tenha sido utilizado foram calculados a partir do método 2, de Young (1999).

Figura 14 - Comparação entre métodos para converter $U(z)$ em U_{10} , em que o método 1, em azul, é o proposto por Benschop (1996) e o método 2, em vermelho, proposto por Young (1999), para a boia 19S34W. A diferença percentual entre os métodos se mantém constante (2.73%) tanto em 19S34W, assim como para todas as demais boias não apresentadas aqui.



Para verificar a consistência dos dados, foram plotadas séries temporais para os dados de cada uma das boias do PIRATA e também para os dados dos satélites e do ERA5 utilizados, nas mesmas posições geográficas das boias. A Figura 15 mostra um exemplo desses gráficos para a posição $19^{\circ}\text{S } 034^{\circ}\text{W}$. As séries temporais do vento, assim como as de outras variáveis utilizadas no decorrer deste trabalho podem ser consultadas nos apêndices. Fazendo uma análise puramente visual, é importante notar nos gráficos as diferenças na frequência de aquisição dos dados, assim como no tamanho das séries temporais e na maior presença de valores mais altos de vento quando comparamos os dados da boia com os dos satélites e do ERA5.

Ademais, as boias (Figura 15A) estão mais sujeitas a maiores lacunas na série de dados, como ocorreu entre o final de 2008 e o início de 2009, enquanto que eventuais falhas nos dados dos satélites (Figura 15B), quando existentes, são extremamente raras, pontuais e praticamente imperceptíveis apenas observando o gráfico. As maiores lacunas nos dados das boias se devem ao fato das mesmas, por serem dados medidos *in situ*, estarem sujeitas a vandalismo e quebra de

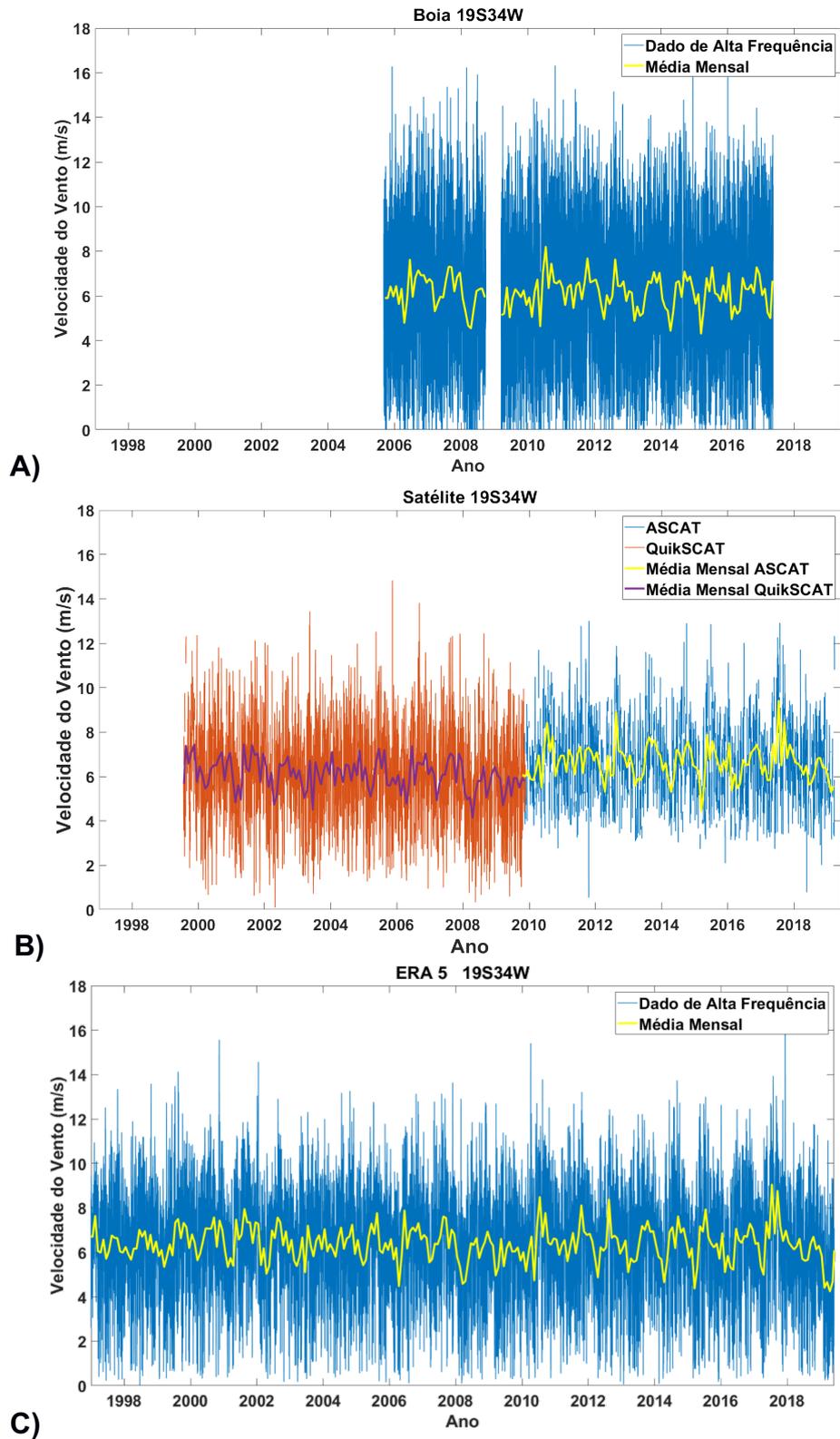
equipamento, além de necessitarem de manutenção constante, que se não forem realizadas no prazo, podem acarretar em problemas nas baterias dos equipamentos, acúmulo excessivo de cracas, entre outros. As falhas nos dados satelitais por sua vez, se devem por exemplo a falhas na transmissão dos dados, chuva excessiva em uma determinada área ou falhas no funcionamento do escaterômetro.

O dado do ERA5 (Figura 15C), por depender exclusivamente das condições de execução do modelo, não apresenta nenhuma falha na série, além de ter a maior cobertura temporal entre os dados apresentados, entretanto são apenas uma representação da realidade. Os dados do ERA5, apesar de estarem disponíveis desde 1979, só foram apresentados a partir de setembro de 1997, uma vez que nenhuma boia ou satélite utilizado neste trabalho apresenta dados anteriores a esta data.

Na Figura 15B é possível observar também uma pequena sobreposição dos dados dos satélites no final do ano de 2009, quando tanto o QuikSCAT como o ASCAT (Metop-A) funcionaram por um pequeno período coincidente. É importante destacar também as pequenas diferenças nos valores absolutos entre os dados do QuikSCAT e do ASCAT, especialmente nos valores mínimos. As diferentes bandas de aquisição dos dados, somadas ao fato dos satélites pertencerem a agências espaciais distintas, podem ser alguns dos fatores que contribuem para essas disparidades. Existem diferenças na metodologia de processamento e correção dos dados desses dois satélites. Bentamy *et al.* (2012) discutem em seu trabalho algumas das diferenças entre os dados do ASCAT e do QuikSCAT e demonstram que, apesar desses dados apresentarem correlação superior a 0.9 na maioria dos casos, especialmente em regiões como a da ZCIT, onde convecção mal resolvida e variabilidade em ventos fracos contribuem significativamente para aumento dos erros amostrais, a correlação entre os dados de vento pode cair de forma significativa para valores próximos a 0.7.

A média mensal da velocidade do vento das três séries de dados estão na faixa de 4 a 8 m/s, e apresentam as cristas e cavados coincidentes, o que sugere que as sazonalidades dos dados estão bem representadas na mesma ordem de magnitude em todas as plataformas. Entretanto, observando os dados de alta frequência da boia, é possível perceber que estes apresentam picos maiores e cavas menores se comparados aos demais dados, relacionado à maior frequência de aquisição quando comparado às outras plataformas e a ocorrência de eventuais *outliers* na série.

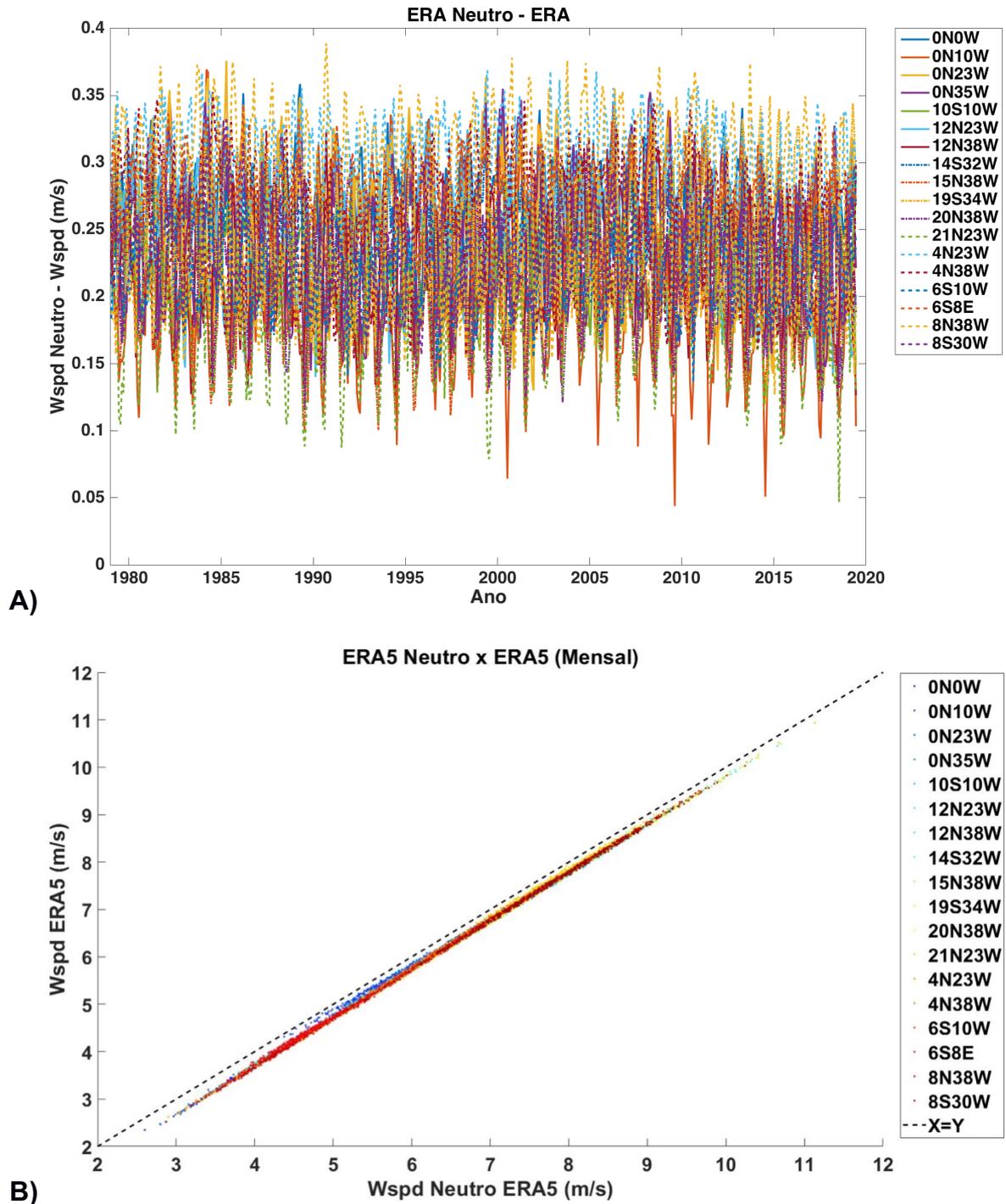
Figura 15 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da (A) boia PIRATA 19S34W, (B) do ASCAT e QuikSCAT e (C) e do ERA5, na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.



Além das séries individuais de cada uma das bases de dados, o ERA5 fornece duas opções de velocidade de vento a 10 m, sendo um deles o vento neutro, caracterizado por uma correção para a estratificação atmosférica. A diferença entre essas variáveis para cada um dos pontos de grade estudados (Figura 11) podem ser observadas na Figura 16A. Conforme descrito por Kent, Fangohr e Berry (2013), é possível observar na Figura 16A a tendência de as velocidades neutras do vento serem mais intensas, em média, do que as velocidades dependentes da estabilidade numa ordem de 0.2 m/s. Os valores mais frequentes na Figura 16A estão entre 0.15 e 0.35. A Figura 16B apresenta um gráfico de dispersão que confirma a tendência de valores de vento neutro maiores se comparados ao não neutro; todos os pontos estão abaixo da reta tracejada. Além disso, como os pontos estão distribuídos como uma massa homogênea, não fica evidente a presença de nenhum gradiente latitudinal ou longitudinal influenciando no aumento ou diminuição das diferenças.

Os dados dos satélites, assim como os das boias assumem a condição de uma estratificação de atmosfera neutra (seção 3.1), sendo assim, optou-se por utilizar no restante deste trabalho a variável do ERA5 que também assume a mesma condição, o vento neutro a 10 m.

Figura 16 – A) Média mensal da diferença, em m/s, para cada um dos pontos de grade onde existem boias PIRATA entre as variáveis de vento fornecidas pelo ERA5, velocidade do vento neutro a 10m e velocidade do vento a 10m. B) Comparação entre os dados mensais, em m/s, de vento neutro e não neutro do ERA5. Em ambos os gráficos foi utilizado todo o período de dados disponíveis na base de dados do ERA5 (1979-2019).

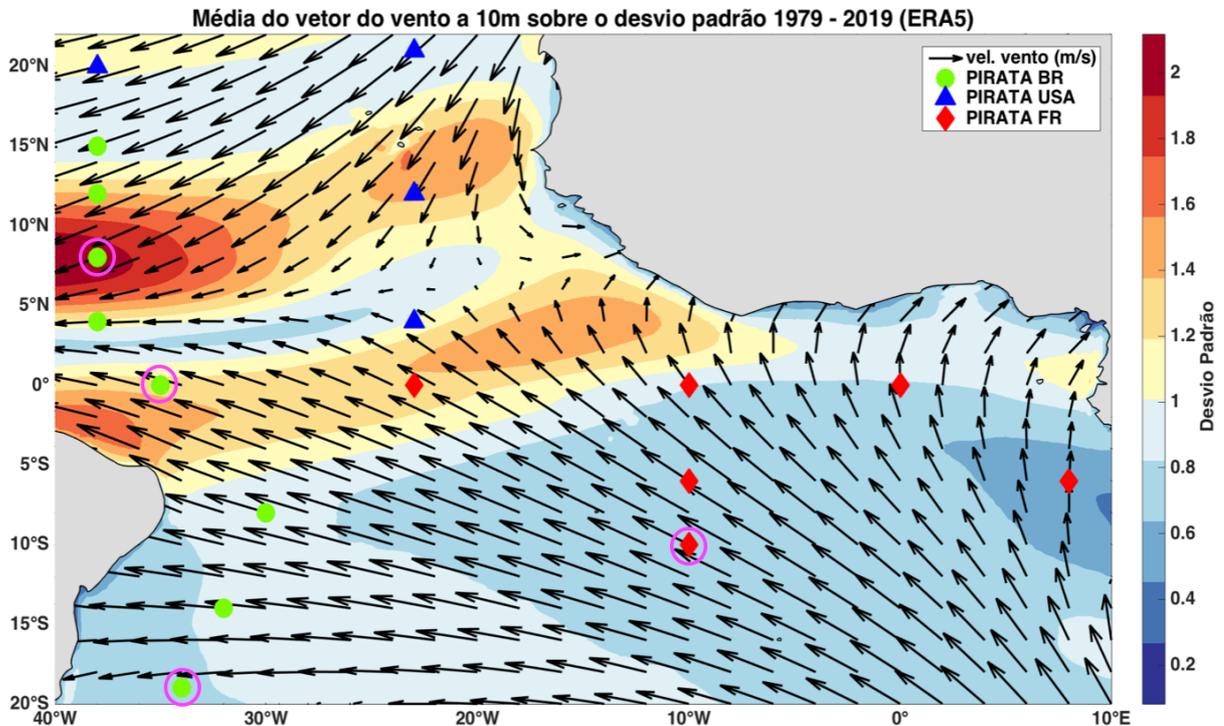


4.2 ANÁLISE CLIMATOLÓGICA

A Figura 17 apresenta a média climatológica baseado nos dados do ERA5 com velocidade do vento e seu respectivo desvio padrão, além de pontos que correspondem à posição de projeto das boias PIRATA e o país responsável pela manutenção dessas. Neste mapa é possível observar o padrão dos ventos alísios de sudeste no hemisfério sul e de nordeste no hemisfério norte, conforme descrito na seção 2.3. Além disso, pode-se observar que as regiões com os maiores valores de desvio padrão (em vermelho no mapa) são aquelas em que o regime de ventos é mais variável, o que muito provavelmente se deve à oscilação no posicionamento da ZCIT.

A escolha das boias que têm seus resultados apresentados ao longo do capítulo 4 foi realizada de forma que os principais padrões de vento fossem representados (alísios de sudeste e de nordeste), além da boia que apresentou o maior desvio padrão (8N38W) e uma que fosse praticamente diametralmente oposta, e que por sua vez apresentou um dos menores valores de desvio padrão (10S10W), mantendo assim uma distribuição geográfica dos resultados que pudesse de alguma forma representar os principais fenômenos e características presentes no Atlântico Tropical. Além disso, uma boia fora da região de atuação dos ventos alísios também foi selecionada (19S34W).

Figura 17 - Série histórica (janeiro/1979 – setembro/2019) dos dados do ERA5 para a região de estudo. Os vetores representam a média de velocidade e direção do vento neste período e a escala de cores, o desvio padrão da velocidade do vento. Os pontos coloridos são as posições de projeto das boias PIRATA, sendo em verde as boias cuja manutenção é realizada pelo Brasil, em azul, as dos Estados Unidos, e em vermelho, as boias da França. Os círculos em rosa representam as boias que terão seus resultados apresentados ao longo de todo o capítulo 4.



As Figuras 18, 19, 20 e 21 mostram as rosas dos ventos utilizando separadamente os dados das boias, os do ERA5, os do QuikSCAT e o do ASCAT, respectivamente. É importante destacar que as rosas dos ventos foram produzidas utilizando todo o período de dados disponíveis no caso das boias e dos satélites e apenas com dados a partir de setembro de 1997 no caso do ERA5. Com o intuito de tornar os gráficos mais comparáveis entre si, não foram utilizados os dados anteriores a 1997 no caso do ERA5, uma vez que não existem dados observacionais do PIRATA ou dos satélites que contemplem esse período. Além disso, velocidades do vento superiores a 18 m/s foram desconsideradas nessa análise.

Esta é uma análise amplamente utilizada para representar não apenas a velocidade do vento, como também a sua direção. Dukhovskoy *et al.* (2017), por exemplo, utiliza essa análise gráfica para caracterizar as máximas de vento no mar do Norte, enquanto que Pereira *et al.* (2017) utiliza uma análise semelhante para caracterizar direção, altura e período de ondas na costa sul-sudeste brasileira.

Em todas as bases de dados apresentados nas Figuras 18, 19, 20 e 21, mais uma vez é possível notar o padrão característico dos ventos alísios de nordeste na posição da boia 8N38W e os de sudeste nas posições 0N35W e 10S10W. A boia 19S34W já não se encontra dentro da região de atuação dos ventos alísios, tendo como predominantes os ventos de leste, muito mais influenciado pela região da alta subtropical do Atlântico Sul, propiciando ventos que predominantemente vão do mar para a costa brasileira. Apesar de todas manterem um padrão aproximado quanto a direção e intervalos de velocidade do vento mais frequentes, é possível notar que as rosas dos ventos produzidas com os dados do ERA5 (Figura 19) possuem uma menor variação na direção, o que se reflete em um maior percentual de dados concentrados em direções específicas. Este fato fica mais evidente na posição 10S10W, onde nas demais bases de dados, a direção mais frequente não concentra mais que 25.8% de dos dados disponíveis enquanto que para o ERA5, a direção mais frequente concentra quase 43% dos dados.

Figura 18 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento das boias 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W do projeto PIRATA. O mapa apresenta a posição de todas as posições das boias PIRATA e circulas em rosa, aquelas cujos resultados foram apresentados nessa e nas demais figuras apresentadas a partir daqui na seção de Resultados.

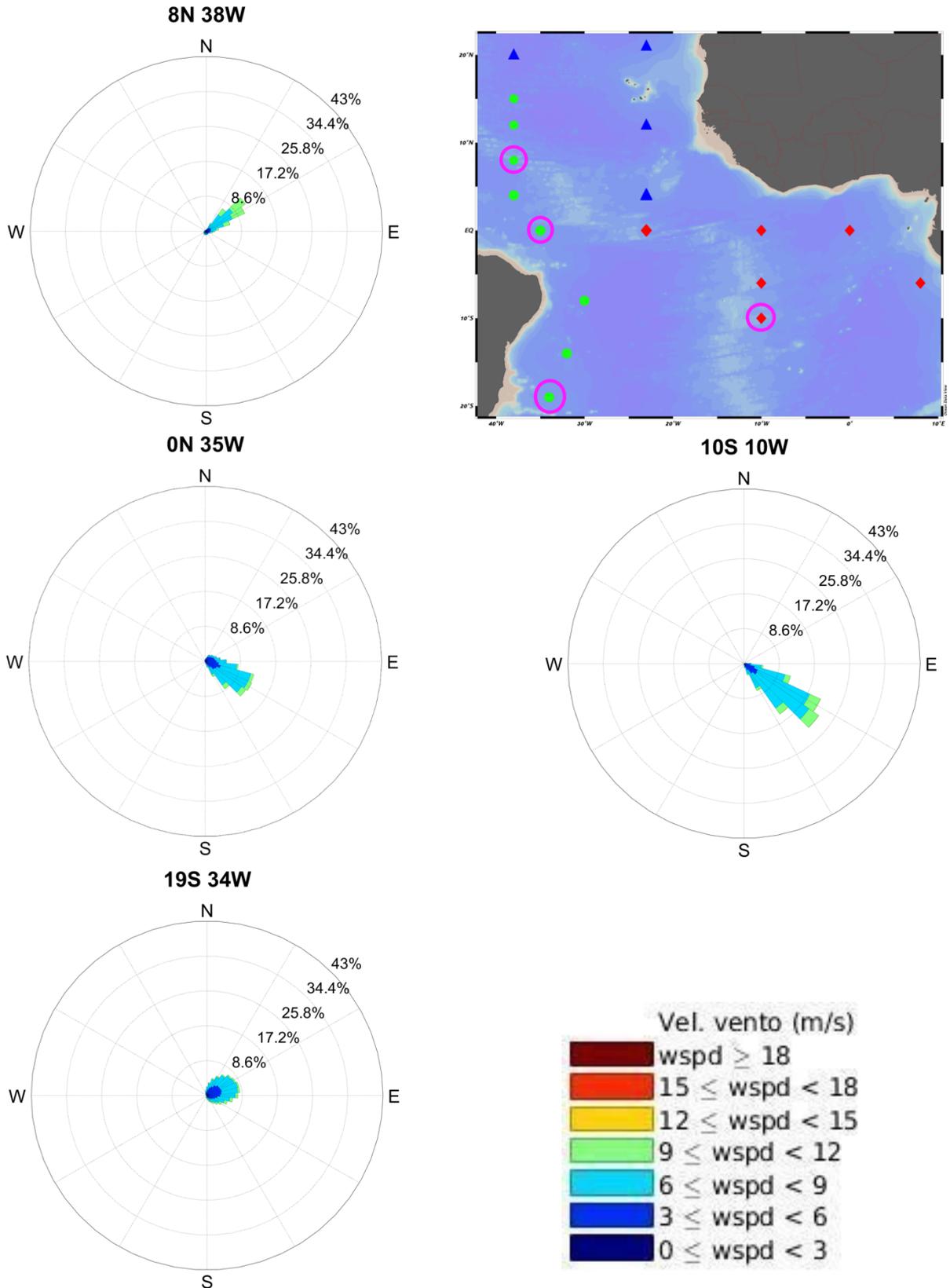


Figura 19 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento do ERA5 a partir de setembro de 1997 nos pontos 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W. O mapa apresenta a posição de todas as posições das boias PIRATA e circuladas em rosa, aquelas localizações cujos resultados foram apresentados nessa figura.

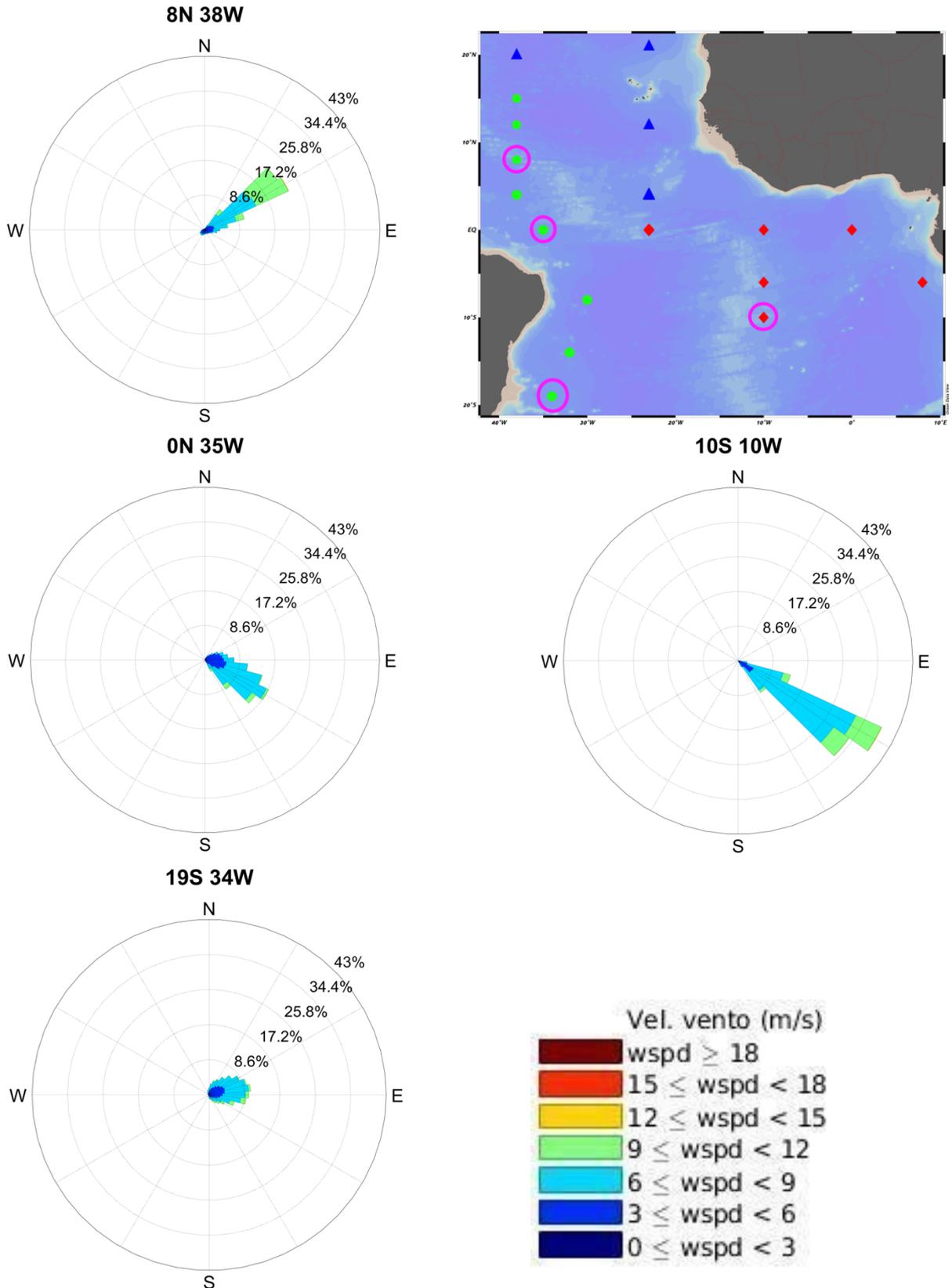


Figura 20 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento do QuikSCAT de 1999 a 2009, nos pontos 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W. O mapa apresenta a posição de todas as posições das boias PIRATA e circuladas em rosa, aquelas localizações cujos resultados foram apresentados nessa figura.

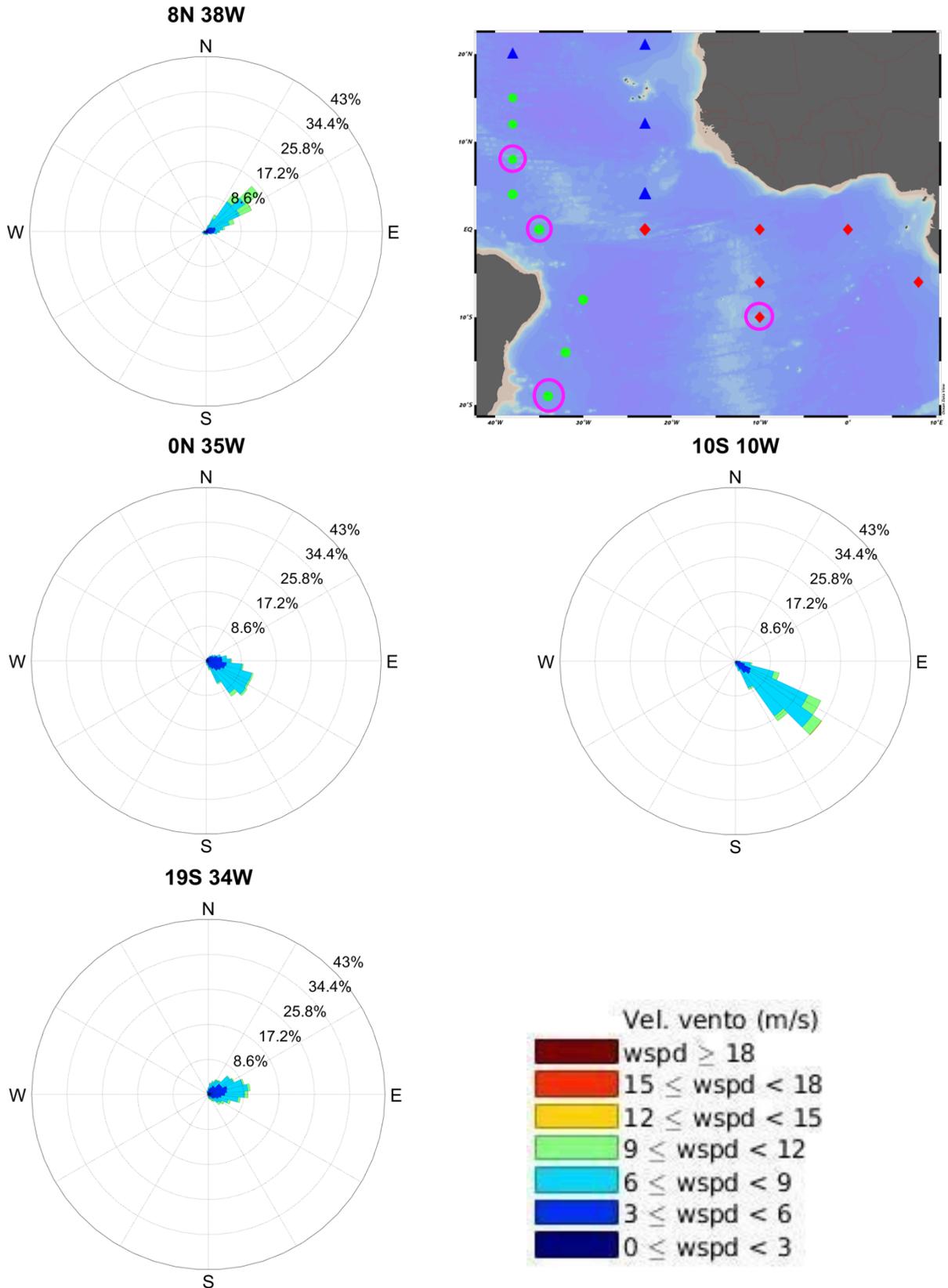
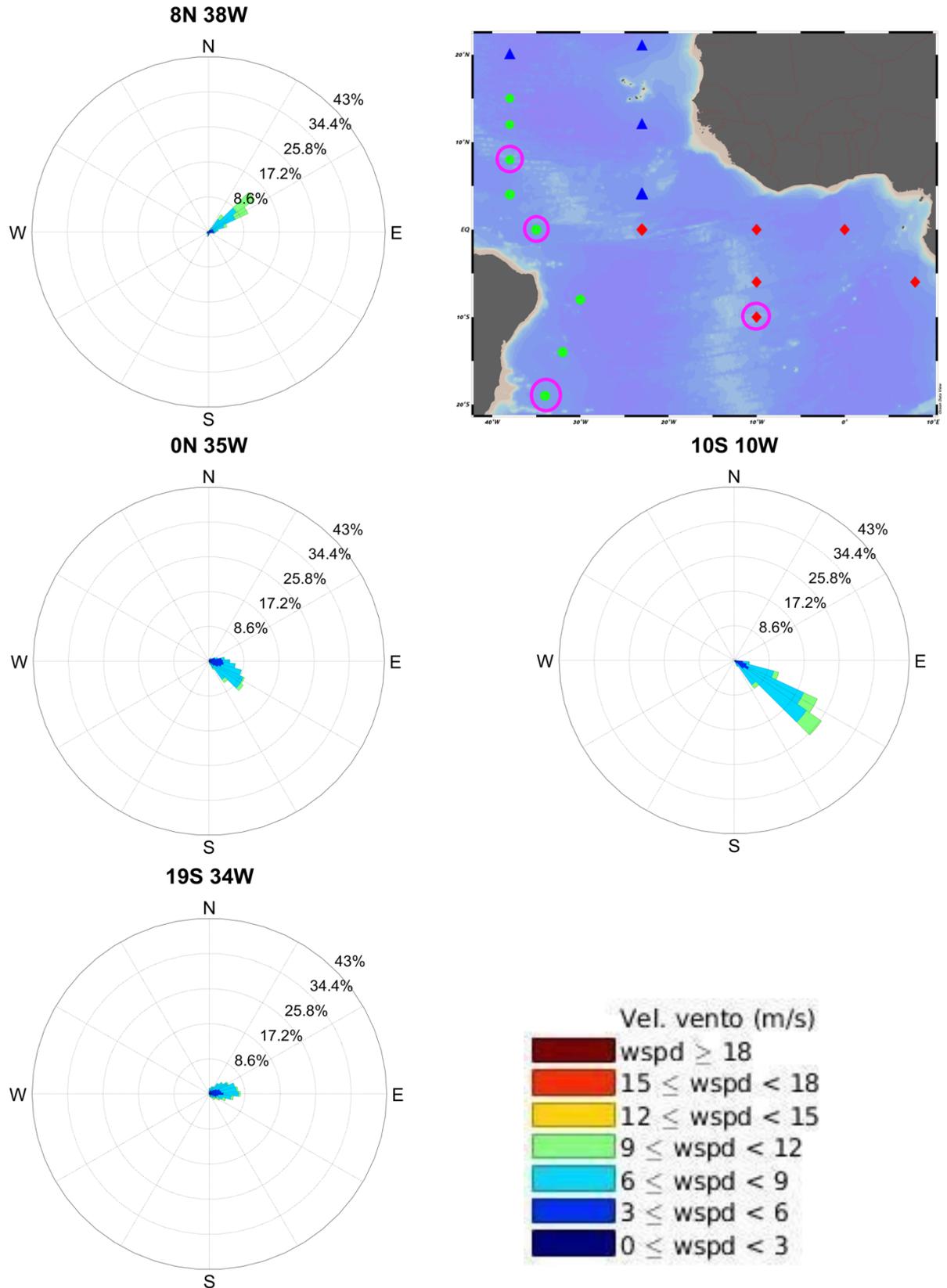


Figura 21 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento do ASCAT de 2009 a 2019, nos pontos 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W. O mapa apresenta a posição de todas as posições das boias PIRATA e circulado em rosa, aquelas localizações cujos resultados foram apresentados nessa figura.



4.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os diagramas de Taylor podem ser utilizados como suporte para validar dados de vento (TAVARES *et al.* 2020) e onda (CHAWLA; SPINDLER; TOLMAN, 2013), bem como para investigar não apenas o grau de correspondência entre os dados de vento dos satélites e das boias, mas também verificar em que momento do dia esse grau de correspondência é potencialmente maior. A Figura 22 corresponde à comparação da velocidade do vento das boias com o QuikSCAT e a Figura 23 com o ASCAT.

Para ambos os satélites, é possível observar que, para as boias aqui apresentadas, o coeficiente de correlação é sempre maior que 0.5, independentemente do horário de comparação, o *CRMSE* varia entre 1 e 2, e o desvio padrão dos dados estão próximos aos valores dos pontos de referência (repare como os marcadores se alinham verticalmente ao ponto vermelho identificado como Referência (*Ref*)). Apesar da relativa boa correspondência de todos os horários com o satélite, em todos os gráficos é possível observar pontos que se destacam positivamente, com valores de *R* superiores a 0.8 e *CRMSE* mais próximos de 1. Entretanto, os pontos de melhor correspondência são variáveis a cada boia e também para cada satélite.

Embora não tenham sido apresentados neste documento, também foram gerados diagramas de Taylor para as componentes *u* e *v*. Os pontos com os melhores resultados para cada uma das componentes, em sua maioria, foram coincidentes com aqueles encontrados quando analisada a velocidade do vento (*wspd*), ou então se encontravam defasados em aproximadamente 12h. Os horários de melhor comparação com cada uma das boias, assim como um resumo estatístico, podem ser encontrados nos Quadros 3 e 4. É importante destacar que a Quadro 4 apresenta os valores máximos, mínimos e médios de *R*, *CRMSE* e *STD* levando em consideração a melhor hora de todas boias, assim como as componentes do vento *u*, *v* e velocidade e por isso a presença de alguns valores consideravelmente diferentes dos apresentados na Figura 22 e na Figura 23. Os piores valores extremos são sempre referentes a componente *u* ou *v*, entretanto, quando combinadas como velocidade do vento, as estatísticas melhoram de forma considerável. Outro aspecto interessante a ser destacado é que na média, a comparação com o ASCAT foi melhor do que com o QSCAT (maior *R*, menor *CRMSE*).

Figura 22 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento, das boias PIRATA nas posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W e o satélite QuikSCAT. O ponto indicado como Ref se refere ao dado diário do satélite e os demais pontos coloridos a estatística da comparação com os dados da boia por hora do dia.

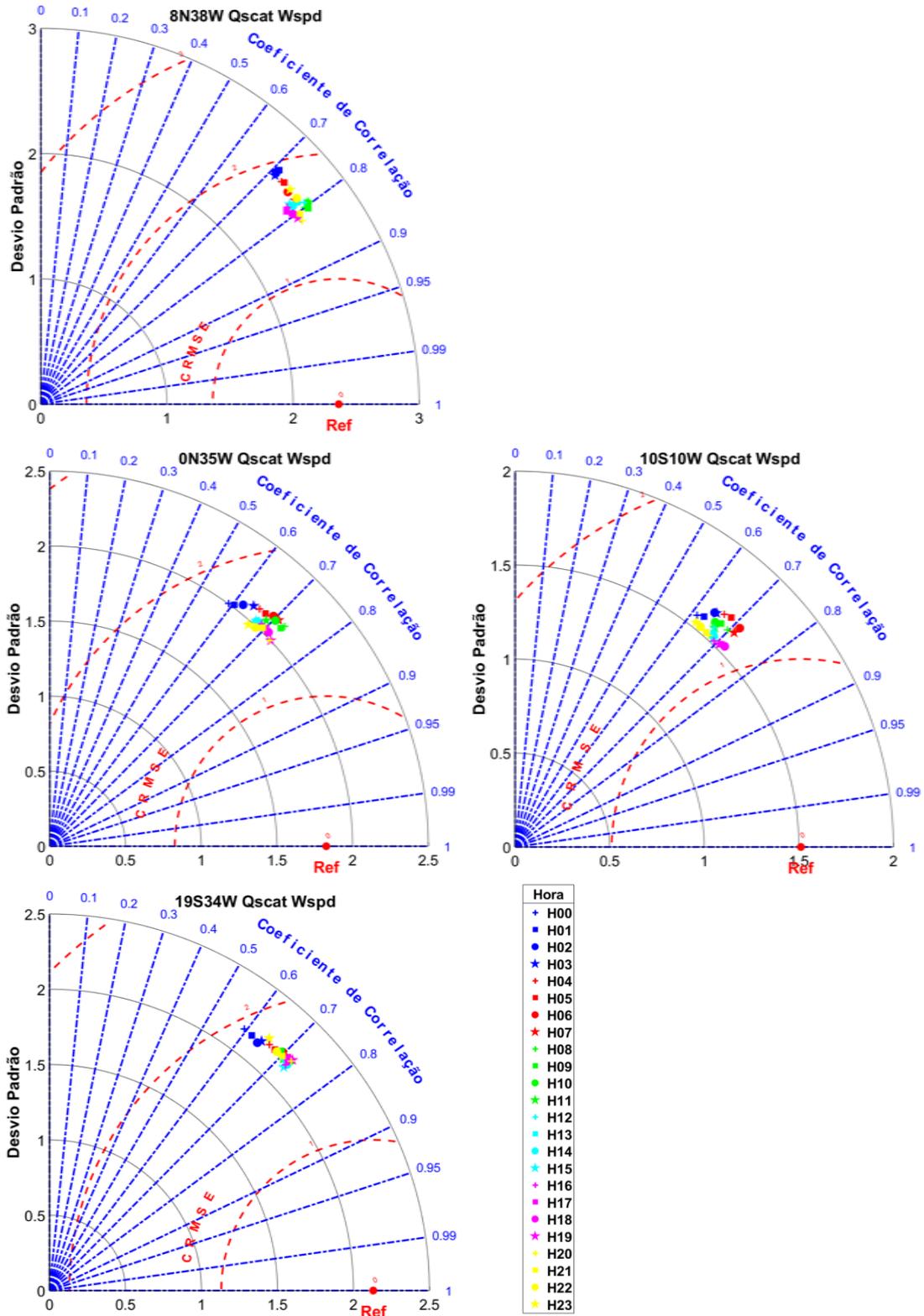
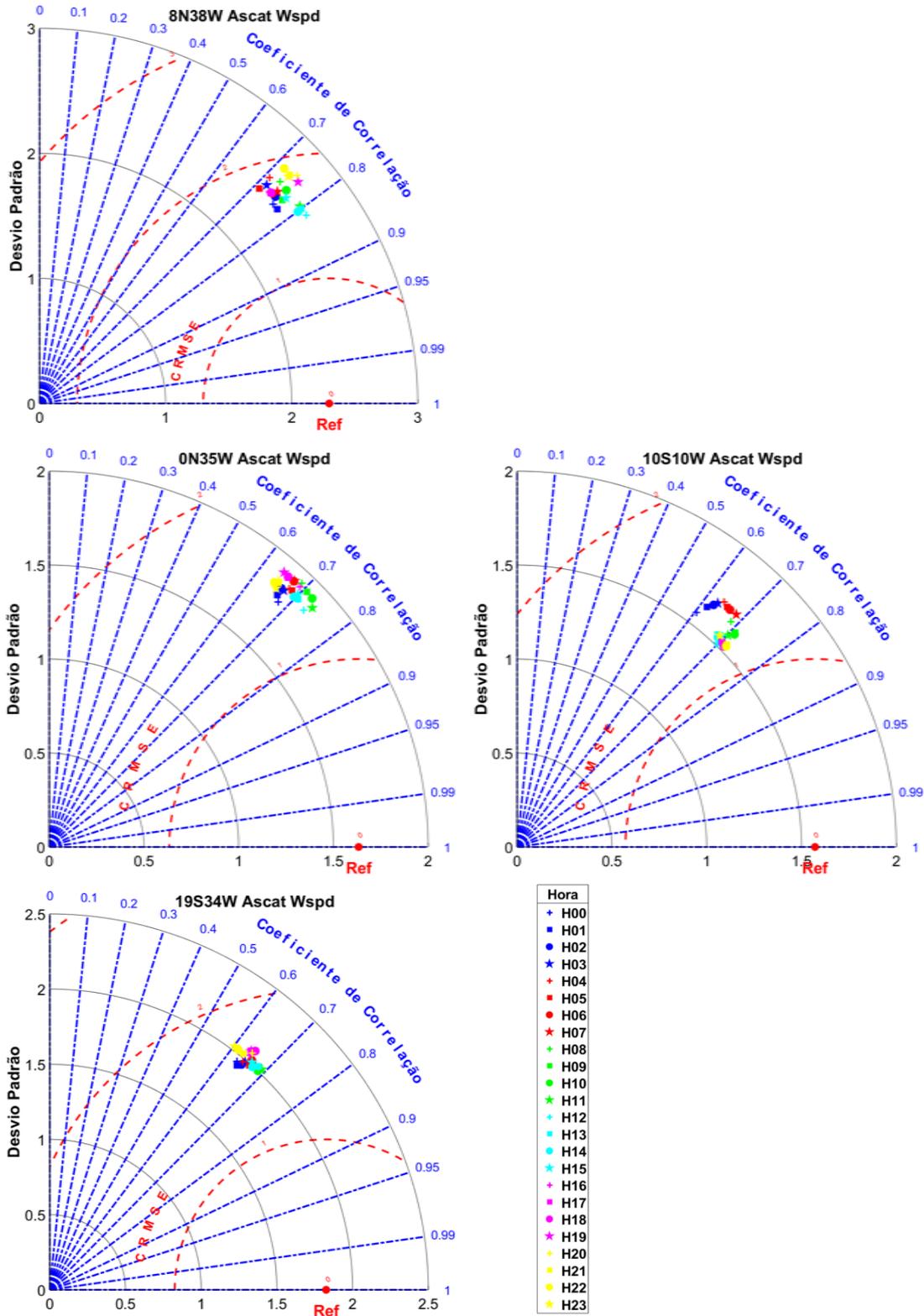


Figura 23 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento das boias PIRATA nas posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W e o satélite ASCAT (Metop-A). O ponto indicado como Ref se refere dado diário do satélite e os demais pontos coloridos a estatística da comparação com os dados da boia por hora do dia.



Quadro 3 – Hora utilizada para realizar as comparações entre cada uma das boias PIRATA e os satélites ASCAT e QuikSCAT (QSCAT). O horário apresentado no quadro foi aquele que apresentou o melhor resultado estatístico baseado nos diagramas de Taylor.

	ASCAT	QSCAT
BUOY	HOUR	HOUR
0N 0E	21	6
0N 10W	9	6
0N 23W	11	19
0N35W	11	19
4N 23W	22	7
4N 38 W	12	20
6S 8E	20	6
6S 10W	22	18
8N 38W	12	19
8S 30W	16	20
10S 10W	10	18
12N 23W	11	10
12N 38W	13	13
14S 32W	11	21
15N 38W	12	8
19S 34W	11	15
20N 38W	12	20
21N 23W	16	17

Quadro 4 - Resumo estatístico baseado nos índices da melhor hora selecionada a partir dos diagramas de Taylor, levando em consideração todas as variáveis de vento (u, v e wspd) e todas as boias PIRATA.

	ASCAT			QuikSCAT		
	MIN	MAX	AVERAGE	MIN	MAX	AVERAGE
R	0.42	0.90	0.72	0.48	0.89	0.70
CRMSE	1.07	2.44	1.60	1.05	2.45	1.71
STD	1.36	4.69	2.34	1.44	5.10	2.39

Com base na melhor hora de comparação entre os satélites e as boias, foram então calculadas as diferenças absolutas entre os dados para toda a série. A diferença absoluta entre os dados e sua variação ao longo do tempo foram apresentados nas Figuras 24 e 25. É importante ressaltar que valores muito grandes de desvio padrão se dão em geral por picos (possivelmente *outliers*) no dado da boia e/ou do satélite. Locais onde não aparece a barra de erro são aqueles onde não existiam dados de pelo menos uma das plataformas.

As boias 0N35W e 19S34W foram as que apresentaram os resultados mais constantes em ambos os satélites, com diferenças variando entre -1 e 1, porém com uma presença de valores majoritariamente positivos. A boia 8N38W também apresentou resultados nesse mesmo intervalo, entretanto com uma leve tendência a valores negativos quando comparamos com o satélite QuikSCAT. Ainda assim, na comparação com o ASCAT, pouco pode ser inferido, uma vez que a boia apresentou muitas falhas nesse período. Já a boia 10S10W também apresentou um comportamento bastante estável ao longo do tempo quando observamos a comparação com o QuikSCAT, com a diferença variando mais uma vez entre -1 e 1, e presença de valores majoritariamente positivos. Na comparação com o ASCAT, no entanto, houve uma queda bastante acentuada nos valores da diferença durante praticamente todo o ano de 2013, voltando a variar no intervalo de -1 a 1 em 2014.

Figura 24 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e QuikSCAT nas posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W, de 1998 a 2009, em vermelho, e seus respectivos desvios padrão, em cinza.

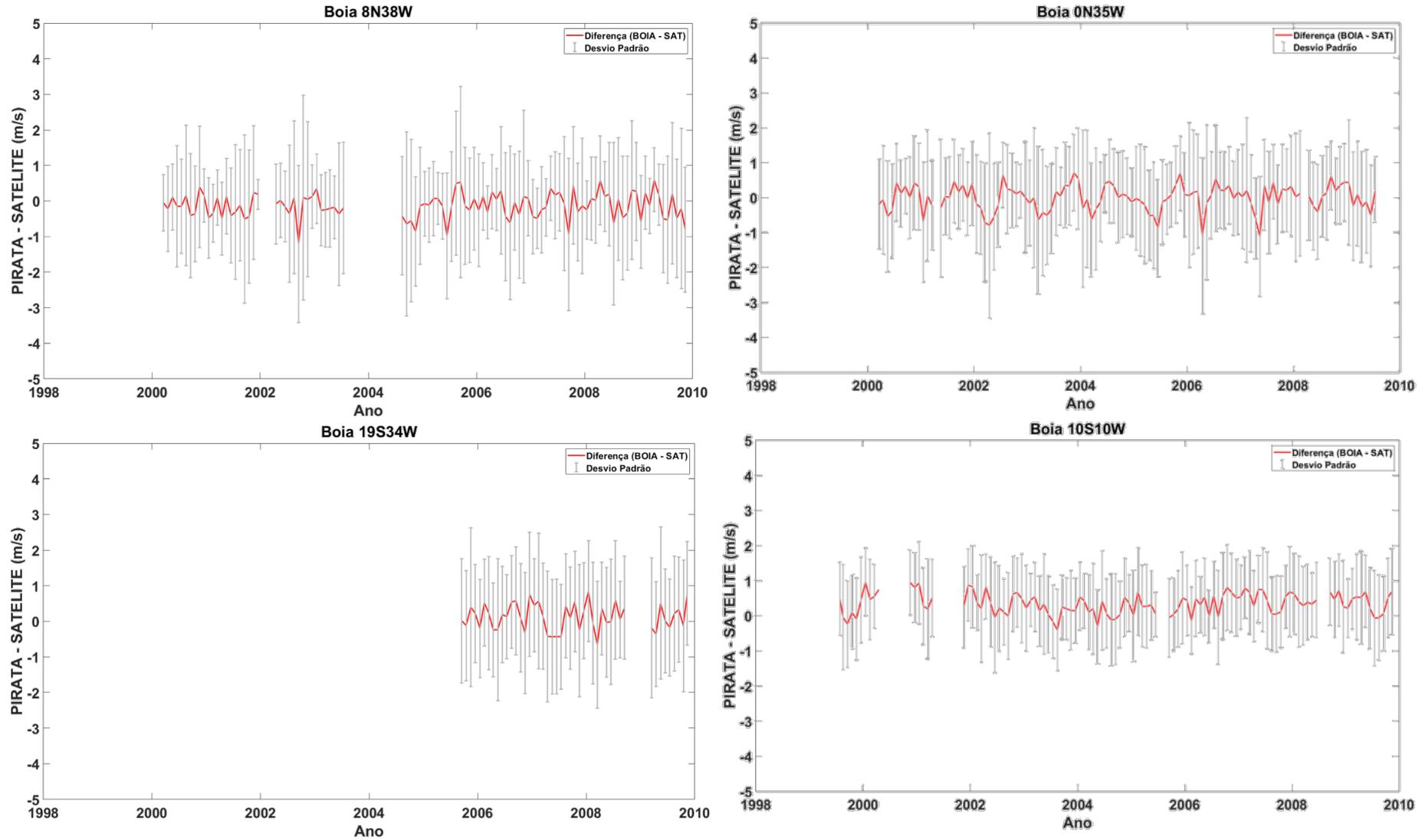
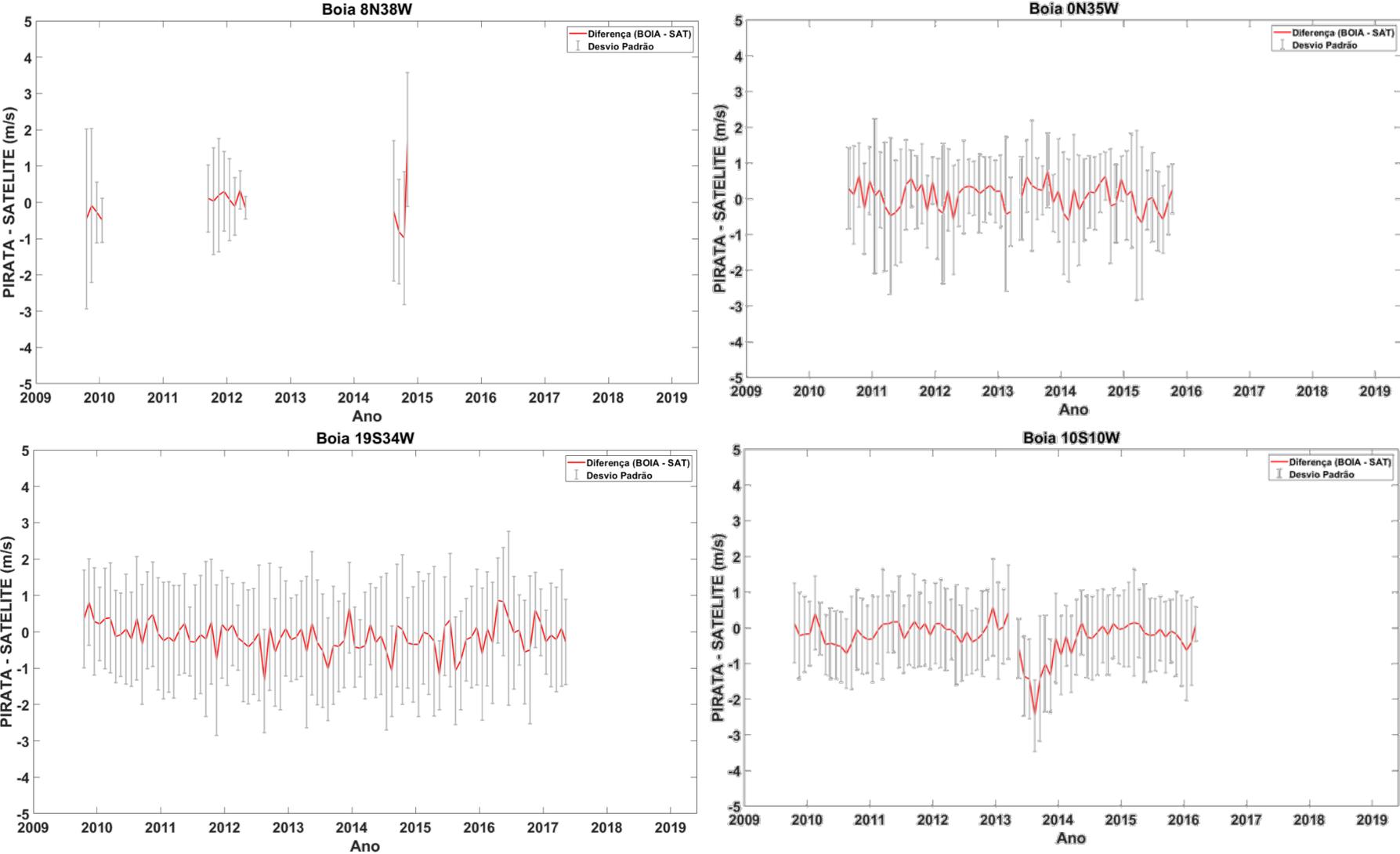


Figura 25 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e ASCAT nas posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W, de 2009 a 2019, em vermelho, e seus respectivos desvios padrão, em cinza.



Por fim, as Figuras 26, 27 e 28, representam a variação do R , $CRMSE$ e STD , respectivamente, entre os dados das boias e do ERA5 ao longo do dia. O coeficiente de correlação é maior que 0.5 em todas as posições de grade e apresentou resultados melhores se comparados aos coeficientes da comparação entre os satélites e as boias. De forma semelhante, os valores do erro médio quadrático são menores e variaram entre 0.8 e 2.5, sendo o intervalo mais frequente entre 1 e 2. Entretanto, o $CRMSE$ mais frequente para a velocidade do vento fica em torno de 1. É possível observar também que existe uma boa concordância entre o desvio padrão da boia em relação ao ERA5, em que as diferenças entre os valores de STD de uma mesma variável não foram superiores a 0.5, sendo o desvio da boia ligeiramente maior se comparado ao da reanálise em todos os casos apresentados. É também interessante ressaltar o comportamento ligeiramente inverso entre os gráficos de R e $CRMSE$, quando R aumenta o $CRMSE$ tende a diminuir e vice-versa, fato que contribui para uma maior correspondência entre os dados comparados.

Figura 26 - Correlação (R) das variáveis do vento u, em azul, v em vermelho e wspd, em amarelo, entre as boias PIRATA 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W e o ERA5 nas mesmas posições geográficas por hora do dia.

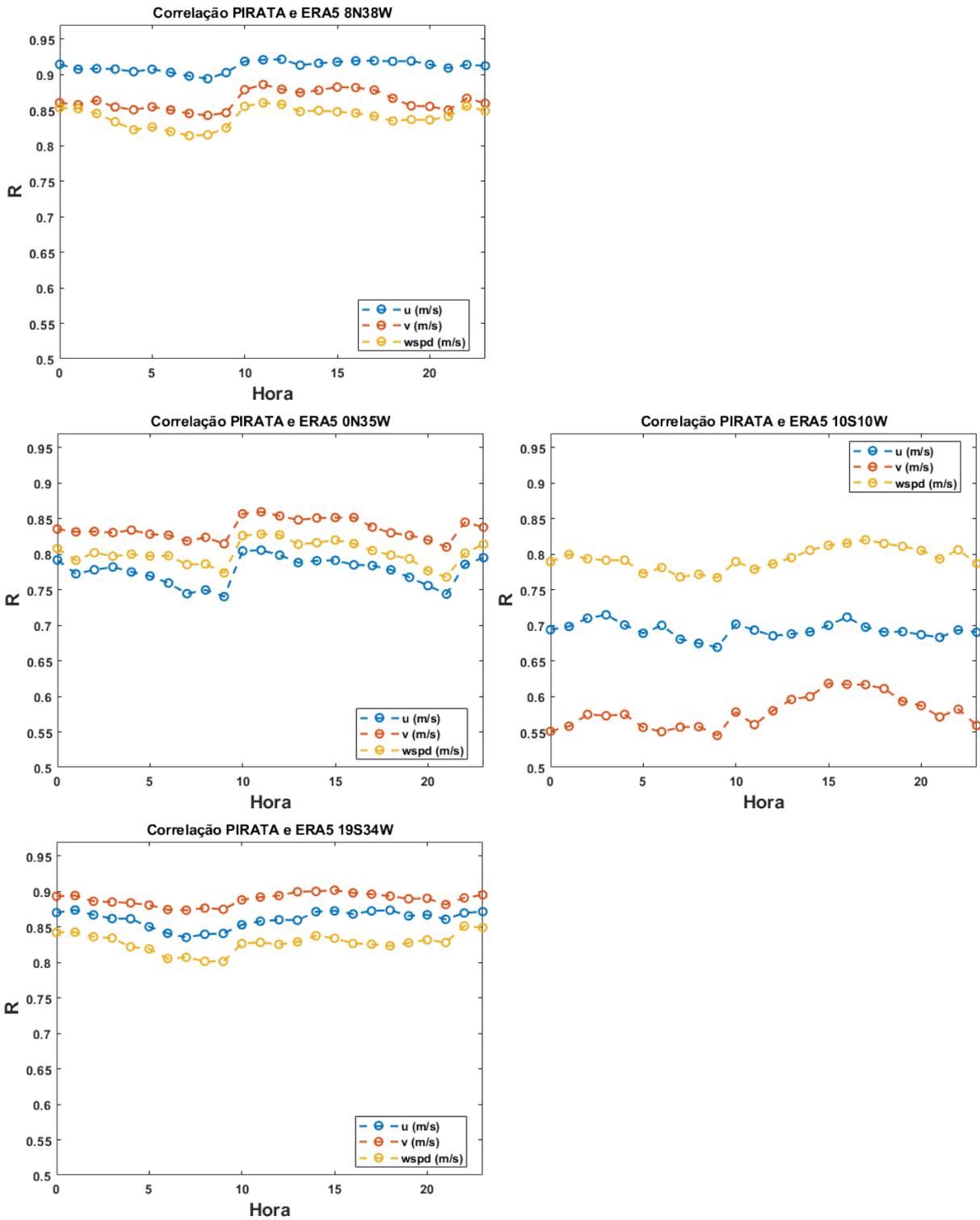


Figura 27 - Raiz do erro quadrático médio centralizado (CRMSE) das variáveis do vento u, em azul, v em vermelho e wspd, em amarelo, entre as boias PIRATA 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W e o ERA5 nas mesmas posições geográficas por hora do dia.

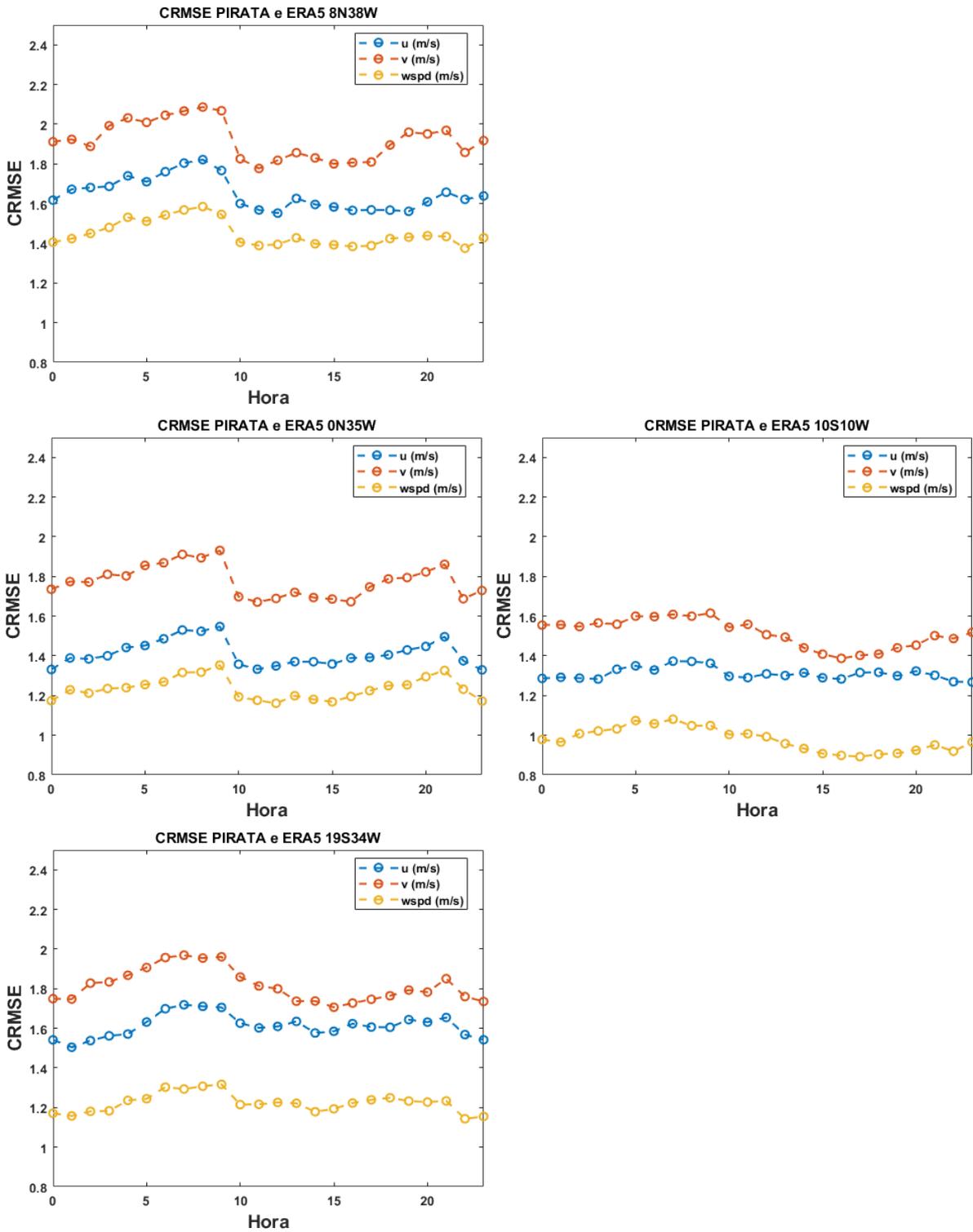
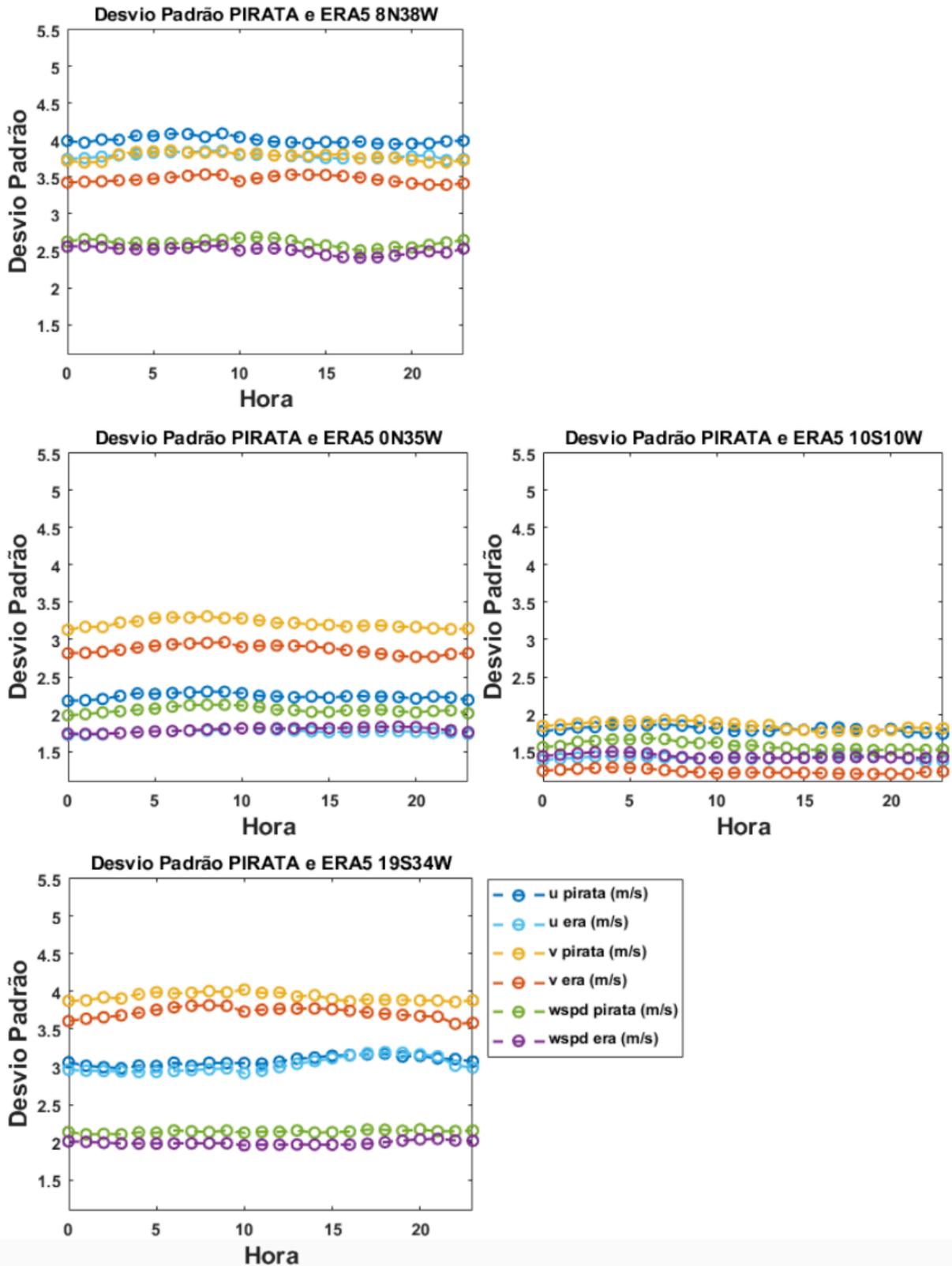


Figura 28 - Desvio Padrão (STD) de cada uma das variáveis do vento das boias PIRATA 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W e o ERA5 nas mesmas posições geográficas por hora do dia. O desvio padrão de u são apresentados em azul escuro para as boias PIRATA e azul claro para o ERA5; v , em amarelo para a PIRATA e laranja para o ERA5; e $wspd$ em verde para a PIRATA e roxo para o ERA5.



PARTE II - Dinâmica: o que influencia as diferenças nos dados de vento?

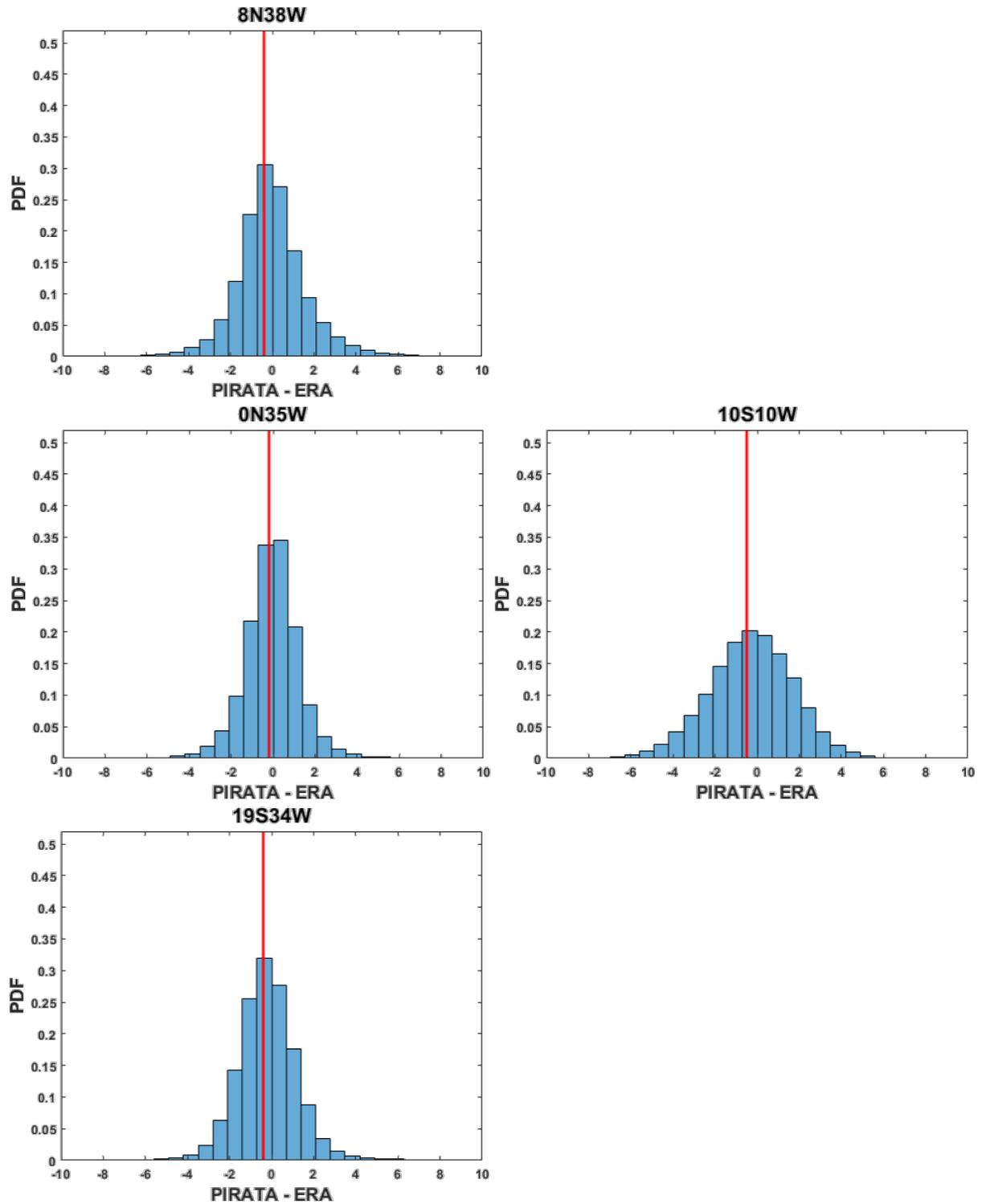
4.4 DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS

Conforme mencionado na seção 3.3, antes da realização da análise de componentes principais, foi necessário reduzir a quantidade de dados para minimizar o custo computacional. A seleção dos dados foi baseada nos resultados apresentados nas Figuras 29, 30 e 31.

A Figura 29 apresenta a distribuição da diferença entre o PIRATA e o ERA5, variável essa que foi utilizada como resposta no modelo da PCA. A linha vermelha representa o valor mais recorrente para a diferença entre o dado da PIRATA e o do ERA5 naquela localidade; caso esse valor fosse positivo, a linha seria azul, fato este que ocorreu em localidades apresentadas apenas nos apêndices¹¹. Os valores recorrentes estão sempre próximos, mas não iguais a zero, identificando uma distribuição não normal, sendo assim, a seleção de dados não pode ser feita de forma totalmente aleatória.

¹¹ Nos apêndices BRAVO, CHARLIE, DELTA, FOXTROT, GOLF, INDIA, MIKE e SIERRA, o valor mais recorrente é positivo e, portanto, a linha apresentada é azul.

Figura 29 - Distribuição das diferenças de velocidade do vento entre o PIRATA – ERA5 em uma estimativa da função de densidade de probabilidade (em inglês, PDF - Probability density function estimate), onde a área de cada barra é o número relativo de observações. A soma das áreas da barra será sempre menor ou igual a 1. A linha vermelha representa o valor mais recorrente; caso esse valor fosse positivo, a linha seria azul.



Buscando investigar os fatores que poderiam contribuir para deslocar a curva, somado ao fato de que os dados das boias podem ser variáveis ao longo do tempo, foram analisadas as Figuras 30 e 31, que apresentam a sazonalidade dos valores da diferença entre PIRATA e ERA e também a quantidade de dados por mês, respectivamente. Devido às variações sazonais nos valores da diferença e à relativa variação do número de amostras por mês em algumas boias, optou-se então, por selecionar aleatoriamente 10% dos dados de cada mês para manter a proporção dos dados. Os dados de cada mês foram concatenados posteriormente em uma única matriz, que formaram a base de dados utilizadas nas análises de componentes principais aplicadas à cada uma das localidades. Posteriormente, esses mesmos valores obtidos para cada uma das 18 boias foram combinados em outra grande matriz, que foi utilizada em um último modelo de PCA.

Figura 30 – Variação mensal das diferenças na velocidade do vento PIRATA – ERA5 e seus respectivos desvios padrão para as posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W.

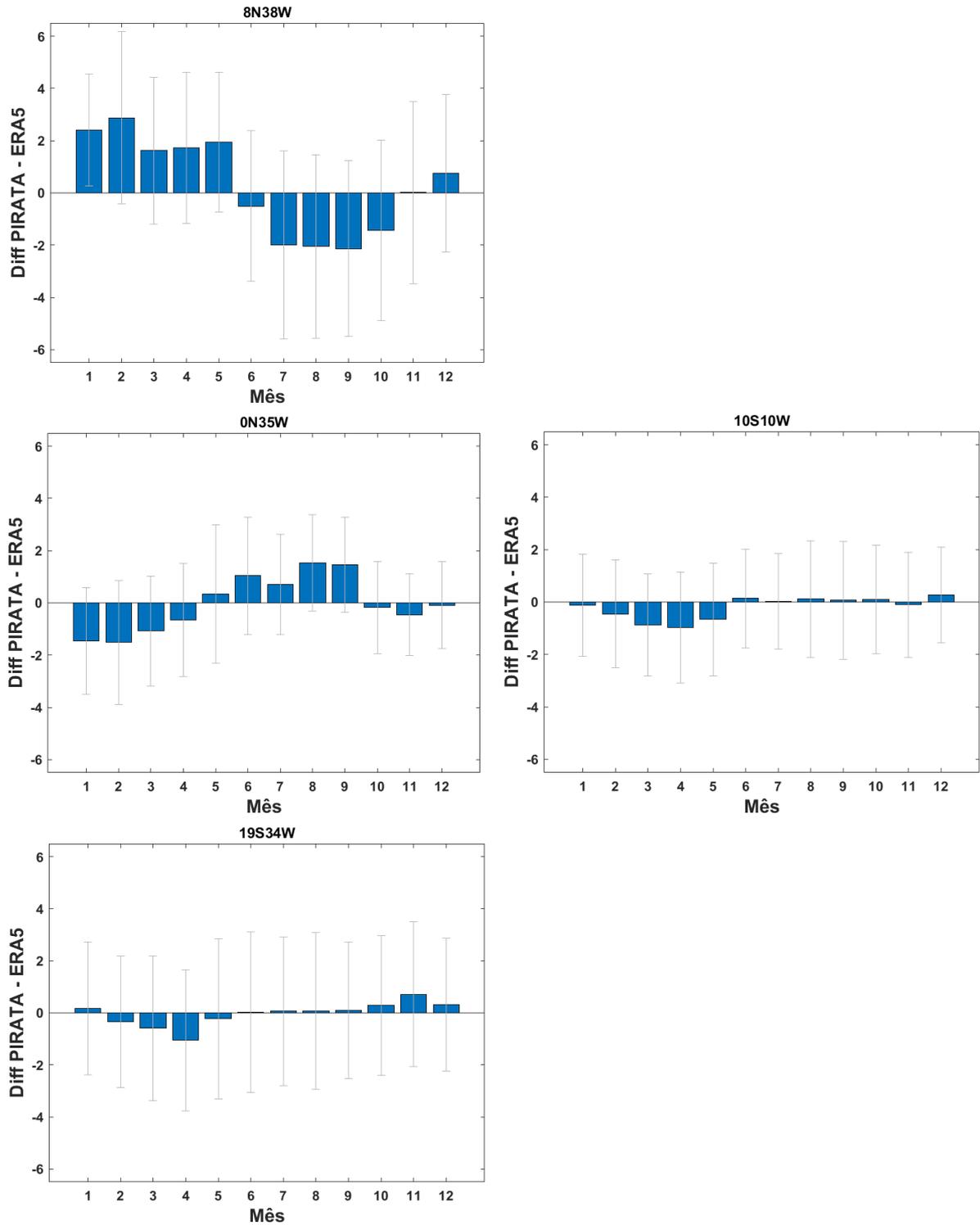
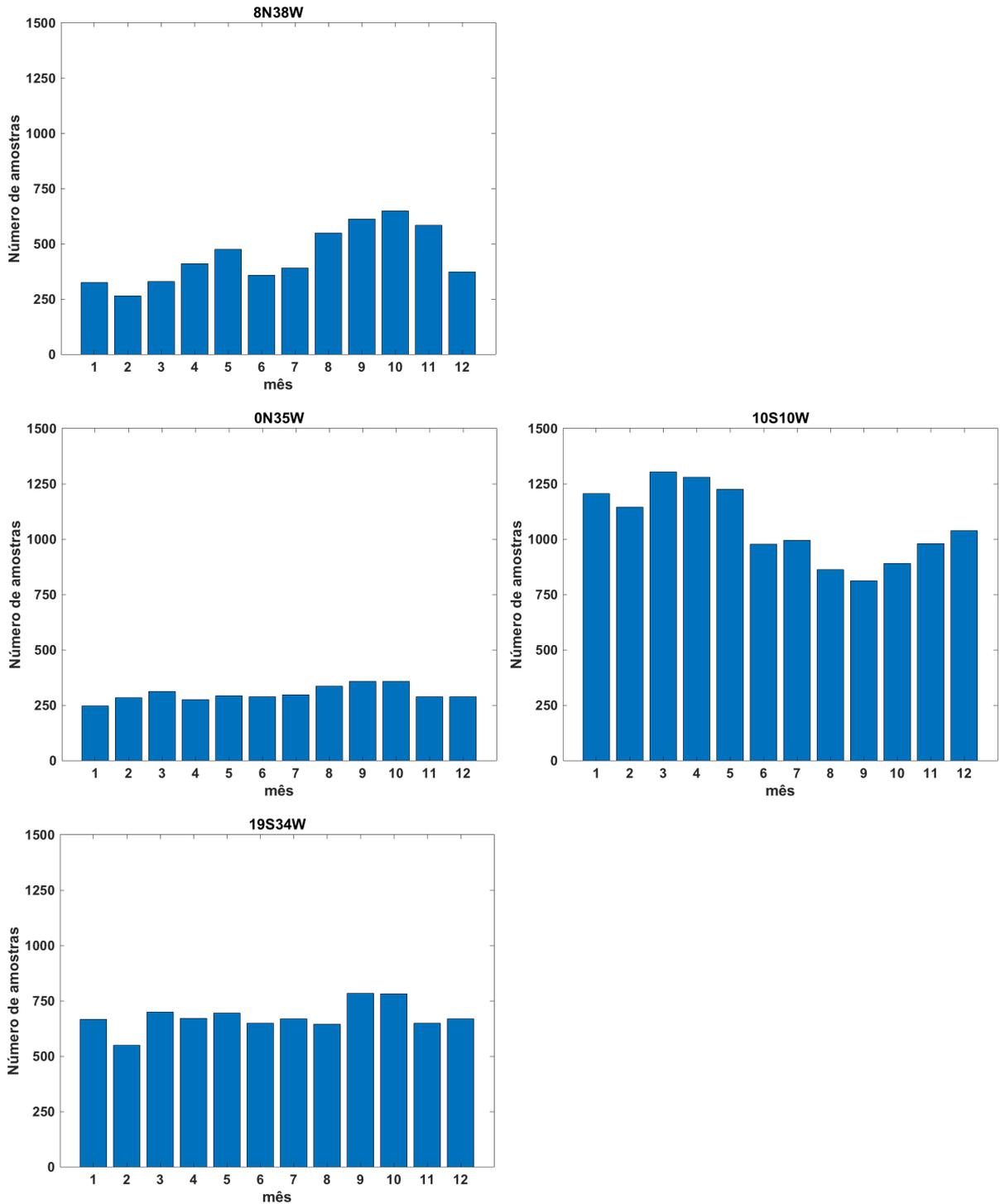


Figura 31 - Número de amostras disponíveis por mês para as posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W. Entraram na análise somente os dados que possuíam dados em todas as variáveis necessárias para a realização desse estudo (TSM, SSD, airT e rh).



4.5 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Para a realização de uma PCA, a primeira escolha a ser feita é a quantidade de componentes principais a serem utilizadas nas análises. Tal escolha foi realizada por meio da análise dos critérios apresentados de forma gráfica na Figura 32 (*scree plot*). Nessa figura, os coeficientes utilizados para definir o número de componentes utilizados são destacados, são eles (Ballabio, 2015):

- Critério do autovalor médio (AEC, ou critério de Kaiser): aceita como significativo apenas as componentes com autovalor maior que o autovalor médio;

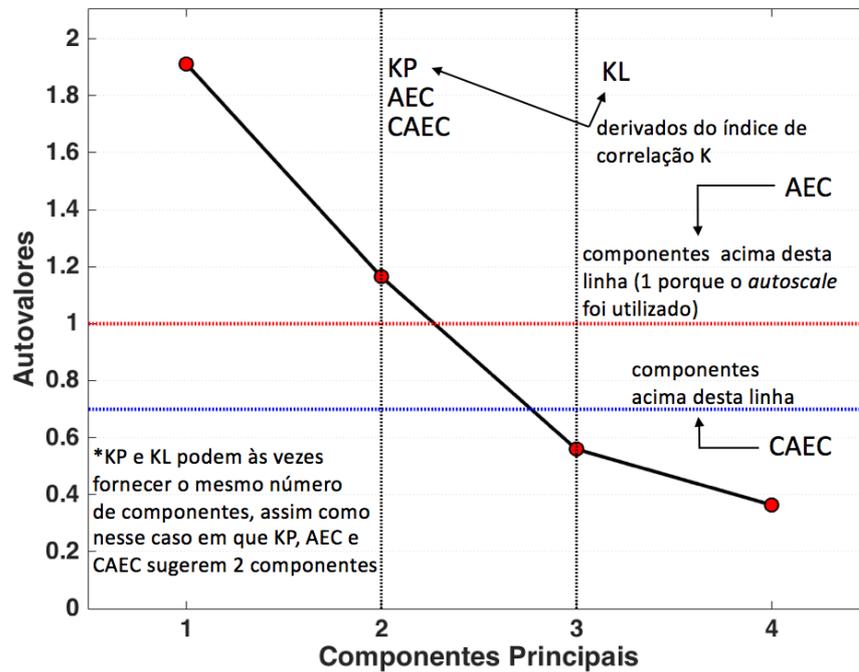
- Critério do autovalor médio corrigido (CAEC): é o mesmo que AEC, porém diminui o limite de rejeição multiplicando o autovalor médio por 0.7;

- KL: fornece o máximo número teórico de componentes principais significativas, pressupondo que as informações nos dados sejam distribuídas linearmente;

- KP: estima o número mínimo de componentes significativas mais seguro supondo que as informações nos dados diminuem mais acentuadamente;

Não existe uma regra única para definição do número de componentes a serem utilizadas, sendo assim fica a cargo dos autores de cada trabalho definirem o critério, ou combinação deles que forneça o número de componentes mínimo para satisfazer as necessidades específicas de cada estudo.

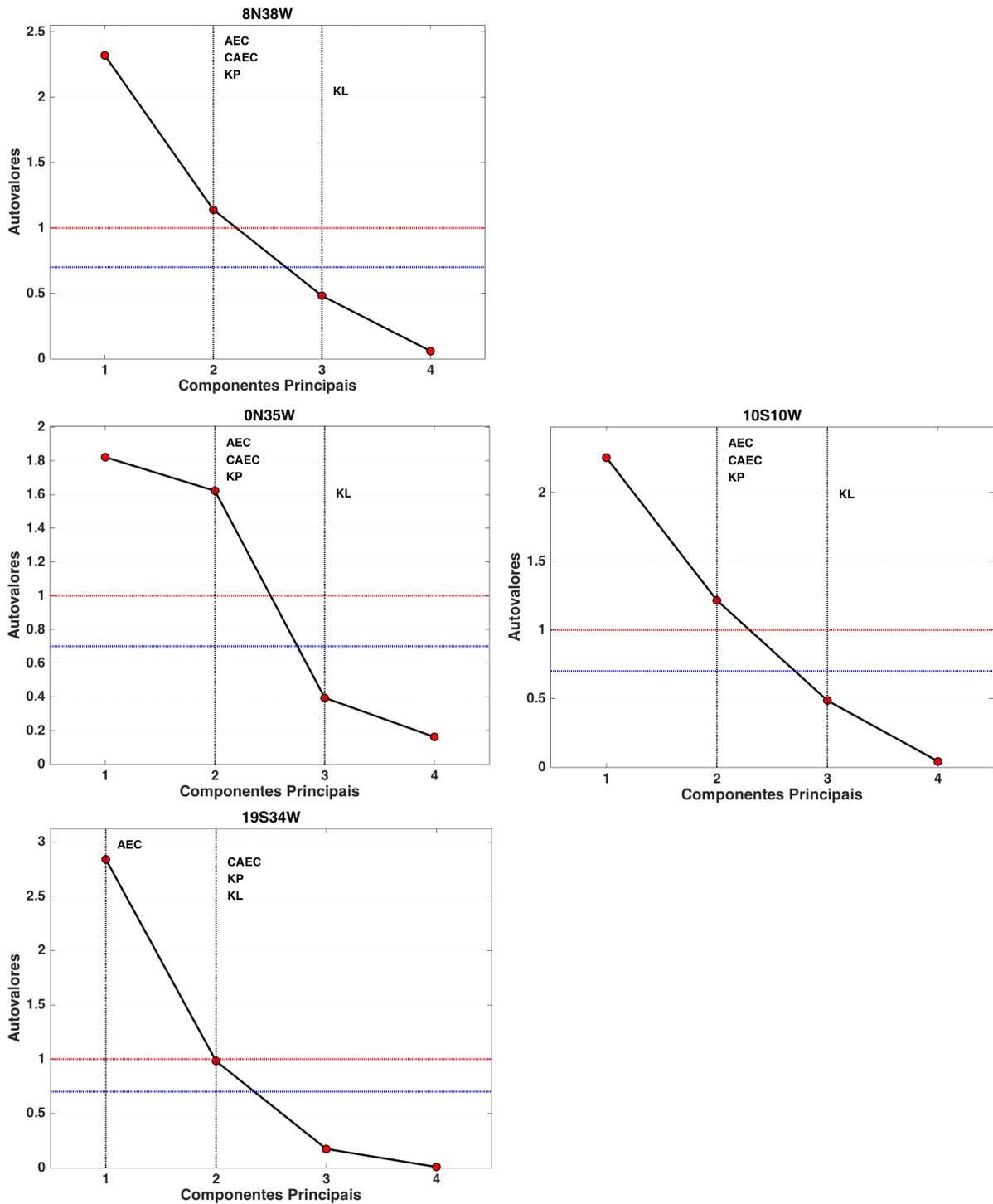
Figura 32 - Resumo dos principais coeficientes (KP, KL, AEC e CAEC) levados em consideração para a escolha do número de componente principais. O limite do critério do autovalor média é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.



Além disso, como foi utilizada a técnica de *autoscale*, cada variável terá uma variação de uma unidade. Se todas as variáveis fossem ortogonais entre si, todas as componentes em um modelo PCA teriam um autovalor igual a um, uma vez que a matriz de correlação seria uma matriz identidade. Sendo assim, como existem componentes que tem um autovalor maior que um, isso significa que ela explica a variação de mais de uma variável (BRO; SMILDE, 2014).

A Figura 33 apresenta o primeiro modelo de PCA. Com base nos critérios explicados acima, foram selecionadas 2 componentes principais como sendo suficientes para explicar boa parte da variância nas velocidades do vento. A primeira componente principal representa uma nova variável, incluindo os pesos definidos e necessários para obter a nova variável que melhor explica a variação do conjunto de dados (BRO; SMILDE, 2014).

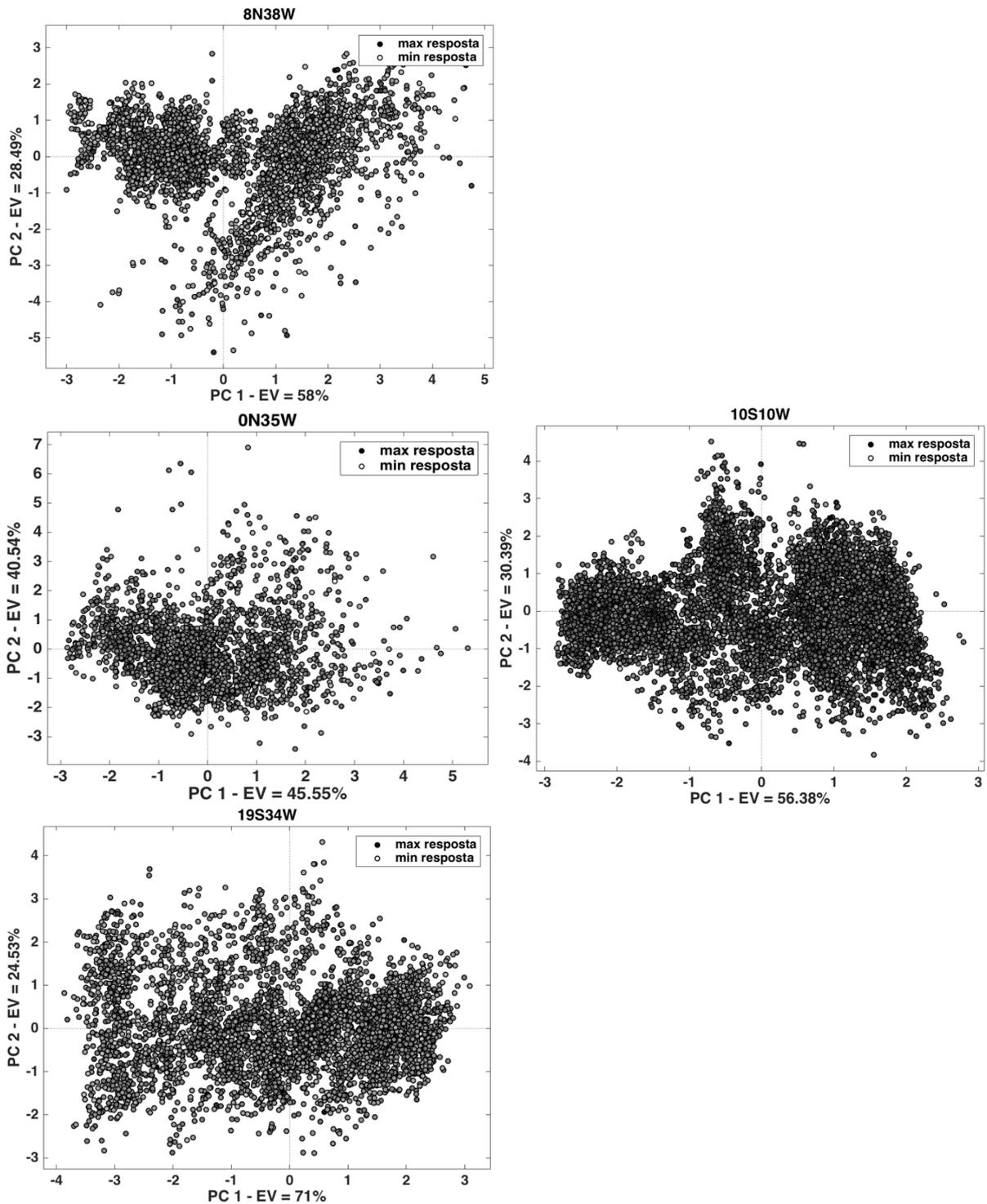
Figura 33 - *Scree plot* das posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no primeiro modelo de PCA proposto. O limite do critério do autovalor média é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.



A Figura 34, chamada de *score plot*, representa as coordenadas da amostra no espaço da componente principal e permite a investigação visual da estrutura de dados, analisando as posições da amostra e seus relacionamentos, coloridos em uma escala de cinza, onde branco é o valor mínimo de resposta, e preto, o valor máximo (BALLABIO, 2015). A primeira componente, incluindo o percentual que a ela explica (EV) se encontra no eixo x e a segunda componente no eixo y. Essa configuração de eixos será mantida em todos os *score* e *loading plots* apresentados ao longo deste trabalho.

A diferença entre os dados de vento da boia e do ERA5, que foi utilizado como resposta em todos os modelos de PCA testados neste trabalho, tem uma distribuição próximo da normal (Figura 29). Assim, é esperado que na Figura 34, os pontos sejam aleatoriamente distribuídos ao redor do 0, fato este que ocorre em 10S10W e 19S34W. Dados muito esparsos dos agrupamentos principais podem ser indicativos de *outliers* na série. Em 0N35W, a maior concentração de dados está ligeiramente mais deslocada para valores negativos e em 8N38W existem dois agrupamentos distintos. O comportamento diferenciado dessas duas boias pode ser atribuído à existência de um comportamento sazonal mais marcado na diferença boia-ERA5 (Figura 30), ou seja, os processos físicos que modulam a diferença na variável de resposta apresentam variabilidade ao longo do ano e, conseqüentemente, os dados se agrupam com outros que possuem características semelhantes.

Figura 34 - *Score Plot* para o primeiro modelo de PCA proposto para as posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. Os pontos representam as coordenadas de uma determinada amostra no espaço e seus relacionamentos, e a escala de cinza o nível de resposta da mesma.

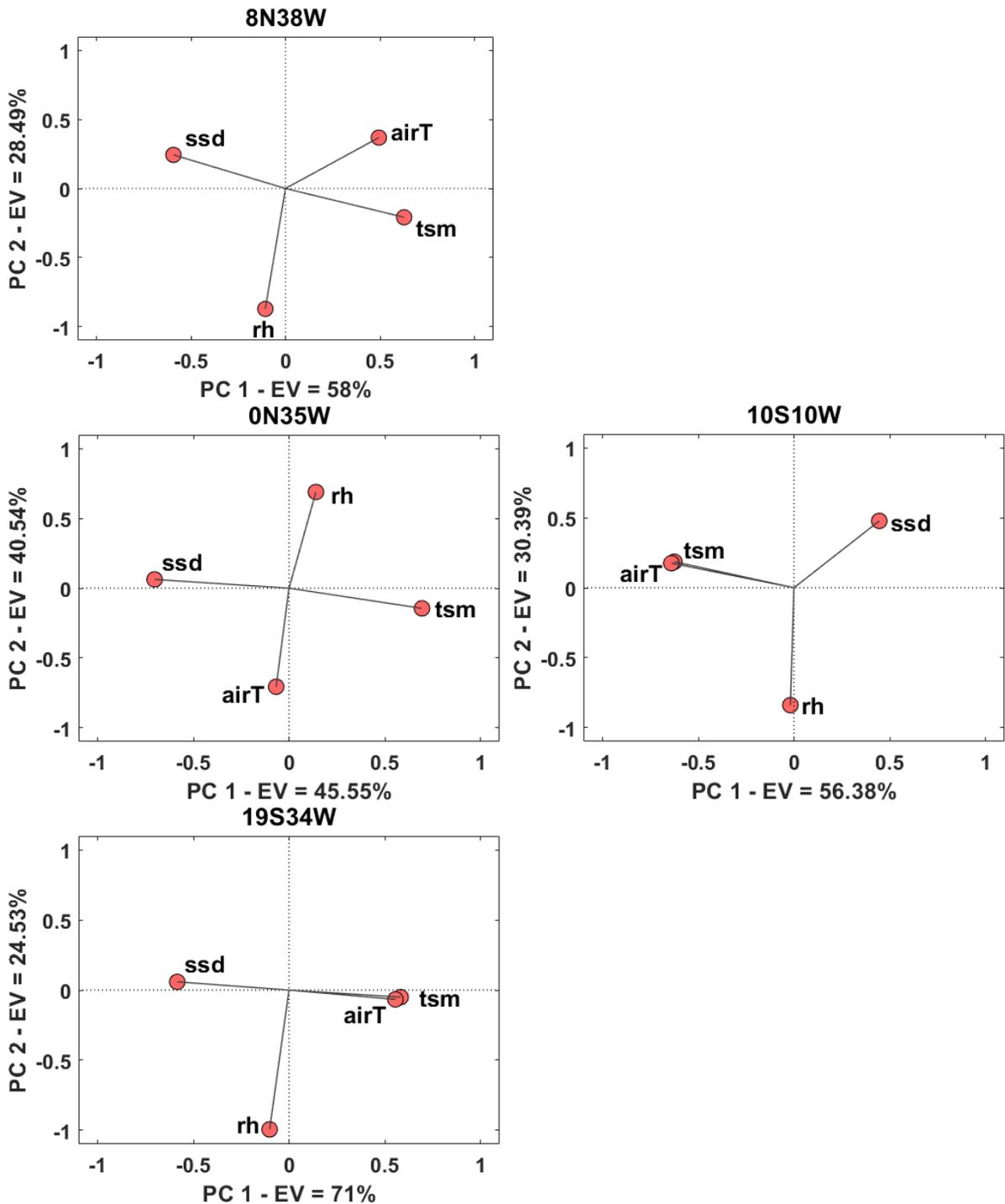


A Figura 35, chamada de *loading plot*, define a representação da componente principal, ou seja, a combinação linear de variáveis em uma componente específica. Dois objetos próximos e distantes da origem têm resposta semelhante em relação à variação explicada pelas componentes e são correlacionadas em relação à variação explicada pelas componentes (BRO; SMILDE, 2014). Variáveis que se encontram com ângulos próximos a 90° têm menor probabilidade de que estejam correlacionadas e, quando divergem formando ângulos próximo a 180° , estão negativamente correlacionadas. É importante ressaltar que esses ângulos estão baseados em retas ligando os pontos à origem do gráfico ($PC1=0$ e $PC2=0$).

Com base nessas informações é possível observar que a forma como as variáveis se relacionam entre si, ou seja, a posição relativa nos gráficos do tipo *Scree Plot*, varia de forma significativa dependendo da posição geográfica analisada. Em 10S10W e 19S34W, TSM e airT são muito bem correlacionadas, em 8N38W a distância entre essas variáveis aumenta e em 0N35W elas formam praticamente um ângulo reto, ou seja, estão pouco correlacionadas. A densidade na superfície do mar apresenta uma alta correlação negativa com airT e TSM em 19S34W; em 0N35W e 8N38W, esse mesmo comportamento só é observado em relação a TSM, enquanto que em 10S10W o ângulo entre eles está entre 90° e 180° . A correlação negativa em todos os casos entre TSM e SSD é esperada, uma vez que SSD é calculada em uma função de TSM e da salinidade, tendo essas duas grandezas no denominador do cálculo. A umidade relativa apresenta pouca correlação com TSM em todas as boias apresentadas.

Para todas as posições apresentadas, a umidade relativa apresentou praticamente todo o seu peso na componente 2. Já as variáveis TSM e SSD possuem boa parte do peso na primeira componente, porém com valores absolutos menores quando comparados à umidade relativa. A variável airT na maioria dos casos apresentou valores absolutos parecidos com TSM e SSD na componente 1, porém em 0N35W esse comportamento foi completamente modificado e todo o peso da variável foi a componente 2. Além disso, TSM e airT que nos demais casos estavam positivamente correlacionados, em 0N35W apresentam-se quase ortogonais entre si, o que indica pouca correlação entre essas variáveis nessa localidade.

Figura 35 - *Loading Plot* das posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W para o primeiro modelo de PCA proposto. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. As variáveis utilizadas nesse modelo são: temperatura da superfície do mar (TSM), densidade ao nível do mar (SSD), temperatura do ar (airT) e umidade relativa do ar (rh).



O Quadro 5 fornece um resumo com os valores encontrados para cada variável, por componente e por posição geográfica. Nela pode-se observar que as duas componentes combinadas conseguem explicar mais de 75% da variação da diferença nos dados de vento.

A variável temperatura do ar tem, à exceção das posições 0N35W e 4N23W, sempre um maior peso na componente 1 do que na componente 2; entretanto, com valores que oscilam entre negativos e positivos. A temperatura superficial do mar se comporta de forma semelhante, tendo maior peso na componente 1 em todos os casos. A densidade na superfície do mar, assim como as variáveis anteriores, também tem em geral maior peso na componente 1; há, entretanto, mais casos em que a componente 2 é mais relevante, como nos casos das boias 4N38W e 6S8E, onde a componente 2 se sobrepõe a 1 e das boias 4N23W e 10S10W onde as componentes 1 e 2 apresentam valores próximos. A umidade relativa, por outro lado, tem um comportamento diferenciado; há na maioria dos casos, praticamente todo o seu peso na componente 2.

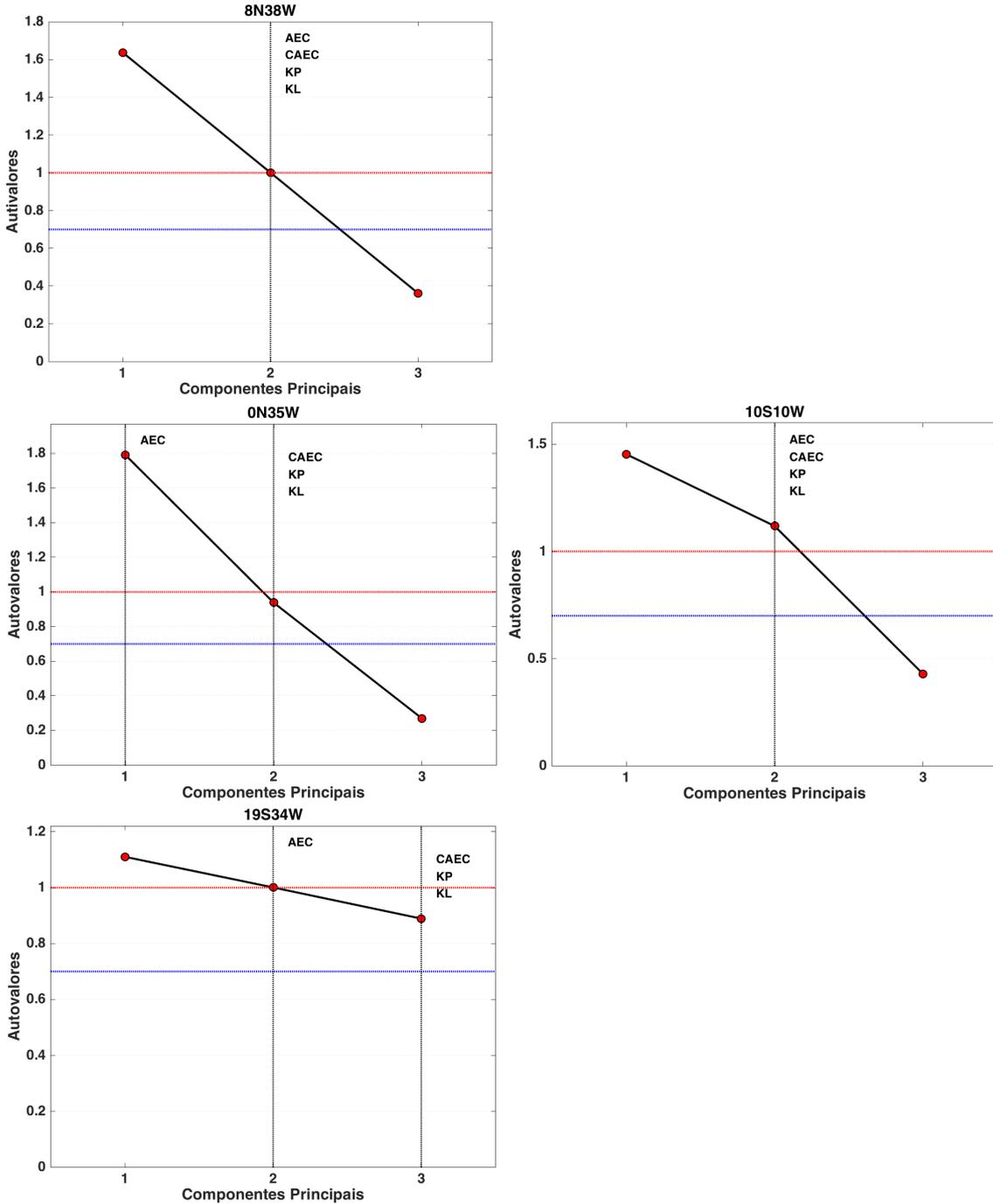
Na componente 1, na maioria dos casos, airT, TSM e SSD possuem índices absolutos semelhantes, em média 0.52, 0.58 e 0.53, respectivamente. A umidade relativa por sua vez, possui um índice médio absoluto consideravelmente menor na componente 1. Baseados nesses valores, podemos afirmar que TSM é a variável com maior peso médio dentre essas 3 para esta componente. Na componente 2, entretanto, rh é a variável que apresenta o maior peso absoluto, em média 0.84. As demais variáveis apresentam médias na casa de 0.2 na componente 2.

Quadro 5 - Resumo da PCA 1 com os índices em cada uma das componentes por variável e o percentual de explicação (EV) de cada componente para cada posição geográfica estudada. Os números em vermelho representam valores negativos e os em verde, valores positivos.

PC1						PC2				
AIRT	TSM	SSD	RH	EV (%)	Boias	AIRT	TSM	SSD	RH	EV (%)
0.57	0.59	-0.57	-0.02	70.16	0N 0W	-0.02	0.04	-0.02	1.00	25.01
-0.53	-0.53	0.52	0.41	84.30	0N 10W	-0.16	-0.28	0.27	-0.91	13.04
0.51	0.56	-0.53	-0.39	72.63	0N 23W	0.04	-0.31	0.36	-0.88	16.92
-0.07	0.69	-0.70	0.14	45.55	0N35W	-0.71	-0.14	0.06	0.69	40.54
-0.48	0.54	-0.54	0.44	53.47	4N 23W	-0.51	-0.46	0.45	0.57	36.79
0.59	0.50	-0.21	-0.60	47.81	4N 38 W	0.33	-0.41	0.79	-0.31	29.11
-0.55	-0.61	0.38	0.42	58.62	6S 8E	-0.32	0.09	-0.82	0.46	22.05
-0.57	-0.57	0.57	0.12	73.56	6S 10W	0.07	0.12	-0.02	0.99	24.38
0.49	0.63	-0.59	-0.11	58.00	8N 38W	0.37	-0.21	0.24	-0.87	28.49
-0.56	-0.59	0.58	0.06	70.38	8S 30W	-0.10	0.09	-0.10	0.99	25.39
-0.64	-0.63	0.45	-0.02	56.38	10S 10W	0.18	0.19	0.48	-0.84	30.39
0.55	0.60	-0.58	-0.07	63.02	12N 23W	0.15	-0.15	0.10	-0.97	25.75
0.55	0.53	-0.53	0.37	72.86	12N 38W	-0.32	-0.35	-0.05	0.88	18.54
-0.56	-0.58	0.57	0.16	68.91	14S 32W	-0.15	0.19	-0.22	0.95	25.65
0.55	0.57	-0.49	0.36	72.32	15N 38W	-0.13	-0.13	0.38	0.91	18.47
0.56	0.58	-0.58	-0.10	71.00	19S 34W	-0.07	-0.05	0.06	-0.99	24.53
0.55	0.59	-0.56	0.18	69.59	20N 38W	-0.19	-0.06	0.07	0.98	23.65
-0.56	-0.55	0.55	-0.29	75.58	21N 23W	-0.01	0.26	-0.25	-0.93	21.25

Um segundo modelo de PCA foi testado, dessa vez, em vez de utilizar a temperatura do ar e do mar como variáveis independentes, foi computada a diferença entre elas. Mais uma vez, baseado na Figura 36, foi selecionado um modelo utilizando 2 componentes principais, mesmo o KP tendo sido 3 em algumas das localidades. Onde o KP era 3, o valor do autovalor da terceira componente era menor que 1; sendo assim, foram mantidas apenas 2 componentes.

Figura 36 – Scree plot das posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no segundo modelo de PCA proposto. O limite do critério do autovalor médio é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.



Da mesma forma como ocorreu no primeiro modelo de PCA proposto, em 10S10W e 19S34W os dados estão distribuídos ao redor do valor 0. Em 0N35W, a maior concentração de pontos está ligeiramente mais deslocada para a esquerda no gráfico e em 8N38W, em vez de dois agrupamentos como na PCA anterior, pode-se observar os pontos mais deslocados para o lado direito (Figura 37).

Na Figura 38, também de forma semelhante ao ocorrido na primeira PCA proposta, a distribuição das variáveis é bastante diversificada entre as diferentes posições geográficas e as relações entre elas não possuem um padrão bem definido. É possível observar, no entanto, que a variável TSM-airT nas boias do Hemisfério Norte tem praticamente todo o peso na primeira componente, enquanto que na 19S34W o peso muda completamente para a segunda componente. A variável rh tem o comportamento oposto, mudando o peso, que é ligeiramente maior na segunda componente para a primeira.

Figura 37 - *Score Plot* para o segundo modelo de PCA proposto para as posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. Os pontos representam as coordenadas de uma determinada amostra no espaço e seus relacionamentos, e a escala de cinza o nível de resposta da mesma.

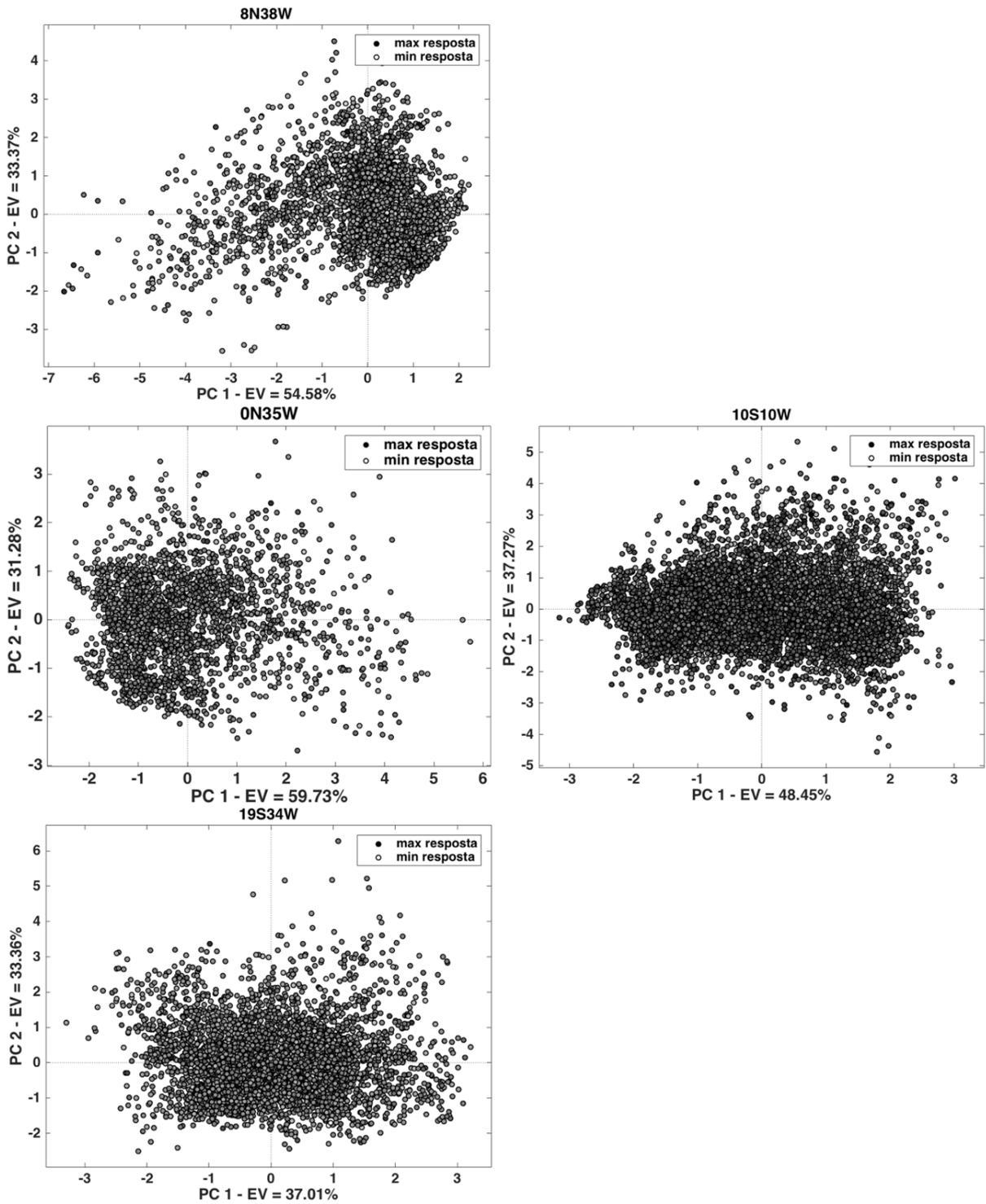
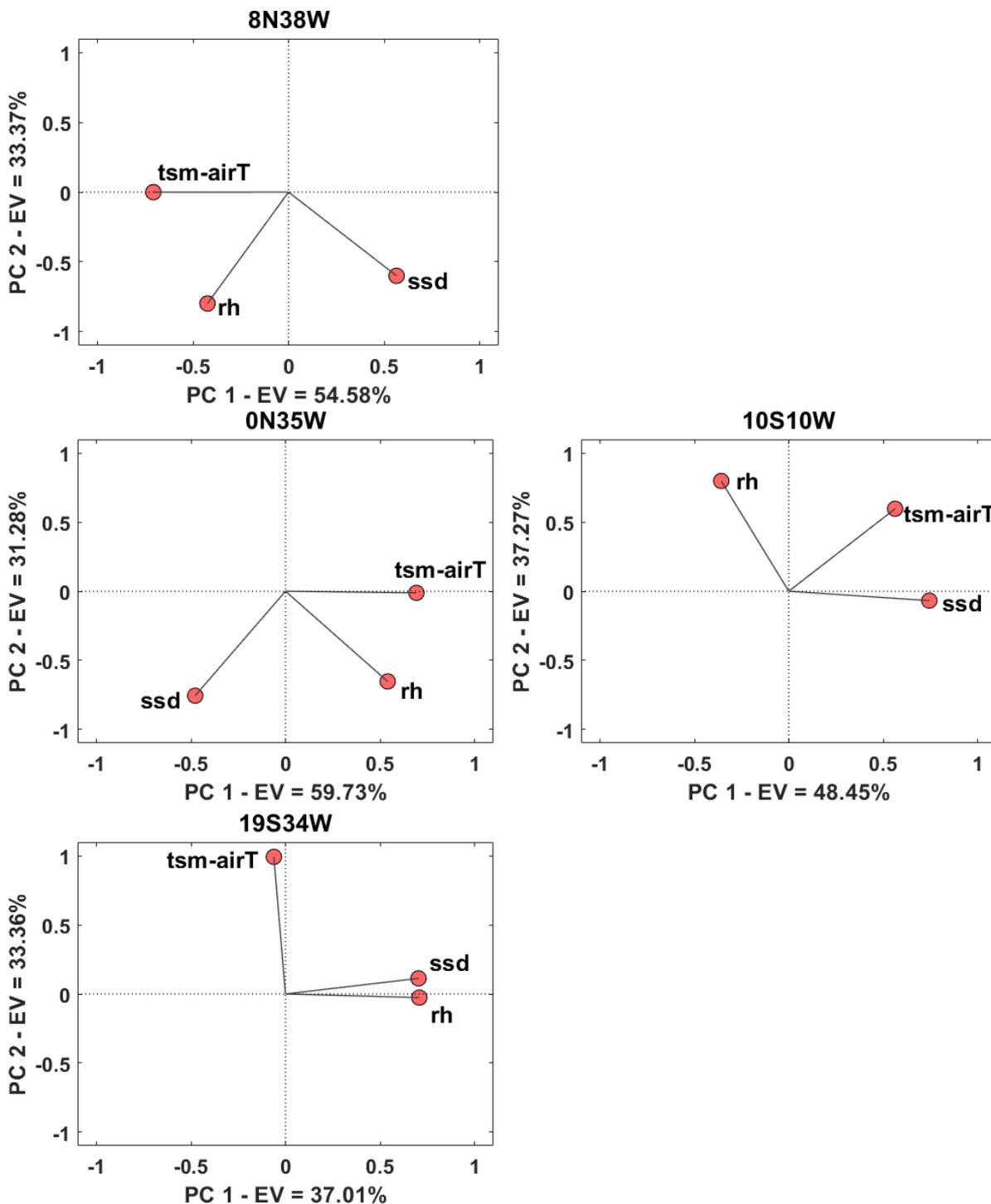


Figura 38 - *Loading Plot* das posições 8N38W, 0N35W, 10S10W e 19S34W para o segundo modelo de PCA proposto. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. As variáveis utilizadas nesse modelo são: temperatura da superfície do mar - temperatura do ar (TSM-airT), densidade ao nível do mar (SSD) e umidade relativa do ar (rh).



O Quadro 6 fornece um resumo desse segundo modelo, em que é possível observar que, no pior dos casos, as 2 componentes juntas ainda explicam mais de 70% da variação, percentual considerado significativo para observações da natureza.

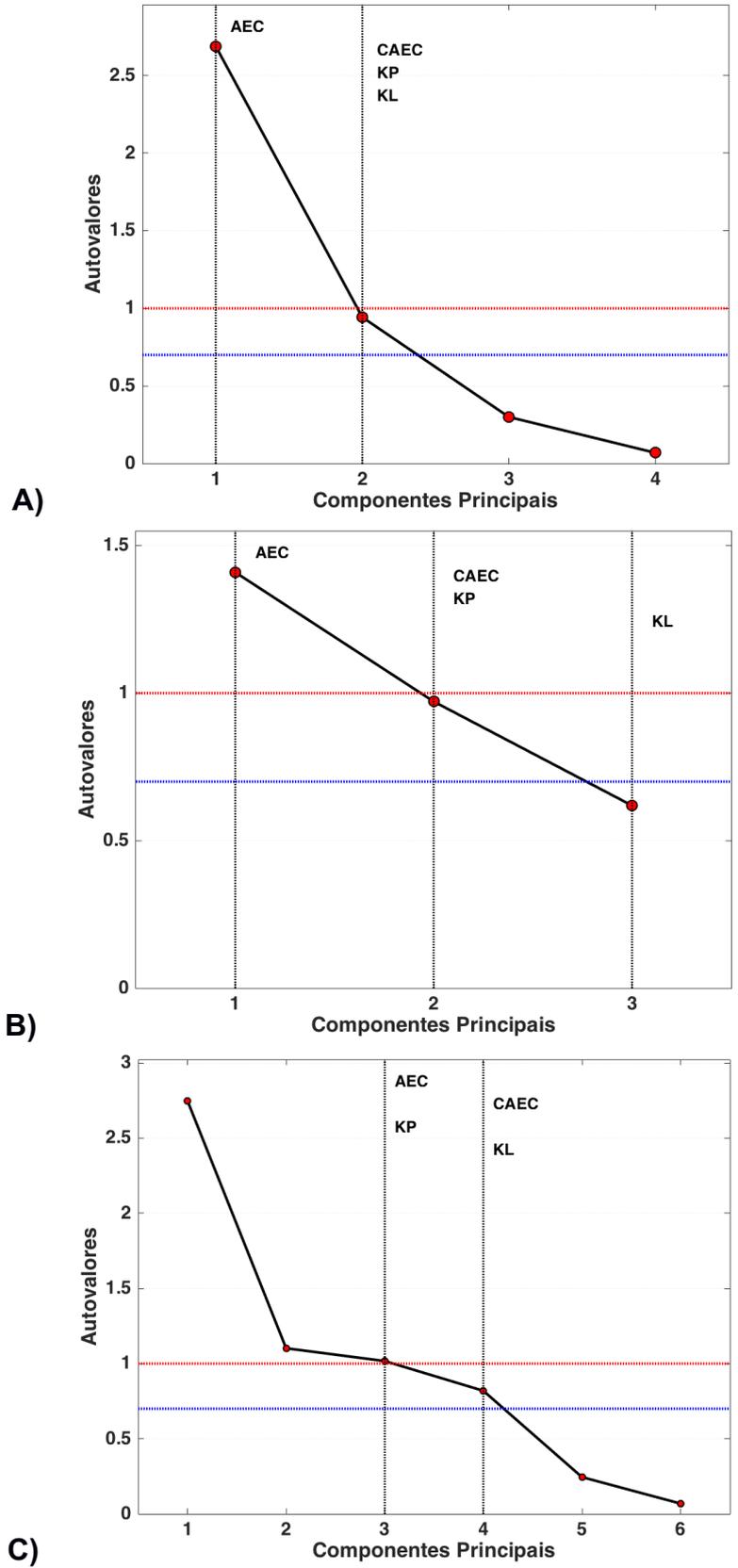
No panorama geral das variáveis é possível notar uma menor frequência de valores extremos (muito próximos de 0 ou 1), e quando eles ocorreram, estavam majoritariamente na componente 2. Em termos de valores médios para cada componente, TSM-airT e rh foram as mais significativas na componente 1, tendo um resultado médio ligeiramente maior se comparado ao SSD, 0.57 e 0.5, respectivamente. Na componente 2, SSD foi a variável mais significativa com uma média de 0.53, valor ligeiramente maior que as médias de 0.41 e 0.43 de TSM-airT e rh.

Quadro 6 - Resumo da PCA 2 com os índices em cada uma das componentes por variável e o percentual de explicação (EV) de cada componente para cada posição geográfica estudada. Os números em vermelho representam valores negativos e os em verde, valores positivos.

PC1					PC2			
TSM - AIRT	SSD	RH	EV (%)	Boias	TSM - AIRT	SSD	RH	EV (%)
0.69	0.55	0.47	40.84	0N 0W	-0.02	-0.63	0.77	32.68
0.50	-0.68	-0.53	62.80	0N 10W	0.73	0.01	0.68	29.45
0.58	-0.70	-0.43	59.57	0N 23W	-0.57	0.02	-0.82	31.64
0.69	-0.48	0.54	59.73	0N35W	-0.01	-0.76	-0.65	31.28
0.68	-0.50	0.54	64.54	4N 23W	-0.02	-0.74	-0.67	28.78
0.71	-0.18	0.68	50.08	4N 38 W	-0.02	0.96	0.28	33.60
-0.68	0.72	0.13	46.82	6S 8E	0.37	0.18	0.91	36.15
0.54	0.33	0.77	40.75	6S 10W	-0.62	0.78	0.10	37.47
-0.71	0.57	-0.42	54.58	8N 38W	0.00	-0.60	-0.80	33.37
0.71	-0.21	0.68	45.58	8S 30W	0.01	-0.96	-0.30	33.38
0.56	0.74	-0.36	48.45	10S 10W	0.60	-0.07	0.80	37.27
0.69	0.29	0.66	44.61	12N 23W	-0.07	0.94	-0.33	32.69
0.27	0.70	-0.66	53.17	12N 38W	0.95	-0.05	0.32	32.53
0.71	-0.03	0.71	49.89	14S 32W	0.11	-0.98	-0.15	33.93
-0.25	-0.68	0.69	44.50	15N 38W	0.96	-0.25	0.10	32.72
-0.06	0.70	0.71	37.01	19S 34W	0.99	0.11	-0.03	33.36
0.55	-0.54	0.64	45.56	20N 38W	-0.70	-0.71	-0.01	29.41
0.60	0.35	-0.72	51.07	21N 23W	-0.53	0.85	-0.04	34.80

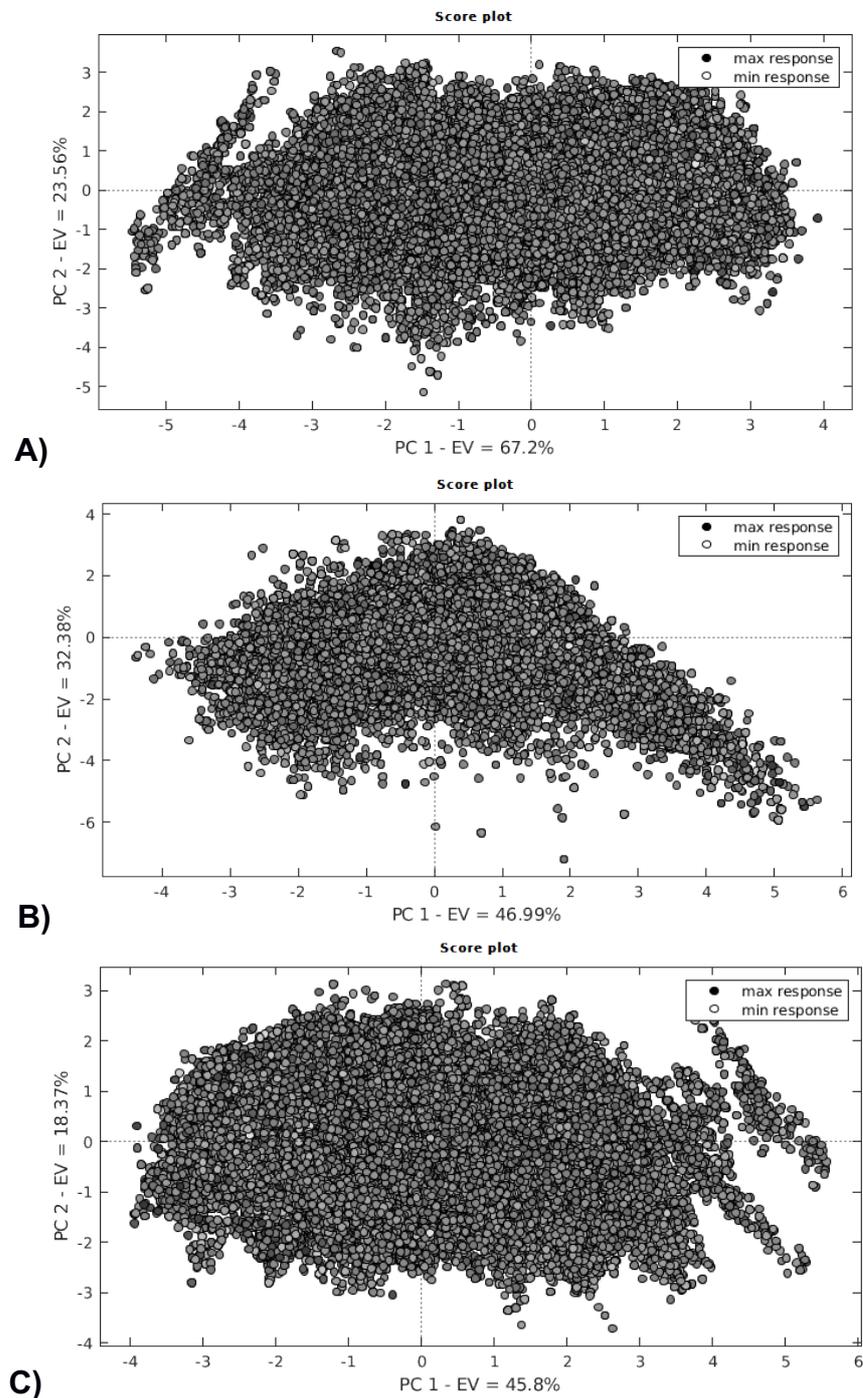
Por fim, os dados individuais de cada uma das 18 localidades foram compilados em uma única matriz e três modelos de PCA foram testados, os dois primeiros seguindo os mesmos padrões apresentados anteriormente, e um terceiro, onde foram incluídas as variáveis mês e o desvio padrão da diferença PIRATA - ERA5. Assim como ocorreu nos casos já apresentados anteriormente, foram selecionadas 2 componentes para todos os três modelos de PCA propostos (Figura 39). No último teste realizado, um número de até 4 componentes poderia ser considerado aceitável; contudo, como a terceira componente já está muito próxima de 1, e 2 componentes já conseguem explicar mais de 64% da variação, optou-se por manter o número de componentes utilizadas em todos os outros modelos.

Figura 39 - *Scree plot* para auxiliar na escolha do número de componentes para as PCA's que utilizam dados de todas as boias do PIRATA. Nela são apresentadas respectivamente o (A) primeiro, o (B) segundo e o (C) terceiro modelo de PCA propostos por esse trabalho. O limite do critério do autovalor médio é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.



Com o agrupamento de todas as boias, a distribuição dos dados se manteve em torno de 0, com alguns pequenos grupos de amostras, especialmente no segundo modelo apresentando pequenos deslocamentos se afastando da origem (Figura 40).

Figura 40 - *Score Plot* utilizando dados de todas as boias do projeto PIRATA. Nela são apresentadas respectivamente o (A) primeiro, o (B) segundo e o (C) terceiro modelo de PCA propostos por esse trabalho. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. Os pontos representam as coordenadas de uma determinada amostra no espaço e seus relacionamentos, e a escala de cinza o nível de resposta da mesma.

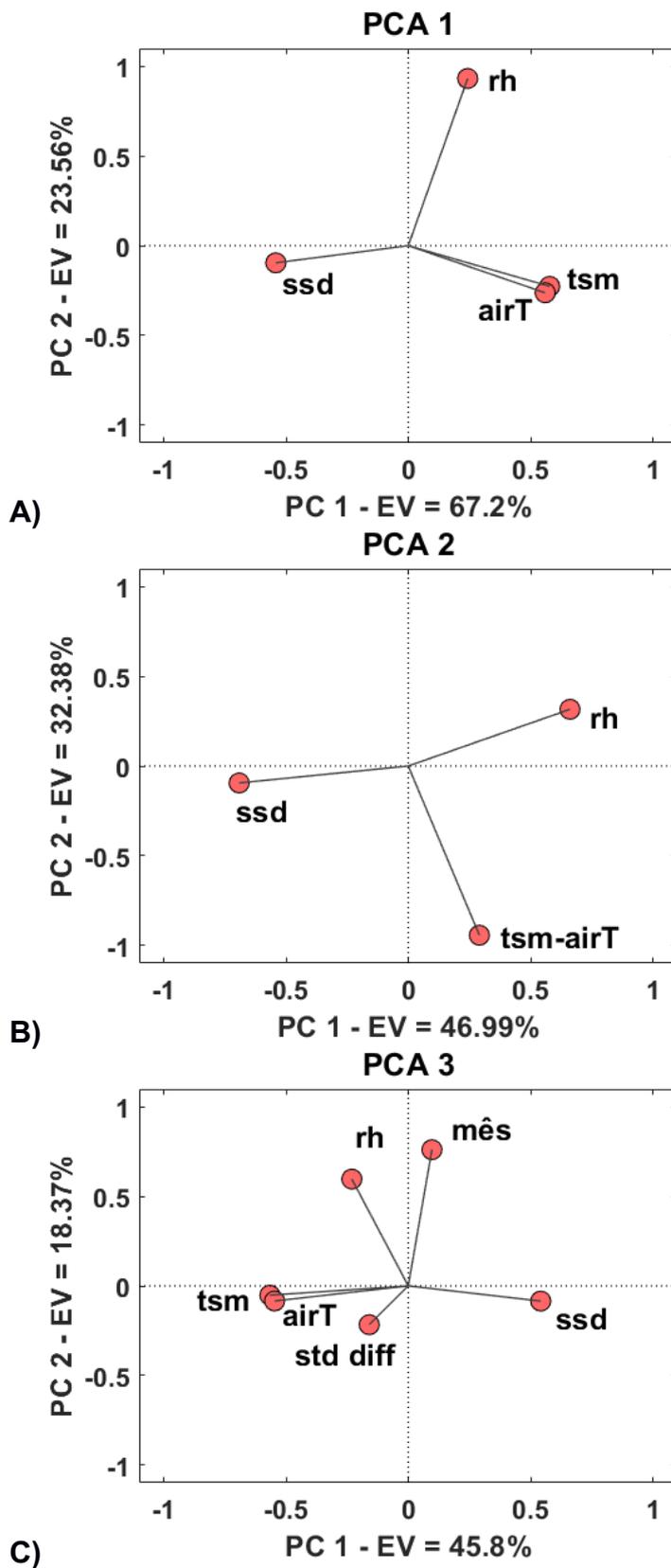


A Figura 41 apresenta o *loading plot* para cada um dos modelos de PCA já descritos anteriormente, utilizando dados de todas as boias do projeto PIRATA. No primeiro modelo de PCA (Figura 41A), é possível notar que as variáveis airT e TSM mantêm o padrão mais comum observado, sendo positivamente correlacionadas entre elas e negativamente correlacionadas com SSD. As três variáveis têm quase que a totalidade de seus pesos na componente 1, tendo seus valores muito próximos, mas com sinais opostos. A variável rh, por sua vez, não apresenta correlação com as demais, porém possui quase todo o peso de explicação da variação atribuída à segunda componente.

No segundo modelo de PCA proposto (Figura 41B) é possível observar que SSD continua tendo boa parte do seu peso na primeira componente, enquanto que a variável TSM-airT fica com quase a totalidade do peso na segunda componente. Já a variável rh passa a ter um maior peso na primeira componente do que na segunda, entretanto com valores mais medianos. Sendo assim, SSD é a variável mais significativa na primeira componente, e TSM-airT é a mais significativa para a segunda componente.

O terceiro modelo de PCA (Figura 41C), em que foram levadas em consideração mais duas variáveis, apresentou algumas diferenças interessantes. O desvio padrão da diferença tem pouca influência sobre as duas componentes. As variáveis airT e TSM mantêm o padrão positivamente correlacionadas entre elas e negativamente correlacionadas com SSD, entretanto com sinais invertidos se comparados ao primeiro modelo de PCA proposto. Essas três variáveis mantiveram a ordem de magnitude dos seus pesos em relação à componente um. A variável rh também manteve praticamente todo o seu peso na segunda componente, mas os valores desse peso diminuíram; e a nova variável mês passou a ter o maior peso na segunda componente, o que mostra que a sazonalidade é importante para a variação das diferenças na velocidade do vento entre as boias do PIRATA e do ERA5.

Figura 41 - *Loading Plot* utilizando dados de todas as boias do projeto PIRATA. Nela são apresentadas respectivamente o (A) primeiro, o (B) segundo e o (C) terceiro modelo de PCA propostos por esse trabalho. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. As variáveis apresentadas são: temperatura da superfície do mar (TSM), densidade ao nível do mar (SSD), temperatura do ar (airT), umidade relativa do ar (rh), temperatura do mar – temperatura do ar (TSM-airT), mês e desvio padrão da diferença (std diff).



5 DISCUSSÕES

As boias do projeto PIRATA são uma ferramenta essencial para o melhor entendimento dos processos que ocorrem no Atlântico Tropical e que são fundamentais no que tange estudos e projeções climáticas. Esses são dados observacionais que, mesmo com os problemas inerentes a dados *in situ*, discutidos por este e tantos outros trabalhos (ex.: ZIEGER; VINOOTH; YOUNG, 2009; KENT; FANGOHR; BERRY, 2013; BABANIN; MCCONOCHIE; CHALIKOV, 2018), apresentam uma excelente taxa de aproveitamento dos mesmos (acima de 80% entre 1997 e 2017, quando combinadas todas as boias e variáveis, segundo Bourlès *et al.* 2019), além de uma boa cobertura temporal, uma vez que o projeto está em operação a pouco mais de 20 anos. Com o aumento da série de dados, agora é possível utilizar essas séries de dados para investigar a variabilidade interanual por exemplo. Além disso, a boa consistência dos dados se reflete na vasta utilização dos mesmos em diversos artigos de validação e calibração das diferentes variáveis medidas nas boias (mais de 60 artigos desde 2006, segundo Bourlès *et al.* 2019).

Na comparação entre os dados das boias, dos satélites e do ERA5 é possível afirmar que, embora seja uma reanálise, o ERA5 representou melhor o ambiente e sua variabilidade natural se comparado aos satélites. Este fato pode estar ligado ao processo de assimilação dos dados do ERA5, que entre outros conjuntos de dados, também utiliza satélites como o ASCAT e o QuikSCAT para melhorar a qualidade dos dados modelados. Cáceres-Soto *et al.* 2020, realizaram testes com diversos dados de vento provenientes de plataformas como o ERA-Interim e QuikSCAT como condição de contorno para simulações utilizando o modelo WRF no Chile e nessas condições, a simulação utilizando o ERA-Interim foi a que mais se aproximou das medições realizadas pela boia utilizada como comparativo. Sendo a reanálise ERA5 uma melhora em relação a ERA-Interim (Hersbach *et al.* 2018), os resultados apresentados aqui, corroboram com a melhor representatividade do ERA5 em relação ao ambiente natural.

Belmonte Rivas e Stoffelen (2019) destacam que tanto o ERA-Interim como o ERA5 possuem erros sistemáticos na partição da energia cinética do vento em componentes zonais e meridionais quando comparados aos dados do ASCAT. O

presente trabalho parece verificar um padrão parcialmente semelhante quando comparamos os dados do ERA5 com as boias. Nesse caso, o CRMSE das componentes do vento são constantemente maiores se comparados aos valores das componentes u e v , entretanto, em alguns casos (ex.: boias 8N38W e 19S34W) o valor de R apresentado pelas componentes é ligeiramente maior que o da velocidade do vento.

Pezzi *et al.* (2005), propõe em seu trabalho na região da confluência Brasil-Malvinas, utilizar TSM-airT como indicador da estabilidade atmosférica; valores positivos ($TSM > airT$) indicam uma camada limite atmosférica marinha (CLAM) instável, o que favorece a turbulência, enquanto valores negativos ($TSM < airT$) indicam uma CLAM estável e diminuição da turbulência. Esse indicador fornece mais um indício de que a estabilidade atmosférica é o fator fundamental na diferença entre as bases de dados. Na comparação entre os dados das boias com os dados do ERA5, é possível observar que os picos (cavas) de R e cavas (picos) de CRMSE seguem um padrão parecido em relação ao ciclo diurno de variação da diferença TSM-airT (gráfico disponível no Apêndice A, figura A1). Quando essas diferenças são menores, existe uma tendência de maior convergência nos resultados dessas plataformas.

Dentre os satélites, o ASCAT teve em média um resultado ligeiramente melhor se comparado ao QuikSCAT, entretanto esta foi uma melhoria pouco significativa. Esse avanço pode ser atribuído a uma série de fatores como melhorias nos equipamentos, tanto da boia como do satélite, aperfeiçoamento das rotinas de processamento dos dados ou até mesmo em virtude da utilização da banda C ou invés da Ku que, conforme descrito na seção 2.1.2, representa uma vantagem na aquisição dos dados na presença de chuva.

Chelton e Freilich em 2005 realizaram, entre outras análises, comparações entre algumas boias do *National Data Buoy Center* (NDBC) e o QuikSCAT e encontraram valores de RMSE da velocidade do vento entre esses dois dados de 1.2 m/s, contra a média de 1.71 m/s encontrado neste trabalho. Essa diferença pode ser devido ao pequeno intervalo de tempo em que o estudo de 2005 foi realizado (agosto/1999 – julho/2001), o modelo do equipamento ou até mesmo a localização das boias utilizadas, uma vez que estas boias ainda que em alto mar, se localizam próximas a costa dos Estados Unidos, Canadá e Havaí. Quando foram analisadas as

componentes do vento de forma mais global os valores do erro aumentaram, assim como apontados por este trabalho.

Young, Sanina e Babanin (2017) por sua vez demonstraram resultados mais próximos a este trabalho; a diferença ao longo do tempo entre o QuikSCAT e as boias do NDBC também variou entre -1 e 1. A menor presença de grandes picos na análise apresentada por Young, Sanina e Babanin (2017) demonstram que existe um espaço para melhoria na metodologia de identificação e remoção de *outliers* realizada pelo presente trabalho. Além disso, independente da qualidade dos resultados, como dados confiáveis de calibração sobre a realidade do solo em altas velocidades do vento são muito limitados, todos os sistemas de sensoriamento remoto (escaterômetros, altímetros, radiômetros) devem ser usados com cautela em velocidades do vento superiores a 20 m/s (YOUNG; SANINA; BABANIN, 2017).

Como já destacado na seção 2.2.4, dados de satélite são relativos a superfície do oceano, enquanto os das boias são relativos a Terra (KENT; FANGOHR; BERRY, 2013). Devido a sistemática negligência em desconsiderar o efeito das correntes superficiais nos dados de satélites, a velocidade do vento em relação ao oceano é sistematicamente mais baixa, em média, do que a velocidade do vento em relação à Terra fixa (EDSON *et al.*, 2013; CRONIN *et al.*, 2019). Ao analisar a média das diferenças boia - satélite ao longo do tempo, é possível verificar essa tendência nos dados. Existe uma maior presença de valores positivos quando plotadas a média das diferenças boia - satélite ao longo do tempo.

Ainda sobre os satélites, o fato de pelo menos uma das componentes do vento (u e/ou v) ter resultado consideravelmente inferior quando observada de forma isolada em relação ao vetor de velocidade sugere que, assim como descrito por Mears *et al.* (2019), grande parte da diferença nos componentes do vento se deve a diferenças de direção, que não foram analisadas por este trabalho.

É importante destacar também a diferença na frequência de aquisição dos dados ao realizarmos as comparações. É necessário que o usuário dessas diferentes plataformas tenha bem estabelecido a frequência mínima necessária para estudar os eventos propostos e qual o comprimento mínimo que uma série temporal deve ter para que o estudo seja de fato relevante. Diante desse cenário, o ERA5 se mostra mais versátil para um maior número de estudos devido a possibilidade de adquirir 40

anos de dados (em breve 70 anos), em resolução horária. Os dados da PIRATA tem o potencial de uso aumentado a cada ano em que as boias são mantidas em funcionamento, uma vez que a série de dados de alta frequência aumenta.

Com o intuito de facilitar a visualização, o Quadro 7 foi criado para sintetizar as principais vantagens e desvantagens para cada uma das bases de dados utilizadas ao longo deste trabalho:

Quadro 7 - Principais vantagens e desvantagens em relação a resolução temporal e espacial, além das principais influencias físicas que atuam nas bases de dados utilizadas por este trabalho.

		PRÓS	CONTRAS
Boias PIRATA	Resolução Temporal	Dados de alta frequência	Falhas nas séries temporais; Exigem constante manutenção de forma que a captação de dados seja continuada
	Resolução Espacial	Realidade em solo	Dado pontual, representativo para uma pequena área
	Influências Físicas	Equipamento pode sofrer manutenções periódicas e atualização dos componentes	Equipamento sujeito aos efeitos de <i>pitch</i> , <i>roll</i> e efeito de abrigo gerado pelas ondas; Equipamento sujeito a vandalismo; Dado precisa ser convertido para a altura padrão de 10 m de altura
Escaterômetros (QuikSCAT e ASCAT)	Resolução Temporal	Pelo menos 10 anos de dados com poucas falhas na série temporal	Dado Diário
	Resolução Espacial	Dado global em um grid de 0.25 x 0.25°	Dados de pior qualidade próximos a costa e na presença de gelo marinho
	Influências Físicas	Dado pouco influenciado pela presença de nuvens	Dados perdem qualidade na presença de chuva; Dados dependentes da estabilidade atmosférica; Dados perdem qualidade na presença de ventos muito fortes ou muito fracos
Reanálises (ERA5)	Resolução Temporal	Dados horários; Longa série temporal	Fenômenos em escalas menores que a horária são mal representados
	Resolução Espacial	Dado global em um grid de 0.25 x 0.25°	Os dados de velocidade do vento exatamente nos polos (90N e 90S) são muito baixos. O ECMWF recomenda utilizar os dados de pontos vizinhos
	Influências Físicas	Incorporam medições <i>in situ</i> e de sensoriamento remoto na assimilação de dados	Simulações são altamente dependentes da qualidade dos campos forçantes; Simplificações nos modelos tornam difíceis a representação de alguns fenômenos

Ebuchi, Graber e Caruso (2002) não encontraram relação direta entre o residual do vento do QuikSCAT e das boias do *Tropical Atmosphere Ocean* (TAO), PIRATA e NDBC e alguns parâmetros atmosféricos e oceanográficos medidos pelas boias. O mesmo estudo, no entanto, levou em consideração somente ventos entre 9 e 12 m/s, além de não ter deixado claro se as comparações foram realizadas por localidade ou de forma mais generalizada. Através das análises de componentes

principais foi possível aprofundar as investigações sobre quais fatores externos têm maior potencial para afetar a diferença entre os dados de vento da boia e o da reanálise.

Diferentemente dos resultados apresentados por Ebuchi, Graber e Caruso (2002), todos os modelos de PCA aqui testados explicam bem a diferença entre os dados de velocidade do vento medidos *in situ* pelas boias do projeto PIRATA e a reanálise ERA5, o que é uma boa indicação de que ao menos uma das variáveis propostas de fato exerce alguma influência sobre a diferença nas medições de vento entre o ERA5 e as boias do PIRATA. O comportamento bastante variável entre as diferentes posições geográficas sugere que o fator localização geográfica é relevante. Este é um fato que também pode ser observado na variabilidade dos resultados apresentados na parte 1 do capítulo 4, com valores de R, CRMSE e STD consideravelmente variáveis entre as boias analisadas, contudo não existe um padrão latitudinal ou longitudinal claro nessas diferenças.

A variabilidade geográfica dos dados também foi observada no trabalho de Foltz *et al.* (2004). Os autores realizaram diversas comparações entre parâmetros medidos pelas boias PIRATA ao longo do transecto 038°W e seus impactos no balanço de sal na região. Dentre os fatores listados como importantes para a variabilidade nos dados, podemos destacar a mudança sazonal dos fluxos de água doce; deslocamento meridional da ZCIT e consequente mudança nos padrões de evaporação, precipitação, e dos ventos alísios; variações sazonais nas correntes zonais. É importante destacar também, que essas variabilidades significativas em alguns dos parâmetros foram observadas mesmo em boias com menor distância entre elas, como a 4N38W e a 8N38W.

Conforme já descrito ao longo deste trabalho, o Atlântico Tropical apresenta uma significativa componente sazonal modulada pelo acoplamento das interações oceano-atmosfera-terra, o que corrobora o aparecimento da variável “mês” como tendo bastante relevância na componente 2, ainda que no geral essa variável tenha um menor percentual de explicação se comparado a TSM, SSD e airT. Este resultado sugere que a variabilidade da posição da ZCIT contribui de forma significativa para as diferenças entre o dado observado e o do ERA5, resultado provavelmente de processos físicos não totalmente incorporados no modelo. Desvios do ciclo sazonal

na temperatura da superfície do mar e ventos, embora menos pronunciados que as mudanças sazonais, também são importantes (FOLTZ; SCHMID; LUMPKIN, 2018) devido à sua influência por exemplo na localização da ZCIT e das chuvas continentais (NOBRE; SHUKLA, 1996). Tanto os efeitos da sazonalidade como os desvios são contemplados nas variáveis utilizadas, não tendo sido feita uma análise separada desses dois efeitos distintos.

A umidade relativa não pode ser desprezada e também se mostra relevante, especialmente na segunda componente principal. Conforme destacado por Liu e Tang (1996), historicamente, os estudos sobre transporte de turbulência foram em grande parte realizados sobre a terra ou em latitudes médias do oceano, onde variações são principalmente geradas por flutuações de temperatura e por isso, o efeito da variação da umidade é geralmente negligenciado nesses estudos. Contudo, no quente oceano tropical, devido ao rápido aumento da umidade com a temperatura, as flutuações de umidade podem ter efeitos significativos na estabilidade atmosférica, e conseqüentemente afetar nas medições do vento a 10m.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Confiabilidade nos dados utilizados é imprescindível para a realização de qualquer estudo científico. Diante deste cenário, este trabalho se mostra relevante ao não apenas ressaltar as limitações inerentes a algumas das principais bases de dados de vento sobre o oceano, mas também quantificar as diferenças entre elas.

As comparações entre as diferentes plataformas de dados de vento realizadas por esse trabalho somente levaram em consideração o ajuste para a estabilidade atmosférica e obtiveram em geral resultados satisfatórios, entretanto, piores se comparados a estudos realizados em outras áreas e com equipamentos semelhantes. Belmonte Rivas e Stoffelen (2019) também sugerem uma correção nos dados dos modelos para a densidade do ar de forma a obter uma melhor correspondência quando comparamos estes dados com os provenientes dos escaterômetros.

Apesar de esse trabalho não ter realizado uma comparação direta entre reanálises e escaterômetros, é importante ressaltar a necessidade de ajustes que além da estabilidade da atmosfera e densidade do ar, também leve em conta os efeitos das correntes oceânicas, conforme discutido por trabalhos como Chelton e Freilich (2005) e Belmonte Rivas e Stoffelen (2019). O ajuste para as correntes poderia contribuir para uma melhoria nos resultados da comparação entre os satélites e as boias. Além dos impactos na comparação direta, as ondas e correntes em geral também não são bem incorporados nos algoritmos para cálculo de fluxos. Sem nenhum dos ajustes sugeridos, das bases de dados apresentadas ao longo desse trabalho, o ERA5 se mostrou como a opção mais versátil para uma maior variedade de estudos climáticos e aquela que apresentou melhor concordância com os dados medido *in situ*.

Reduzir imprecisões nos cálculos dos fluxos ar - mar é imprescindível para que possamos melhorar as previsões meteorológicas e climáticas de longo prazo, e essa previsibilidade a longo prazo tem sua origem nos oceanos, devido a sua alta capacidade térmica. Por estar presente em todas as fórmulas *bulk*, o vento é uma das variáveis, que têm papel fundamental para melhorar os cálculos desses fluxos. No entanto, os resultados apresentados pela análise de PCA neste trabalho mostram que

outras variáveis como a TSM podem, além de afetar diretamente no cálculo dos fluxos, também ter esse efeito cumulativo nas medições diretas de vento, provavelmente afetando o nível de turbulência no horizonte da boia.

O fluxo de momento, por depender basicamente da variável de vento a 10m, é mais facilmente calculado se comparado aos fluxos de calor, que dependem de parâmetros termodinâmicos próximos à superfície (umidade e temperatura a 2 m) e fluxos radiativos para a superfície (PRAVEEN KUMAR *et al.*, 2012). Fica evidente, portanto, que apenas melhorar a aquisição de dados de vento sobre o oceano não é suficiente para melhorar significativamente os estudos de fluxos entre o oceano e a atmosfera. É necessário que esforço seja empregado em também realizar melhorias nas medições dos demais parâmetros de superfície como temperatura, umidade e salinidade.

Idealmente, os campos de fluxo global seriam calculados a partir de observações de alta resolução de cada um dos parâmetros de entrada das fórmulas *bulk*, entretanto, as mesmas não são frequentes o suficiente para permitir a construção de campos globais; e variáveis de entrada tendenciosas podem levar a fluxos tendenciosos (KENT; FANGOHR; BERRY, 2013). Sendo assim, além dos cuidados com as séries de vento utilizadas, é imperativo que a região em que o estudo dos fluxos entre o oceano e a atmosfera é realizado seja levada em consideração. Regiões naturalmente mais turbulentas tem maior tendência a piores resultados tanto nas comparações entre plataformas de dados de vento como no cálculo dos fluxos na interface oceano-atmosfera. Parâmetros mais regionalizados possuem, portanto, um bom potencial para melhoria nos cálculos de fluxo entre esses dois sistemas.

Outras sugestões de estudos que advém da conclusão deste trabalho seriam: (1) desenvolver uma metodologia mais completa para filtrar os dados de todas as variáveis utilizadas, (2) utilizar dados de satélite processado de forma que pudéssemos retirar o horário exato da passagem do satélite pelo ponto de grade a ser utilizado. Além disso, conjunto de dados como do ePIRATA (*enhanced* PIRATA), descrito por Foltz, Schmid e Lumpkin (2018), que integram os dados das boias PIRATA e diversos outros (ex.: TropFlux, OAFlux, Argo, *Ocean Surface Currents Analyses–Real Time* (OSCAR)), para preenchimento das falhas nas séries de dados podem ser uma alternativa para realização de estudos com maior escala temporal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, C. **Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere**. 7. ed. Stamford: Cengage Learning, 2015.

AHRENS, C. Donald; HENSON, Robert. **Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment**. 12. ed. Boston: Cengage, 2018. 656 p.

AIMOLA, L.; MOURA, M. A Influência da Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico na Definição da Posição Média da ZCIT ao Norte do Equador. Uma Revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4 suppl 1, p. 555-563, 2016.

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY. **Glossary of Meteorology**: Reynolds Number, 2012a. Disponível em: http://glossary.ametsoc.org/wiki/Reynolds_number. Acesso em: 9 maio 2020.

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY. **Glossary of Meteorology**: Gradient Richardson Number, 2012b. Disponível em: http://glossary.ametsoc.org/wiki/Gradient_richardson_number. Acesso em: 20 jun. 2020.

BABANIN, A.; MCCONOCHIE, J.; CHALIKOV, D. Winds near the Surface of Waves: Observations and Modeling. **Journal of Physical Oceanography**, v. 48, n. 5, p. 1079-1088, 2018.

BALLABIO, D. A. MATLAB toolbox for Principal Component Analysis and unsupervised exploration of data structure. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 149, p. 1-9, 2015.

BAUM, Steven K. Bulk Parametrizations. In: BAUM, Steven K. **Glossary of Physical Oceanography and Related Disciplines**. Texas: Department of Oceanography - Texas A&m University, 2004. p. 72.

BELMONTE RIVAS, M.; STOFFELEN, A. Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind biases using ASCAT. **Ocean Science**, v. 15, n. 3, p. 831-852, 2019.

BENSCHOP H. 1996. **Windsnelheidsmetingen op zeestations en kuststations: herleiding waarden windsnelheid naar 10-meter niveau** (com um resumo em

inglês). Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut Technical Report No. 188, KNMI De Bilt, 1996.

BENTAMY, A. *et al.* Matching ASCAT and QuikSCAT winds. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 117, C02011, 2012.

BIO, A. *et al.* Methods for coastal monitoring and erosion risk assessment: two Portuguese case studies. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, p. 47-63, 2015.

BORSCHÉ, Michael; KAISER-WEISS, Andrea K.; KASPAR, Frank. Wind speed variability between 10 and 116 m height from the regional reanalysis COSMO-REA6 compared to wind mast measurements over Northern Germany and the Netherlands. **Advances in Science and Research**, v. 13, p. 151-161, 2016.

BOURASSA, Mark A. *et al.* High-Latitude Ocean and Sea Ice Surface Fluxes: Challenges for Climate Research. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 94, n. 3, p.403-423, 2013.

BOURLÈS, B. *et al.* THE PIRATA PROGRAM History, Accomplishments, and Future Directions*. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 89, n. 8, p. 1111-1126, 2008.

BOURLÈS, B. *et al.* PIRATA: A Sustained Observing System for Tropical Atlantic Climate Research and Forecasting. **Earth and Space Science**, 2019.

BRO, R.; SMILDE, A. Principal component analysis. **Analytical Methods**, v. 6, n. 9, p. 2812-2831, 2014.

BRANDT, P. *et al.* Equatorial upper-ocean dynamics and their interaction with the West African monsoon. **Atmospheric Science Letters**, v. 12, n. 1, p. 24-30, 2011.

CÁCERES-SOTO, M.; SEPÚLVEDA, H. H.; MUÑOZ-MELLADO, K. *et al.* Comparison of QuikSCAT, WRF and buoy ocean surface wind data off Valparaíso Bay, Chile. **Journal of Marine Systems**, v. 203, 2020.

CAMPOS, R.; GUEDES SOARES, C. Assessment of three wind reanalyses in the North Atlantic Ocean. **Journal of Operational Oceanography**, v. 10, n. 1, p. 30-44, 2016.

CATALDI, Marcio. **Simulação de Camadas Limite Estratificadas em Túnel de Vento**. 2002. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Engenharia Mecânica, COPPE-UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

CHAWLA, A.; SPINDLER, D.; TOLMAN, H. Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds. **Ocean Modelling**, v. 70, p. 189-206, 2013.

CHELTON, D.; FREILICH, M. Scatterometer-Based Assessment of 10-m Wind Analyses from the Operational ECMWF and NCEP Numerical Weather Prediction Models. **Monthly Weather Review**, v. 133, n. 2, p. 409-429, 2005.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S), 2017. **ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate**. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS). Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>. Acesso em: 09 set. 2019.

CRONIN, Meghan F. *et al.* Air-Sea Fluxes With a Focus on Heat and Momentum. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, 2019.

DPI/INPE, 2006. **SPRING: Tutorial de Geoprocessamento**. Introdução ao Sensoriamento Remoto. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_sen.html. Acesso em: 25 abr. 2020.

DUKHOVSKOY, D. *et al.* Comparison of the ocean surface vector winds from atmospheric reanalysis and scatterometer-based wind products over the Nordic Seas and the northern North Atlantic and their application for ocean modeling. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 122, n. 3, p. 1943-1973, 2017.

EBUCHI, Naoto; GRABER, Hans C.; CARUSO, Michael J. Evaluation of Wind Vectors Observed by QuikSCAT/SeaWinds Using Ocean Buoy Data. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, n. 12, p.2049-2062, 2002.

EDSON, J. B. *et al.* On the Exchange of Momentum over the Open Ocean. **Journal of Physical Oceanography**, v. 43, n. 8, p. 1589-1610, 2013.

EUMETSAT. **Metop-C: monitoring weather, atmosphere and oceans**, 2018. Disponível em: <https://www.eumetsat.int/website/home/MetopCLaunch/Status/index.html>. Acesso em: 18 jul. 2019.

FRAJKA-WILLIAMS, E. *et al.* Atlantic Meridional Overturning Circulation: Observed Transport and Variability. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, 2019.

FREITAG, H.; MCPHADEN, M.; CONNELL, K. **Comparison of Atlas and T-Flex Mooring Data**: NOAA Technical Memorandum OAR PMEL-149. Seattle, Washington, 2018. Disponível em: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/19249>. Acesso em: 25 jul. 2019.

FOLTZ, Gregory R. *et al.* Seasonal salt budget of the northwestern tropical Atlantic Ocean along 38°W. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 109, n. C3, 2004.

FOLTZ, Gregory R. *et al.* The Tropical Atlantic Observing System. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, 2019.

FOLTZ, Gregory R.; SCHMID, Claudia; LUMPKIN, Rick. An Enhanced PIRATA Dataset for Tropical Atlantic Ocean–Atmosphere Research. **Journal of Climate**, v. 31, n. 4, p.1499-1524, 2018.

GEERNAERT, G.; KATSAROS, K. Incorporation of Stratification Effects on the Oceanic Roughness Length in the Derivation of the Neutral Drag Coefficient. **Journal of Physical Oceanography**, v. 16, n. 9, p. 1580-1584, 1986.

GILL, A. **Atmosphere - ocean dynamics**. San Diego: Academic Press, 1982.

HERSBACH, H. *et al.* **Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP**. ECMWF ERA Report Series 27, 2018.

HERSBACH, H. *et al.* **Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5**. Disponível em: <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/159/meteorology/global-reanalysis-goodbye-era-interim-hello-era5>. Acesso em: 10 set. 2019.

HOLTON, J. **An introduction to dynamic meteorology**. 4. ed. Burlington, MA: Elsevier Academic Press, 2004.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), **Offshore Wind Outlook 2019**, IEA, Paris, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019>.

JET PROPULSION LABORATORY (JPL) – NASA. **QuikSCAT**. Disponível em: <https://winds.jpl.nasa.gov/missions/quikscat/>. Acesso em: 23 jul. 2019.

JOLLIFFE, I. **Principal component analysis**. 2nd ed. New York, NY: Springer-Verlag, 2002.

KAMEDA, S.; KUTSUWADA, K. Validation of gridded data set of global surface wind/wind-stress vector field. **Journal of Oceanography**, v. 73, n. 5, p. 585-601, 2017.

KARA, A.; HURLBURT, H.; WALLCRAFT, A. Stability-Dependent Exchange Coefficients for Air–Sea Fluxes*. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 22, n. 7, p. 1080-1094, 2005.

KARA, A. *et al.* Wind Stress Drag Coefficient over the Global Ocean*. **Journal of Climate**, v. 20, n. 23, p. 5856-5864, 2007.

KENT, E.; FANGOHR, S.; BERRY, D. A comparative assessment of monthly mean wind speed products over the global ocean. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 11, p. 2520-2541, 2013.

KNUTSON, T. *et al.* Tropical cyclones and climate change. **Nature Geoscience**, v. 3, n. 3, p. 157-163, 2010.

LENTON, T. *et al.* Tipping elements in the Earth's climate system. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 105, n. 6, p. 1786-1793, 2008.

LIU, W. *et al.* Overlooked possibility of a collapsed Atlantic Meridional Overturning Circulation in warming climate. **Science Advances**, v. 3, n. 1, p. e1601666, 2017.

LIU, W. T.; KATSAROS, K. B.; BUSINGER, J. A. Bulk Parameterization of Air-Sea Exchanges of Heat and Water Vapor Including the Molecular Constraints at the Interface. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 36, n. 9, p.1722-1735, 1979.

LIU, W.; TANG, W. **Equivalent Neutral Wind**. JPL Publication, 96-17, 1996.

MARSHALL, J. *et al.* The ocean's role in setting the mean position of the Inter-Tropical Convergence Zone. **Climate Dynamics**, v. 42, n. 7-8, p. 1967-1979, 2014.

MCPHADEN, Michael J. *et al.* The Tropical Ocean-Global Atmosphere observing system: A decade of progress. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 103, n. C7, p. 14169-14240, 1998.

MEARS, Carl A. *et al.* A Near-Real-Time Version of the Cross-Calibrated Multiplatform (CCMP) Ocean Surface Wind Velocity Data Set. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 124, n. 10, p.6997-7010, 2019.

NOBRE, P.; SRUKLA, J. Variations of Sea Surface Temperature, Wind Stress, and Rainfall over the Tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v. 9, n. 10, p. 2464-2479, 1996.

PACIFIC MARINE ENVIRONMENTAL LABORATORY (PMEL) – NOAA. **Global Tropical Moored Buoy Array Program**. [s.d]. Disponível em: <https://www.pmel.noaa.gov/gtmba/mission>. Acesso em: 19 maio 2020.

PEDRO, J. *et al.* Beyond the bipolar seesaw: Toward a process understanding of interhemispheric coupling. **Quaternary Science Reviews**, v. 192, p. 27-46, 2018.

PEREIRA, H. *et al.* Wave observations from an array of directional buoys over the southern Brazilian coast. **Ocean Dynamics**, v. 67, n. 12, p. 1577-1591, 2017.

PEZZI, L. P. *et al.* Ocean-atmosphere in situ observations at the Brazil-Malvinas Confluence region. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 22, 2005.

PHILANDER, S. George. **El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation**. San Diego: Academic Press, 1990. 293 p. (International Geophysics Series).

PIERSON JUNIOR, W. J. Dependence of Radar Backscatter on Environmental Parameters. In: GEERNAERT, G. L.; PLANT, W. L. (ed.). **Surface Waves and Fluxes**. Volume II - Remote Sensing. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. Cap. 13, p. 213. (Environmental Fluid Mechanics 8).

PRAVEEN KUMAR, B. *et al.* TropFlux wind stresses over the tropical oceans: evaluation and comparison with other products. **Climate Dynamics**, v. 40, n. 7-8, p. 2049-2071, 2012.

PRICE, James F. **A Coriolis Tutorial**. Woods Hole Oceanographic Institution, Massachusetts, 2003. Disponível em: https://www2.whoi.edu/staff/jprice/wp-content/uploads/sites/199/2019/01/aCt_2003.pdf. Acesso em: 19 maio 2020.

RAMON, J. *et al.* What global reanalysis best represents near- surface winds?. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 145, n. 724, p. 3236-3251, 2019.

RIBAL, Agustinus; YOUNG, Ian R. 33 years of globally calibrated wave height and wind speed data based on altimeter observations. **Scientific Data**, v. 6, n. 1, 2019.

RODRIGUES, Regina. Circulação Atmosférica e Oceânica. In: CASTELLO, Jorge Pablo; KRUG, Luiz Carlos (org.). **Introdução às Ciências do Mar**. Pelotas: Editora Textos, 2015. Cap. 7. p. 172-195.

RODRÍGUEZ, M. *et al.* Brazilian Coastal Processes: Wind, Wave Climate and Sea Level. **Coastal Research Library**, p. 37-66, 2016.

SAF, Ocean and Sea Ice; EUMETSAT, Advanced Retransmission Service. **ASCAT Wind Product User Manual**. Versão 1.15. 2018. Disponível em: http://projects.knmi.nl/scatterometer/publications/pdf/ASCAT_Product_Manual.pdf

SATO, Olga T. Fluxo de Calor Oceânico Medido por Satélites. In: SOUZA, Ronald Buss de. **Oceanografia por Satélites**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Cap. 10. p. 165-184.

SCHLAX, M.; CHELTON, D.; FREILICH, M. Sampling Errors in Wind Fields Constructed from Single and Tandem Scatterometer Datasets. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 18, n. 6, p. 1014-1036, 2001.

STRAMMA, L.; SCHOTT, F. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 46, n. 1-2, p. 279-303, 1999.

STULL, Roland B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Dordred: Springer Netherlands, 670 p., 1988. (Atmospheric Sciences Library 13).

SWART, S. *et al.* Constraining Southern Ocean Air-Sea-Ice Fluxes Through Enhanced Observations. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, 2019.

TALLEY, L. D.; PICKARD, G. L.; EMERY, W. J.; SWIFT J. H. Capítulo 9 - Atlantic Ocean. In L. D. Talley, G. L. Pickard, W. J. Emery, and J. H. Swift (Eds.), **Descriptive Physical Oceanography**, 4. ed., pp. 245 – 301. Boston: Academic Press, 2011.

TAVARES, Luiz Filipe de Assis *et al.* Assessment of the offshore wind technical potential for the Brazilian Southeast and South regions. **Energy**, v. 196, p. 117097, 2020.

TAYLOR, K. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. D7, p. 7183-7192, 2001.

THOMAS, B.; KENT, E.; SWAIL, V. Methods to homogenize wind speeds from ships and buoys. **International Journal of Climatology**, v. 25, n. 7, p. 979-995, 2005.

TOMCZAK, Matthias; GODFREY, J. Stuart. Ekman layer transports, Ekman pumping, and the Sverdrup balance. In: TOMCZAK, Matthias; GODFREY, J. Stuart. **Regional Oceanography: An Introduction**. Versão em pdf 1.2, 2002. Cap. 4. p. 39-50.

Disponível em:
<http://gyre.umeoce.maine.edu/physicalocean/Tomczak/regoc/pdfversion.html>.
Acesso em: 13 abr. 2020.

TRUJILLO, A.; THURMAN, H. **Essentials of Oceanography**, 10. ed. Prentice Hall, 2011.

UNITED NATIONS (UN). **People and Oceans**. In: THE OCEAN CONFERENCE, 2017, New York. Fact Sheet. Disponível em:
<<https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2017/05/Ocean-fact-sheet-package.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2020.

VAREJÃO-SILVA, M. **Meteorologia e Climatologia**, Versão Digital 2, Recife, 2006.

VILLAS BÔAS, A.B., *et al.* Integrated Observations of Global Surface Winds, Currents, and Waves: Requirements and Challenges for the Next Decade. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, 2019.

VINOTH, J.; YOUNG, I. Global Estimates of Extreme Wind Speed and Wave Height. **Journal of Climate**, v. 24, n. 6, p. 1647-1665, 2011.

WALKER, G. T., BLISS, E. W. **World Weather V**. Memoirs of the Royal Meteorological Society, v. 4, p. 53-84, 1932.

WINTERFELDT, J. **Comparison of measured and simulated wind speed data in the North Atlantic**. Departamento de Geociências, Universidade de Hamburgo, 2008. [Dissertação]

YOUNG, I. **Wind generated ocean waves**. Amsterdam: Elsevier, 1999.

YOUNG, I.; DONELAN, M. On the determination of global ocean wind and wave climate from satellite observations. **Remote Sensing of Environment**, v. 215, p. 228-241, 2018.

YOUNG, I.; SANINA, E.; BABANIN, A. Calibration and Cross Validation of a Global Wind and Wave Database of Altimeter, Radiometer, and Scatterometer Measurements. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 6, p. 1285-1306, 2017.

YOUNG, I.; ZIEGER, S.; BABANIN, A. Global Trends in Wind Speed and Wave Height. **Science**, v. 332, n. 6028, p. 451-455, 2011.

YU, Lisan; JIN, Xiangze; WELLER, Robert A. Role of Net Surface Heat Flux in Seasonal Variations of Sea Surface Temperature in the Tropical Atlantic Ocean. **Journal of Climate**, v. 19, n. 23, p.6153-6169, 2006.

ZEBIK, Stephen E. Air–Sea Interaction in the Equatorial Atlantic Region. **Journal of Climate**, v. 6, n. 8, p. 1567-1586, 1993.

ZIEGER, S.; BABANIN, A.; YOUNG, I. Changes in ocean surface wind with a focus on trends in regional and monthly mean values. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 86, p. 56-67, 2014.

ZIEGER, S.; VINOTH, J.; YOUNG, I. Joint Calibration of Multiplatform Altimeter Measurements of Wind Speed and Wave Height over the Past 20 Years. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 26, n. 12, p. 2549-2564, 2009.

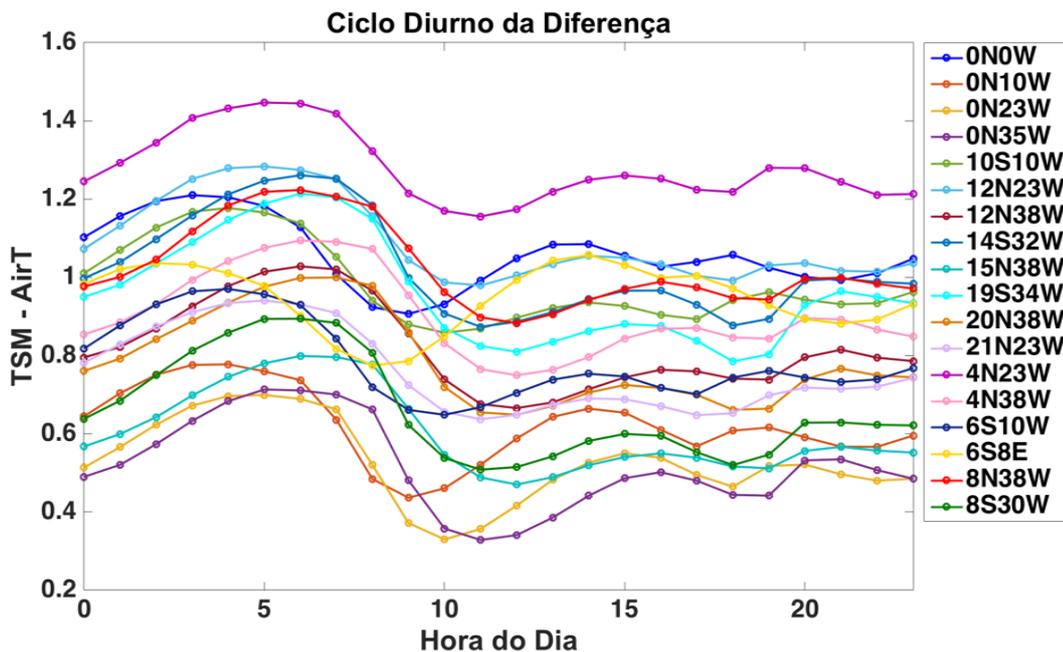
APÊNDICE ALFA – GRÁFICOS E INFORMAÇÕES GERAIS

Tabela A1 – Resumo dos dados disponíveis para cada uma das boias PIRATA e o número utilizado para realizar a PCA.

Boia	Nº de dados* (horário)	Dados utilizados (PCA)	1º registro da boia
0N 0W	57246	5719	09-Nov-1998 04:00
0N 10W	43990	4696	18-Abr-1999 11:00
0N 23W	71188	7113	06-Mar-1999 14:00
0N35W	36257	3621	22-Jan-1998 01:00
4N 23W	42987	4298	14-Out-2008 21:00
4N 38 W	55211	5518	20-Mar-2000 02:00
6S 8E	24721	2467	27-Jun-2006 21:00
6S 10W	98941	9888	14-Mar-2000 14:00
8N 38W	53182	5313	30-Jan-1998 16:00
8S 30W	58102	5804	21-Ago-2005 02:00
10S 10W	127171	12712	29-Dez-1999 14:00
12N 23W	49332	4928	08-Jun-2006 11:00
12N 38W	60094	6005	03-Fev-1999 23:00
14S 32W	49458	4943	24-Ago-2005 07:00
15N 38W	77705	7765	27-Jan-1998 20:00
19S 34W	81287	8124	01-Set-2005 02:00
20N 38W	36256	3622	22-Maio-2007 05:00
21N 23W	64973	6494	19-Maio-2007 03:00

* Número de dados em que temos as variáveis wspd, wdir, airT, TSM, SSD e rh todas disponíveis em um mesmo passo de tempo.

Figura A1 – Média da diferença entre a temperatura superficial do mar (TSM) e a temperatura do ar (airT) em cada uma das boias PIRATA.



APÊNDICE BRAVO – RESUMO DA POSIÇÃO 0N0W

Figura B1 - Série temporal comparativa, do vento a 10 m, de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 0N 0W (A), do ASCAT e QuikSCAT (B) e do ERA5 (C), na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.

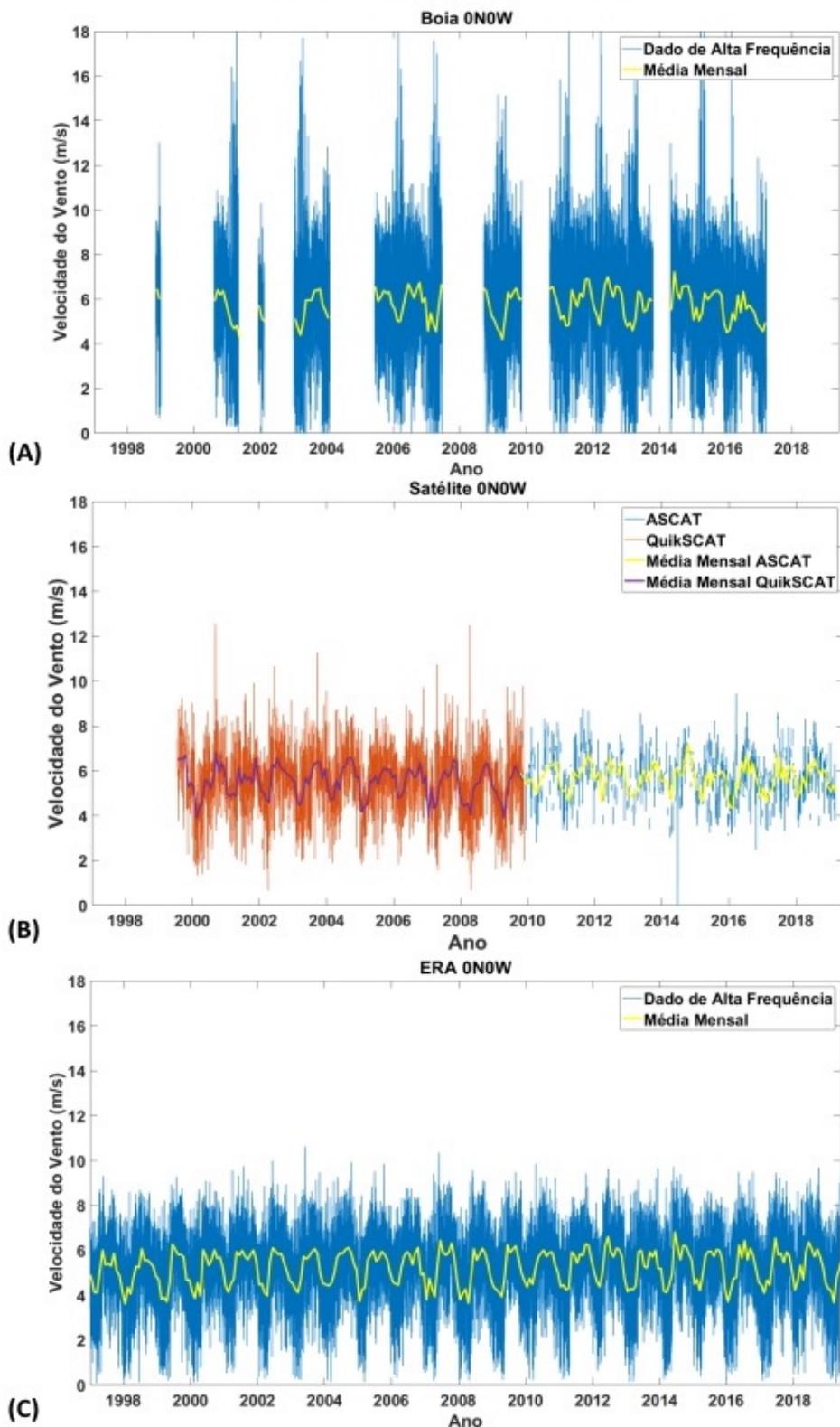


Figura B2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 0N 0W; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.

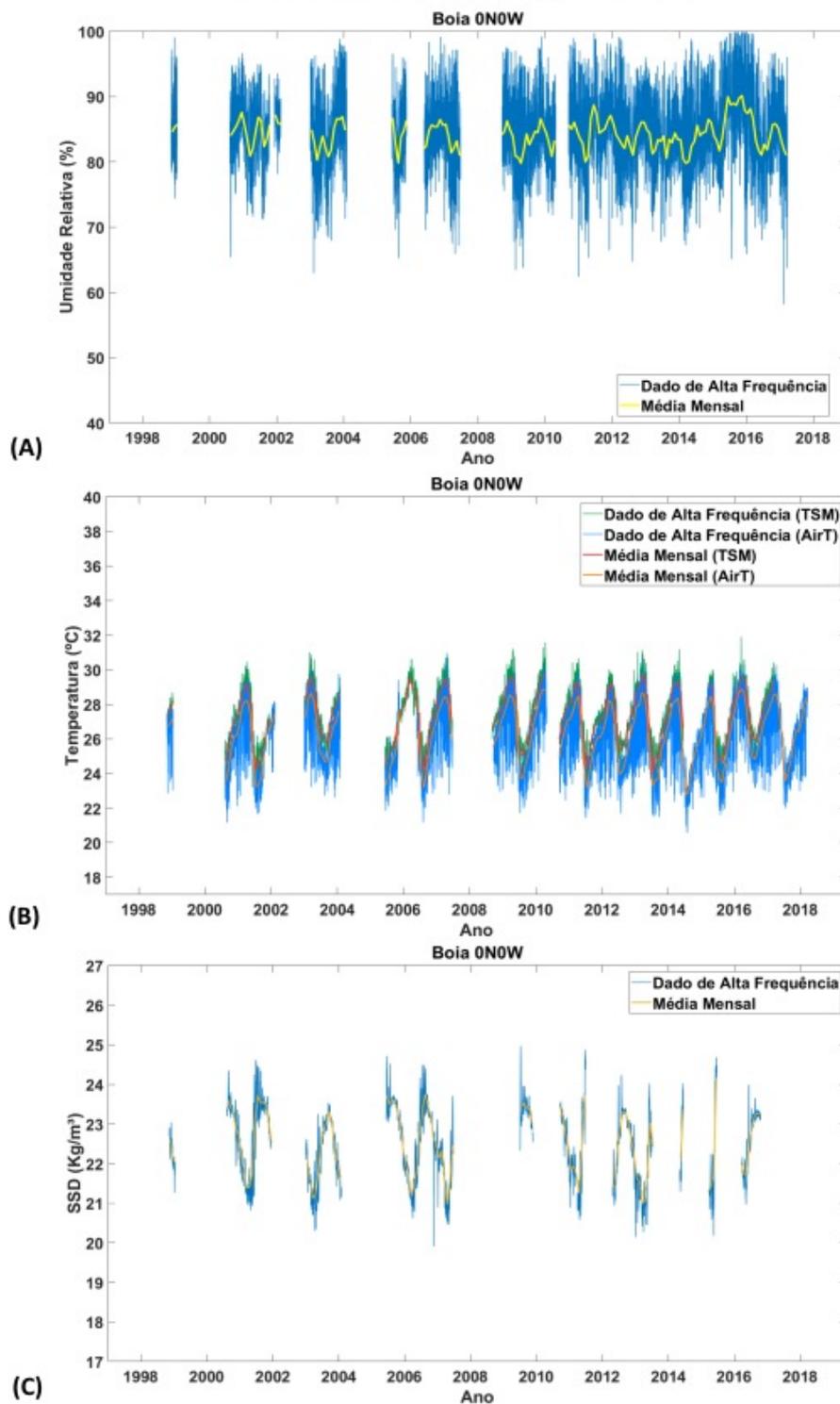


Figura B3 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento na posição 0N0W (A) da boia do projeto PIRATA, (B) do ERA5 (a partir de 1997), (C) do QuikSCAT (de 1999 a 2009) e (D) do ASCAT (de 2007-presente).

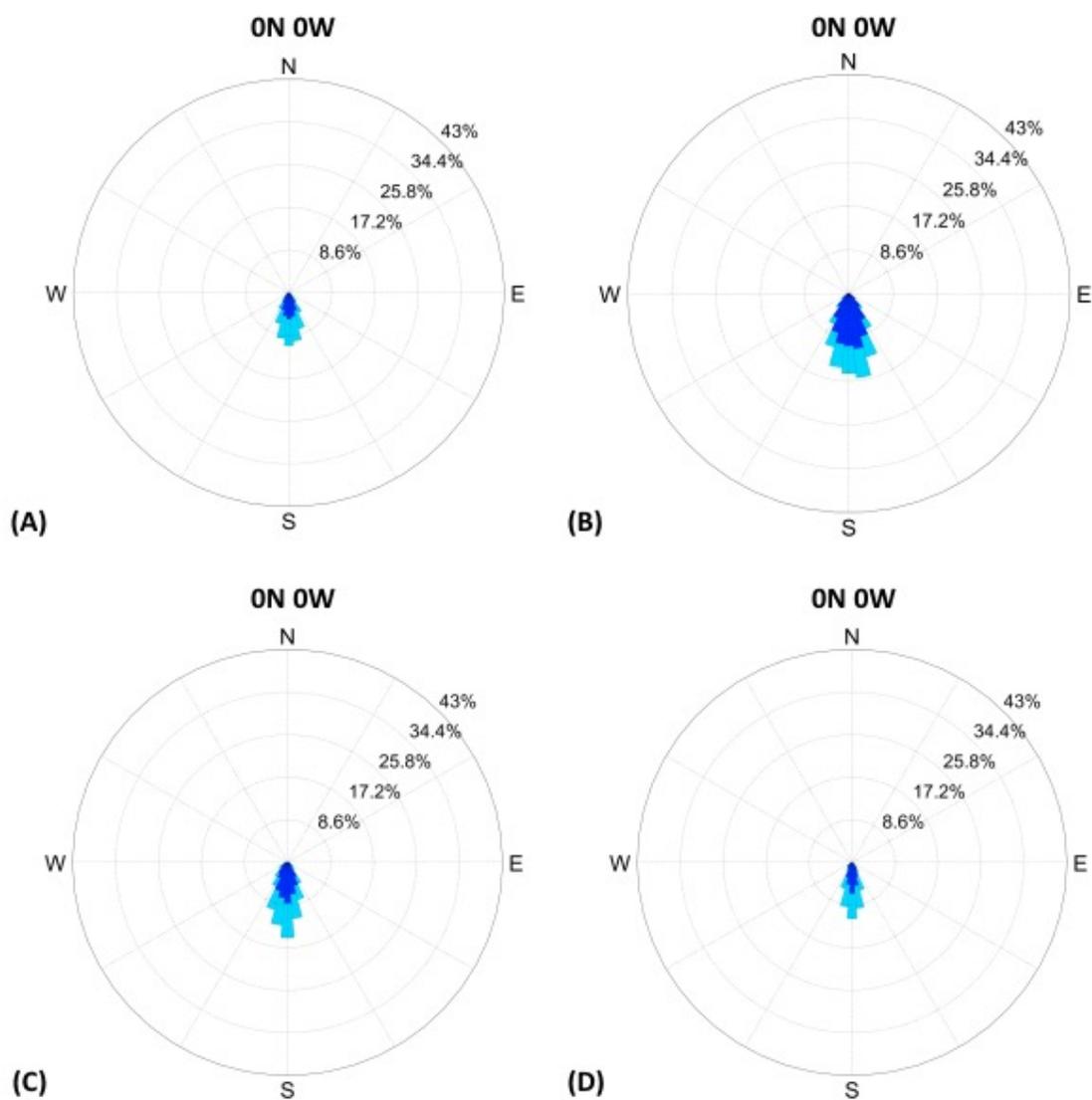


Figura B4 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento das boias PIRATA na posição 0N0W e os satélites QuikSCAT (esquerda) e ASCAT (direita). O ponto indicado como Ref se refere ao dado diário do satélite e os demais pontos coloridos a estatística da comparação com os dados da boia por hora do dia.

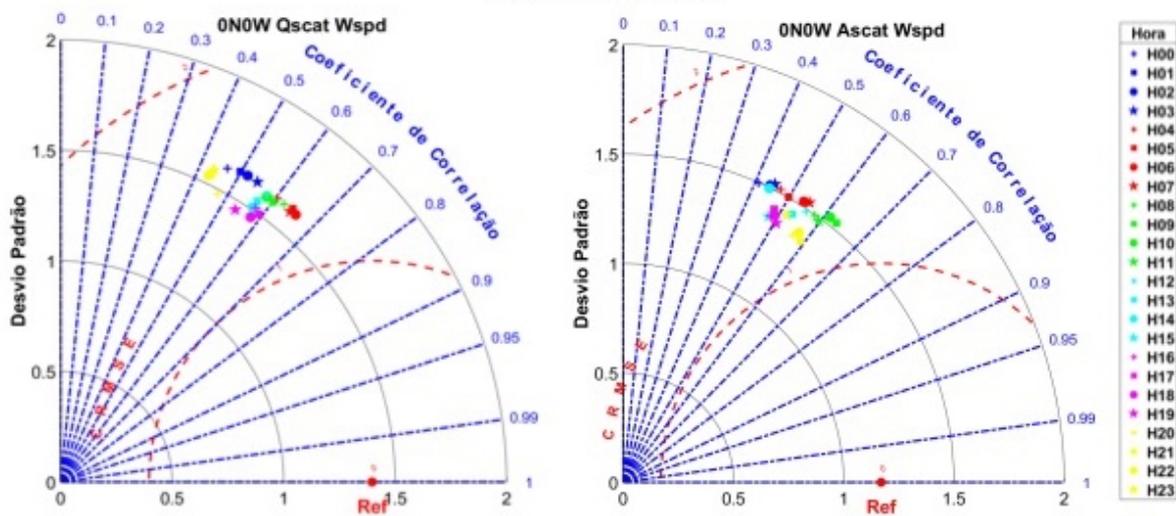


Figura B5 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e os satélites na posição 0N0W, de 1998 a 2009 (QuikSCAT) e 2009 a 2019 (ASCAT), em vermelho, e seus respectivos desvios padrão, em cinza.

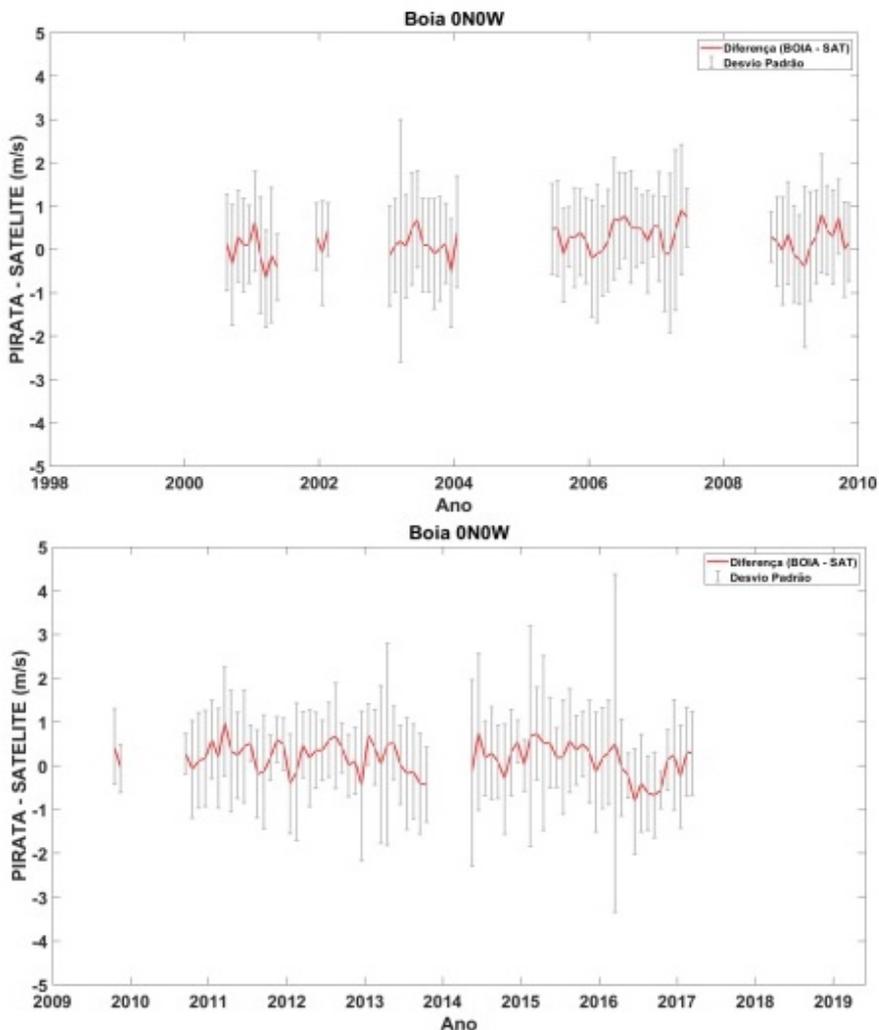


Figura B6 - Correlação (R), raiz do erro quadrático médio centralizado (CRMSE) e Desvio Padrão das variáveis do vento u, v e wspd, entre a boia PIRATA 0N0W e o ERA5 na mesma posição geográfica por hora do dia.

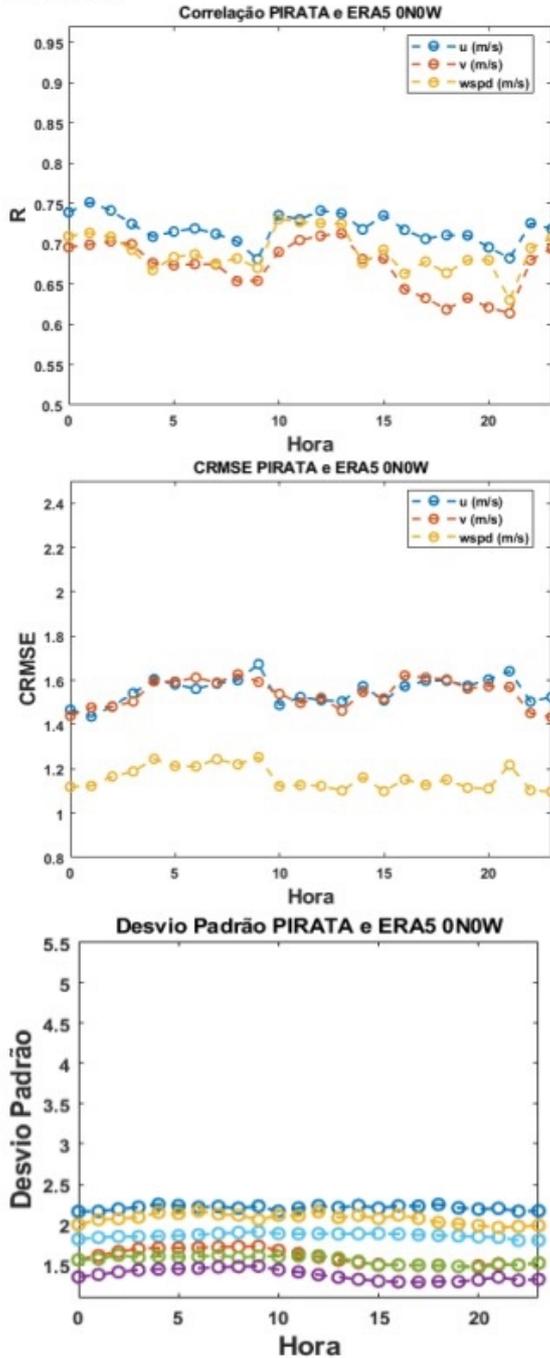


Figura B7 - Variação mensal das diferenças na velocidade do vento PIRATA – ERA5 e seus respectivos desvios padrão para a posição 0N0W.

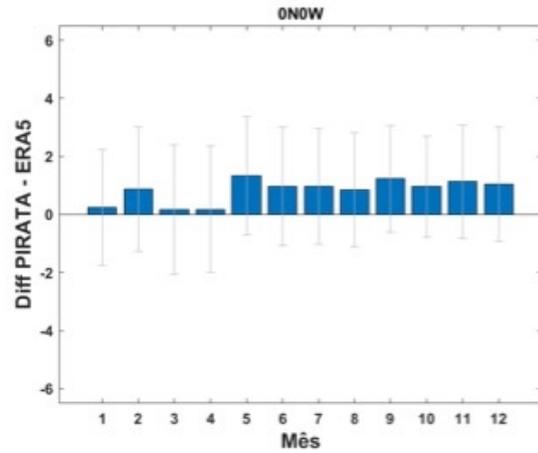


Figura B8 - Distribuição das diferenças de velocidade do vento entre o PIRATA – ERA5 em uma estimativa da função de densidade de probabilidade (em inglês, PDF - Probability density function estimate), onde a área de cada barra é o número relativo de observações. A linha azul representa o valor mais recorrente; caso esse valor fosse negativo, a linha seria vermelha.

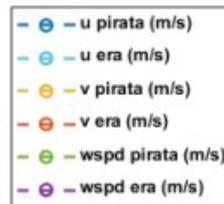
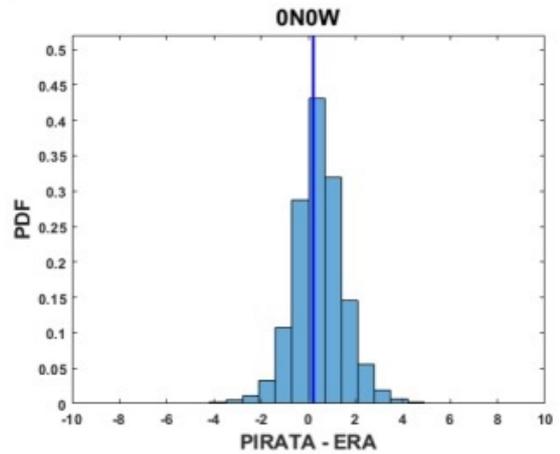


Figura B9 - *Scree plot* da posição ONOW, utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no primeiro e segundo modelos de PCA propostos, respectivamente. O limite do critério do autovalor médio é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.

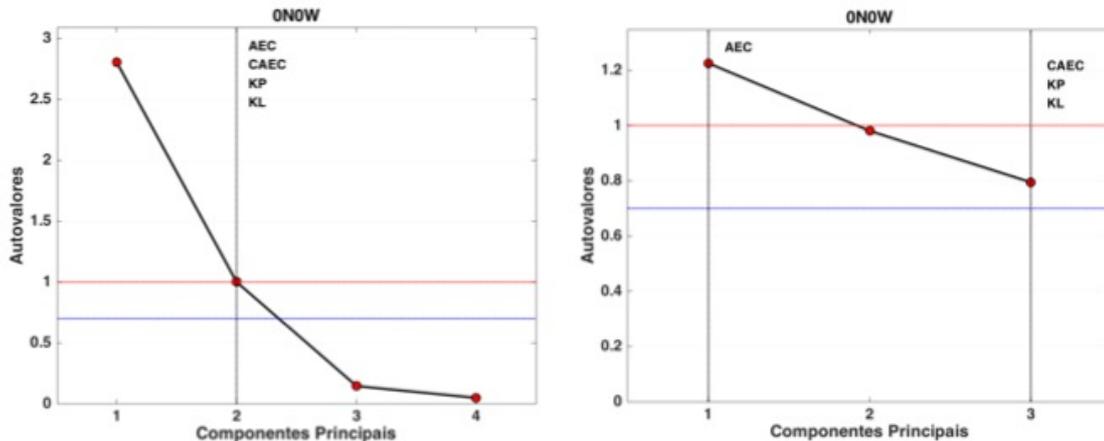


Figura B10 - *Score Plot* para o primeiro e segundo modelo, respectivamente, de PCA propostos da posição ONOW. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. Os pontos representam as coordenadas de uma determinada amostra no espaço e seus relacionamentos, e a escala de cinza o nível de resposta da mesma.

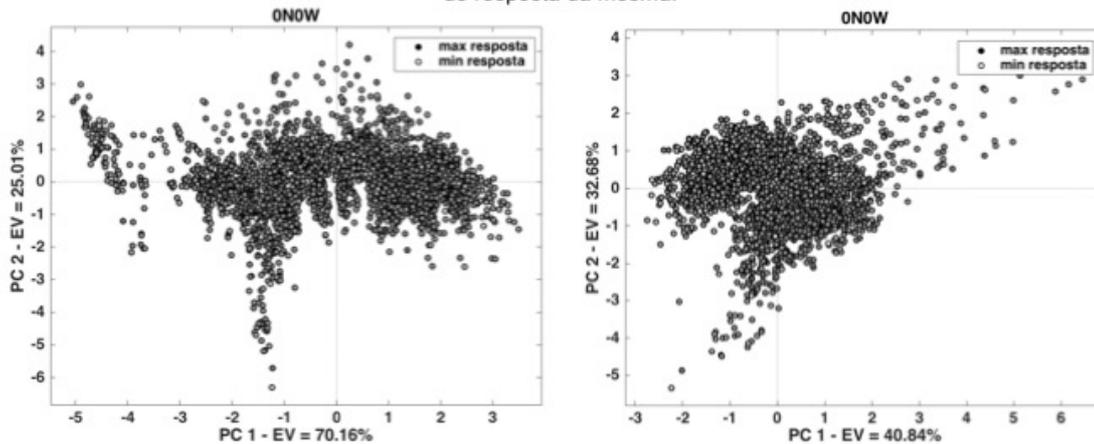
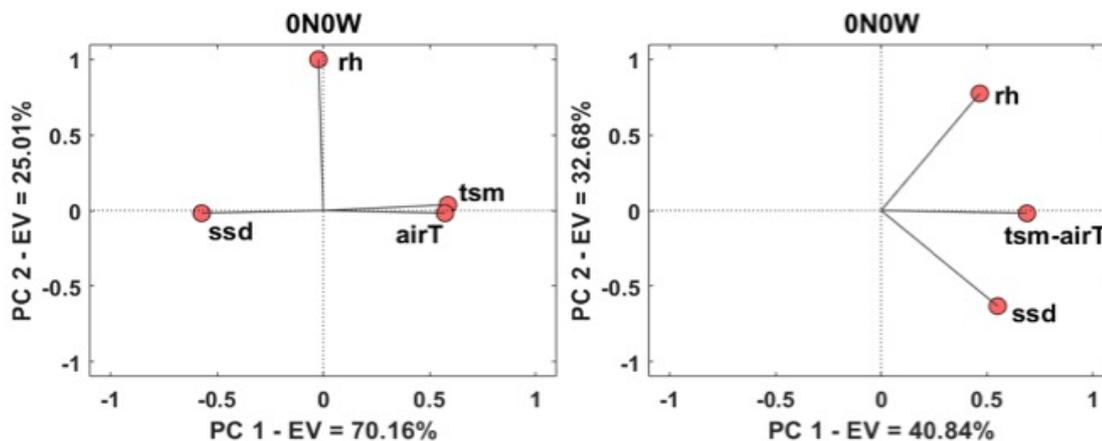


Figura B11 - *Loading Plot* da posição ONOW para o primeiro e segundo modelo de PCA propostos, respectivamente. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. As variáveis utilizadas nesses modelos são: temperatura da superfície do mar (TSM), densidade ao nível do mar (SSD), temperatura do ar (airT) e umidade relativa do ar (rh).



APÊNDICE CHARLIE – RESUMO DA POSIÇÃO 0N10W

Figura C1 - Série temporal comparativa, do vento a 10 m, de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 0N 10W (A), do ASCAT e QuikSCAT (B) e do ERA5 (C), na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.

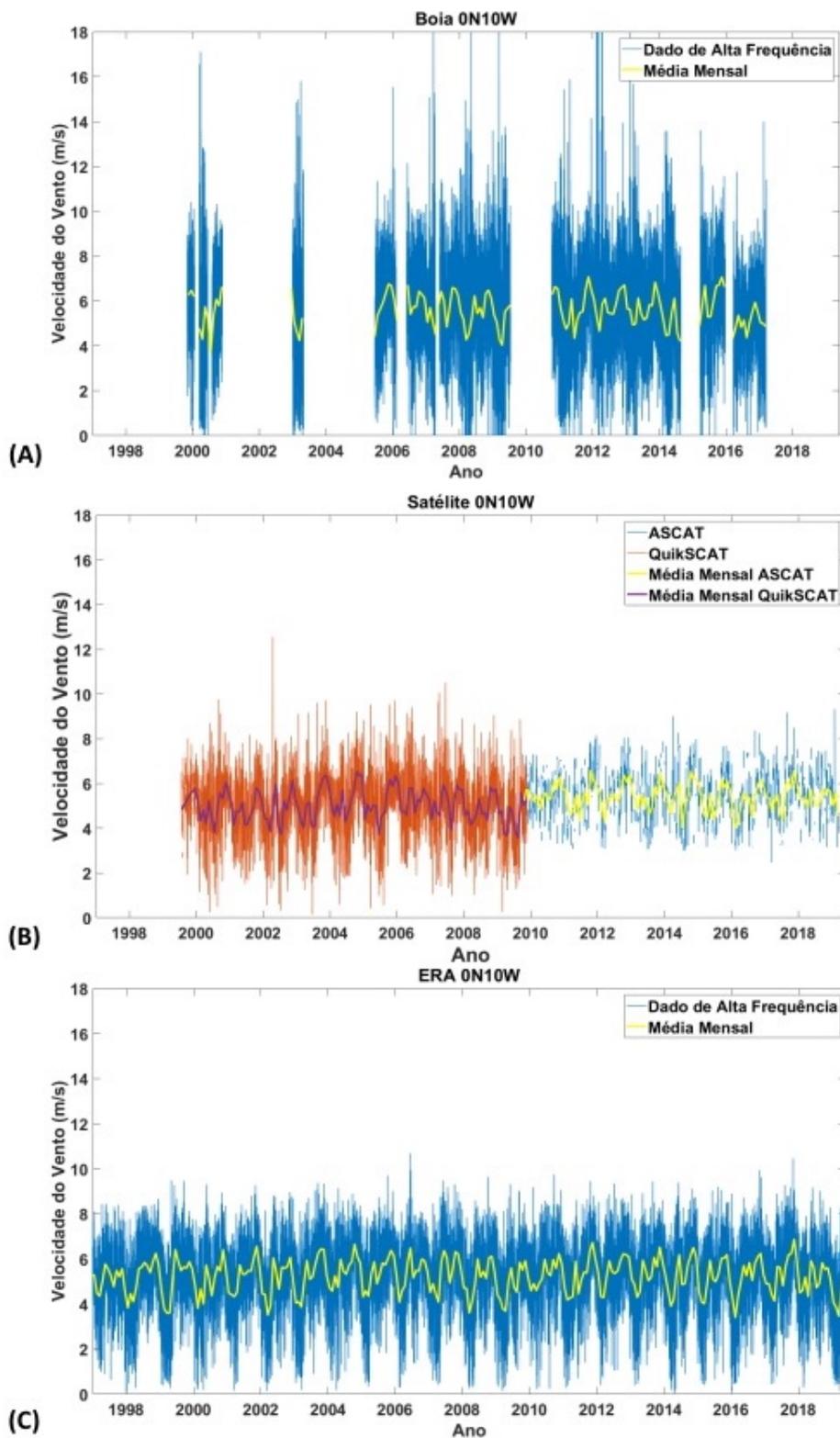


Figura C2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 0N 10W; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.

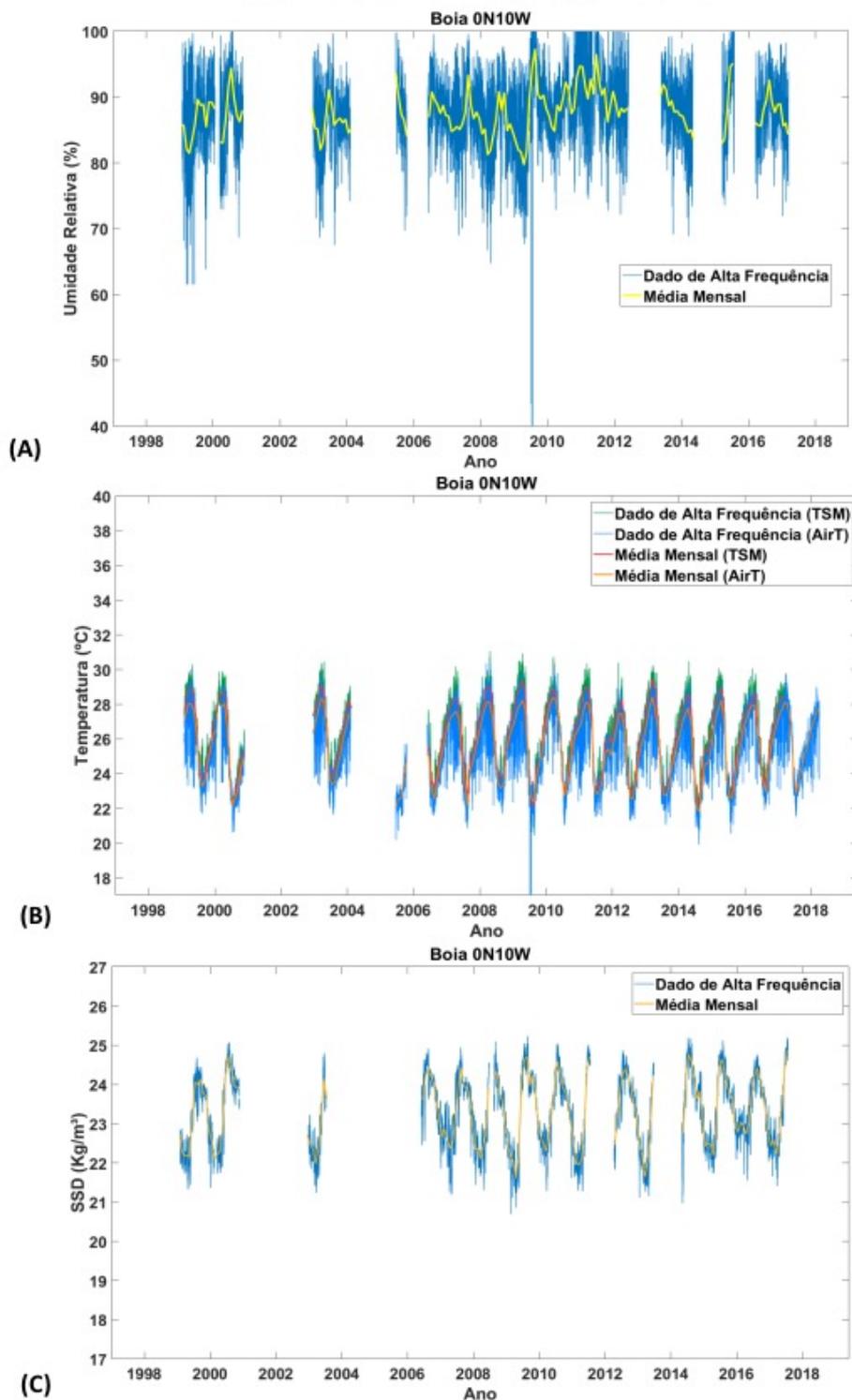


Figura C3 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento na posição 0N10W (A) da boia do projeto PIRATA, (B) do ERA5 (a partir de 1997), (C) do QuikSCAT (de 1999 a 2009) e (D) do ASCAT (de 2007-presente).

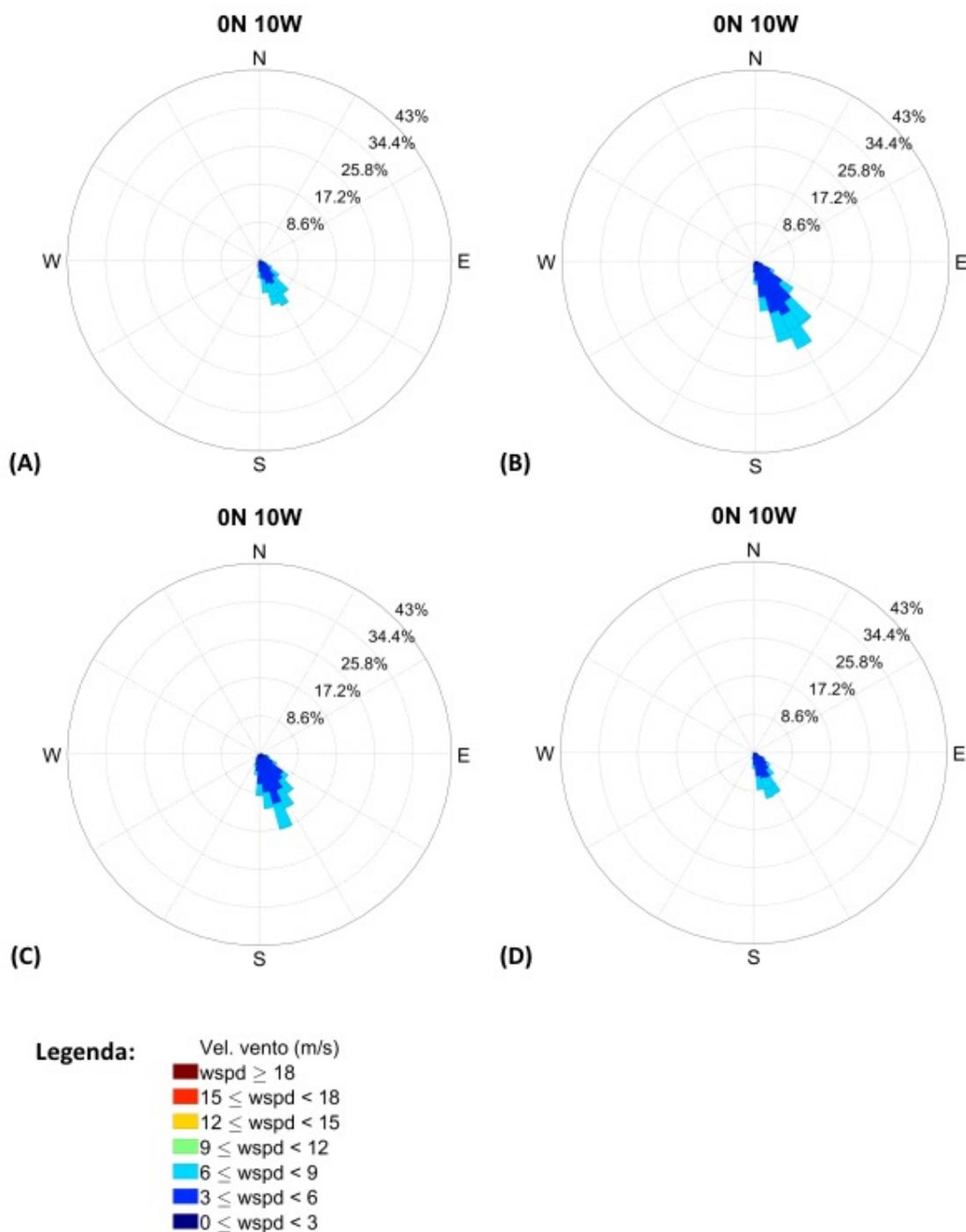


Figura C4 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento das boias PIRATA na posição 0N10W e os satélites QuikSCAT (esquerda) e ASCAT (direita). O ponto indicado como Ref se refere ao dado diário do satélite e os demais pontos coloridos a estatística da comparação com os dados da boia por hora do dia.

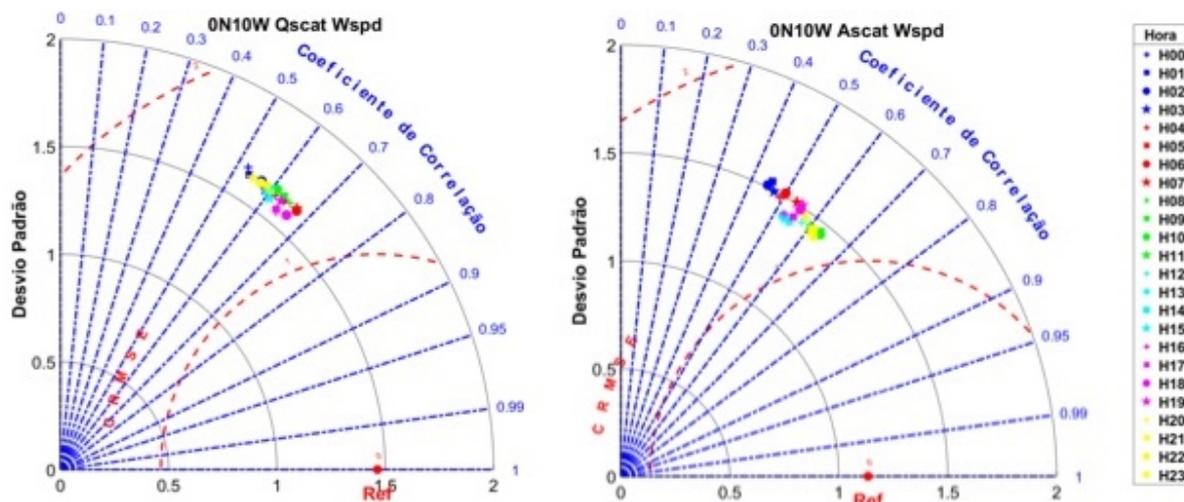


Figura C5 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e os satélites na posição 0N10W, de 1998 a 2009 (QuikSCAT) e 2009 a 2019 (ASCAT), em vermelho, e seus respectivos desvios padrão, em cinza.

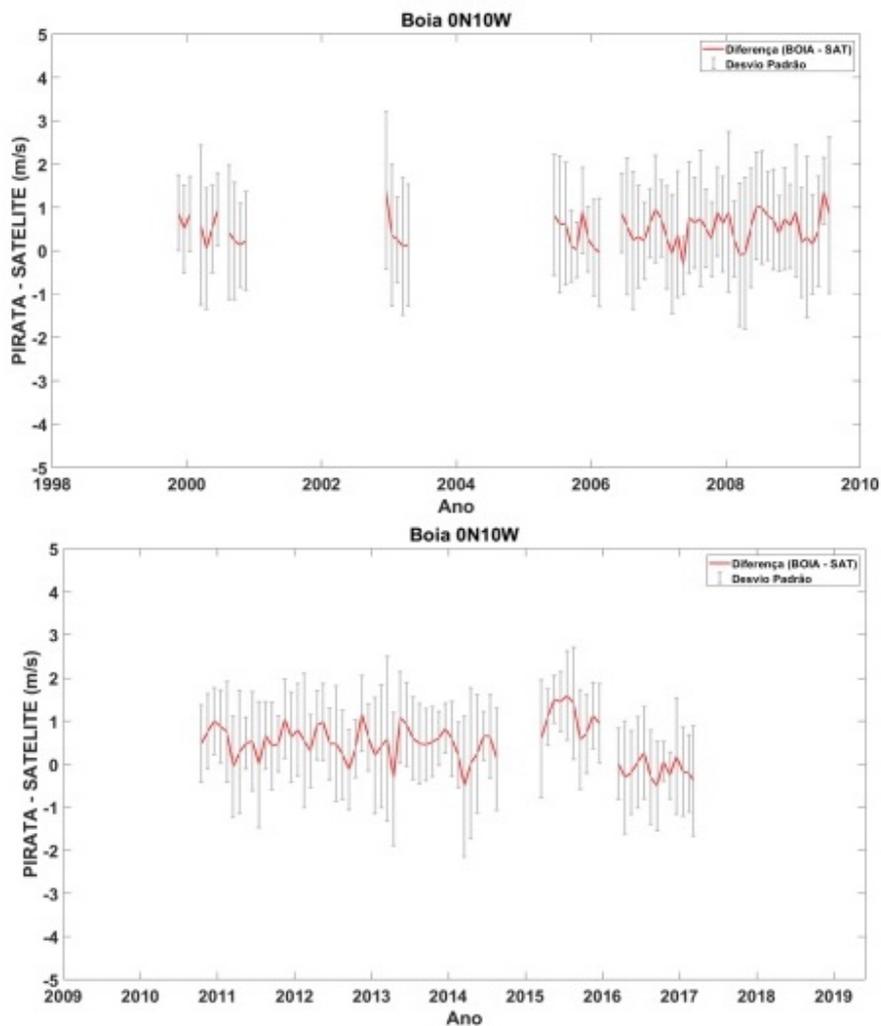


Figura C6 - Correlação (R), raiz do erro quadrático médio centralizado (CRMSE) e Desvio Padrão das variáveis do vento u, v e wspd, entre a boia PIRATA 0N10W e o ERA5 na mesma posição geográfica por hora do dia.

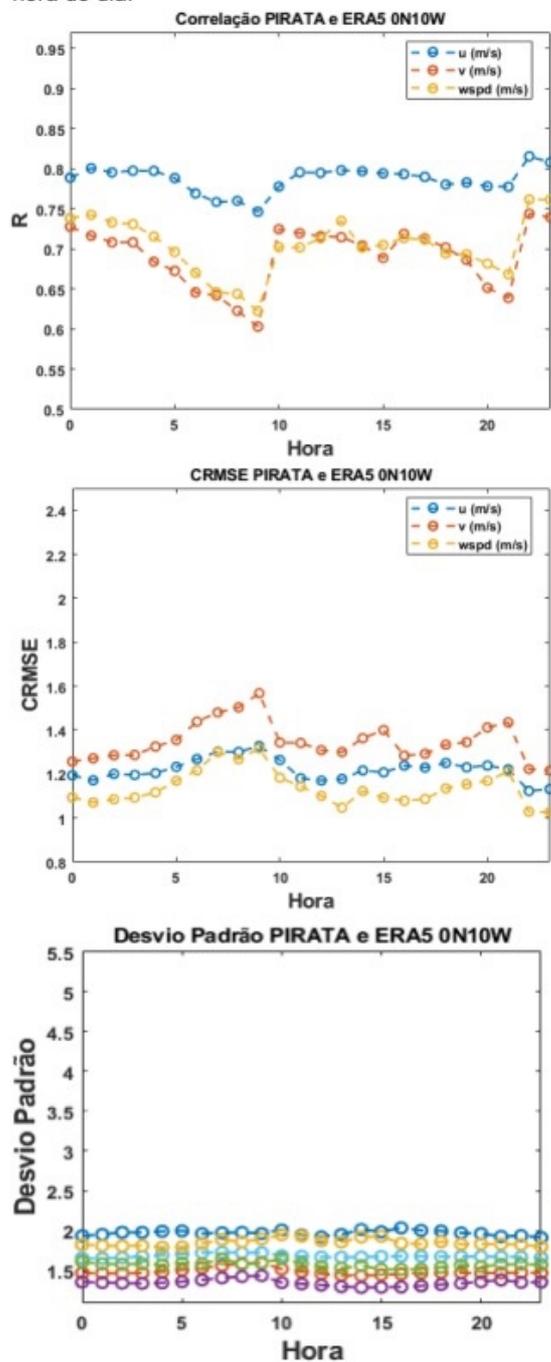


Figura C7 - Variação mensal das diferenças na velocidade do vento PIRATA – ERA5 e seus respectivos desvios padrão para a posição 0N10W.

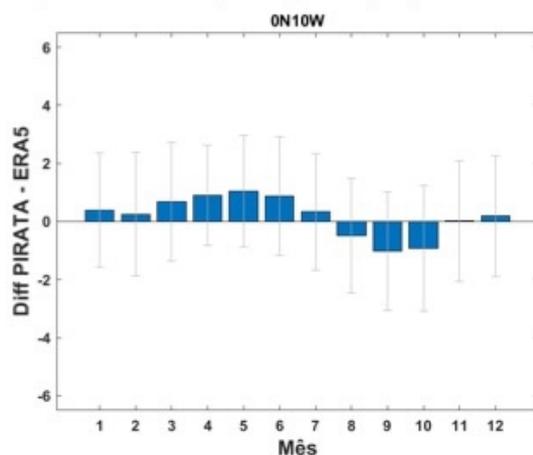


Figura C8 - Distribuição das diferenças de velocidade do vento entre o PIRATA – ERA5 em uma estimativa da função de densidade de probabilidade (em inglês, PDF - Probability density function estimate), onde a área de cada barra é o número relativo de observações. A linha azul representa o valor mais recorrente; caso esse valor fosse negativo, a linha seria vermelha.

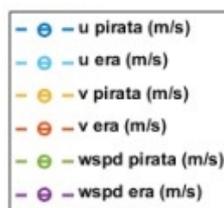
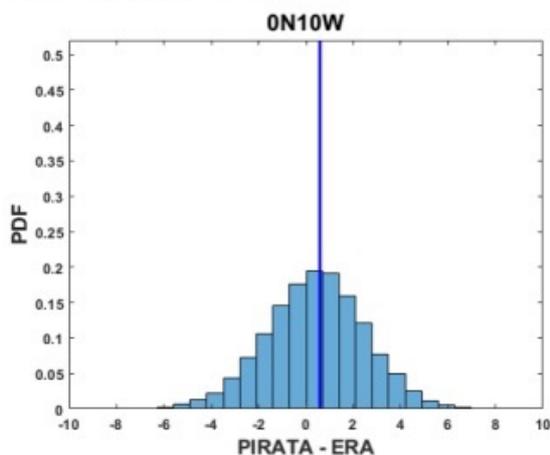


Figura C9 - Scree plot da posição 0N10W, utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no primeiro e segundo modelos de PCA propostos, respectivamente. O limite do critério do autovalor médio é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.

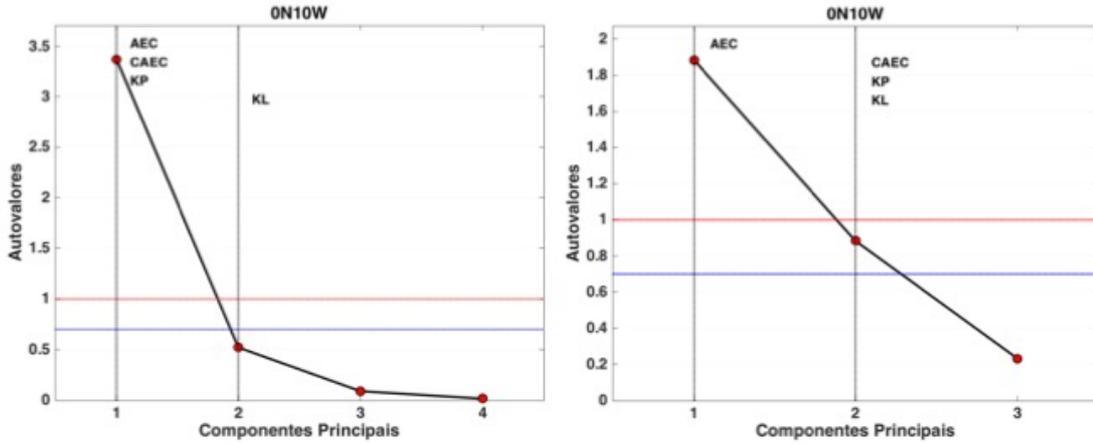


Figura C10 - Score Plot para o primeiro e segundo modelo, respectivamente, de PCA propostos da posição 0N10W. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. Os pontos representam as coordenadas de uma determinada amostra no espaço e seus relacionamentos, e a escala de cinza o nível de resposta da mesma.

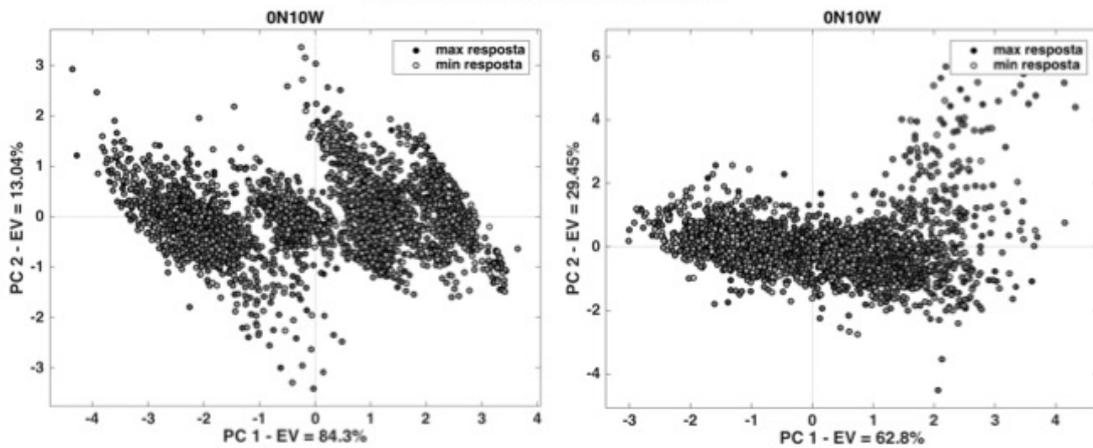
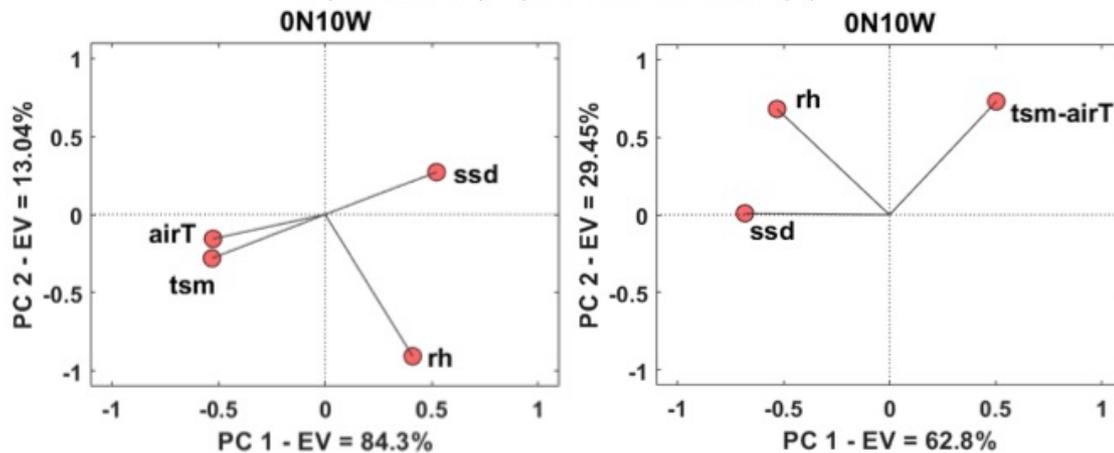


Figura C11 - Loading Plot da posição 0N10W para o primeiro e segundo modelo de PCA propostos, respectivamente. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. As variáveis utilizadas nesses modelos são: temperatura da superfície do mar (TSM), densidade ao nível do mar (SSD), temperatura do ar (airT) e umidade relativa do ar (rh).



APÊNDICE DELTA – RESUMO DA POSIÇÃO 0N23W

Figura D1 - Série temporal comparativa, do vento a 10 m, de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 0N 23W (A), do ASCAT e QuikSCAT (B) e do ERA5 (C), na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.

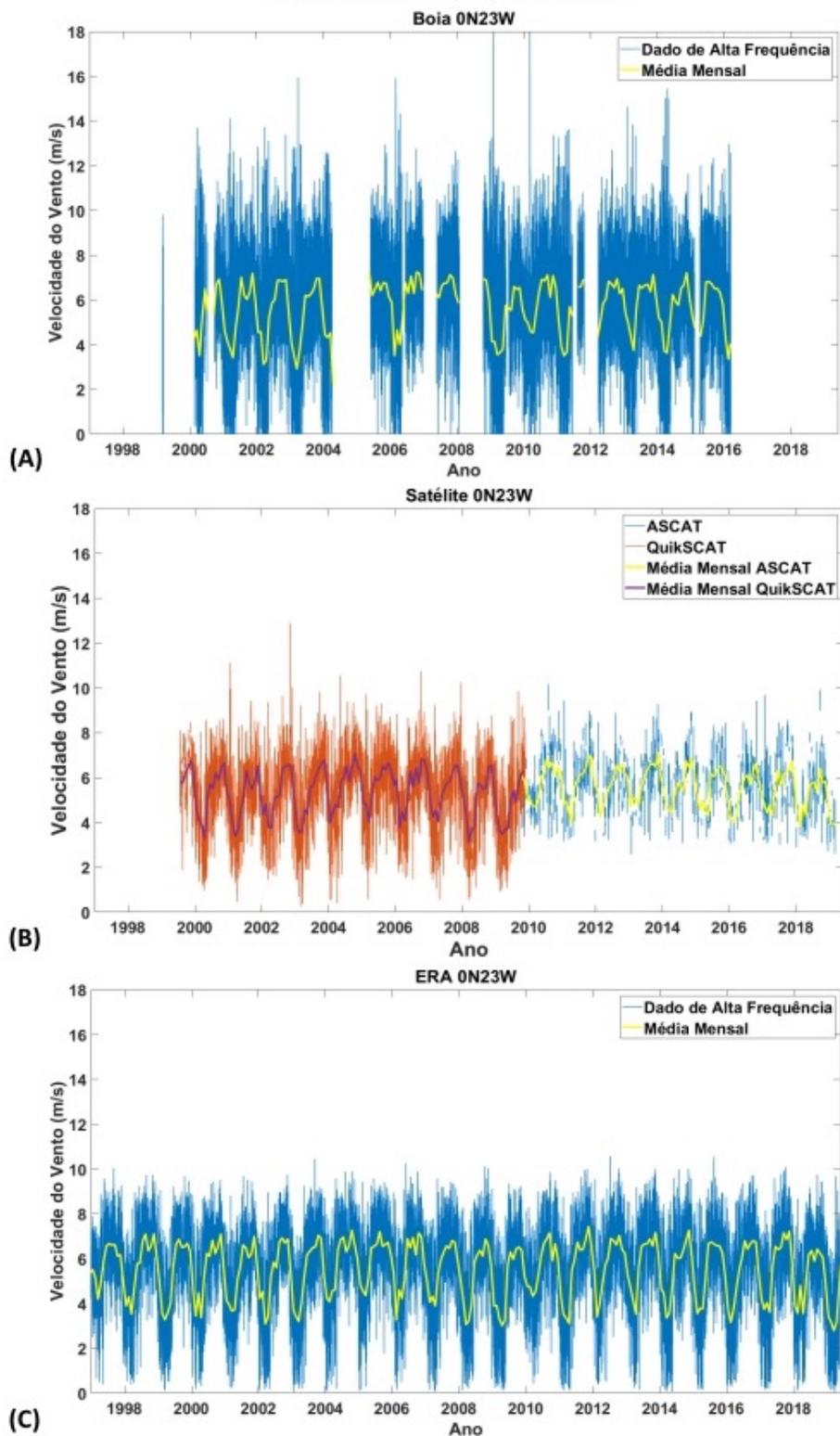


Figura D2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 0N 23W; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.

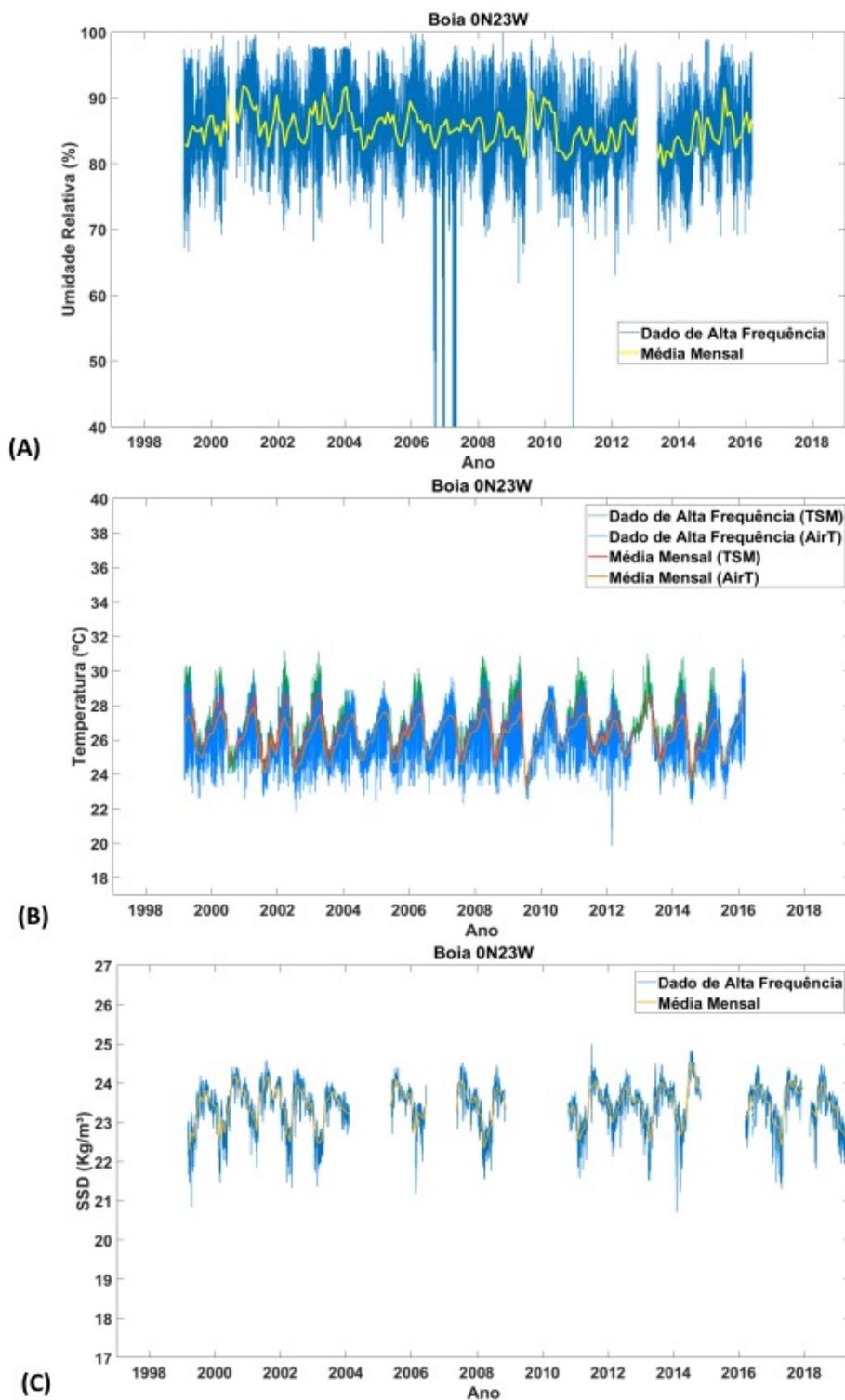


Figura D3 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento na posição 0N 23W (A) da boia do projeto PIRATA, (B) do ERA5 (a partir de 1997), (C) do QuikSCAT (de 1999 a 2009) e (D) do ASCAT (de 2007-presente).

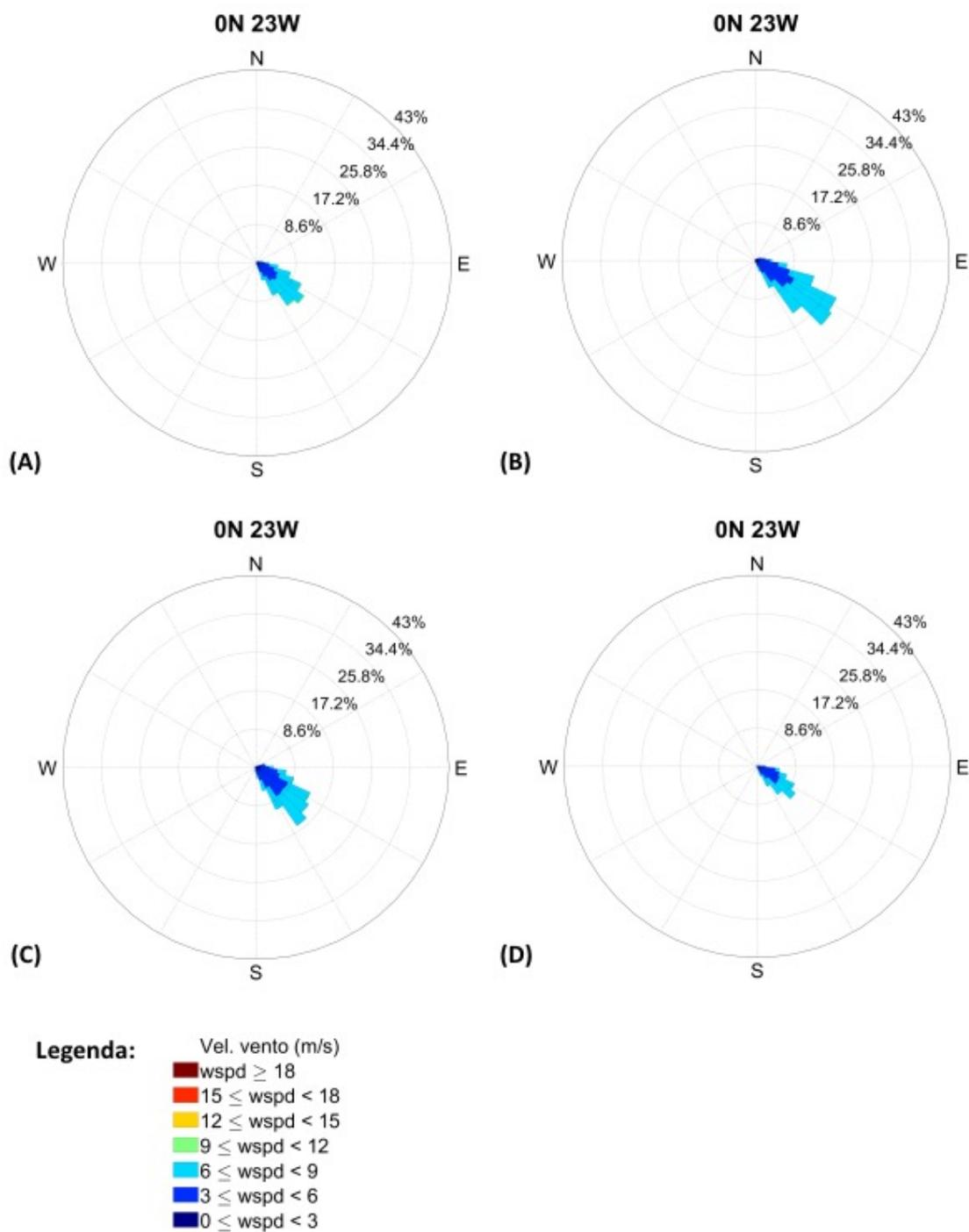


Figura D4 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento das boias PIRATA na posição 0N23W e os satélites QuikSCAT (esquerda) e ASCAT (direita). O ponto indicado como Ref se refere ao dado diário do satélite e os demais pontos coloridos a estatística da comparação com os dados da boia por hora do dia.

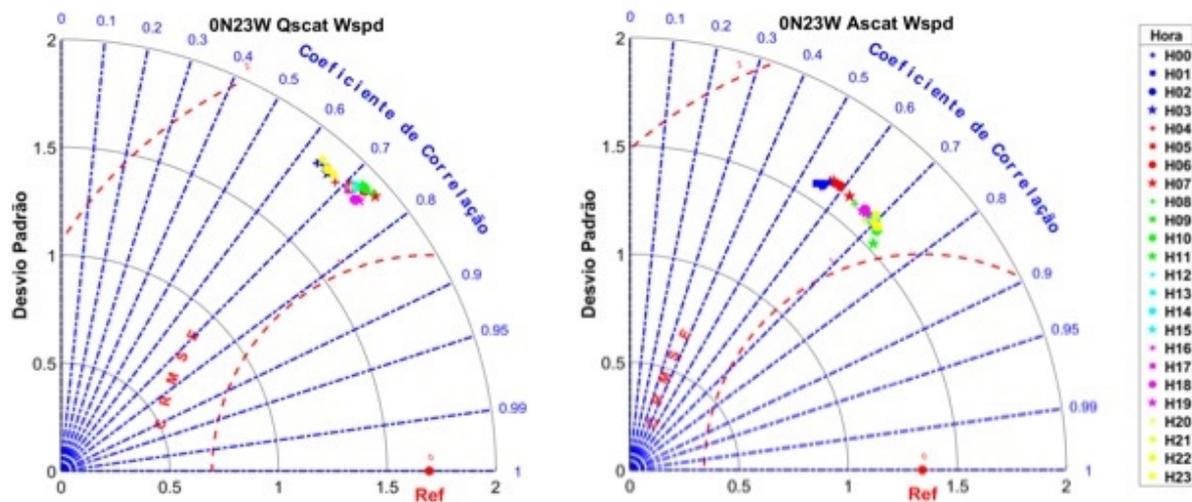


Figura D5 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e os satélites na posição 0N23W, de 1998 a 2009 (QuikSCAT) e 2009 a 2019 (ASCAT), em vermelho, e seus respectivos desvios padrões, em cinza.

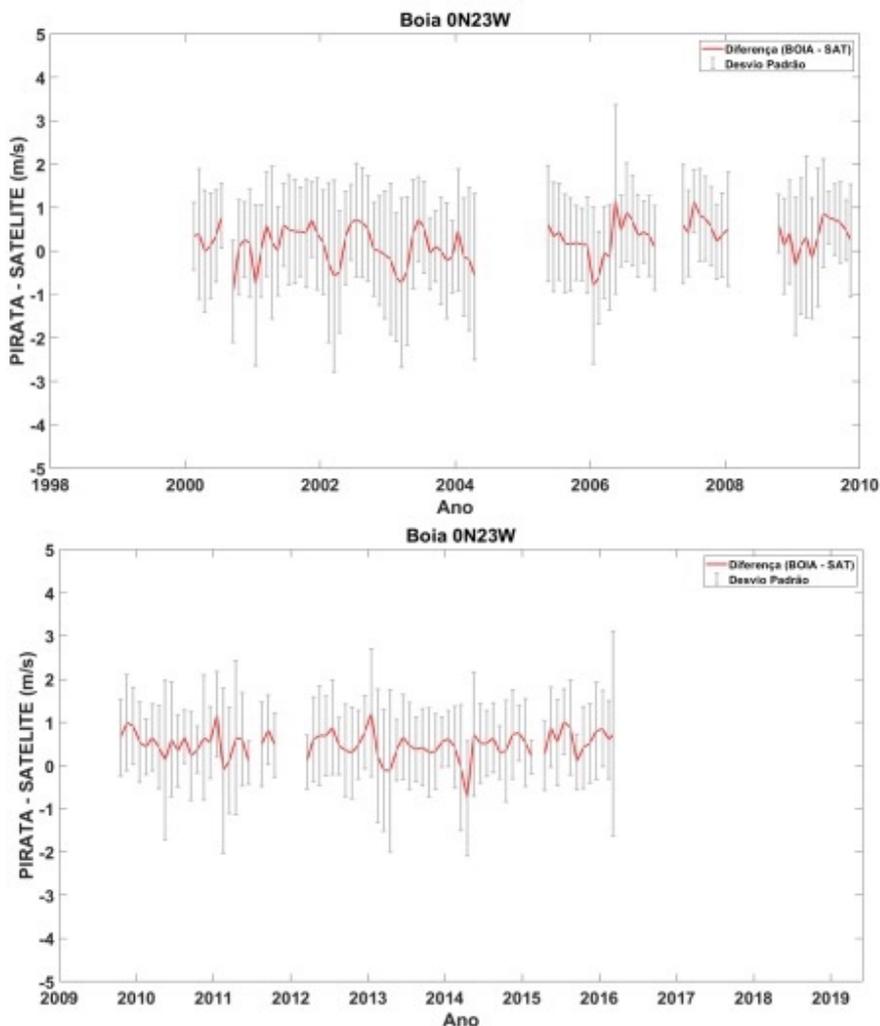


Figura D6 - Correlação (R), raiz do erro quadrático médio centralizado (CRMSE) e Desvio Padrão das variáveis do vento u, v e wspd, entre a boia PIRATA 0N23W e o ERA5 na mesma posição geográfica por hora do dia.

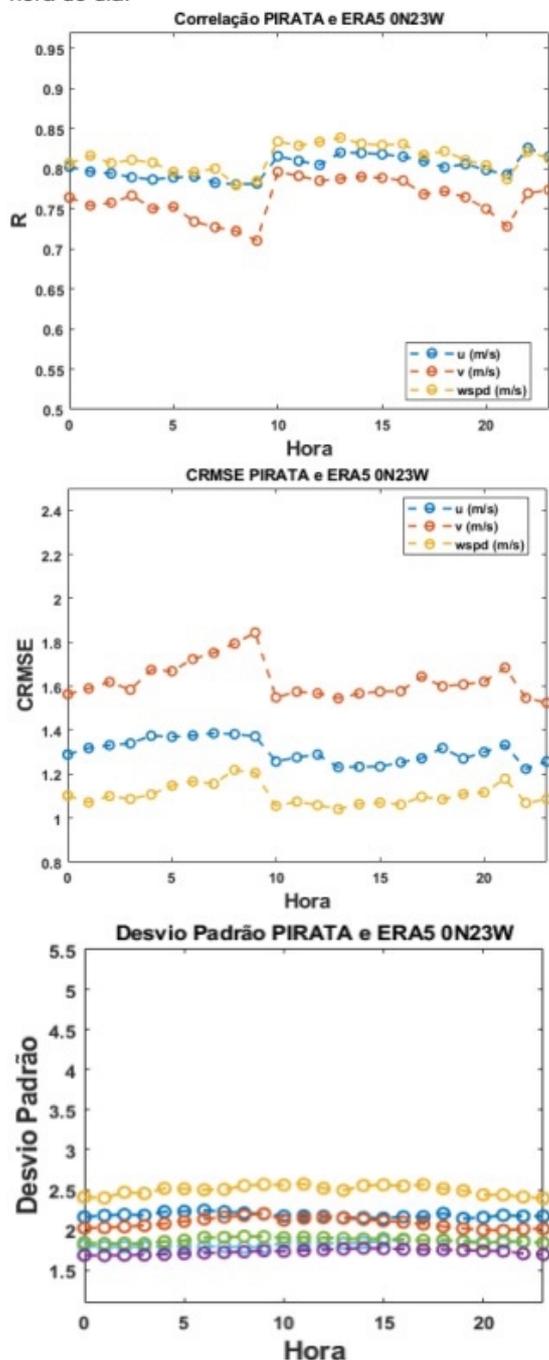


Figura D7 - Variação mensal das diferenças na velocidade do vento PIRATA – ERA5 e seus respectivos desvios padrão para a posição 0N23W.

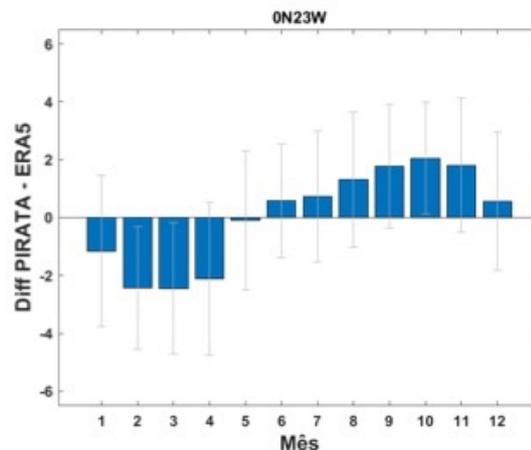


Figura D8 - Distribuição das diferenças de velocidade do vento entre o PIRATA – ERA5 em uma estimativa da função de densidade de probabilidade (em inglês, PDF - Probability density function estimate), onde a área de cada barra é o número relativo de observações. A linha azul representa o valor mais recorrente; caso esse valor fosse negativo, a linha seria vermelha.

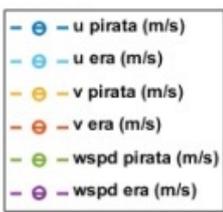
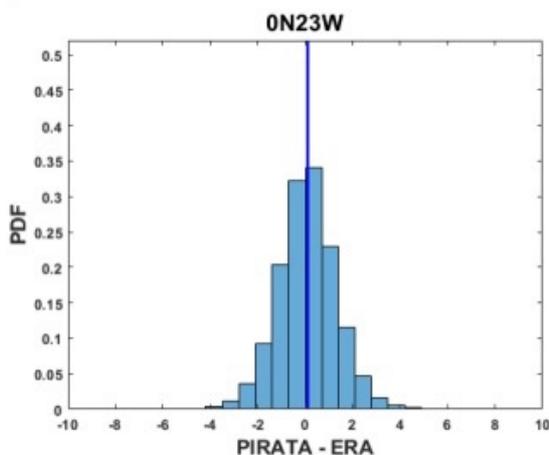


Figura D9 - Scree plot da posição 0N23W, utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no primeiro e segundo modelos de PCA propostos, respectivamente. O limite do critério do autovalor médio é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.

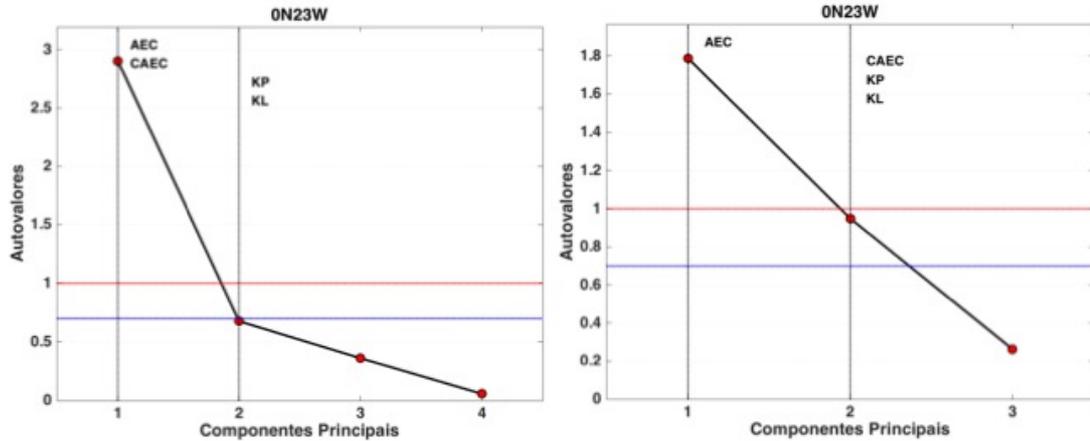


Figura D10 - Score Plot para o primeiro e segundo modelo, respectivamente, de PCA propostos da posição 0N23W. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. Os pontos representam as coordenadas de uma determinada amostra no espaço e seus relacionamentos, e a escala de cinza o nível de resposta da mesma.

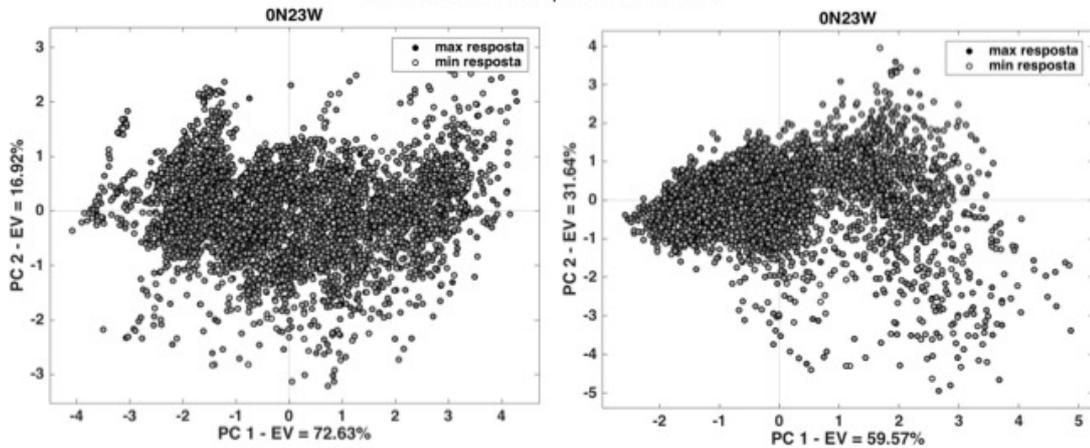
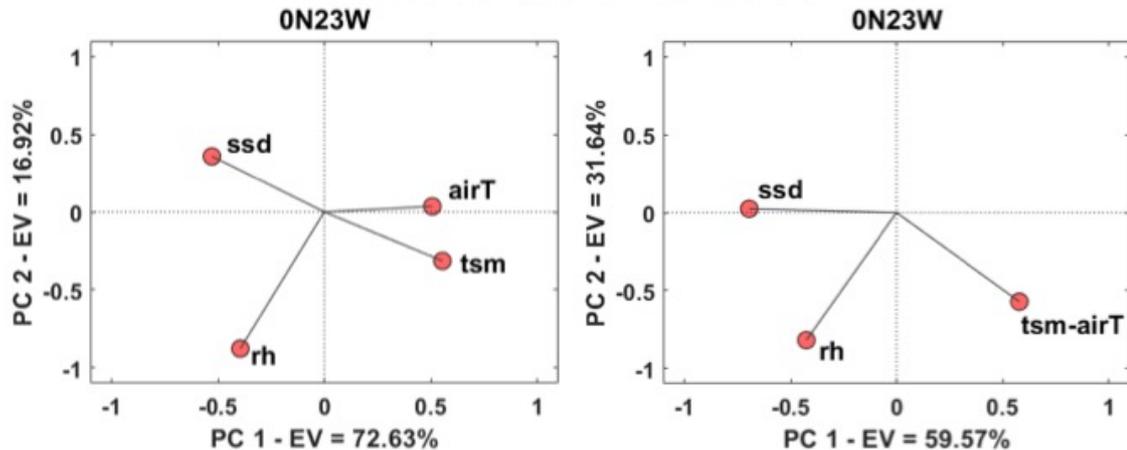


Figura D11 - Loading Plot da posição 0N23W para o primeiro e segundo modelo de PCA propostos, respectivamente. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. As variáveis utilizadas nesses modelos são: temperatura da superfície do mar (TSM), densidade ao nível do mar (SSD), temperatura do ar (airT) e umidade relativa do ar (rh).



APÊNDICE ECHO – RESUMO DA POSIÇÃO 0N35W

Figura E1 - Série temporal comparativa, do vento a 10 m, de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 0N 35W (A), do ASCAT e QuikSCAT (B) e do ERA5 (C), na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.

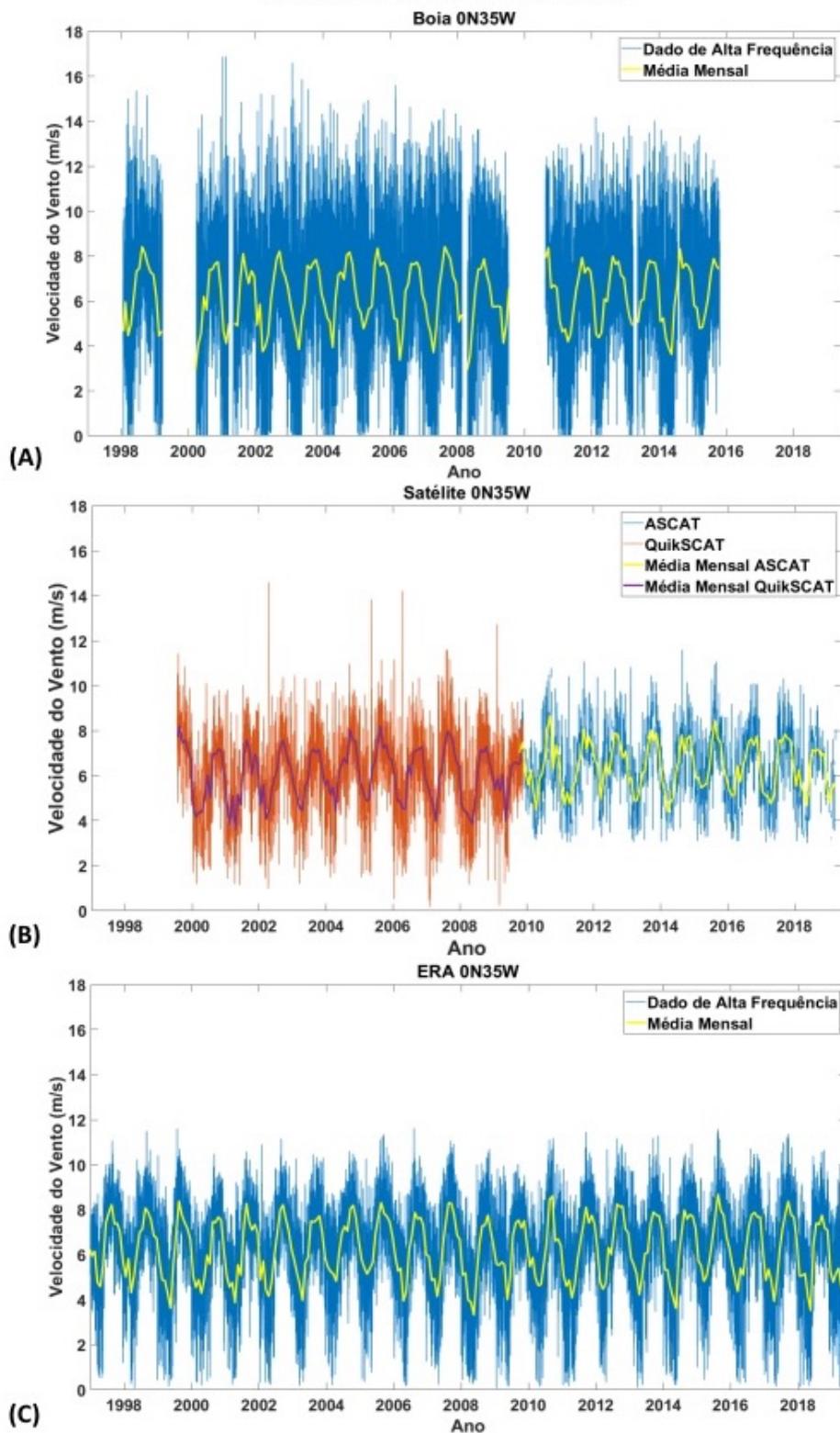
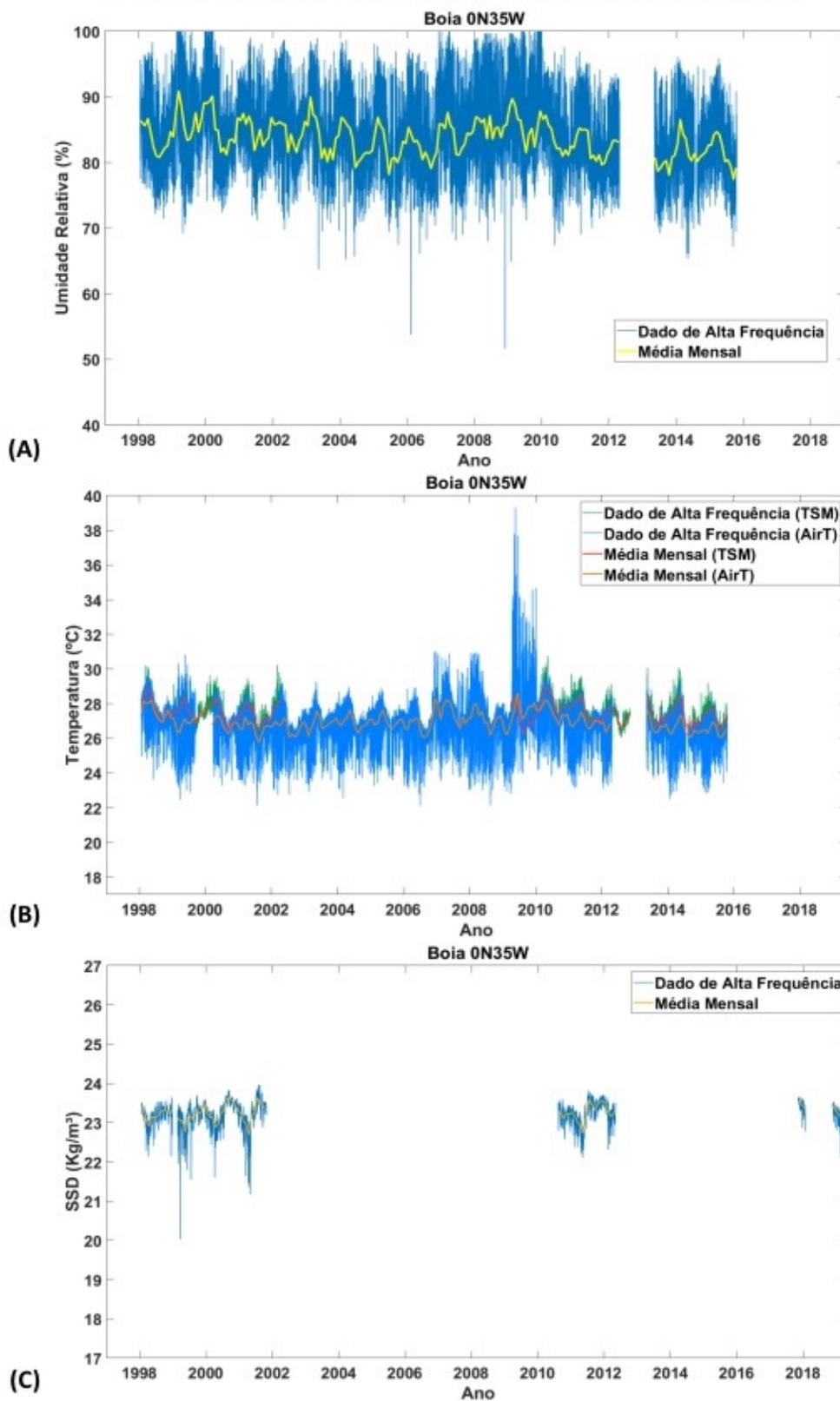


Figura E2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 0N 35W; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.



APÊNDICE FOXTROT – RESUMO DA POSIÇÃO 4N23W

Figura F1 - Série temporal comparativa, do vento a 10 m, de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 4N 23W (A), do ASCAT e QuikSCAT (B) e do ERA5 (C), na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.

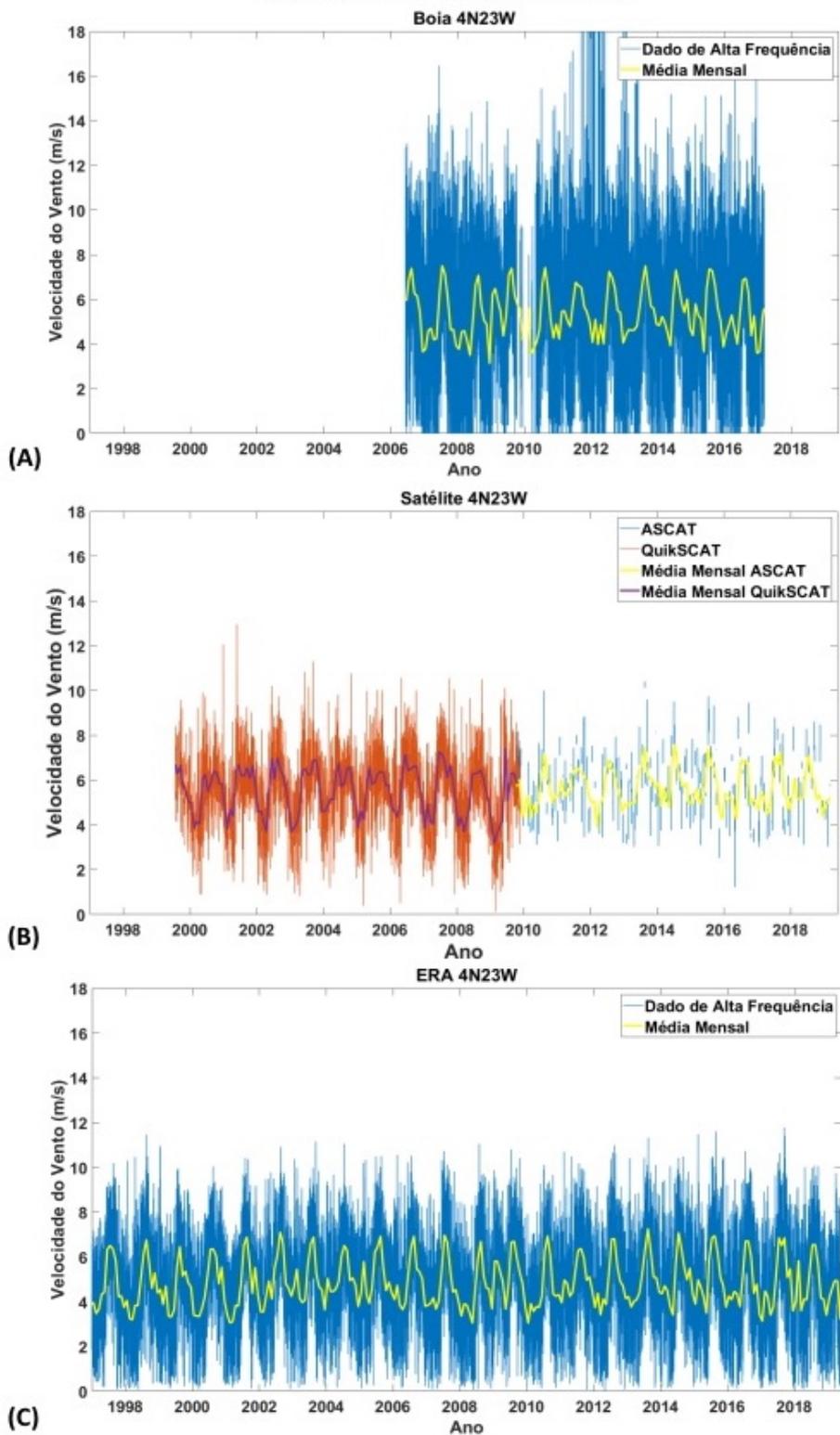


Figura F2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 4N 23W; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.

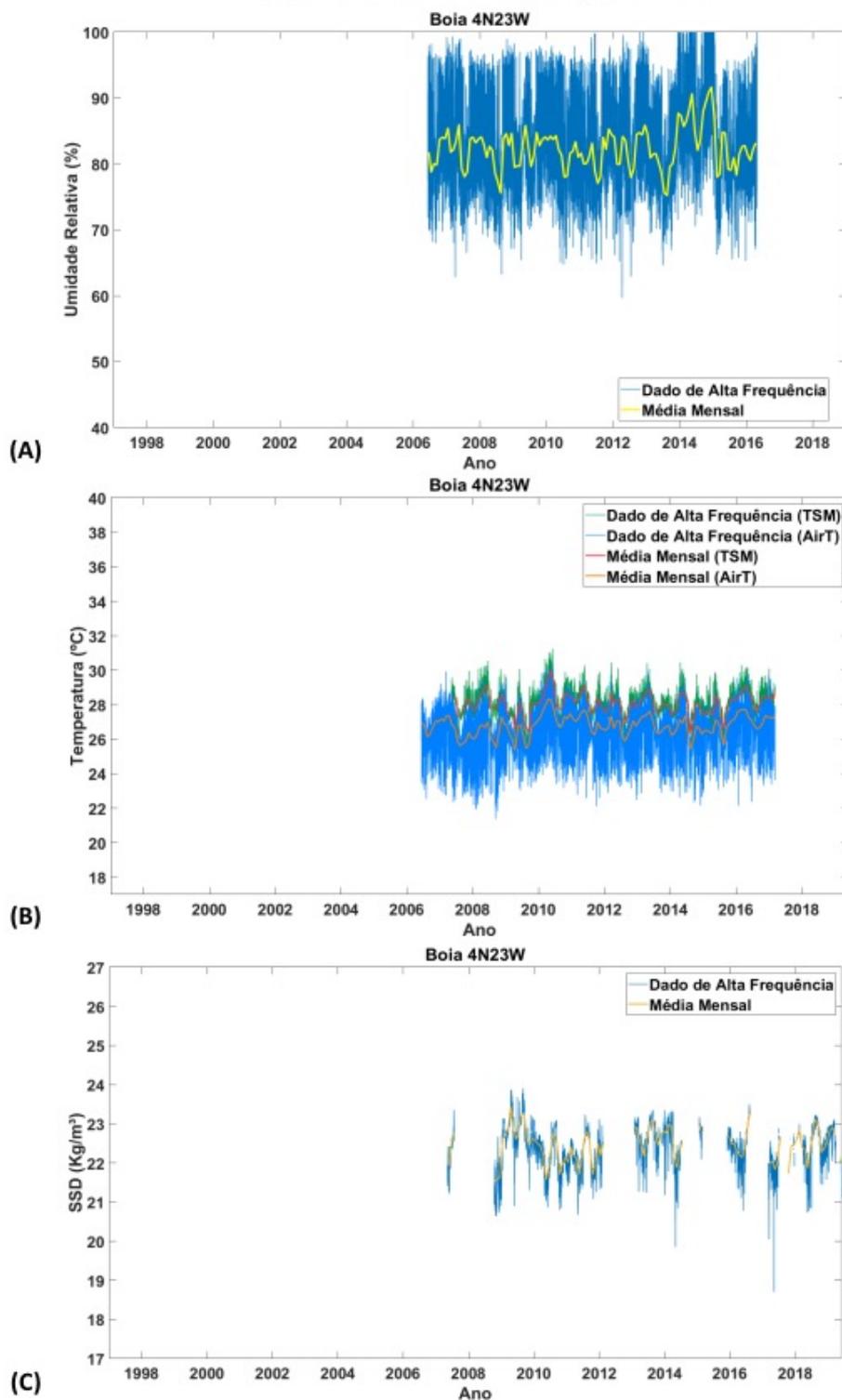


Figura F3 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento na posição 4N 23W (A) da boia do projeto PIRATA, (B) do ERA5 (a partir de 1997), (C) do QuikSCAT (de 1999 a 2009) e (D) do ASCAT (de 2007-presente).

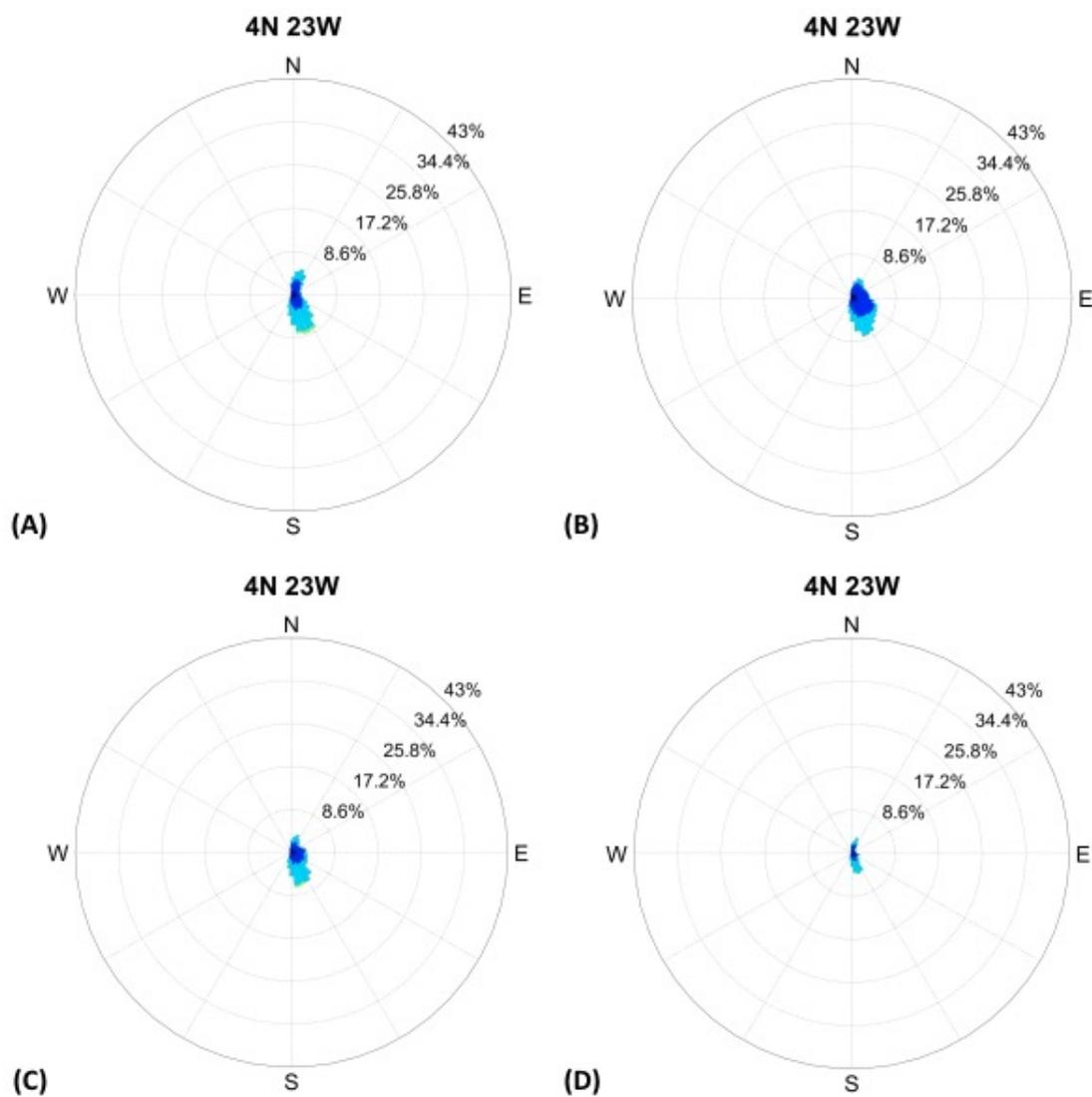


Figura F4 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento das boias PIRATA na posição 4N23W e os satélites QuikSCAT (esquerda) e ASCAT (direita). O ponto indicado como Ref se refere ao dado diário do satélite e os demais pontos coloridos a estatística da comparação com os dados da boia por hora do dia.

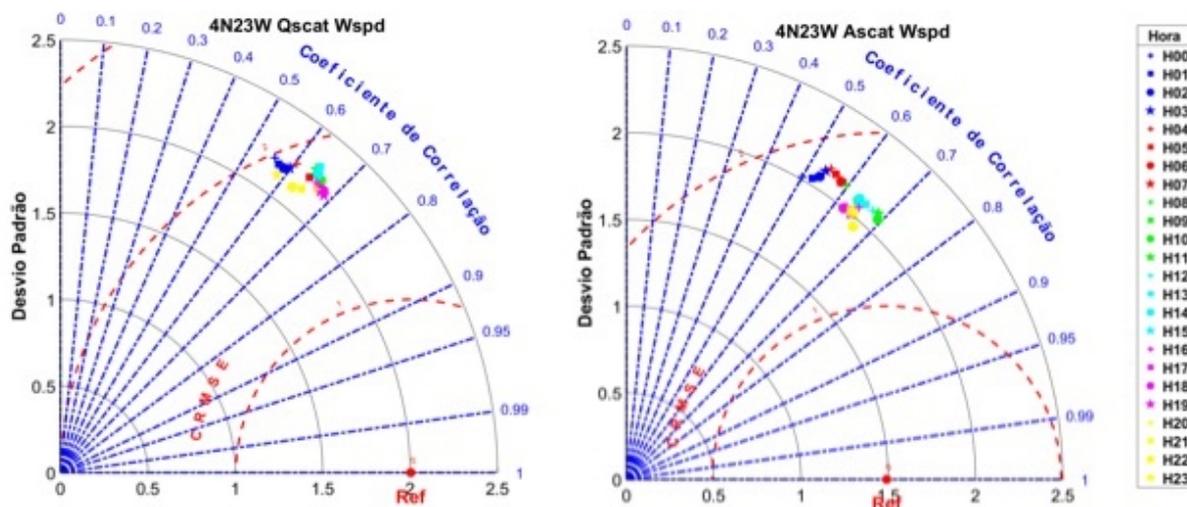


Figura F5 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e os satélites na posição 4N23W, de 1998 a 2009 (QuikSCAT) e 2009 a 2019 (ASCAT), em vermelho, e seus respectivos desvios padrão, em cinza.

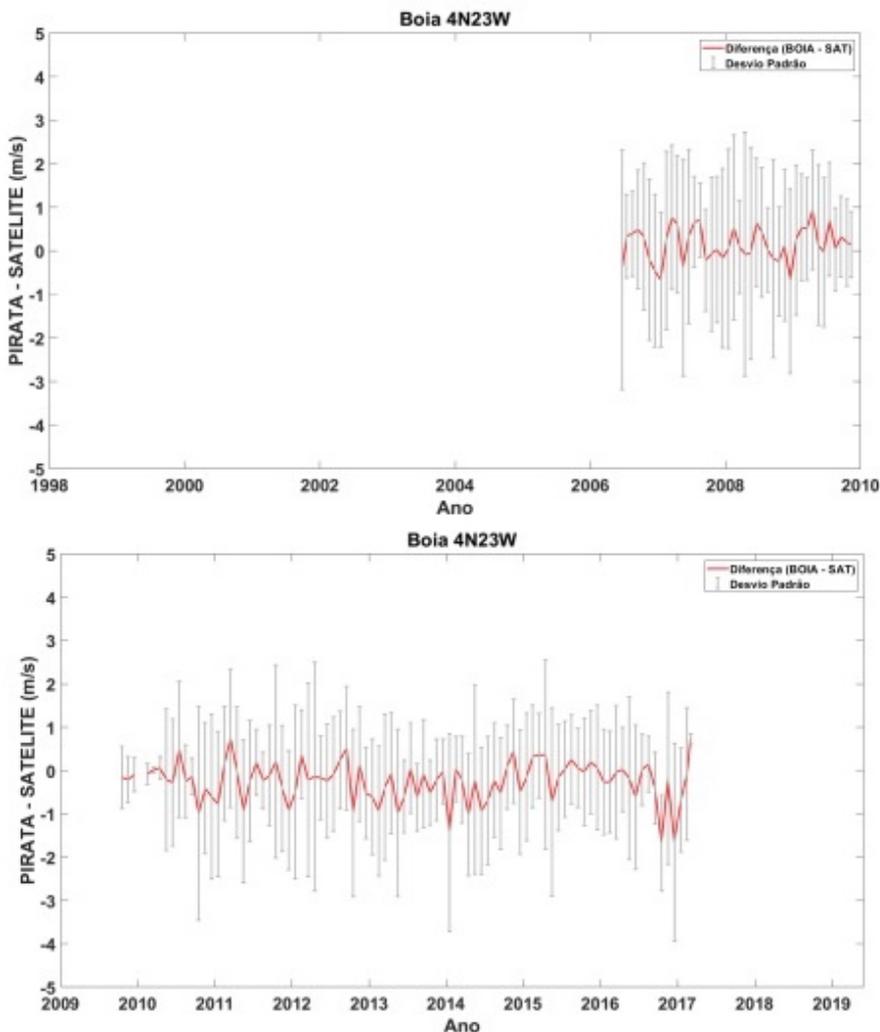


Figura F6 - Correlação (R), raiz do erro quadrático médio centralizado (CRMSE) e Desvio Padrão das variáveis do vento u, v e wspd, entre a boia PIRATA 4N23W e o ERA5 na mesma posição geográfica por hora do dia.

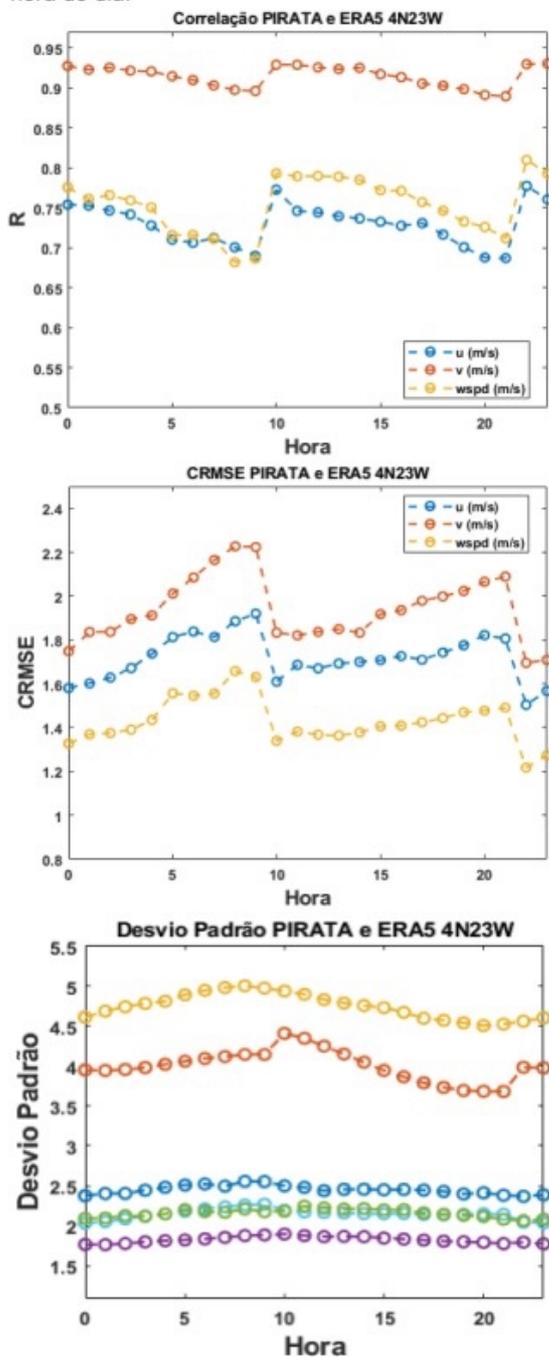


Figura F7 - Variação mensal das diferenças na velocidade do vento PIRATA – ERA5 e seus respectivos desvios padrão para a posição 4N23W.

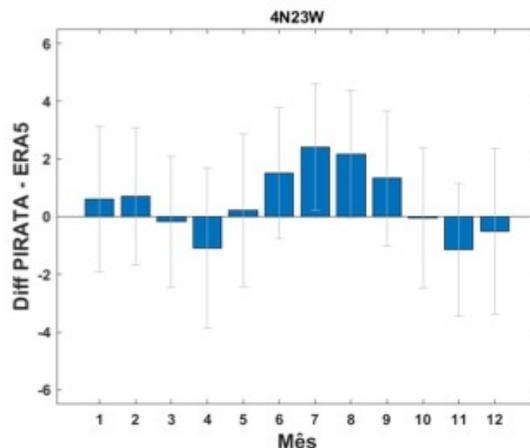


Figura F8 - Distribuição das diferenças de velocidade do vento entre o PIRATA – ERA5 em uma estimativa da função de densidade de probabilidade (em inglês, PDF - Probability density function estimate), onde a área de cada barra é o número relativo de observações. A linha azul representa o valor mais recorrente; caso esse valor fosse negativo, a linha seria vermelha.

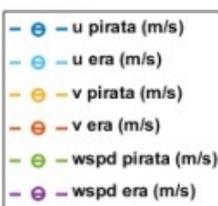
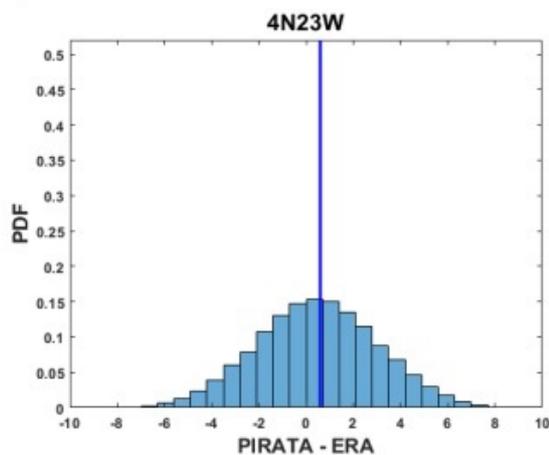


Figura F9 - *Scree plot* da posição 4N23W, utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no primeiro e segundo modelos de PCA propostos, respectivamente. O limite do critério do autovalor médio é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.

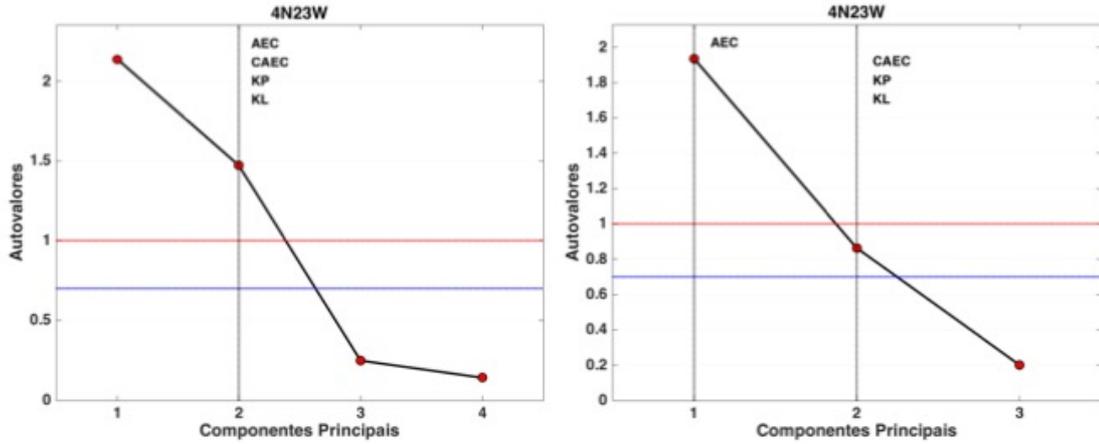


Figura F10 - *Score Plot* para o primeiro e segundo modelo, respectivamente, de PCA propostos da posição 4N23W. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. Os pontos representam as coordenadas de uma determinada amostra no espaço e seus relacionamentos, e a escala de cinza o nível de resposta da mesma.

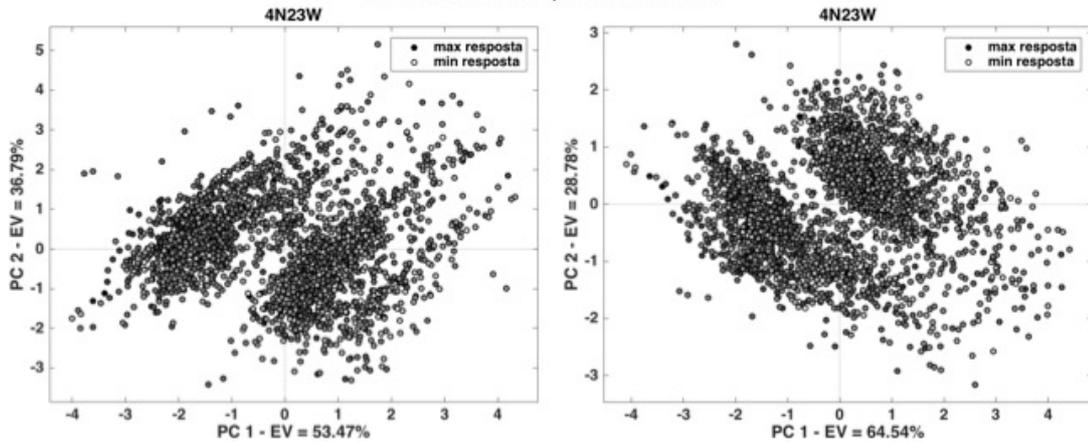
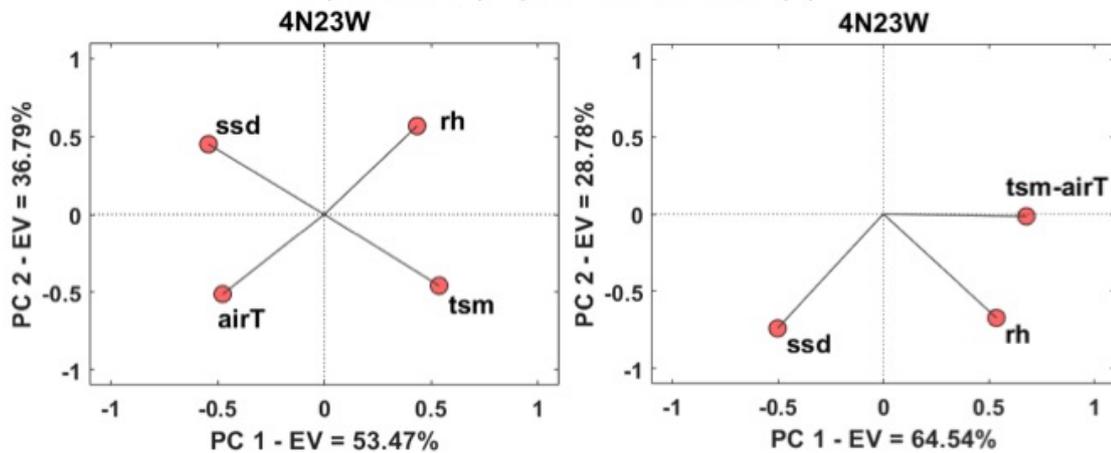


Figura F11 - *Loading Plot* da posição 4N23W para o primeiro e segundo modelo de PCA propostos, respectivamente. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. As variáveis utilizadas nesses modelos são: temperatura da superfície do mar (TSM), densidade ao nível do mar (SSD), temperatura do ar (airT) e umidade relativa do ar (rh).



APÊNDICE GOLF – RESUMO DA POSIÇÃO 4N38W

Figura G1 - Série temporal comparativa, do vento a 10 m, de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 4N 38W (A), do ASCAT e QuikSCAT (B) e do ERA5 (C), na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.

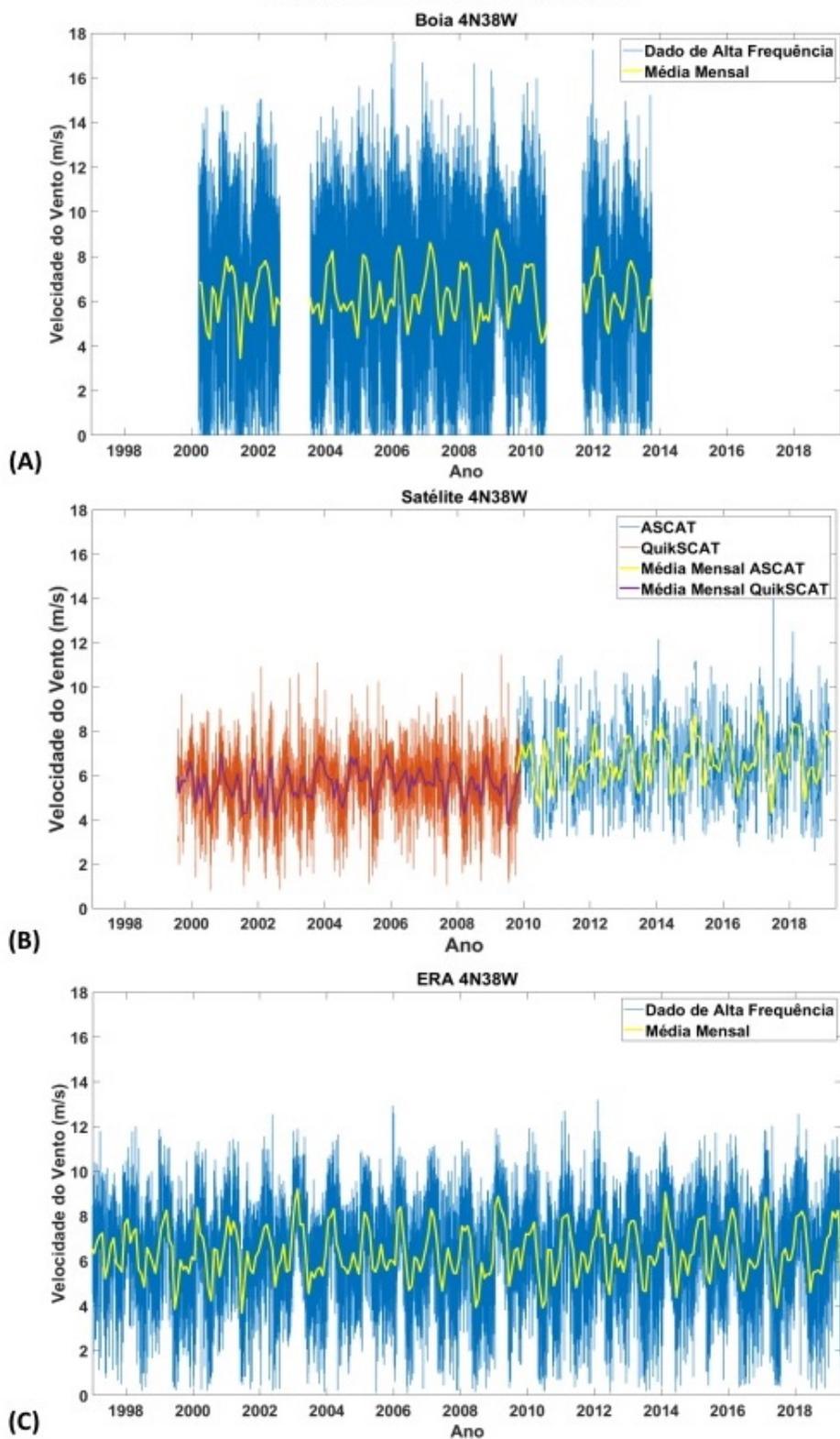


Figura G2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 4N 38W; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.

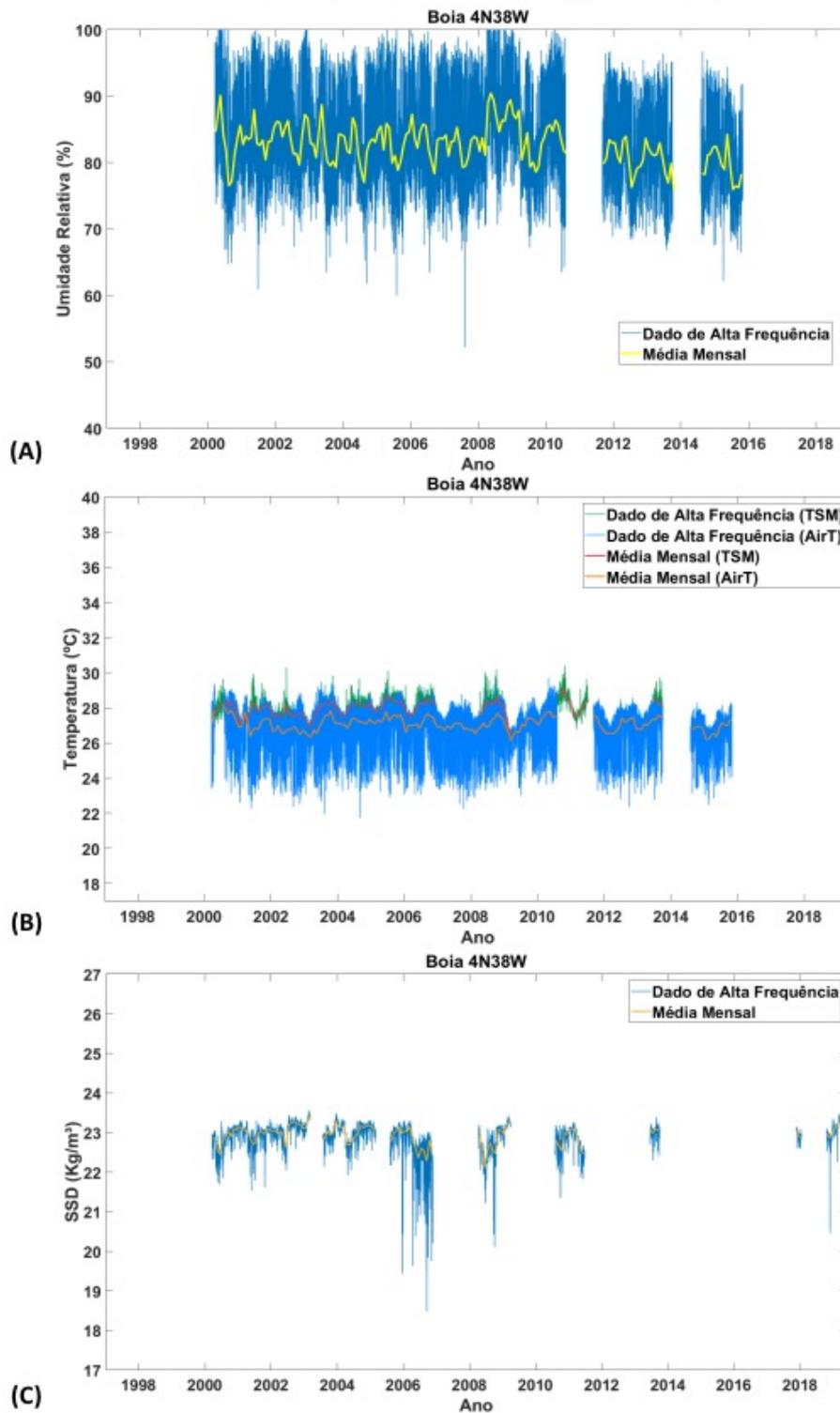


Figura G3 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento na posição 4N 38W (A) da boia do projeto PIRATA, (B) do ERA5 (a partir de 1997), (C) do QuikSCAT (de 1999 a 2009) e (D) do ASCAT (de 2007-presente).

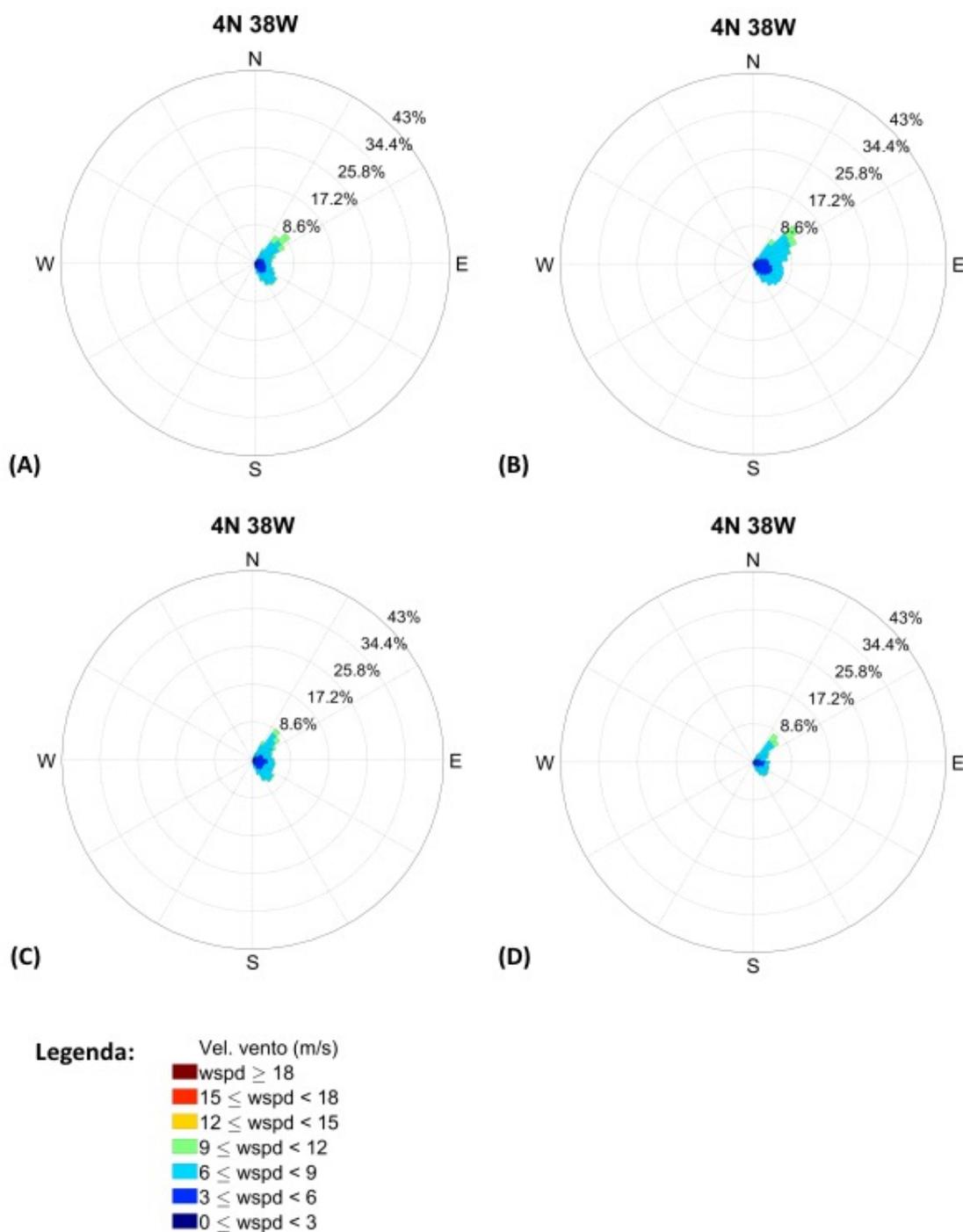


Figura G4 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento das boias PIRATA na posição 4N38W e os satélites QuikSCAT (esquerda) e ASCAT (direita). O ponto indicado como Ref se refere ao dado diário do satélite e os demais pontos coloridos a estatística da comparação com os dados da boia por hora do dia.

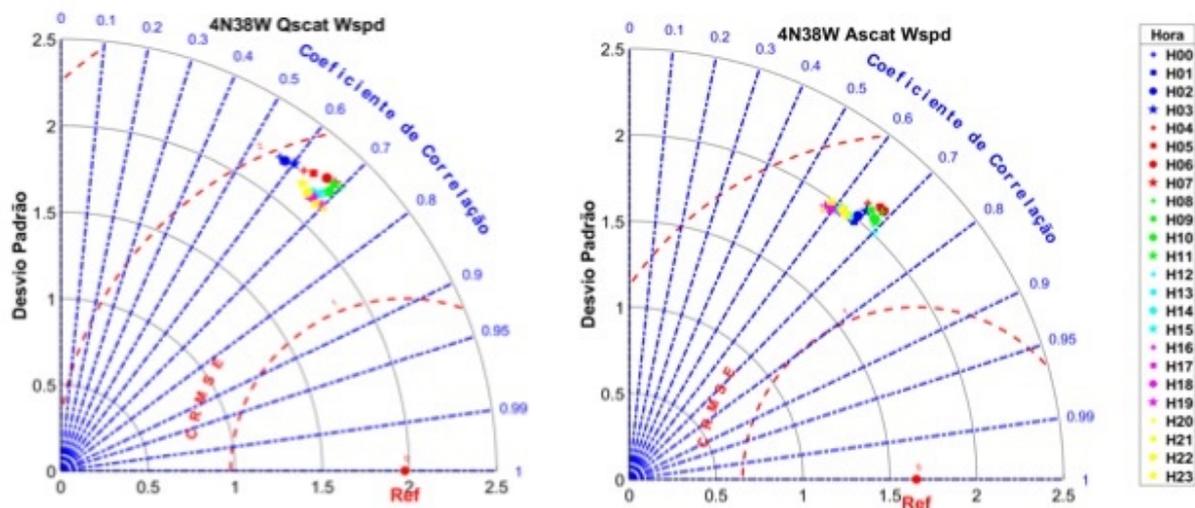


Figura G5 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e os satélites na posição 4N38W, de 1998 a 2009 (QuikSCAT) e 2009 a 2019 (ASCAT), em vermelho, e seus respectivos desvios padrão, em cinza.

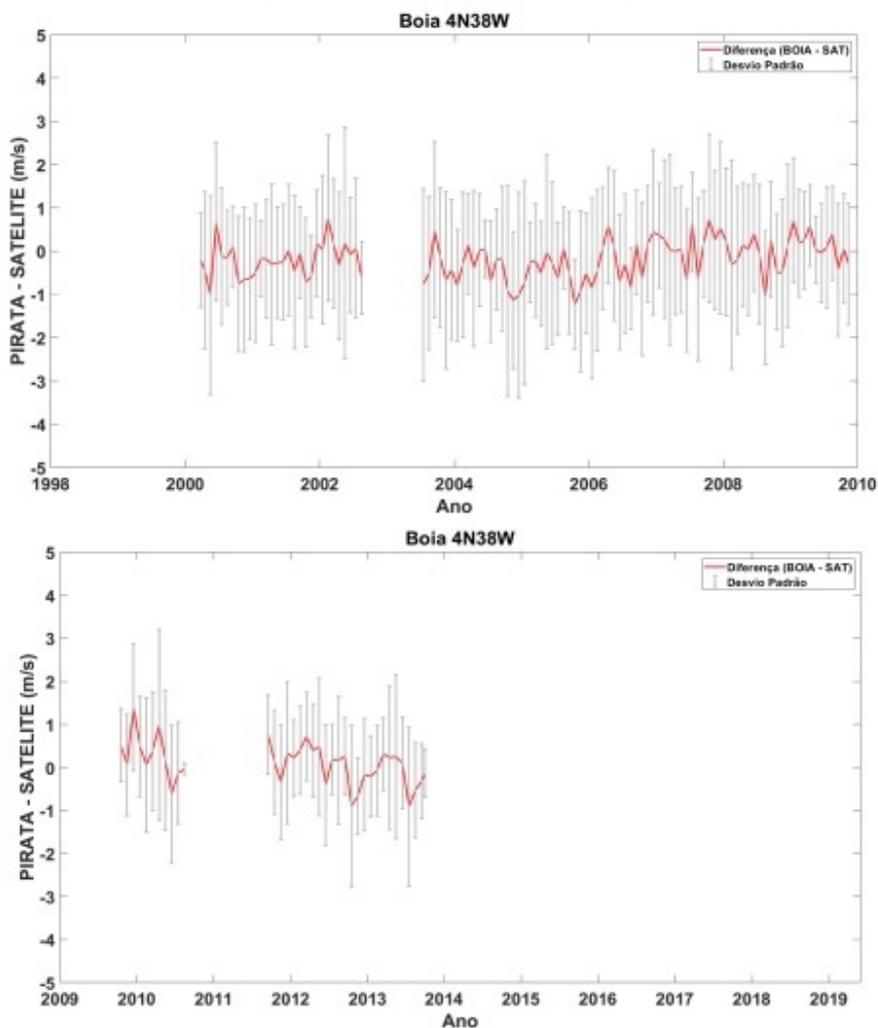


Figura G6 - Correlação (R), raiz do erro quadrático médio centralizado (CRMSE) e Desvio Padrão das variáveis do vento u, v e wspd, entre a boia PIRATA 4N38W e o ERA5 na mesma posição geográfica por hora do dia.

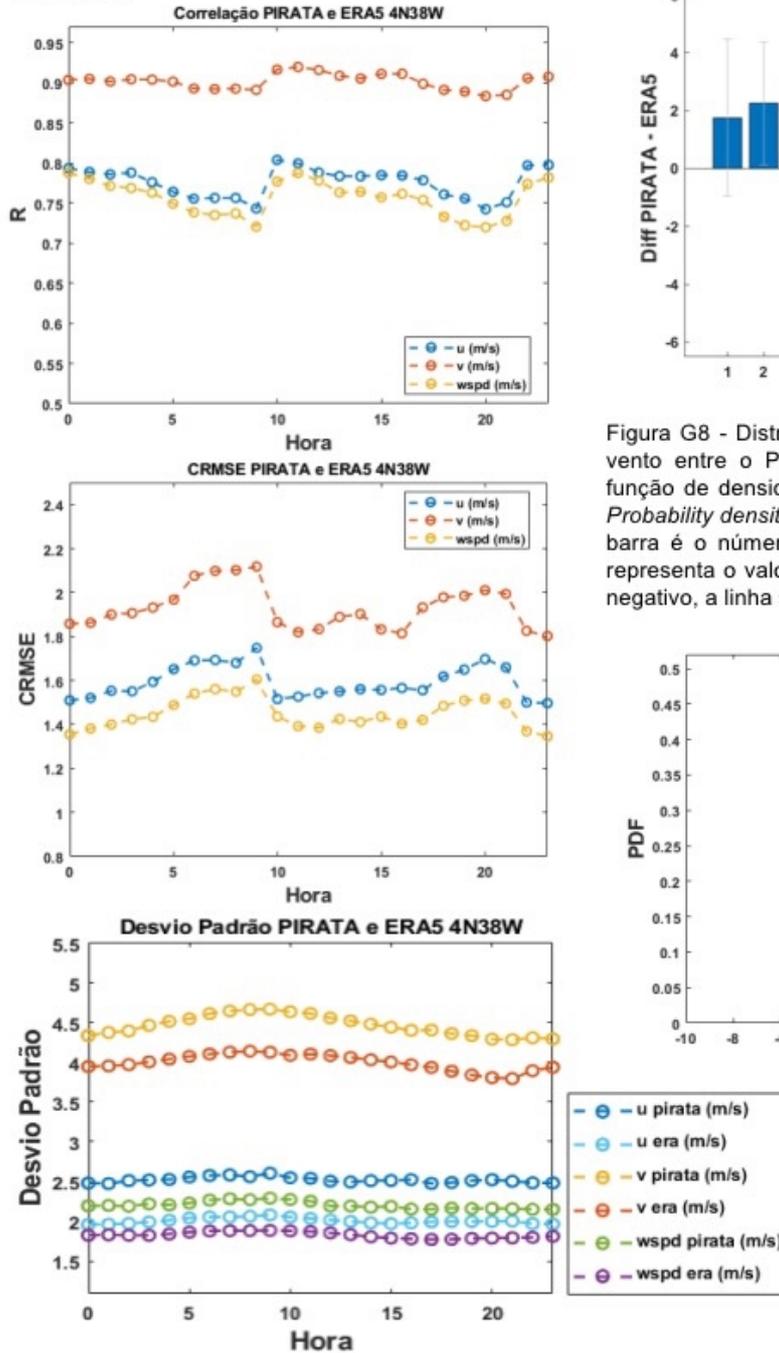


Figura G7 - Variação mensal das diferenças na velocidade do vento PIRATA – ERA5 e seus respectivos desvios padrão para a posição 4N38W.

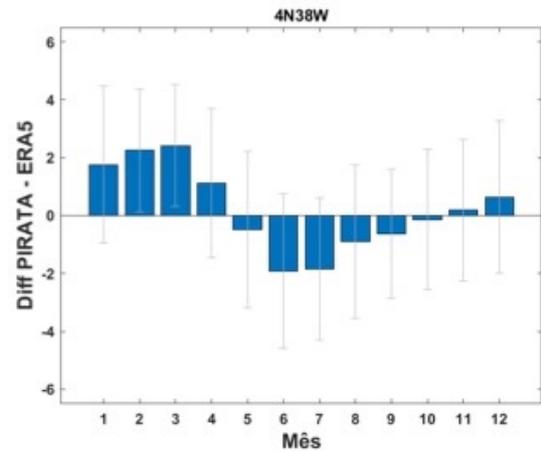


Figura G8 - Distribuição das diferenças de velocidade do vento entre o PIRATA – ERA5 em uma estimativa da função de densidade de probabilidade (em inglês, PDF - Probability density function estimate), onde a área de cada barra é o número relativo de observações. A linha azul representa o valor mais recorrente; caso esse valor fosse negativo, a linha seria vermelha.

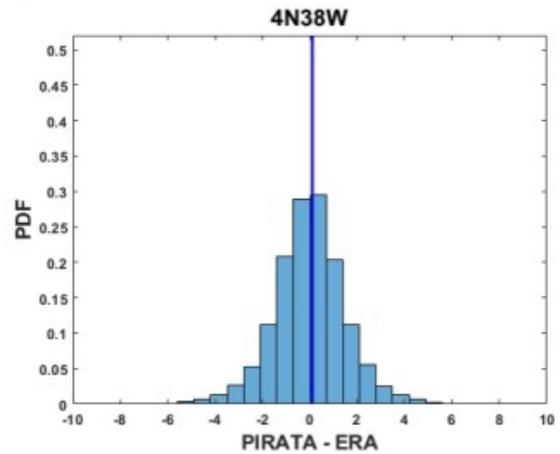


Figura G9 - Scree plot da posição 4N38W, utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no primeiro e segundo modelos de PCA propostos, respectivamente. O limite do critério do autovalor médio é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.

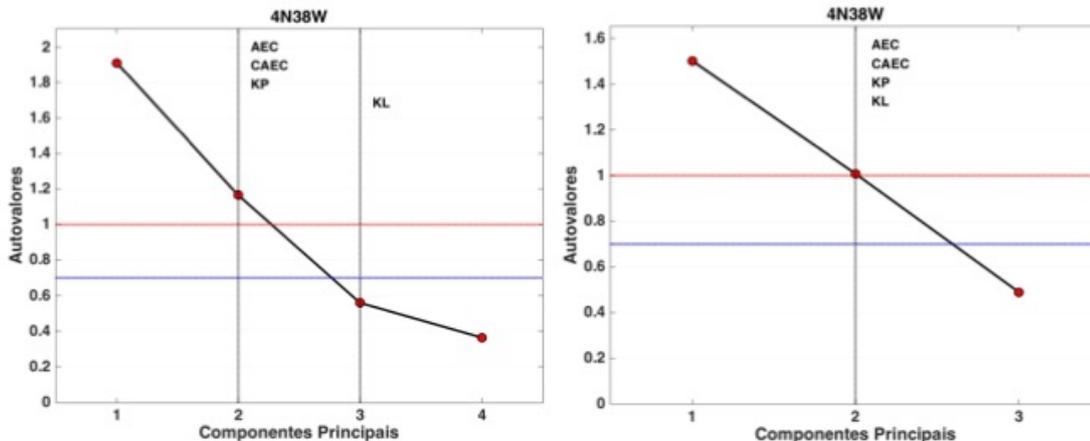


Figura G10 - Score Plot para o primeiro e segundo modelo, respectivamente, de PCA propostos da posição 4N38W. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. Os pontos representam as coordenadas de uma determinada amostra no espaço e seus relacionamentos, e a escala de cinza o nível de resposta da mesma.

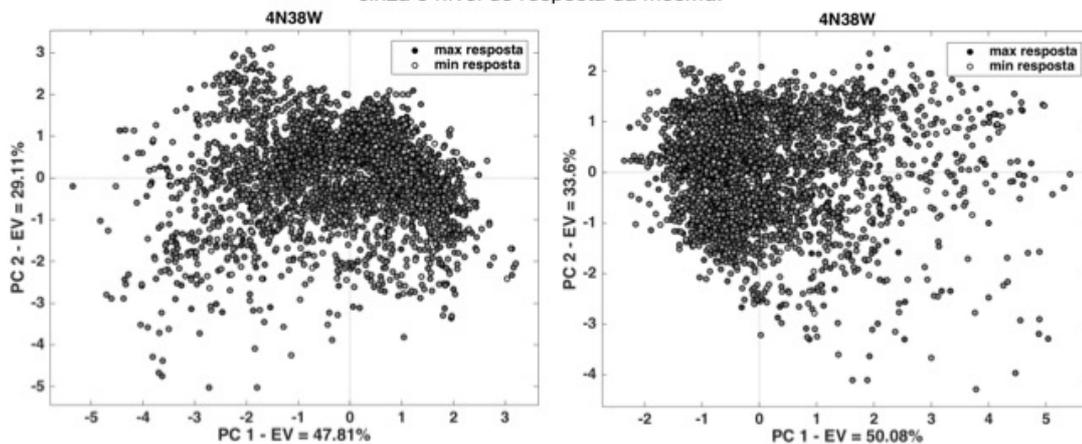
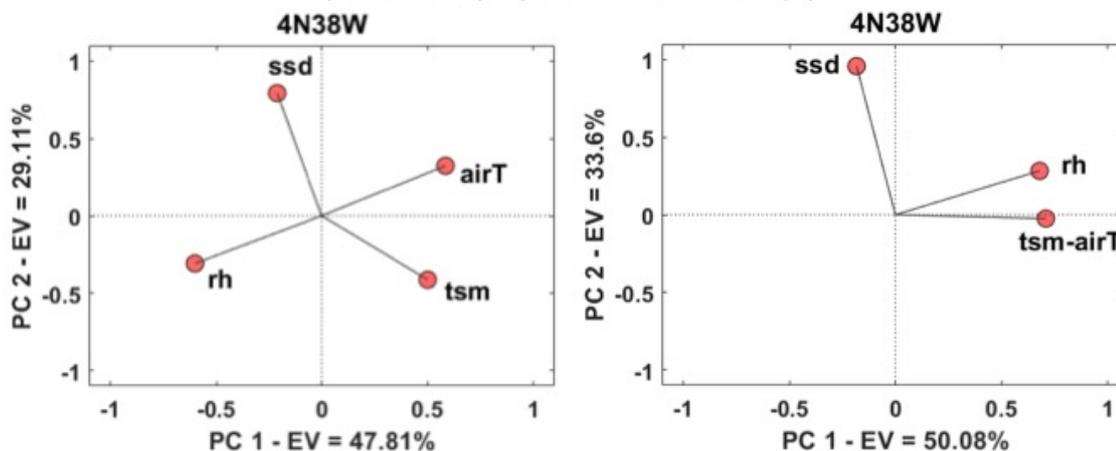


Figura G11 - Loading Plot da posição 4N38W para o primeiro e segundo modelo de PCA propostos, respectivamente. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. As variáveis utilizadas nesses modelos são: temperatura da superfície do mar (TSM), densidade ao nível do mar (SSD), temperatura do ar (airT) e umidade relativa do ar (rh).



APÊNDICE HOTEL – RESUMO DA POSIÇÃO 6S8E

Figura H1 - Série temporal comparativa, do vento a 10 m, de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 6S 8E (A), do ASCAT e QuikSCAT (B) e do ERA5 (C), na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.

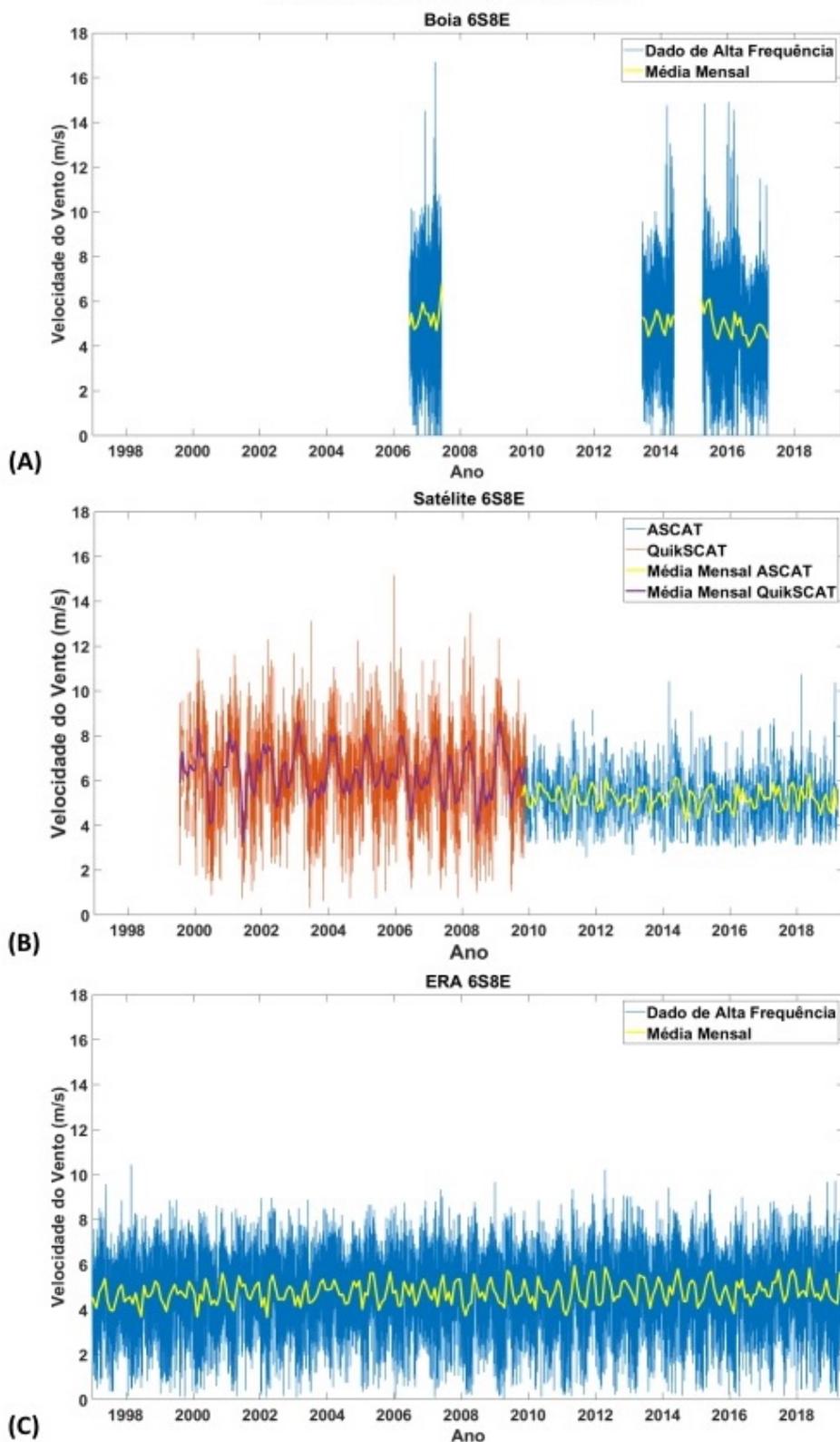


Figura H2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 6S 8E; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.

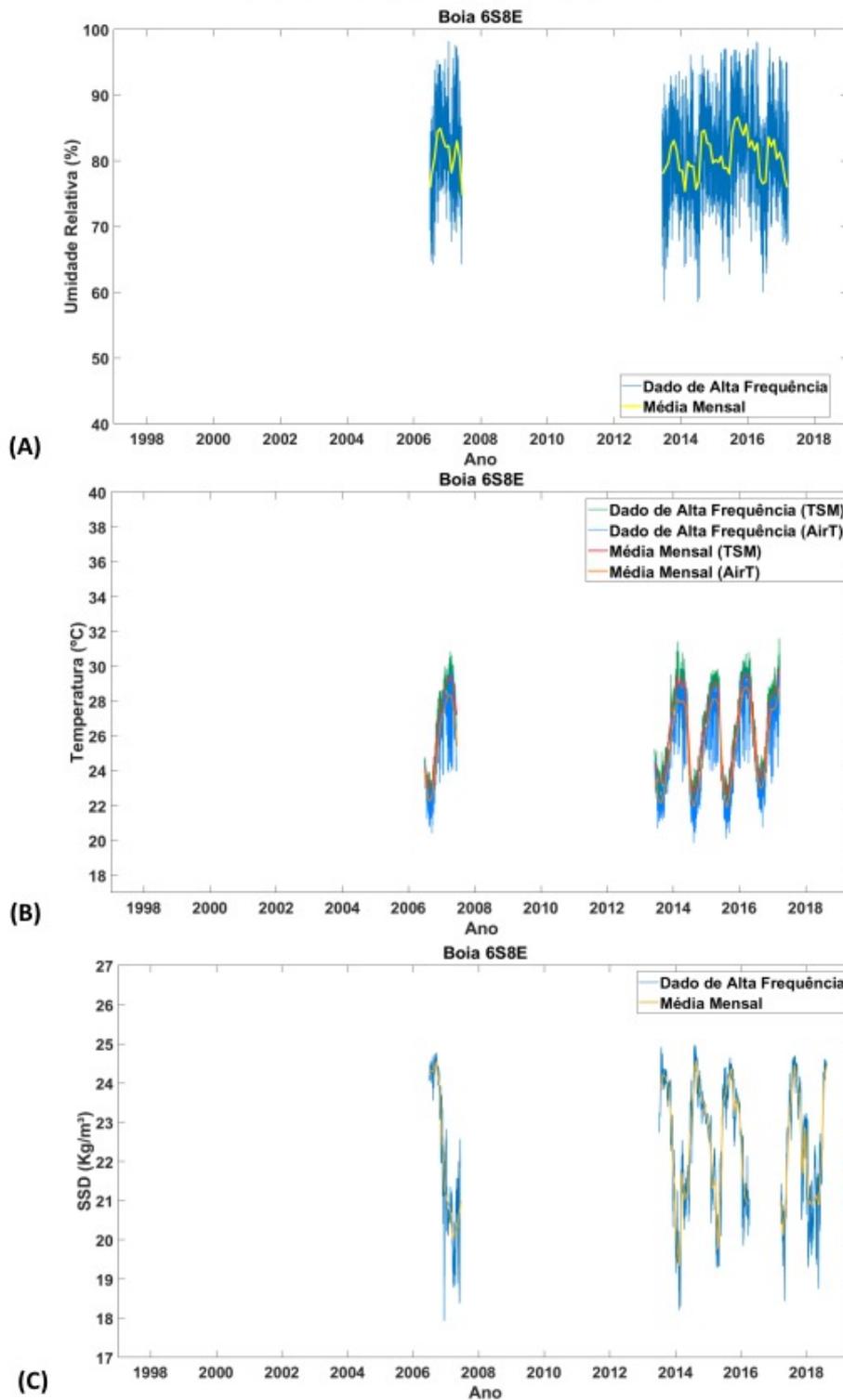


Figura H3 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento na posição 6S 8E (A) da boia do projeto PIRATA, (B) do ERA5 (a partir de 1997), (C) do QuikSCAT (de 1999 a 2009) e (D) do ASCAT (de 2007-presente).

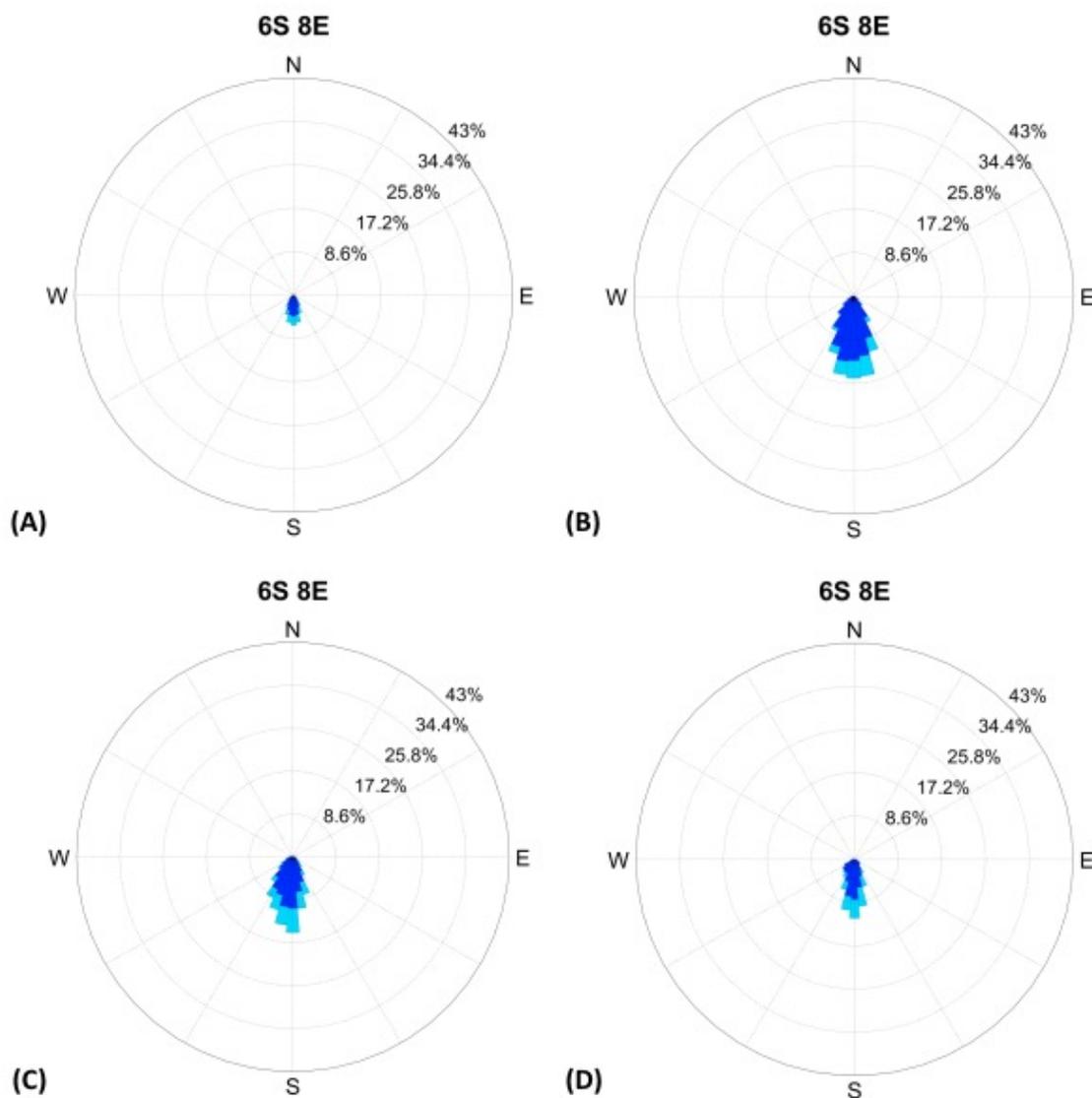


Figura H4 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento das boias PIRATA na posição 6S8E e os satélites QuikSCAT (esquerda) e ASCAT (direita). O ponto indicado como Ref se refere ao dado diário do satélite e os demais pontos coloridos a estatística da comparação com os dados da boia por hora do dia.

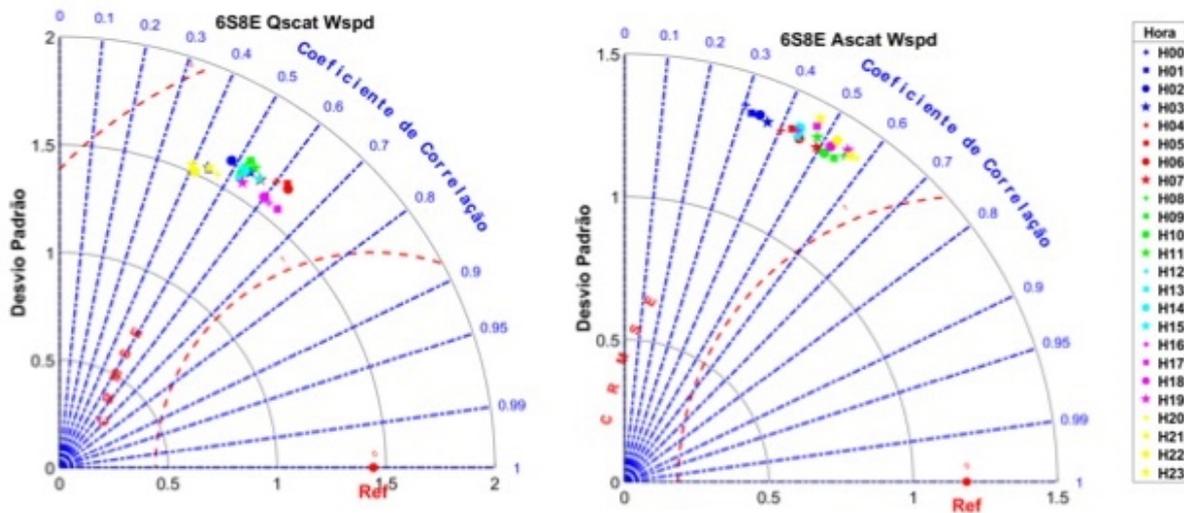


Figura H5 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e os satélites na posição 6S8E, de 1998 a 2009 (QuikSCAT) e 2009 a 2019 (ASCAT), em vermelho, e seus respectivos desvios padrão, em cinza.

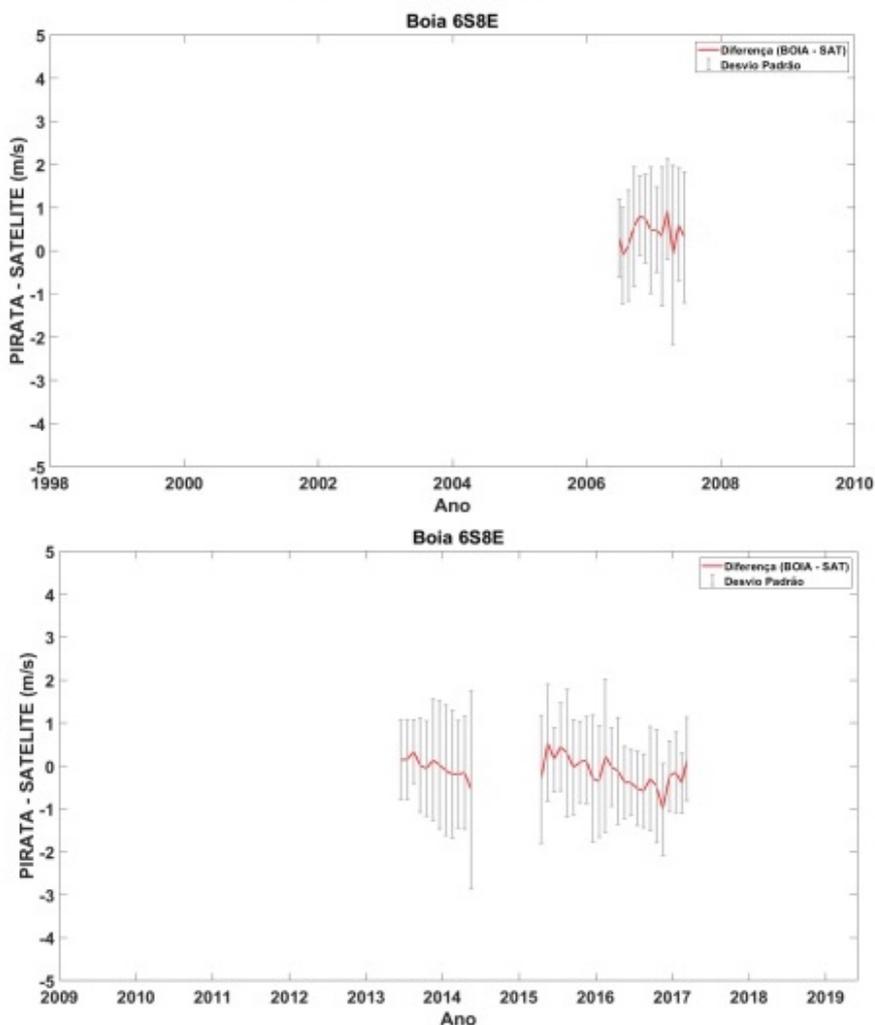


Figura H6 - Correlação (R), raiz do erro quadrático médio centralizado (CRMSE) e Desvio Padrão das variáveis do vento u, v e wspd, entre a boia PIRATA 6S8E e o ERA5 na mesma posição geográfica por hora do dia.

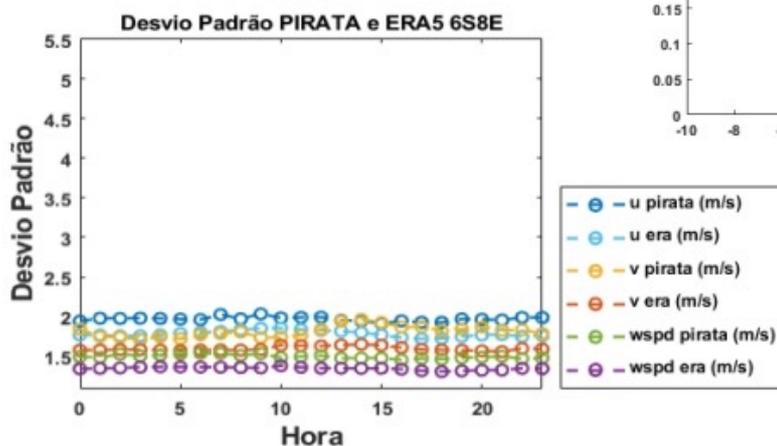
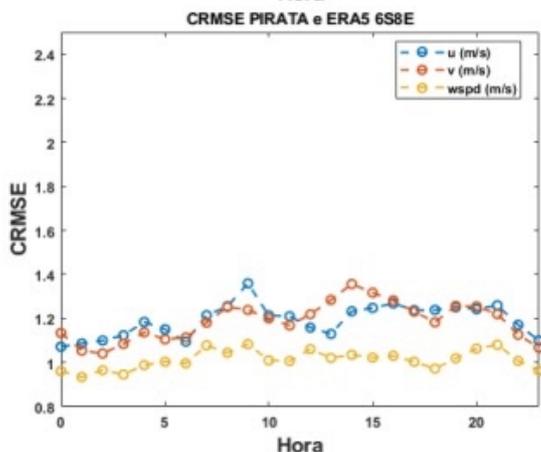
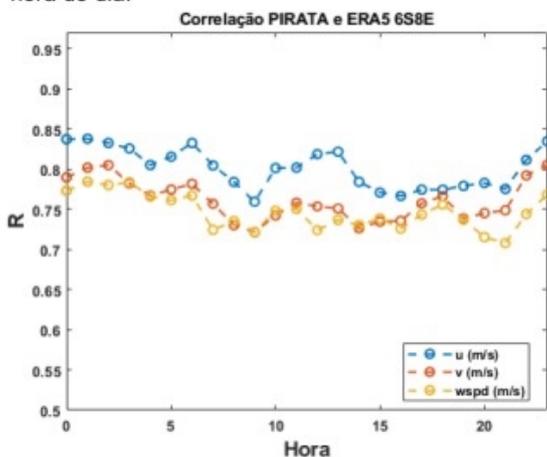


Figura H7 - Variação mensal das diferenças na velocidade do vento PIRATA – ERA5 e seus respectivos desvios padrão para a posição 6S8E.

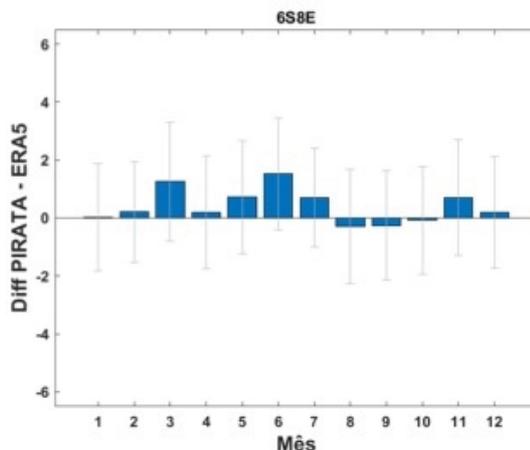


Figura H8 - Distribuição das diferenças de velocidade do vento entre o PIRATA – ERA5 em uma estimativa da função de densidade de probabilidade (em inglês, PDF - Probability density function estimate), onde a área de cada barra é o número relativo de observações. A linha vermelha representa o valor mais recorrente; caso esse valor fosse positivo, a linha seria azul.

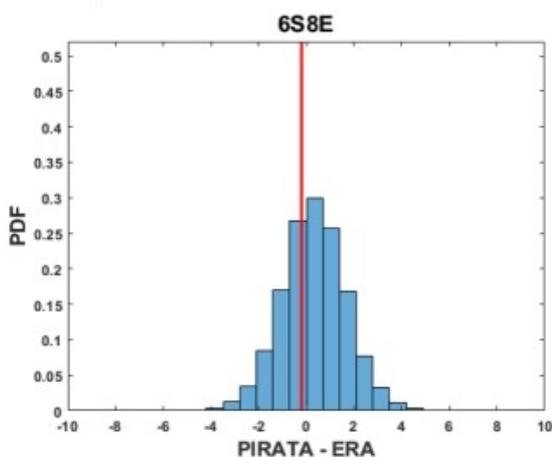


Figura H9 - Scree plot da posição 6S8E, utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no primeiro e segundo modelos de PCA propostos, respectivamente. O limite do critério do autovalor médio é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.

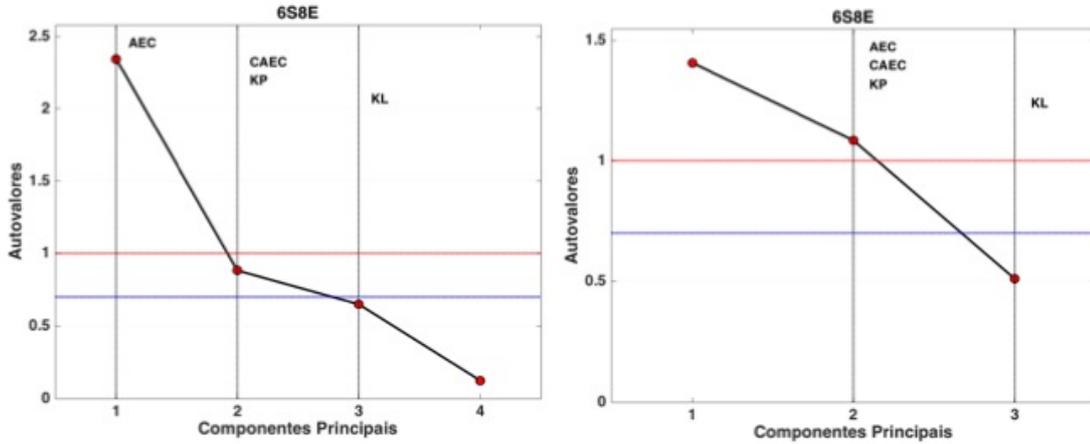


Figura H10 - Score Plot para o primeiro e segundo modelo, respectivamente, de PCA propostos da posição 6S8E. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. Os pontos representam as coordenadas de uma determinada amostra no espaço e seus relacionamentos, e a escala de cinza o nível de resposta da mesma.

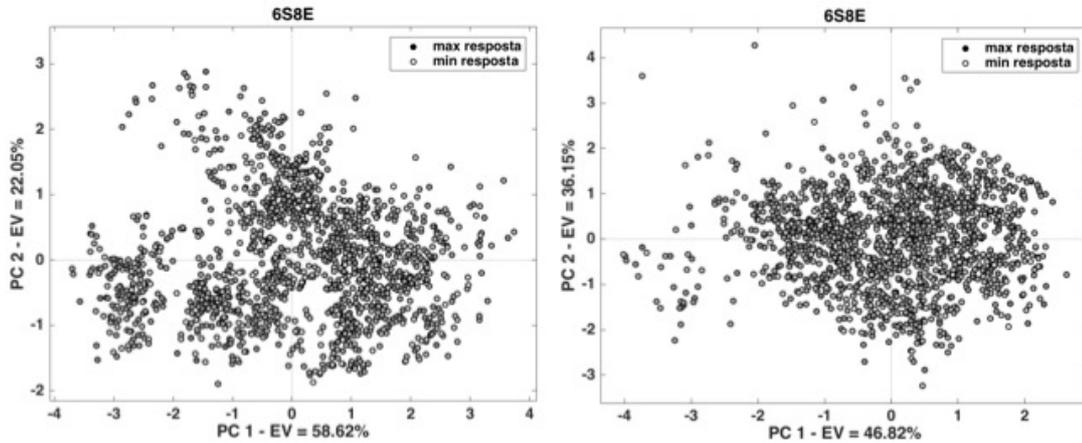
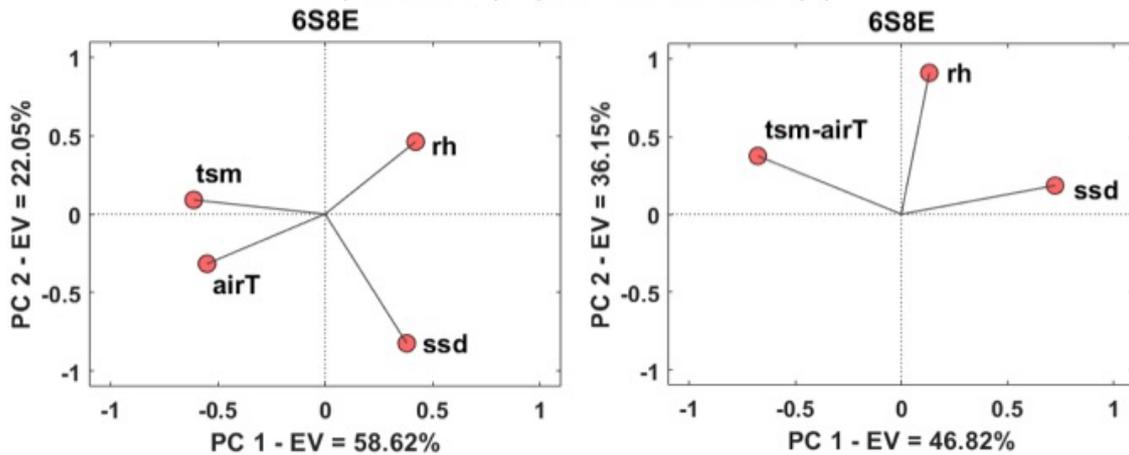


Figura H11 - Loading Plot da posição 6S8E para o primeiro e segundo modelo de PCA propostos, respectivamente. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. As variáveis utilizadas nesses modelos são: temperatura da superfície do mar (TSM), densidade ao nível do mar (SSD), temperatura do ar (airT) e umidade relativa do ar (rh).



APÊNDICE INDIA – RESUMO DA POSIÇÃO 6S10W

Figura I1 - Série temporal comparativa, do vento a 10 m, de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 6S 10W (A), do ASCAT e QuikSCAT (B) e do ERA5 (C), na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.

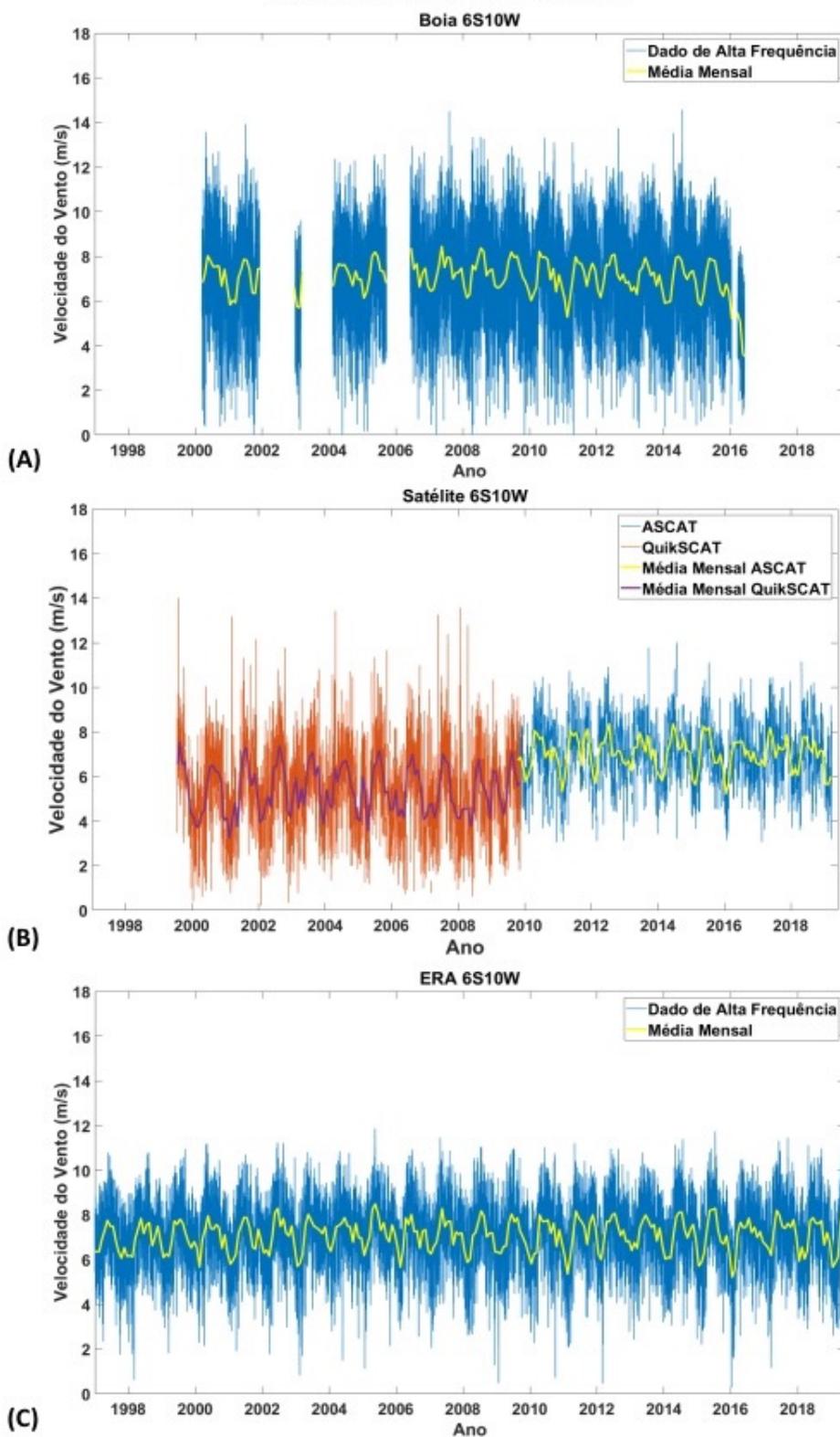


Figura I2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 6S 10W; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.

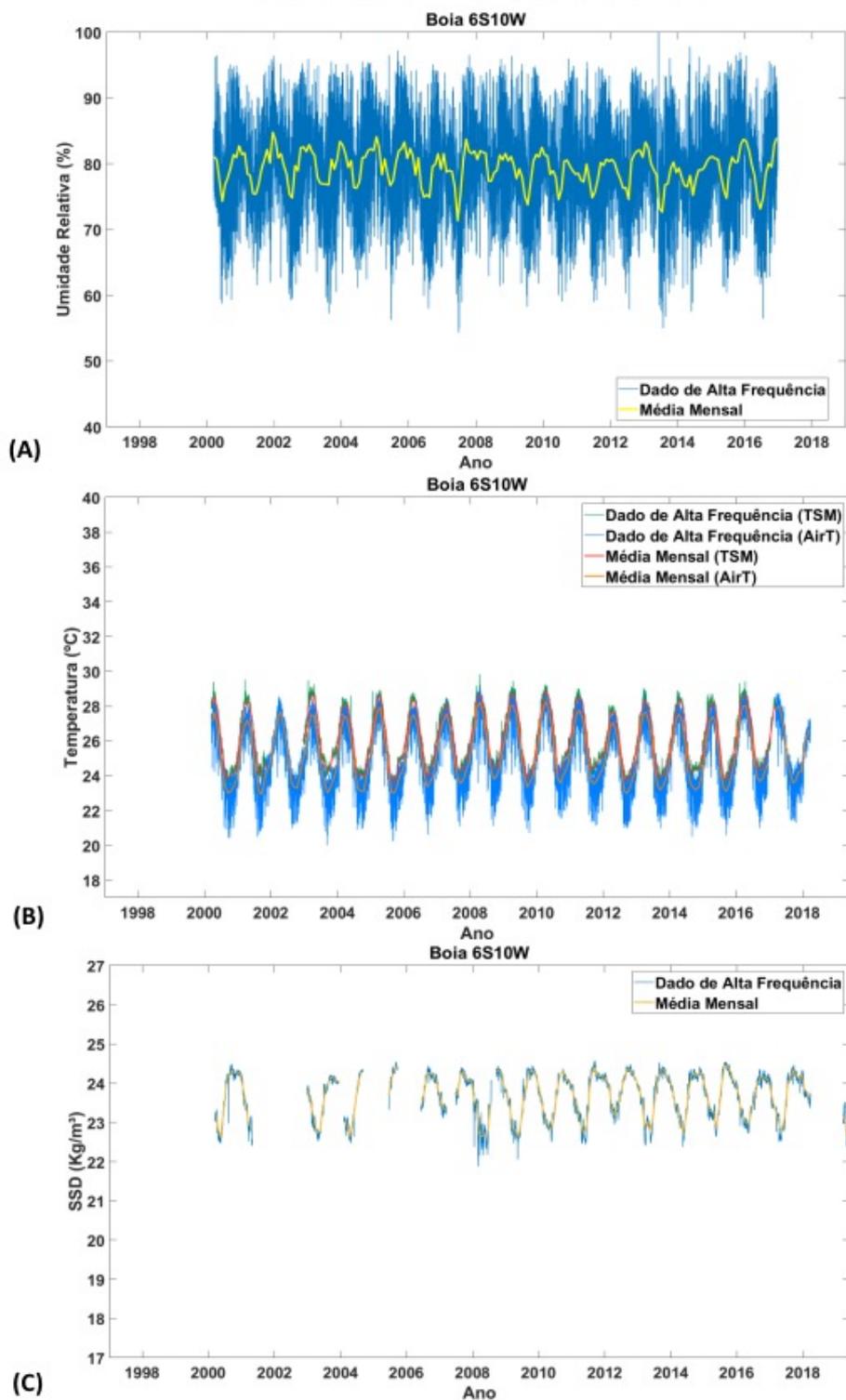


Figura I3 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento na posição 6S 10W (A) da boia do projeto PIRATA, (B) do ERA5 (a partir de 1997), (C) do QuikSCAT (de 1999 a 2009) e (D) do ASCAT (de 2007-presente).

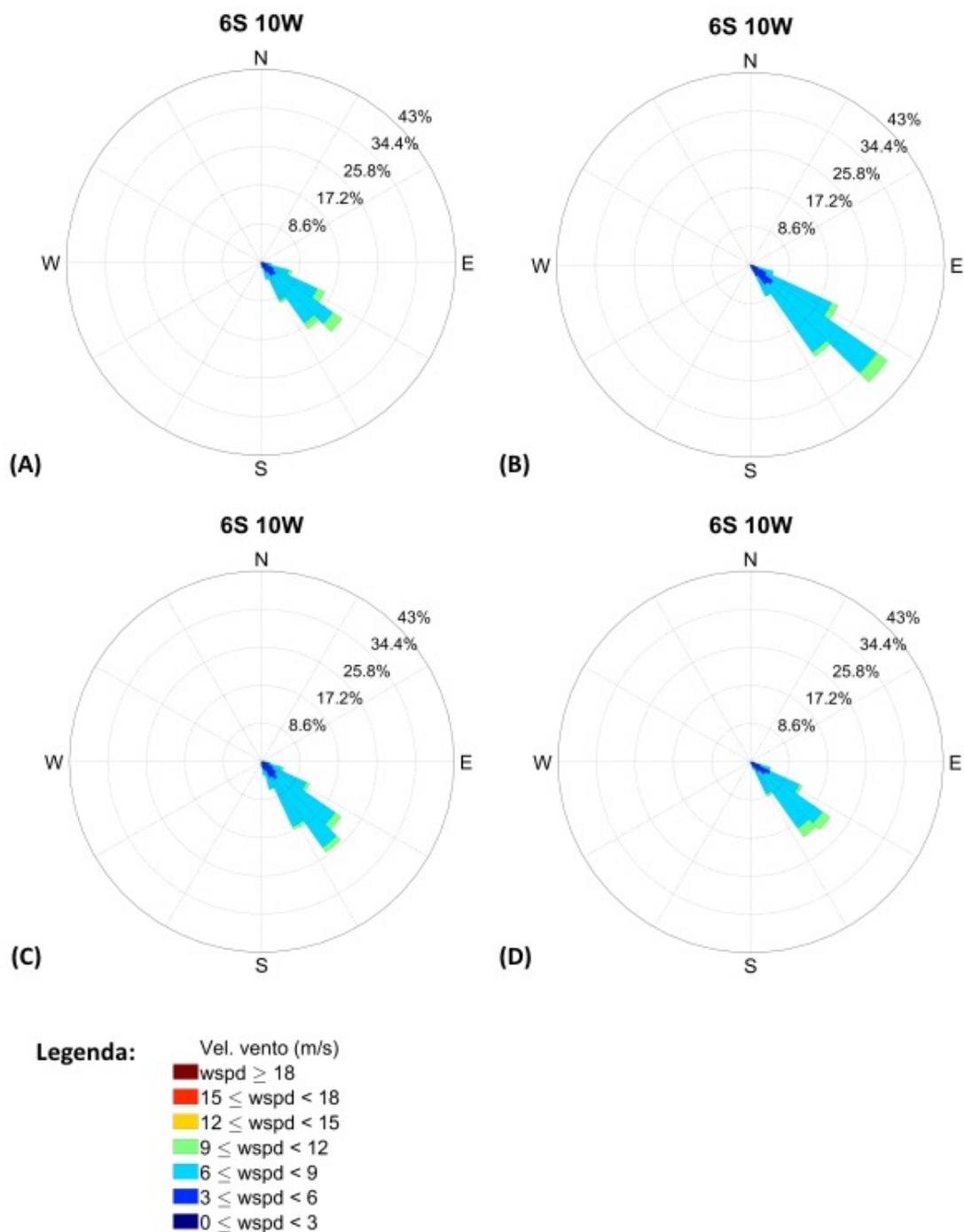


Figura 14 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento das boias PIRATA na posição 6S10W e os satélites QuikSCAT (esquerda) e ASCAT (direita). O ponto indicado como Ref se refere ao dado diário do satélite e os demais pontos coloridos a estatística da comparação com os dados da boia por hora do dia.

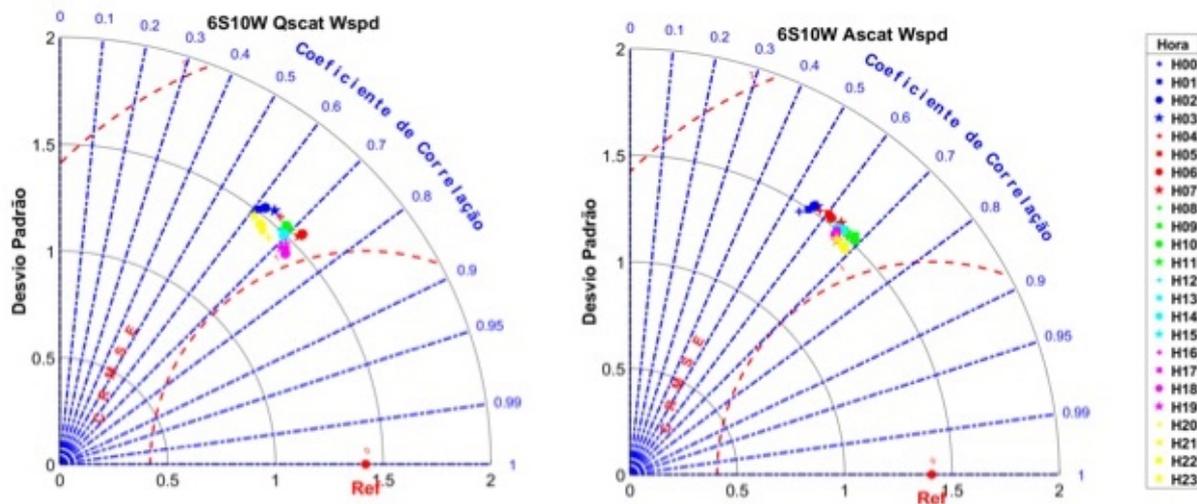


Figura 15 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e os satélites na posição 6S10W, de 1998 a 2009 (QuikSCAT) e 2009 a 2019 (ASCAT), em vermelho, e seus respectivos desvios padrões, em cinza.

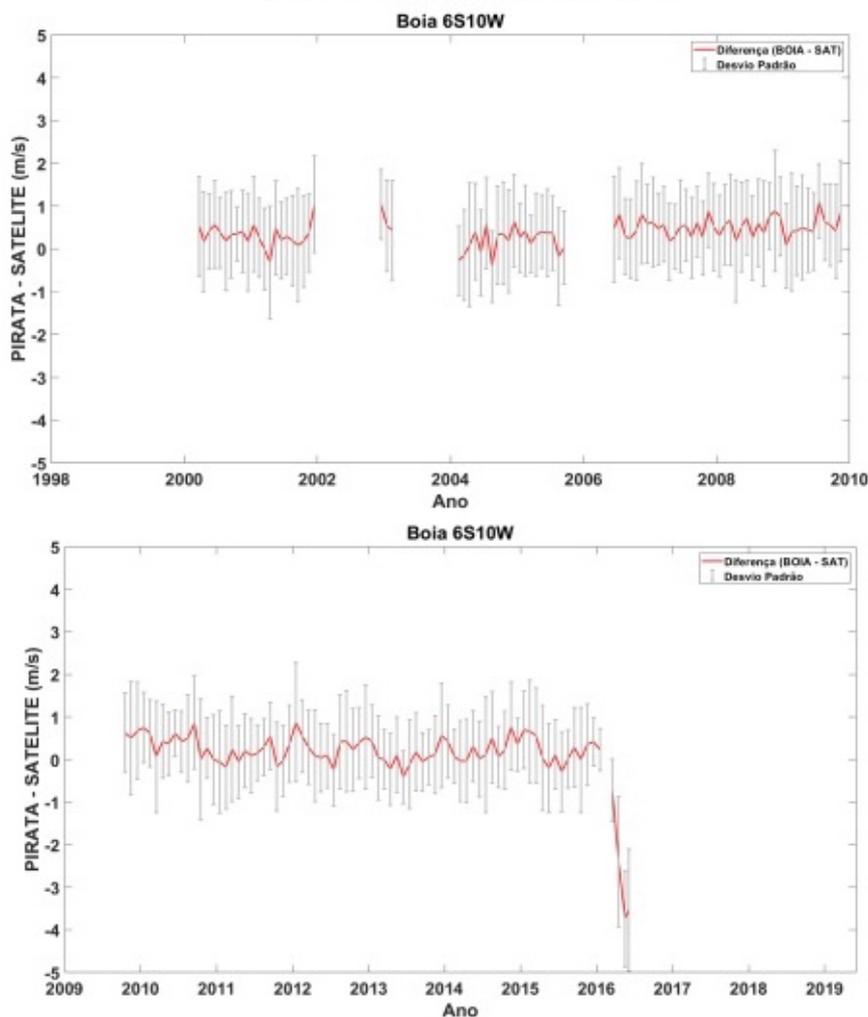


Figura 16 - Correlação (R), raiz do erro quadrático médio centralizado (CRMSE) e Desvio Padrão das variáveis do vento u, v e wspd, entre a boia PIRATA 6S10W e o ERA5 na mesma posição geográfica por hora do dia.

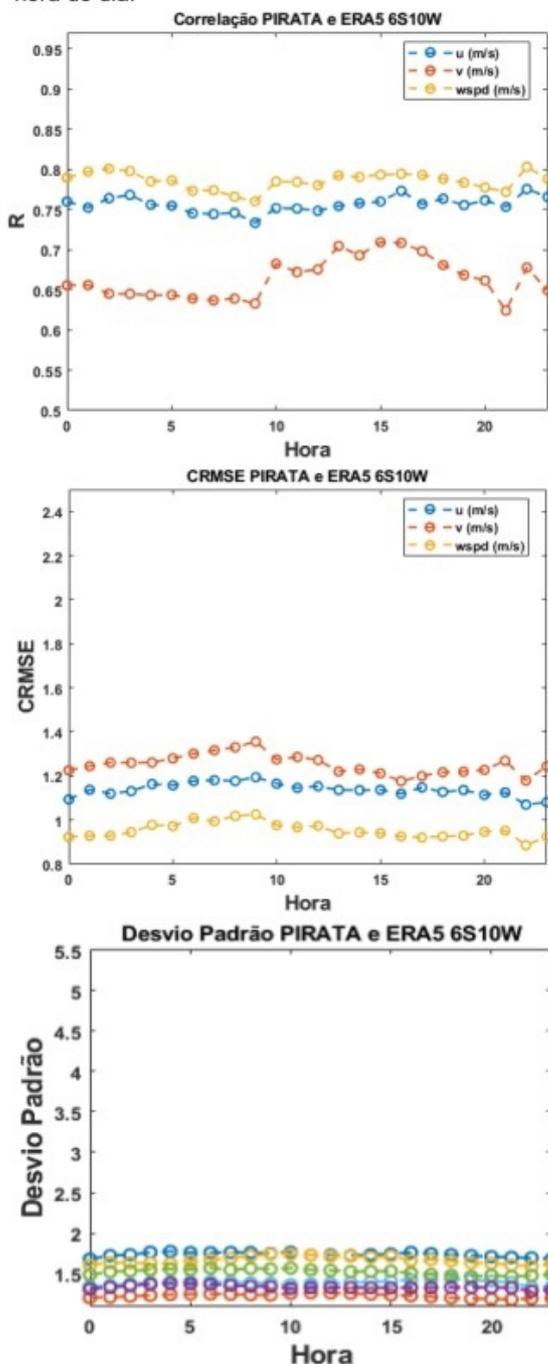


Figura 17 - Variação mensal das diferenças na velocidade do vento PIRATA – ERA5 e seus respectivos desvios padrão para a posição 6S10W.

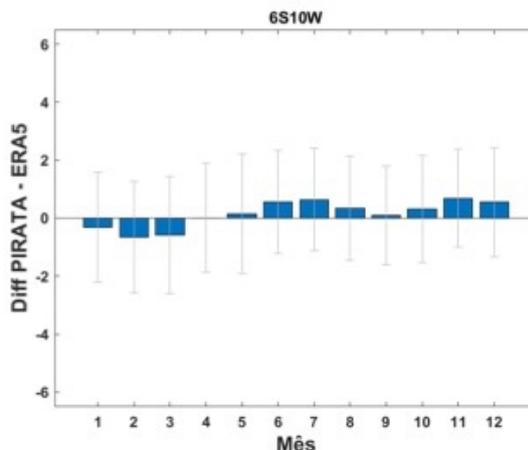


Figura 18 - Distribuição das diferenças de velocidade do vento entre o PIRATA – ERA5 em uma estimativa da função de densidade de probabilidade (em inglês, PDF - Probability density function estimate), onde a área de cada barra é o número relativo de observações. A linha azul representa o valor mais recorrente; caso esse valor fosse negativo, a linha seria vermelha.

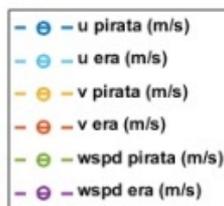
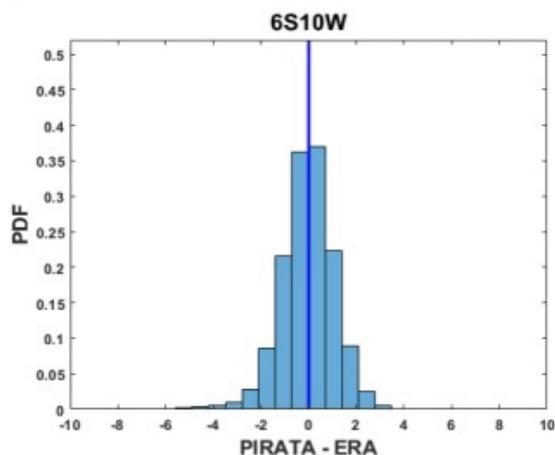


Figura I9 - *Scree plot* da posição 6S10W, utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no primeiro e segundo modelos de PCA propostos, respectivamente. O limite do critério do autovalor médio é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.

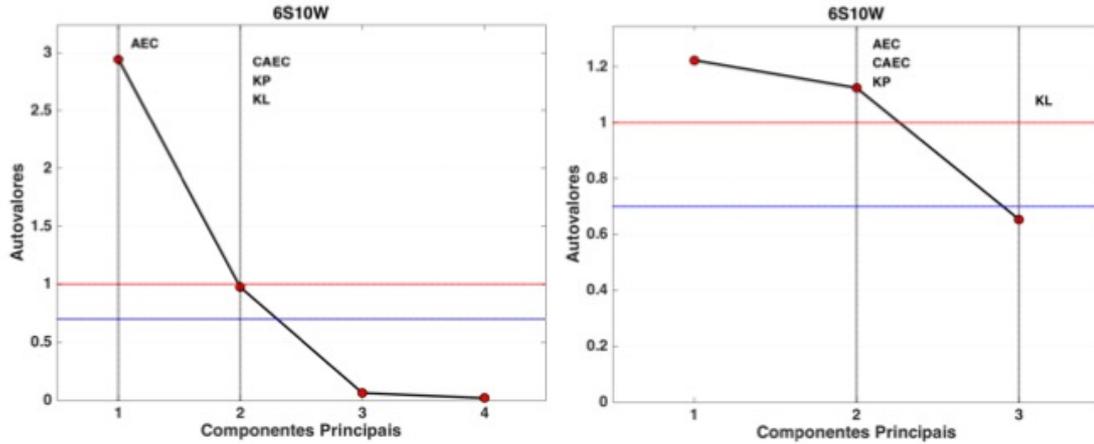


Figura I10 - *Score Plot* para o primeiro e segundo modelo, respectivamente, de PCA propostos da posição 6S10W. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. Os pontos representam as coordenadas de uma determinada amostra no espaço e seus relacionamentos, e a escala de cinza o nível de resposta da mesma.

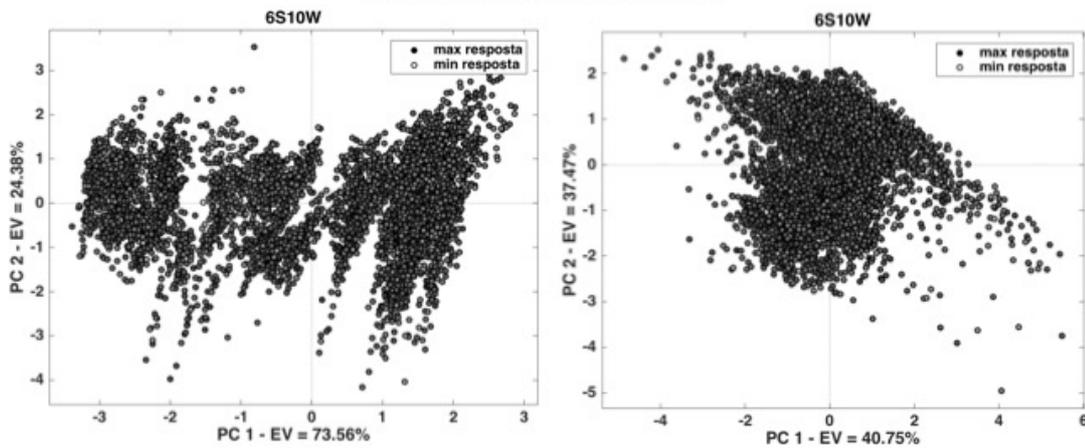
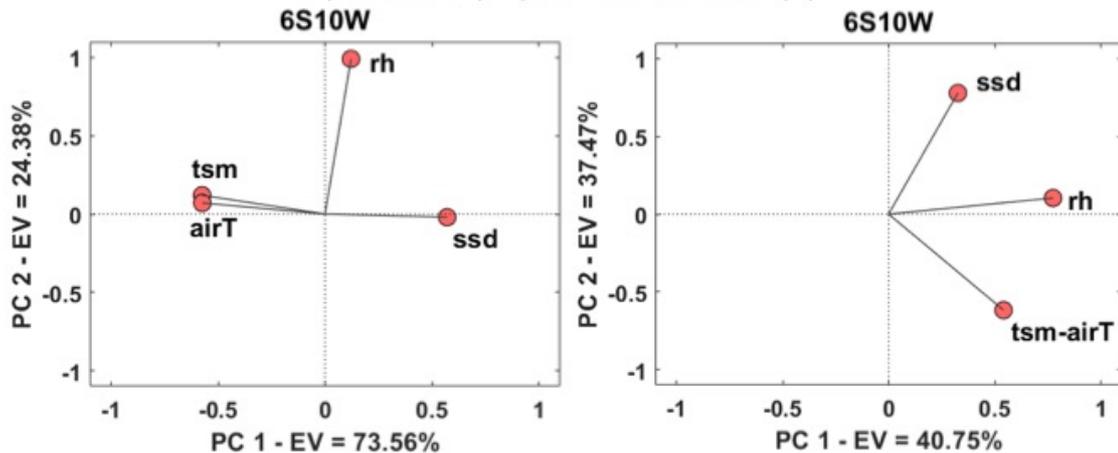


Figura I11 - *Loading Plot* da posição 6S10W para o primeiro e segundo modelo de PCA propostos, respectivamente. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. As variáveis utilizadas nesses modelos são: temperatura da superfície do mar (TSM), densidade ao nível do mar (SSD), temperatura do ar (airT) e umidade relativa do ar (rh).



APÊNDICE JULIETT – RESUMO DA POSIÇÃO 8N38W

Figura J1 - Série temporal comparativa, do vento a 10 m, de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 8N 38W (A), do ASCAT e QuikSCAT (B) e do ERA5 (C), na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.

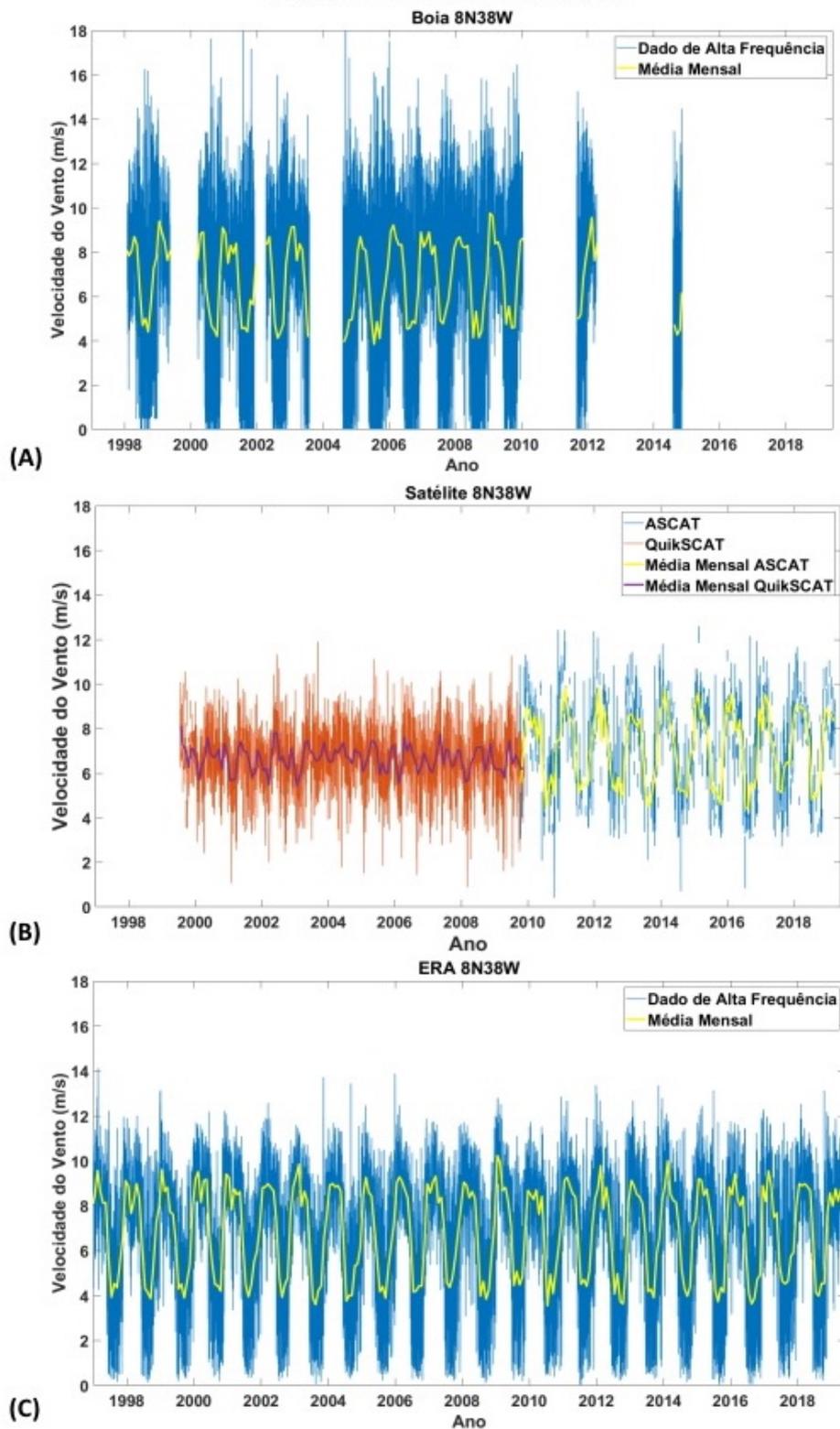
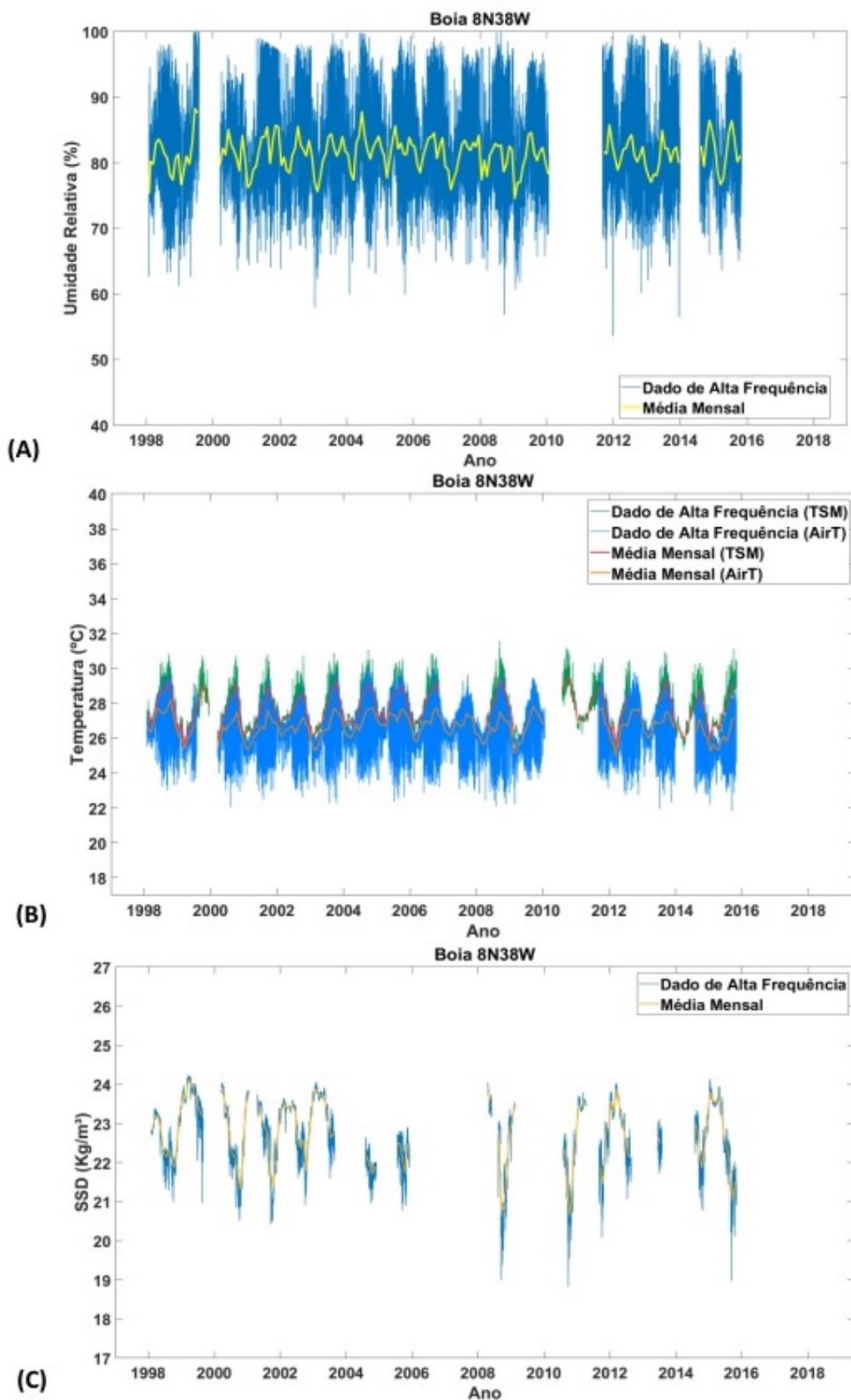


Figura J2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 8N 38W; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.



APÊNDICE KILO – RESUMO DA POSIÇÃO 8S30W

Figura K1 - Série temporal comparativa, do vento a 10 m, de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 8S 30W (A), do ASCAT e QuikSCAT (B) e do ERA5 (C), na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.

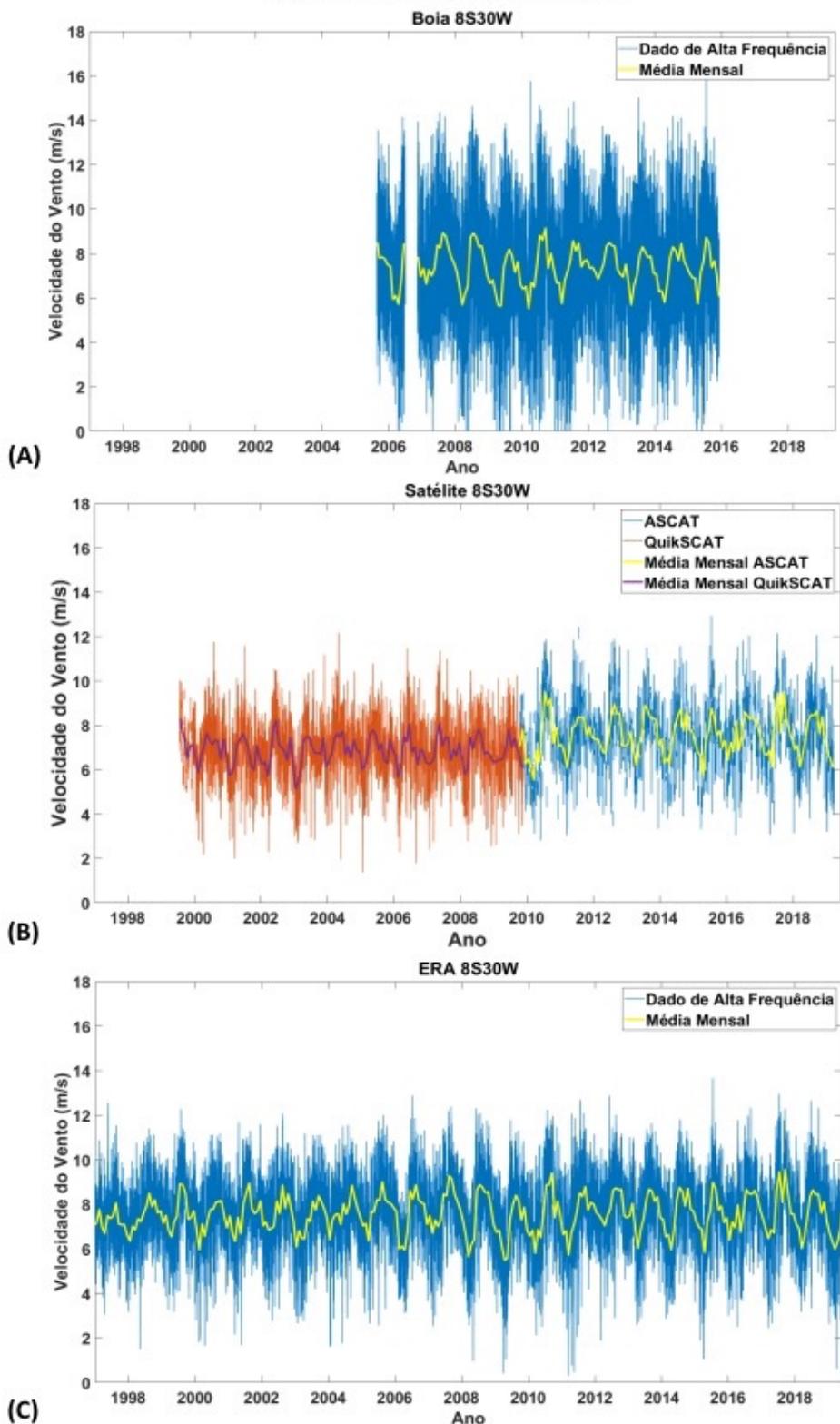


Figura K2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 8S 30W; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.

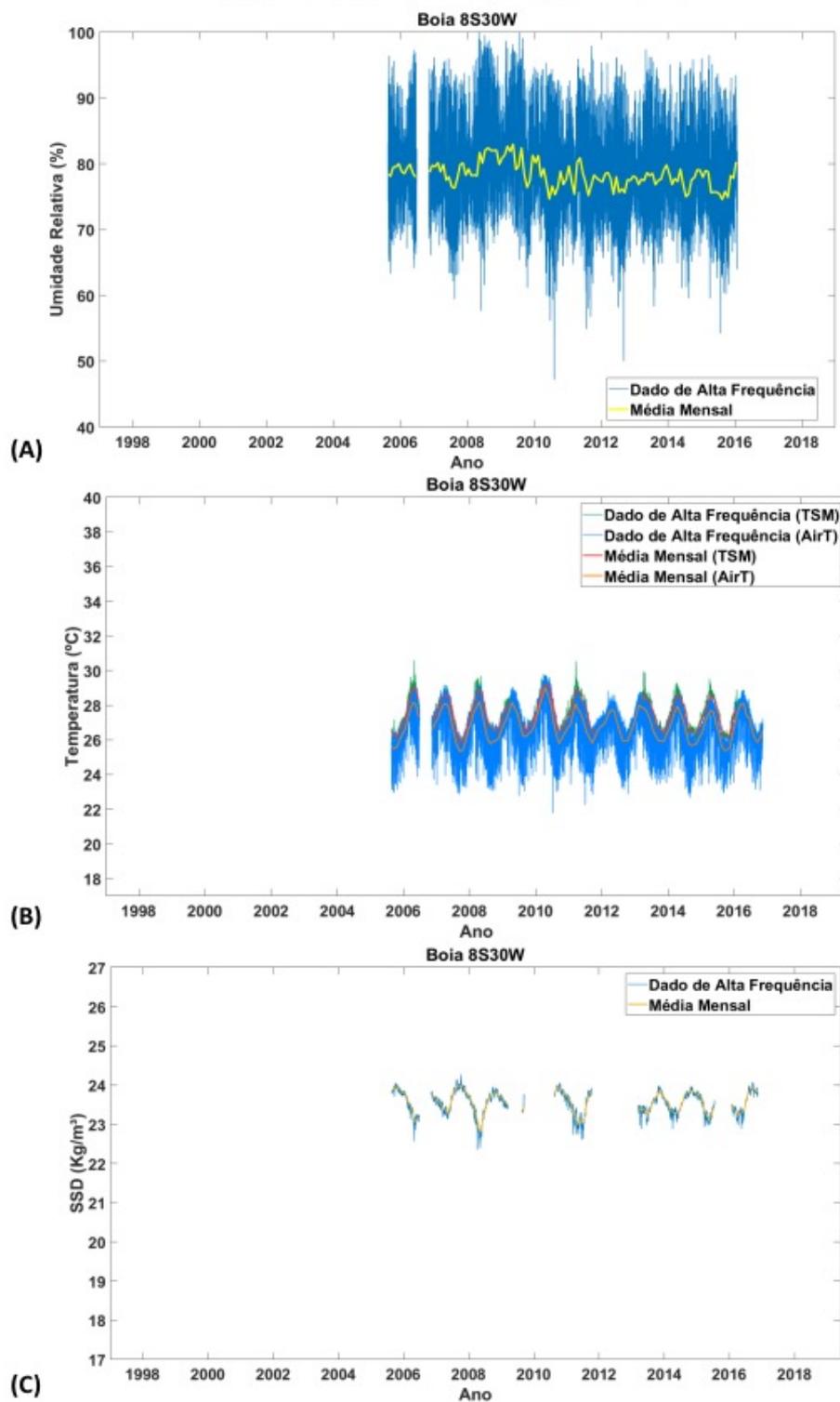


Figura K3 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento na posição 8S 30W (A) da boia do projeto PIRATA, (B) do ERA5 (a partir de 1997), (C) do QuikSCAT (de 1999 a 2009) e (D) do ASCAT (de 2007-presente).

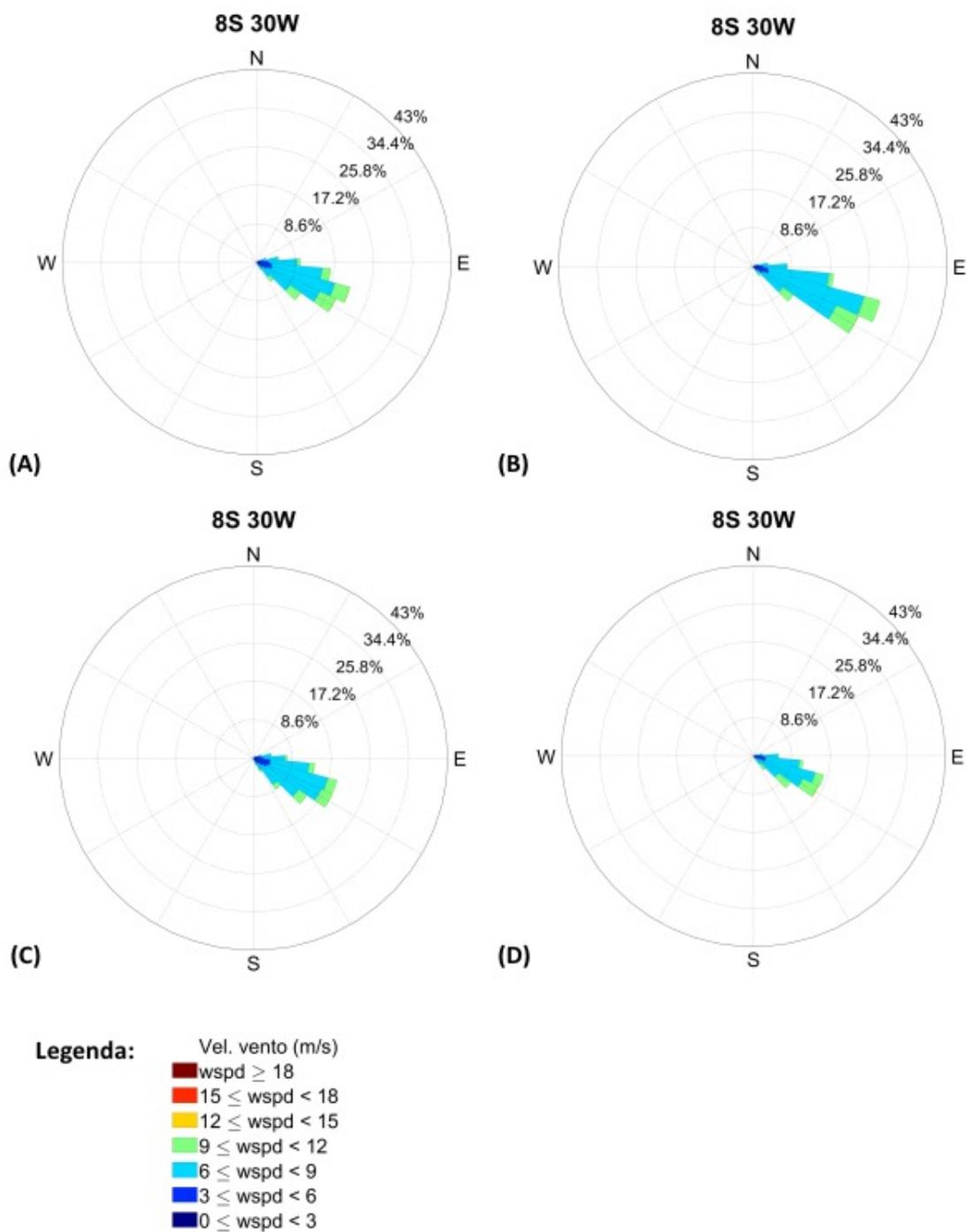


Figura K4 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento das boias PIRATA na posição 8S30W e os satélites QuikSCAT (esquerda) e ASCAT (direita). O ponto indicado como Ref se refere ao dado diário do satélite e os demais pontos coloridos a estatística da comparação com os dados da boia por hora do dia.

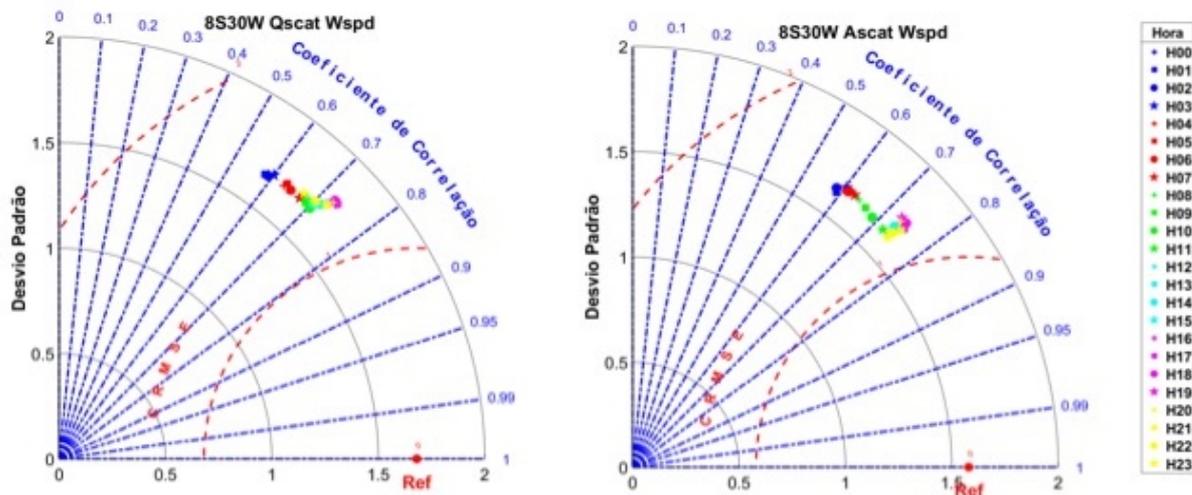


Figura K5 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e os satélites na posição 8S30W, de 1998 a 2009 (QuikSCAT) e 2009 a 2019 (ASCAT), em vermelho, e seus respectivos desvios padrão, em cinza.

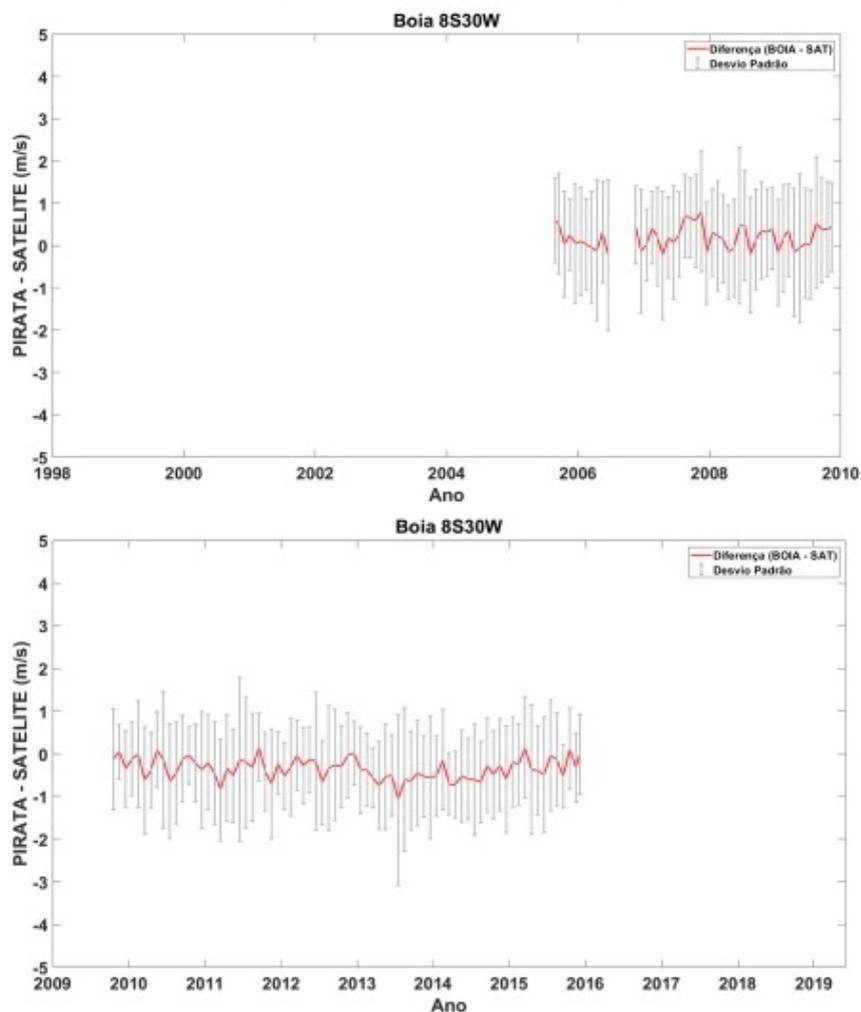


Figura K6 - Correlação (R), raiz do erro quadrático médio centralizado (CRMSE) e Desvio Padrão das variáveis do vento u, v e wspd, entre a boia PIRATA 8S30W e o ERA5 na mesma posição geográfica por hora do dia.

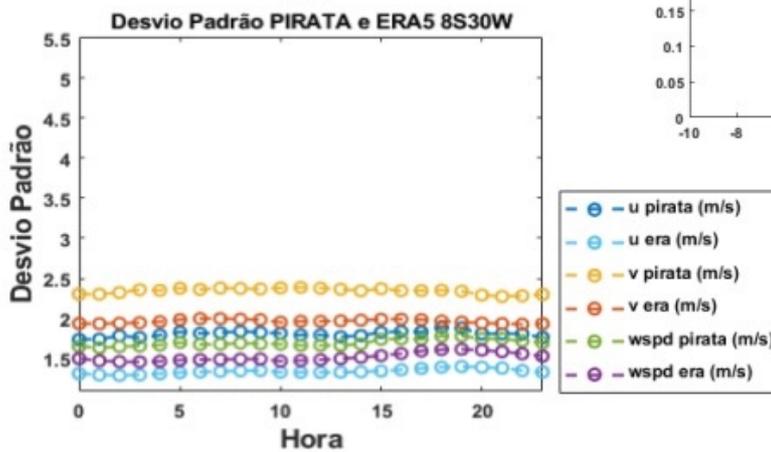
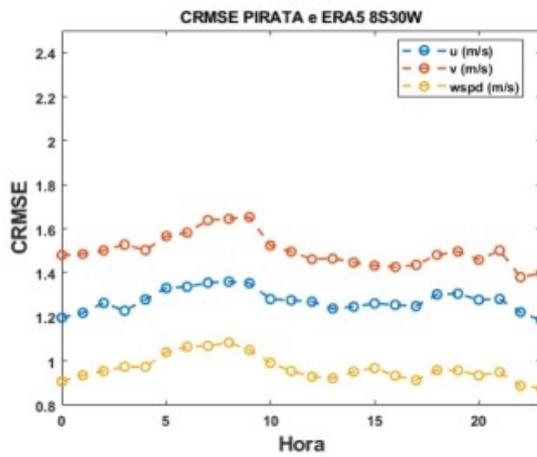
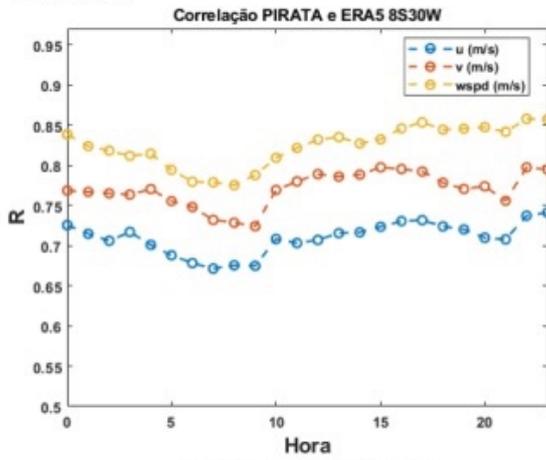


Figura K7 - Variação mensal das diferenças na velocidade do vento PIRATA – ERA5 e seus respectivos desvios padrão para a posição 8S30W.

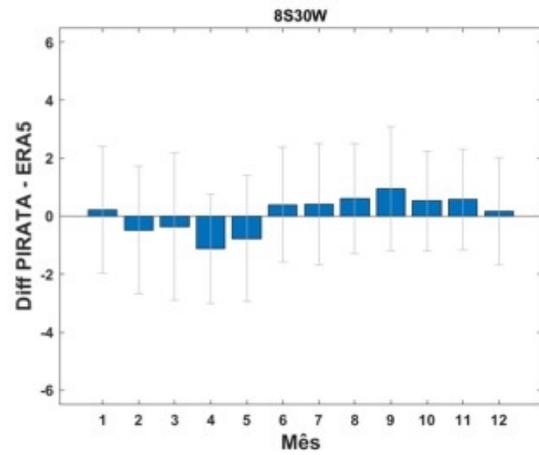


Figura K8 - Distribuição das diferenças de velocidade do vento entre o PIRATA – ERA5 em uma estimativa da função de densidade de probabilidade (em inglês, PDF - Probability density function estimate), onde a área de cada barra é o número relativo de observações. A linha vermelha representa o valor mais recorrente; caso esse valor fosse positivo, a linha seria azul.

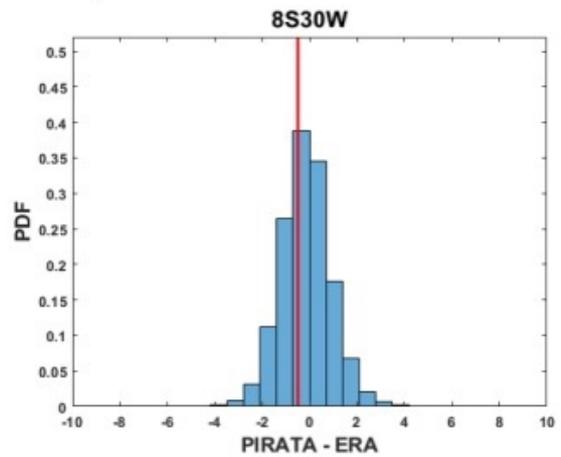


Figura K9 - Scree plot da posição 8S30W, utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no primeiro e segundo modelos de PCA propostos, respectivamente. O limite do critério do autovalor médio é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.

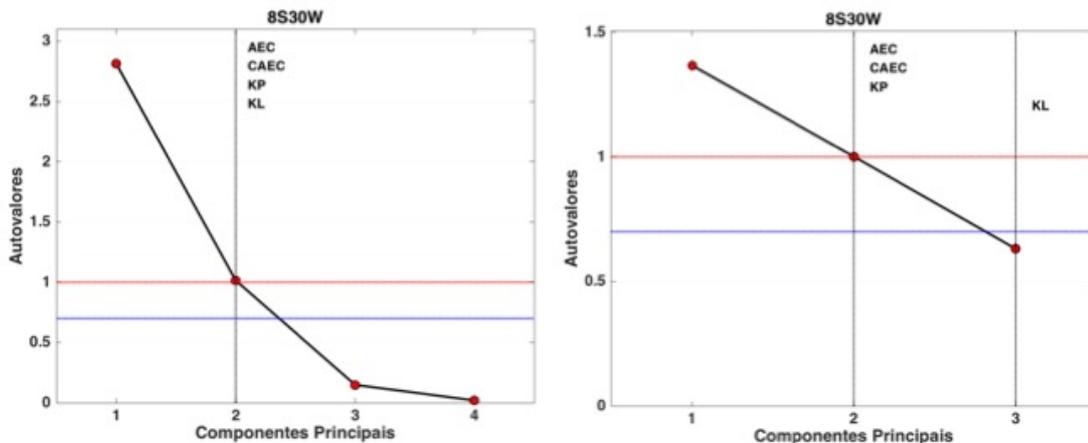


Figura K10 - Score Plot para o primeiro e segundo modelo, respectivamente, de PCA propostos da posição 8S30W. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. Os pontos representam as coordenadas de uma determinada amostra no espaço e seus relacionamentos, e a escala de cinza o nível de resposta da mesma.

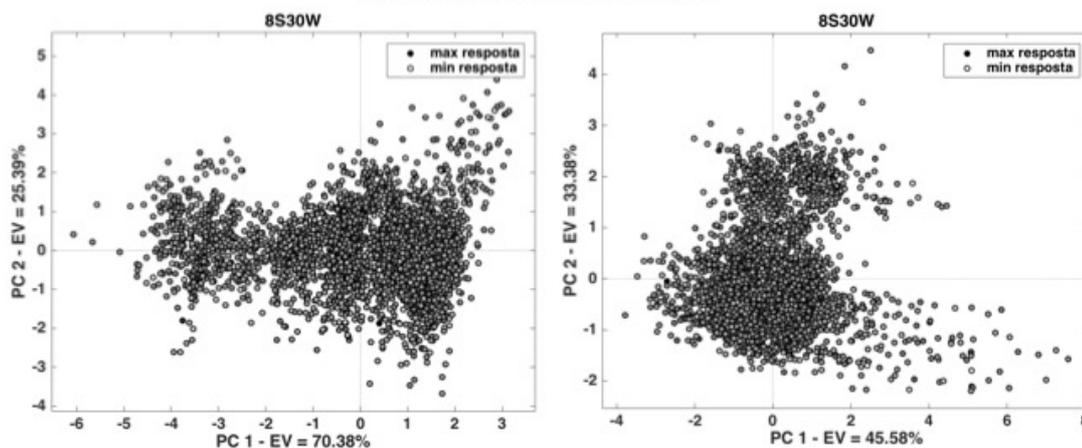
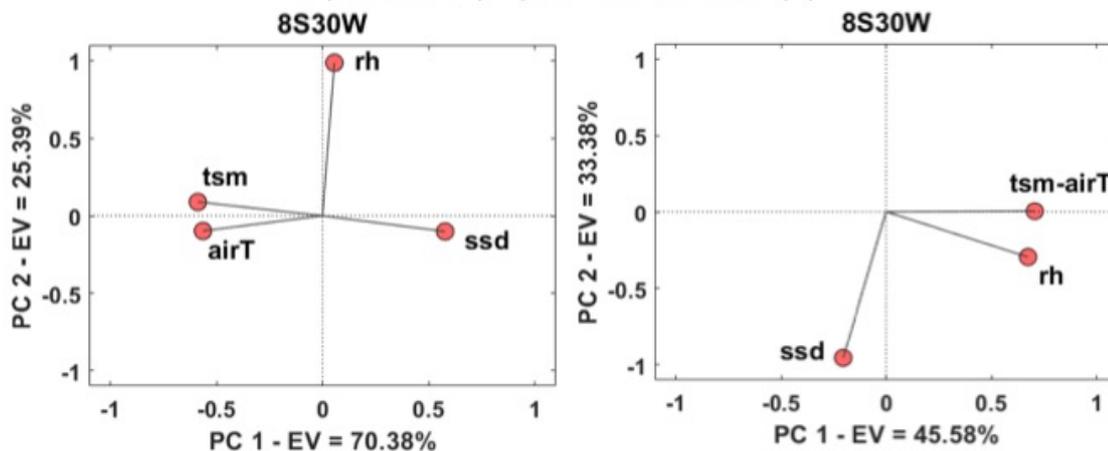


Figura K11 - Loading Plot da posição 8S30W para o primeiro e segundo modelo de PCA propostos, respectivamente. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. As variáveis utilizadas nesses modelos são: temperatura da superfície do mar (TSM), densidade ao nível do mar (SSD), temperatura do ar (airT) e umidade relativa do ar (rh).



APÊNDICE LIMA – RESUMO DA POSIÇÃO 10S10W

Figura L1 - Série temporal comparativa, do vento a 10 m, de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 10S 10W (A), do ASCAT e QuikSCAT (B) e do ERA5 (C), na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.

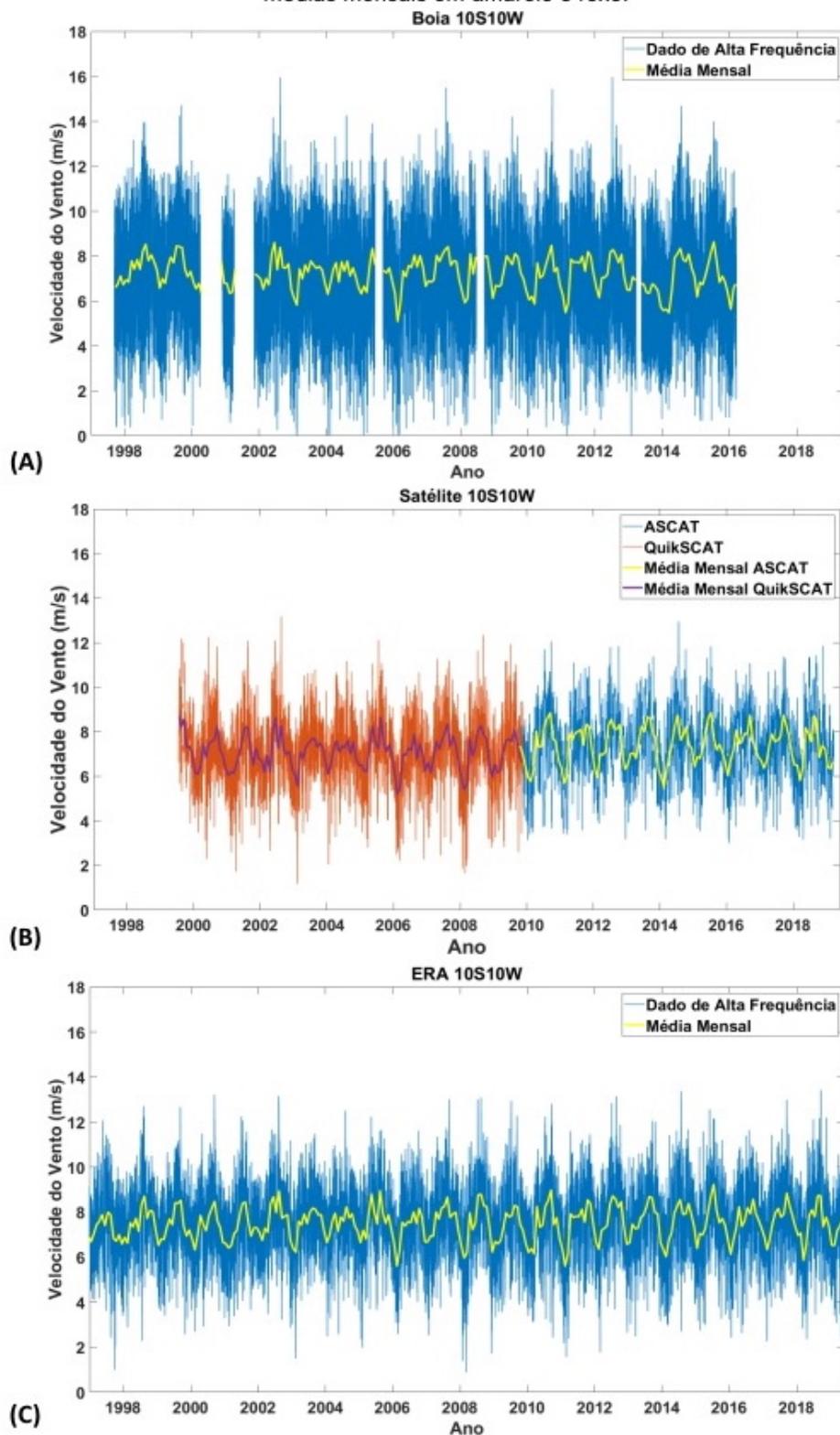
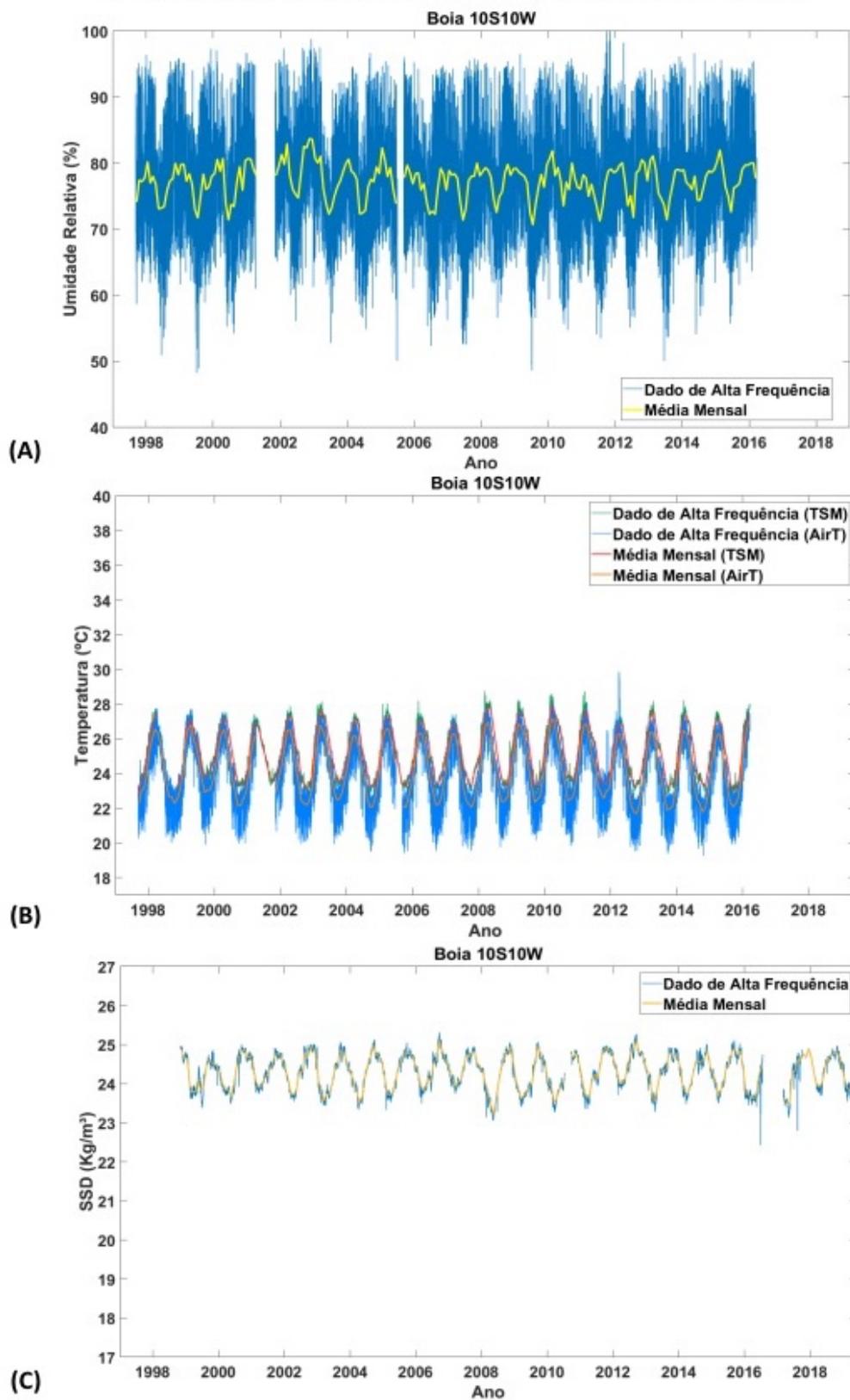


Figura L2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 10S 10W; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.



APÊNDICE MIKE – RESUMO DA POSIÇÃO 12N23W

Figura M1 - Série temporal comparativa, do vento a 10 m, de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 12N 23W (A), do ASCAT e QuikSCAT (B) e do ERA5 (C), na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.

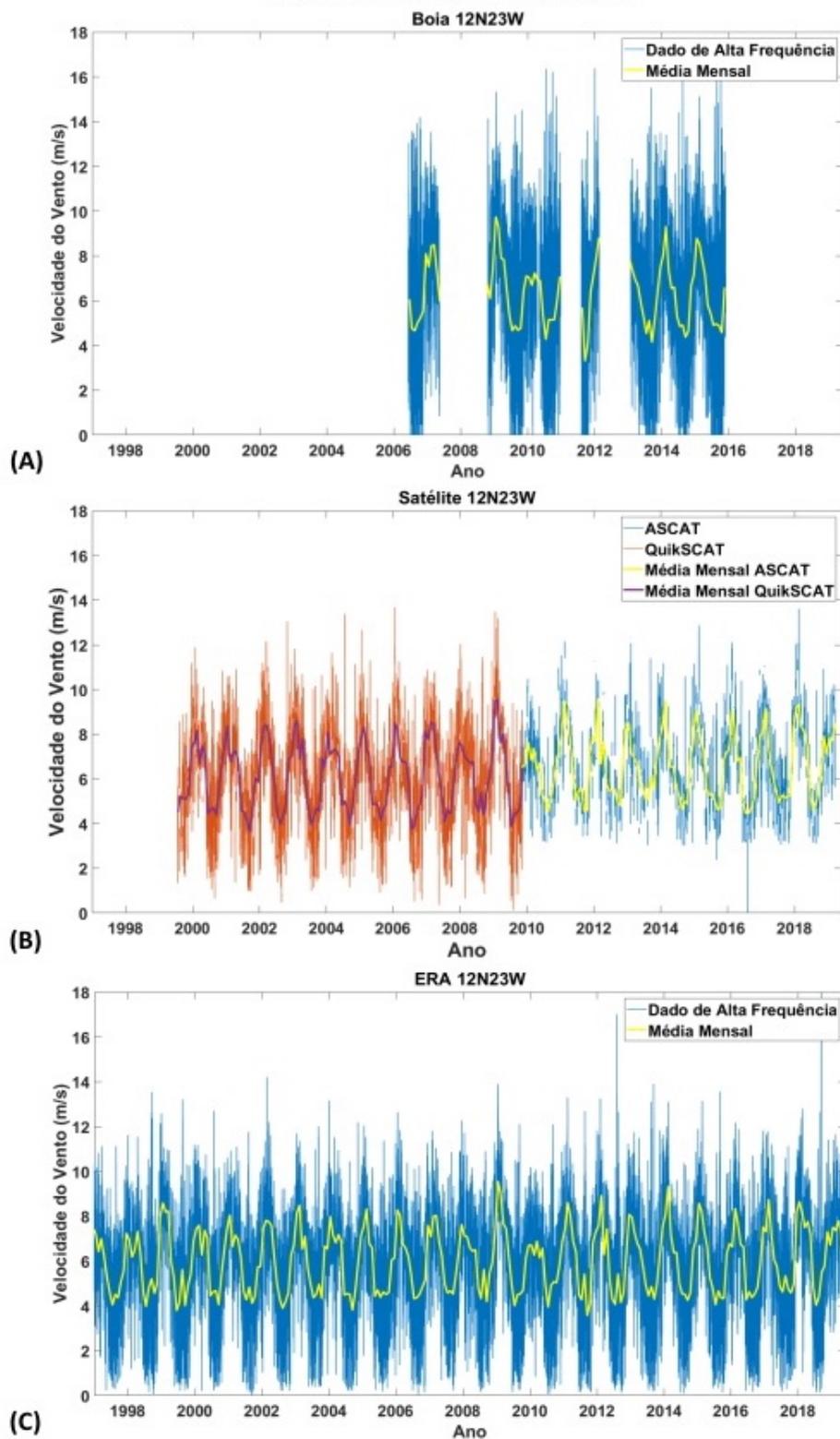


Figura M2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 12N 23W; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.

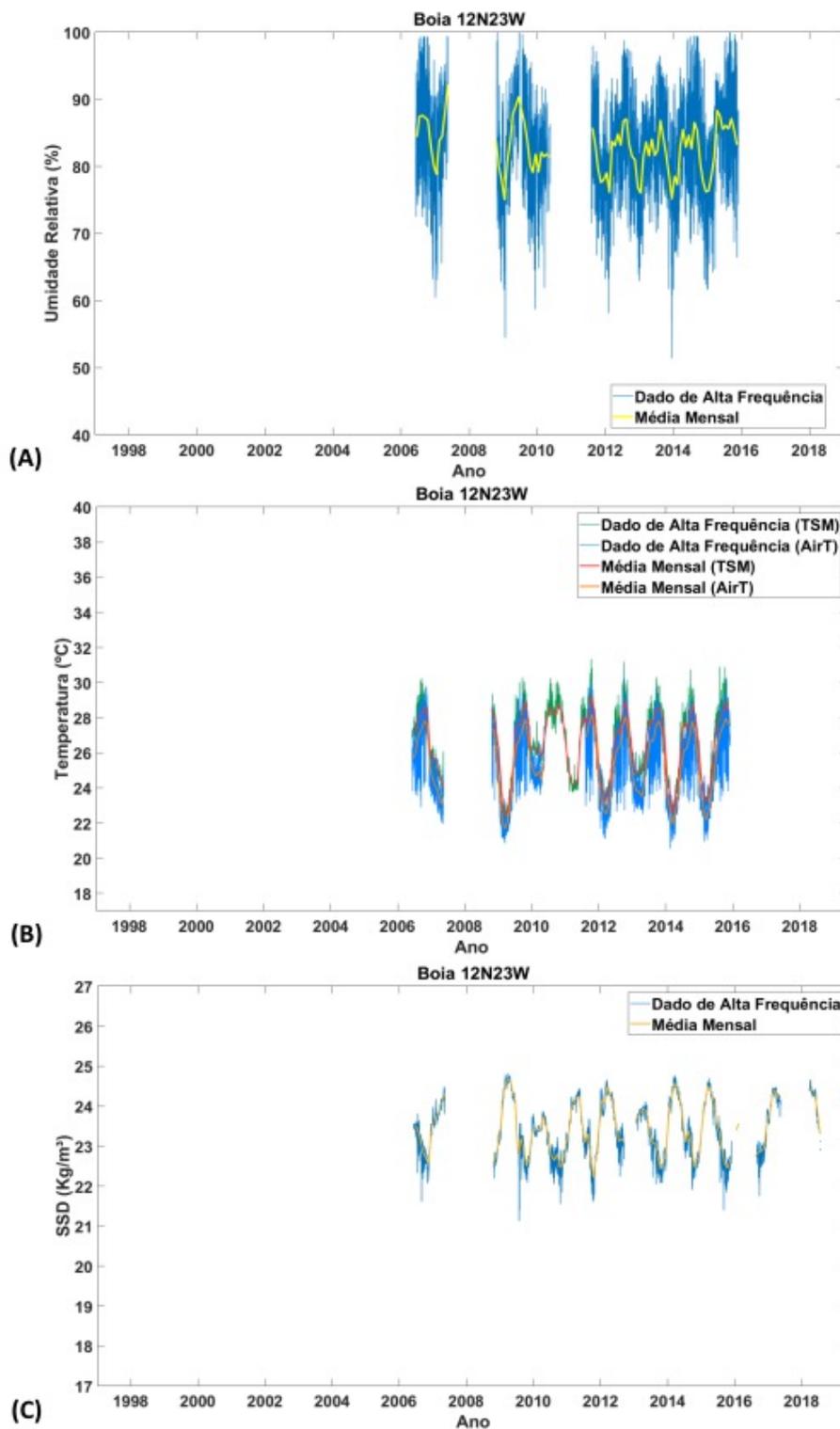


Figura M3 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento na posição 12N 23W (A) da boia do projeto PIRATA, (B) do ERA5 (a partir de 1997), (C) do QuikSCAT (de 1999 a 2009) e (D) do ASCAT (de 2007-presente).

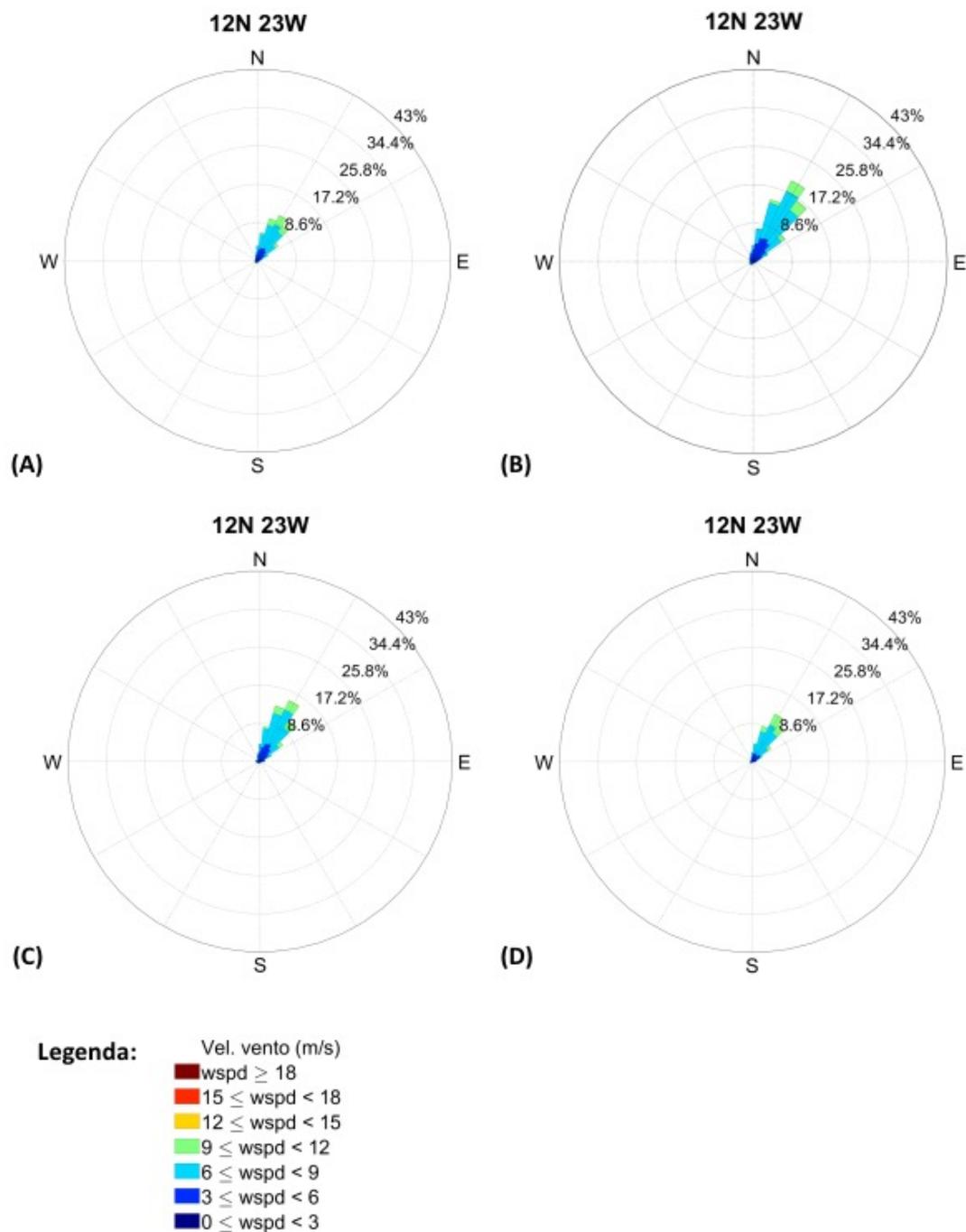


Figura M4 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento das boias PIRATA na posição 12N23W e os satélites QuikSCAT (esquerda) e ASCAT (direita). O ponto indicado como Ref se refere ao dado diário do satélite e os demais pontos coloridos a estatística da comparação com os dados da boia por hora do dia.

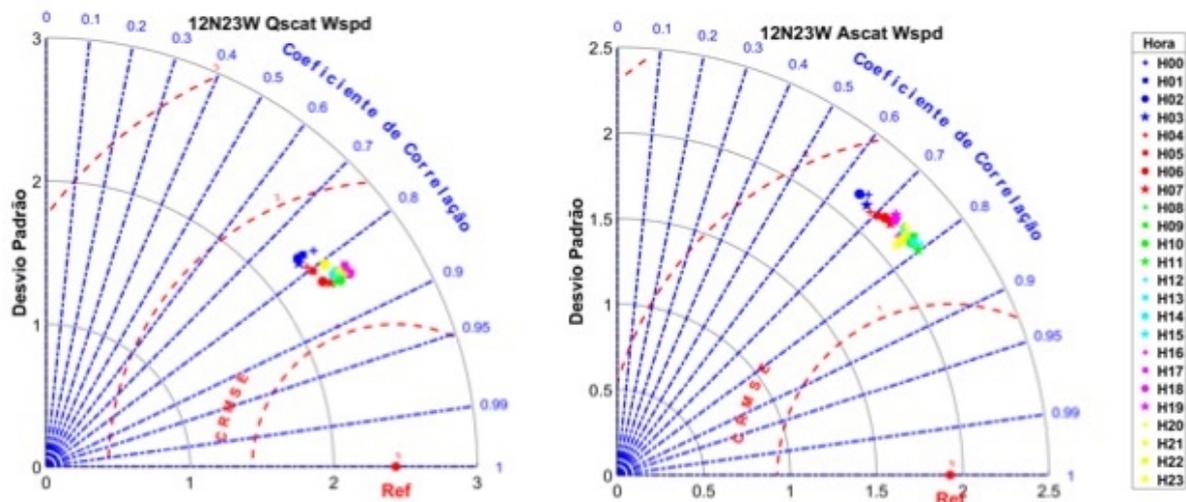


Figura M5 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e os satélites na posição 12N23W, de 1998 a 2009 (QuikSCAT) e 2009 a 2019 (ASCAT), em vermelho, e seus respectivos desvios padrão, em cinza.

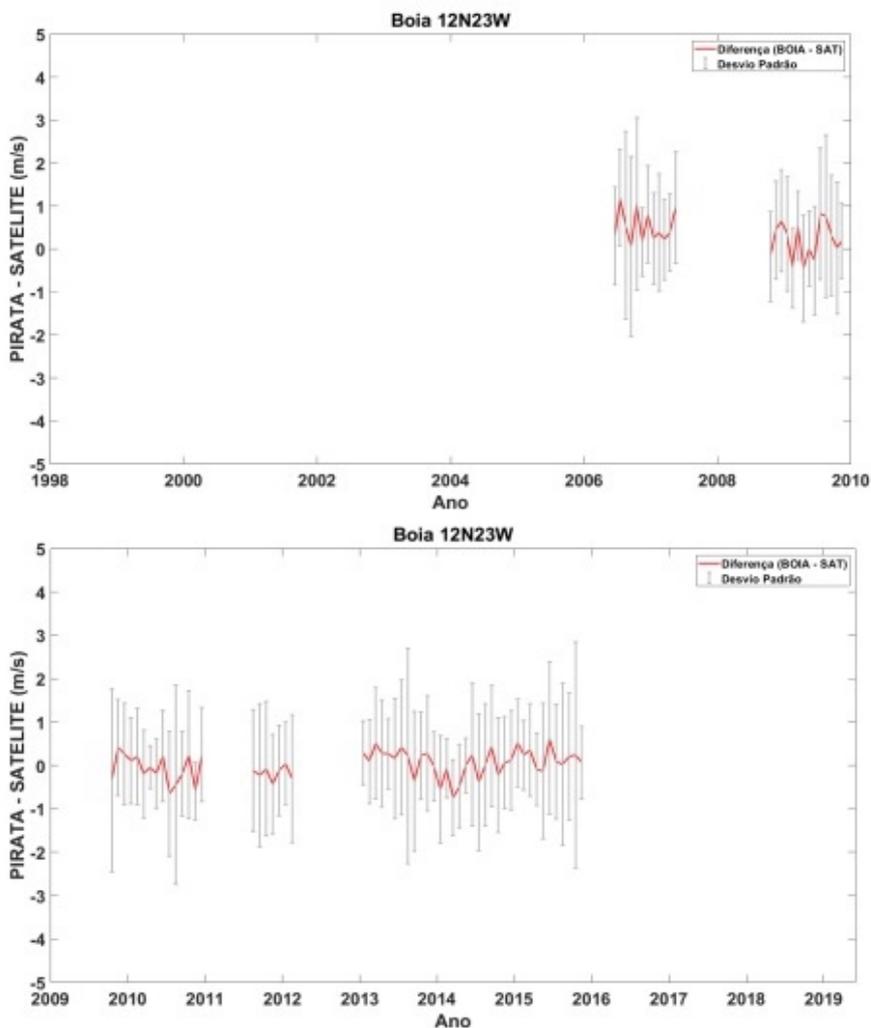


Figura M6 - Correlação (R), raiz do erro quadrático médio centralizado (CRMSE) e Desvio Padrão das variáveis do vento u, v e wspd, entre a boia PIRATA 12N23W e o ERA5 na mesma posição geográfica por hora do dia.

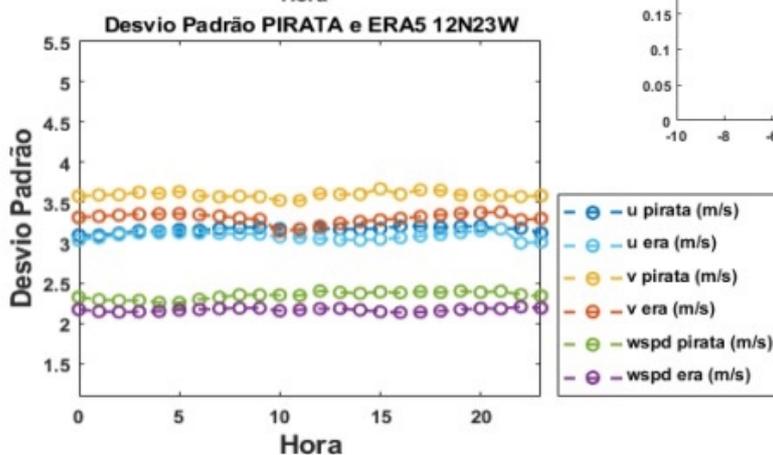
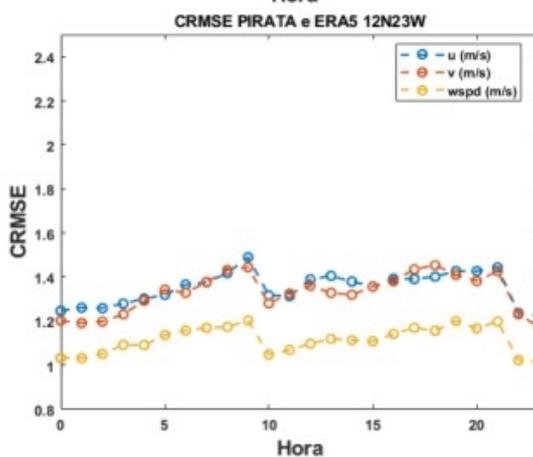
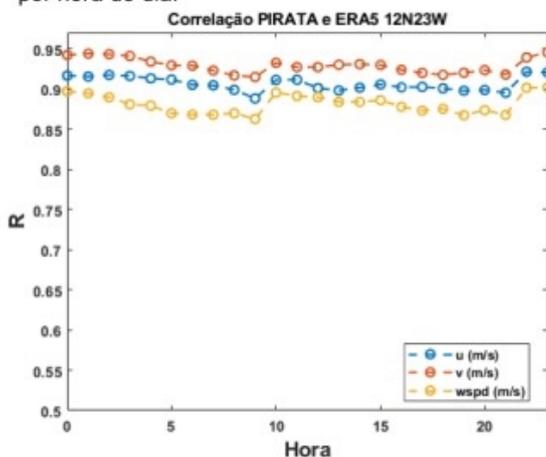


Figura M7 - Variação mensal das diferenças na velocidade do vento PIRATA – ERA5 e seus respectivos desvios padrões para a posição 12N23W.

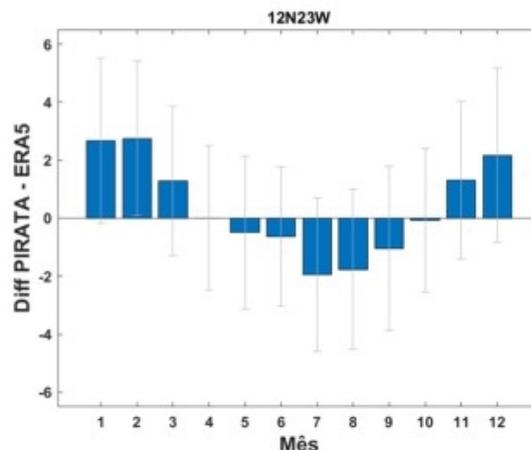


Figura M8 - Distribuição das diferenças de velocidade do vento entre o PIRATA – ERA5 em uma estimativa da função de densidade de probabilidade (em inglês, PDF - Probability density function estimate), onde a área de cada barra é o número relativo de observações. A linha azul representa o valor mais recorrente; caso esse valor fosse negativo, a linha seria vermelha.

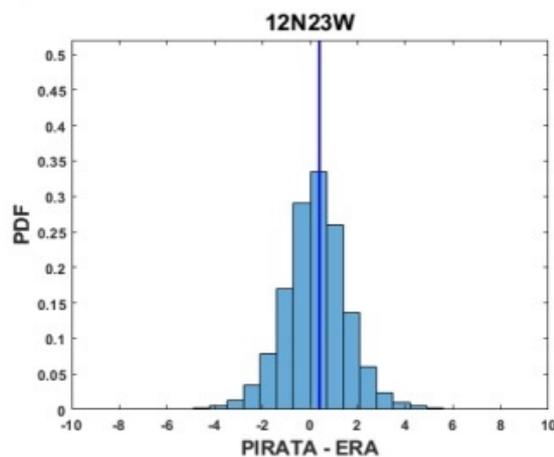


Figura M9 - *Scree plot* da posição 12N23W, utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no primeiro e segundo modelos de PCA propostos, respectivamente. O limite do critério do autovalor médio é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.

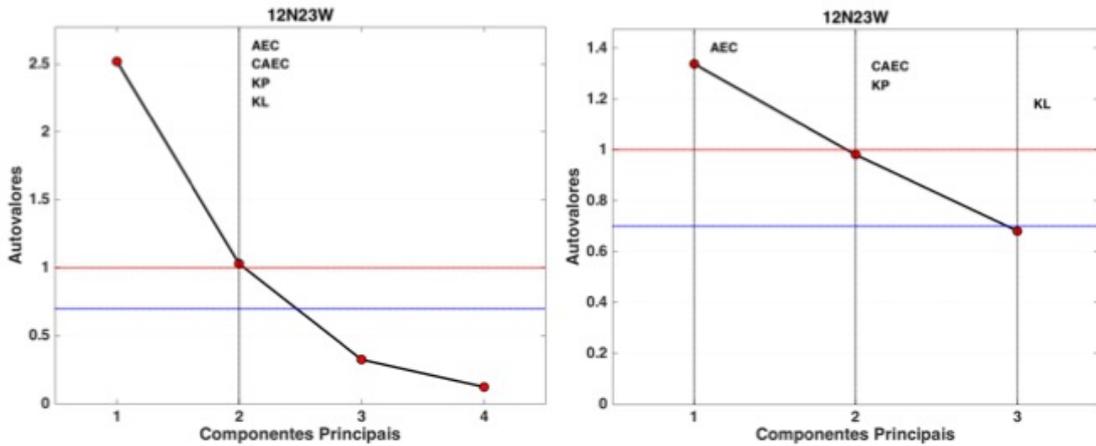


Figura M10 - *Score Plot* para o primeiro e segundo modelo, respectivamente, de PCA propostos da posição 12N23W. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. Os pontos representam as coordenadas de uma determinada amostra no espaço e seus relacionamentos, e a escala de cinza o nível de resposta da mesma.

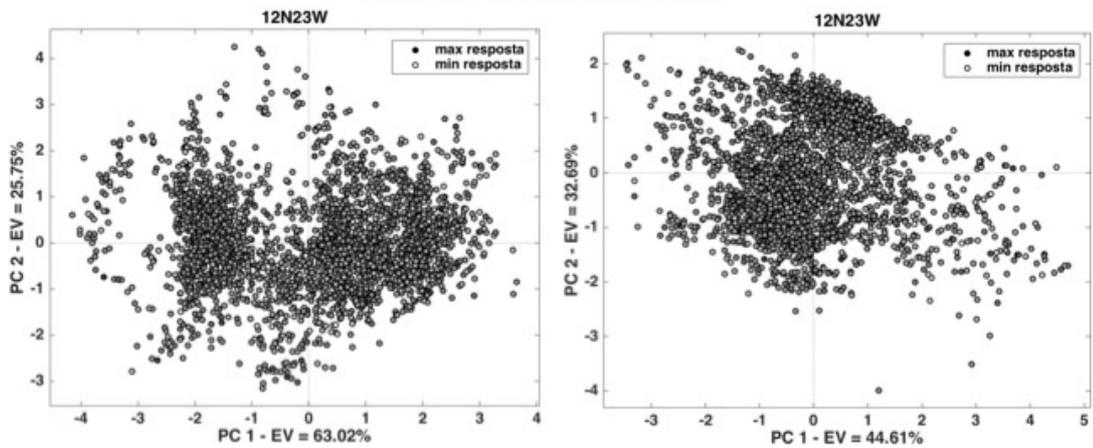
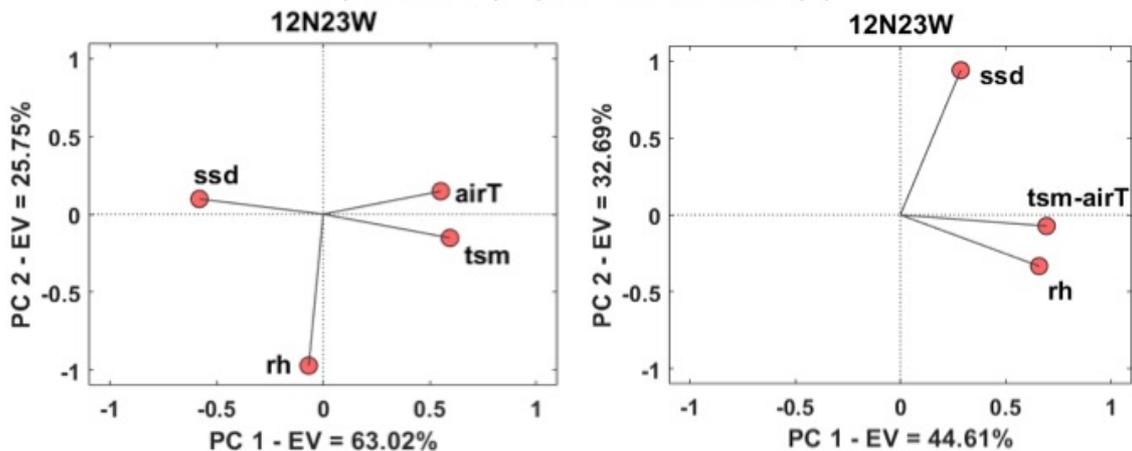


Figura M11 - *Loading Plot* da posição 12N23W para o primeiro e segundo modelo de PCA propostos, respectivamente. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. As variáveis utilizadas nesses modelos são: temperatura da superfície do mar (TSM), densidade ao nível do mar (SSD), temperatura do ar (airT) e umidade relativa do ar (rh).



APÊNDICE NOVEMBER – RESUMO DA POSIÇÃO 12N38W

Figura N1 - Série temporal comparativa, do vento a 10 m, de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 12N 38W (A), do ASCAT e QuikSCAT (B) e do ERA5 (C), na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.

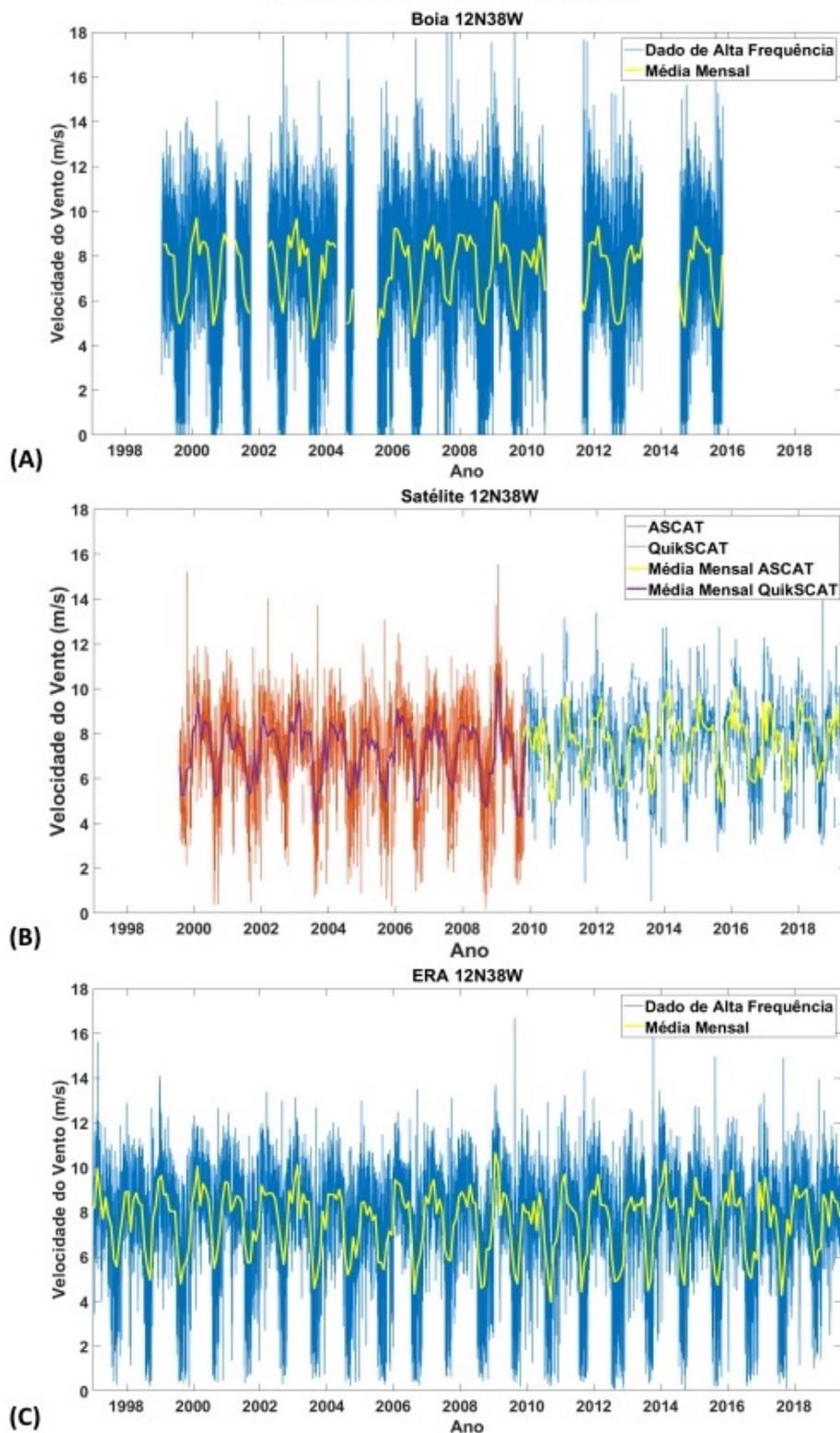


Figura N2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 12N 38W; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.

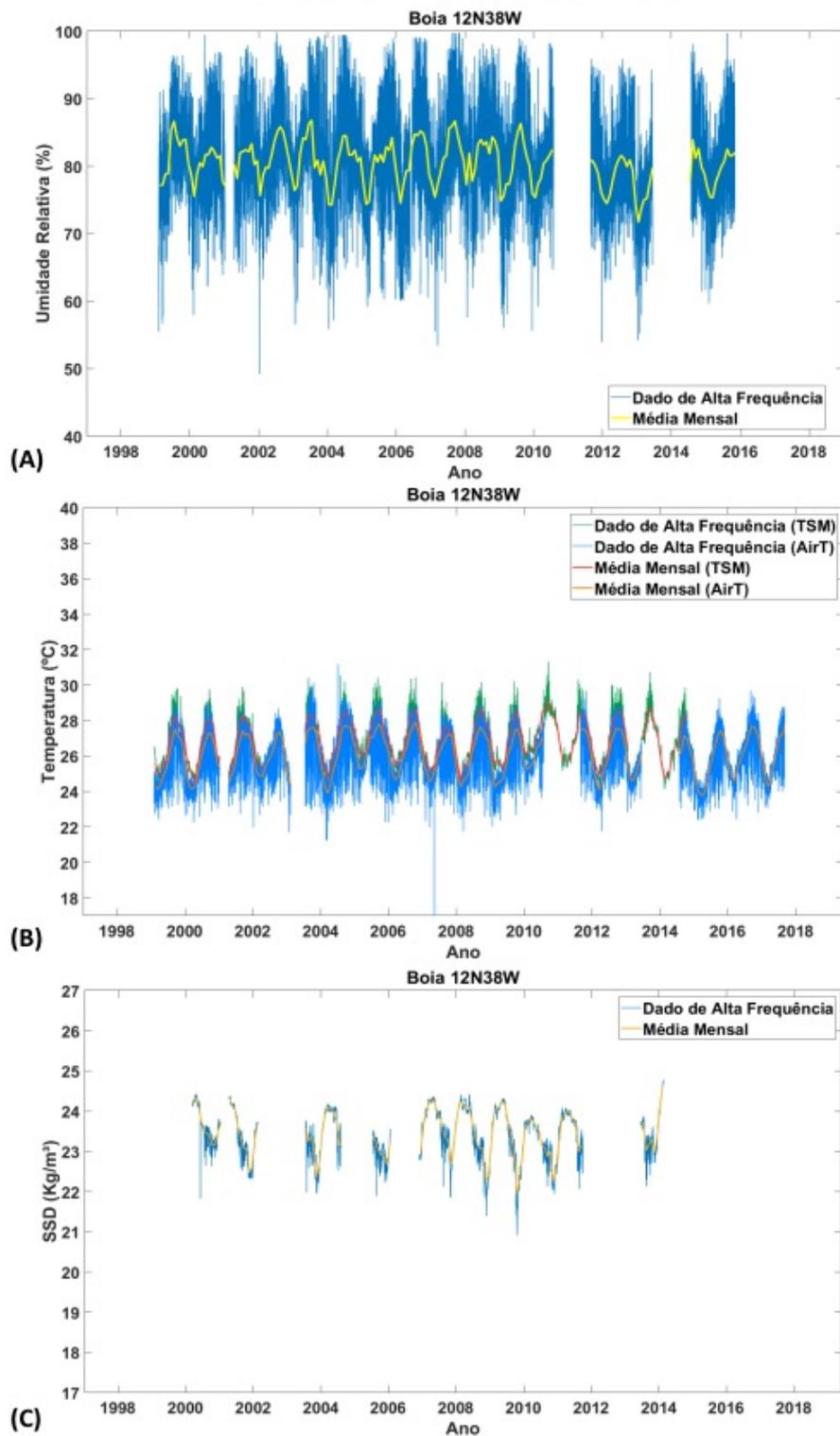


Figura N3 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento na posição 12N 38W (A) da boia do projeto PIRATA, (B) do ERA5 (a partir de 1997), (C) do QuikSCAT (de 1999 a 2009) e (D) do ASCAT (de 2007-presente).

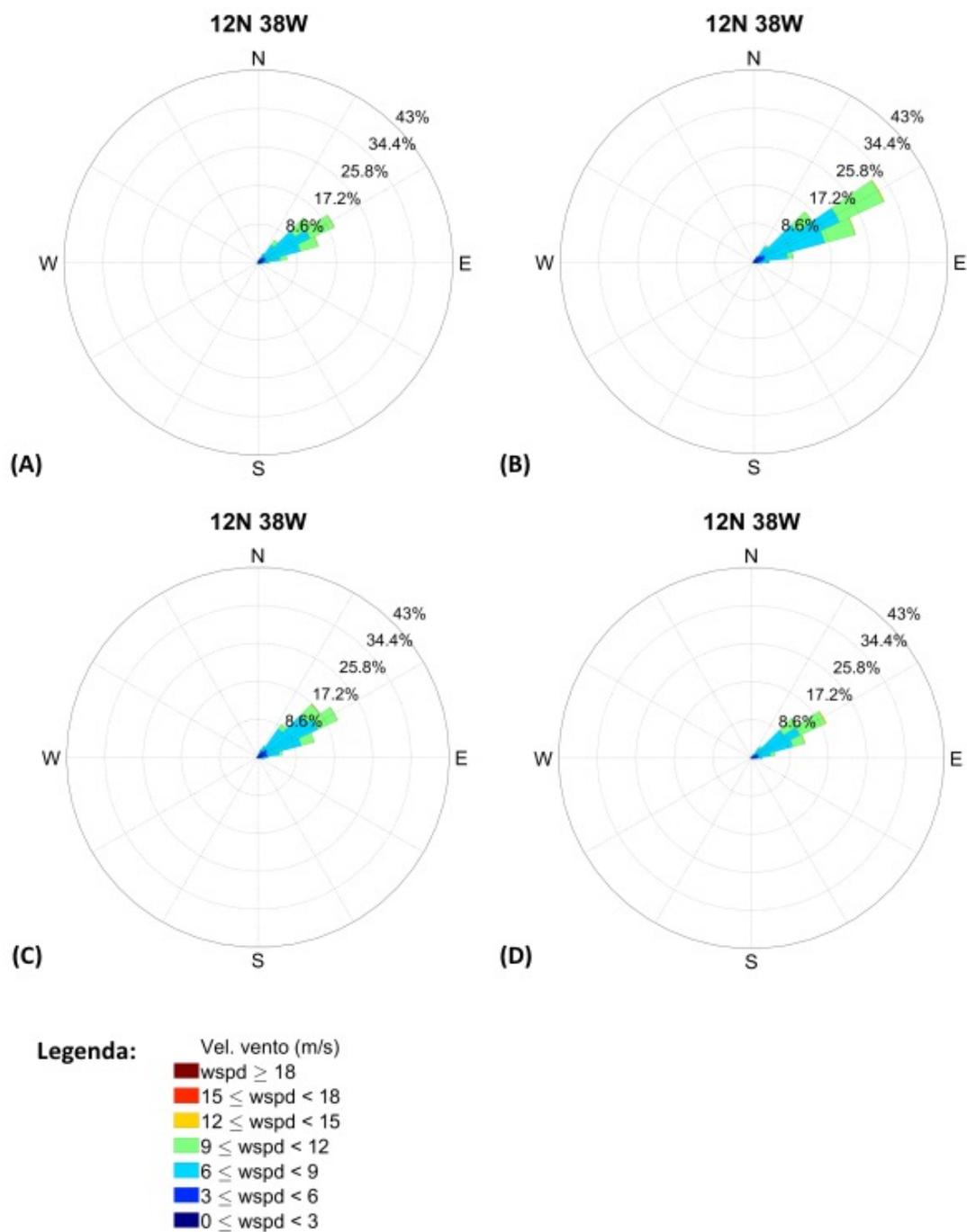


Figura N4 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento das boias PIRATA na posição 12N38W e os satélites QuikSCAT (esquerda) e ASCAT (direita). O ponto indicado como Ref se refere ao dado diário do satélite e os demais pontos coloridos a estatística da comparação com os dados da boia por hora do dia.

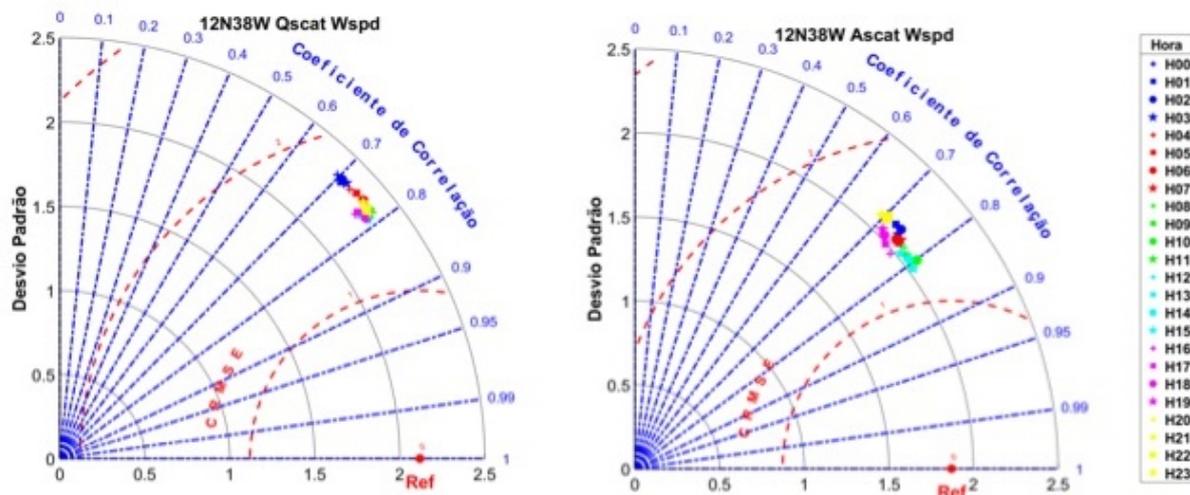


Figura N5 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e os satélites na posição 12N38W, de 1998 a 2009 (QuikSCAT) e 2009 a 2019 (ASCAT), em vermelho, e seus respectivos desvios padrão, em cinza.

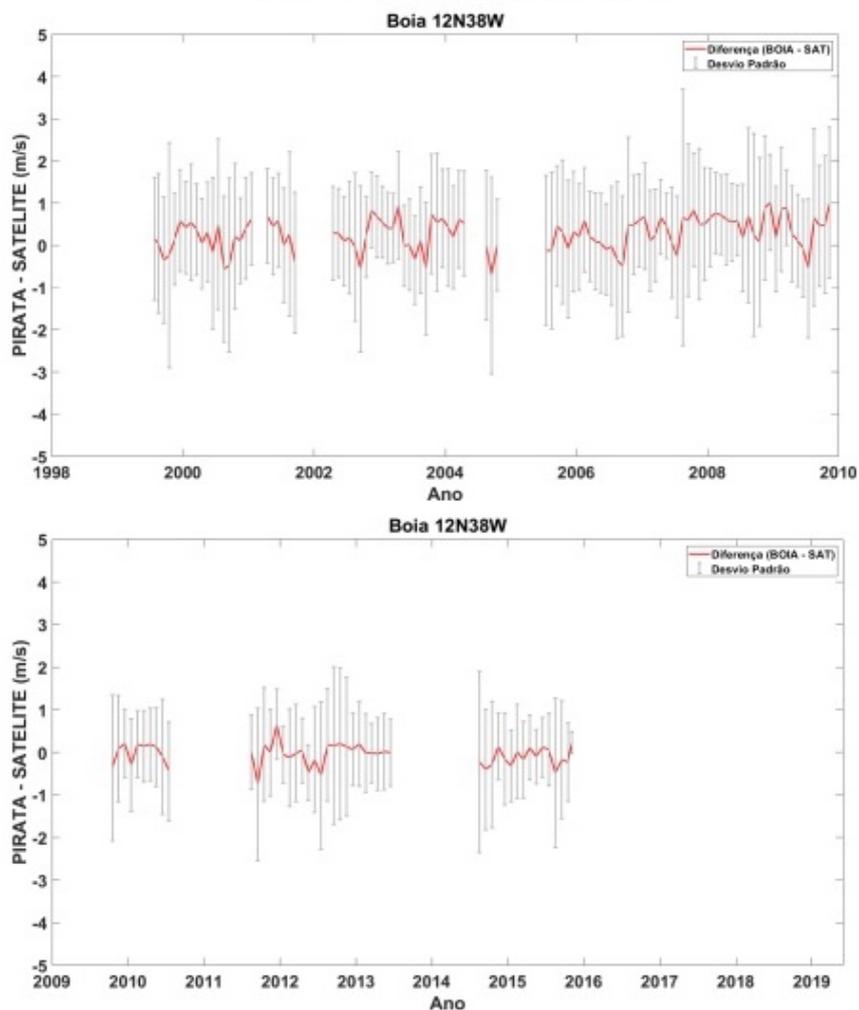


Figura N6 - Correlação (R), raiz do erro quadrático médio centralizado (CRMSE) e Desvio Padrão das variáveis do vento u, v e wspd, entre a boia PIRATA 12N38W e o ERA5 na mesma posição geográfica por hora do dia.

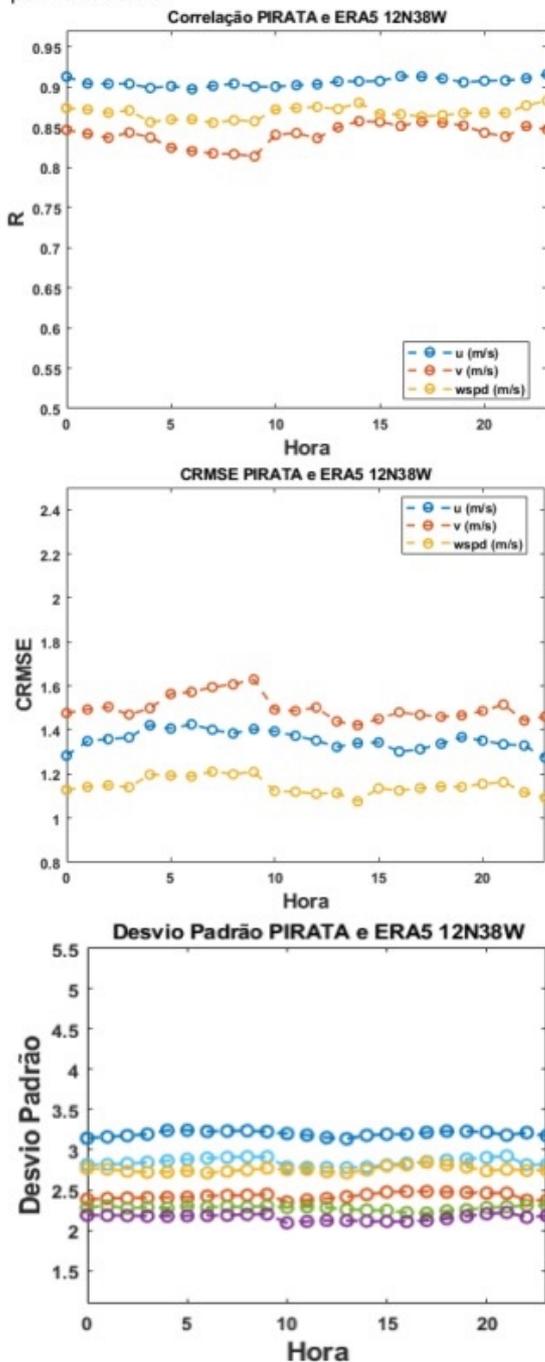


Figura N7 - Variação mensal das diferenças na velocidade do vento PIRATA – ERA5 e seus respectivos desvios padrões para a posição 12N38W.

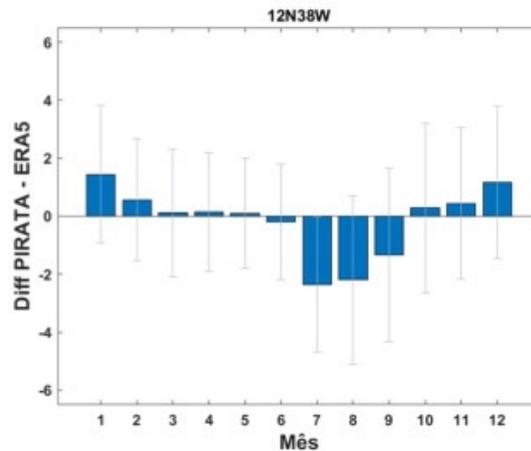


Figura N8 - Distribuição das diferenças de velocidade do vento entre o PIRATA – ERA5 em uma estimativa da função de densidade de probabilidade (em inglês, PDF - Probability density function estimate), onde a área de cada barra é o número relativo de observações. A linha vermelha representa o valor mais recorrente; caso esse valor fosse positivo, a linha seria azul.

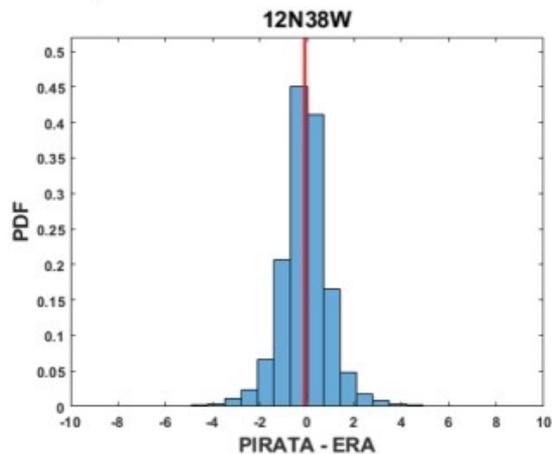


Figura N9 - *Scree plot* da posição 12N38W, utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no primeiro e segundo modelos de PCA propostos, respectivamente. O limite do critério do autovalor médio é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.

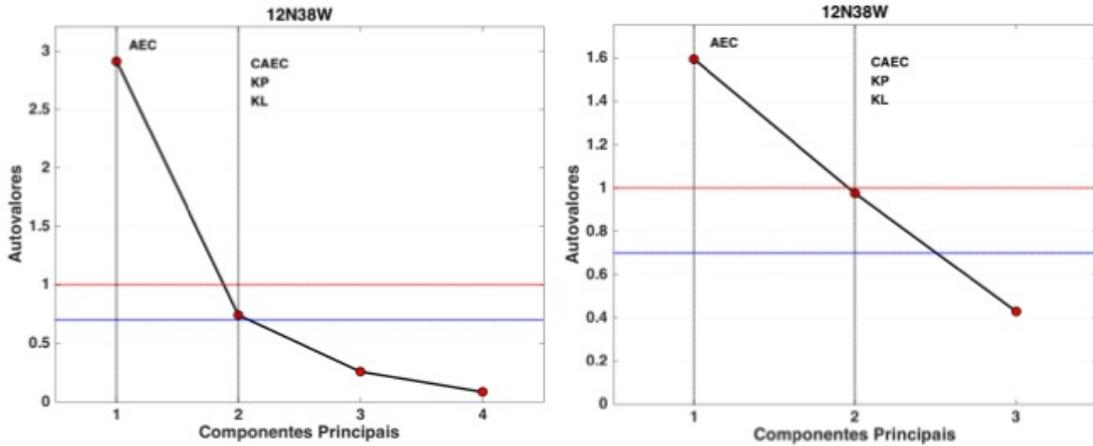


Figura N10 - *Score Plot* para o primeiro e segundo modelo, respectivamente, de PCA propostos da posição 12N38W. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. Os pontos representam as coordenadas de uma determinada amostra no espaço e seus relacionamentos, e a escala de cinza o nível de resposta da mesma.

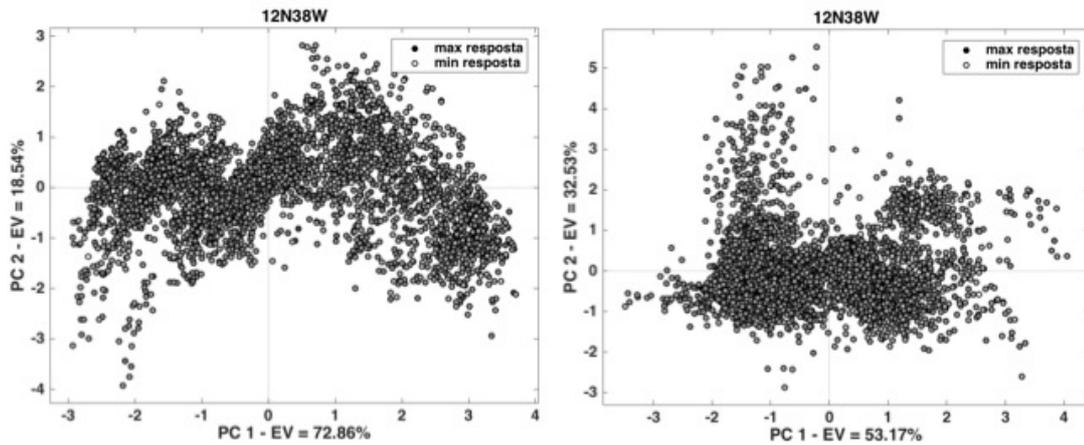
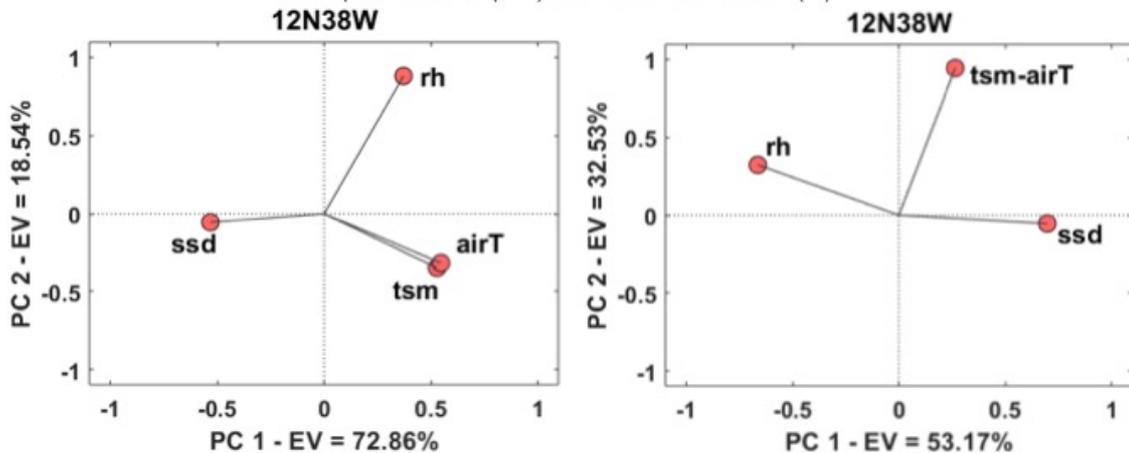


Figura N11 - *Loading Plot* da posição 12N38W para o primeiro e segundo modelo de PCA propostos, respectivamente. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. As variáveis utilizadas nesses modelos são: temperatura da superfície do mar (TSM), densidade ao nível do mar (SSD), temperatura do ar (airT) e umidade relativa do ar (rh).



APÊNDICE OSCAR – RESUMO DA POSIÇÃO 14S32W

Figura O1 - Série temporal comparativa, do vento a 10 m, de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 14S 32W (A), do ASCAT e QuikSCAT (B) e do ERA5 (C), na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.

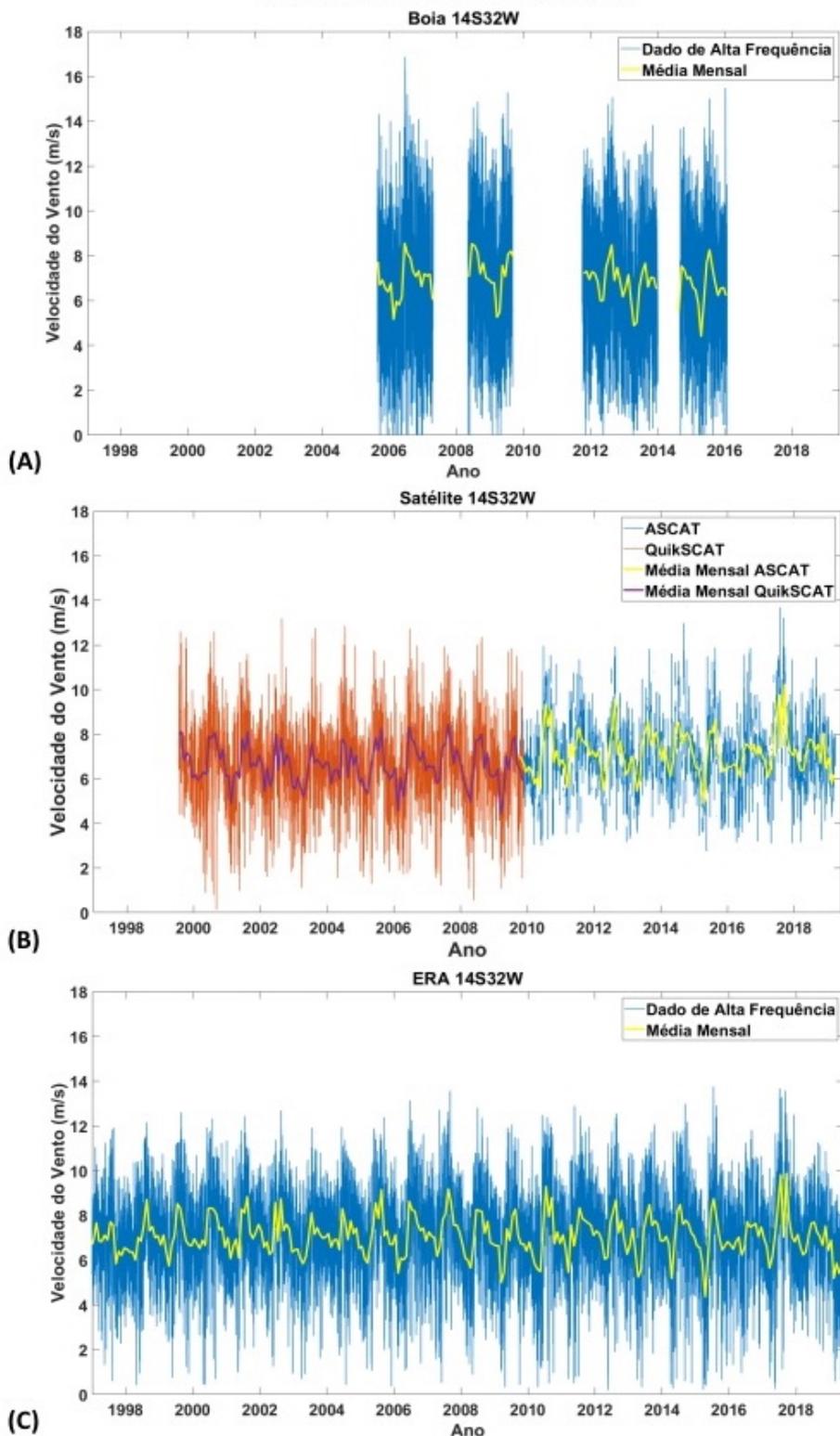


Figura O2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 14S 32W; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.

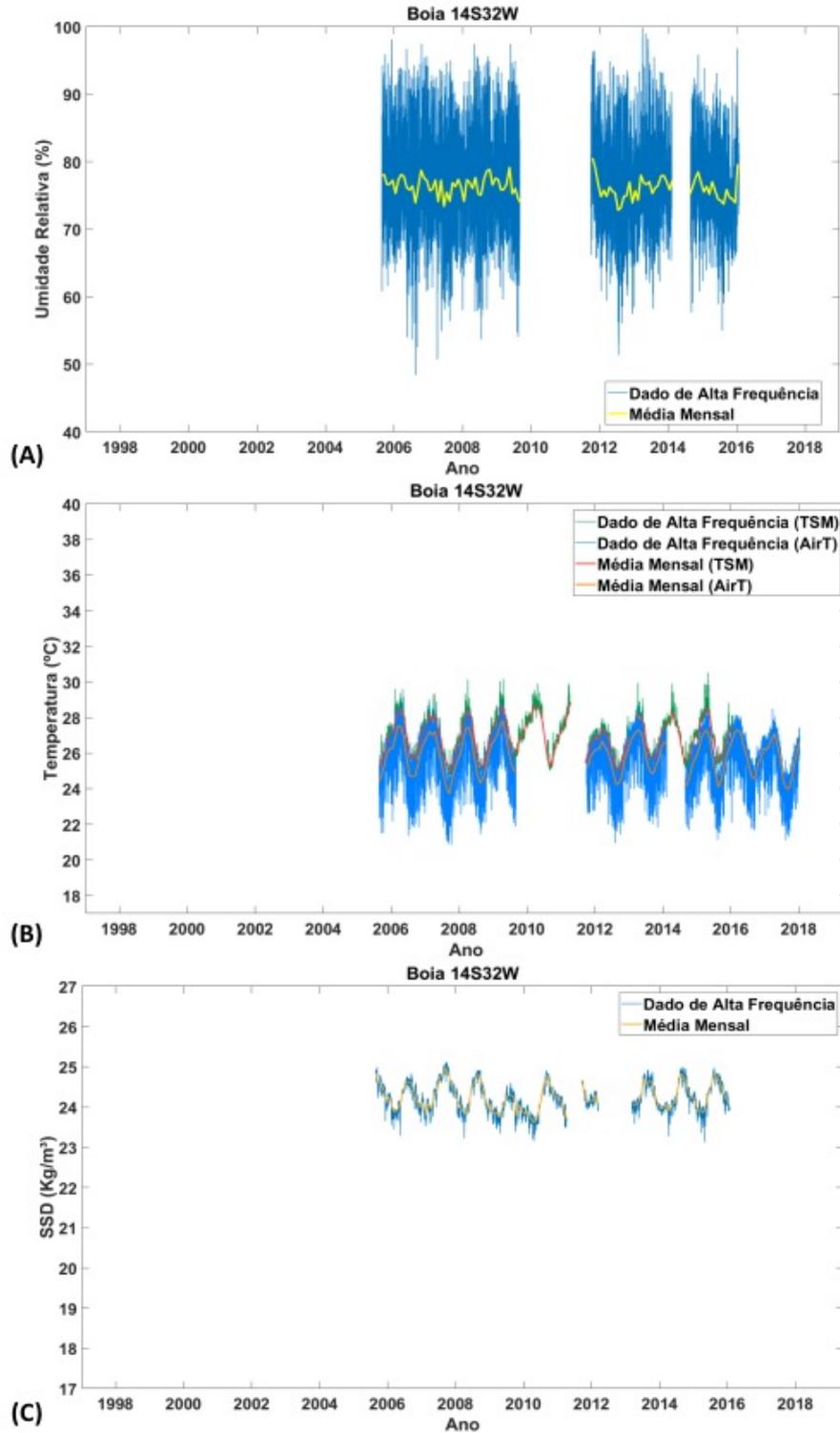


Figura O3 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento na posição 14S 32W (A) da boia do projeto PIRATA, (B) do ERA5 (a partir de 1997), (C) do QuikSCAT (de 1999 a 2009) e (D) do ASCAT (de 2007-presente).

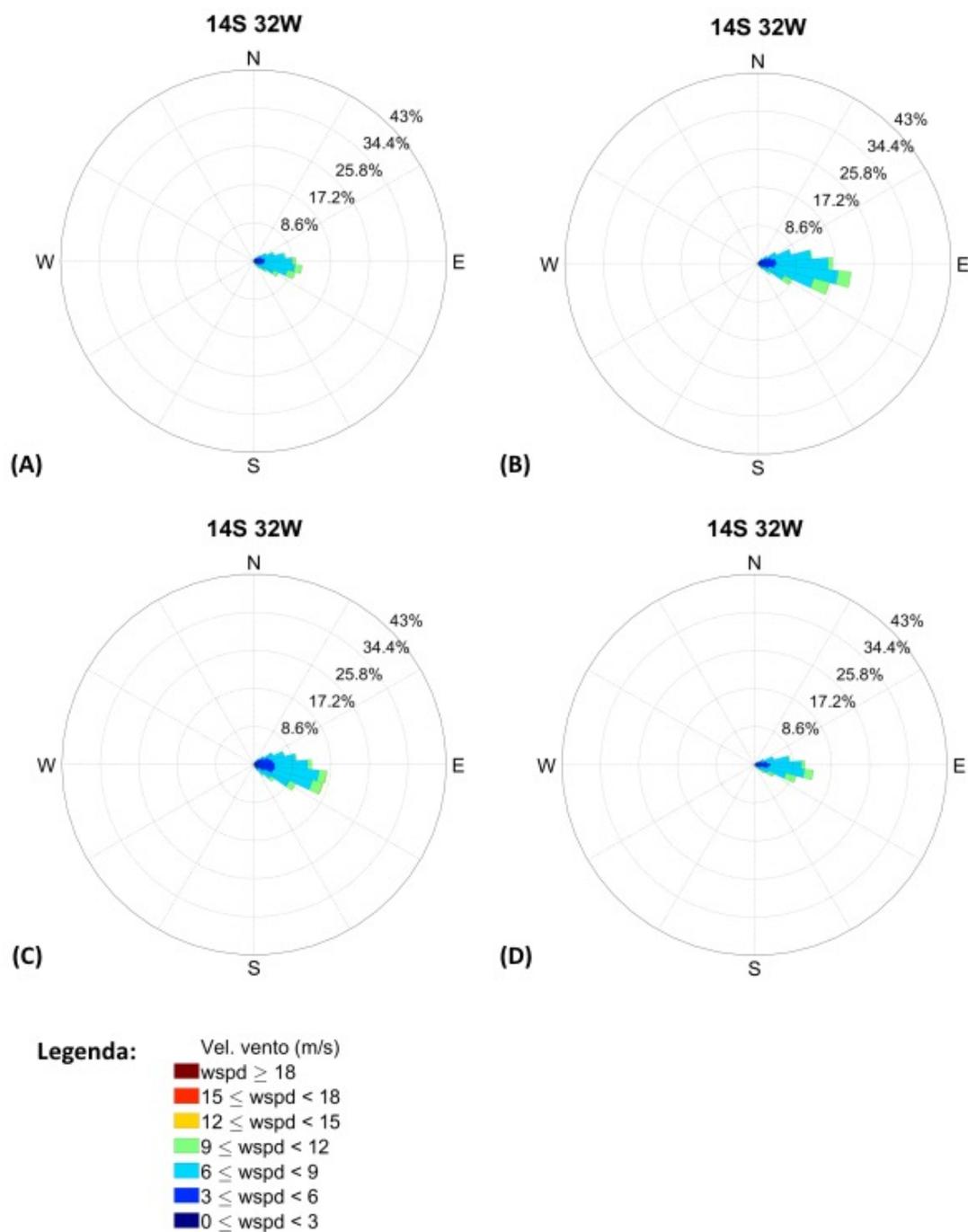


Figura O4 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento das boias PIRATA na posição 14S32W e os satélites QuikSCAT (esquerda) e ASCAT (direita). O ponto indicado como Ref se refere ao dado diário do satélite e os demais pontos coloridos a estatística da comparação com os dados da boia por hora do dia.

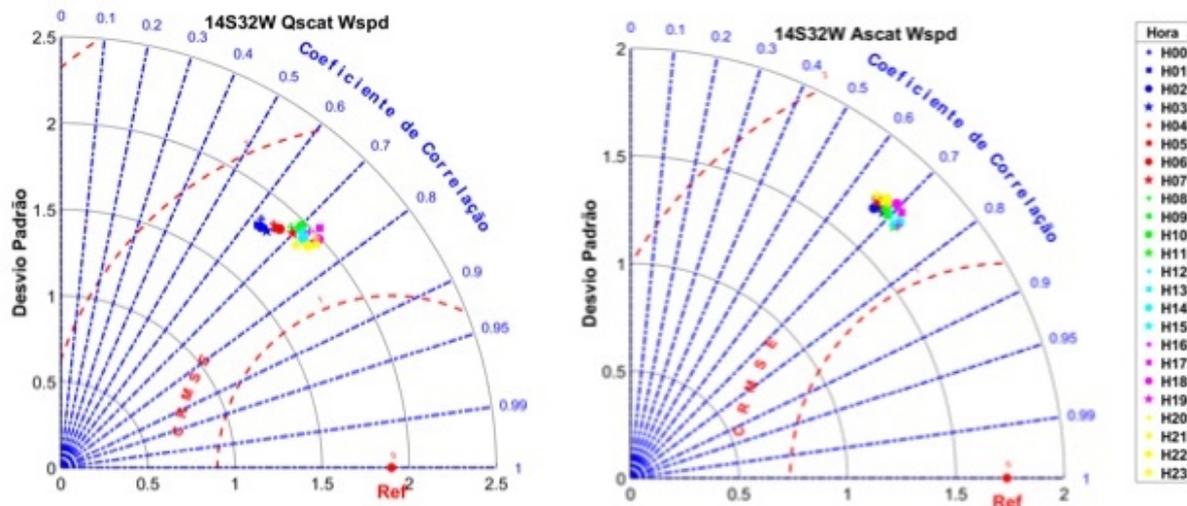


Figura O5 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e os satélites na posição 14S32W, de 1998 a 2009 (QuikSCAT) e 2009 a 2019 (ASCAT), em vermelho, e seus respectivos desvios padrão, em cinza.

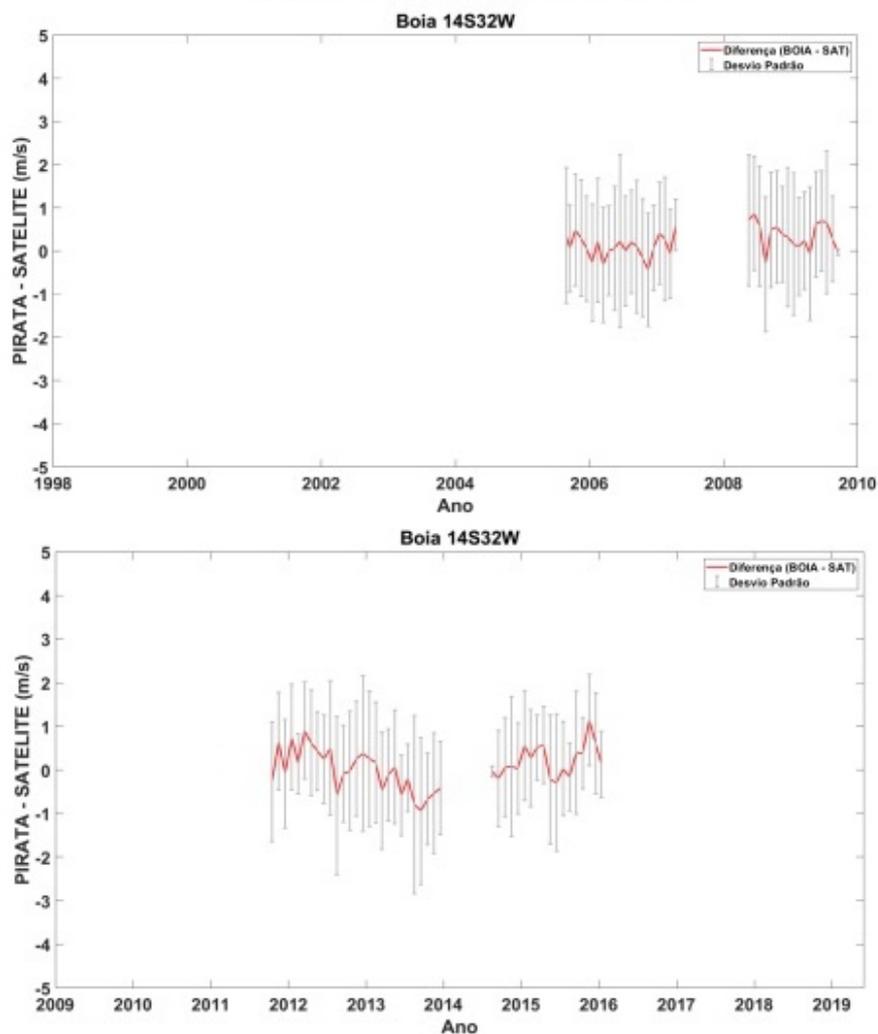


Figura O6 - Correlação (R), Erro médio quadrático (CRMSE) e Desvio Padrão das variáveis do vento u, v e wspd, entre a boia PIRATA 14S32W e o ERA5 na mesma posição geográfica por hora do dia.

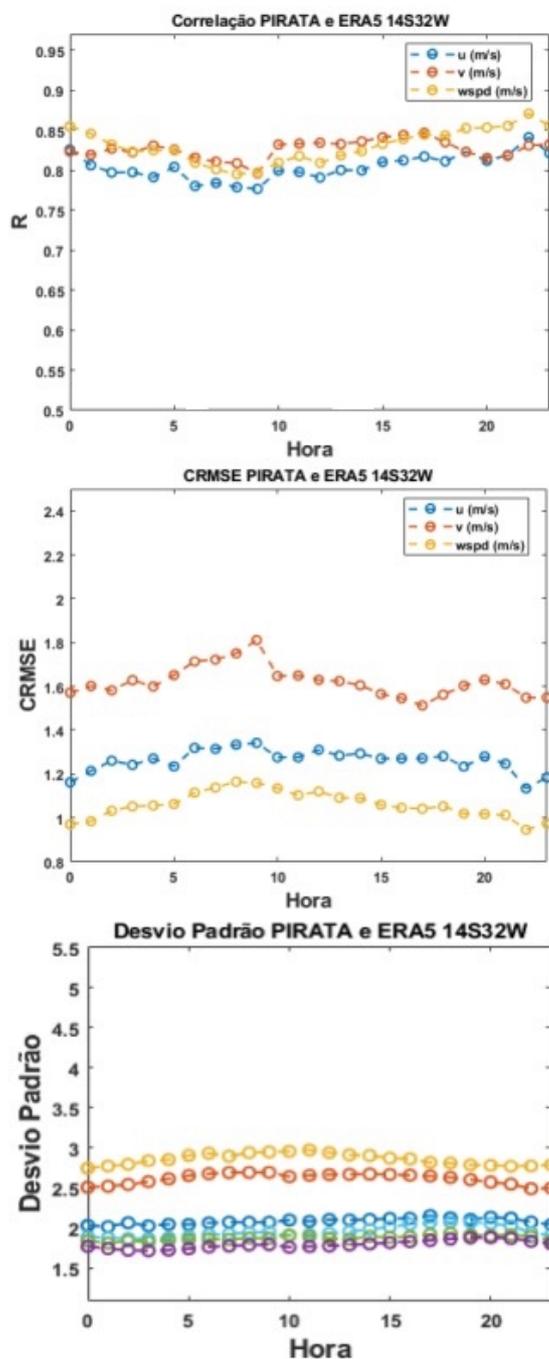


Figura O7 - Variação mensal das diferenças na velocidade do vento PIRATA – ERA5 e seus respectivos desvios padrões para a posição 14S32W.

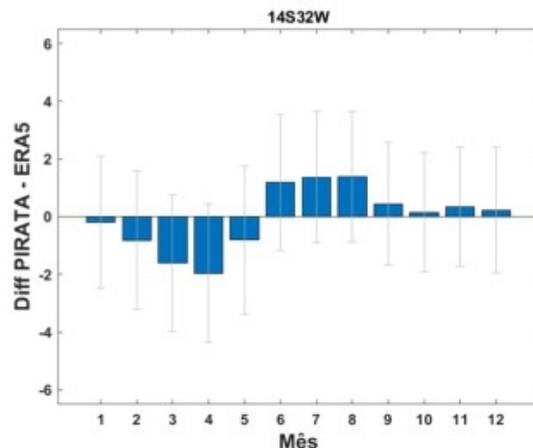


Figura O8 - Distribuição das diferenças de velocidade do vento entre o PIRATA – ERA5 em uma estimativa da função de densidade de probabilidade (em inglês, PDF - Probability density function estimate), onde a área de cada barra é o número relativo de observações. A linha vermelha representa o valor mais recorrente; caso esse valor fosse positivo, a linha seria azul.

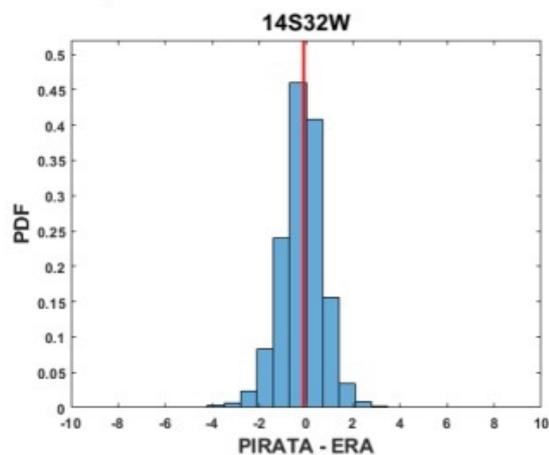


Figura O9 - *Scree plot* da posição 14S32W, utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no primeiro e segundo modelos de PCA propostos, respectivamente. O limite do critério do autovalor médio é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.

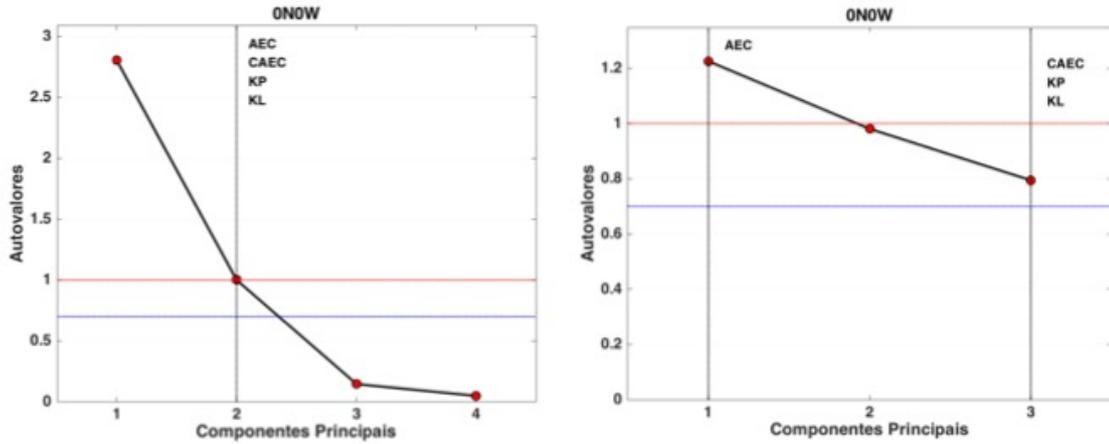


Figura O10 - *Score Plot* para o primeiro e segundo modelo, respectivamente, de PCA propostos da posição 14S32W. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. Os pontos representam as coordenadas de uma determinada amostra no espaço e seus relacionamentos, e a escala de cinza o nível de resposta da mesma.

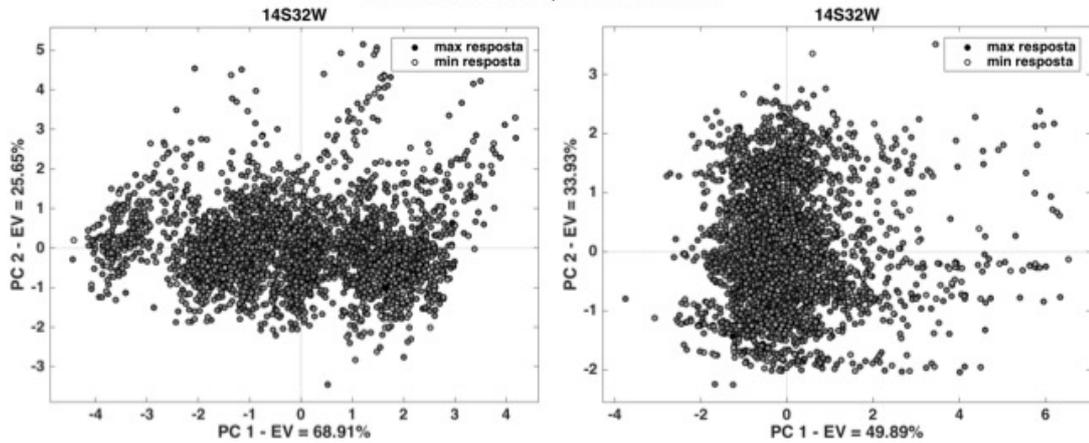
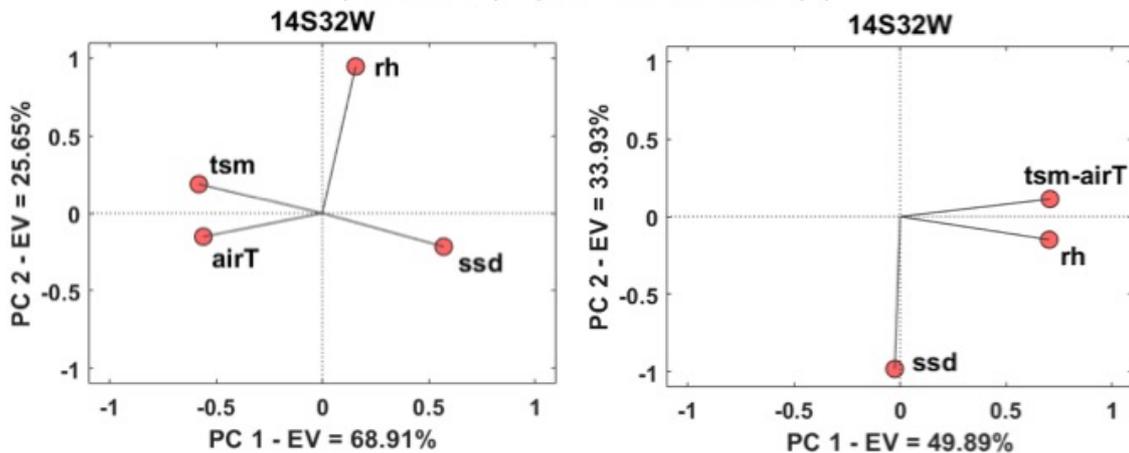


Figura O11 - *Loading Plot* da posição 14S32W para o primeiro e segundo modelo de PCA propostos, respectivamente. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. As variáveis utilizadas nesses modelos são: temperatura da superfície do mar (TSM), densidade ao nível do mar (SSD), temperatura do ar (airT) e umidade relativa do ar (rh).



APÊNDICE PAPA – RESUMO DA POSIÇÃO 15N38W

Figura P1 - Série temporal comparativa, do vento a 10 m, de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 15N 38W (A), do ASCAT e QuikSCAT (B) e do ERA5 (C), na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.

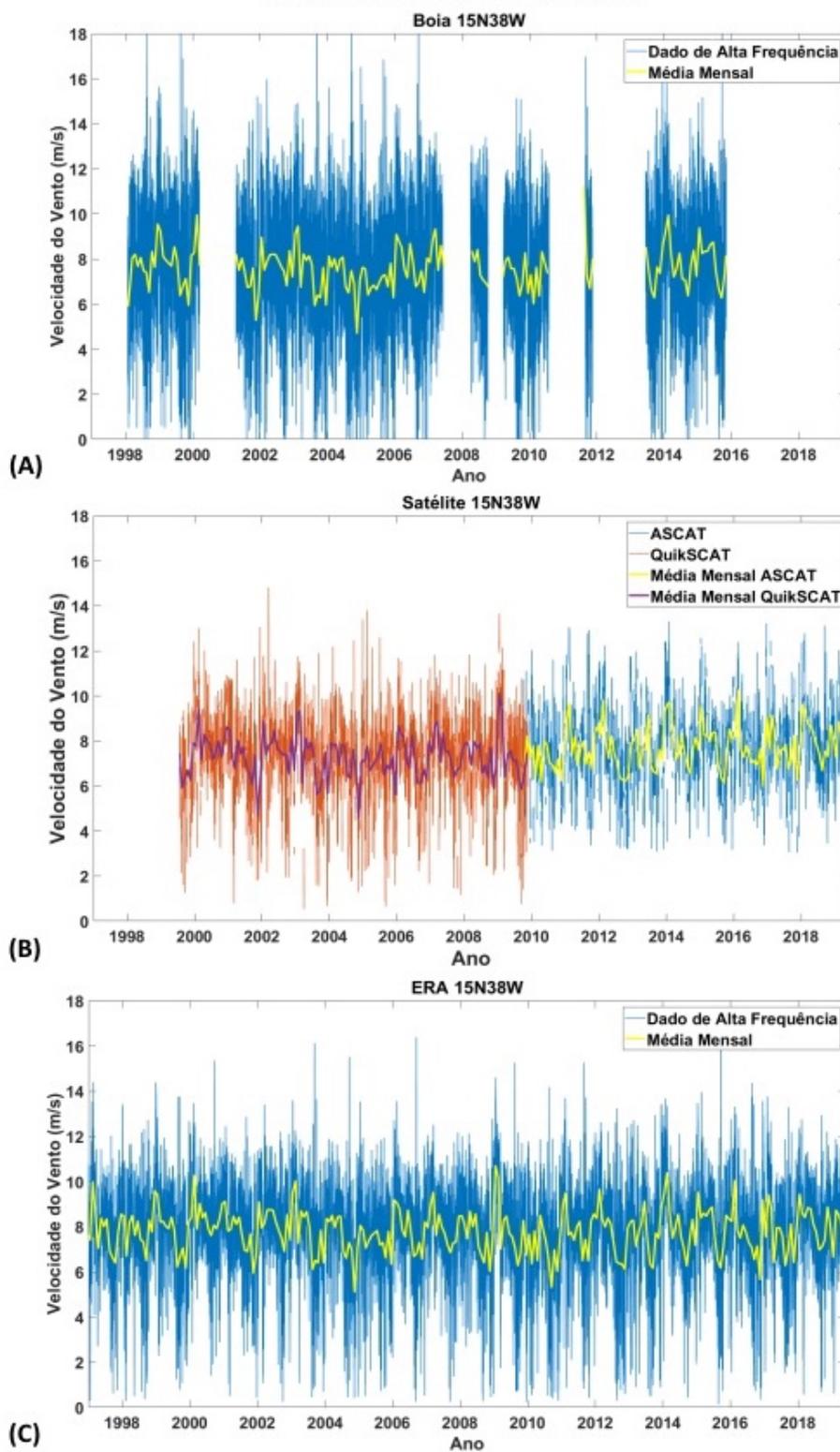


Figura P2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 15N 38W; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.

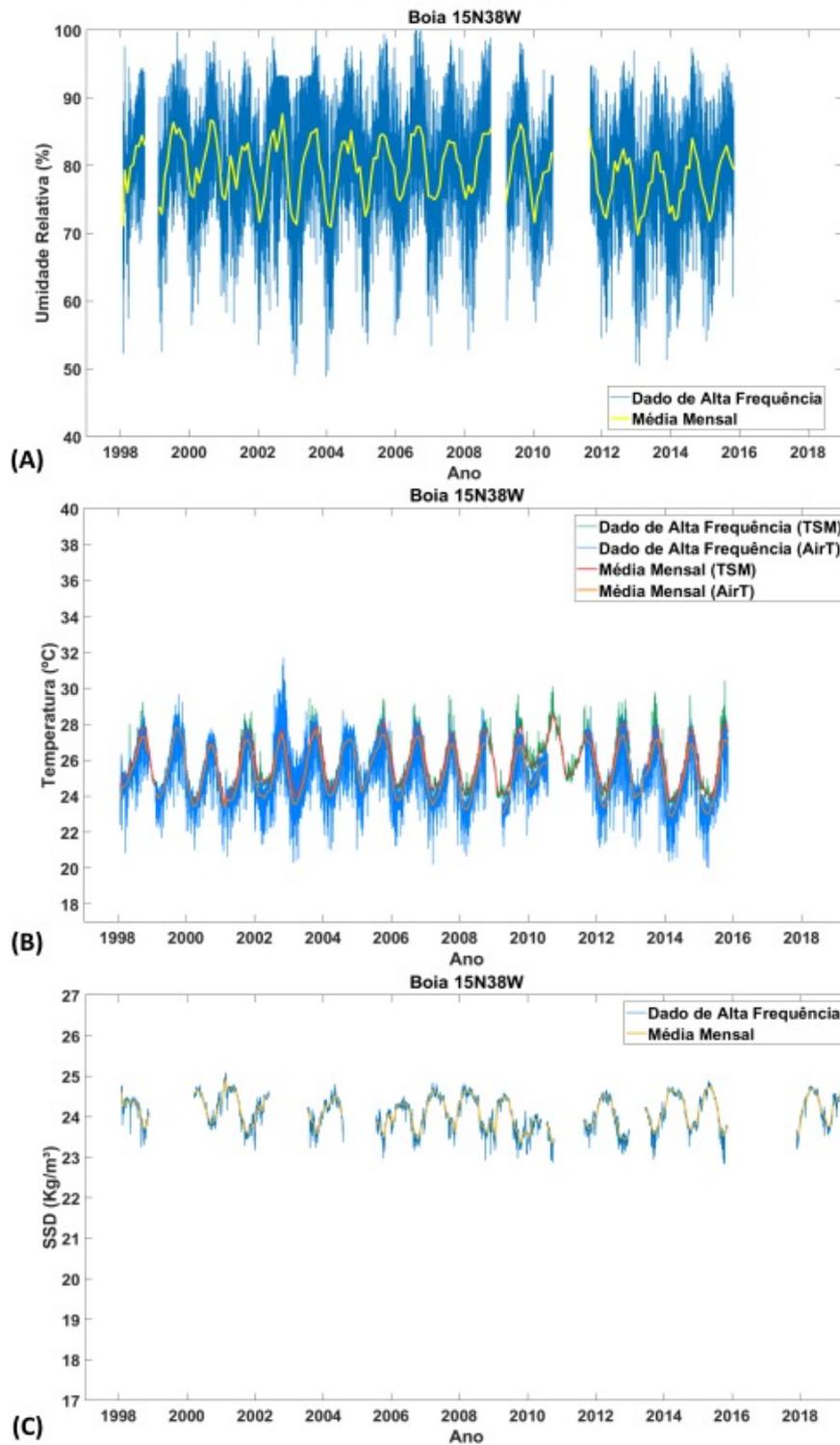


Figura P3 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento na posição 15N 38W (A) da boia do projeto PIRATA, (B) do ERA5 (a partir de 1997), (C) do QuikSCAT (de 1999 a 2009) e (D) do ASCAT (de 2007-presente).

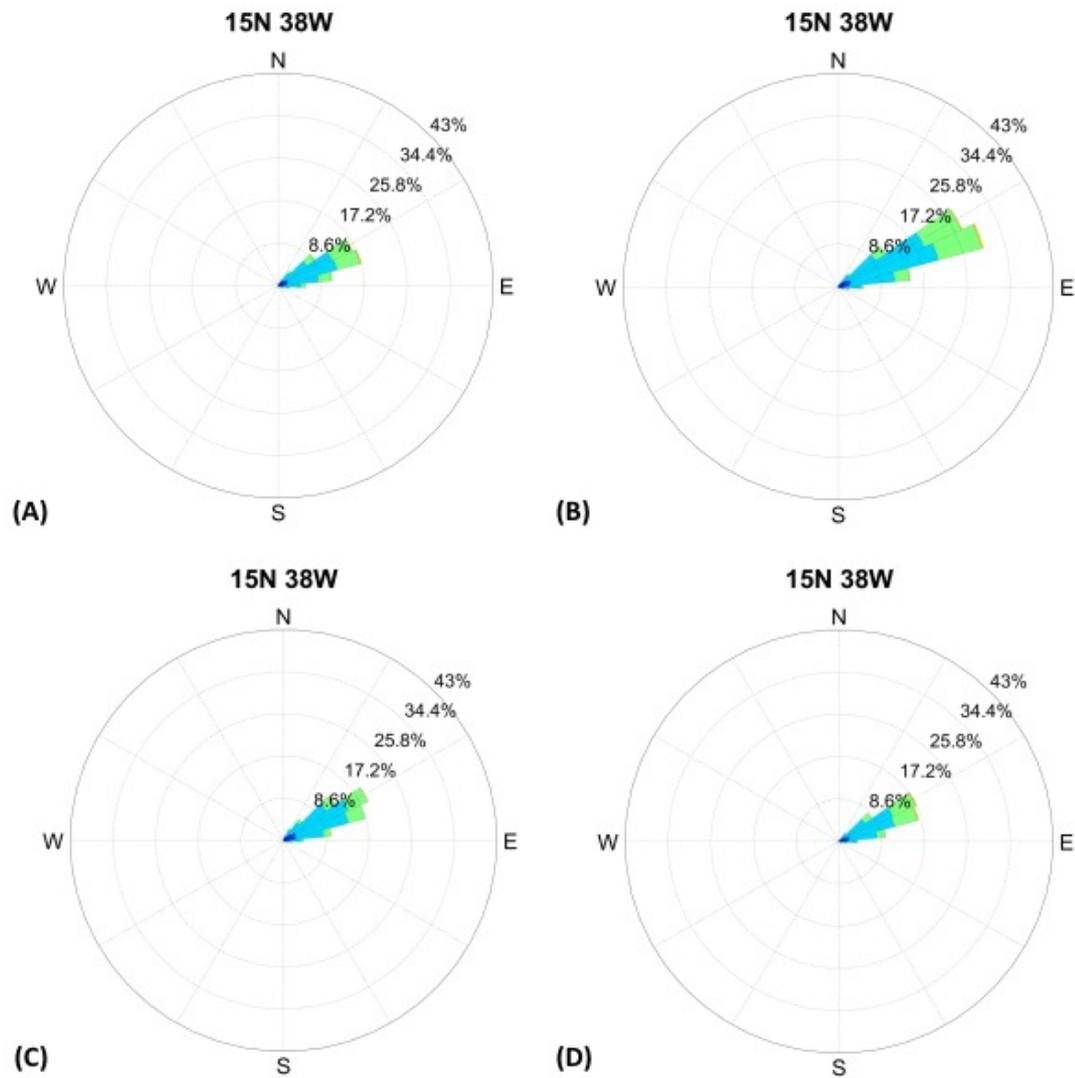


Figura P4 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento das boias PIRATA na posição 15N38W e os satélites QuikSCAT (esquerda) e ASCAT (direita). O ponto indicado como Ref se refere ao dado diário do satélite e os demais pontos coloridos a estatística da comparação com os dados da boia por hora do dia.

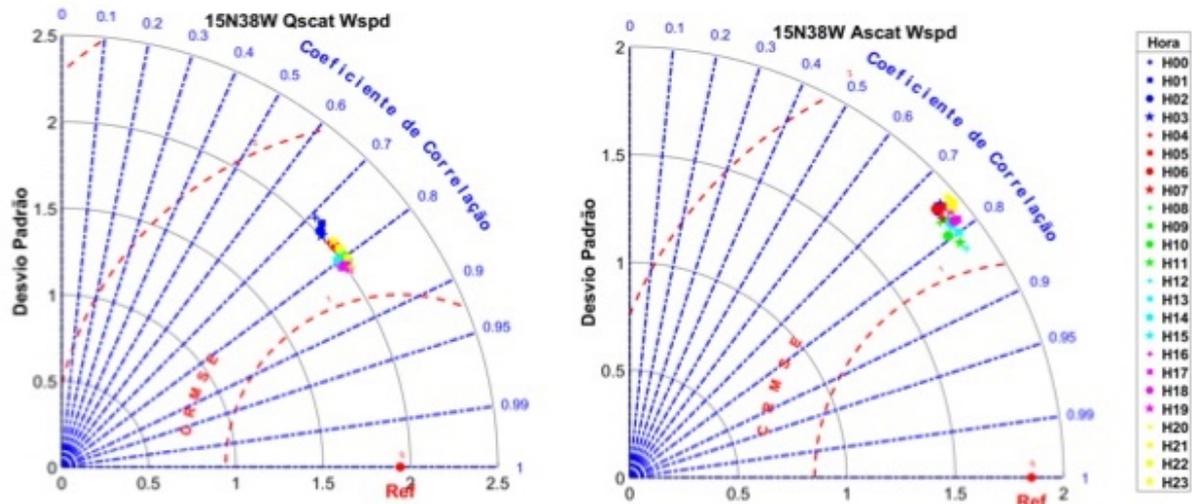


Figura P5 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e os satélites na posição 15N38W, de 1998 a 2009 (QuikSCAT) e 2009 a 2019 (ASCAT), em vermelho, e seus respectivos desvios padrão, em cinza.

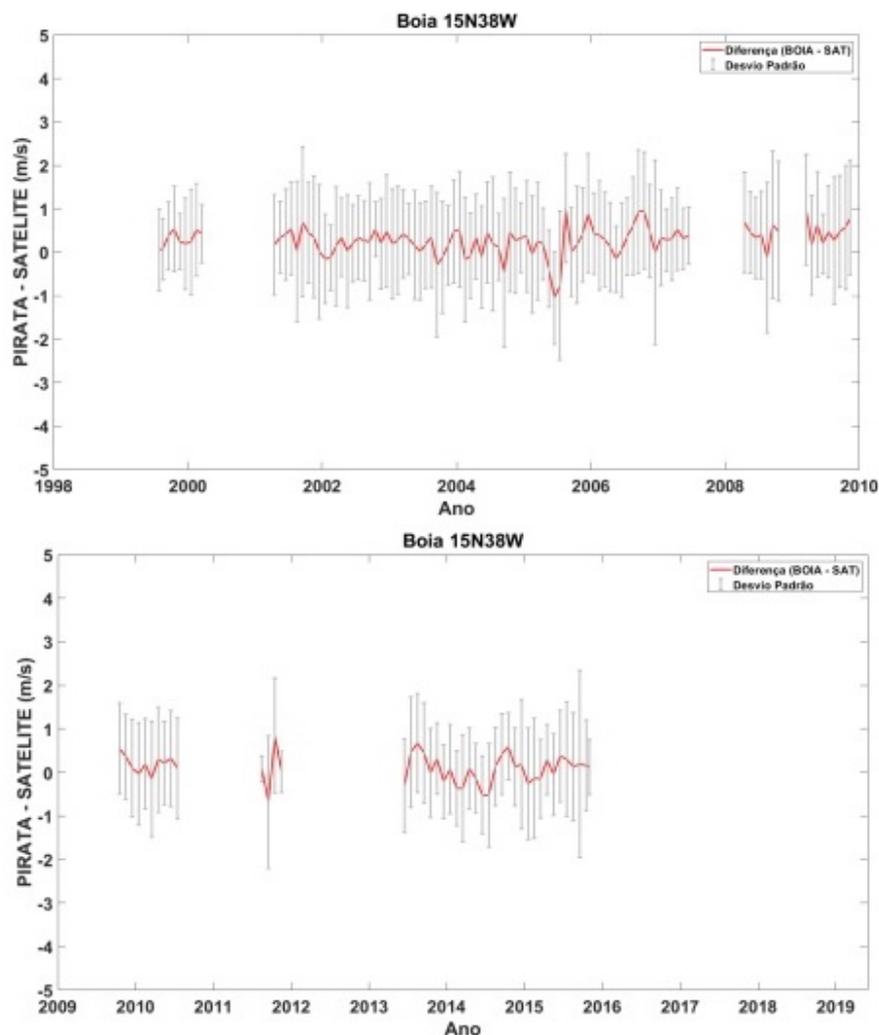


Figura P6 - Correlação (R), raiz do erro quadrático médio centralizado (CRMSE) e Desvio Padrão das variáveis do vento u, v e wspd, entre a boia PIRATA 15N38W e o ERA5 na mesma posição geográfica por hora do dia.

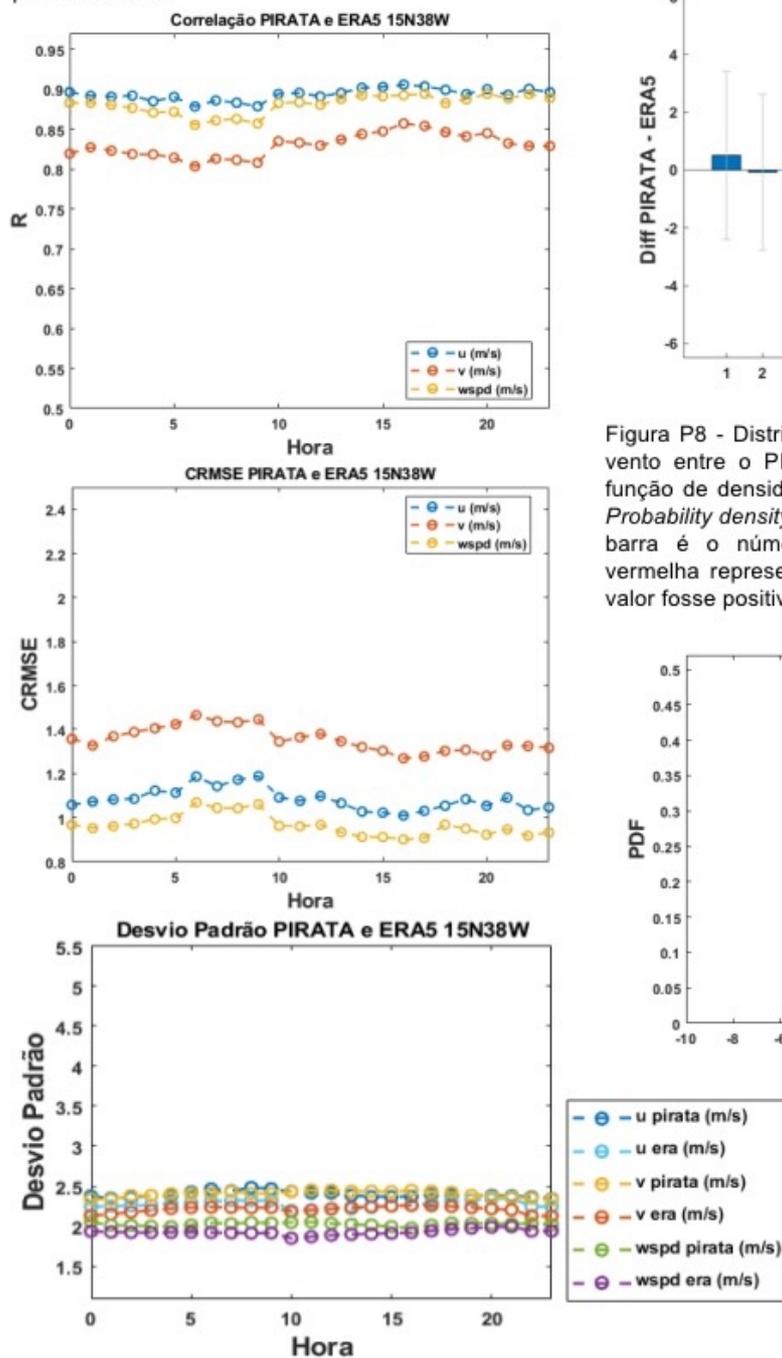


Figura P7 - Variação mensal das diferenças na velocidade do vento PIRATA – ERA5 e seus respectivos desvios padrões para a posição 15N38W.

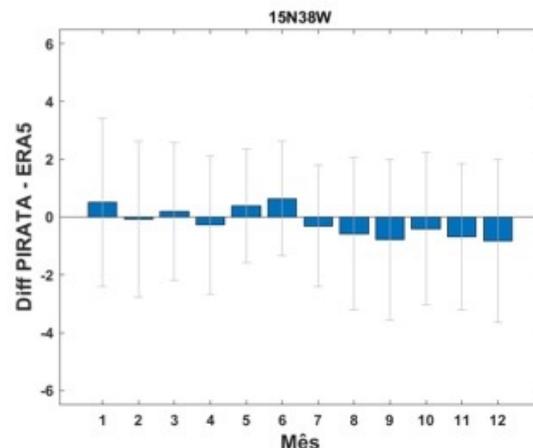


Figura P8 - Distribuição das diferenças de velocidade do vento entre o PIRATA – ERA5 em uma estimativa da função de densidade de probabilidade (em inglês, PDF - Probability density function estimate), onde a área de cada barra é o número relativo de observações. A linha vermelha representa o valor mais recorrente; caso esse valor fosse positivo, a linha seria azul.

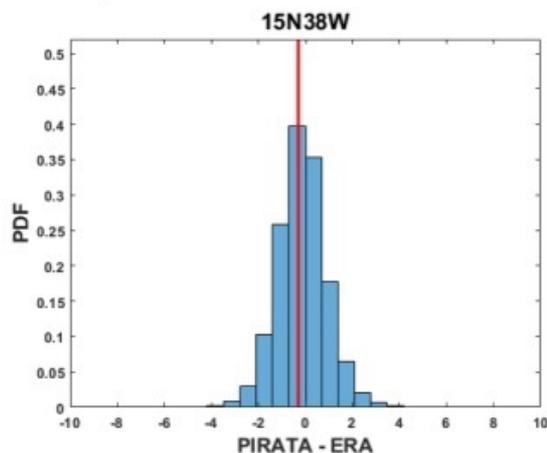


Figura P9 - *Scree plot* da posição 15N38W, utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no primeiro e segundo modelos de PCA propostos, respectivamente. O limite do critério do autovalor médio é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.

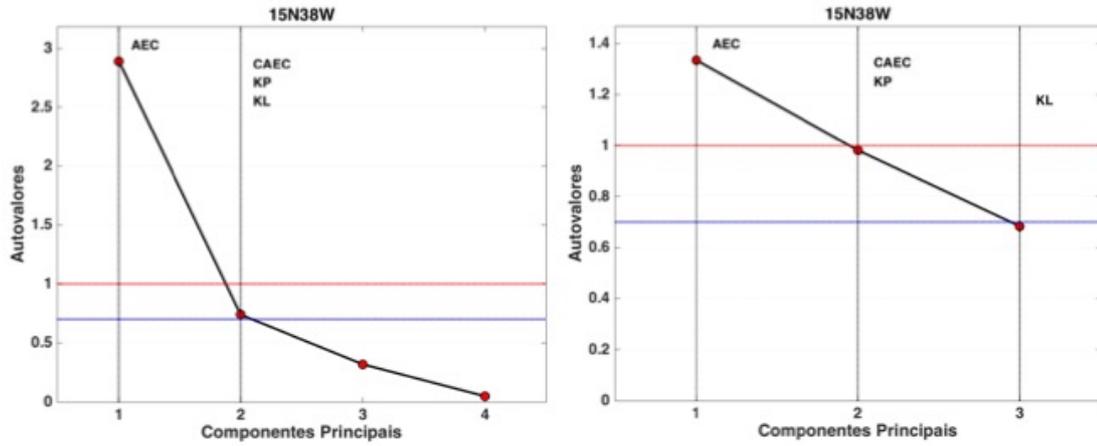


Figura P10 - *Score Plot* para o primeiro e segundo modelo, respectivamente, de PCA propostos da posição 15N38W. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. Os pontos representam as coordenadas de uma determinada amostra no espaço e seus relacionamentos, e a escala de cinza o nível de resposta da mesma.

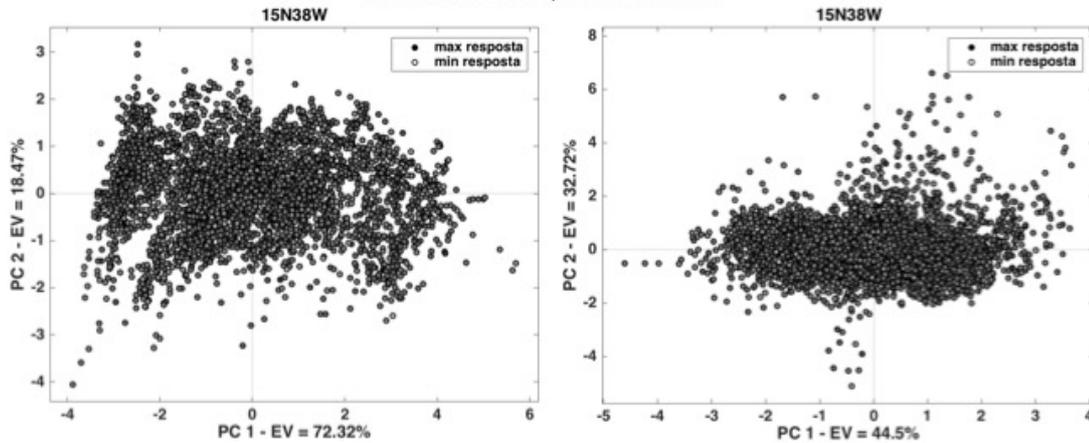
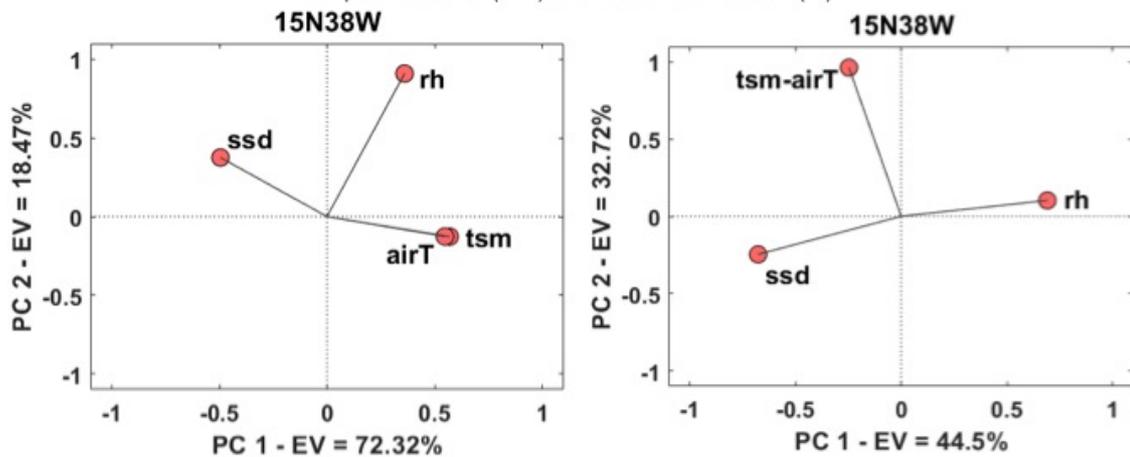
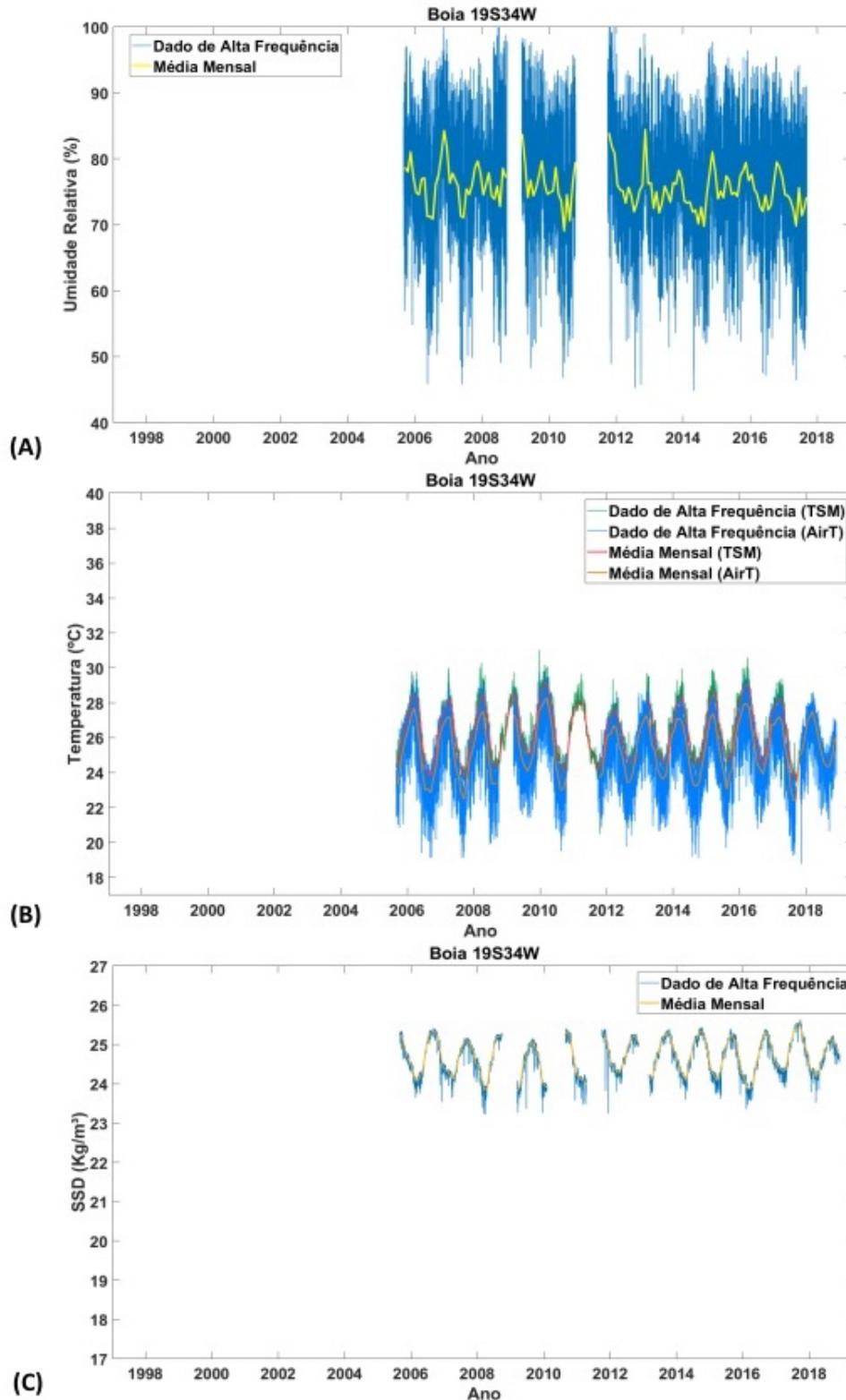


Figura P11 - *Loading Plot* da posição 15N38W para o primeiro e segundo modelo de PCA propostos, respectivamente. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. As variáveis utilizadas nesses modelos são: temperatura da superfície do mar (TSM), densidade ao nível do mar (SSD), temperatura do ar (airT) e umidade relativa do ar (rh).



APÊNDICE QUEBEC – RESUMO DA POSIÇÃO 19S34W

Figura Q2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 19S 34W; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.



APÊNDICE ROMEO – RESUMO DA POSIÇÃO 20N38W

Figura R1 - Série temporal comparativa, do vento a 10 m, de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 20N 38W (A), do ASCAT e QuikSCAT (B) e do ERA5 (C), na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.

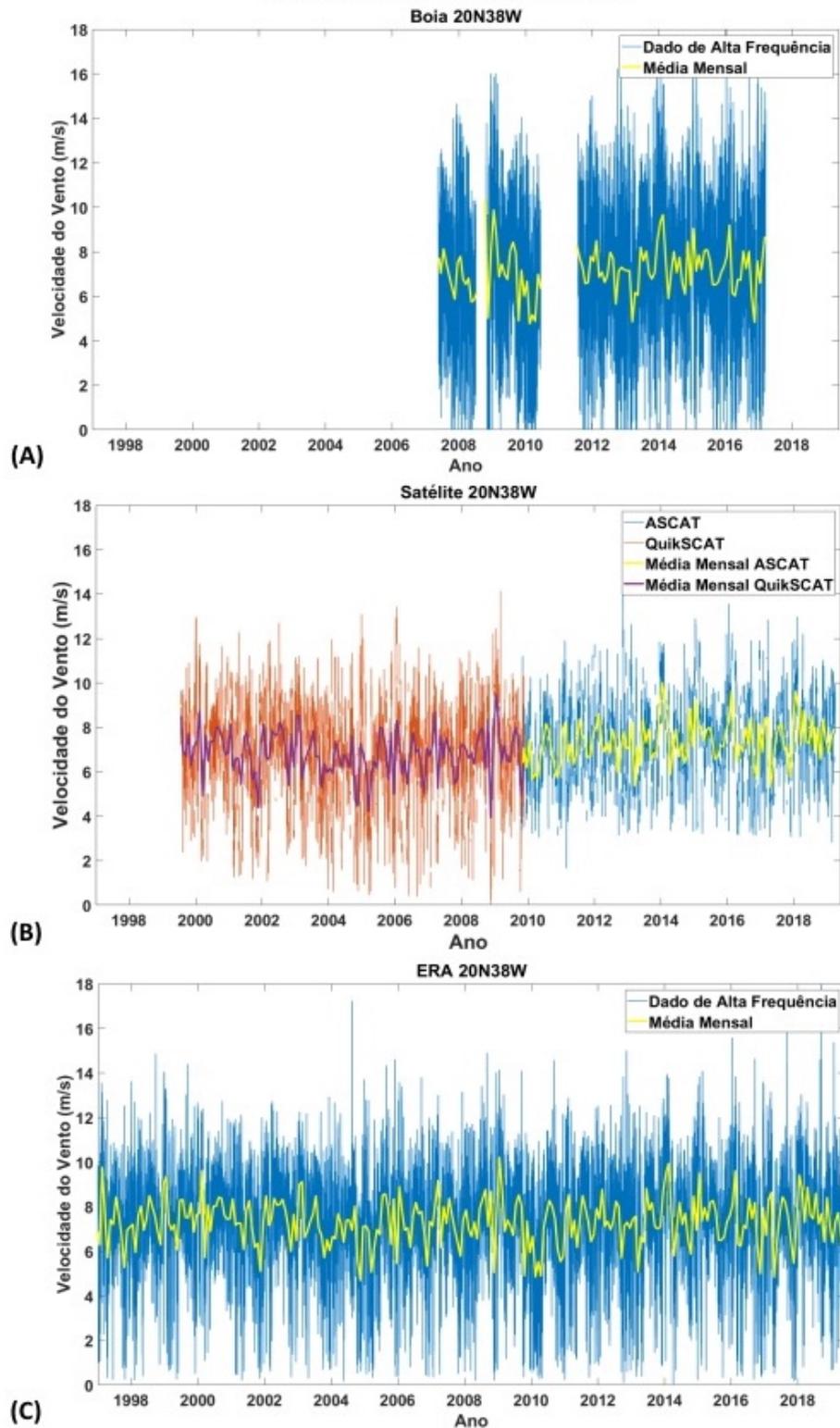


Figura R2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 20N 38W; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.

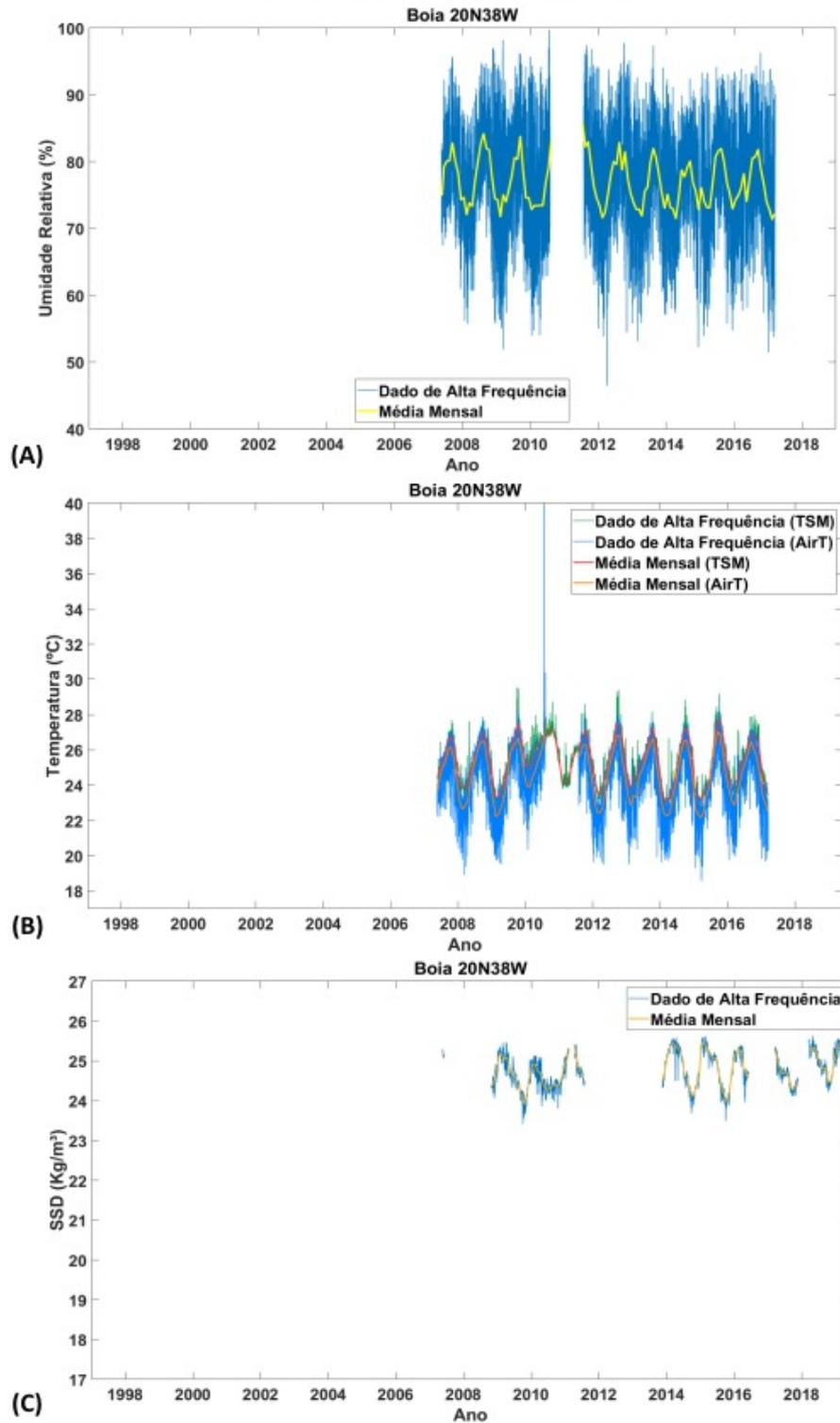


Figura R3 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento na posição 20N 38W (A) da boia do projeto PIRATA, (B) do ERA5 (a partir de 1997), (C) do QuikSCAT (de 1999 a 2009) e (D) do ASCAT (de 2007-presente).

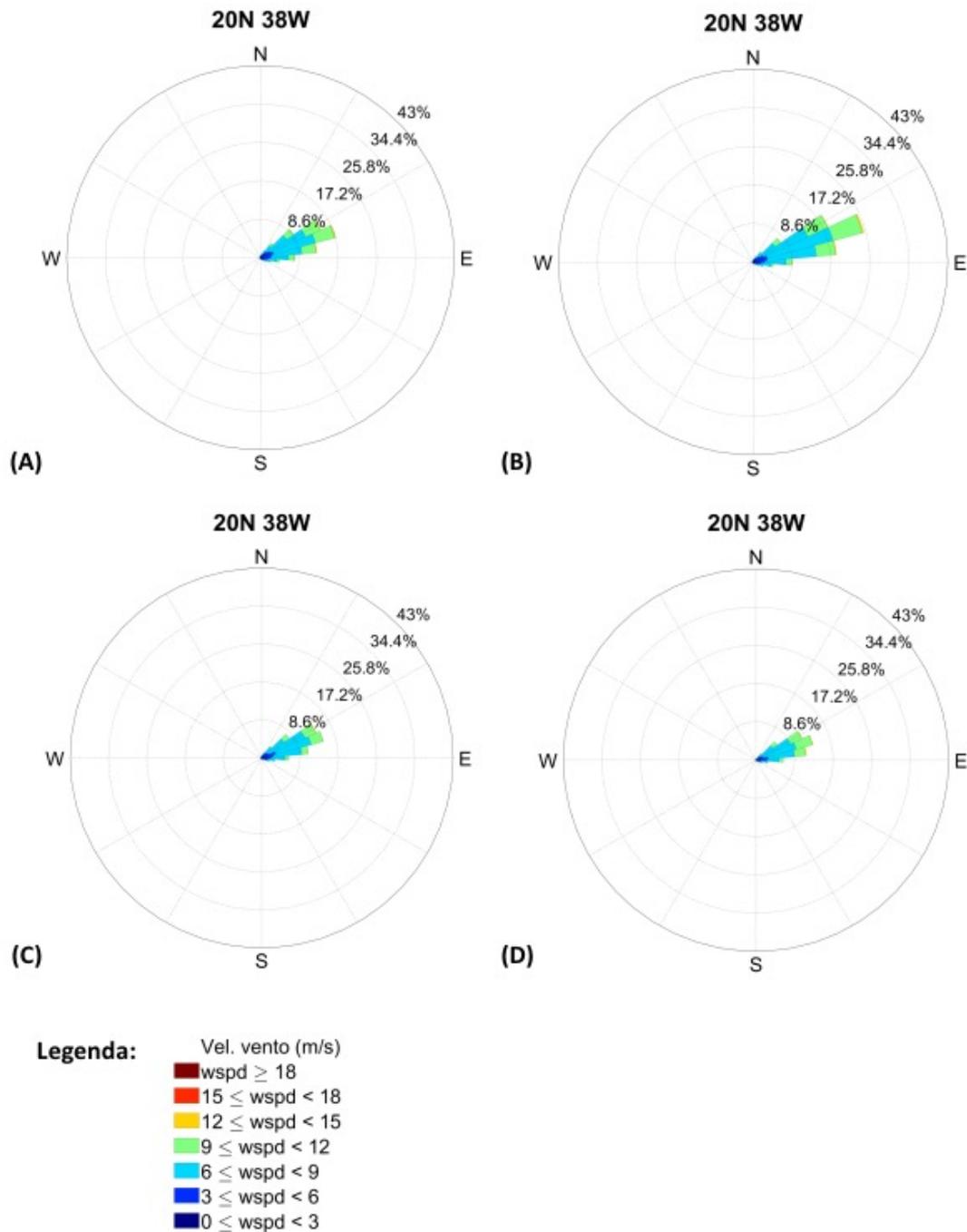


Figura R4 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento das boias PIRATA na posição 20N38W e os satélites QuikSCAT (esquerda) e ASCAT (direita). O ponto indicado como Ref se refere ao dado diário do satélite e os demais pontos coloridos a estatística da comparação com os dados da boia por hora do dia.

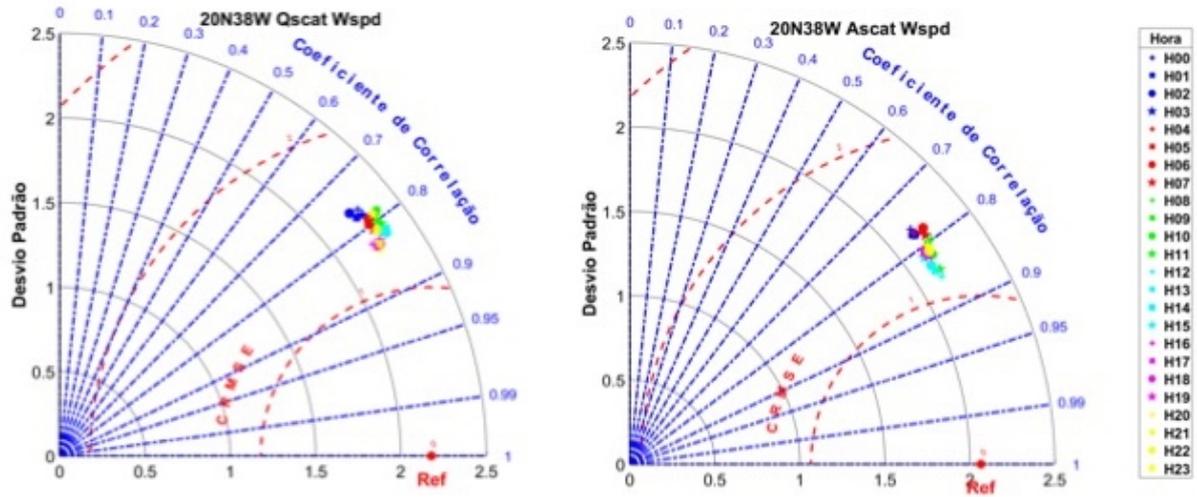


Figura R5 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e os satélites na posição 20N38W, de 1998 a 2009 (QuikSCAT) e 2009 a 2019 (ASCAT), em vermelho, e seus respectivos desvios padrão, em cinza.

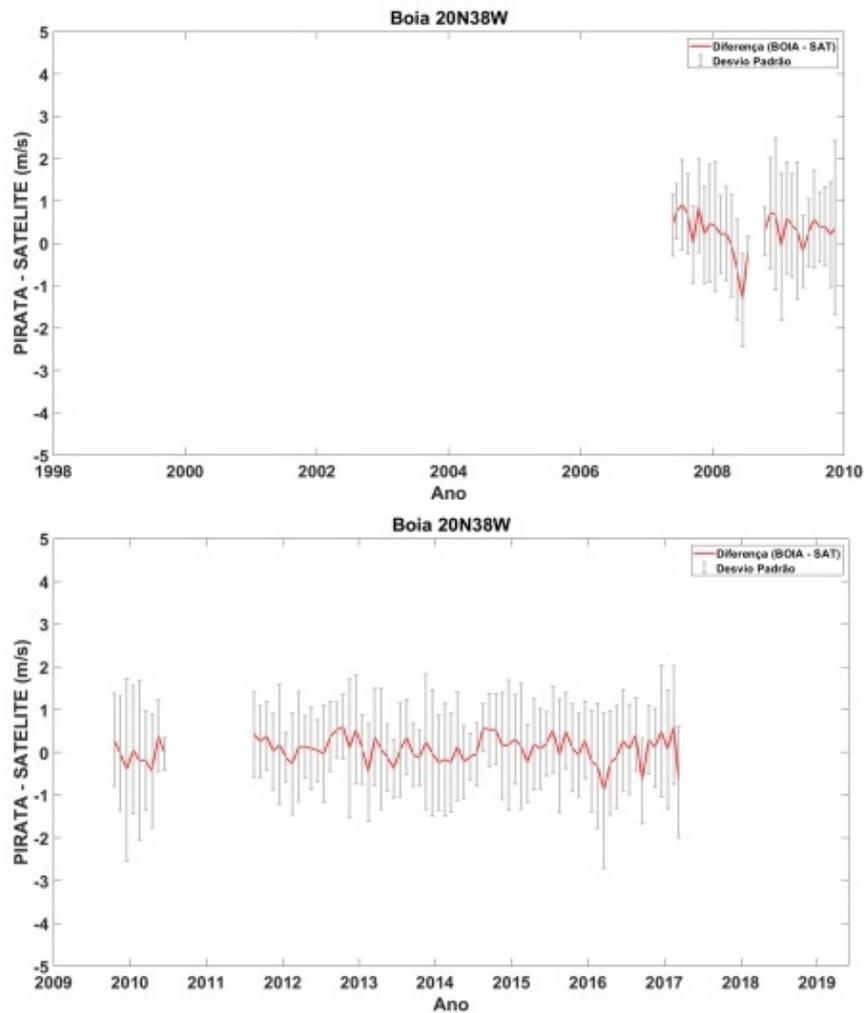


Figura R6 - Correlação (R), raiz do erro quadrático médio centralizado (CRMSE) e Desvio Padrão das variáveis do vento u, v e wspd, entre a boia PIRATA 20N38W e o ERA5 na mesma posição geográfica por hora do dia.

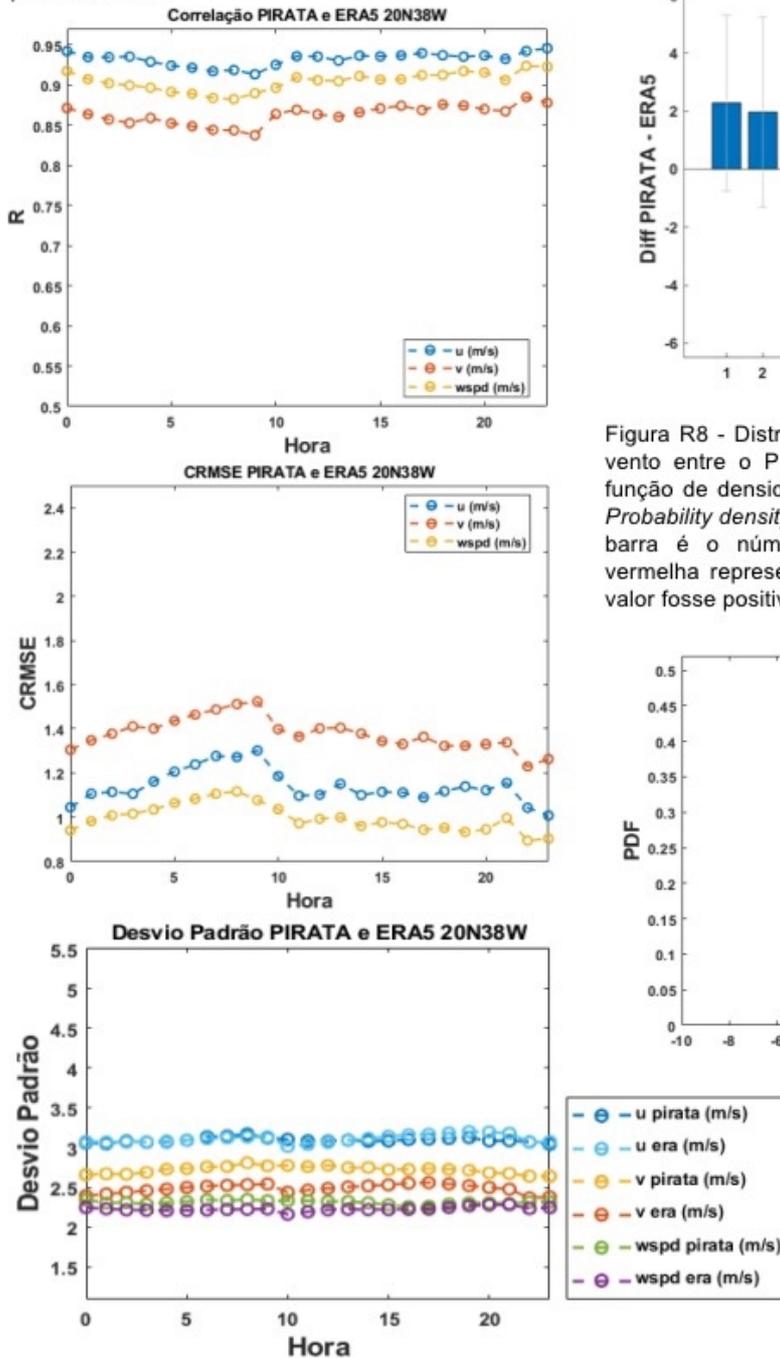


Figura R7 - Variação mensal das diferenças na velocidade do vento PIRATA – ERA5 e seus respectivos desvios padrão para a posição 20N38W.

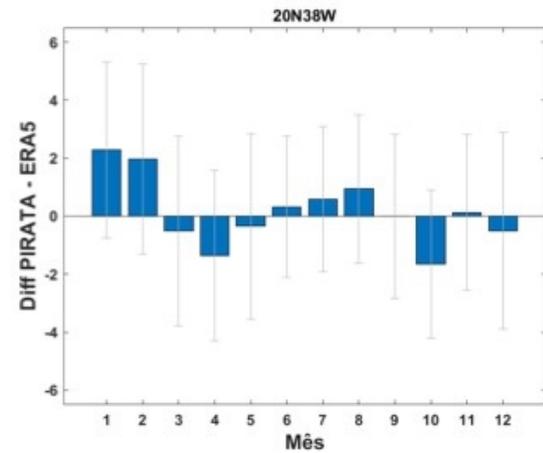


Figura R8 - Distribuição das diferenças de velocidade do vento entre o PIRATA – ERA5 em uma estimativa da função de densidade de probabilidade (em inglês, PDF - Probability density function estimate), onde a área de cada barra é o número relativo de observações. A linha vermelha representa o valor mais recorrente; caso esse valor fosse positivo, a linha seria azul.

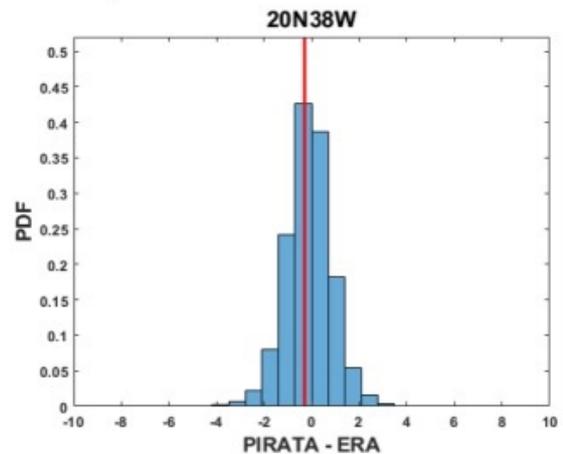


Figura R9 - *Scree plot* da posição 20N38W, utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no primeiro e segundo modelos de PCA propostos, respectivamente. O limite do critério do autovalor médio é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.

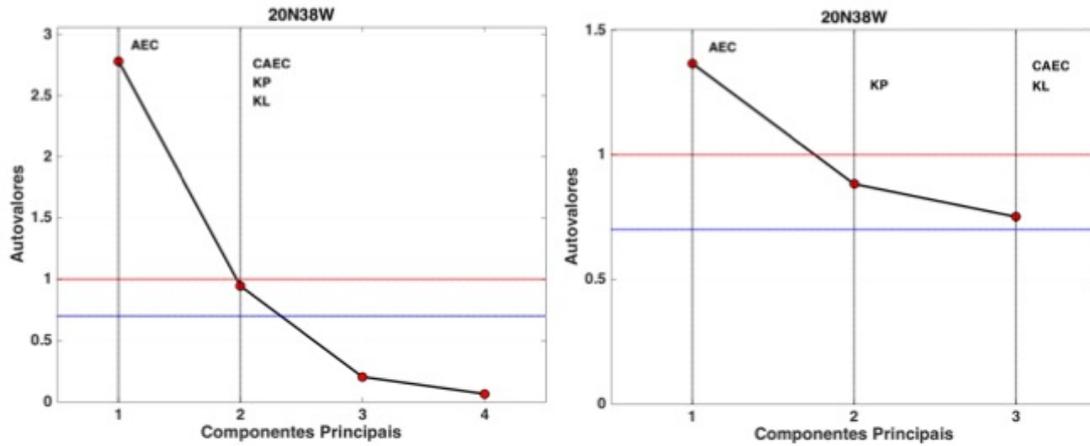


Figura R10 - *Score Plot* para o primeiro e segundo modelo, respectivamente, de PCA propostos da posição 20N38W. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. Os pontos representam as coordenadas de uma determinada amostra no espaço e seus relacionamentos, e a escala de cinza o nível de resposta da mesma.

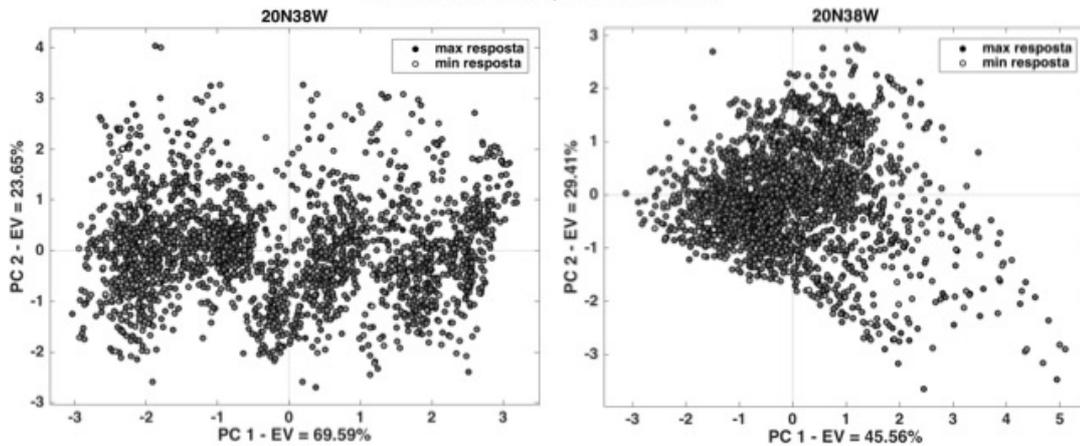
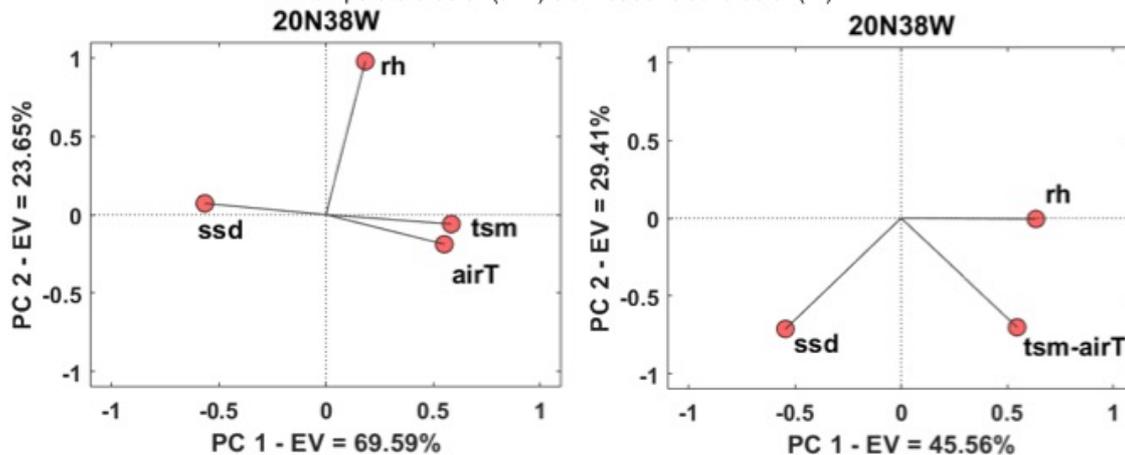


Figura R11 - *Loading Plot* da posição 20N38W para o primeiro e segundo modelo de PCA propostos, respectivamente. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. As variáveis utilizadas nesses modelos são: temperatura da superfície do mar (TSM), densidade ao nível do mar (SSD), temperatura do ar (airT) e umidade relativa do ar (rh).



APÊNDICE SIERRA – RESUMO DA POSIÇÃO 21N23W

Figura S1 - Série temporal comparativa, do vento a 10 m, de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 21N 23W (A), do ASCAT e QuikSCAT (B) e do ERA5 (C), na mesma posição geográfica, com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e vermelho e as médias mensais em amarelo e roxo.

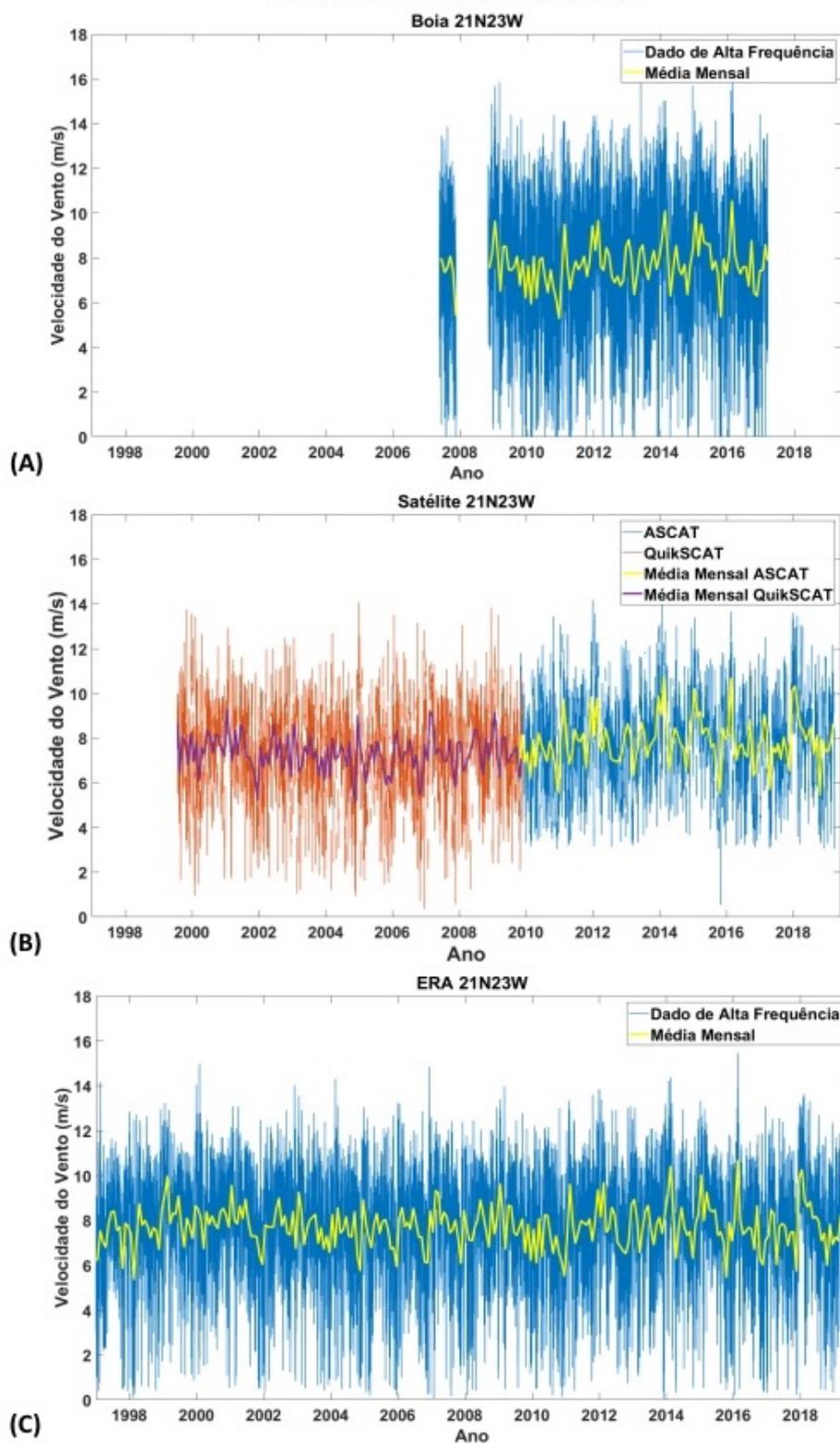


Figura S2 - Série temporal de setembro de 1997 ao final de 2018 da boia PIRATA 21N 23W; (A) da umidade relativa (rh); (B) da temperatura do ar (airT) e do mar (TSM); e (C) da densidade da superfície do mar (SSD), com suas respectivas médias mensais. Os dados de alta frequência são apresentados em azul e verde e as médias mensais em amarelo, laranja e vermelho.

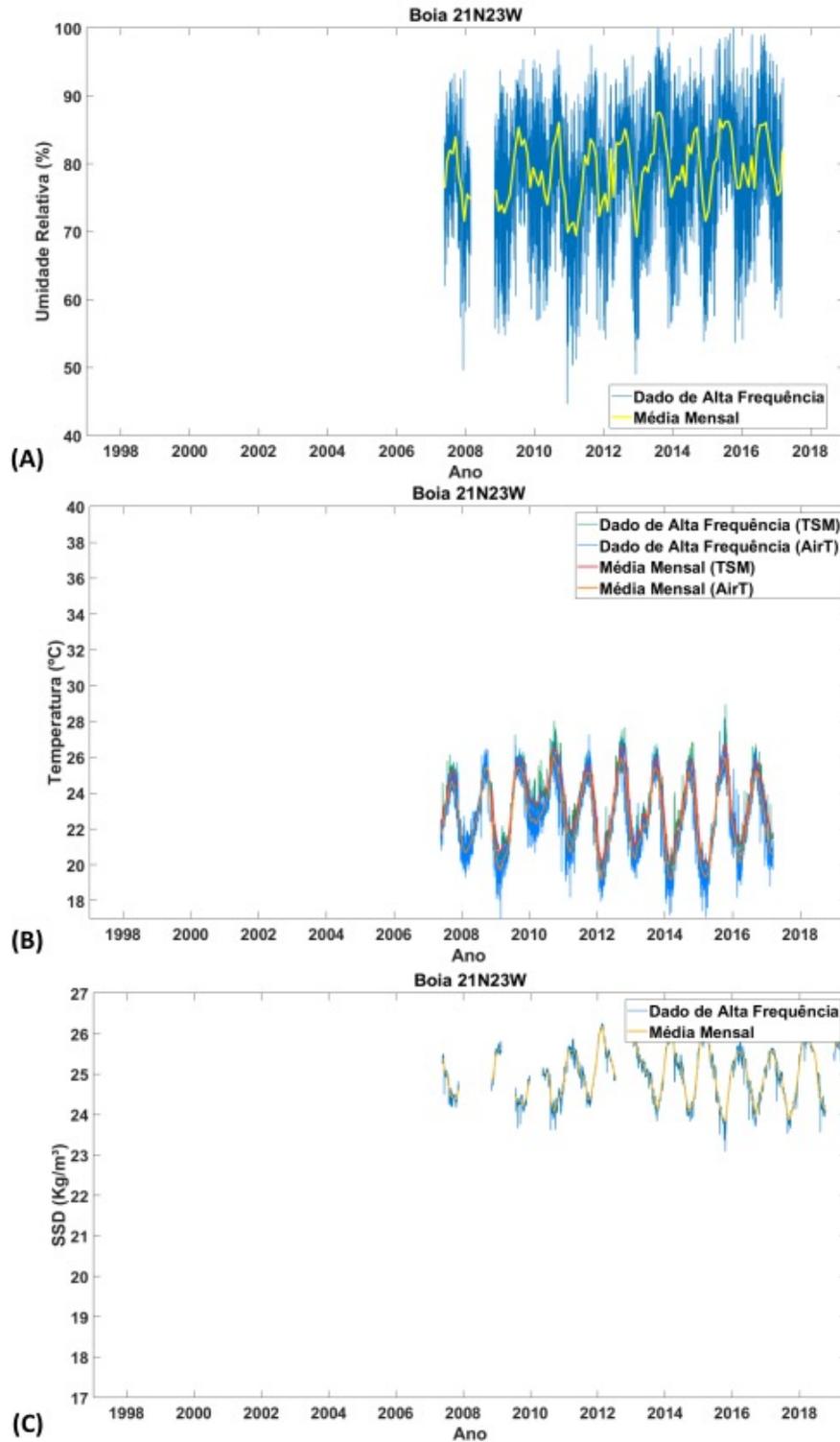


Figura S3 - Rosas dos ventos com os dados de velocidade e direção do vento na posição 21N 23W (A) da boia do projeto PIRATA, (B) do ERA5 (a partir de 1997), (C) do QuikSCAT (de 1999 a 2009) e (D) do ASCAT (de 2007-presente).

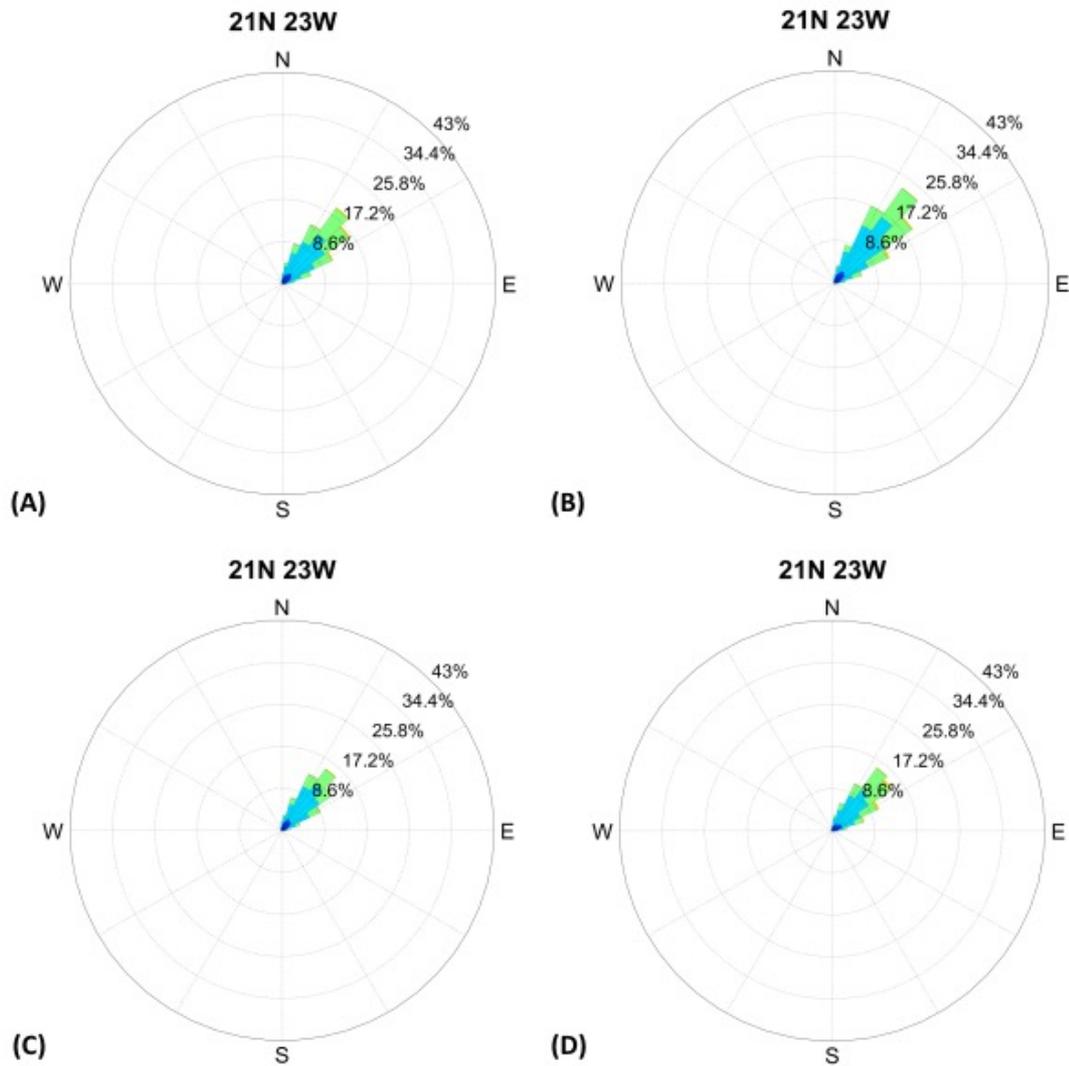


Figura S4 - Diagramas de Taylor comparando a velocidade do vento das boias PIRATA na posição 21N23W e os satélites QuikSCAT (esquerda) e ASCAT (direita). O ponto indicado como Ref se refere ao dado diário do satélite e os demais pontos coloridos a estatística da comparação com os dados da boia por hora do dia.

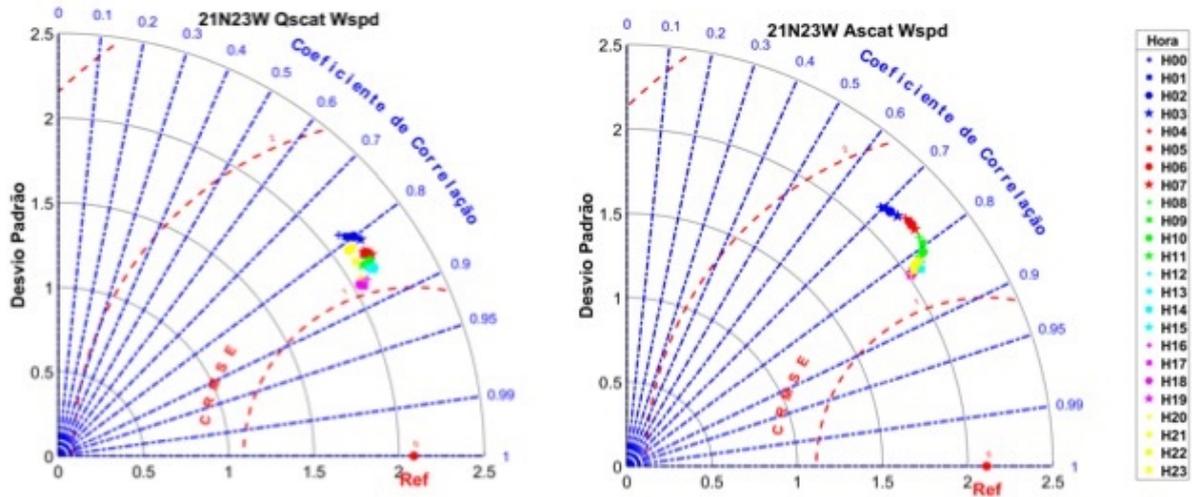


Figura S5 - Média mensal da diferença da velocidade do vento, em m/s, entre PIRATA e os satélites na posição 21N23W, de 1998 a 2009 (QuikSCAT) e 2009 a 2019 (ASCAT), em vermelho, e seus respectivos desvios padrão, em cinza.

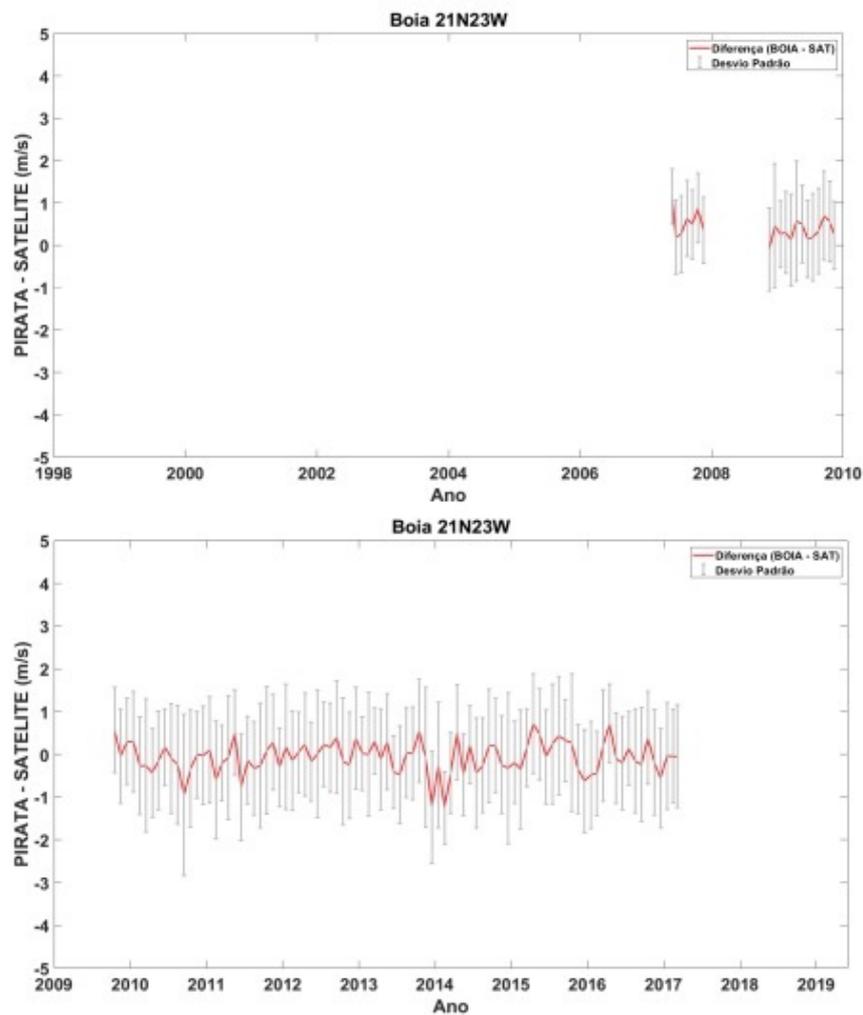


Figura S6 - Correlação (R), raiz do erro quadrático médio centralizado (CRMSE) e Desvio Padrão das variáveis do vento u, v e wspd, entre a boia PIRATA 21N23W e o ERA5 na mesma posição geográfica por hora do dia.

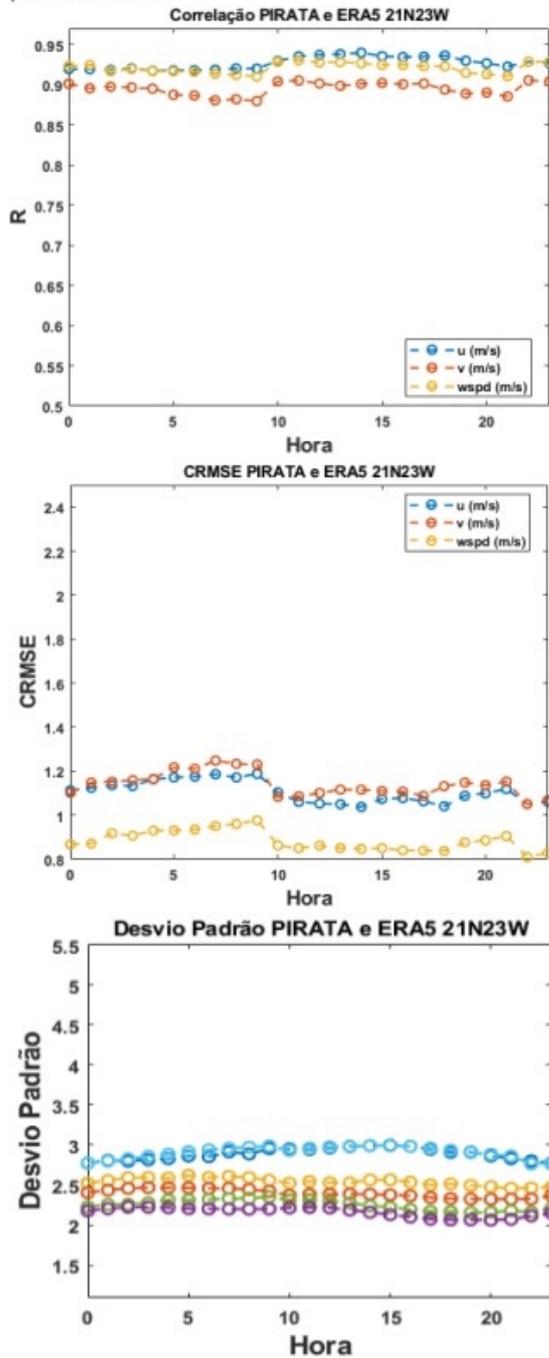


Figura S7 - Variação mensal das diferenças na velocidade do vento PIRATA – ERA5 e seus respectivos desvios padrões para a posição 21N23W.

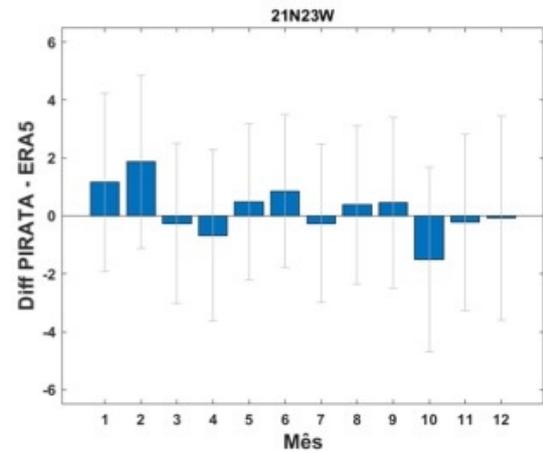


Figura S8 - Distribuição das diferenças de velocidade do vento entre o PIRATA – ERA5 em uma estimativa da função de densidade de probabilidade (em inglês, PDF - Probability density function estimate), onde a área de cada barra é o número relativo de observações. A linha azul representa o valor mais recorrente; caso esse valor fosse negativo, a linha seria vermelha.

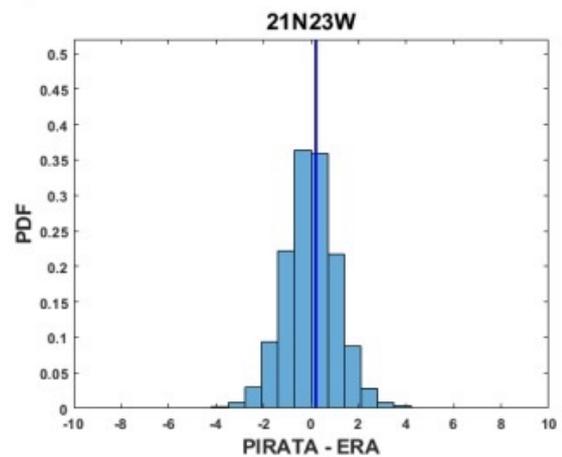


Figura S9 - *Scree plot* da posição 21N23W, utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem utilizadas no primeiro e segundo modelos de PCA propostos, respectivamente. O limite do critério do autovalor médio é indicado pela linha vermelha e o do critério do autovalor médio corrigido pela linha azul.

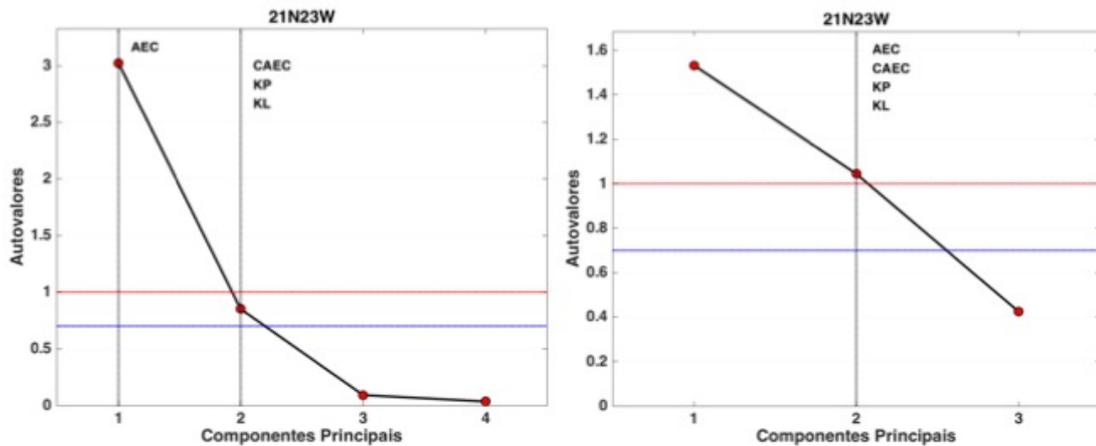


Figura S10 - *Score Plot* para o primeiro e segundo modelo, respectivamente, de PCA propostos da posição 21N23W. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. Os pontos representam as coordenadas de uma determinada amostra no espaço e seus relacionamentos, e a escala de cinza o nível de resposta da mesma.

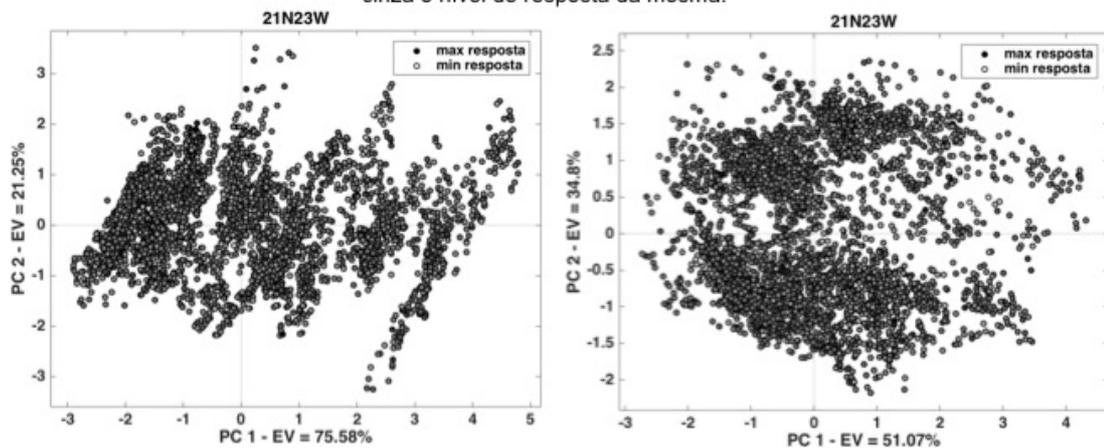


Figura S11 - *Loading Plot* da posição 21N23W para o primeiro e segundo modelo de PCA propostos, respectivamente. A primeira componente principal se encontra no eixo x e a segunda no eixo y. As variáveis utilizadas nesses modelos são: temperatura da superfície do mar (TSM), densidade ao nível do mar (SSD), temperatura do ar (airT) e umidade relativa do ar (rh).

