

# INVESTIGAÇÃO DOS FLUXOS TURBULENTOS NA INTERFACE AR-MAR NO ARQUIPÉLAGO DE SÃO PEDRO E SÃO PAULO

*Udo Tersiano Skielka<sup>1</sup>, Jacyra Soares<sup>1</sup> e Amauri Pereira de Oliveira<sup>1</sup>*

## RESUMO

Devido à ausência de dados observacionais é limitado o número de estudos de processos físicos atmosféricos e oceânicos no Atlântico tropical e sul que contribuem para as variações encontradas nos parâmetros de superfície marinha e para os fluxos turbulentos entre o oceano e a atmosfera. O presente trabalho de pesquisa se encaixa no Projeto FluTuA (Fluxos Turbulentos sobre o Atlântico). O FluTuA tem como objetivo primeiro investigar a interação oceano-atmosfera através da determinação observacional direta e contínua dos fluxos verticais turbulentos de calor sensível, calor latente e de momento sobre o oceano Atlântico equatorial no Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), localizado em uma região de mar aberto (00°56'N e 29°22'W). Há poucas referências na literatura de observações meteorológicas e oceanográficas efetuadas na região do ASPSP. Existem, entretanto, vários resultados de modelos numéricos sobre o Atlântico tropical. Este trabalho tem como objetivo estudar as características meteorológicas e oceanográficas na região do ASPSP utilizando dados de variáveis meteorológicas e oceanográficas disponíveis na internet a fim de obter uma caracterização dos fluxos turbulentos na região, os quais são pouco conhecidos e auxiliarão em futuros estudos do FluTuA.

## ABSTRACT

The amount of studies of atmospheric and oceanic physical processes over the tropical and south Atlantic is limited due to the lack of observational data. These processes induce the variations found in the sea surface patterns and the turbulent fluxes regime between the ocean and the atmosphere. This work is included in the FluTuA Project (Turbulent Fluxes over Atlantic). The FluTuA's first objective is to investigate the air-sea interaction through the direct and continuous observational determination of the turbulent vertical fluxes of sensible heat, latent heat and momentum over the Atlantic at the Archipelago of São Pedro and São Paulo (ASPSP), located at an open sea area over the equatorial Atlantic region (00°56'N e 29°22'W). There are few references of meteorological and oceanographic measurement data at the ASPSP region. There are, however, several numeric model

---

<sup>1</sup> Grupo de Micrometeorologia - Departamento de Ciências Atmosféricas IAG/USP. Rua do Matão n°1226 cep: 05508900  
Cidade Universitária - Tel: 55-11-30914702 - email: [udotskielka@yahoo.com.br](mailto:udotskielka@yahoo.com.br)

results about this region. This work intends to study the meteorological and oceanographic features over the ASPSP region using meteorological and oceanographic variables data available in the internet in order to do turbulent flux regime characterization, which are not very well known and will help oncoming FluTuA's investigations.

**Palavras-chave:** Interação ar-mar; Arquipélago de São Pedro e São Paulo; Fluxos turbulentos.

## 1. INTRODUÇÃO

Melhorar a previsão e o entendimento do sistema acoplado oceano-atmosfera requer um tratamento mais realístico dos fluxos de calor e movimento entre o oceano-atmosfera.

Além dos estudos diagnósticos e prognósticos de mudança climática muitos outros estudos requerem o conhecimento dos parâmetros de interação ar-mar de superfície: modelos operacionais de previsão de tempo, estudos sinóticos de meteorologia e oceanografia, estudos na região da plataforma continental, estudos dos ciclos biogênicos, modelos de previsão de onda, engenharia marinha, etc.

Apesar do conhecimento de fenômenos meteorológicos atuantes, pouco se sabe sobre os fluxos turbulentos da região equatorial do oceano Atlântico devido à falta de dados observacionais, o que limita o desenvolvimento de pesquisas.

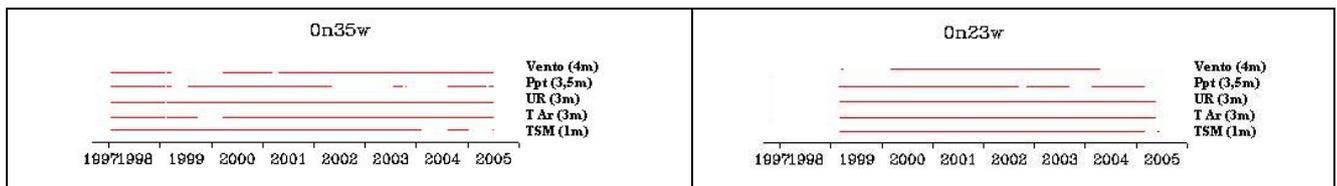
### 1.1. Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é fazer um estudo da interação ar-mar – fluxos verticais turbulentos de calor sensível, calor latente e momento - da região do ASPSP utilizando dados de projetos científicos disponibilizados na internet, seja de medidas diretas ou estimadas.

## 2. DADOS UTILIZADOS

### *Projeto PIRATA – Pilot Research Moored Array in the Tropical Atlantic*

Projeto em atividade desde 1997, realizado no âmbito internacional entre Brasil, França e EUA, o qual tem como objetivo a aquisição de dados oceanográficos e meteorológicos utilizando uma rede de quinze bóias oceanográficas espalhada pelo oceano Atlântico tropical. Nessas bóias estão instalados diversos instrumentos, a maioria realizando medidas de alta resolução (10 minutos). Os dados estão disponíveis no endereço <http://www.pmel.noaa.gov/pirata/>. As variáveis utilizadas neste trabalho são mostradas na Fig. 1.



**Figura 1** – Série temporal de medidas realizadas nas respectivas bóias oceanográficas do projeto Pirata utilizadas no trabalho (B35W e B23W). As séries de medidas do *Projeto Pirata* eventualmente possuem intervalos com falta de dados devido a ocorrências técnicas. Essas informações estão disponibilizadas no site do projeto.

### *Projeto OAFflux – Objectively Analyzed Air-Sea Flux*

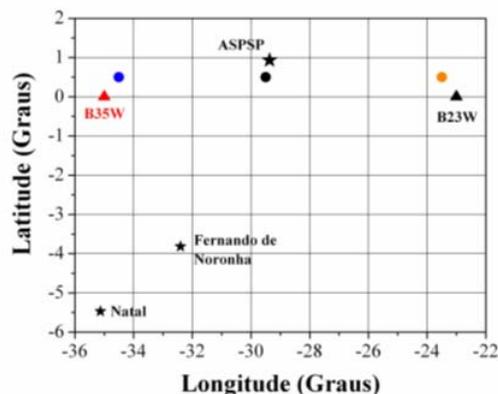
Projeto do *Woods Hole Oceanographic Institute*, tem como principal objetivo estimar, através de métodos numéricos acoplados - utilizando dados de observações em superfície, satélites e gerados por modelos numéricos - os fluxos de troca de energia entre o oceano e a atmosfera (exceto o fluxo de momento) em todo o globo, a cada 0°30' de latitude por 0°30' de longitude. O projeto disponibiliza também estimativas da temperatura do ar e TSM em seu *web site* -

<http://www.whoi.edu/science/PO/people/lyu/res-flux.html>. Atualmente o projeto apresenta dados diários e mensais desde 1981 até 2002.

Do projeto OAFflux foram utilizados os dados de temperatura do ar e TSM de 1989 a 1999. Os dados de fluxos turbulentos de calor sensível e latente usados para comparação com os fluxos estimados com as variáveis do projeto PIRATA foram de 1999 a 2002. Os dados do OAFflux não possuem interrupções em suas séries temporais.

### 3. REGIÃO DE ESTUDO

Neste estudo foram utilizados os dados de duas bóias oceanográficas do Projeto PIRATA: uma situada a 0°N 23°W (B23W), a aproximadamente 720 quilômetros de distância do arquipélago, e a outra situada a 0°N 35°W (B35W), a cerca de 635 quilômetros do arquipélago. O ASPSP se encontra geograficamente entre as duas bóias, conforme ilustrado na Fig. 2.



**Figura 2** - Localização geográfica dos dados utilizados no estudo: bóia Pirata em 35°W (triângulo vermelho), bóia Pirata em 23°W (triângulo preto) e dados do Projeto *OAFflux* (círculos). Como referência foram colocados alguns locais geográficos (estrelas).

Para comparação com os dados de temperatura do ar e TSM do PIRATA foram utilizados os dados do OAFlux do ponto de grade mais próximo do ASPSP, a 0,5°N 29,5°W, já que o objetivo foi de fazer um reconhecimento do clima da região. Para o estudo de fluxos turbulentos foram utilizados dados dos dois pontos de grade do OAFlux mais próximos às bóias oceanográficas (0,5°N 34,5°W e 0,5°N 23,5°W), ambos a aproximadamente 70km de cada bóia.

## 5. IMPLICAÇÕES E PARAMETRIZAÇÃO DOS FLUXOS VERTICAIS TURBULENTOS

Os fluxos turbulento de momento ( $\vec{\tau}$ ), calor sensível ( $H$ ) e calor latente ( $LE$ ) são representados pelas relações abaixo.

$$\begin{aligned} |\vec{\tau}| &= \rho \overline{w'u'} = -\rho u_*^2 \\ H &= \rho c_p \overline{w'T'} = -\rho c_p u_* T_* \\ LE &= \rho L_e \overline{w'q'} = -\rho L_e u_* q_* \end{aligned} \quad (1)$$

Nas Equações (1),  $w'$ ,  $T'$ ,  $q'$  e  $u'$  representam as flutuações da velocidade vertical, temperatura, umidade e vento, respectivamente, em torno de um valor médio definido experimentalmente de acordo com a região de estudo. Como pode ser observado nas equações, a turbulência é calculada através da covariância entre essas flutuações, sendo possível medir esses fluxos “diretamente” utilizando instrumentos meteorológicos de alta precisão. A constante  $\rho$  é a densidade do ar,  $c_p$  é o calor específico do ar a pressão constante e  $L_e$  é o calor latente de vaporização. As escalas características  $T_*$ ,  $q_*$  e  $u_*$  são baseadas na teoria da similaridade de Monin-Obukhov (Panofsky e Dutton, 1984; Greenaert, 1990).

Devido a dificuldade de obtenção das medidas de fluxos, fórmulas de parametrizações são utilizadas na determinação destes a partir de variáveis básicas (temperatura ar, TSM, umidade, intensidade do vento) medidas *in situ* ou estimadas por sensoriamento remoto. Essas parametrizações são utilizadas em modelos numéricos na estimativa de fluxos em grande escala, já que são poucos os locais que medem esses fluxos diretamente sobre o oceano. A utilização das fórmulas bulk é o método mais comum no meio científico para parametrização de fluxos turbulentos sobre o oceano e tem sido constantemente aprimoradas por pesquisadores. De modo mais simplificado, as fórmulas bulk podem ser representadas pela relação (WGASF, 2000):

$$F \propto C_{xz} u_z (\Delta s_z) \quad (2)$$

onde  $F$  é o fluxo,  $u_z$  é velocidade do vento medida a uma altura de referência  $z$  e  $\Delta s_z$  é a diferença do valor da variável básica apropriada ao fluxo (velocidade do vento, temperatura ou umidade) entre a

superfície e a altura  $z$ . A maioria dos processos físicos têm sido parametrizados pelos chamados “coeficiente de transferência”,  $C_{XZ}$ , para cada fluxo ( $C_D$ ,  $C_E$ ,  $C_H$  – coeficiente de arrasto, de transferência de umidade e de calor, respectivamente), os quais variam com a altura  $z$  e a estabilidade atmosférica em relação à superfície (intensidade do vento e rugosidade da superfície), tendo, geralmente, a altura de dez metros e estabilidade atmosférica neutra como referência.

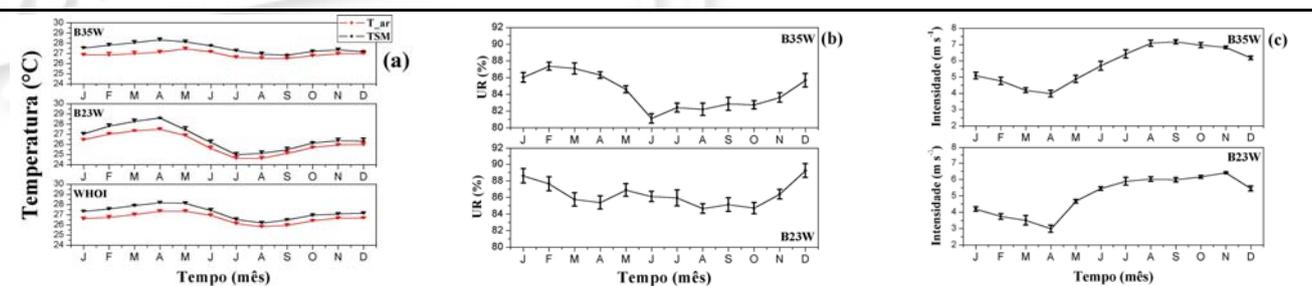
Apesar de existirem poucos locais de medições diretas de fluxos sobre o oceano, esses experimentos são muito importantes e necessários para o desenvolvimento, calibração e verificação das equações de parametrização.

Os coeficientes de transferência utilizados neste trabalho foram aqueles mais utilizados atualmente no meio científico e que são mais adequados à intensidade média dos ventos na região em estudo. Foram utilizados os coeficientes de arrasto determinado por Garrat (1977)

( $10^3 C_{DN} = 0,75 + 0,067 \bar{u}_z$ ) e os coeficientes de calor e umidade determinados por Smith (1988) ( $10^3 C_{HN} = 1,0$  e  $10^3 C_{EN} = 1,2 \pm 0,1$ ).

## 6. RESULTADOS

Observando a Fig. 3 é possível verificar a existência de duas estações bem definidas: na primeira metade do ano as temperaturas do ar e do mar são mais altas assim como seus gradientes e os ventos menos intensos, enquanto que para a segunda metade há uma inversão dessas variáveis, tendo assim os extremos entre março e abril e entre setembro e novembro.

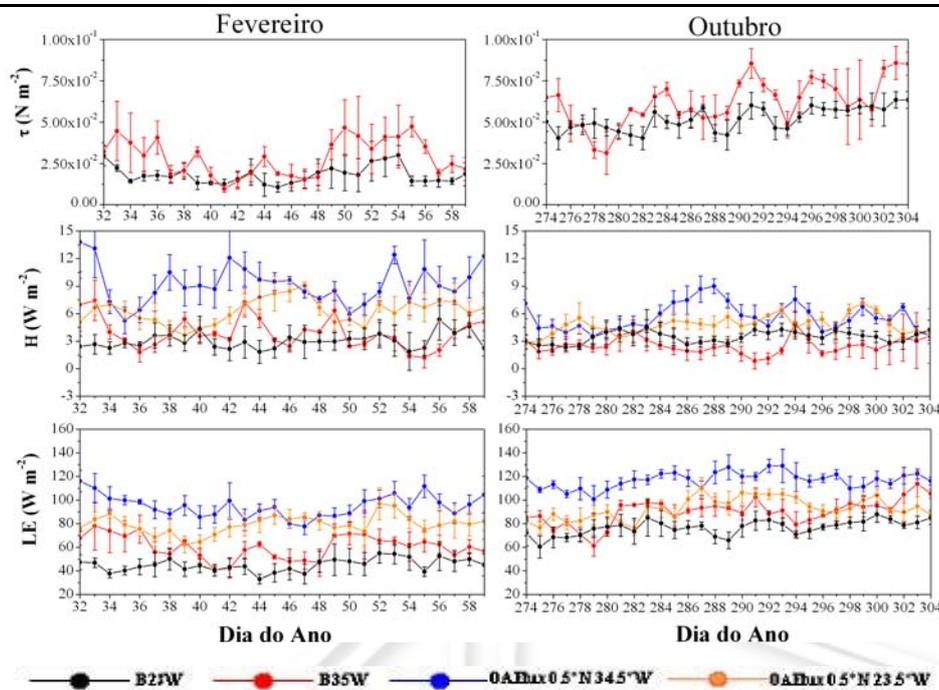


**Figura 3** – Climatologia das temperaturas do ar e do mar (a), umidade relativa (b) e intensidade do vento (c) para cada fonte de dados.

A Fig. 4 apresenta os fluxos estimados representativos de duas estações (fevereiro e outubro) e, para comparação, os fluxos do OAFlux. Como o fluxo de momento depende da intensidade do vento (Equação 2 aplicada ao fluxo de momento), ambos possuem o mesmo ciclo anual. O fluxo de momento na B35W se apresenta maior que na B23W durante, praticamente, todo o ano.

O fluxo de calor sensível não apresenta uma grande variação em seu ciclo anual, principalmente para os fluxos parametrizados. Como há uma dependência térmica do fluxo com o gradiente de temperatura entre a superfície do mar e do ar e uma dependência mecânica com a

intensidade do vento (Equação 2), esse fluxo tende a se manter sem grandes variações durante o ano, já que o ciclo anual do gradiente de temperatura (Fig. 3a) e da intensidade do vento (Fig. 3c) são inversos. As variações anuais dos fluxos calculados nas bóias PIRATA são bem próximas.



**Figura 4** – Climatologia dos fluxos turbulentos de momento, calor sensível e calor latente estimados com os dados do Projeto PIRATA e os fluxos de calor latente e sensível estimados pelo OAF flux para os meses de fevereiro e outubro.

O fluxo de calor latente se apresenta maior no segundo semestre, sendo os valores da B23W em geral menores que o da bóia a 35°W. Como sobre o oceano o gradiente de umidade entre a superfície e a atmosfera é praticamente constante durante o ano, variações no fluxo de calor latente são influenciados, principalmente, pela variação anual da intensidade do vento (Equação 2).

As variações anuais dos fluxos de calor sensível e latente do OAF flux são bem próximas às dos fluxos estimados, porém, o OAF flux apresenta, em geral, valores maiores do que os estimados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Garratt, J.R., 1977: Review of Drag Coefficients over Oceans and Continents, *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 915-929.
- Geernaert, G.L., 1990: Bulk parameterization for the wind stress and heat fluxes. *Surface Waves and Fluxes*, **1**, 91-172.
- Panofsky, H.A. and J.A. Dutton, 1984: *Atmospheric Turbulence*. 397pp, Wiley-Interscience, Nova York.
- Smith D.S., 1988: Water vapor flux at the sea surface. *Boudary – Layer Meteorology*, **47**, 277-293
- Smith D.S., 1988: Coefficients for sea surface wind stress, heat flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature. *J. Geophys. Res.*, **93**, 15467-15472.
- WGASF, 2000: Intercomparison and validation of ocean-atmosphere energy flux fields. Final report of Joint WCRP/SCOR Working Group on Air-Sea fluxes (SCOR working group 110).