

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS
ATMOSFÉRICAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

FÁBIO VIEIRA MACHADO

O deslocamento da piscina de água quente do Pacífico:

El Niño

São Paulo

2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

FÁBIO VIEIRA MACHADO

**O deslocamento da piscina de água quente do Pacífico:
El Niño.**

Dissertação apresentada ao Instituto de
Astronomia, Geofísica e Ciências
Atmosféricas da Universidade de São
Paulo para a obtenção do Título de Mestre
em Ciências.

Área de Concentração: Meteorologia.
Orientador(a): Dr(a). Jacyra Soares

São Paulo

2005

FOLHA DE APROVAÇÃO

Fábio Vieira Machado

O deslocamento da piscina de água quente do Pacífico: El Niño.

Dissertação apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para a obtenção do Título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Meteorologia.

Aprovado em:.....

BANCA EXAMINADORA

Prof.(a). Dr(a).....

Instituição:.....Assinatura:.....

Prof.(a). Dr(a).....

Instituição:.....Assinatura:.....

Prof.(a). Dr(a).....

Instituição:.....Assinatura:.....

DEDICATÓRIA

A Alexandre e Sofia Féo, meus avós, com amor, respeito, admiração e gratidão pela incansável presença ao longo da minha vida.

A Eliana Vieira Machado (Féo), minha mãe, com respeito e agradecimento mais que merecedor pela compreensão, carinho e presença em todos os momentos.

A Stephanie, minha sobrinha, que com carinho muito faz sorrir meu coração.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meu reconhecimento ao *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico* (CNPq), que disponibilizou a bolsa de mestrado 131084/2003-8, e ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP), onde esta dissertação foi desenvolvida. Manifesto ainda meu agradecimento aos responsáveis pelo Laboratório de Micrometeorologia que cederam o espaço para elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Victor d'Ávila que me auxiliou no desenvolvimento computacional para obtenção das séries temporais estudadas. Obrigado ainda pela sua amizade.

Aos meus eternos amigos Alexandre Féo e Eliana Vieira Machado que sempre estiveram ao meu lado.

Minha gratidão estende-se as verdadeiras amizades conquistadas na cidade de São Paulo. Neste momentos lembro-me também dos(as) grandes amigos(as) que deixei na cidade onde nasci e cresci por grande parte da minha vida, o Rio de Janeiro. Ainda reconheço os amigos que fiz longe, percorrendo as viagens acadêmicas.

A Deus. Obrigado pela oportunidade de poder aprender.

RESUMO

MACHADO, F. V. O deslocamento da piscina de água quente do Pacífico: El Niño. 2005. 96 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

As variabilidades da posição da piscina de água quente (PAQ) do Pacífico são analisadas utilizando 24 anos de observação da temperatura superficial do oceano (TSO) de 1981 até 2004. Os deslocamentos desta piscina ($TSO > 29^{\circ}\text{C}$) foram estimados utilizando as componentes de sua posição média, denominada de centróide, calculadas em coordenadas esféricas. A transformada de ondeleta, que é capaz de decompor os sinais no domínio do tempo e da frequência, é utilizada para analisar a série temporal do centróide. O foco é a variabilidade interanual e o ciclo anual do deslocamento zonal do centróide. O deslocamento meridional do centróide da PAQ está em fase com o ciclo anual solar. As maiores amplitudes no deslocamento meridional são identificadas nas migrações para norte porque a Austrália funciona como uma barreira natural imposta ao movimento da PAQ. A análise espectral revelou que o deslocamento zonal está relacionado com os eventos de *El Niño-La Niña* e com o ciclo anual. As intensidades do fenômeno podem ser observadas no espectro de energia que marca inclusive a duração de cada episódio manifestado pela permanência do centróide na região central-leste do Oceano Pacífico. O espectro de energia também detectou picos de oscilações nas escalas de 24-26 e 48-52 semanas e 2.6 anos. O deslocamento zonal do centróide apresenta-se como uma forma alternativa para monitorar o fenômeno El Niño. A principal vantagem deste método está no fato de depender apenas de um único parâmetro arbitrário, o limiar da TSO para determinar a PAQ. Além disso, a componente zonal do centróide permite elaborar um índice que varia no tempo e no espaço.

Este método apresenta ainda a vantagem de independe de uma climatologia para poder identificar os episódios de El Niño.

Palavras chaves: El Niño. Centróide. Variabilidade interanual. Ondeleta.

ABSTRACT

MACHADO, F. V. The displacement of the Pacific warm pool: El Niño. 2005. 96 f. Dissertation (Master) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

The variabilities of the position of the Pacific warm pool (PAQ) were analyzed using 24 years of sea surface temperature (TSO) observations from 1981 to 2004. The displacements of the PAQ ($TSO > 29^{\circ}\text{C}$) were estimated using the components of its medium position, called centroid, computed in the spherical coordinates. Wavelet transform, which can unfold signals in both time and frequency domains, is used to analyze the timeseries of the centroid. The focus is the interannual variability and the annual cycle of the zonal displacement of the centroid. The annual cycle is the dominant feature in the meridional displacement of the centroid. The largest amplitude in the meridional displacement is identified in the migrations for north because Australia works as a natural barrier imposed to the movement of PAQ. Spectral analysis revealed that the zonal displacement is related to the *El Niño-La Niña* event and the annual cycle. The intensities of phenomenon can be observed by wavelet power spectra that marks the duration of each event revealed by the persistence of the centroid in the central-east region of the Pacific Ocean. The wavelet power spectra also detected peaks in the 24-26 and 48-52 week and 2.6 year bands. Therefore, the zonal displacement of the centroid presents an alternative form to monitor the El Niño phenomena. The main advantage of this method is that it depends only on one arbitrary parameter, the threshold of the TSO to define the PAQ. In addition, the zonal component of the centroid permits to elaborate an index that varies in both time and space. This method presents yet the advantage of climatology independency to indentify the El Niño episodes.

Keywords: El Niño. Centroid. Interannual variability. Wavelet.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esquema das relações entre o oceano e a atmosfera como proposto por Bjerkness (1969). Note o contraste de temperatura entre o setor leste (azul) e oeste (vermelho) forçado pelos ventos em superfície representado pelas setas brancas no canto direito da imagem. As setas ascendentes vermelhas no canto esquerdo representam os fluxos de calor dado pela diferença de temperatura entre o oceano e o ar da camada atmosférica adjacente. Ainda no oeste, em branco estão representadas as nuvens e a precipitação formada sobre a região de temperatura mais elevada. Fonte: http://library.thinkquest.org/20901/overview_4.htm.....24

Figura 1.2 - Figuras esquemáticas ilustrando a desintensificação dos aliseos representado por uma única seta branca (superior esquerda), a subsidência da termoclina no setor leste indicada pela seta vermelha (figura superior direita), e o deslocamento das águas quentes e da atividade convectiva para parte central-leste do oceano (figura inferior), como proposto por Bjerkness (1969). Fonte: http://library.thinkquest.org/20901/overview_4.htm.....27

Figura 1.3 - Regiões oceânicas sobre a superfície do Pacífico onde são feitas as medidas da temperatura superficial para monitoramento do fenômeno ENOS.....29

Figura 1.4 - Anomalia mensal da TSO nas regiões do Oceano Pacífico de monitoramento do fenômeno ENOS, desde novembro de 1981 até outubro de 2004. O período base da normal climatológica é de 1971 até 2000, de acordo com a Organização Meteorológica Mundial. Fonte: <ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/cpc/wd52dg/data/indices/stoi.indices>31

Figura 1.5 - Série temporal do IOS normalizado, desde novembro de 1981 até outubro de 2004. O eixo das ordenadas está invertido, com

valores crescentes para baixo. Valores negativos (positivos) indicam anos sob atuação do fenômeno *El Niño* (*La Niña*). Fontes: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/Readme.index.htm> e <ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/cpc/wd52dg/data/indices/soi.....>32

Figura 1.6 - Série mensal da componente zonal do centróide da PAQ (linha contínua, eixo vertical esquerdo) e anomalia da TSO (linha traço e ponto, eixo vertical direito) na região de monitoramento do Oceano Pacífico conhecida como N1.2. Fonte: MACHADO (em fase de elaboração).....40

Figura 2.1 - Sistema de coordenada direto.....44

Figura 2.2 - Esquema para obter o ponto P no sistema de coordenada.....45

Figura 2.3 - Parte real da ondeleta Morlet utilizada neste trabalho. Eixo vertical representa a escala da ondeleta e o eixo horizontal o parâmetro de localização.....51

Figura 2.4 - (A) Série temporal da anomalia da TSO na região N3. Eixo horizontal está o tempo em anos e na vertical a anomalia representada em graus Celsius. (B) Correspondente espectro de energia da ondeleta Morlet. Eixo horizontal escalonado com o gráfico (A) e na vertical os períodos em meses na escala diádica. Ainda estão representados o cone de influência (linha contínua preta) e o nível de confiança de 95% (contornos pretos). A energia é distribuída através das cores com energia crescente para a tonalidade avermelhada. Período de análise é de 1871 até 1997. Fonte: <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/software.html>.....52

Figura 3.1 - Representação do Oceano Pacífico com destaque para a PAQ do Pacífico com temperatura acima de 29°C (em vermelho). O 'x' branco representa a posição do centróide. Em preto os continentes e em azul o oceano com temperatura abaixo de 29°C. (A) Março de 1998, *El Niño*; (B) Setembro de 1998, *La Niña*. Fonte: d'Ávila e Machado (2004).....54

Figura 3.2 - Série semanal das componentes (A) meridional e (B)

zonal do centróide da PAQ com $T \geq 29^{\circ}\text{C}$. A série temporal inicia em 8 de novembro de 1981 e termina em 27 outubro de 2004.....56

Figura 3.3 - Posição do centróide da PAQ durante os momentos com grandes migrações para leste, coincidentes com os *El Niños* de (A) 1982-83, (B) 1986-87, (C) 1992-93 e (D) 1997-98. O primeiro ponto equivale a primeira semana de novembro do primeiro ano em questão; o último ponto corresponde a época na qual o centróide apresenta a máxima posição leste. Os símbolos '*' e 'o' em (C) indicam os dois períodos da trajetória que o centróide deslocou-se para máxima posição ao leste durante o evento 1992-93.....58

Figura 3.4 - Posição do centróide no setor oeste do Pacífico em (A) 1984, (B) 1988, (C) 1999 e (D) 2000, coincidentes com os anos de *La Niña*. O primeiro ponto equivale a semana de maio que apresentou a primeira posição a oeste da média (160°E) e o ponto final corresponde a última semana de dezembro. Simbolo azul escuro (claro) represente o deslocamento para o hemisfério norte (sul).....60

Figura 3.5 - (A) Freqüência acumulada da posição zonal do centróide da PAQ e (B) histograma com dez intervalos de classes iguais de amplitude 6.67° . Dados semanais de novembro de 1981 a outubro de 2004.....62

Figura 3.6 - (A) Série temporal da componente zonal do centróide da PAQ. O eixo vertical é a longitude em graus e o eixo horizontal é o tempo em anos. (B) Espectro de ondeleta para a série temporal de (A). O eixo vertical é o período em semanas na escala diádica e o eixo horizontal o tempo em anos (escalonado com o eixo horizontal de (A)). O cone de influência está ilustrado através da linha contínua preta. A energia está representada em faixa de cores com maior (menor) valor preenchendo a coloração avermelhada (azulada).....64

Figura 3.7 - Série semanal da posição zonal do centróide da PAQ para os eventos de 1982-83 (linha contínua preta), 1986-87 (linha '-*'

preta), 1992-93 (linha pontilhada preta) e 1997-98 (linha contínua vermelha). O tempo é da primeira semana de outubro do ano 1 (1982; 1986; 1992; e 1997) até a última semana de setembro do ano 2 (1983; 1987; 1993; e 1998).....65

Figura 3.8 - Série semanal da componente zonal do centróide da PAQ para os eventos de 1982-83 (linha contínua) e 1997-98 (linha pontilhada). O tempo é da primeira semana de 1982 (1997) até a última semana de 1983 (1998).....67

Figura 3.9 - Índices mensais (A) da anomalia da TSO na região N1.2 e (B) do IOS durante os episódios de 1982-83 (linha contínua) e 1997-98 (linha tracejada). Fonte dos dados de anomalia da TSO e IOS podem ser achadas, respectivamente, em: <ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/cpc/wd52dg/data/indices/sstoi.indices>; <ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/cpc/wd52dg/data/indices/soi>.....68

Figura 3.10 - Série semanal da (A) componente meridional e (B) zonal do centróide da PAQ. (C) Posição do centróide da PAQ durante o ciclo ENOS de 1997-98 com grandes migrações para leste e retorno para oeste. O período de registro é de janeiro de 1997 até dezembro de 1998. A posição em (C) é numerada a cada cinco pontos (ou semanas). O símbolo ‘*’ representa migração para leste e ‘o’ para oeste. As cores pretas e azuis escuros em cada símbolo denotam, respectivamente, o centróide em torno da posição média (160°E) e a oeste desta longitude. Cores azuis claras e vermelhas ilustram a posição do centróide a leste daquela longitude..... 70

Figura 3.11 - Isotherma de 20°C na faixa equatorial do Oceano Pacífico para os meses de: (A) janeiro (linha pontilhada), março (linha contínua) e maio (linha tracejada) de 1997; e (B) julho (linha pontilhada), agosto (linha contínua) e setembro (linha tracejada) de 1997.....72

Figura 3.12 - Média trimestral da velocidade vertical do vento em

coordenadas isobáricas (Pa/s) entre as latitudes 2°-5°S e longitudes 120°E-80°W de janeiro a março de 1997. Valores negativos (positivos) indicam movimentos ascendentes (descendentes). Eixo horizontal em graus e vertical em hPa. Fonte: <http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/Composites/comp.pl>.....73

Figura 3.13 - Media trimestral da velocidade vertical do vento em coordenadas isobáricas (Pa/s) entre as latitudes 2°-5°N e longitudes 120°E-80°W de junho a agosto de 1997. Valores negativos indicam movimentos ascendentes. Eixo horizontal em graus e vertical em hPa. Fonte: <http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/Composites/comp.pl>.....74

Figura 3.14 - Isotherma de 20°C na faixa equatorial do Oceano Pacífico para os meses de: (A) dezembro (linha pontilhada), janeiro (linha contínua) e fevereiro (linha tracejada) de 1998, ano de *El Niño*; e (B) julho (linha pontilhada), agosto (linha contínua) e setembro (linha tracejada) de 1998, ano de *La Niña*.....76

Figura 3.15 - Media trimestral da velocidade vertical do vento em coordenadas isobáricas (Pa/s) entre as latitudes 2°-5°S e longitudes 140°E-80°W de janeiro a março de 1998, durante o *El Niño*. Valores negativos indicam movimentos ascendentes. Eixo horizontal em graus e vertical em hPa. Fonte: <http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/Composites/comp.pl>.....77

Figura 3.16 - Média bimensal da velocidade vertical em coordenadas isobáricas (Pa/s) entre as latitudes 2°-8°N e longitudes 140°E-80°W para agosto-setembro de 1998, durante a *La Niña*. Valores negativos (positivos) indicam movimentos ascendentes (descendentes). Eixo horizontal em graus e vertical em hPa. Fonte: <http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/Composites/comp.pl>.....79

Figura 3.17 - Parte real da ondeleta para o deslocamento zonal do centróide da PAQ entre janeiro de 1996 e 2000. O eixo horizontal é correspondente ao período em semanas na escala diádica. No eixo

vertical está o tempo em anos. A energia associada ao valor negativo (positivo) da oscilação está distribuída para coloração azul (vermelha).....80

LISTA DE ABREVIATURAS

AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer)</i>
COADS	<i>Comprehensive Ocean and Atmospheric Data Sets</i>
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
IOS	Índice de Oscilação Sul
LE	Linha Equatorial
LMD	Linha Internacional de mudança de data
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Center for Environmental Prediction</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NWS	<i>National Weather Service</i>
OMJ	Oscilação de Madden-Julian
PAQ	Piscina de água quente (do Pacífico)
PNM	Pressão ao Nível do Mar
Região N1.2	Região Nino 1+2
Região N3	Região Nino 3
Região N4	Região Nino 4
Região N3.4	Região Nino 3.4
TAO	<i>Topical Atmosphere Ocean</i>
TOGA	<i>Topical Ocean Glogal Atmosphere</i>
TSO	Temperatura Superficial do Oceano
XBT	<i>Expendable Bathythermograph</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	17
1.1 - INTRODUÇÃO.....	17
1.2 - OBJETIVOS.....	20
1.3 - ASPECTOS OCEANOGRÁFICOS E ATMOSFÉRICOS NO PACÍFICO TROPICAL DURANTE O FENÔMENO ENOS.....	21
1.4 - O MONITORAMENTO DO FENÔMENO ENOS.....	28
1.4.1 - ANOMALIA DA TEMPERATURA SUPERFICIAL NO OCEANO PACÍFICO.....	28
1.4.2 - ÍNDICE DE OSCILAÇÃO SUL.. ..	31
1.5 - ANÁLISES EM ONDELETAS APLICADAS AOS ÍNDICES DE MONITORAMENTO DO ENOS.....	33
1.6 - A PAQ.....	36
CAPÍTULO 2: DADOS E METODOLOGIA.....	41
2.1 - DESCRIÇÃO DOS DADOS	41
2.1.1 - TSO.....	41
2.1.2 - ISOTERMA DE 20°C.....	42
2.1.3 - VELOCIDADE VERTICAL DO VENTO.....	43
2.2 - PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	43
2.2.1 - O CENTRÓIDE DA PAQ.....	44
2.2.2 - ONDELETA.....	48
CAPÍTULO 3: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	53
.....	53
3.1 - O POSICIONAMENTO DO CENTRÓIDE.....	54
3.2 - O DESLOCAMENTO ZONAL DO CENTRÓIDE.....	61
3.3 - O EPISÓDIO DE 1997-98.....	70
CAPÍTULO 4: DISCUSSÕES E CONCLUSÕES.....	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

CAPÍTULO 1

- CONSIDERAÇÕES INICIAIS -

1.1 - INTRODUÇÃO

A principal fonte de energia na forma de calor do oceano para atmosfera é proveniente das regiões oceânicas que apresentam as mais altas temperaturas conhecidas como piscina quente (*warm pool*). Sabe-se que a diferença de temperatura entre o ar da camada mais baixa da atmosfera e a água superficial do oceano provoca transferência de calor entre os dois fluidos, e a atmosfera, por apresentar menor capacidade térmica, tende a se ajustar à temperatura do oceano (NILER, 1998).

McPhaden e Picaut (1990), McPhaden (1999) e Nof e Gorder (1999) denominaram como piscina de água quente (PAQ) do Pacífico as águas situadas predominantemente na região oeste do Oceano Pacífico que apresentam temperaturas acima de 29°C. No entanto, diversos autores têm definido a PAQ do Pacífico com diferentes limites de temperatura. Por exemplo, Delcroix et al. (2000) classificaram a PAQ como as águas superficiais com temperaturas maiores que 28,5°C; Yan et al. (1992a,b), Ho et al. (1995) e Yan et al. (1997) consideraram a PAQ como as águas com temperaturas acima de 28°C.

Segundo Wells (1997) e Philander (1990), a superfície dos oceanos com temperatura acima de 27,5°C fornece condições favoráveis para formar células atmosféricas convectivas. No entanto, esta não é uma condição suficiente porque a convecção pode estar ausente em muitas áreas onde a temperatura superficial do oceano (TSO) excede este valor (PHILANDER, 1990; MCPHADEN, 1999).

McPhaden (1999) analisou o vento zonal, a TSO e a radiação de onda longa emitida sobre a região do Oceano Pacífico para confirmar que os mais fortes ventos em superfície e a convecção profunda estiveram somente sobre as águas mais aquecidas que apresentavam TSO maiores que 29°C.

O deslocamento longitudinal da PAQ também tem despertado bastante interesse no estudo do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS). Análises de corrente no Oceano Pacífico realizadas por McPhaden e Picaut (1990) foram necessárias para ratificar que durante os anos de *El Niño* as anomalias positivas da TSO no Pacífico resultam do deslocamento anômalo da água aquecida do Pacífico oeste para leste. Segundo Picaut et al. (1996), a célula ascendente de convecção atmosférica e a convergência dos ventos em baixos níveis seguem a trajetória zonal da PAQ durante as fases fria e quente do ciclo ENOS.

Ho et al. (1995) e Yan et al. (1997) utilizaram a TSO estimadas dos satélites do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) para monitorar o movimento da PAQ. Os autores calcularam o centróide da PAQ em coordenadas planas e demonstraram que o movimento do centróide pode resumir o deslocamento da PAQ. Machado e d'Ávila (2005) traçaram a trajetória percorrida pelo centróide calculado em coordenadas esféricas e confirmaram que nos anos de *La Niña* a PAQ

permanece na região oeste e durante o *El Niño* a PAQ desloca-se para a região central do Pacífico.

Segundo Ho et al. (1995), Yan et al. (1997) e Machado e d'Ávila (2005) o deslocamento zonal do centróide da PAQ apresenta oscilações que estão em fase com o ciclo ENOS. Por este motivo, Machado comparou a migração zonal do centróide da PAQ com a anomalia da TSO no Pacífico (em fase de elaboração)¹. O autor relata que a anomalia positiva da TSO corresponde ao deslocamento do centróide para leste, principalmente em anos como os de 1983 e 1998, que apresentaram uma evolução anormal em seu posicionamento, indicando os eventos de *El Niño* no Pacífico.

Este trabalho faz uma análise das séries temporais das componentes do centróide da PAQ calculadas em coordenadas esféricas com a proposta principal de investigar as variabilidades no tempo e no espaço do deslocamento zonal da PAQ do Pacífico. Na convencional transformada de Fourier, a série temporal é mapeada no domínio da frequência de tal maneira que toda informação no domínio do tempo é perdida. Por este motivo, é utilizada a transformada de ondeleta porque esta análise mapeia a série temporal simultaneamente no tempo e no espaço (ou frequência), tanto que é possível visualizar como as amplitudes das flutuações numa frequência particular variam com o tempo (GU; PHILANDER, 1995). Este método tem sido utilizado em diversos campos da ciência e da engenharia, mas sua aplicação na oceanografia e meteorologia é mais recente.

A organização deste trabalho é feita da seguinte forma: a seguir são descritos os objetivos deste estudo engajado no estado da arte do fenômeno ENOS, da PAQ e dos

¹ MACHADO, F. M. **Zonal position variabilities of the Pacific warm pool**. A ser submetido a Geophysical Research Letters, 2005.

métodos de análise de dados oceânicos e atmosféricos; o tópico seguinte ao objetivo apresenta as características do ENOS mostrando os principais sistemas de monitoramento do fenômeno; o capítulo 2 apresenta os dados que são utilizados no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa e os métodos empregados na determinação das variáveis e nas análises das mesmas; os resultados são apresentados e analisados no capítulo 3; por fim, uma discussão conclusiva deste estudo é feita no capítulo 4.

1.2 - OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é traçar a trajetória do centróide para monitorar o movimento da PAQ e relacionar o seu deslocamento zonal com os eventos ENOS utilizando um campo semanal de TSO de novembro de 1981 até outubro de 2004.

As etapas para o desenvolvimento apresentam-se da seguinte forma:

1. Organizar um banco de dados de TSO semanal com início em novembro de 1981 até outubro de 2004;
2. Utilizar a metodologia desenvolvida por Machado e d'Ávila (2005) para determinar a posição zonal e meridional do centróide da PAQ;
3. Traçar a trajetória do centróide para estimar a posição e o deslocamento da PAQ durante os anos neutros, sob condições de *La Niña* e *El Niño*;
4. Fazer uma análise comparativa do deslocamento zonal do centróide da PAQ com os índices de monitoramento do ENOS;

5. Detectar as escalas de tempo e suas interações utilizando a transformada de ondeleta;
6. Fazer um estudo de caso utilizando as informações do deslocamento zonal da PAQ, a isoterma de 20°C e a velocidade vertical do vento para melhor discutir os processos envolvidos no deslocamento da PAQ durante o episódio mais bem monitorado de todos os tempos, o evento de 1997-98.

1.3 - ASPECTOS OCEANOGRÁFICOS E ATMOSFÉRICOS NO PACÍFICO TROPICAL DURANTE O FENÔMENO ENOS

A componente oceanográfica do fenômeno ENOS, conhecida como *El Niño*, reflete o deslocamento das águas quentes situadas no Pacífico central-oeste para leste cobrindo pelo menos quase toda extensão equatorial deste oceano. A componente atmosférica relacionada, chamada de Oscilação Sul, espelha uma gangorra barométrica ou uma competição entre duas células de convecção atmosférica que formam os dois centros principais de ação, um localizado sobre o Pacífico sudeste e outro sobre o Pacífico oeste e Índico leste. Sabe-se que esses fenômenos envolvem um complexo sistema acoplado formado pela interação entre o oceano e a atmosfera. No entanto, apesar dos progressos teóricos e observacionais ocorridos nas últimas décadas, ainda não é conhecida a causa do fenômeno.

Oscilação Sul foi um termo primeiramente utilizado por Gilbert Walker em 1924 para descrever as flutuações interanuais naqueles dois centros principais de

pressão atmosférica ao nível do mar. Walker (1924 apud PHILANDER, 1983, p. 295)² observou que “quando a pressão atmosférica é alta no Oceano Pacífico, ela tende a ser baixa no Oceano Índico, da África até a Austrália”. Desta forma, Walker verificou que a flutuação de pressão na escala interanual sobre o Índico e Pacífico tropical estavam fora de fase e que isso fazia parte de um fenômeno global.

Uma descrição geral das características do *El Niño* baseia-se em uma grande piscina de água quente que deriva na faixa intertropical do Oceano Pacífico afetando e sendo afetada pelos ventos alíseos sazonais (MCPHADEN, 1999; DELCROIX et al. 2000). Sabe-se, por exemplo, que o movimento desta piscina para leste corresponde a pelo menos um relaxamento parcial dos alíseos e um aumento na temperatura das águas no Pacífico equatorial central-leste, particularmente durante os anos de *El Niño* quando a PAQ descreve esses deslocamentos anômalos possuindo um caráter episódico. O fenômeno oposto, conhecido como *La Niña*, corresponde a intensificação dos alíseos com empilhamento da PAQ no lado oeste e diminuição na temperatura das águas no setor leste do Pacífico.

Durante todo o ano, as águas superficiais no Oceano Pacífico são mais quentes no setor oeste e mais frias no leste. A maior diferença entre as duas regiões é observada de agosto a outubro quando a temperatura no Pacífico leste alcança seu mínimo anual (CANE, 1983; PHILANDER, 1985; GU; PHILANDER, 1995), reguladas pelos fenômenos da ressurgência equatorial e costeira (PHILANDER, 1981a; PHILANDER; PACANOWSKI, 1981; PHILANDER, 1990; WANG; WANG, 1996; HALPERN, 2002). A PAQ que preenche o setor oeste deste oceano sustenta a

² WALKER, G. T. Correlation of seasonal variations in weather IX: a further study of world weather. **Mem. Indian Meteorological Dep.**, v. 24, p. 275-332, 1924.

temperatura da água mais elevada quando comparado com o leste. O afloramento das águas na parte central-oeste deste oceano causado pela ressurgência carrega água de fundo quente mantida pela PAQ (HELBER; WEISBERG, 2001).

Essa distribuição da temperatura superficial em todo o Pacífico tropical contribui significativamente para os padrões de chuva, vento e pressão que estão associados com o movimento ascendente do ar sobre as águas quentes na porção oeste e descendente sobre as águas frias na porção leste deste oceano (RASMUSSON; WALLACE, 1983; YAN et al., 1992b). Isto está de acordo com Bjerknes (1969) que propôs originalmente uma relação física entre os parâmetros meteorológicos e oceanográficos no Pacífico tropical. Ele descreveu que, sob condições normais, o ar seco e denso desce sobre a região de águas frias do Pacífico Tropical leste e flui para oeste ao longo da faixa equatorial como parte dos ventos alíseos. O ar aquece e ganha umidade a medida que desloca-se sobre uma superfície de água quente até que alcança o Pacífico tropical oeste e ascende (Fig. 1.1). O fluxo sofre divergência em altos níveis e retorna na troposfera superior subsidindo novamente sobre a região de águas frias, fechando assim a Circulação de Walker, um termo introduzido originalmente por Bjerknes. Ele ainda colocou que o gradiente de temperatura ao longo da faixa equatorial – água fria na costa do Peru e quente no Pacífico Tropical oeste – é necessário para formar o gradiente de pressão atmosférico que intensifica os ventos alíseos que força a Circulação de Walker.

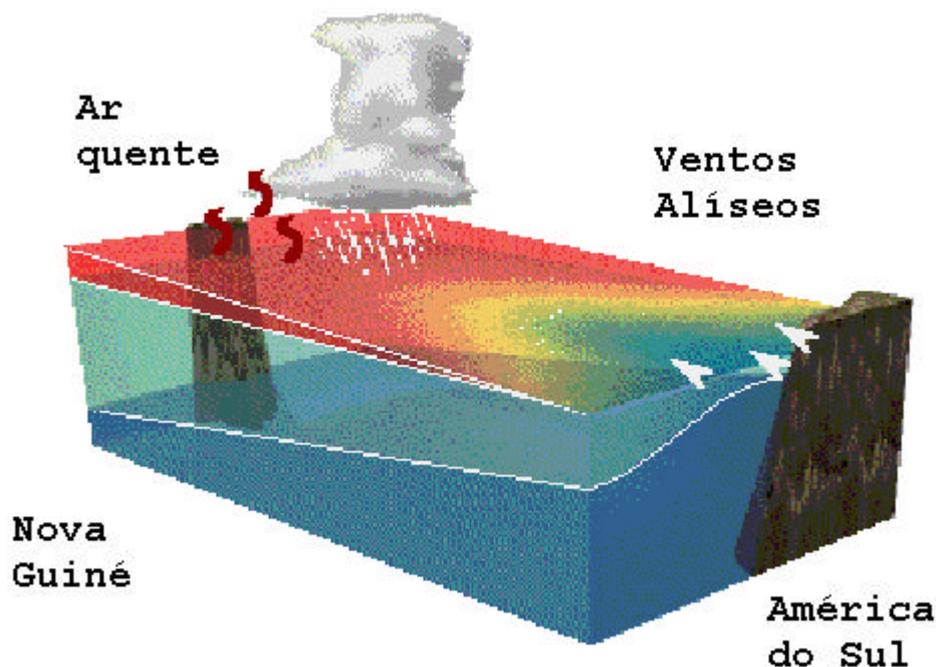


Fig. 1.1 – Esquema das relações entre o oceano e a atmosfera como proposto por Bjerkness (1969). Note o contraste de temperatura entre o setor leste (azul) e oeste (vermelho) forçado pelos ventos em superfície representado pelas setas brancas no canto direito da imagem. As setas ascendentes vermelhas no canto esquerdo representam os fluxos de calor dado pela diferença de temperatura entre o oceano e o ar da camada atmosférica adjacente. Ainda no oeste, em branco estão representadas as nuvens e a precipitação formada sobre a região de temperatura mais elevada. Fonte: http://library.thinkquest.org/20901/overview_4.htm

No entanto, a temperatura da água ao largo da costa do Peru começa a aumentar normalmente durante o mês de dezembro (WYRTKI, 1965; CANE, 1983; PHILANDER, 1990) com a desintensificação dos alísios e a interrupção do fenômeno da ressurgência (PHILANDER, 1981b; HALPERN, 2002). Em 1957-58, por exemplo, as condições atmosféricas e oceanográficas no Pacífico tropical foram atípicas e foi sugerido por Bjerknes (1969) e Wyrtki (1975) que as águas aquecidas não estavam confinadas próximas a costa oeste da América do Sul, mas se entendiam por toda faixa equatorial do Oceano Pacífico. Ou seja, o enfraquecimento, ou até mesmo a reversão, dos ventos no Pacífico permite o deslocamento das águas superficiais mais aquecidas

situadas no setor oeste para a parte leste do oceano (MCPHADEN; PICAUT, 1990; PICAUT et al., 1996; DELCROIX et al., 2000) impedindo a ressurgência (HALPERN, 2002). Tais eventos implicam em perturbações climáticas e conseqüências sócio-econômicas desastrosas em diversas partes do mundo (GILL; RASMUSSEN, 1983; ROPELEWSKI; HALPERT, 1987; NICHOLLS, 2000; SU; NEELIN, 2002).

Além de 1957-58, os anos de 1965-66, 1972-73, 1982-83, 1986-88, 1990-1995 e 1997-98 também apresentaram condições anômalas na atmosfera e no Oceano Pacífico com desastres naturais em diversas partes do mundo. Isso chamou a atenção da comunidade científica que começou a buscar repostas para tais acontecimentos. Durante essas décadas muitos artigos foram publicados procurando descrever as principais características oceanográficas e atmosféricas relacionadas ao fenômeno como, por exemplo, os trabalhos de Bjerkness (1966a, 1966b, 1969, 1972), Wyrski (1965, 1975, 1989), Rasmusson e Hall (1983), Cane (1983), Gill e Rasmusson (1983), Philander (1983, 1990), Rasmusson e Wallace (1983), Zebiak e Cane (1987), McPhaden e Picaut (1990), Delcroix et al. (2000), Picaut et al. (2002) e Sun (2003), entre outros.

Esses artigos descrevem que durante os anos que precedem o ENOS os intensos alíseos de sudeste estão presentes no Pacífico. Os alíseos intensificam o giro subtropical do Pacífico Sul, fortalecem a Corrente Sul Equatorial, aumentam a inclinação leste-oeste do nível do mar acumulando água aquecida pelo sol no Pacífico equatorial oeste que, em seguida, evapora e ascende durante um processo convectivo. O vapor de água ascendente sofre resfriamento, condensa na forma de chuva e libera

energia durante o processo. O transporte de Ekman³ ao longo da faixa equatorial central-leste do Pacífico faz com que a água movimente-se para norte (a norte da faixa) e sul (a sul da faixa) causando ressurgência na região (PHILANDER, 1981a; PHILANDER; PACANOWSKI, 1981). Este mecanismo conduz a formação de uma *língua de água fria* (PHILANDER, 1990; JIN, 1996) na superfície equatorial do oceano que se entende da América do Sul até mesmo a linha de mudança de data (LMD). O gradiente horizontal de temperatura formado na região alimenta a Circulação de Walker que percorre o caminho proposto por Bjerknes (1969) e já descrito aqui anteriormente.

Assim que os ventos sobre o Pacífico diminuem de intensidade, o oceano tende a se ajustar a um novo equilíbrio e, a água quente acumulada no setor oeste flui para o leste na forma de uma onda de Kelvin equatorial (HARRISON; SCHOPF, 1984; ZEBIAK; CANE, 1987; PHILANDER, 1990; SOARES et al., 1999). Esta onda conduz a água quente acumulada no setor oeste do Pacífico para o setor central e leste, junto a costa americana provocando a subsidência da termoclina, normalmente rasa nesta região (PHILANDER, 1973; 1981b). O deslocamento da água aquecida de oeste para leste espalha a fonte de calor do oceano para atmosfera e, conseqüentemente, a célula ascendente de circulação atmosférica por toda extensão do Oceano Pacífico (Fig. 1.2).

Sun (2003) descreveu que os estágios iniciais de todos os ciclos ENOS entre 1980-99 foram precedidos por um pico na quantidade de calor armazenado na região

³ O transporte integrado na camada de Ekman, orientado perpendicularmente à esquerda (direita) da direção do vento no hemisfério sul (hemisfério norte), responde à variação da tensão de cisalhamento do vento com convergências e divergências. Nas regiões de divergência (convergência) ocorre ressurgência (subsidência) no fundo da camada de Ekman com velocidade vertical positiva (negativa).

oeste do Pacífico, seguido por uma perda durante os eventos de *El Niño*. Ele relatou que o fenômeno *El Niño* age como um mecanismo regulador do conteúdo de calor armazenado no Pacífico equatorial oeste.

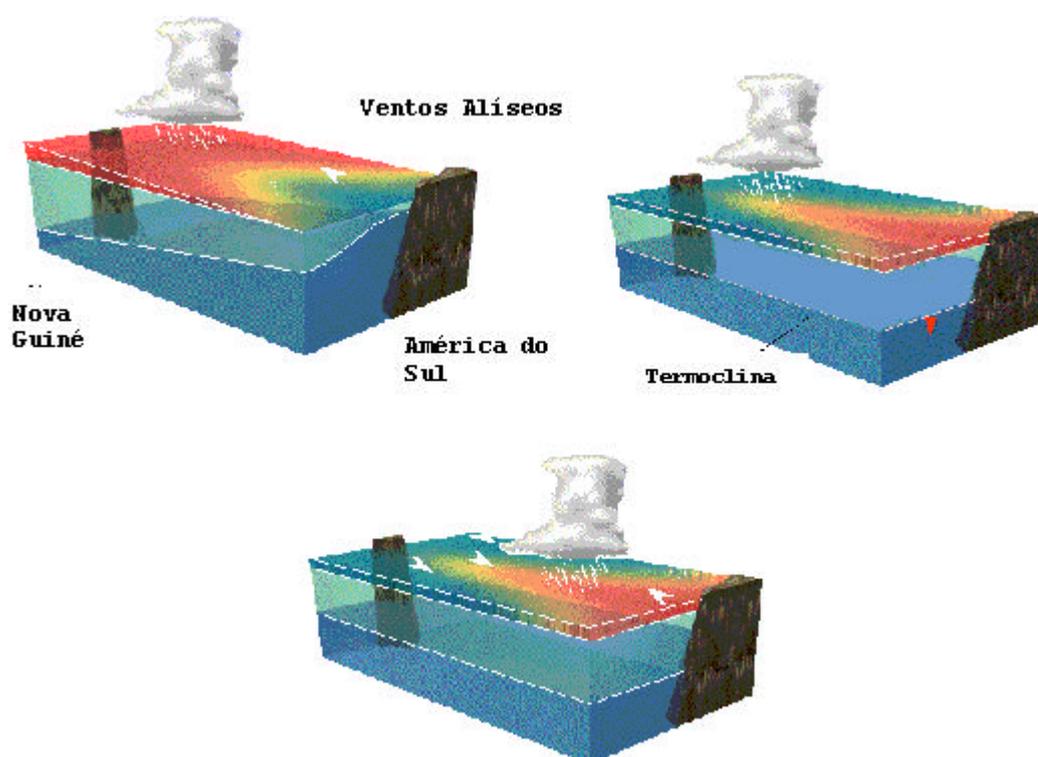


Fig. 1.2 – Figuras esquemáticas ilustrando a desintensificação dos alísios representado por uma única seta branca (figura superior esquerda), a subsidência da termoclina no setor leste indicada pela seta vermelha (figura superior direita), e o deslocamento das águas quentes e da atividade convectiva para parte central-leste do oceano (figura inferior), como proposto por Bjerkness (1969).
Fonte: http://library.thinkquest.org/20901/overview_4.htm

Atualmente, o termo *El Niño* é reservado para os eventos naturalmente recorrentes de deslocamento anômalo da PAQ para leste com aumento conseqüente na temperatura das águas superficiais ao longo da faixa equatorial do Oceano Pacífico associados a desastres sócio-econômicos em diversas partes do globo como, por

exemplo, os episódios de 1982-83 e 1997-98, que permaneceram durante o período de ressurgência costeira.

1.4 - O MONITORAMENTO DO FENÔMENO ENOS

Devido aos conseqüentes efeitos sócio-econômicos do fenômeno ENOS de 1972-73 e 1982-83 maciços investimentos foram destinados ao desenvolvimento de uma ampla organização para obter informações dos parâmetros atmosféricos e oceanográficos no Oceano Pacífico tropical. Este subitem tem o objetivo de apresentar os principais meios de monitoramento do fenômeno ENOS fazendo uso da anomalia da TSO e da pressão ao nível do mar (PNM) medidos em tempo real em algumas regiões do Pacífico.

1.4.1. Anomalia da temperatura superficial no Oceano Pacífico

Um dos parâmetros ambientais mais relevantes para compreender os processos dinâmicos e termodinâmicos comprometidos nas mudanças climáticas em escala global é a TSO. A medida da TSO no Pacífico tem uma importante função no estudo dos fenômenos *El Niño* e *La Niña*. O monitoramento da anomalia desse parâmetro em quatro áreas específicas no Oceano Pacífico conhecidas como regiões *Nino* (Fig. 1.3) é utilizado como indicador de um evento. São elas:

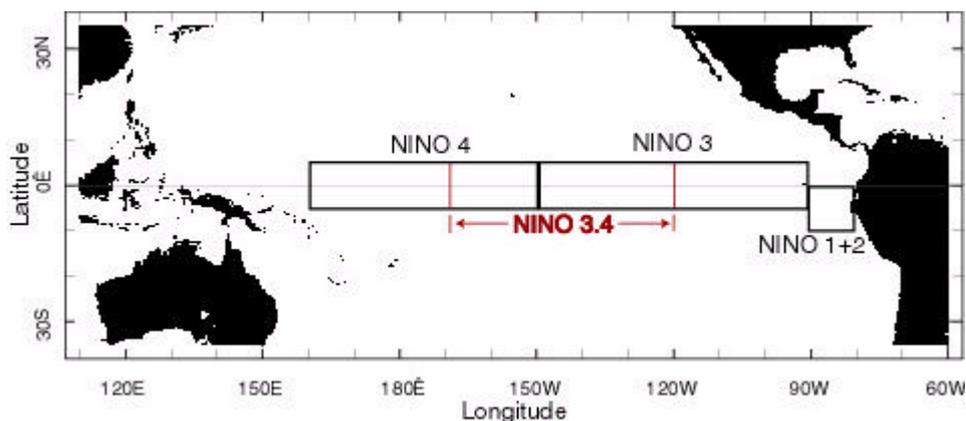


Fig. 1.3 – Regiões oceânicas sobre a superfície do Pacífico onde são feitas as medidas da temperatura superficial para monitoramento do fenômeno ENOS.

- Região Nino 1+2 (N1.2) → localiza-se no Pacífico tropical leste, entre as latitudes 0° - 10° S e longitudes 90° - 80° W. Apresenta características oceanográficas particulares do fenômeno como a ressurgência junto à costa da América do Sul (CANE, 1983);
- Região Nino 3 (N3) → situa-se entre as latitudes 5° N- 5° S e longitudes 150° - 90° W. Uma característica marcante é a presença de uma extensa língua de água fria que predomina durante a fase negativa do fenômeno ENOS, a *La Niña* (JIN, 1996);
- Região Nino 4 (N4) → posiciona-se no Pacífico equatorial oeste, entre as latitudes 5° N- 5° S e longitudes 160° E- 150° W. A característica marcante desta região é a presença da piscina de água quente do Pacífico (YAN et al., 1992a,b; PICAUT; DELCROIX, 1995; MACHADO; D'ÁVILA, 2005). As primeiras manifestações do fenômeno ENOS no Pacífico se mostram nestas áreas.
- Região Nino 3.4 (N3.4) → coloca-se na parte central da faixa equatorial do Pacífico, entre as latitudes 5° N- 5° S e longitudes 170° W- 120° W. Esta região foi

adicionada para monitoramento do fenômeno ENOS com a finalidade de permitir aos pesquisadores o conhecimento sobre a TSO na faixa intermediária entre as regiões N3 e N4.

As anomalias padronizadas são obtidas pela diferença entre a TSO observada e a média histórica da TSO calculada para intervalos uniformes (doze meses) com base no período da normal climatológica⁴. Quando a anomalia é positiva (negativa) significa que há uma elevação (diminuição) anormal na temperatura das águas naquela região do oceano. Esta representação é característica da presença do fenômeno *El Niño* (*La Niña*). A Figura 1.4 ilustra as séries temporais da anomalia mensal da TSO nas quatro regiões (ou janelas) oceânicas de monitoramento do fenômeno ENOS, com início em novembro de 1981 até outubro de 2004.

Uma identificação dos anos de atuação do fenômeno ENOS atualmente bem aceita entre os pesquisadores foi desenvolvida por Trenberth (1997). O autor analisa médias corridas de cinco meses utilizando os dados de anomalia da TSO na região N3. Se esta média se mantiver maior que 0,4°C durante seis meses ou mais, este período pode ser classificado como *El Niño*. Caso a média corrida mantenha-se menor que -0,4°C seis meses corridos o período é classificado como *La Niña*.

⁴ As normais climatológicas padronizadas são atualmente expressadas especificamente em termos da média das observações em períodos suficientemente longos (30 anos seguidos), de 1971 até 2000.

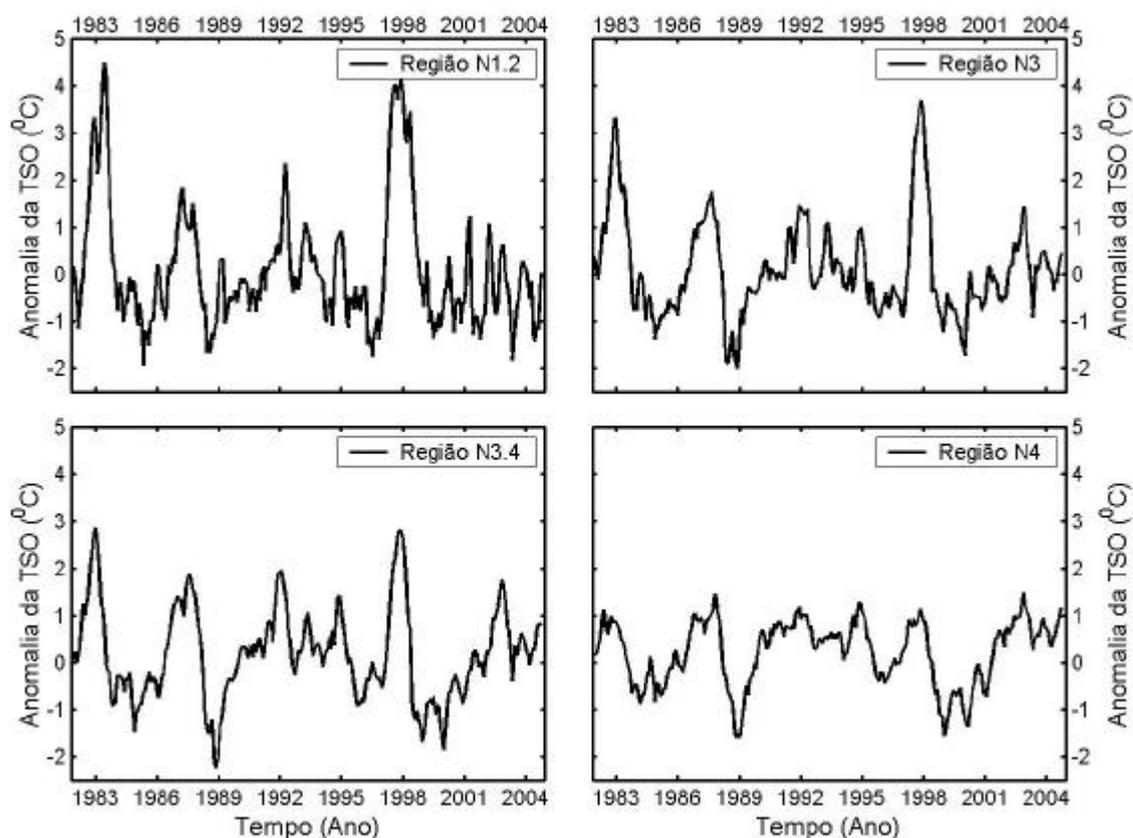


Fig. 1.4 – Anomalia mensal da TSO nas regiões do Oceano Pacífico de monitoramento do fenômeno ENOS, desde novembro de 1981 até outubro de 2004. O período base da normal climatológica é de 1971 até 2000, de acordo com a Organização Meteorológica Mundial. Fonte: <ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/cpc/wd52dg/data/indices/sstoi.indices>.

1.4.2. Índice de Oscilação Sul

A Oscilação Sul, comentada no início deste capítulo, é uma espécie de gangorra barométrica com dois centros principais de ação. Esta gangorra é monitorada utilizando a diferença padronizada da pressão reduzida ao nível do mar sobre o Tahiti ($17,5^{\circ}\text{S} - 149,6^{\circ}\text{W}$), Pacífico sudeste, e em Darwin ($12,4^{\circ}\text{S} - 130,9^{\circ}\text{E}$), Austrália (Pacífico oeste), na qual a diferença é convertida em um índice denominado por Índice

de Oscilação Sul (IOS)⁵. A Figura 1.5 ilustra a série temporal do IOS com início em novembro de 1981 até outubro de 2004.

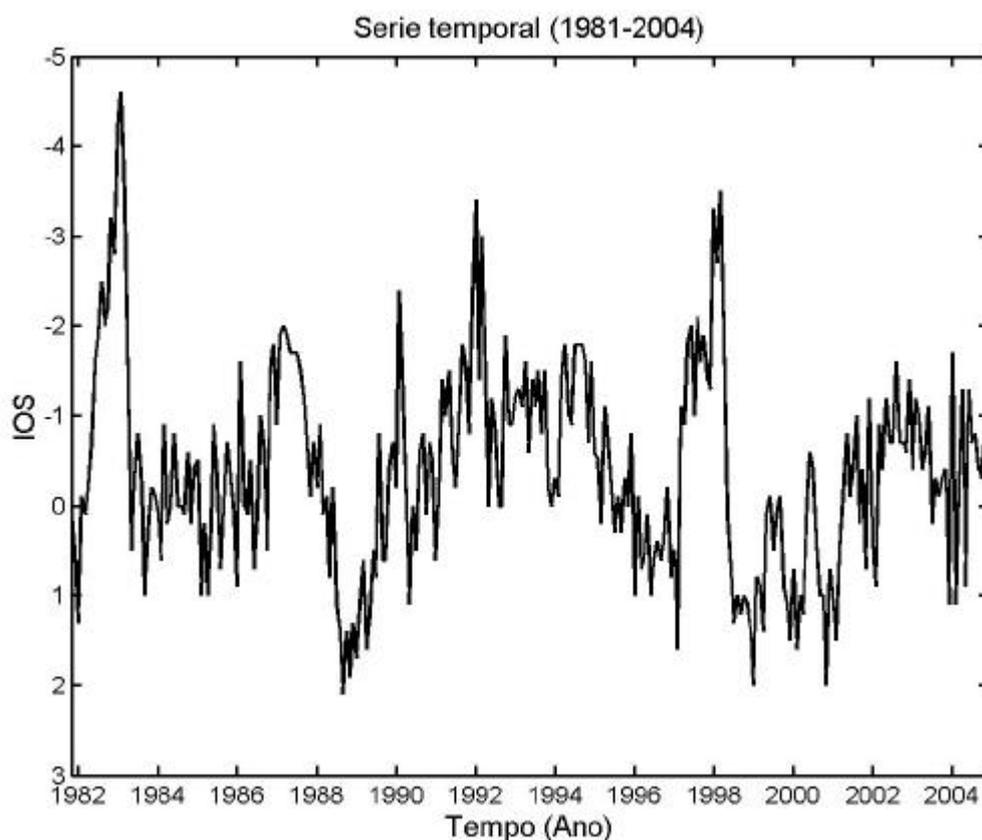


Fig. 1.5 – Série temporal do IOS normalizado, desde novembro de 1981 até outubro de 2004. O eixo das ordenadas está invertido, com valores crescentes para baixo. Valores negativos (positivos) indicam anos sob atuação do fenômeno *El Niño* (*La Niña*). Fontes: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/Readme.index.htm> e <ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/cpc/wd52dg/data/indices/soi>.

Na conhecida *fase positiva* da Oscilação Sul, ou quando o IOS é positivo, o centro de baixa pressão do Pacífico oeste apresenta valores menores que o normal e o centro de alta pressão do Pacífico sudeste é maior do que o normal. O aumento do gradiente horizontal de pressão intensifica os alísios que convergem para o centro de

⁵ Para o conhecimento do método usado para obter o IOS ver: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/Readme.index.htm>

baixa pressão localizado no norte da Austrália e Indonésia (PHILANDER, 1983; RASMUSSON; WALLACE, 1983), e, como consequência, há um acentuado deslocamento das águas de leste para oeste no Pacífico, provocando a ressurgência de águas mais frias que o normal na parte central leste do Oceano (RASMUSSON; WALLACE, 1983; HALPERN, 2002). Essa configuração sobre o Oceano Pacífico é característica do fenômeno *La Niña* (CANE, 1983; PHILANDER, 1990; JIN, 1996).

Durante a *fase negativa* da Oscilação Sul, ou quando o IOS é negativo, o centro de baixa pressão do Pacífico oeste apresenta valores maiores que o normal, enquanto o centro de alta pressão do Pacífico sudeste descreve valores menores do que o normal. Essa configuração caracteriza uma diminuição do gradiente horizontal de pressão que marca o enfraquecimento dos alíseos e favorece o deslocamento da água mais aquecida do Pacífico oeste para leste, chegando inclusive a se manter ao largo da costa peruana atuando contra a ressurgência costeira sul americana (RASMUSSON; WALLACE, 1983; HALPERN, 2002). Essa configuração sobre o Oceano Pacífico é característica do fenômeno *El Niño* (CANE, 1983; PHILANDER, 1990).

1.5. ANÁLISES EM ONDELETAS APLICADAS AOS ÍNDICES DE MONITORAMENTO DO ENOS

Nas últimas décadas, as ondeletas têm sido aplicadas nas análises de sinais oceanográficos e atmosféricos. Essa técnica é capaz de localizar simultaneamente a variabilidade do sinal no domínio do tempo e da frequência (DOMINGUES et al.,

2005). Particularmente é adequada para diagnosticar flutuações que tendem a ter um caráter episódico e consistem de componentes de múltiplas escalas (MAK, 1995).

Diversos autores têm documentado a estrutura temporal do ENOS no sistema oceano-atmosfera utilizando ondeletas. Gu e Philander (1995) aplicaram a função Morlet complexa utilizando dados de TSO e velocidade zonal e meridional do vento do COADS (*Comprehensive Ocean and Atmospheric Data Sets*) em diferentes regiões dos oceanos Índico, Atlântico e Pacífico com a finalidade de determinar as mudanças seculares nas amplitudes da variabilidade interanual e do ciclo sazonal nos trópicos a partir de 1870. Os resultados indicaram que as intensidades dos ENOS no Pacífico foram relativamente pequenas no início do último século e relativamente grandes no final.

Mak (1995) aplicou a função Meyer nas médias mensais da TSO, de janeiro de 1949 a setembro de 1991, para estudar as variabilidades no Pacífico equatorial leste, especificamente a longitude 175,5°W. Seus resultados delinearam os eventos de *El Niño* e *La Niña* esboçando as oscilações mais bem pronunciadas dentro dos períodos de 2,6 e 5,3 anos.

Wang e Wang (1996) também utilizaram as estimativas mensais do COADS em duas áreas do Pacífico, entre as longitudes 80°-90°W e 155°-170°W e latitude 5°N-5°S, de janeiro de 1950 até dezembro de 1992. Os autores aplicaram a transformada da ondeleta Morlet e documentaram que as variações em ambas regiões foram dominadas pelo ciclo anual e moduladas pelo ciclo ENOS. Mas qual seria a natureza exata do casamento de fase entre o ENOS e o ciclo anual? Suas análises indicaram que ambos eventos, de aquecimento e resfriamento da água, alcançam seus máximos na estação

fria do Pacífico central e leste reguladas pelos fenômenos ENOS e da ressurgência, respectivamente. Eles complementaram que uma forte fase fria do ENOS realça a variação anual da TSO e a fase quente tende a enfraquecer o ciclo anual. Isto está de acordo com Gu e Philander (1995) que descreveram que o ciclo anual apresenta menor amplitude durante o *El Niño* do que durante a *La Niña*. Estes últimos autores ainda concluíram que a variação da profundidade da termoclina, tal como a subsidência durante o *El Niño* e a ressurgência durante a *La Niña*, afeta o ciclo anual significativamente no Pacífico tropical leste, que também está de acordo com Wang e Wang (1996).

Torrence e Webster (1999) utilizaram o programa desenvolvido por Torrence e Compo (1998) e aplicaram a transformada de ondeleta empregando a função Morlet nas séries temporais da anomalia da TSO na região N3 (de janeiro de 1871 a setembro de 1998), no IOS (de janeiro de 1876 a setembro de 1998) e nos dados pluviométricos de estações da Índia (de 1871 a 1994) para relacionar as oscilações do ENOS com as Monções na Índia. O espectro de ondeleta apresentou mudanças interdecadais com alta variância entre 1875-1920 e 1960-90 e baixa entre 1920-1960. Os autores descreveram que a fase fria do ENOS associado ao índice positivo da Oscilação Sul e presença da PAQ no extremo oeste do Pacífico implica em altos valores de precipitação nas Índias.

1.6. A PAQ

Como relatado nos itens anteriores, a faixa intertropical do Oceano Pacífico apresenta, em média, águas relativamente frias no setor leste devido ao fenômeno da ressurgência e quente no oeste caracterizado pela presença das águas com temperaturas acima de 29°, a PAQ. Nos últimos anos, a PAQ tem despertado o interesse da comunidade científica por dois motivos: a quantidade de calor armazenado na *piscina* (SUN, 2003); e por estar relacionada com a fase inicial do fenômeno ENOS (YAN et al., 1992a; PICAUT; DELCROIX, 1995; PICAUT et al., 2002).

Durante o *El Niño* a PAQ espalha-se sobre a faixa equatorial do Oceano Pacífico chegando a alcançar em algumas ocasiões a costa da Americana do Sul impedindo a ressurgência no Pacífico leste (PICAUT; DELCROIX, 1995; HALPERN, 2002; MACHADO; D'ÁVILA, 2005). O oposto ocorre durante a *La Niña*, com empilhamento da água quente no setor oeste e água fria penetrando na região da PAQ (DELCROIX et al., 2000; MACHADO; D'ÁVILA, 2005). Segundo Webster e Lukas (1992) e Picaut e Delcroix (1995), o deslocamento zonal da borda leste da PAQ na faixa equatorial é dominado por variações interanuais em fase com IOS. No entanto, esse movimento exibe insignificante sinal sazonal (PICAUT; DELCROIX, 1995) em contraste com outros índices de monitoramento do ENOS como a TSO no Pacífico leste (GU; PHILANDER, 1995; WANG; WANG, 1996).

Yan et al. (1992b) estudaram as variabilidades da temperatura e da área da PAQ, entre as latitudes 120°E-150°W e longitudes 20°N-20°S, desde 1982 até 1991, e

relataram um crescimento na área preenchida pela piscina quente entre 1983 e 1988. Segundo os autores, a atmosfera global é muito influenciada por oscilações da PAQ pelo fato dela apresentar uma ampla área de água quente e pela troca de calor turbulento entre o oceano e a atmosfera ser uma função não-linear da TSO. O ar ascendente da célula de Circulação de Walker está relacionado com as águas que apresentam os maiores valores de TSO, especificamente a PAQ existente no Oceano Pacífico tropical oeste, enquanto o ar descendente localiza-se sobre as águas oceânicas mais frias do Pacífico equatorial leste e em médias latitudes (YAN et al., 1992a).

Ho et al. (1995) calcularam o centróide da PAQ em coordenadas planas para monitorar o movimento da mesma. Yan et al. (1997) deram continuidade ao trabalho de Ho et al. (1995) e utilizaram uma série de dados semanais obtidas pelo sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) dos satélites do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) para descrever a trajetória da PAQ no interior de uma região limitada geograficamente pelas longitudes 120°E-110°W e latitudes 30°N-30°S. Os autores definiram a PAQ como uma superfície de água homogênea com TSO acima de 28°C e calcularam o centróide da PAQ da seguinte forma:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad (1)$$

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^n y_i / n \quad (2)$$

na qual x_i é a componente longitudinal, y_i a latitudinal e n é o número total de pontos na imagem de satélite. Os resultados de Yan et al. (1997) demonstraram que o movimento do centróide pode representar o deslocamento da PAQ.

Machado e d'Ávila (2005) foram os pioneiros na definição matemática do centróide da PAQ em coordenadas esféricas. Os autores utilizaram o campo mensal da TSO, descrito por Reynolds e Smiths (1994), para representar a PAQ como uma superfície de água homogênea, assim como Ho et al. (1995) e Yan et al. (1997) e determinaram o limiar de 29°C, de acordo com McPhaden e Picaut (1990), McPhaden (1999) e Nof e Gorder (1999). As componentes do centróide da PAQ foram obtidas de acordo com as relações abaixo:

$$\varphi_m = \arctg \frac{\sum_{i=1}^N (\text{sen} \varphi_i \cos \varphi_i)}{\sum_{i=1}^N \cos \varphi_i} \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^N (\cos^2 \varphi_i \cos \lambda_i)}{\sum_{i=1}^N \cos \varphi_i} \right)^2 + \left(\frac{\sum_{i=1}^N (\cos^2 \varphi_i \text{sen} \lambda_i)}{\sum_{i=1}^N \cos \varphi_i} \right)^2} \quad (3)$$

$$\lambda_m = \arctg \frac{\sum_{i=1}^N (\cos^2 \varphi_i \text{sen} \lambda_i)}{\sum_{i=1}^N \cos \varphi_i} \frac{\sum_{i=1}^N (\cos^2 \varphi_i \cos \lambda_i)}{\sum_{i=1}^N \cos \varphi_i} \quad (4)$$

na qual φ_m e λ_m são respectivamente a latitude e a longitude do centróide. φ_i e λ_i representam respectivamente a latitude e a longitude no ponto i da grade com TSO maior ou igual a 29°C. Detalhes são achados em Machado e d'Ávila (2005). De acordo com os autores, o deslocamento zonal do centróide da PAQ para leste, principalmente em anos como os de 1983 e 1998, que apresentaram uma evolução anormal em seu posicionamento, corresponde a anomalia positiva da TSO na Região N1.2, indicando os eventos de *El Niño* no Pacífico (Fig. 1.6). Desta forma, eles concluem que a posição zonal do centróide pode ser tomada como uma forma alternativa para monitorar o fenômeno ENOS.

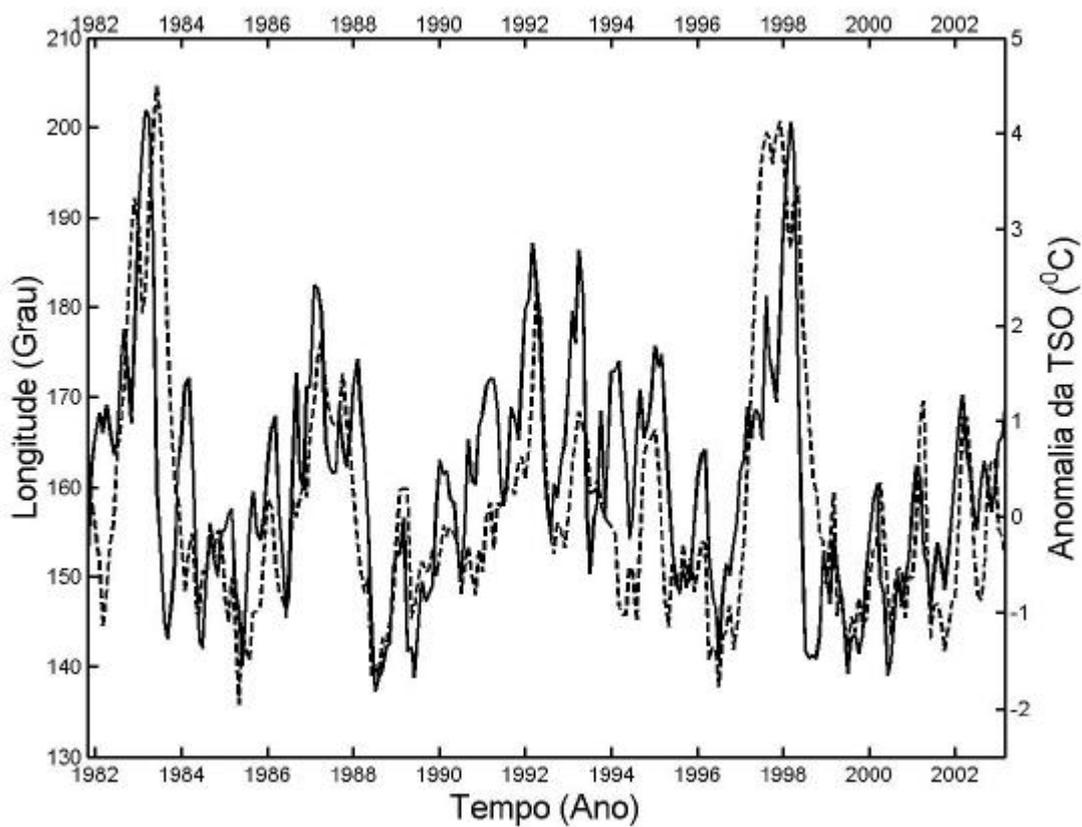


Fig. 1.6 - Série mensal da componente zonal do centróide da PAQ (linha contínua, eixo vertical esquerdo) e anomalia da TSO (linha traço e ponto, eixo vertical direito) na região de monitoramento do Oceano Pacífico conhecida como N1.2. Fonte: MACHADO (em fase de elaboração)⁶.

⁶ MACHADO, F. M. **Zonal position variabilities of the Pacific warm pool.** A ser submetido a Geophysical Research Letters, 2005.

CAPÍTULO 2

- DADOS E METODOLOGIA -

2.1 - DESCRIÇÃO DOS DADOS

No ano de 1985, a Organização Meteorológica Mundial e o NWS (*National Weather Service*) dos Estados Unidos determinaram o NCEP (*National Center for Environmental Prediction*) como núcleo para armazenamento de dados das variáveis atmosféricas e oceanográficas em apoio ao Programa de Pesquisa Climática Mundial (REYNOLDS, 1988). Este tópico tem por finalidade fazer uma breve apresentação dos dados utilizados no decorrer deste trabalho de pesquisa.

2.1.1 - TSO

Reynolds et al. (2002) utilizaram dados derivados de satélite, navios de oportunidade, bóias ancoradas, bóias de deriva e TSO simulada a partir da cobertura de gelo para criar um campo global da TSO com alta resolução espacial e temporal. O

campo de TSO é analisado semanalmente no NCEP sobre uma grade espacial de um grau de latitude por um grau de longitude com início em oito de novembro de 1981 até a presente data. A descrição detalhada das etapas de processamento e das informações para a utilização dos campos de TSO analisados pelo NCEP é fornecida por Reynolds et al. (2002) e Reynolds e Stokes (2004), respectivamente.

Os oceanos e os continentes são definidos por uma máscara numérica disponível no mesmo diretório que contêm os dados de TSO. Este arquivo contêm um conjunto de números 0 (zero) e 1 (um) para representar as áreas continentais e oceânicas, respectivamente (REYNOLDS; STOKES, 2004) que estão definidos de acordo com a estrutura dos dados da TSO. Estas informações são preparadas em conjunto com as análises de TSO para se determinar a PAQ e calcular o centróide da mesma.

2.1.2 - ISOTERMA DE 20°C

Behringer et al. (1998) descreveram uma versão de um sistema de análises para assimilação de dados oceânicos. Temperaturas observadas são obtidas por XBTs (*Expendable Bathythermograph*) e pelas bóias do programa TOGA-TAO (*Topical Atmosphere Ocean*) (MCPHADEN, 1993). Esse sistema foi desenvolvido para fornecer uma série espacial e temporal das análises oceânicas apartir de 1980.

2.1.3 - VELOCIDADE VERTICAL DO VENTO

Dados da velocidade vertical do vento foram obtidos do *Reanalysis*, um projeto do NCEP/NCAR (*National Center for Atmospheric Research*) que utiliza o estado da arte dos sistemas de análises e previsão para assimilação de dados. As análises desse projeto são baseadas em modelo que fornecem um campo global das variáveis atmosféricas com início em 1948 até o presente com resolução espacial de 2,5° de latitude por 2,5° de longitude. A velocidade vertical do vento é obtida em 17 níveis de pressão e o período base para o cálculo da normal climatológica é de 1968 até 1996. Maiores detalhes podem ser achados em Kalnay et al. (1996) e Kistler et al. (2001).

2.2 - PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O objetivo aqui é descrever a metodologia utilizada nesta dissertação. Primeiramente, é apresentada a relação matemática para determinar os pontos geográficos e gerar a série temporal das componentes do centróide da PAQ, de acordo com Machado e d'Ávila (2005). Em seguida, é descrita a transformada da função ondeleta aplicada na série temporal da componente zonal do centróide. Por último, é apresentado um resultado da aplicação dessa técnica na série temporal do índice da região N3 de monitoramento do fenômeno ENOS com o propósito de ilustrar a utilização adequada na estimativa do espectro de energia.

2.2.1 - O CENTRÓIDE DA PAQ

Machado e d'Ávila (2005) desenvolveram uma abordagem original utilizando o sistema de coordenadas esféricas para definir matematicamente o centróide da PAQ utilizando campos mensais de TSO. Os autores admitiram um sistema de coordenadas direto, ou seja, com seus eixos dispostos conforme a Figura 2.1.

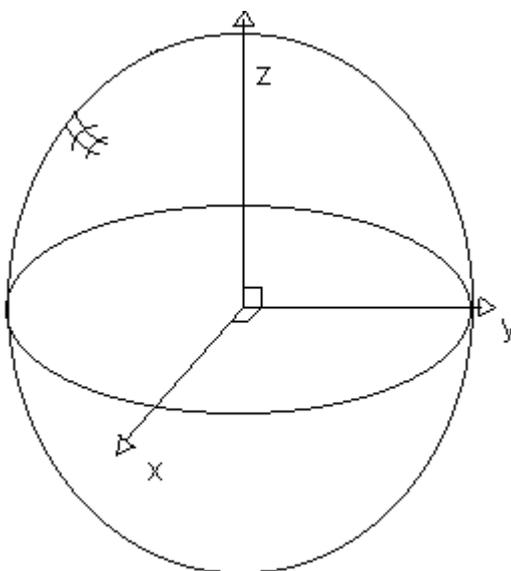


Fig. 2.1 – Sistema de coordenada direto.

Ou seja:

$$\vec{x} \times \vec{y} = \vec{z} \quad (5)$$

Neste, um ponto P terá coordenadas x, y, z . Num sistema esférico, esse mesmo ponto terá coordenadas μ (medido no plano xy , no sentido anti-horário, a partir de x) e ν (medido a partir do plano xy , em direção ao lado positivo de z). Adota-se o raio OP com valor unitário, permitindo definir a Terra como uma esfera trigonométrica. A

Figura 2.2 é um esquema representativo para obter as coordenadas de um ponto sobre a superfície esférica.

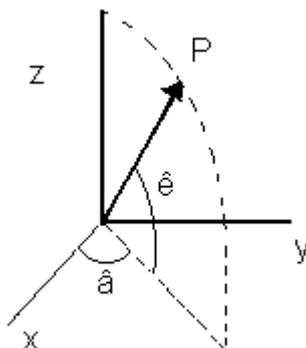


Fig. 2.2 – Esquema para obter o ponto P no sistema de coordenada.

Desta forma, as coordenadas do ponto P podem ser escritas como:

$$x = \cos \hat{e} \cos \hat{a} \quad (6)$$

$$y = \cos \hat{e} \sin \hat{a} \quad (7)$$

$$z = \sin \hat{e} \quad (8)$$

Inversamente:

$$\hat{a} = \arctan \frac{y}{x} \quad (9)$$

$$\hat{e} = \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (10)$$

O quadrante de \hat{a} será dado pelo sinal de x e y .

A condição para que as duas matrizes de mesmo tipo sejam iguais é que seus elementos correspondentes sejam iguais; assim, o sistema de equações (6), (7) e (8) pode ser escrito conforme esquema:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\hat{e}\cos\hat{a} \\ \cos\hat{e}\sen\hat{a} \\ \sen\hat{e} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Desta forma, os autores consideraram uma base no espaço e apresentaram o centróide como uma soma de 'n' vetores com origem no centro da Terra até cada ponto da grade de TSO da PAQ. O centróide da PAQ foi definido matematicamente de acordo com a relação abaixo:

$$\vec{V}_m = \frac{\sum_{i=1}^N \vec{V}_i a_i}{\sum_{i=1}^N a_i} \quad (12)$$

na qual V_i é um vetor na direção da PAQ, a_i é a área da superfície correspondente ao vetor, n é o número total de vetores (ou o número total de pontos). A área a_i correspondente a um vetor qualquer é dada por:

$$a_i = \Delta\varphi \Delta\lambda \cos\varphi_i \quad (13)$$

Como $(\Delta\varphi \Delta\lambda)$ é uma constante ($1^\circ \times 1^\circ$), então a equação (13) é equivalente a:

$$a_i = k \cos\varphi_i \quad (14)$$

As componentes do centróide são descritas nas relações abaixo:

$$V_{mx} = \frac{\sum_{i=1}^N \dot{\mathbf{a}}(V_{ix} a_i)}{N \sum_{i=1}^N \dot{\mathbf{a}} a_i} \quad (15)$$

$$V_{my} = \frac{\sum_{i=1}^N \dot{\mathbf{a}}(V_{iy} a_i)}{N \sum_{i=1}^N \dot{\mathbf{a}} a_i} \quad (16)$$

$$V_{mz} = \frac{\sum_{i=1}^N \dot{\mathbf{a}}(V_{iz} a_i)}{N \sum_{i=1}^N \dot{\mathbf{a}} a_i} \quad (17)$$

V_{ix} , V_{iy} e V_{iz} são as componentes de um vetor calculadas conforme esquema abaixo:

$$\begin{pmatrix} V_{ix} \\ V_{iy} \\ V_{iz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \lambda \\ \cos \varphi \sin \lambda \\ \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (18)$$

As coordenadas geográficas da posição do centróide da PAQ são descritas de acordo com as relações abaixo:

$$\varphi_m = \arctg \frac{V_{mz}}{\sqrt{V_{mx}^2 + V_{my}^2}} \quad (19)$$

$$\lambda_m = \arctg \frac{V_{my}}{V_{mx}} \quad (20)$$

Maiores detalhes podem ser achados em Machado e d'Ávila (2005).

2.2.2 - ONDELETA

O conhecimento no ramo de processamento de sinais aliado aos esforços de matemáticos, físicos e engenheiros tem se destacado nos últimos anos com o desenvolvimento das análises em ondeleta devido a sua versátil aplicabilidade. O termo em francês *ondelettes* ou em inglês *wavelet* associa-se à idéia de “pequenas ondas”, tendo um apelo intuitivo. No sentido desta análise, esse termo está associado a ondas localizadas, isto é, ondas que crescem e decaem em um período limitado de tempo (DOMINGUES et al., 2005).

A transformada de ondeleta⁷ vem se tornando uma ferramenta de uso habitual para analisar as variações de energia localizadas numa série temporal (KUMAR; FOUFOULA-GEORGIU, 1997). Numerosos estudos vêm sendo desenvolvidos nas análises de sinais atmosféricos e oceanográficos, incluindo convecção nos trópicos (WENG; LAU, 1994), TSO (GU; PHILANDER, 1995; MAK, 1995; TORRENCE; WEBSTER, 1999) e IOS (WANG; WANG, 1996; TORRENCE; WEBSTER, 1999). A transformada de Fourier também é discutida nesses artigos. A destacada diferença entre as transformadas de ondeleta e de Fourier é a conjunta localização em tempo-frequência das funções ondeleta, enquanto as funções seno e co-seno de Fourier não são (DOMINGUES et al., 2005).

Formalmente, para que uma função seja denominada de ondeleta, usualmente denotada pela letra ψ , ela deve satisfazer as propriedades a seguir (KUMAR; FOUFOULA-GEORGIU, 1997):

⁷ Aqui, o termo análise em ondeleta terá a mesma interpretação de transformada de ondeleta.

1. A integral no tempo desta função deve ser zero, i.e.,

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (21)$$

Isso garante que a função ondeleta tenha uma forma do tipo onda. Essa condição, conhecida como condição de admissibilidade (DOMINGUES et al., 2005).

2. A função ondeleta deve ter energia unitária, i.e.,

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1 \quad (22)$$

Isso garante que a função ondeleta possua suporte compacto, ou com decaimento rápido de amplitude (*e-folding time*), garantindo a localização no tempo e no espaço (DOMINGUES et al., 2005).

A transformada de ondeleta $\xi(\lambda, \Gamma)$ de uma série temporal f é definida como sendo (KUMAR; FOUFOULA-GEORGIU, 1997; DOMINGUES et al., 2005):

$$\xi(\lambda, \Gamma) = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \int_{-\infty}^{\infty} f(u) \bar{\Psi}_{\lambda, \Gamma}(u) du \quad \lambda > 0 \quad (23)$$

na qual a relação (24) representa uma família de funções chamada ondeleta.

$$\Psi_{\lambda, \Gamma}(u) = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \psi\left(\frac{u - \Gamma}{\lambda}\right) \quad (24)$$

λ é o parâmetro de escala, Γ é o parâmetro de localização e $\bar{\Psi}_{\lambda, \Gamma}(u)$ é o complexo conjugado de $\Psi_{\lambda, \Gamma}(u)$. Alterando o valor de λ tem-se o efeito de dilatação ($\lambda > 0$) ou contração ($\lambda < 0$) da função $\psi(\Gamma)$. A medida que Γ varia, a função f é analisada localmente em torno do ponto Γ . Quando λ cresce (decresce), a ondeleta estende-se (estreita-se) e demonstra o comportamento de tempo longo (tempo curto) da série em

consideração. Por conseguinte, a transformada em ondeleta fornece uma janela em tempo-escala flexível que se estreita quando está focalizando características de pequena escala e amplia-se para grandes escalas, análogo a uma lente de contato.

Gu e Philander (1995) demonstraram que a ondeleta *Morlet* é apropriada para tratar as oscilações anuais e do tipo ENOS porque ela permite representar a amplitude (ou energia) e a fase da escala λ em função do tempo. Além desses, Torrence e Compo (1998) e Torrence e Webster (1999) também utilizam a função *Morlet* para analisar os sinais oceanográficos e atmosféricos do Pacífico com a finalidade de estudar as variabilidades do ciclo ENOS. A ondeleta *Morlet* é definida como o produto de uma onda plana modulada por uma função Gaussiana, de acordo com a relação abaixo:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{-i\omega\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (25)$$

na qual ψ_0 é a ondeleta em um tempo adimensional η , e ω é o número de onda. Esta ondeleta permite extrair informação sobre a amplitude e fase dos processos que estão sendo analisados (KUMAR; FOUFOULA-GEORGIU, 1997). Como essa ondeleta é representada por uma função complexa é possível analisar a fase e o módulo do sinal decomposto (DOMINGUES et al., 2005). O gráfico da parte real dessa função ondeleta está ilustrado na Figura 2.3, dada pela parte real da relação abaixo:

$$\psi_0(\eta) = e^{-i\omega_0\eta} * \cos(5\eta) \quad (26)$$

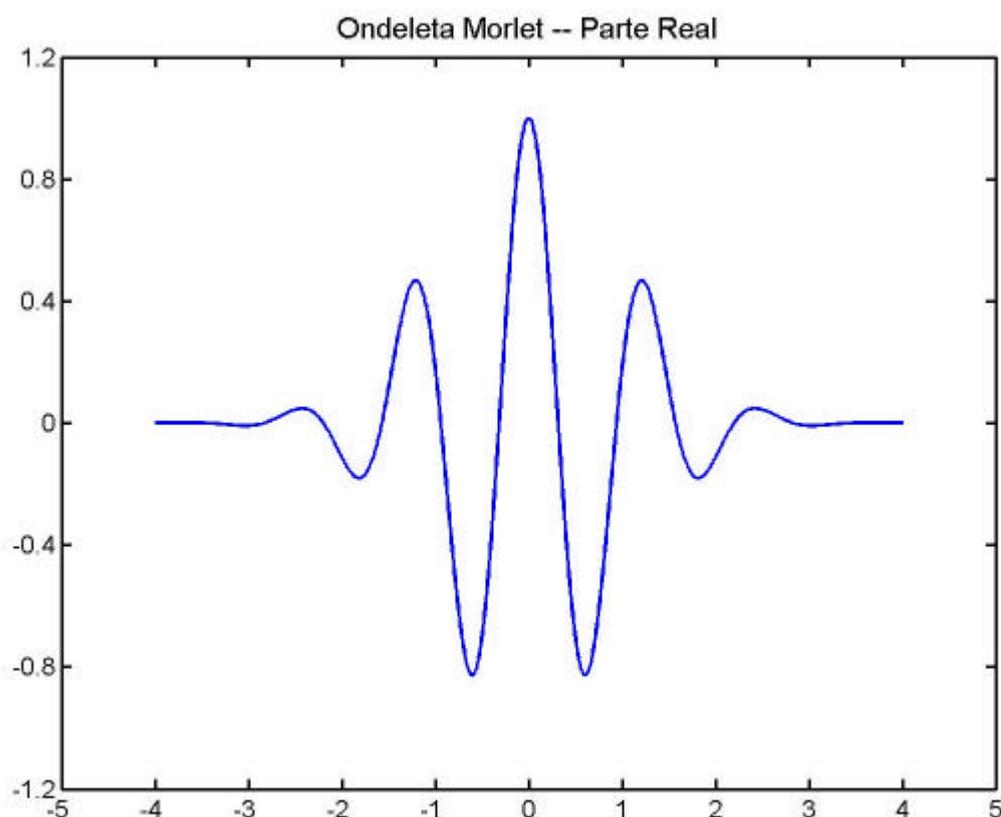


Fig. 2.3 – Parte real da ondeleta Morlet utilizada neste trabalho. Eixo vertical representa a escala da ondeleta e o eixo horizontal o parâmetro de localização.

Torrence e Compo (1998) publicaram um guia de análise em ondeletas. O guia apresenta os efeitos de borda, a escolha da função apropriada, e a relação entre a escala da ondeleta e a frequência de Fourier. Algumas aplicações foram feitas utilizando os dados mensais da anomalia da TSO na região N3, IOS e pressão ao nível do mar (PNM) de 1871 até 1997.

Neste trabalho, utilizou-se o programa desenvolvido por Torrence e Compo (1998) para obter o espectro de energia e a parte real da componente zonal do centróide da PAQ do Pacífico. Com o objetivo de ilustrar a utilização adequada do programa foi calculado o espectro de energia da mesma série temporal utilizada pelos

autores, a anomalia da TSO na região N.3 de monitoramento do ENOS (Fig. 2.4). A série temporal utilizada por Torrence e Compo (1998) tem início em 1871 e termina em 1997 (Fig. 2.4_A). Da mesma forma que no trabalho por eles apresentados, pode-se observar a maior concentração de energia na faixa de 2,6 a 5,3 anos realçando as oscilações interanuais dominadas pelo ciclo ENOS.

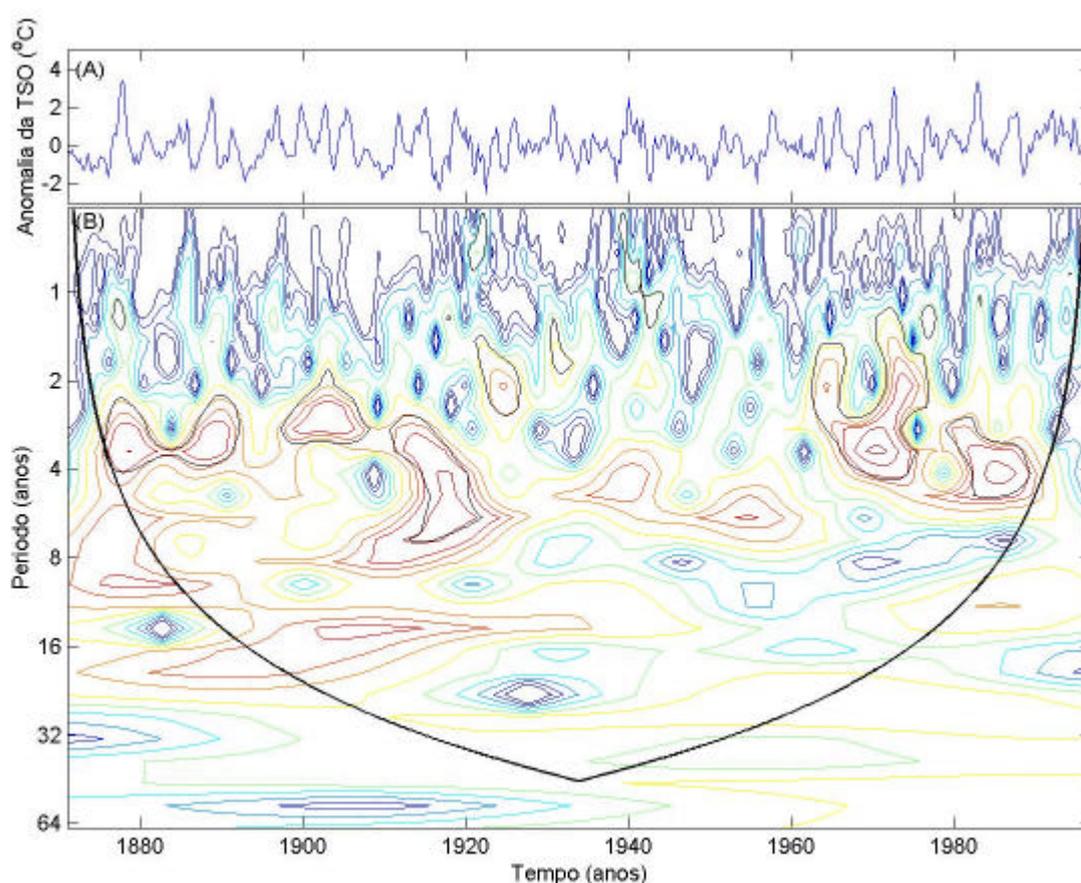


Fig. 2.4 – (A) Série temporal da anomalia da TSO na região N3. Eixo horizontal está o tempo em anos e na vertical a anomalia representada em graus Celsius. (B) Correspondente espectro de energia da ondeleta Morlet. Eixo horizontal escalonado com o gráfico (A) e na vertical os períodos em meses na escala diádica. Ainda estão representados o cone de influência (linha contínua preta) e o nível de confiança de 95% (contornos pretos). A energia é distribuída através das cores com energia crescente para a tonalidade avermelhada. Período de análise é de 1871 até 1997. Fonte: <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/software.html>.

CAPÍTULO 3

- APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS -

As componentes do centróide da PAQ foram calculadas utilizando a metodologia desenvolvida por Machado e d'Ávila (2005) no campo semanal da TSO. Este tópico tem o objetivo de apresentar e discutir os resultados obtidos a partir das séries temporais de cada componente. Primeiramente, o posicionamento do centróide é analisado sob diferentes configurações no Pacífico tropical. Em seguida são avaliados e discutidos os principais aspectos do deslocamento da componente zonal durante os episódios de *El Niño*. A escalas de tempo e espaço do deslocamento zonal da PAQ foram detectadas com a aplicação da transformada de ondeleta. Por fim, é feito um estudo de caso no qual foi possível traçar a trajetória do centróide durante todo o ciclo ENOS de 1997-98. Ainda foram utilizadas as informações da isoterma de 20°C e a velocidade vertical do vento com a finalidade de contribuir com o conhecimento dos mecanismos envolvidos neste episódio que foi o mais bem monitorado de todos os tempos.

3.1 – O POSICIONAMENTO DO CENTRÓIDE

Na Figura 3.1 está ilustrada a máscara numérica editada para representar o Oceano Pacífico e limitar os movimentos da PAQ. Além disso, podem ser visualizadas a PAQ, a posição do centróide e a área preenchida pela mesma em dois meses específicos para o ano de 1998. Note as duas situações extremas: a PAQ cobrindo toda a faixa equatorial do Pacífico em março, configurando condições de *El Niño* (Fig. 3.1_A) e; e preenchendo somente o setor oeste deste oceano em setembro, condições de *La Niña* (Fig. 3.1_B).

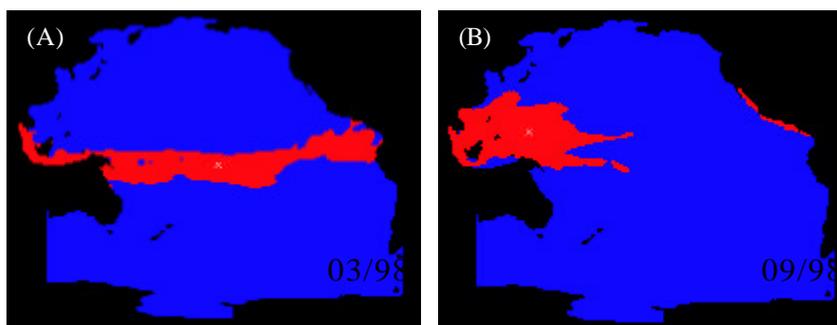


Fig. 3.1 – Representação do Oceano Pacífico com destaque para a PAQ do Pacífico com temperatura acima de 29°C (em vermelho). O ‘x’ branco representa a posição do centróide. Em preto os continentes e em azul o oceano com temperatura abaixo de 29°C. (A) Março de 1998, *El Niño*; (B) Setembro de 1998, *La Niña*. Fonte: d’Ávila e Machado (2004).

De acordo com as séries temporais da anomalia da TSO, as duas últimas décadas apresentaram os seguintes episódios de *El Niño*: 1982-83 (CANE, 1983; PHILANDER, 1983; RASMUSSEN; WALLACE, 1983; RASMUSSEN; HALL, 1983) e 1997-98 (MCPHADEN, 1999; DELCROIX et al., 2000; NICHOLLS, 2000; PICAUT et al., 2002), considerados como os mais fortes do século passado; 1986-87,

qualificado como um evento moderado (PHILANDER, 1990; MCPHADEN; PICAUT, 1990; PICAUT; DELCROIX, 1995); e 1990-1995, rotulado como o mais longo dos *El Niños* (TRENBERTH; HOAR, 1996). Outros autores como Boo e Lim (2004), por exemplo, dividem o evento de 1990-95 em dois episódios: o primeiro corresponde aos anos de 1991-93; e o segundo 1994-95. Os anos de 1988-89 (PHILANDER, 1990; DELCROIX et al., 2000; PICAUT et al., 2002) e 1998-1999 (NICHOLLS, 2000; DELCROIX et al., 2000; PICAUT et al., 2002), por exemplo, configuraram as condições de *La Niña* como fase complementar do ciclo ENOS.

As séries temporais das componentes meridional e zonal do centróide da PAQ utilizando o campo semanal da TSO estão representadas na Figura 3.2. A componente meridional do centróide (Fig. 3.2_A) apresenta um deslocamento norte-sul de acordo com o ciclo anual solar; ou seja, durante o inverno (verão) austral o centróide posiciona-se no hemisfério norte (sul). A posição meridional média está em torno da latitude 1.1°N. Além disso, as maiores amplitudes nos deslocamentos meridionais ocorrem para o norte porque a Austrália funciona como uma barreira natural imposta ao movimento da PAQ.

O deslocamento leste-oeste da PAQ é monitorado utilizando a componente zonal do centróide da PAQ (Fig. 3.2_B). Nota-se em alguns anos que esta componente migra para leste chegando até mesmo a alcançar a região central do Pacífico em torno da longitude 203°E. Cabe ressaltar que essa componente pode alcançar no máximo a região central do oceano porque o centróide representa o centro geométrico da PAQ.

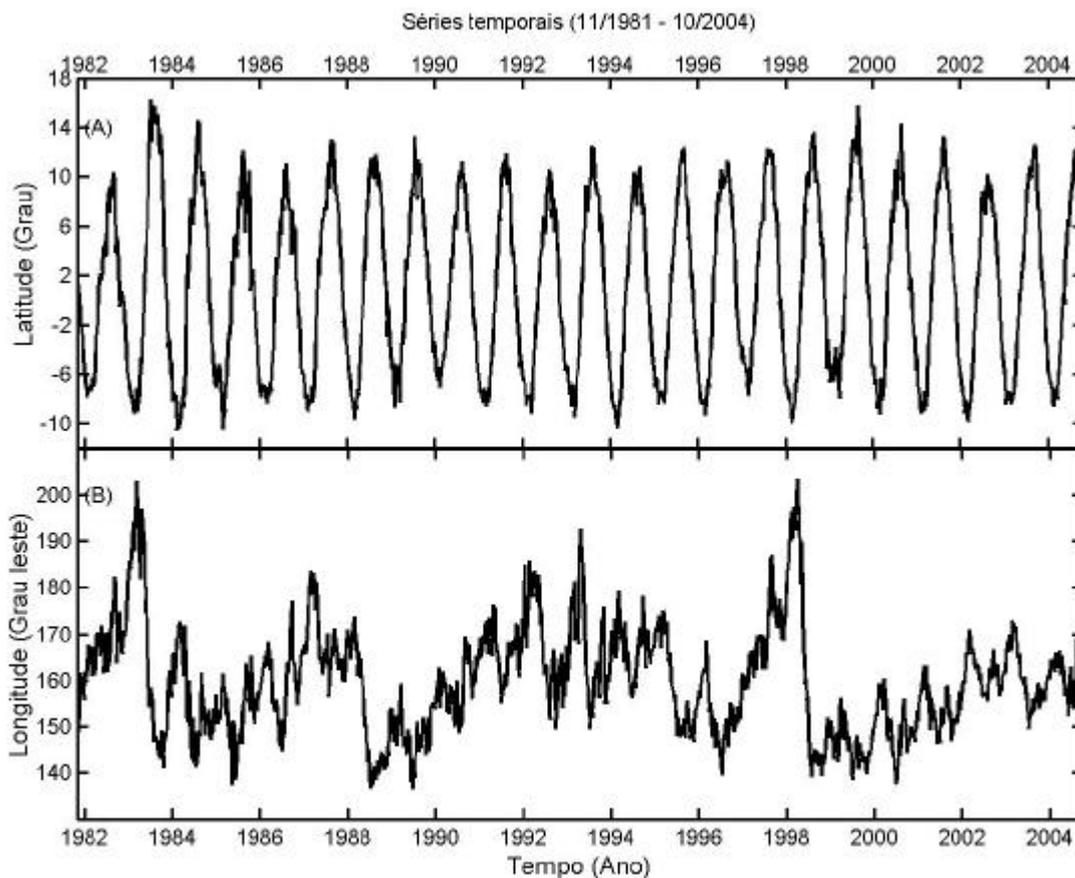


Fig. 3.2 – Série semanal das componentes (A) meridional e (B) zonal do centróide da PAQ com $T \geq 29^{\circ}\text{C}$. A série temporal inicia em 8 de novembro de 1981 e termina em 27 outubro de 2004.

A componente zonal do centróide da PAQ se desloca por grandes distâncias para leste no Oceano Pacífico justamente durante os episódios de *El Niño* de 1982-83; 1986-87; 1990-95; e 1997-98. Nesses anos o centróide da PAQ deslocou-se para leste, cruzou a LMD e alcançou as posições zonais máximas indicando todos os eventos de *El Niño* (Fig. 3.2_B).

Nota-se que os maiores deslocamentos do centróide para leste ocorreram precisamente durante os eventos mais fortes do século passado, os episódios de 1982-83 e 1997-98. Durante esses eventos o centróide traçou a maior trajetória percorrida para leste e alcançou a região central do Pacífico batendo a longitude de 203°E em março de 1983 e abril de 1998. Como fase complementar do ciclo ENOS o centróide

retornou para o extremo oeste deste oceano atingindo os menores valores em longitude (Fig. 3.2_B), refletindo os episódios de *La Niña*. Outros autores (PICAUT; DELCROIX, 1995; DELCROIX et al., 2000; PICAUT et al., 2002) têm monitorado o contorno leste da PAQ para determinar o seu deslocamento e relacioná-lo com o fenômeno *El Niño-La Niña* e a dinâmica de ondas equatoriais.

As trajetórias do centróide da PAQ que apresentaram os maiores posicionamentos para leste durante os episódios de *El Niño* (1982-83; 1986-87; 1990-95; e 1997-98) foram traçadas e podem ser visualizadas na Figura 3.3⁸. A trajetória do centróide é traçada a partir da primeira semana de novembro do ano um (1982; 1986; 1992; e 1997) até a data na qual o centróide alcança o seu máximo deslocamento para leste no ano dois (1983; 1987; 1993; e 1998). O maior número de pontos durante a trajetória traçada em cada episódio indica o maior tempo que o centróide levou para alcançar a máxima posição no leste. Todos esses períodos supracitados com deslocamento para leste preenchem o final da primavera e todo verão austral. Conseqüentemente, o centróide está presente predominantemente no hemisfério sul.

⁸ A trajetória do centróide durante os anos de *El Niño* são representadas pelos símbolos de coloração vermelha, os anos de *La Niña* pela cor azul e os anos neutros pela cor preta. Salvo na figura 6.10_C que se destaca um ciclo ENOS completo e por este motivo são distribuídas mais cores para melhor visualização e interpretação dos resultados pelo leitor.

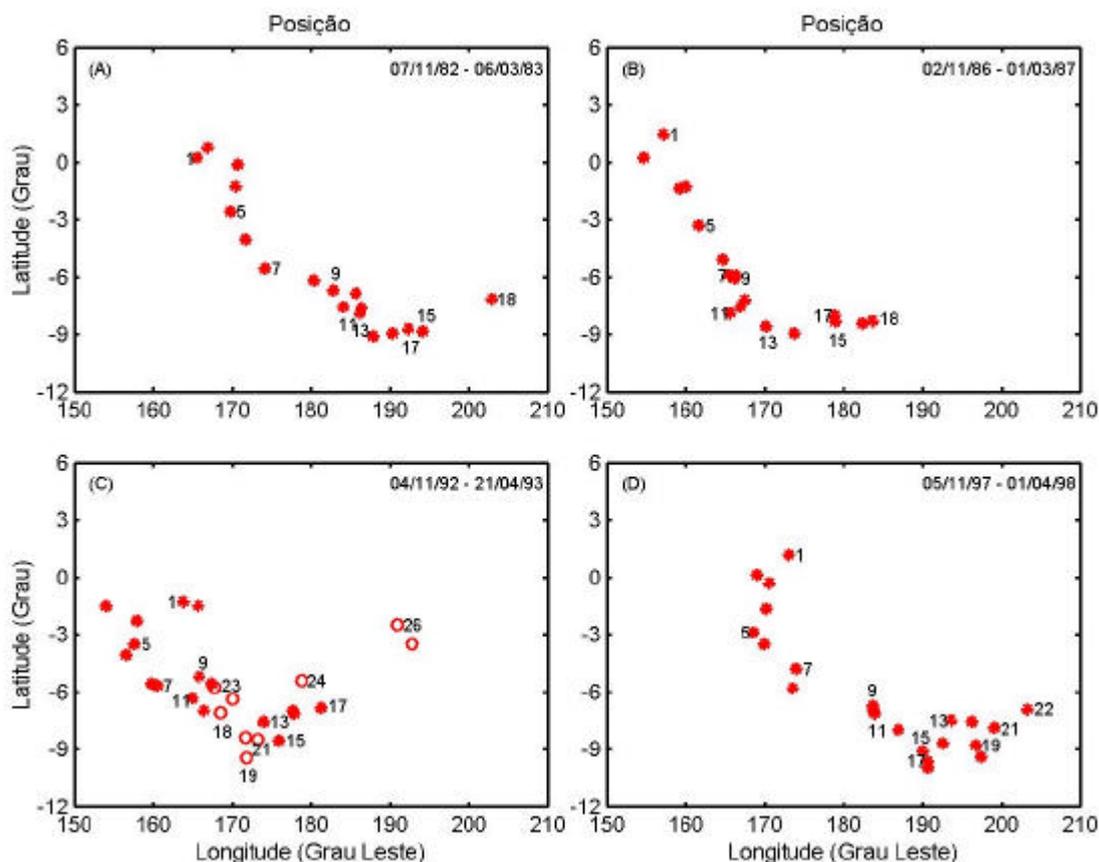


Fig. 3.3 – Posição do centróide da PAQ durante os momentos com grandes migrações para leste, coincidentes com os *El Niños* de (A) 1982-83, (B) 1986-87, (C) 1992-93 e (D) 1997-98. O primeiro ponto equivale a primeira semana de novembro do primeiro ano em questão; o último ponto corresponde a época na qual o centróide apresenta a máxima posição leste. Os símbolos ‘*’ e ‘o’ em (C) indicam os dois períodos da trajetória que o centróide deslocou-se para máxima posição ao leste durante o evento 1992-93.

Nota-se que durante os eventos 1982-83, 1986-87 e 1997-98 (Fig. 3.3_{A,B,D}) o centróide alcança sua posição zonal máxima percorrendo uma trajetória anti-horária. Isto não é observado no percurso traçado durante o *El Niño* de 1992-93 (Fig. 3.3_C) no qual o centróide permanece no setor central-leste do Oceano Pacífico até alcançar sua posição zonal máxima. Este fato acontece porque o episódio 1992-93 está contido no ENOS de 1990-95, o mais longo evento do século passado de acordo com Trenberth e Hoar (1996) (ou 1991-93 de acordo com Boo e Lim (2004)). Ou seja, durante este

episódio o centróide desloca-se para o setor oriental do oceano e permanece a leste da posição média (160°E) na maior parte do tempo até retornar completamente para o setor central-oeste, completando o ciclo interativo do fenômeno ENOS.

Durante os anos sob condições de *La Niña* (1984-85; 1988-89; 1998-1999; e 2000-01), a posição zonal do centróide se encontra no lado ocidental do Pacífico permanecendo inclusive a oeste do meridiano de 160°E (Fig. 3.2_B), que é a posição zonal média de todo o período de análise. As trajetórias do centróide da PAQ que apresentaram os menores posicionamentos para leste em cada um desses episódios de *La Niña* foram traçadas e podem ser visualizadas na Figura 3.4.

Naqueles anos, a componente zonal do centróide da PAQ alcança longitudes como 141.4°E em julho de 1984, 136.8°E em julho de 1988, 138.6°E em julho de 1999 e 137.7°E em junho de 2000, indicando as mínimas posições do centróide da PAQ para leste. A componente meridional percorre a trajetória traçada pelo ciclo anual solar. Nota-se que em todos os pontos numerados por um (1) na Figura 3.4, correspondente a primeira semana de maio, o centróide está presente em torno da Linha Equatorial (LE). A componente meridional desloca-se para norte acompanhando o inverno austral e em seguida retorna para sul indicando o verão no hemisfério sul na última semana dos meses de novembro.

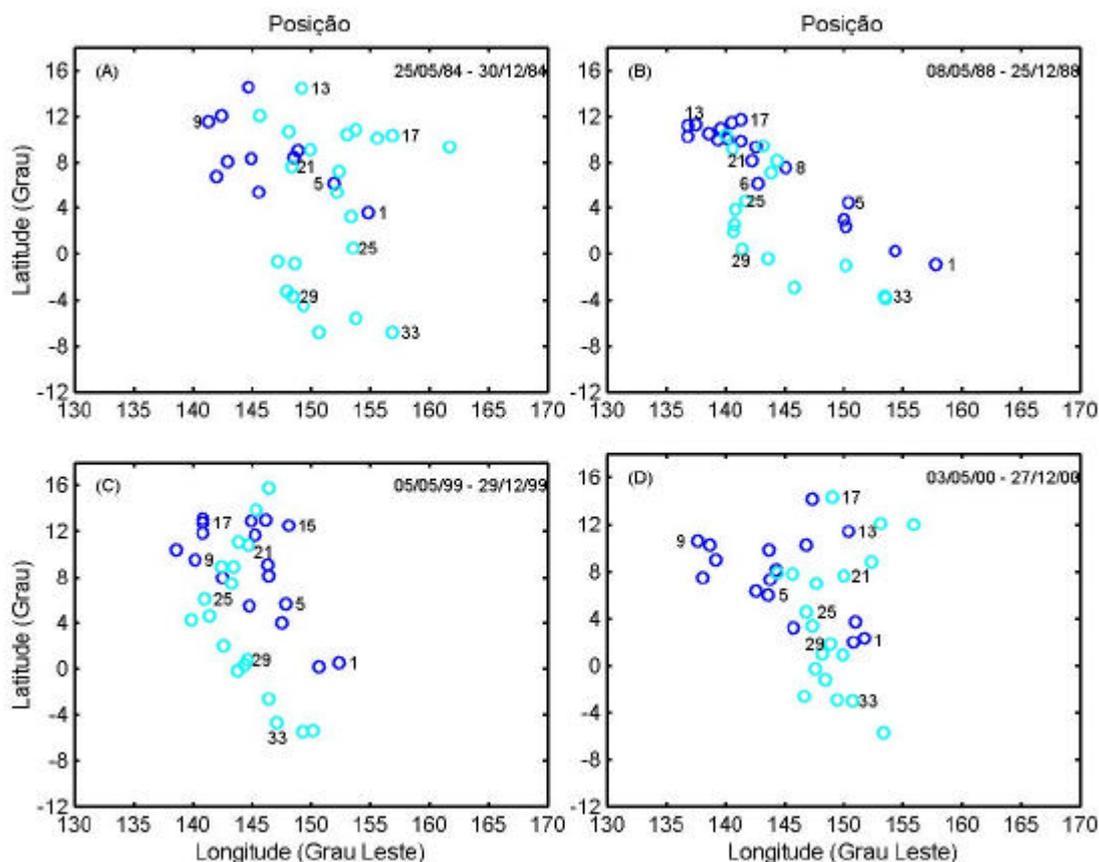


Fig. 3.4 – Posição do centróide no setor oeste do Pacífico em (A) 1984, (B) 1988, (C) 1999 e (D) 2000, coincidentes com os anos de *La Niña*. O primeiro ponto equivale a semana de maio que apresentou a primeira posição a oeste da média (160°E) e o ponto final corresponde a última semana de dezembro. Símbolo azul escuro (claro) representa o deslocamento para o hemisfério norte (sul).

Durante os anos de *El Niño*, os maiores deslocamentos do centróide da PAQ para leste coincidem com as épocas nas quais o mesmo encontra-se no hemisfério sul; ou seja, as maiores migrações para leste da componente zonal em cada evento de *El Niño* são coincidentes com o verão austral (Fig. 3.2 e 3.3), especificamente entre março e abril. Além disso, a componente meridional do vento no Pacífico sudeste, geralmente de sul, é mais fraca justamente nesta época do ano (CANE, 1983; GU; PHILANDER, 1995) concordando com o deslocamento do centróide da PAQ para sudeste (Fig. 3.3). Isto não implica que sempre que o centróide estiver no hemisfério

sul ou a componente meridional do vento no Pacífico leste enfraquecer ocorrerá um *El Niño*.

Por outro lado, a posição da componente meridional do centróide encontra-se nas mais altas latitudes do hemisfério norte justamente entre agosto e setembro (Fig. 3.3_A e 3.4) concordando com a época na qual a componente meridional do vento no Pacífico sudeste é mais forte (CANE, 1983; GU; PHILANDER, 1995). Ao mesmo tempo, há concordância com o fenômeno *La Niña* se a componente zonal do centróide estiver presente no extremo oeste do Pacífico nestas épocas do ano (Fig. 3.4). Por estes motivos, a amplitude do ciclo anual é negativamente correlacionada com as variações interanuais no Pacífico leste, como observado por Gu e Philander (1995).

3.2 – O DESLOCAMENTO ZONAL DO CENTRÓIDE

Na Figura 3.5 estão representados as frequências relativas acumuladas e o histograma das observações semanais da posição zonal do centróide da PAQ para todo o período de análise, de novembro de 1981 a outubro de 2004. Os intervalos de classes foram obtidos a partir da relação $N \leq 2^k$, onde N é o número de pontos ou dimensão da amostra e k é o número de classes.

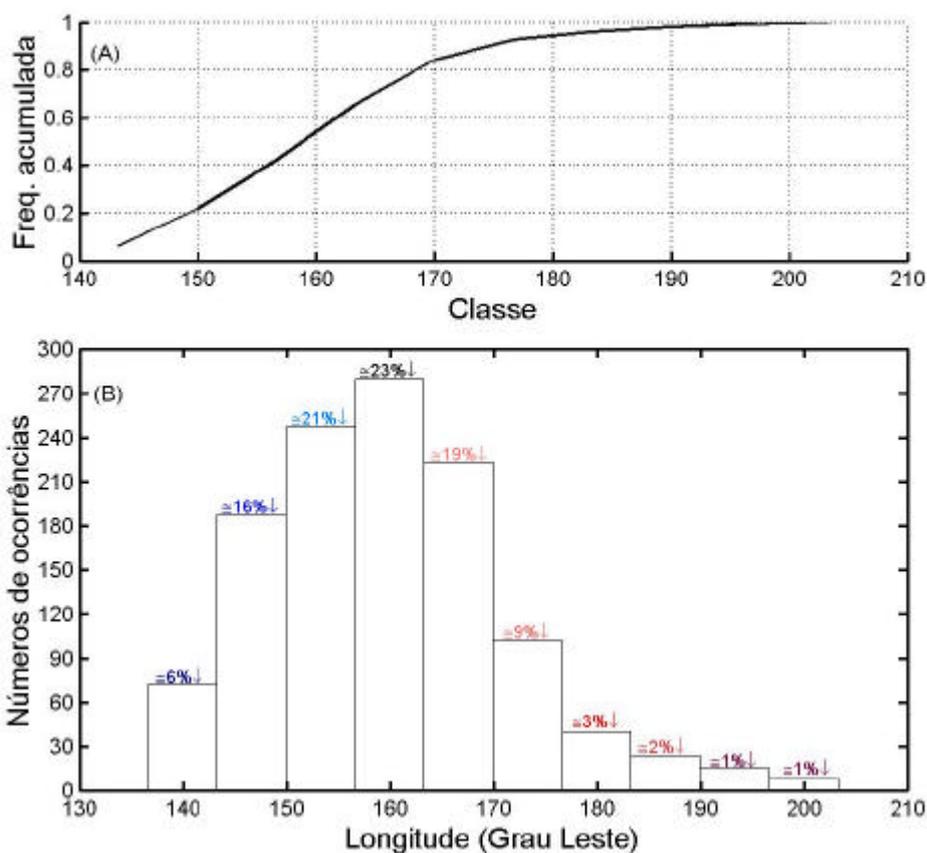


Fig. 3.5 – (A) Freqüência acumulada da posição zonal do centróide da PAQ e (B) histograma com dez intervalos de classes iguais de amplitude 6.67° . Dados semanais de novembro de 1981 a outubro de 2004.

A posição da componente zonal do centróide apresenta-se predominantemente no setor oeste do Oceano Pacífico. Para o período estudado, esta componente do centróide posicionou-se 1132 vezes (94.5%) a oeste da LMD (180°E/W), e 66 vezes (5.5%) a leste da mesma (Fig. 3.5). A posição zonal média foi de aproximadamente 160°E .

A componente zonal do centróide da PAQ desloca-se abruptamente para leste, cruza a LMD e alcança a região central do Oceano Pacífico justamente durante os episódios de *El Niño*, ou seja: 1982-83; 1986-87; 1990-95; 1997-98 (Fig. 3.2_B). Cabe ressaltar que os maiores deslocamentos do centróide para leste ocorreram precisamente

durante os dois episódios mais intensos do século passado (1982-83 e 1997-98). Nesses fortes eventos o centróide da PAQ percorreu o sentido oeste-leste-oeste sem interrupção; ou seja, o centróide esteve em torno de sua posição média, migrou para leste cruzando a LMD, alcançou sua posição zonal máxima indicando os eventos de *El Niño* e retornou bruscamente para o setor oeste do Pacífico (Fig. 3.2_B).

A Figura 3.6_B apresenta o espectro de ondeleta da série semanal da componente zonal do centróide da PAQ representada na Figura 3.6_A. Todos os ciclos ENOS existentes no período analisado podem ser observados, ou seja: 1982-83; 1986-87; 1990-95; e 1997-98. Além disso, a duração e a intensidade de cada ciclo ENOS também podem ser observadas no espectro. Esses eventos são visualizados na faixa de cores com maior concentração de energia com tonalidade avermelhada.

Nota-se que o evento que apresentou maior energia foi o episódio de 1982-83, seguido pelo *El Niño* de 1997-98, 1992-93 (que está contido no evento de 1990-95), e 1986-87. A maior quantidade de energia no espectro concentrada no episódio de 1982-83 pode ser atribuída ao casamento de fase entre as diferentes escalas de movimento da PAQ. Para confirmar esse processo deve-se calcular a fase da ondeleta.

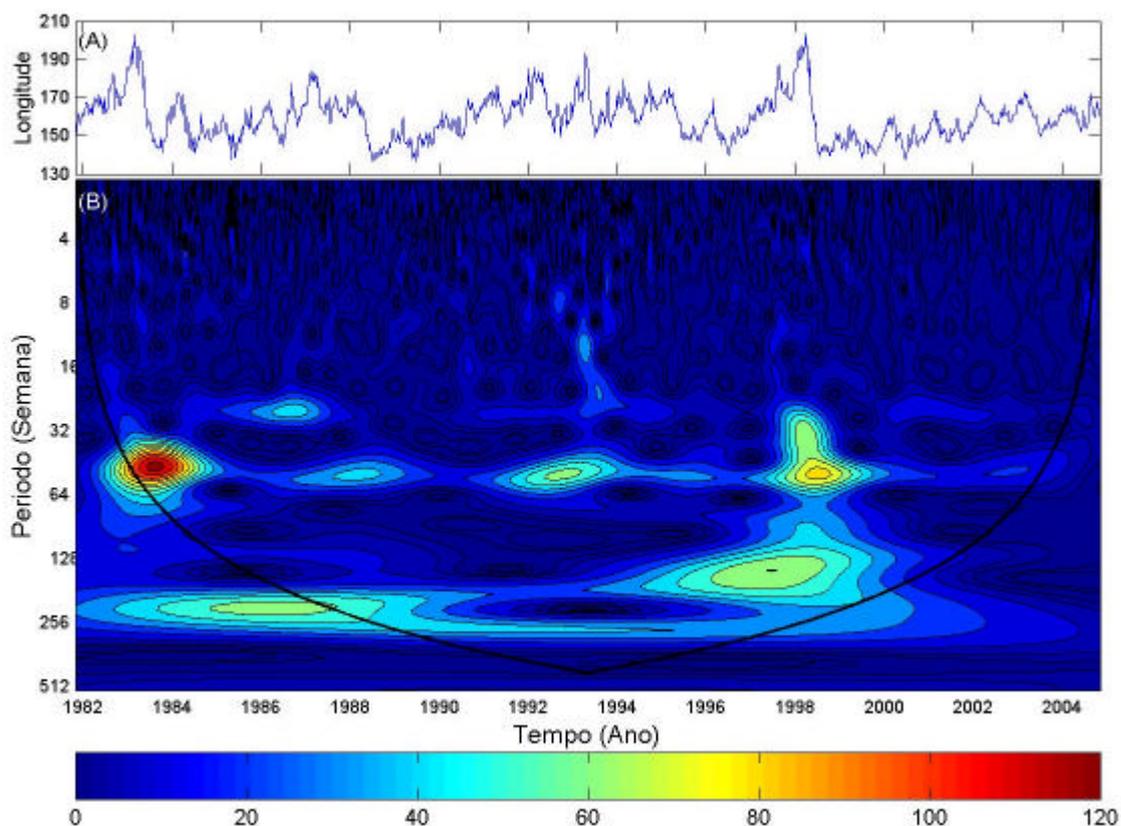


Fig. 3.6 – (A) Série temporal da componente zonal do centróide da PAQ. O eixo vertical é a longitude em graus e o eixo horizontal é o tempo em anos. (B) Espectro de ondeleta para a série temporal de (A). O eixo vertical é o período em semanas na escala diádica e o eixo horizontal o tempo em anos (escalonado com o eixo horizontal de (A)). O cone de influência está ilustrado através da linha contínua preta. A energia está representada em faixa de cores com maior (menor) valor preenchendo a coloração avermelhada (azulada).

Para entender a correlação negativa entre a amplitude do ciclo anual e as variabilidades interanuais no Pacífico central-leste, torna-se necessário ter em mente que os processos físicos que determinam as mudanças nas escalas interanuais e sazonais são diferentes. Por exemplo, as mudanças interanuais estão associadas à redistribuição zonal em grande escala das águas superficiais aquecidas, pois durante o *El Niño* a termoclina afunda no Pacífico tropical leste e aflora no oeste. No Pacífico

sudeste, a componente meridional do vento, geralmente de sul, é mais fraca entre março e abril e mais forte de agosto a setembro (CANE, 1983; GU; PHILANDER, 1995). A componente zonal dos ventos, que geralmente são de leste, a oeste de 90°W , apresentam menor variação sazonal (PHILANDER, 1990; GU; PHILANDER, 1995). Essas duas componentes dos ventos, de sul e de leste, induzem a ressurgência e a baixa temperatura no Pacífico central-leste (PHILANDER; PACANOWSKI, 1981; PHILANDER, 1990).

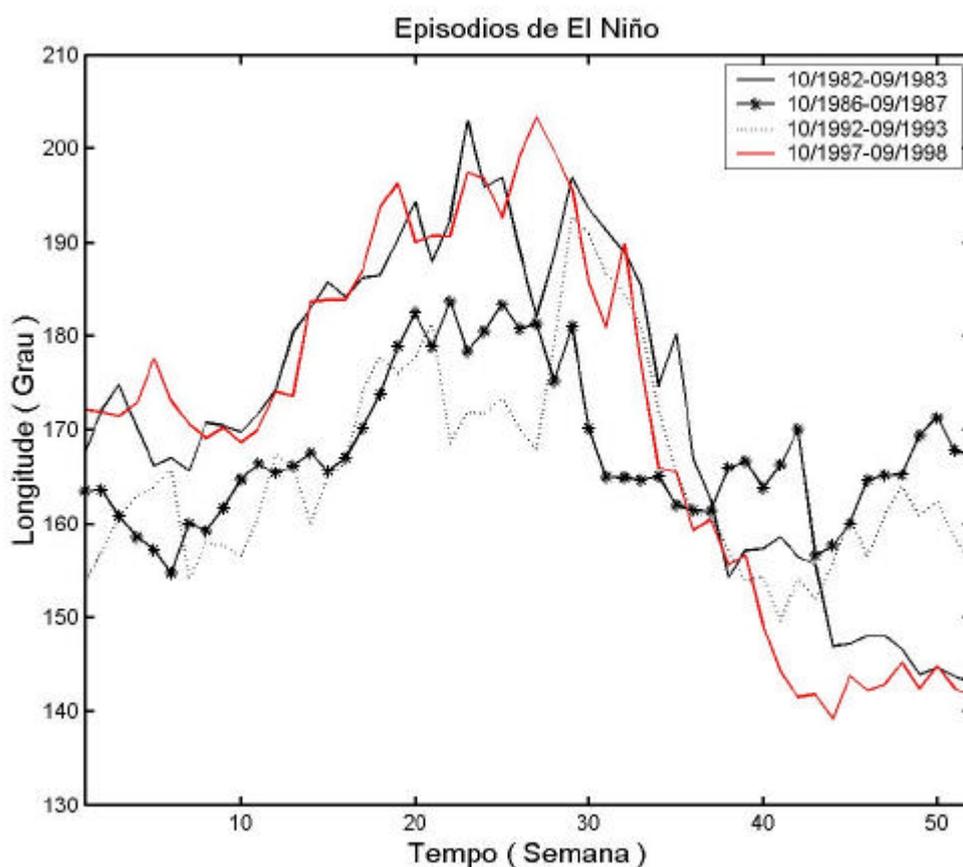


Fig. 3.7 – Série semanal da posição zonal do centróide da PAQ para os eventos de 1982-83 (linha contínua preta), 1986-87 (linha ‘-*’ preta), 1992-93 (linha pontilhada preta) e 1997-98 (linha contínua vermelha). O tempo é da primeira semana de outubro do ano 1 (1982; 1986; 1992; e 1997) até a última semana de setembro do ano 2 (1983; 1987; 1993; e 1998).

De acordo com Gu e Philander (1995), o relaxamento do vento meridional e a conseqüente interrupção no fenômeno da ressurgência contribuem para a máxima elevação sazonal na temperatura da água no Pacífico leste, enquanto a ressurgência devido aos fortes ventos de agosto a setembro favorecem um mínimo na TSO. Mas a amplitude do ciclo anual parece ser menor durante o deslocamento da componente zonal da PAQ para leste (*El Niño*) e maior durante o deslocamento para oeste (*La Niña*) (Fig. 3.6_{A,B} durante os fortes eventos). Isto coincide com Gu e Philander (1995) que discutem esse contraste em termos de profundidade da termoclina e velocidade vertical no Oceano Pacífico leste. Antes de ocorrer um *El Niño* e a PAQ migrar para leste, o centróide já está presente em torno da posição média e desloca-se para leste alcançando sua posição máxima. Quando ele retorna para oeste percorre a maior trajetória, saindo de sua máxima posição no leste para a mínima (Fig. 3.8). Por isso, a amplitude do deslocamento para oeste (mudanças nas condições do Pacífico de *El Niño* para *La Niña*) é maior; ou seja, a amplitude (energia) do ciclo anual aumenta na mudança da fase *El Niño* (centróide no leste) para a *La Niña* (centróide no oeste). O mesmo ocorre nos dados da anomalia da TSO analisados por Gu e Philander (1995). A TSO no Pacífico leste já é mais alta sob condições normais durante o verão austral, porém eleva-se mais durante os anos de *El Niño* com aumento anômalo na temperatura das águas da região. Quando as condições do Pacífico mudam para a fase fria a TSO diminui bruscamente traçando a maior amplitude nesse intervalo, isto é, diferença entre a TSO máxima e mínima.

Embora existam algumas diferenças entre os episódios de *El Niño* mais fortes do século passado (1982-83 e 1997-98) observa-se que estes eventos apresentaram

uma característica em comum: o centróide da PAQ percorreu uma trajetória bastante semelhante entre os anos em questão (Fig. 3.8). A correlação da série semanal da componente zonal entre os dois episódios supracitados foi de 0.93.

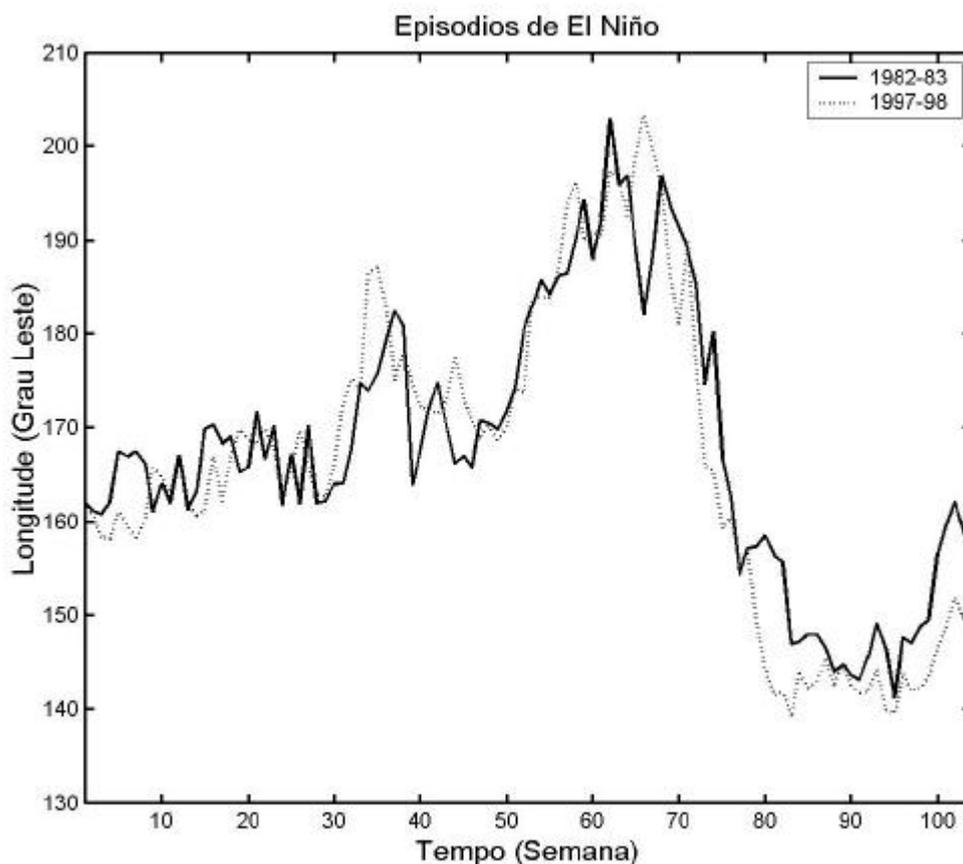


Fig. 3.8 – Série semanal da componente zonal do centróide da PAQ para os eventos de 1982-83 (linha contínua) e 1997-98 (linha pontilhada). O tempo é da primeira semana de 1982 (1997) até a última semana de 1983 (1998).

Analisando os índices de monitoramento do ENOS descritos no capítulo 1.4 observa-se que existem defasagens no tempo em que ocorrem os valores máximos e mínimos para os diferentes episódios e índices (Fig. 3.9). Por exemplo, a região N1.2 indicou os dois máximos da anomalia positiva na temperatura da água superficial (condições de *El Niño*) em dezembro e junho de 1983, durante o episódio de 1982-83;

e dois máximos em agosto e dezembro de 1997, no evento de 1997-98 (Fig. 3.9_A). A correlação da anomalia da TSO nesta região do Pacífico entre os dois episódios é de 0.49 para os dados mensais.

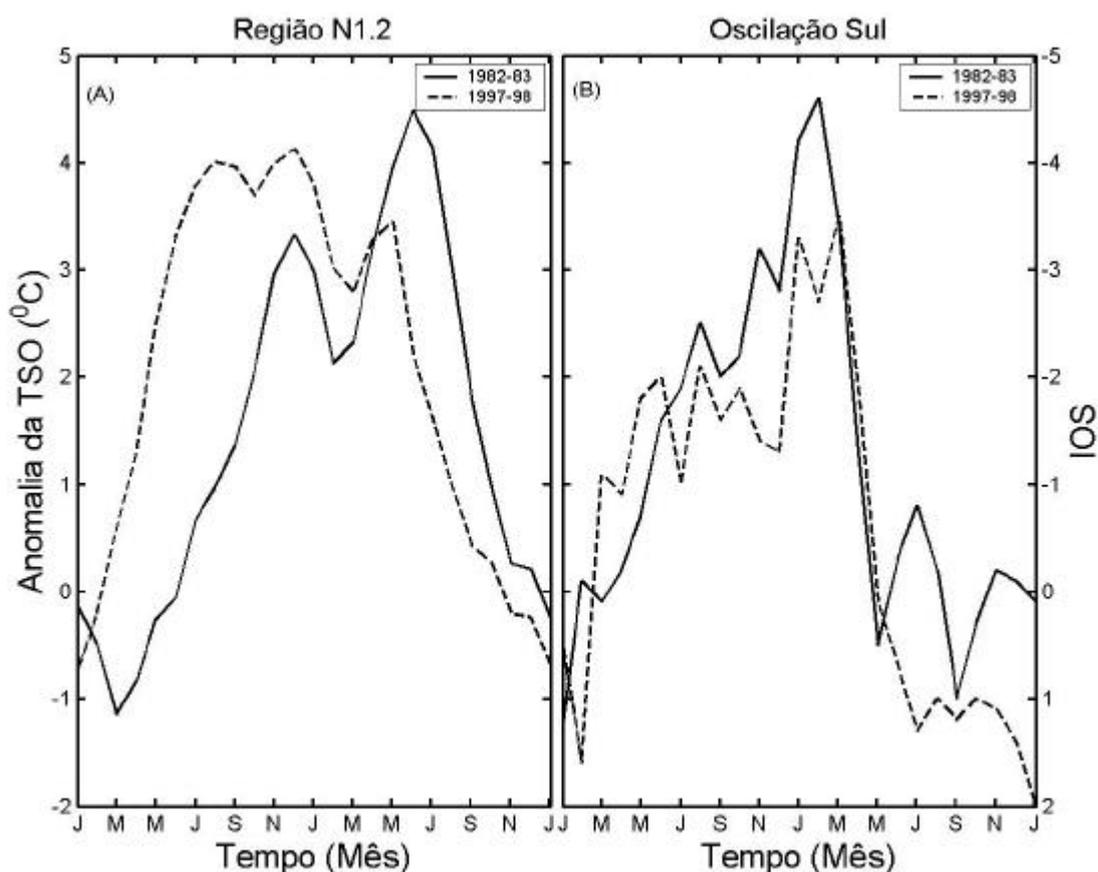


Fig. 3.9 – Índices mensais (A) da anomalia da TSO na região N1.2 e (B) do IOS durante os episódios de 1982-83 (linha contínua) e 1997-98 (linha tracejada). Fonte dos dados de anomalia da TSO e IOS podem ser achadas, respectivamente, em: <ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/cpc/wd52dg/data/indices/sstoi.indices>; <ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/cpc/wd52dg/data/indices/soi>.

Nota-se que essas épocas também são bem diferentes quando comparado com as máximas anomalias negativas do IOS (condições de *El Niño*) que foi em fevereiro de 1983, durante o evento de 1982-83, e março de 1998, no episódio de 1997-98 (Fig.

3.9_B). A correlação dos dois episódios utilizando o IOS é de 0.8 para os dados mensais⁹.

Segundo Philander (1990), é possível que uma elevação na pressão em Darwin e simultâneo decréscimo no Tahiti não sejam coincidentes com o aumento na temperatura das águas e chuvas torrenciais no Pacífico central e leste. Ou seja, os métodos de monitoramento ainda apresentam deficiências e por isso são capazes de descrever um episódio com imprecisão. Para o autor é inútil debater se está ocorrendo ou não o episódio nestes casos, consequência das imperfeitas correlações entre os vários parâmetros no Pacífico tropical.

Além das interações com o ciclo sazonal (GU; PHILANDER, 1995), as oscilações intrasazonais (BERGMAN et al., 2001), a área preenchida pela PAQ (YAN et al., 1992; DELCROIX et al., 2000; SUN, 2003; MACHADO; D'ÁVILA, 2005), a elevação da temperatura no interior da PAQ (SUN, 2003) e a configuração geométrica dos continentes (HAMZA et al., 2000; PICAUT et al., 2002; MACHADO; D'ÁVILA, 2005) apresentam-se também como um dos fatores críticos para determinar a natureza oscilatória do ciclo ENOS e os impactos causados em diferentes regiões do planeta.

A parte seguinte dos resultados está focada na descrição do ciclo ENOS de 1997-98. Além do deslocamento do centróide da PAQ são apresentadas as análises da isoterma de 20°C e velocidade vertical do vento na faixa equatorial do Pacífico para, desta forma, complementar as discussões feitas nesta seção.

⁹ A correlação entre o IOS e a anomalia da TSO na RN1.2 utilizando os dados mensais foi: -0.33 para o evento de 1982-83; -0.77 para o evento de 1997-98.

3.3 - O EPISÓDIO DE 1997-98

A variação meridional, zonal e a posição geográfica do centróide desde janeiro de 1997 até dezembro de 1998 estão ilustradas na Figura 3.10. O objetivo desta figura é fazer uma descrição sucinta da trajetória percorrida pelo centróide durante o ciclo ENOS de 1997-98.

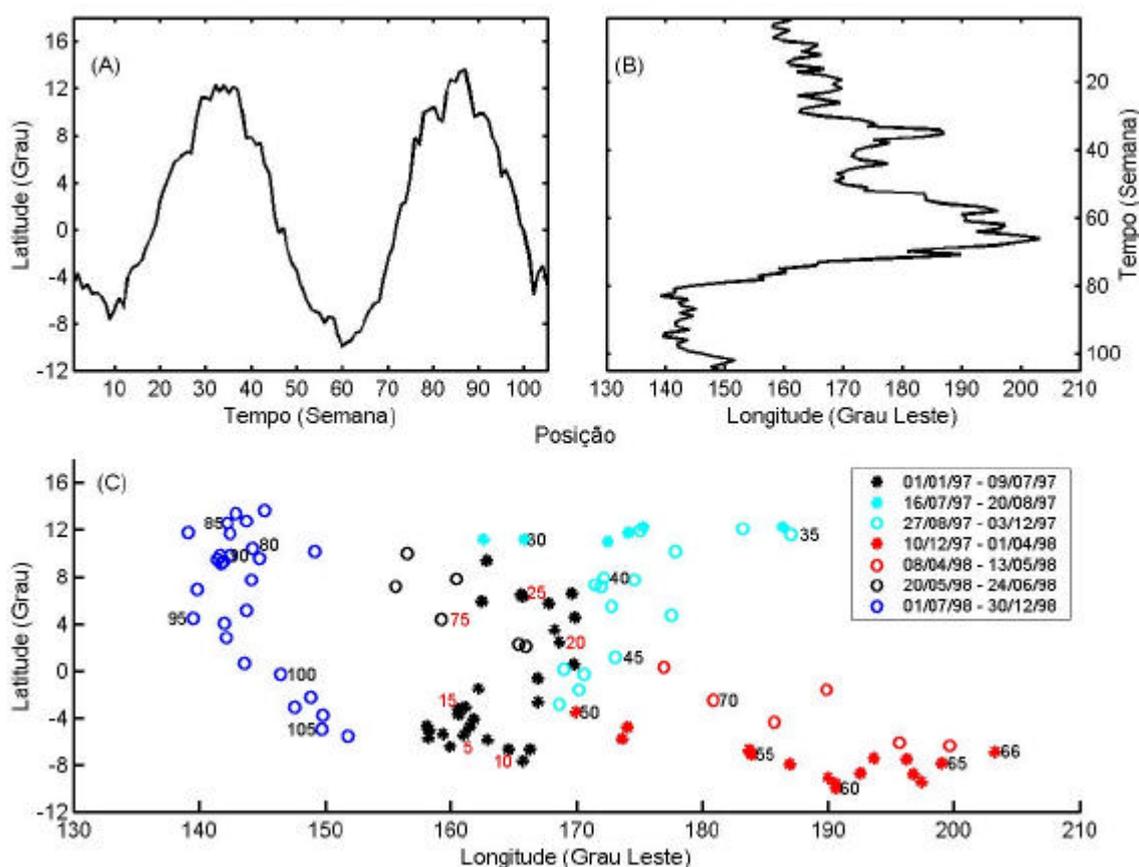


Fig. 3.10 – Série semanal da (A) componente meridional e (B) zonal do centróide da PAQ. (C) Posição do centróide da PAQ durante o ciclo ENOS de 1997-98 com grandes migrações para leste e retorno para oeste. O período de registro é de janeiro de 1997 até dezembro de 1998. A posição em (C) é numerada a cada cinco pontos (ou semanas). O símbolo “*” representa migração para leste e ‘o’ para oeste. As cores preto e azul escuro em cada símbolo denotam, respectivamente, o centróide em torno da posição média (160°E) e a oeste desta longitude. As cores azul claro e vermelho ilustram a posição do centróide a leste daquela longitude.

O centróide da PAQ permanece em torno da posição zonal média (160°E) até o início de julho de 1997 (Fig. 3.10_{B,C}) deslocando-se do hemisfério sul para o norte acompanhando o ciclo anual solar (símbolo ‘*’ preto na Figura 3.10_C).

A componente meridional (Fig. 3.10_{A,C}) indica que na primeira semana de 1997 o centróide esteve presente no hemisfério sul (verão austral), migrou para o hemisfério norte cruzando a LE na primeira semana de maio (outono austral) e alcançou sua posição máxima no hemisfério norte na primeira semana de agosto (inverno austral). Esta componente conservou-se por aproximadamente oito semanas nas mais altas latitudes alcançadas para este período e em seguida deslocou-se para o sul cruzando novamente a LE permanecendo no hemisfério sul da última semana de novembro de 1997 (verão austral) até a primeira semana de maio de 1998 quando outra vez retornou para o hemisfério norte completando o ciclo anual.

A média mensal da seção horizontal da isoterma de 20°C na faixa equatorial do Pacífico indica sua posição em grandes profundidades na parte central-oeste deste oceano com valor máximo em torno de 196 metros na longitude 174.7°E em março, realçando a presença da PAQ nesta região. Na parte central-leste a isoterma situou-se próximo à superfície com profundidade mínima em torno de 28 metros na longitude 264.7°E realçando o fenômeno da ressurgência neste setor do Pacífico (Fig. 3.11_A).

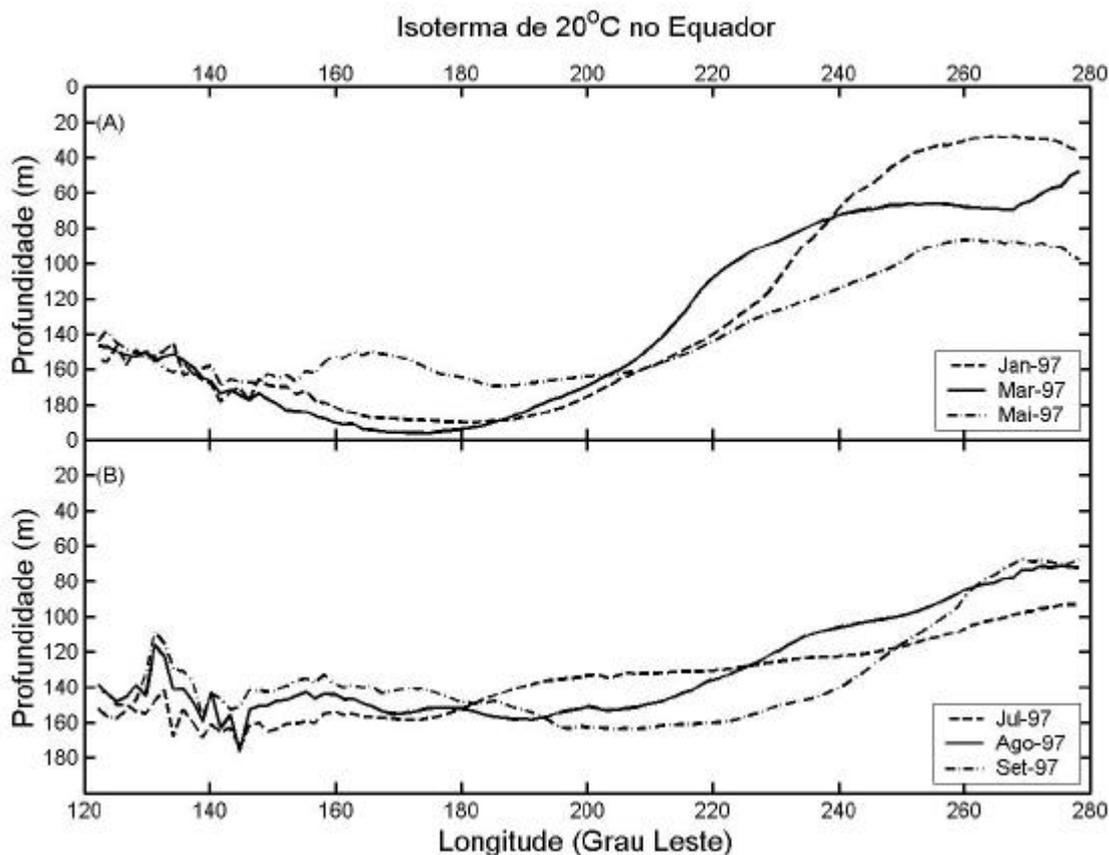


Fig. 3.11 – Isoterma de 20°C na faixa equatorial do Oceano Pacífico para os meses de: (A) janeiro (linha pontilhada), março (linha contínua) e maio (linha tracejada) de 1997; e (B) julho (linha pontilhada), agosto (linha contínua) e setembro (linha tracejada) de 1997.

A composição da média trimestral da velocidade vertical do vento de janeiro até março de 1997 entre as latitudes 2°-5°S está ilustrada na Figura 3.12. Como previamente discutido, este período é caracterizado pela presença da PAQ no hemisfério sul (verão austral) e no setor central-oeste do Pacífico com águas frias no setor central-leste. Nota-se na Figura citada que há correntes de ar que se deslocam para cima (movimentos ascendentes do ar) na parte oeste, especificamente sobre a PAQ, e descendentes sobre as águas frias do setor central-leste.

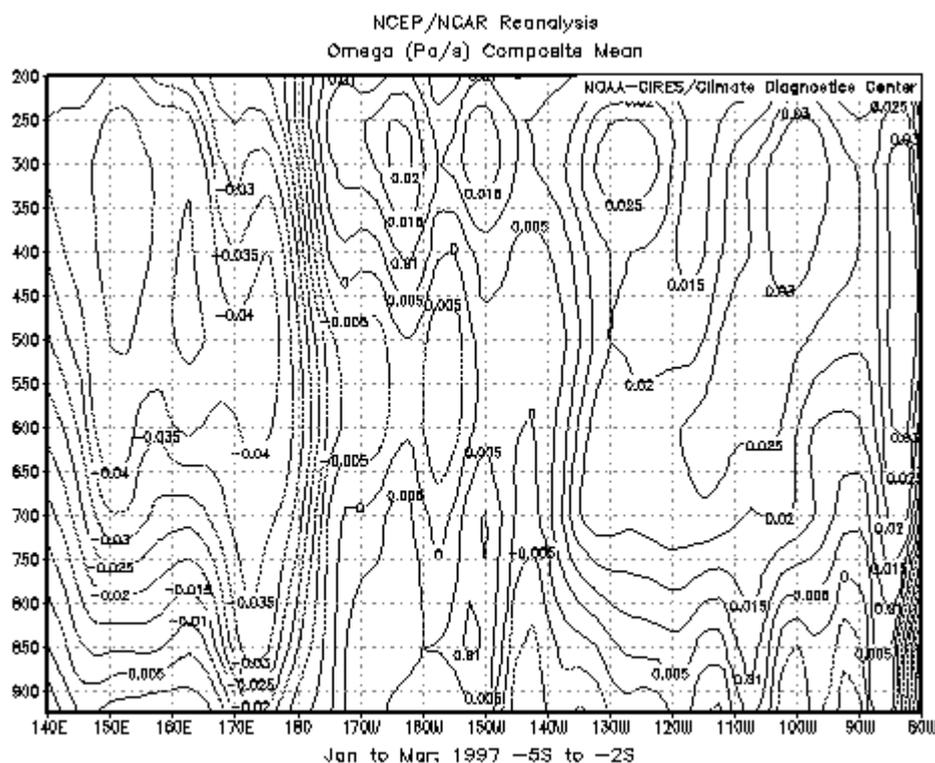


Fig. 3.12 – Media trimestral da velocidade vertical do vento em coordenadas isobáricas (Pa/s) entre as latitudes 2°-5°S e longitudes 120°E-80°W de janeiro a março de 1997. Valores negativos (positivos) indicam movimentos ascendentes (descendentes). Eixo horizontal em graus e vertical em hPa. Fonte: <http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/Composites/comp.pl>

Nos meses de junho a agosto de 1997 o centróide permaneceu em altas latitudes no hemisfério norte (~11.5°N) e deslocou-se somente para leste chegando a alcançar a longitude de 187.05°E (símbolo ‘*’ azul claro na Figura 3.10)¹⁰. Isto significa que a PAQ espalhou-se ocupando uma extensão significativa na faixa intertropical do Oceano Pacífico Norte. Naqueles meses a isoterma de 20°C tornou-se pouco mais rasa no centro-oeste e afundou no extremo leste chegando a profundidade em torno de 100 metros (Fig. 3.11_B) confirmando o deslocamento da PAQ para leste. Nota-se pela

¹⁰ Vale ressaltar que o centróide representa o centro geométrico da PAQ e por este motivo os contornos da piscina apresentam-se em torno do centróide.

média trimestral da velocidade vertical do vento para junho-agosto de 1997 entre as latitudes 2°-5°N que o movimento do ar é ascendente por quase toda extensão do Pacífico (Fig. 3.13), sobre a PAQ.

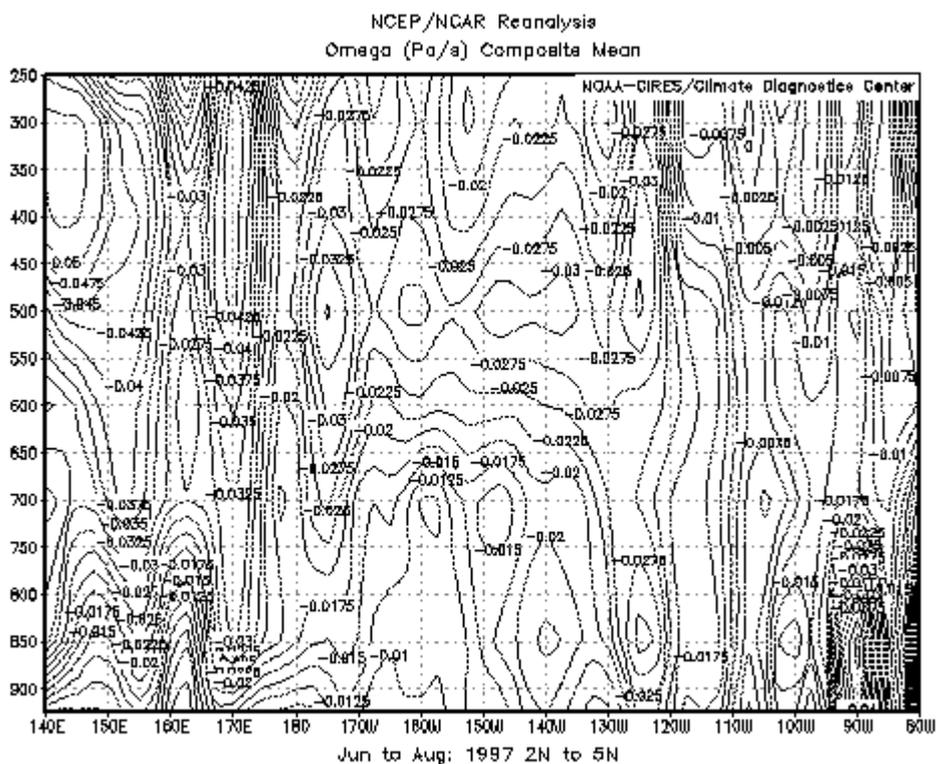


Fig. 3.13 – Media trimestral da velocidade vertical do vento em coordenadas isobáricas (Pa/s) entre as latitudes 2°-5°N e longitudes 120°E-80°W de junho a agosto de 1997. Valores negativos indicam movimentos ascendentes. Eixo horizontal em graus e vertical em hPa. Fonte: <http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/Composites/comp.pl>

Segundo Picaut et al. (2002), o evento de 1997-98 teve início com rajadas de ventos persistentes de oeste (*Westerly Wind Bursts*) que ocorreram nos meses de dezembro de 1996 e março e junho de 1997. Esses ventos excitaram ondas de Kelvin que se propagaram para leste contribuindo para o deslocamento da PAQ para leste e

subsistência da termoclina (representada aqui pela isoterma de 20°C) no setor central-leste do Oceano Pacífico interrompendo o fenômeno sazonal da ressurgência equatorial e aumentando a TSO na região. De acordo com Bergman et al. (2001), a TSO elevou na região central do Pacífico na resposta da onda de Kelvin que foi forçada durante a atividade convectiva associada à Oscilação de Madden-Julian (OMJ) - que são oscilações de 20-100 dias resultante das células de circulação em grande escala orientada no plano equatorial e que se movem para leste pelo menos do Oceano Índico até o Pacífico central (MADDEN; JULIAN, 1994) - disparada em fevereiro de 1997.

Apesar do anômalo deslocamento inicial para leste, vale lembrar que é inverno austral. Por este motivo, o centróide e grande parte da área preenchida pela PAQ estão localizados no hemisfério norte. Assim, na transição para o verão austral, o centróide retrocede um pouco para oeste com a PAQ se ajustando a migração sazonal (símbolo ‘o’ azul claro na Figura 3.10_C) e novamente ganha intensidade movendo-se bruscamente para leste percorrendo uma trajetória anti-horária alcançando a máxima posição zonal em torno da longitude 203.3°E e localização meridional próxima da latitude 6.9°S em abril de 1998 (símbolo ‘*’ vermelho na Figura 3.10_C). Isto significa que a PAQ espalhou-se ocupando toda extensão da faixa intertropical do Oceano Pacífico Sul. A distância zonal percorrida pelo centróide para leste neste último período (3/12/1997 – 1/04/1998) foi de aproximadamente 34.4^{o11}. Esta configuração sustenta a isoterma de 20°C em grandes profundidades por toda a faixa equatorial do Pacífico (Fig. 3.14_A) confirmando o deslocamento da PAQ até o limite leste deste

¹¹ Aqui, somente foi estimada a distância zonal percorrida pelo centróide. Não foi calculada a distância baseada na trajetória do arco. Vale ainda ressaltar que a borda leste da PAQ pode percorrer distâncias até duas vezes maior.

oceano. Segundo Picaut et al. (2002), os fenômenos que contribuíram para a maior profundidade da termoclina equatorial foram a permanência da componente zonal dos ventos de oeste associados com o aumento na temperatura das águas no Pacífico equatorial leste de janeiro a abril de 1998. Este último está relacionado ao deslocamento das águas com temperaturas superficiais em torno de 29°C, representadas aqui pela PAQ, para leste (Fig. 3.10_{B,C}) e que ocorreram na mesma época do ano.

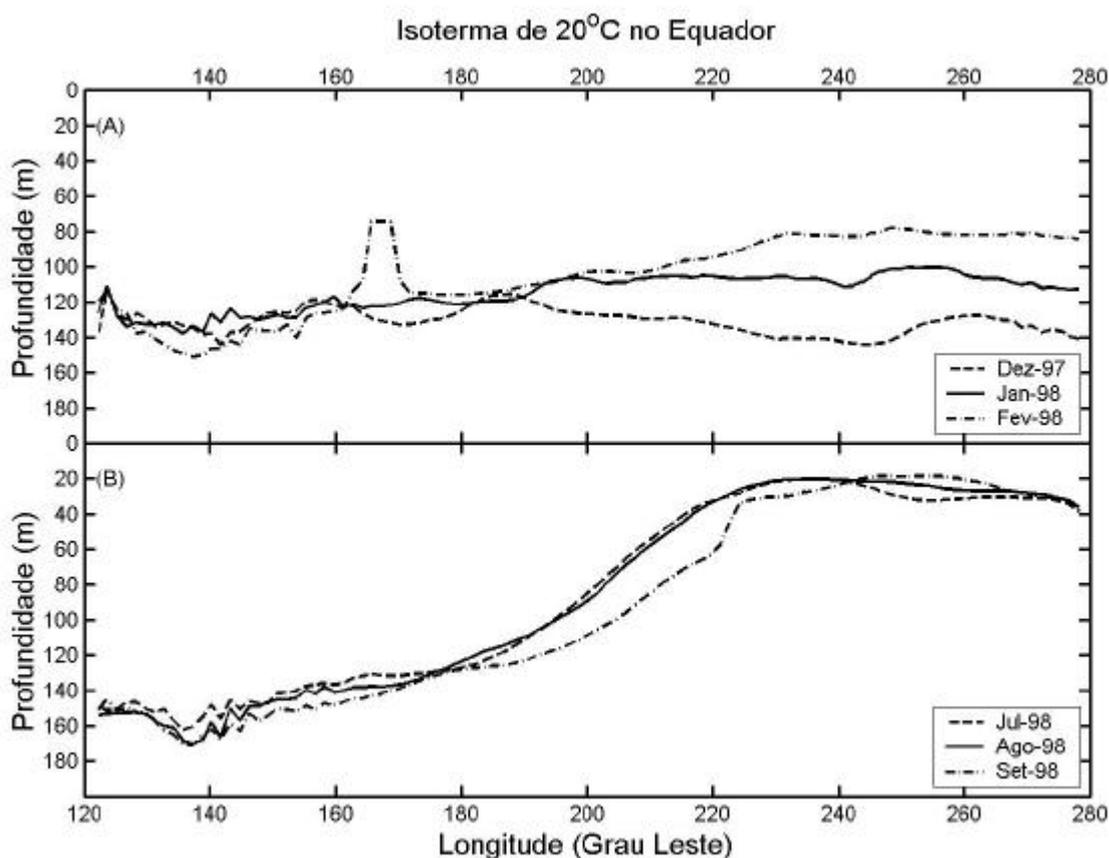


Fig. 3.14 – Isoterma de 20°C na faixa equatorial do Oceano Pacífico para os meses de: (A) dezembro (linha pontilhada), janeiro (linha contínua) e fevereiro (linha tracejada) de 1998, ano de *El Niño*; e (B) julho (linha pontilhada), agosto (linha contínua) e setembro (linha tracejada) de 1998, ano de *La Niña*.

Nos meses de deslocamento anômalo do centróide da PAQ para sudeste com subsidência da termoclina no leste do Pacífico e afloramento no oeste (Fig. 3.14_A), há movimentos ascendentes do ar sobre quase toda a extensão do Oceano Pacífico. Isto pode ser notado na Figura 3.15 que ilustra a média trimestral - de janeiro a março de 1998 - da velocidade vertical do vento sobre toda extensão do Pacífico entre as latitudes 2°-5°S. Nota-se que os menores valores estão entre as longitudes de 170°W-130°W, sobre a PAQ.

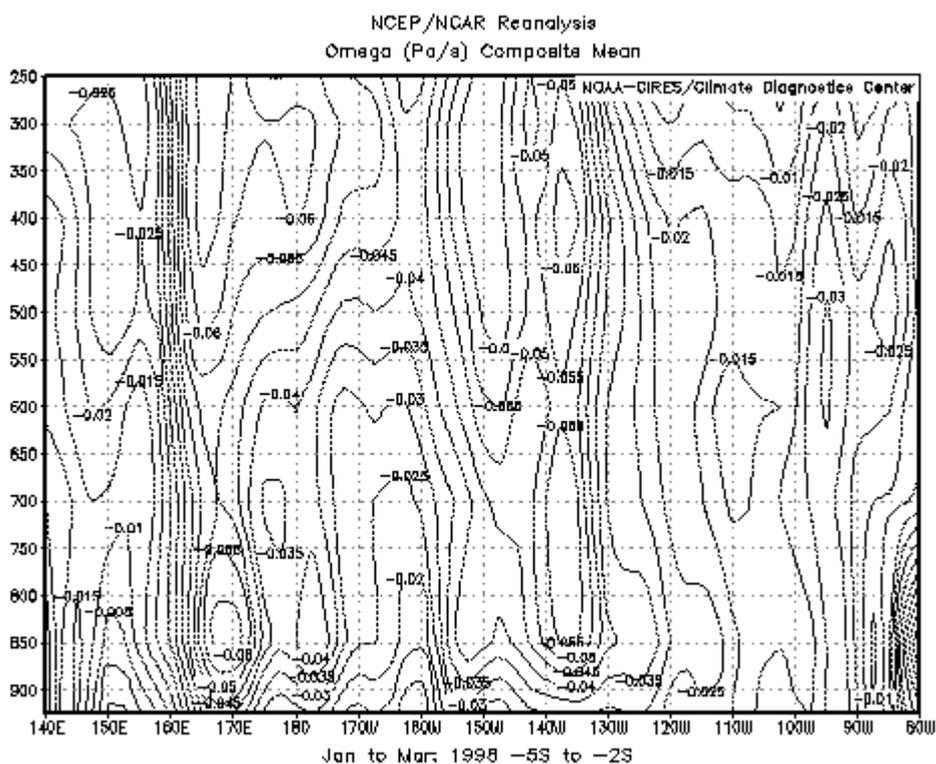


Fig. 3.15 – Média trimestral da velocidade vertical do vento em coordenadas isobáricas (Pa/s) entre as latitudes 2°-5°S e longitudes 140°E-80°W de janeiro a março de 1998, durante o *El Niño*. Valores negativos indicam movimentos ascendentes. Eixo horizontal em graus e vertical em hPa. Fonte: <http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/Composites/comp.pl>

Como fase complementar do ciclo ENOS, o centróide da PAQ, ainda numa trajetória anti-horária, começa a retornar de sua máxima posição no leste (símbolo ‘o’ vermelho na Figura 3.10_C), cruza a LMD e a LE, passa pela sua posição zonal média (símbolo ‘o’ preto na Figura 3.10_C) e alcança a longitude mínima próxima de 139.1°E e latitude 11.72°N em julho de 1998 (símbolo ‘o’ azul escuro na Figura 3.10_C) traçando a maior distância percorrida (máximo leste para o máximo oeste) de aproximadamente 64.1^{o12}. Esta configuração representa a PAQ aprisionada no extremo oeste do Pacífico com a termoclina localizada em maiores profundidades neste setor (Fig. 3.14_B). O afloramento da termoclina no setor leste deste oceano (Fig. 3.14_B) associado ao deslocamento da piscina quente para oeste provoca a ressurgência nesta região (Picaut et al., 2002).

A maior posição meridional do centróide da PAQ foi 13.62°N em meados de agosto do respectivo ano. Além disso, os movimentos ascendentes do ar concentram-se no setor central-oeste, a oeste da longitude 170°E, especificamente sobre a PAQ. As correntes de ar que se movimentam de cima para baixo (correntes descendentes) concentram-se na parte central-leste do Pacífico, a leste da longitude 170°E (Fig. 3.16), especificamente sobre as águas frias do oceano.

¹² Novamente, somente foi estimada a distância zonal percorrida pelo centróide. Não foi calculada a distância baseada na trajetória do arco.

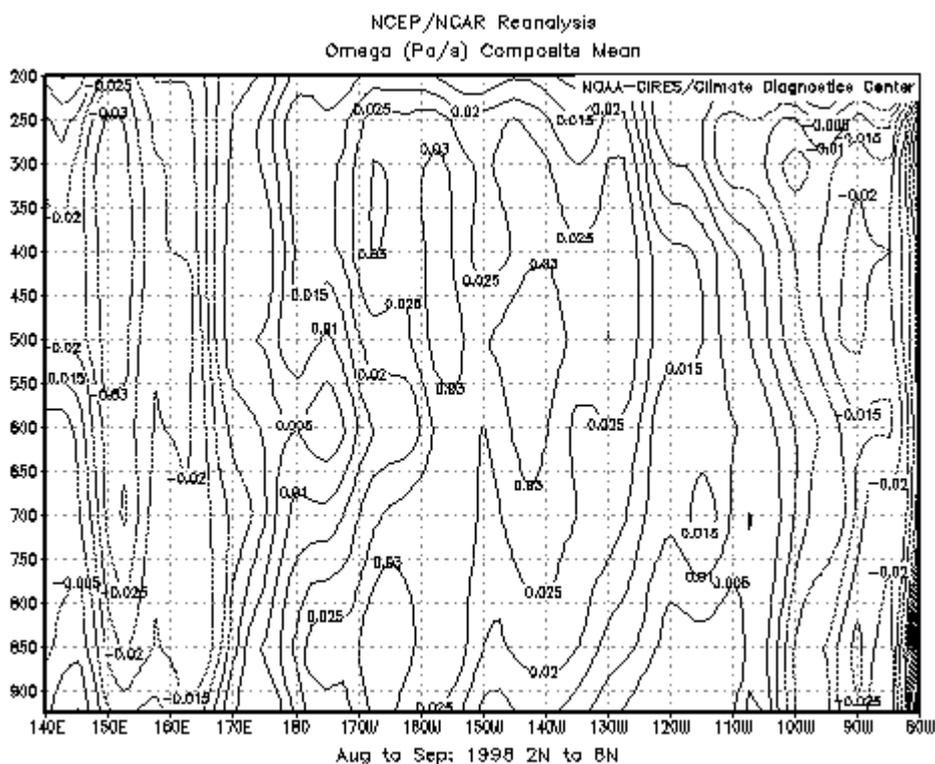


Fig. 3.16 – Média bimensal da velocidade vertical em coordenadas isobáricas (Pa/s) entre as latitudes 2°-8°N e longitudes 140°E-80°W para agosto-setembro de 1998, durante a *La Niña*. Valores negativos (positivos) indicam movimentos ascendentes (descendentes). Eixo horizontal em graus e vertical em hPa. Fonte: <http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/Composites/comp.pl>

As diferentes escalas de movimento envolvidas no deslocamento zonal da PAQ durante o ciclo ENOS de 1997-98 podem ser visualizadas na Figura 3.17 que ilustra em cores os coeficientes da parte real da ondeleta de Morlet aplicada na série temporal desta componente do centróide. Nota-se que as migrações longitudinais da PAQ revelam oscilações nas escalas da OMJ, semi-anual, anual e de 2.6 anos.

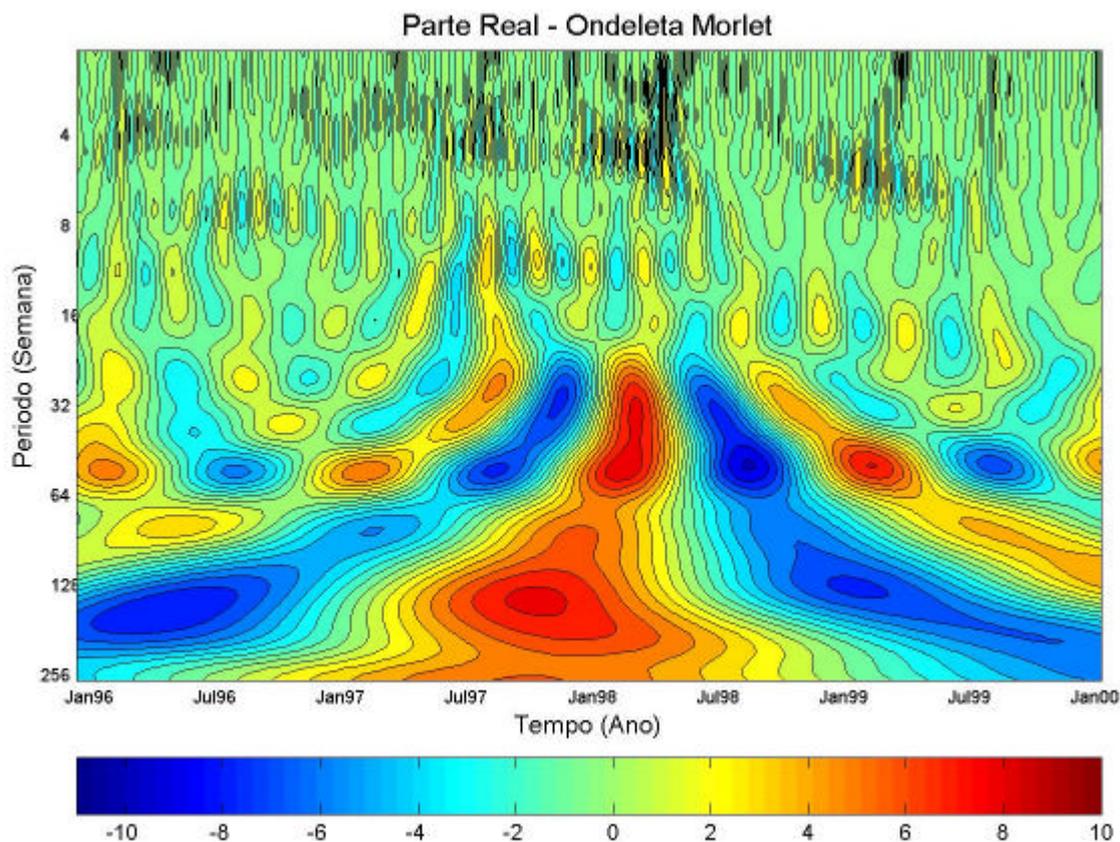


Fig. 3.17 – Parte real da ondeleta para o deslocamento zonal do centróide da PAQ entre janeiro de 1996 e 2000. O eixo horizontal é correspondente ao período em semanas na escala diádica. No eixo vertical está o tempo em anos. A energia associada ao valor negativo (positivo) da oscilação está distribuída para coloração azul (vermelha).

Nos últimos anos, a comunidade científica vem procurando alguma relação entre os episódios de ENOS e a OMJ. Todos os trabalhos têm relatado as dificuldades para entender a conexão entre o ENSO e a OMJ baseado na concordância das atividades convectivas com as variações da TSO sobre o Pacífico equatorial. Ou seja, ainda não há nenhuma correlação óbvia entre as intensidades da OMJ e a fase inicial do *El Niño* (BERGMAN et al, 2001). Jones e Carvalho (2005) ainda relatam que o índice da OMJ parece não relacionado com a variabilidade do ENOS indicando que a OMJ apresenta seu próprio modo de variação na baixa frequência. No entanto,

especula-se que intensas atividades da OMJ podem disparar uma onda de Kelvin que permite deslocar a água quente situada no Pacífico de oeste para leste (KESSLER et al., 1995; MCPHADEN, 1999, 2004; BERGMAN et al., 2001).

De acordo com os trabalhos desenvolvidos nas últimas décadas sobre o ENOS (DELCROIX et al., 2000; BERGMAN et al., 2001; PICAUT et al., 2002) e os resultados aqui apresentados pode-se propor que durante o episódio de 1997-98 o Pacífico apresentou diferentes modos de oscilação que estão associados aos diferentes fenômenos que atuam sobre este oceano. Mas a natureza exata do envolvimento desses fenômenos e a possível interação entre cada um deles durante os episódios de *El Niño*, especificamente o evento de 1997-98, ainda é uma incógnita.

CAPÍTULO 4

- DISCUSSÕES E CONCLUSÕES -

Estudos recentes tem feito progredir o conhecimento de algumas características das oscilações da PAQ baseado no deslocamento zonal da sua borda leste. Neste trabalho, os movimentos desta piscina, definida como uma superfície de água homogênea no Oceano Pacífico com temperatura igual ou superior a 29°C, foram estimados utilizando as componentes de sua posição média, denominada de centróide, calculadas em coordenadas esféricas.

Quando é verão austral, a componente meridional do centróide situa-se no hemisfério sul indicando que a PAQ está predominantemente localizada neste hemisfério. Quando é inverno austral esta componente coloca-se no hemisfério norte marcando a presença da PAQ também neste hemisfério. Ou seja, a componente meridional do centróide da PAQ está em fase com o ciclo anual solar. A posição meridional média fica em torno da latitude 1.1°N e as maiores amplitudes são identificadas nos deslocamentos para norte porque a Austrália funciona como uma barreira natural imposta ao movimento da PAQ para o sul.

O deslocamento da componente zonal do centróide da PAQ está em fase com os índices de monitoramento do fenômeno ENOS como, por exemplo, o IOS e a anomalia da TSO nas regiões N3 e N1.2. Sob condições de *El Niño* no Pacífico esta componente do centróide desloca-se de forma anômala para leste alcançando no máximo a região central deste oceano porque o centróide representa o centro geométrico da PAQ. Isso reflete em temperaturas acima da normal climatológica nas águas do Pacífico leste esboçando anomalias positivas da TSO e índices negativos para a Oscilação Sul. Sob condições de *La Niña*, a componente zonal do centróide desloca-se de forma anômala para oeste. Conseqüentemente, a PAQ conserva-se no extremo oeste do Pacífico desenvolvendo significativo gradiente horizontal de TSO e PNM. Esta configuração permite a intensificação dos ventos alísios de leste que favorecem a ressurgência no setor central-leste do Pacífico resultando em temperaturas superficiais abaixo da normal. Desta forma, a Oscilação Sul esboça um índice positivo com anomalias negativas na TSO.

A célula ascendente de convecção atmosférica do Oceano Pacífico permanece sobre as águas que apresentam as mais altas temperaturas e por este motivo segue a trajetória zonal da PAQ durante as fases fria e quente do ciclo ENOS. Em condições de *La Niña* o ramo ascendente da célula de Circulação de Walker permanece sobre a PAQ presente na região oeste do Pacífico enquanto que o ramo descendente localiza-se sobre as águas oceânicas mais frias do Pacífico equatorial leste. Em condições de *El Niño*, a PAQ espalha-se pelo cinturão equatorial do Pacífico e expande o ramo ascendente da célula de circulação atmosférica para leste.

Todos os ciclos ENOS existentes no período analisado foram destacados aplicando a transformada de ondeleta na série temporal da componente zonal do centróide da PAQ. A intensidade de cada ENOS pode ser observada no espectro de energia que marca inclusive a duração de cada evento. Apesar das peculiaridades de cada episódio e a duração mais prolongada do evento 1990-95, o espectro de energia ainda mostra que o ENOS, descrito não só pelo deslocamento zonal do centróide utilizado aqui como também pelas séries temporais da TSO, apresenta uma oscilação anual. Isto é, a PAQ permanece no setor oeste do Pacífico na maior parte do tempo desloca-se para leste chegando até mesmo a alcançar a costa da América do Sul, como nos anos de 1982-83 e 1997-98, e retorna para oeste num período de um ano. O que diferencia na migração zonal do centróide da PAQ para leste é a sua distância percorrida e particular permanência na faixa central-leste equatorial do Pacífico. Essa é uma característica capaz de determinar a duração de cada ciclo ENOS e que é destacada no espectro de energia.

Durante os eventos de *El Niño* registrados no período estudado (1982-83, 1986-87; 1990-95; e 1997-98) o centróide alcança sua posição zonal máxima percorrendo uma trajetória anti-horária, salvo durante o episódio de 1992-93 no qual o centróide permaneceu no setor central-leste do Oceano Pacífico até alcançar sua posição zonal máxima. Este fato acontece porque o episódio 1992-93 está contido no ENOS de 1990-95 que foi o mais longo evento do século passado.

Os maiores deslocamentos do centróide para leste ocorreram durante as condições de *El Niño* mais fortes do século passado, precisamente durante os episódios de 1982-83 e 1997-98. Nestes períodos o centróide traçou a maior trajetória percorrida

para leste (aproximadamente 36° em 1983 e 34.4° em 1998) cruzando a LMD e batendo a longitude de 203°E em março de 1983 e abril de 1998. Como fase complementar do ciclo ENOS, configurando as condições dos episódios de *La Niña*, a componente zonal traçou a maior distância percorrida para oeste (aproximadamente 60° em 1983 e 64.1° em 1998) alcançando a longitude de aproximadamente 143°E em julho de 1983 e 139°E em setembro de 1998. Ou seja, a amplitude no deslocamento da componente zonal para leste (*El Niño*) é menor durante quando comparado com o deslocamento para oeste (*La Niña*).

Embora existam algumas diferenças entre os episódios de *El Niño*, os eventos de 1982-83 e 1997-98 apresentaram uma característica em comum: o centróide da PAQ percorreu uma trajetória bastante semelhante apresentando uma correlação de 0.93 entre os anos em questão.

Uma outra característica marcante é a correlação negativa entre as duas componentes do centróide. O deslocamento da componente zonal do centróide da PAQ para leste coincide com o verão austral na qual a componente meridional do centróide localiza-se no hemisfério sul. Em anos de *El Niño* as duas componentes também são negativamente correlacionadas. No entanto, isto não implica dizer que sempre que o centróide estiver no hemisfério sul será indicativo de um ano de *El Niño*. O deslocamento da componente zonal do centróide da PAQ para oeste coincide com o inverno austral na qual a componente meridional do centróide encontra-se nas mais altas latitudes do hemisfério norte.

A migração da PAQ para leste e a subsidência da isoterma de 20° na parte central-leste do Pacífico contribui para interrupção do fenômeno da ressurgência

resultando em máxima elevação sazonal na temperatura da água no Pacífico leste. O deslocamento da PAQ para oeste e o afloramento da isoterma de 20° no Pacífico equatorial central-leste favorecem um mínimo sazonal na TSO.

Antes de ocorrer um episódio de *El Niño* a componente zonal do centróide já está presente em torno da longitude de 160°E que é a posição média para todo o período analisado. No desenvolvimento do fenômeno, a componente zonal do centróide desloca-se para leste até alcançar sua posição máxima, realçando o deslocamento da PAQ para leste. Quando o centróide retorna para oeste percorre a maior trajetória, partindo de sua máxima posição no leste para a mínima sobre o Pacífico oeste. Por isso, a amplitude do ciclo anual é maior durante a *La Niña* (centróide no oeste) em relação ao *El Niño* (centróide no leste). O mesmo ocorre nos dados de anomalia de TSO. No verão austral, as águas no Pacífico leste sob condições normais já apresentam temperaturas superiores ao inverno, porém elevam-se mais durante os anos de *El Niño* com aumento anômalo na TSO da região. Quando as condições do Pacífico mudam para a fase fria a TSO diminui bruscamente traçando a maior amplitude nesse intervalo, isto é, diferença entre a TSO máxima e mínima.

Os parâmetros oceanográficos e atmosféricos no Pacífico tropical oeste apresentam oscilações em diferentes frequências devido aos fenômenos existentes sobre esta região. A análise espectral da componente zonal do centróide detectou oscilações nas escalas de 24 a 26 semanas (semi-anual), 48 a 52 semanas (anual) e 131-140 semanas (2.6 anos). Mas a natureza exata do envolvimento desses fenômenos e a possível interação entre cada um deles durante cada episódio de *El Niño* ainda é uma incógnita. Desta forma, cada evento ENOS pode realçar distintos aspectos

oceanográficos e meteorológicos sobre o Oceano Pacífico com diferentes conseqüências climáticas, biológicas e sócio-econômicas em diferentes partes do mundo.

A componente zonal da posição do centróide da PAQ apresenta-se de fato como uma forma alternativa para monitorar e descrever a evolução do fenômeno ENOS. Sua principal vantagem está no fato de depender apenas de um único parâmetro arbitrário, o limiar da temperatura da água superficial do Oceano Pacífico tropical capaz de representar a PAQ. Além disso, todos os métodos de monitoramento do ENOS são obtidos em um ponto fixo no espaço enquanto a metodologia descrita pelo centróide permite um índice que varia no tempo e no espaço. Este método ainda apresenta a vantagem de não depender de médias climatológicas para identificação dos episódios de *El Niño* e *La Niña*. Os demais métodos de monitoramento utilizados até o momento, como a anomalia da TSO em diferentes regiões do Oceano Pacífico e o IOS, dependem de um número maior de variáveis arbitrárias e são dependentes de médias climatológicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEHRINGER, D. W.; JI, M.; LEETMAA, A. An Improved coupled model for ENSO prediction and implications for ocean initialization. Part I: The ocean data assimilation system. **Monthly Weather Review**, v. 126, p. 1013-1021, 1998.
- BERGMAN, J. W.; HENDON, H. H.; WEICKMANN, K. M. Intraseasonal air-sea interactions at the onset of El Niño. **Journal of Climate**, v.14, 1702-1719, 2001.
- BJERKNES, J. Survey of El Niño 1957-58 in its relation to tropical Pacific meteorology. **Inter-American tropical Tuna Comission**, v.12, nº2, p. 3-42, 1966a.
- BJERKNES, J. “El Niño” study based on analysis of ocean surface temperatures 1935-57. **Inter-American tropical Tuna Comission**, v. 5, nº3, p. 219-272, 1966b.
- BJERKNES, J. Atmospheric teleconnection from the Equatorial Pacific. **Monthly Weather Review**, v. 97, nº 3, p. 163-172, 1969.
- BJERKNES, J. Large-scale atmospheric response to the 1964-65 Pacific Equatorial warming. **Journal of Physical Oceanography**, v. 2, p. 212-217, 1972.

- BOO, K.-O.; LIM, G.-H. On the low-level circulation over the western north Pacific in relation with the duration of El Niño. **Geophysical Research Letters**, v. 31, L10202, doi:10.1029/2004GL019418., 2004
- CANE, M. A. Oceanographic events during El Niño. **Science**, v. 222, nº4629, p. 1189-1195, 1983.
- D'ÁVILA, V.A.; MACHADO, F. V. Programa para a visualização da grade de temperatura superficial dos oceanos e edição de máscaras numéricas continentais. **XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Fortaleza, Ceará, 2004.
- DELCROIX, T. et al. Equatorial wave and warm pool displacements during the 1992-1998 El-Niño Southern Oscillation: observation and modelling. **Journal of Geophysical Research**, v. 105 (C11), p. 26045-26062, 2000.
- DOMINGUES, M. O.; MENDES JUNIOR, O.; DA COSTA, A. M. On wavelet techniques in atmospheric sciences. **Elsevier Science**, 2005, No prelo.
- GILL, A. E.; E. M. RASMUSSEN. The 1982-83 climate anomaly in the equatorial Pacific. **Nature**, v. 306, nº17, p. 229-234, 1983
- GU, D.; PHILANDER, S.G.H. Secular changes of annual and interannual variability in the tropics during the past century. **Journal of Climate**, v. 8, p. 864-876, 1995.
- HALPERN, D. Offshore Ekman transport and Ekman pumping off Peru during the 1997-98 El Niño. **Geophysical Research Letters**, v. 29, nº5, p. 19[1]-19[4], 2002
- HAMZA, V. M.; D'ÁVILA, V.A.; ULUGERGERLI, E. U. Use of interactive web tools in teaching geophysics in developing countries. **Seismological Research Letter**, v.22, nº5, p. 519-529, 2000.

HARRISON, D. E.; SCHOPF, P. S. Kelvin-wave-induced anomalous advection and onset of surface warming in El Niño events. **Monthly Weather Review**, v. 112, p. 923-933, 1984.

HELBER, R. W.; WEISBERG, R. H. Equatorial upwelling in the western Pacific warm pool. **Journal of Geophysical Research**, v. 106 (C5), p. 8989-9003, 2001

HO, C.-R.; YAN, X.-H.; ZHENG, Q. Satellite observations of upper-layer variabilities in the in the western Pacific warm poll. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 76, p. 669-679, 1995.

JIN, F.-F. Tropical ocean-atmosphere interaction, the Pacific cold tongue, and the El Niño-Southern Oscillation. **Science**, v. 274, p. 76-78, 1996.

JIN, F.-F; NEELIN, J. D.; GHIL, M. El Niño/Southern Oscillation and the annual cycle: subharmonic frequency-locking and aperiodicity. **Physica D**, v. 98, p. 442-465, 1996.

JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. Na observational analysis of decadal variations in the Madden-Julian Oscillation. **Journal of Climate**, 2005. No prelo.

KALNAY, E. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis Project. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 77, n° 3, p. 437-471, 1996.

KESSLER, W. S.; MCPHADEN, M. J.; MWEICKMANN, K. M. Forcing of intraseasonal Kelvin waves in the equatorial Pacific. **Journal of Geophysical Research**, v. 100 (C6), p. 10613-10631, 1995.

KISTLER, R. et al. The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 82, n° 2, p. 247-267, 2001.

KUMAR, P.; FOUFOULA-GEORGIU, E. Wavelets analysis for geophysical applications. **Reviews of Geophysics**, v.35, n°4, p. 385-412, 1997.

MACHADO, F. M.; D'ÁVILA, V.A. A trajetória e área da piscina de água quente do Pacífico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2005, No prelo.

MADDEN, R. A.; JULIAN, P. R. Observations of the 40-50-day tropical oscillation: a review. **Monthly Weather Review**, v. 122, p. 814-837, 1994.

MAK, M. Orthogonal wavelets analysis: interannual variability in the sea surface temperature. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 76, n° 11, p. 2179-2186, 1995.

MCPHADEN, M. J. TOGA-TAO and the 1991-93 El Niño-Southern Oscillation Event, **Oceanography**, vol. 6, n° 2, p. 36-44, 1993.

MCPHADEN, M. J. Genesis and evolution of the 1997-98 El Niño. **Science**, v. 283, p. 950-954, 1999.

MCPHADEN, M. J. Evolution of the 2002-03 El Niño. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 85, n° 11, p. 677-695, 2004.

MCPHADEN, M.J.; PICAUT, J. El Niño-Southern Oscillation displacements of the western equatorial Pacific warm pool. **Science**, v. 250, p. 1385-1388, 1990.

Data: *sst*. Climate Prediction Center, Camp Springs, Maryland. Disponível em: <<ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/cmb/sst/>>. Acesso em : 29 mar. 2004.

Monthly Atmospheric and SST Indices: *Monthly Sea Surface Temperature*.

Climate prediction Center, Camp Springs, Maryland. Disponível em:

<<ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/cpc/wd52dg/data/indices/sstoi.indices>>. Acesso em: 10 jan. 2005.

Monthly Atmospheric and SST Indices: *Monthly Sea Surface Temperature.*

Climate prediction Center, Camp Springs, Maryland. Disponível em:

<<ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/cpc/wd52dg/data/indices/soi.>>. Acesso em: 10 jan. 2005.

Monthly/Seasonal Climate Composites. Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado. Disponível em: < <http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/Composites/printpage.pl>> Acesso em: 03 fev. 2005.

NICHOLLS, N. El Niño/Southern Oscillation: aftermath of the 1997/1998 event and prediction of future events. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 49, n° 3, p. 267-270, 2000.

NIILER, P. P. The Ocean Circulation. In: TRENBERTH, K. E. **Climate System Modeling.** Cambridge: Cambridge University Press, 1998. p. 117-148.

NOF, D.; GORDER, S. V. Intense nonlinear migration of the Pacific warm pool. **Deep-sea Research I**, v. 46, p. 1705-1731, 1999.

PICAUT, J.; DELCROIX, T. Equatorial wave sequence associated with warm pool displacements during the 1986-1989 El Niño-LaNiña. **Journal Geophysical Research**, v. 100 (C9), p. 18393-18408, 1995.

PICAUT, J. et al. Mechanisms of the 1997-98 El Niño-La Niña, as inferred from space-based observations. **Journal Geophysical Research**, v. 107 (C5), p. 5[1]-5[20], 2002.

PICAUT, J. et al. Mechanisms of the zonal displacement of the Pacific warm pool: implications for ENSO. **Science**, v. 274, p. 1486-1489, 1996.

- PHILANDER, S. G. H. The equatorial thermocline. **Deep-sea Research**, v. 20, p. 69-89, 1973.
- PHILANDER, S. G. H. The oceanic response to cross-equatorial winds (with application to coastal upwelling in low latitudes). **Tellus**, v. 33, p. 201-210, 1981a.
- PHILANDER, S. G. H. The response of equatorial oceans to a relaxation of the trade winds. **Journal Physical Oceanography**, v.11, n° 2, p. 176-189, 1981b.
- PHILANDER, S.G.H. El Niño Southern Oscillation phenomena. **Nature**, v. 302, n° 5096, p. 295-301, 1983
- PHILANDER, S. G. H. El Niño and La Niña. **Journal Atmospheric Science**, v. 42, n° 23, p. 2652-2662, 1985.
- PHILANDER, S. G. H. **El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation**. San Diego: Academic Press, 1990. 293 p.
- PHILANDER, S. G. H.; PACANOWSKI, R. C.. The oceanic response to cross-equatorial winds (with application to coastal upwelling in low latitudes). **Tellus**, v. 33, p. 201-210, 1981.
- RASMUSSEN, E.M.; HALL, J.M.. The major Pacific warm episode of 1982/93. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 32, n° 4, p. 301-306, 1983.
- RASMUSSEN, E.M.; WALLACE, J.M.. Meteorological aspects of the El Niño/Southern Oscillation. **Science**, v. 222, n° 4629, p. 1195-1202, 1983.
- REYNOLDS, R.W. A real time global sea surface temperature Analysis. **Journal of Climate**, v. 1, p. 75-86, 1988.
- REYNOLDS, R.W. et al. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. **Journal of Climate**, v. 15, p. 1609-1625, 2002

REYNOLDS, R.W.; D.C. STOKES. *Description of the OI.v2 (v2 indicates version 2) Weekly SST Analysis*. Maryland: National Center for Environmental Prediction. 28/03/2003. 3p. Disponível em: ftp://ftp.ncep.noaa.gov/pub/cmb/sst/oisst_v2/OIv2.info.asc . Acesso em: 10 jan. 2004.

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Global and regional scale precipitation associated with El Niño/Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 115, p. 1606-1626, 1987.

SOARES, J.; WAINER, I.; WELLS, N. C. Reflection of equatorial Kelvin waves at eastern ocean boundaries Part II: Pacific and Atlantic Oceans. **Annales Geophysicae**, v. 17, p. 827-837, 1999.

SU, H.; NEELIN, J. D. Teleconnection mechanisms for tropical Pacific descent anomalies during El Niño. **Journal of Atmospheric Science**, v. 59, p. 2694-2712, 2002.

SUN, D-Z. A possible effect of an increase in the warm pool SST on the magnitude of El Niño warming. **Journal of Climate**, v. 16, nº 2, p. 185-205, 2003.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A practical guide to wavelets analysis. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 79, nº 1, p. 61-78, 1998.

TORRENCE, C.; WEBSTER, P. J. Interdecadal changes in the ENSO-Monsoon system. **Journal of Climate**, v. 12, p. 2679-2690, 1999.

TREBERTH, K.E. The definition of El Niño. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 78, nº 12, p. 2771-2777, 1997.

TREBERTH, K.E.; HOAR, T. J. The 1990-1995 El Niño-Southern Oscillation event: longest on record. **Geophysical Research Letters**, v. 101, p. 57-60, 1996.

Wavelet Software. Programme in Atmospheric and Oceanic Sciences, Boulder, Colorado. Disponível em: <<http://paos.colorado.edu/research/wavelets/software.html>> Acesso em: 10 jun. 2003.

WANG, B.; WANG, Y. Temporal structure of the Southern Oscillation as revealed by waveform and wavelets analysis. **Journal of Climate**, v. 9, p. 1586-1598, 1996.

WEBSTER, P.; LUKAS, R. TOGA-COARE: Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 73, p. 1377-1416, 1992.

WELLS, N. **The atmosphere and ocean: a physical introduction.** 2^a ed. London: Wiley, 1997. 394 p.

WENG, H. Y.; LAU, K. M. Wavelets, period doubling, and time-frequency localization with application to organization of convection over the tropical western Pacific. **Journal of Atmospheric Science**, v. 51, p. 2523-2541, 1994.

WYRTKI, K. Surface currents of the eastern tropical Pacific Ocean. **Inter-American tropical Tuna Commission**, v. 9, n°5, p. 271-294, 1965.

WYRTKI, K. El Niño: the dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. **Journal of Physical Oceanography**, v. 5, p. 572-584, 1975

WYRTKI, K. Some thoughts about the west Pacific warm pool. **Proc. Western Pacific Int. Meeting and Workshop on TOGA-COARE**, New Caledonia, ORSTUM, Centre de Nouma, p. 90-109, 1989.

YAN, X.-H.; KLEMAS, V.; CHEN; D. The western pacific warm pool observed from Space. **Eos**, v. 73, n° 4, p. 41-44, 1992a.

YAN, X.-H. et al. Temperature and size variabilities of the western Pacific warm pool. **Science**, v. 258, p. 1643-1645, 1992b.

YAN, X.-H. et al. Centroid motion of the western Pacific warm pool during three recent El Niño-Southern Oscillation events. **Journal of Climate**, v. 27, p. 837-845, 1997.

ZEBIAK, S. E.; CANE, M. A. A model El Niño-Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 115, p. 2262-2278, 1987.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)