



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

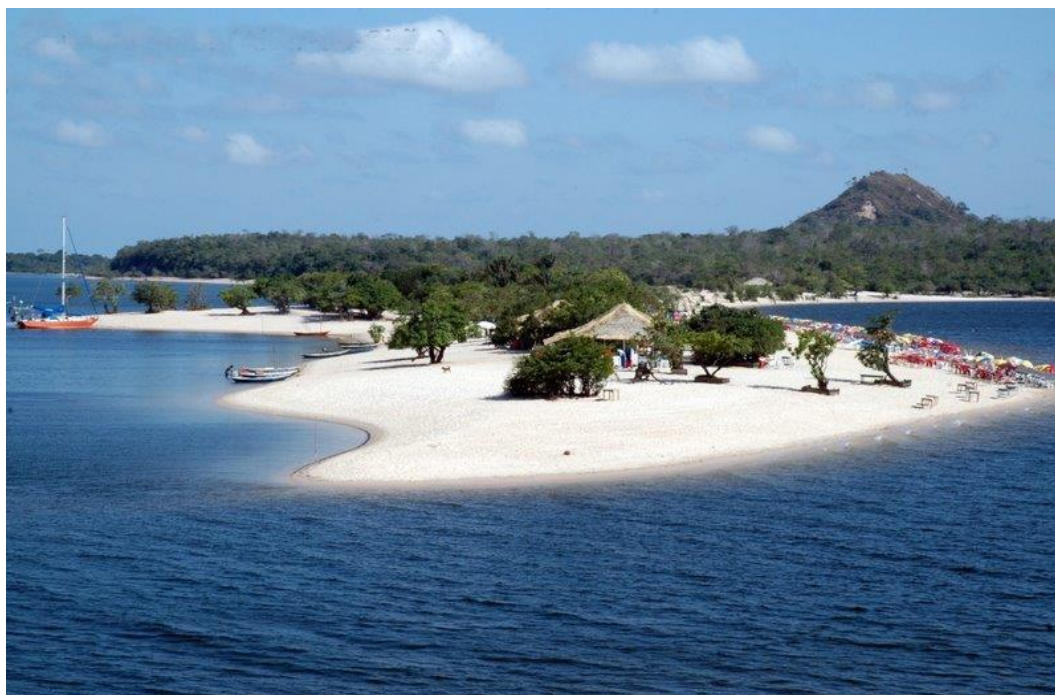


INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



GRADUAÇÃO DE METEOROLOGIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO



LETÍCIA LORENA BRAGA AMORIM

VARIABILIDADE FLUVIOMÉTRICA DO RIO TAPAJÓS EM SANTARÉM-PA

Nº 290

BELÉM-PARÁ

2010

LETÍCIA LORENA BRAGA AMORIM

VARIABILIDADE FLUVIOMÉTRICA DO RIO TAPAJÓS EM SANTARÉM-PA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Meteorologia do Instituto de Geociência da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Meteorologia.
Orientador: Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza.

BELÉM-PARÁ

2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

A524v Amorim, Letícia Lorena Braga

Variabilidade fluviométrica do rio tapajós em Santarém -PA /
Letícia Lorena Braga Amorim; Orientador: Everaldo Barreiros de
Souza – 2010

38 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Meteorologia)
– Faculdade de Meteorologia, Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Pará, Belém, Quarto Período de 2010.

1. Precipitação. 2. Variabilidade fluviométrica. 3. El Niño. 4. La
Niña. 5. Santarém (PA). I. Souza, Everaldo Barreiros de, *orient.* II.
Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 20º ed.: 551.57728115

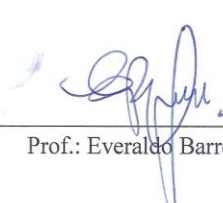
LETÍCIA LORENA BRAGA AMORIM

VARIABILIDADE FLUVIOMÉTRICA DO RIO TAPAJÓS EM SANTARÉM-PA

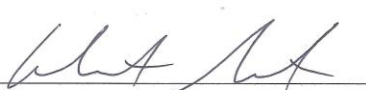
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Meteorologia
do Instituto de Geociência da
Universidade Federal do Pará, como
requisito parcial para a obtenção do grau
de Bacharel em Meteorologia.

Aprovado em 17 / 12 / 10


Banca examinadora:



Prof.: Everaldo Barreiros de Souza – Orientador
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Prof. Dimitrie Nechet – Membro
Mestre em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Profa. Midori Makino – Membro
Doutora em Matemática
Universidade Federal do Pará

Esta e todas as minhas humildes conquistas
são inteiramente dedicadas a minha família,
expresso meu reconhecimento e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que sempre esteve ao meu lado.

A minha avó Nair que não está mais presente entre nós, que sempre me ajudou e também investiu nos meus estudos.

A minha família, em especial minha mãe Suely Braga, que sempre me influenciou a estudar, ao meu pai Walmir Amorim, e meu avô Orlando Braga, que investiram na minha educação, que me acompanharam e apoiaram, que me proporcionaram condição para desenvolver um bom estudo, ter uma boa educação para alcançar as minhas conquistas, e a minha intensa dedicação.

Ao meu namorado Darlyson Beirão, que sempre me apoiou e me ajudou diante das dificuldades, e incentivou pro melhor.

Ao professor Dr. Everaldo B. de Souza e Dimitrie Nechet, pela orientação durante este trabalho, pelos ensinamentos ao longo do curso, pela confiança depositada e, fundamentalmente, pela amizade.

A todos sou verdadeiramente grato.

RESUMO

Estudou-se o diagnóstico sobre a climatologia e variabilidade fluviométrica (cota ou nível) do rio Tapajós no município de Santarém no Pará, onde foram utilizados dados dos anos de 1969 a 2009 da Agencia Nacional de Águas. Foram analisadas radiação de onda longa (ROL), precipitação, temperatura da superfície do Mar (TSM) do Oceano Pacífico e do Atlântico para os trimestres de outubro, novembro e dezembro (OND), janeiro, fevereiro e março (JFM), abril, maio e junho(AMJ) e julho, agosto e setembro (JAS). Foi feita a climatologia dos dados de cota e precipitação, a partir desses dados foram selecionados anos extremos, com anomalias positivas e negativas. O trimestre que apresentou maior cota foi abril, maio e junho, e cota mais baixa foi em outubro novembro dezembro. A Maior cota registrada do rio Tapajós foi em 2009 no mês de maio, com 819 cm e a menor foi em 1995 com 5 cm, no mês de outubro. As cotas mais altas estão associadas com o fenômeno La Niña, temperaturas negativas na superfície do oceano Pacífico e o com a maior parte do oceano Atlântico com TSM negativa, valores negativos de Radiação de Onda Longa e maior precipitação. As cotas mais baixas estão associadas ao Fenômeno El Niño, ou seja, temperaturas positivas na superfície do oceano Pacífico, o oceano Atlântico com dipolo positivo, valores positivos de Radiação de Onda Longa e menor precipitação.

Palavras-chave: Precipitação. Variabilidade fluviométrica. El Niño. La Niña. Santarém (PA).

ABSTRACT

Was studied the diagnosis on the climatology and variability fluviometric (quota or level) of the Tapajós River in the city of Santarem in Para state, where we used data from years 1969 to 2009 of the Agencia Nacional de Aguas. We analyzed the long-wave radiation (OLR), precipitation, sea surface temperature (SST) of the Pacific Ocean and the Atlantic to the quarters in October, November and December (OND), January, February and March (JFM), April, May and June (AMJ) and July, August and September (JAS). It was made the climatology of precipitation and elevation data, the data were selected from these extreme years, with positive and negative anomalies. The quarter with the highest share was in April, May and June, and lowest level was in October November December. Largest share of the Tapajós River was registered in 2009 in the month of May, with 819 cm and the lowest was in 1995 with 5 cm in the month of October. The higher altitudes are associated with La Niña, negative temperatures on the surface of the Pacific Ocean and with most of the Atlantic Ocean SST with negative, negative values of outgoing longwave radiation and increased precipitation. The lower elevations are associated with El Niño, or positive temperature on the surface of the Pacific Ocean, Atlantic Ocean dipole with positive, positive values of outgoing longwave radiation and lower rainfall.

Keywords: Precipitation. Fluviometric variability. El Niño. La Niña. Santarém (PA)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01. ALTER DO CHÃO (período de seca - praias).....	13
Figura 02. ALTER DO CHÃO (período de enchente - praias).....	13
Figura 03. Localização do município de Santarém.....	21
Figura 04. Climatologia mensal (média no período 1970-2009: 40 anos) da cota (cm) e precipitação (mm) em Santarém durante o ano hidrológico.....	23
Figura 05. Cota (cm) em Santarém para os trimestres de OND, JFM, AMJ e JAS durante os anos de 1969 a 2009.....	24
Figura 06. Anomalias padronizadas da cota (cm) em Santarém para os trimestres de JFM e AMJ durante os anos de 1969 a 2009.....	25
Figura 07. Mapas de correlação entre a série de anomalias da cota em Santarém e a grade de anomalias e TSM para o lag -1 (cota no trimestre AMJ x TSM no trimestre JFM) e para o lag 0 (cota no trimestre AMJ x TSM no trimestre AMJ). Áreas em cinza indicam correlações significantes acima de 90%.....	26
Figura 08. Mapas de correlação entre a série de anomalias da cota em Santarém e a grade de anomalias e ROL para o lag -1 (cota no trimestre AMJ x ROL no trimestre JFM) e para o lag 0 (cota no trimestre AMJ x ROL no trimestre AMJ). Áreas em cinza indicam correlações significantes acima de 90%.....	27
Figura 09. Mapas de correlação entre a série de anomalias da cota em Santarém e a grade de anomalias e precipitação para o lag -1 (cota no trimestre AMJ x precipitação no trimestre JFM) e para o lag 0 (cota no trimestre AMJ x precipitação no trimestre AMJ). Áreas em cinza indicam correlações significantes acima de 90%.....	28
Figura 10: Composições de médias mensais de precipitação e cota e das padronizadas da cota (desvio padrão) em Santarém, correspondentes aos anos em que se verificaram cheias (comp+) e vazantes (comp-) extremas.....	29

Figura 11. Composições da anomalias de PRP e cota mensal (figura acima) e das padronizadas da PRP e cota (desvio padrão) em Santarém, correspondentes aos anos em que se verificaram cheias (comp+) e vazantes (comp(-)) extremas.....	29
Figura 12. Composições positivas de anomalias de ROL, TSM e PRP em JFM.....	31
Figura 13. Composições positivas de anomalias de ROL, TSM e PRP em AMJ.....	32
Figura 14. Composições negativas de anomalias de ROL, TSM e PRP em AMJ.....	33
Figura 15. Composições negativas de anomalias de ROL, TSM e PRP em AMJ.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMJ – Abril, Maio e junho.

d^{-1} – Por dia.

ENOS - *El Niño*-Oscilação Sul

HydroWeb-ANA – Site da Agencia Nacional de Águas.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

JAS – Julho, agosto e setembro.

JFM – Janeiro, fevereiro e março.

Km^2 – Quilômetros quadrados.

LI – Linhas de instabilidade.

Mj – Mega Joule.

M^2 – Metro quadrado.

m/s – Metros por segundo.

mm/ano – Milímetros por ano.

NCEP – National Center for Environmental.

OND – Outubro, novembro e dezembro.

PRP – Precipitação.

TSM – Temperatura da Superfície do Mar.

US – United States.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	ASPECTOS GERAIS SOBRE A VARIBILIDADE NA AMAZÔNIA.....	15
2.2	SISTEMAS ATUANTES NA AMAZÔNIA.....	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1	ÁREA DE ESTUDO	20
3.2	DADOS	21
3.3	METODOLOGIA.....	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
4.1	CLIMATOLOGIA	23
4.2	VARIABILIDADE FLUVIOMÉTRICA E MECANISMOS DINÂMICOS	24
4.3	COMPOSIÇÕES DE EVENTOS EXTREMOS DE VAZANTE E CHEIA	28
5	CONCLUSÕES	35
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas na Amazônia é a variabilidade do nível dos rios, que dependendo da situação, trazem problemas à população.

Santarém na confluência do rio Tapajós com o rio Amazonas, sofre tanto com as enchentes na época chuvosa, como no período seco com o baixo nível rio.

O rio Tapajós é um dos principais rios do estado do Pará, fazendo parte da bacia Amazônica, a maior bacia hidrográfica do mundo, sendo utilizada no transporte.

Apesar da época seca, baixar o nível do rio, isso causa um fluxo de turistas em função das praias, umas das mais belas do mundo, é o caso de Alter do Chão.

Em termos gerais Santarém possui os meses mais chuvosos em abril, maio e junho, os menos chuvosos em outubro, novembro e dezembro, esta região sofre influências das temperaturas da superfície do mar, do oceano Pacífico e principalmente o oceano Atlântico, da Radiação de Onda Longa, que provoca períodos de seca e enchentes. Em que o El Niño provoca um índice pluviométrico abaixo do normal, visto que a circulação zonal de Walker é perturbada, resultando, de certo modo, subsidência sobre grande parte do estado do Pará (Rickey; Nobre; Deser, 1989; Souza; Kayano; Ambrizzi, 2005; ramos da Silva; Werth; Avissar, 2008). Por outro lado, o La Niña responde pelo padrão inverso de circulação observado na fase quente (Souza; Kayano; Ambrizzi, 2005).

Sistemas como a ZCIT, ZCAS e Linhas de Instabilidade também provocam variações na precipitação no nível do rio Tapajós.

Pode-se observar as praias de Alter do Chão no período de seca e de enchente na figura 1 e 2.

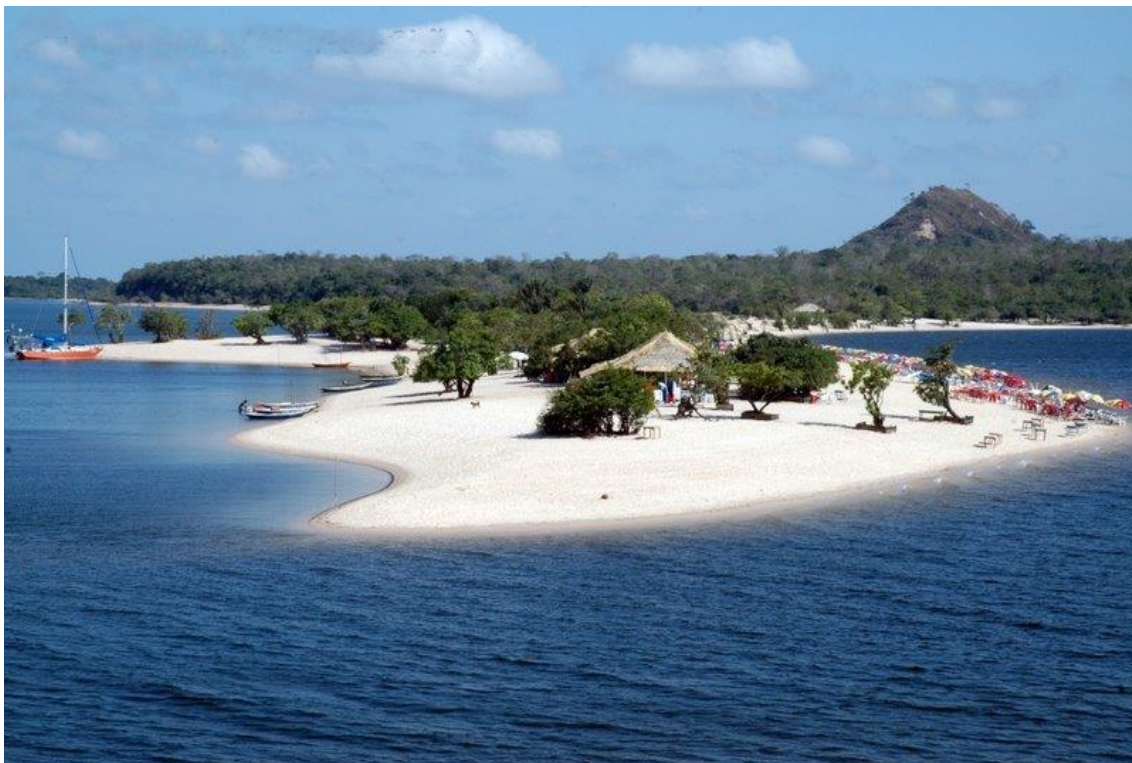


Figura 1. ALTER DO CHÃO (período de seca - praias)
Fonte: Pereira (2009).



Figura 2. ALTER DO CHÃO (período de enchente - praias)
Fonte: Oliveira Notapajos, 2009.

1.1 OBJETIVOS

Com base nos dados de cota do rio Tapajós em Santarém e precipitação também em Santarém encontrados no site da Agencia Nacional de Água (ANA) e, de anos com ocorrência de anomalias da Temperatura da Superfície do Mar (TSM), o objetivo geral deste trabalho é estudar a variabilidade fluviométrica do Rio Tapajós, na região de Santarém, relacionada com a precipitação na região, nos últimos 39 anos, no período de 1969 à 2009.

Os objetivos específicos são:

- Calcular e analisar os aspectos climatológicos fluviométricos do rio Tapajós em Santarém.
- Analisar a variabilidade do rio Tapajós associada com a precipitação da região.
- Avaliar a variabilidade da precipitação, relacionando com os eventos da temperatura da superfície do mar (TSM), no oceano Pacífico a La Niña e El Niño e dipolo no oceano Atlântico e anomalias de ROL.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE A VARIBILIDADE NA AMAZÔNIA

A bacia amazônica está sujeita a um regime de precipitações essencialmente de origem Atlântica e recebe em média 2.460 mm/ano. Na parte brasileira da bacia, a distribuição sazonal das precipitações demonstra diferenças sensíveis entre o Norte e o Sul. Ao Norte do equador (bacia do Rio Negro), o máximo pluviométrico é observado de maio a julho enquanto que ao Sul da bacia é de dezembro a março. A metade do volume das precipitações retoma à atmosfera em forma de vapor d'água devido à fortíssima evapotranspiração da floresta amazônica. Assim, a lâmina de água precipitada corresponde a aproximadamente 50% do vapor d'água reciclado.

A característica intrínseca do clima da Amazônia é a presença de um amplo espectro de variações no tempo e espaço da atividade convectiva tropical e da precipitação, as quais se tornam as variáveis climáticas mais importantes da região. O foco deste trabalho é na região da Amazônia oriental adjacente à costa Atlântica, onde se observa um máximo pluviométrico ao longo dos Estados do Amapá, Pará e Maranhão, com volume de chuva anual em torno de 2000 a 3000 mm (FIGUEROA e NOBRE, 1990). A maior parte desta precipitação anual ocorre entre as estações de verão e outono austral (MARENGO et al., 2001; AMBRIZZI e SOUZA, 2003), tipicamente de dezembro a maio, em associação aos padrões de circulação atmosférica quase-estacionários de grande escala associados à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (SOUZA et al., 2004, SOUZA e ROCHA, 2006). No contexto da dinâmica climática tropical, é bem conhecido que a variabilidade interanual e sazonal da estação chuvosa da Amazônia é modulada diretamente pelos padrões oceano-atmosfera de grande escala, associados ao ciclo do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) sobre o Oceano Pacífico e as fases do gradiente meridional inter-hemisférico de anomalias de temperatura da superfície do mar (aTSM) sobre o Oceano Atlântico intertropical (NOBRE e SHUKLA, 1996; SOUZA et al., 2000). Através de mudanças significativas nos padrões da circulação troposférica associados às células de Walker e de Hadley (AMBRIZZI e SOUZA, 2002; SOUZA et al., 2004), ambos os modos climáticos do Pacífico e Atlântico interferem na posição e intensidade das bandas de nebulosidade convectiva da ZCAS e ZCIT e, portanto, modulam a distribuição de chuva na região. As análises observacionais conduzidas por

Souza et al. (2005), considerando dois cenários climáticos contrastantes denominados de favorável: concomitância de condições de La Niña e gradiente meridional de aTSM apontando para a bacia do Atlântico sul (desfavorável: concomitância de condições de El Niño e gradiente meridional de aTSM apontando para a bacia do Atlântico norte), evidenciaram a predominância de circulação atmosférica ascendente (descendente) nas regiões da célula de Walker/Hadley equatorial, que fortaleceu (inibiu) a ZCIT e conseqüentemente resultou em precipitação sazonal significativamente abundante (deficitária) no leste da Amazônia.

Diversas atividades do setor produtivo (particularmente aquelas ligadas à agricultura, geração e distribuição de energia hidroelétrica, indústria, etc) são dependentes da variabilidade pluviométrica regional, em especial nas regiões situadas nos trópicos (como é o caso da Amazônia), tornando a população vulnerável ao comportamento e variabilidade do sistema climático. Portanto, estudos que visam o entendimento científico das causas e conseqüências da variabilidade de chuva, e uma ferramenta que possa prevê-la, são imprescindíveis para gerar informações e produtos climatológicos úteis ao benefício da sociedade. Nesse sentido, os modelos climáticos globais e regionais são reconhecidamente ferramentas chave, uma vez que os mesmos conseguem equacionar com boa aproximação o sistema climático e assim, investigar vários detalhes dos mecanismos ou processos reguladores do clima e sua variabilidade espaço-temporal.

A Amazônia é uma região de maior atividade convectiva do planeta, constituindo assim fonte de umidade e calor que são importantes para os diversos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na interação biosfera-atmosfera locais e de regiões remotas. O conhecimento das diversas componentes envolvidas nessa interação é fundamental para a previsão da evolução do clima e da sustentabilidade dos seus ecossistemas como um todo, assim como para tomada de decisão sobre as políticas públicas mais adequadas para minimização de impactos danosos irreversíveis. Abriga também a maior bacia hidrográfica do mundo, com cerca de cinco milhões de quilômetros quadrados e influi nos ciclos biogeoquímicos e hidrológicos, com interações no clima do mundo inteiro. Sendo uma floresta equatorial de clima quente e úmido, a Floresta Amazônica possui uma alta pluviosidade (valores médios de precipitação anual entre 2.000 a 2.200 mm) associada a uma forte atividade convectiva, com períodos longos e intensos de chuvas durante o ano. A precipitação no

pico do período chuvoso normalmente excede o valor de 250 mm/mês. (HOREL et al., 1989).

A combinação de vários fatores forma o clima da região Amazônica, sendo que o mais importante é a disponibilidade de energia solar, através do balanço de energia. A Amazônia é situada na região entre latitude de 5° Norte e longitude de 10 ° Sul e recebe no topo da atmosfera um valor máximo de 36,7 MJ. M⁻². dia⁻¹ em dezembro/janeiro e um valor mínimo de 30,7 MJ. M⁻². dia⁻¹ em junho/julho (MARQUES E SALATI, 1984). Essa distribuição é controlada pela nebulosidade advinda da migração SE/NW da convecção amazônica (HOREL et al., 1989). A energia que atinge a superfície terrestre é devolvida para a atmosfera na forma de fluxo de calor sensível (aquecimento) e latente (evapotranspiração). Desta forma, o balanço de energia e umidade interage, sendo que o saldo de radiação é particionado em termos de calor sensível e/ou latente, dependendo das condições ambientais e de água no solo.

Figuerola e Nobre (1990) verificaram a distribuição espacial e temporal da precipitação na Amazônia. Seus resultados afirmaram que o período de chuvas ou forte atividade convectiva na região é compreendido entre novembro e março, sendo que o período de menos chuva (sem grande atividade convectiva) está compreendido entre os meses de maio e setembro. Os meses de abril e outubro são meses de transição entre um regime e outro. Segundo Souza e Ambrizzi (2003), o máximo da estação chuvosa na região Amazônica Oriental ocorre em no mês de Março.

A precipitação dentro da região amazônica é um parâmetro meteorológico de grande variabilidade no tempo e espaço, que está associada à influência de diferentes sistemas de meso-escala, escala sinótica e de grande escala (ROCHA, 2001).

2.2 SISTEMAS ATUANTES NA AMAZÔNIA

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o principal sistema meteorológico de grande escala indutor de chuva na Amazônia oriental, especialmente no Amapá e Pará, quando da sua posição climatológica mais austral, sendo que a sua atuação define a qualidade da estação chuvosa nestes estados (SOUZA et al., 2000). A distribuição espacial da precipitação possui uma marcha anual bem definida e influenciada principalmente pelo deslocamento norte-sul da ZCIT. As interações com outros sistemas contribuem com aproximadamente 70% da precipitação da Amazônia

(ROCHA, 2001). A ZCIT é uma extensa região de convergência dos ventos alísios de nordeste, oriundos do sistema de alta pressão ou anticiclone subtropical do Hemisfério Norte, e dos ventos alísios de sudeste, proveniente da alta subtropical do Hemisfério Sul. São caracterizadas por movimentos ascendentes, baixas pressões, e uma banda de nebulosidade e chuvas no sentido leste-oeste aproximadamente (BERNARDO, MOLION, 2002).

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que é um fenômeno de escala intrasazonal, também influencia o regime de precipitação na Amazônia, sendo em muitos casos, responsável por variabilidades no clima regional (KODAMA, 1992; LIEBMANN et al., 1999; NOGUES-PAEGLE; MOLION, 1997; QUADRO, 1994). Assim sendo, o Pará também está sujeito aos efeitos da ZCAS, que tem sua maior frequência nos meses de verão, coincidindo com a estação chuvosa e afetando os índices pluviométricos, principalmente na porção Sul do Estado do Pará. É comum nestes episódios, haver um acoplamento da ZCAS com a ZCIT, em associação com a Alta da Bolívia, o que pode provocar chuvas generalizadas sobre grande parte do estado (AMBRIZZI; GAN; KOUSKY, 1986; SOUZA, 2003).

Na escala intrasazonal a Oscilação de Madden-Julian é o principal mecanismo modulador de precipitação na Amazônia Oriental. Oscilação essa que é definida como uma onda de escala planetária que se propaga para leste com máxima atividade na região equatorial; esta oscilação ocorre num período de 30 a 70 dias, e estão associadas com os máximos de precipitação durante a estação chuvosa no leste da Amazônia (AMBRIZZI; SOUZA, 2006)

Considerando as escalas de tempo interanual e sazonal, a variabilidade climática na Amazônia é controlada pelos mecanismos climáticos de grande escala que se processam nas bacias oceânicas tropicais do Pacífico e Atlântico (SOUZA et al., 2005).

No Oceano Pacífico, o mecanismo climático dominante é o conhecido fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) que possui duas fases distintas: El Niño e La Niña que estão associados respectivamente ao aquecimento e resfriamento anômalo das águas oceânicas sobre o Pacífico tropical. Episódios de El Niño causam diminuição das chuvas no leste da Amazônia. Com relação ao fenômeno La Niña este causa em geral chuvas abundantes no norte e leste da Amazônia. Marengo et al. (2004), pesquisando a influência do ENOS na Amazônia, constatou que, na porção norte da bacia predominam

condições mais secas durante eventos de El Niño e nas regiões sul e centro da Amazônia prevalecem condições mais úmidas.

Os eventos do Dipolo no oceano Atlântico foram selecionados pelos anos que apresentaram o sinal contrário entre os índices normalizados de TSM, isso ocorre devido esses fatores: As relações entre as variáveis oceânicas e atmosféricas na superfície concordaram com os estudos anteriores (HASTENRATH; HELLER, 1977; NOBRE, 1993; NOBRE; SHUKLA, 1996) e o gradiente térmico meridional e inter-hemisférico modulou o posicionamento da banda de nebulosidade e precipitação associado a ZCIT. As análises observacionais da circulação de ar superior evidenciaram a manifestação da circulação meridional anômala e termicamente direta (HASTENRATH; GREISCHAR, 1993; MOURA; SHUKLA, 1981). Os fluxos das radiações de onda curta e onda longa e o fluxo de calor latente (associado ao processo de evaporação da água oceânica) agem cooperativamente para a gênese e manutenção do padrão inverso de anomalias de TSM e do gradiente térmico meridional associados ao modo do Dipolo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do presente trabalho é o município de Santarém pertencente ao Estado do Pará, o qual situa-se a 2°25'30'' de latitude sul e 54°42'50'' de longitude no oeste na microrregião do médio Amazonas (Figura 3), localizado na margem direita do rio Tapajós, na confluência com o rio Amazonas. Santarém possui cerca de 270.000 habitantes e uma área territorial de 22.887 Km², segundo dados estatísticos do IBGE (2009).



Figura 03. Localização do município de Santarém.
Fonte: Raphael Lorenzeto de Abreu, 2006.

3.2 DADOS

Os dados de Santarém usados foram cota ou nível do rio medido pela régua limnimétrica e precipitação medido pela estação pluviométrica pertencente ao banco de dados do Agencia Nacional de Águas (ANA). Esses dados compreendem o período de 1969 a 2009, 41 anos.

Usaram-se também alguns dados em ponto de grade:

- Precipitação sobre a Amazônia proveniente do conjunto de dados pertencente ao Centro de Previsão Climática (CPC) do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) dos EUA. Estes dados encontram-se documentados em Silva et al. (2007) e foram gerados através da interpolação espacial dos dados observados nas estações meteorológicas de superfície, reportados na codificação SYNOP das 1200UTC. Maiores detalhes sobre o controle de qualidade e métodos e procedimentos metodológicos podem ser encontrados em Silva et al. (2007).

- Radiação de onda longa (ROL) derivados dos satélites meteorológicos de órbita polar (LIEBMANN; SMITH, 1996), para caracterizar a atividade convectiva (nebulosidade) tropical.

- Temperatura da superfície do mar (TSM) adquiridos junto ao CPC/NCEP com o propósito de se investigar os padrões observados sobre a superfície oceânica do Pacífico e Atlântico tropical (REYNOLDS et al. 2002).

3.3 METODOLOGIA

Define-se a *variabilidade climática* como uma variação das condições climáticas em torno da média climatológica. Já *anomalia climática* refere-se a uma flutuação extrema de um elemento em uma série climatológica, com desvios acentuados do padrão observado de variabilidade. Neste trabalho utiliza-se a anomalia padronizada dada por:

$$AP = (\text{valor observado} - \text{média climatológica}) / \text{desvio padrão}$$

Utiliza-se o método de correlações simples para se investigar a relação entre a variabilidade fluviométrica do rio Tapajós em Santarém e os padrões espaciais (grade) de precipitação, ROL e TSM.

Usa-se o método de composições (média de vários eventos) para se investigar o comportamento da cota e precipitação em Santarém associada aos eventos extremos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CLIMATOLOGIA

A Figura 04 mostra o ciclo anual durante o ano hidrológico dos valores médios climatológicos (média de 1969 a 2009) de cota e de precipitação na região de Santarém. Observa-se que o período chuvoso inicia-se no mês de dezembro e atinge máximos de precipitação de 450 mm no mês de março, seguindo de abril com 403 mm, devido a influencia da ZCIT que está acima da região neste período. A partir de junho inicia-se o período de estiagem, onde o mês com menor precipitação é o de setembro com 37 mm e o mês de outubro com 47 mm. Observa-se que a cota do rio Tapajós eleva-se após os meses de máxima precipitação, ou seja, primeiramente vêm às chuvas e depois de algum período o rio começa a encher. Os meses de maiores cheias são março, abril, maio, junho e julho, onde o maior valor observado foi de 609 mm, no mês de maio, e os outros meses foram de 496 mm em março, 567 mm em abril, 596 mm em junho e 546 em julho. O período de maior vazante foram nos meses de outubro, novembro e dezembro, onde a mínima foi de 141 mm em novembro.

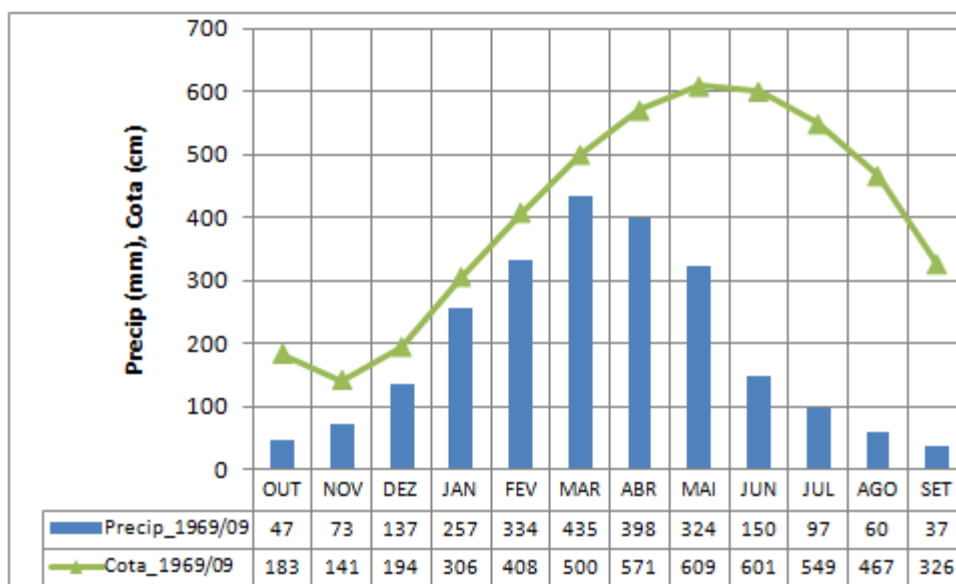


Figura 04. Climatologia mensal (média no período 1970-2009: 40 anos) da cota do rio Tapajós (cm) e precipitação (mm) em Santarém durante o ano hidrológico.

4.2 VARIABILIDADE FLUVIOMÉTRICA E MECANISMOS DINÂMICOS

Analisando ainda a Figura 04, nota-se que o trimestre em que o nível do rio é máximo (maiores valores ao longo do ano hidrológico) é Abril, Maio e Junho (AMJ). Fazendo-se a média trimestral que antecede AMJ temos as médias sazonais de Janeiro, fevereiro e Março (JFM) e Outubro, Novembro e Dezembro (OND), bem como o trimestre que precede, ou seja, Julho, Agosto e Setembro (JAS). Na Figura 5 plotaram-se estas médias trimestrais, na qual percebe-se claramente que AMJ é realmente o período que apresenta os maiores níveis da cota do rio ao longo de toda a série temporal de 1969 a 2009. As médias de JFM e JAS possuem comportamento e intensidade parecidos e em OND percebe-se os valores mínimos da cota do rio durante a série de 40 anos.

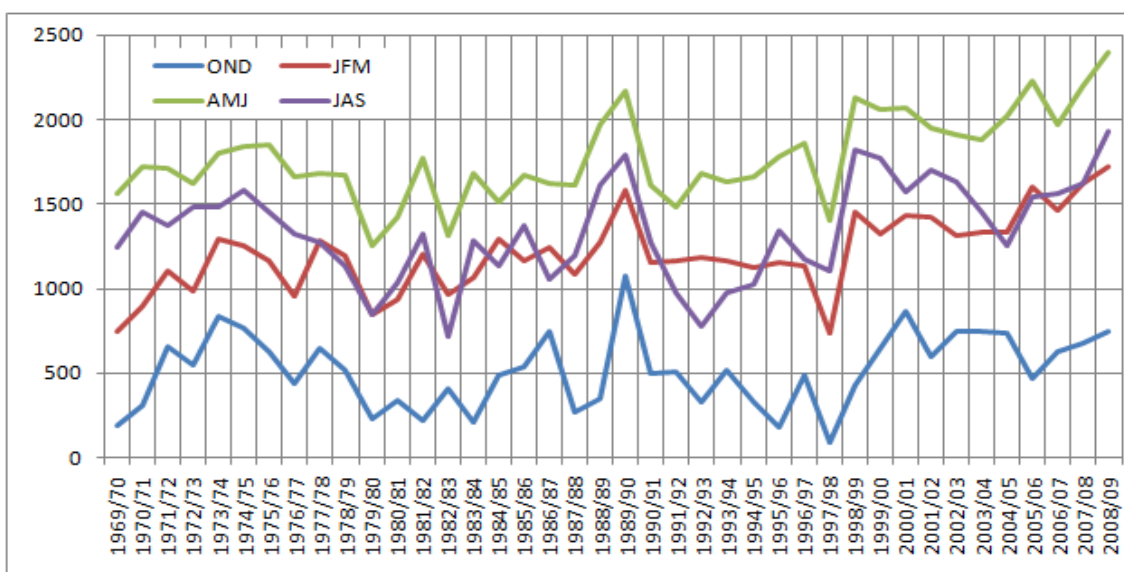


Figura 05. Cota do rio Tapajós (cm) em Santarém para os trimestres de OND, JFM, AMJ e JAS durante os anos de 1969 a 2009.

A Figura 06 mostra a anomalia padronizada de cota para os trimestres AMJ, no qual observa-se que nos primeiros anos em estudo até 1973 foram de anomalias negativas, seguido de três anos com a cota acima de zero e a partir de 1977 ocorreu uma decaída atingindo uma mínima cota registrada em 1980 com -2,1. A cota elevou-se bastante no ano de 1990 atingindo anomalia positiva de 1,5, após algumas oscilações o nível do rio tornou a subir, admitindo anomalias positivas no restante dos anos, confirmando a máxima anomalia positiva em 2009 com quase 2,5. Ressalta-se que

desde 1999 a 2009, ou seja, na última década, o nível do rio Tapajós em Santarém apresentou sistematicamente cheias acima do normal (anomalias positivas).

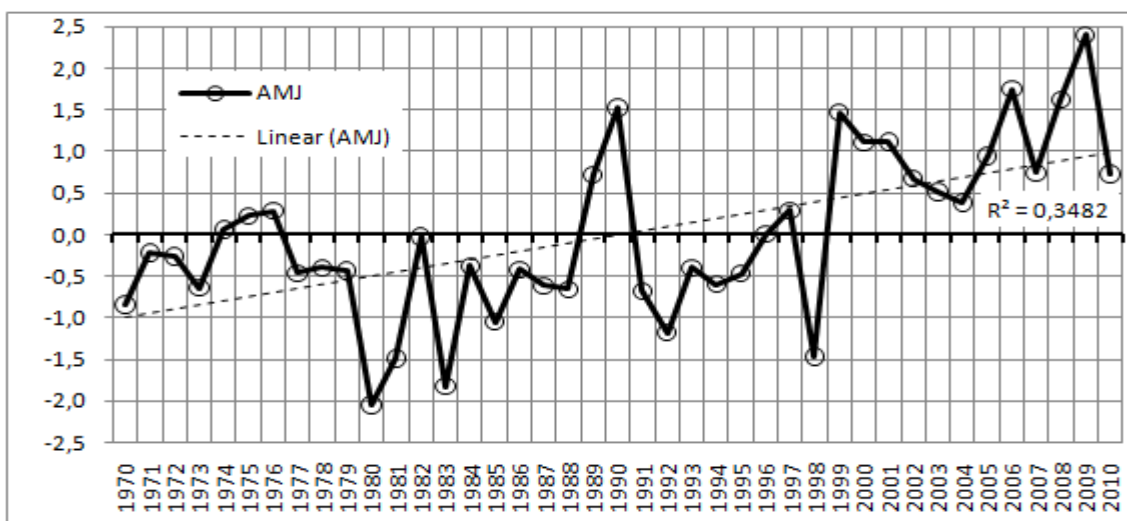


Figura 06. Anomalias padronizadas da cota (em desvio padrão) em Santarém para os trimestres de AMJ durante os anos de 1969 a 2009.

A seguir apresentam-se os resultados das correlações entre a série trimestral das anomalias padronizadas de cota em Santarém e as grades de TSM no Pacífico e Atlântico, ROL sobre a América do Sul e precipitação sobre a Amazônia. A finalidade de se analisar esses mapas de correlação é descrever os mecanismos climáticos de grande escala no Pacífico/Atlântico, convecção sobre o Brasil tropical e precipitação sobre a Amazônia associados com a variabilidade fluviométrica em Santarém.

A Figura 7 mostra a correlação entre a série de anomalias da cota em Santarém e a grade de anomalias e TSM sobre os Oceanos Pacífico e Atlântico.

Para o lag -1, ou seja, correlação entre a cota de AMJ e a TSM de JFM (trimestre anterior), nota-se que o Pacífico tropical apresenta a maior resposta, sendo que as correlações são negativas, confirmando que o ciclo do El Niño e La Niña exercem grande influência na cota do rio em Santarém. A correlação negativa significa que em anos de El Niño (anomalia de TSM positiva) a cota do rio é negativa (cota abaixo do normal). Inversamente, os anos de La Niña (anomalia negativa de TSM) associam-se a cota do rio acima do normal (cota positiva).

Outra área de influencia aparece sobre o Oceano Atlântico tropical em JFM, com correlações positivas, ou seja, anomalias positivas (negativas) associam-se com cota também positiva (negativas).

Para o lag 0 (simultâneo), ou seja cota em AMJ e TSM também em AMJ, observa-se que o Pacífico diminui o seu grau de influência e aparece mais fortemente o impacto do Oceano Atlântico tropical sul que apresenta correlações positivas significantes. Esse resultado mostra que os anos com anomalias positivas de TSM relacionam-se com anomalia de cota acima do normal. Contrariamente, anos com anomalias de TSM negativa também verificam-se anomalias negativas de cota em Santarém.

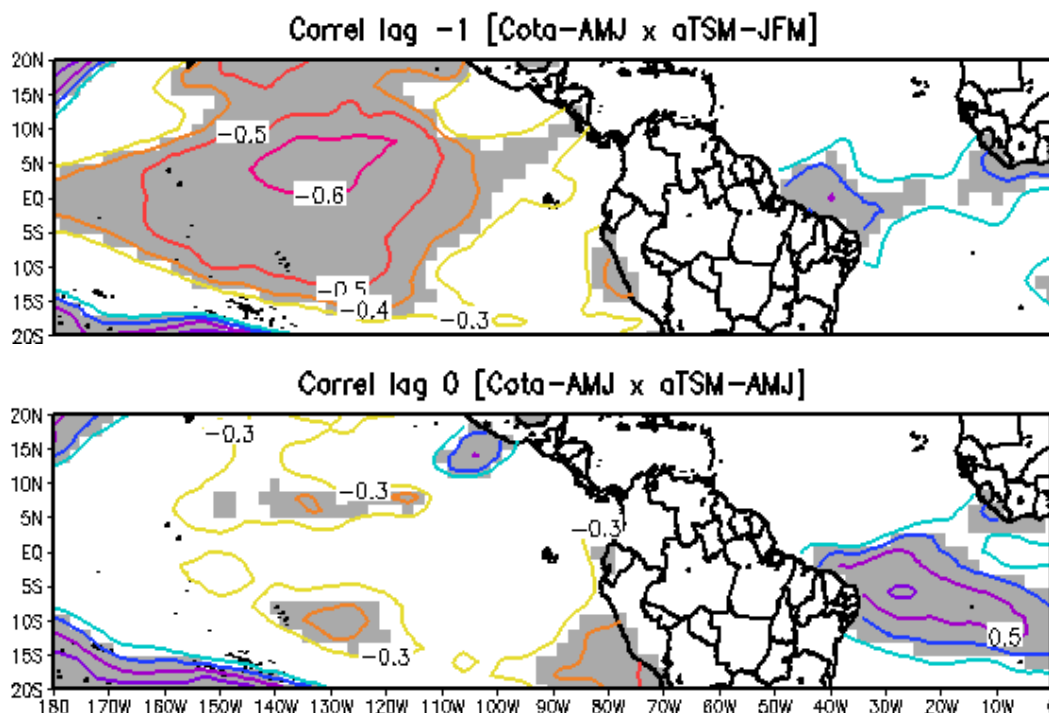


Figura 07. Mapas de correlação entre a série de anomalias da cota em Santarém e a grade de anomalias e TSM para o lag -1 (cota no trimestre AMJ x TSM no trimestre JFM) e para o lag 0 (cota no trimestre AMJ x TSM no trimestre AMJ). Áreas em cinza indicam correlações significantes acima de 90%.

A Figura 08 mostra os mapas de correlação entre a cota do rio e a grade de ROL sobre a América do Sul tropical.

Para o lag -1, observa-se uma grande área com correlação negativa sobre a porção norte da Amazônia e Oceano Atlântico. Ou seja, anos com cota acima do normal em Santarém são precedidas de muita atividade convectiva associada à ZCIT atuando sobre o norte da Amazônia, particularmente no norte do Pará e Amazonas. Anos com cota negativa são associados com o padrão inverso, ou seja, ausência da ZCIT naquelas regiões.

Para o lag 0, notam-se correlações negativas sobre a região do Atlântico equatorial, sugerindo a modulação direta da ZCIT.

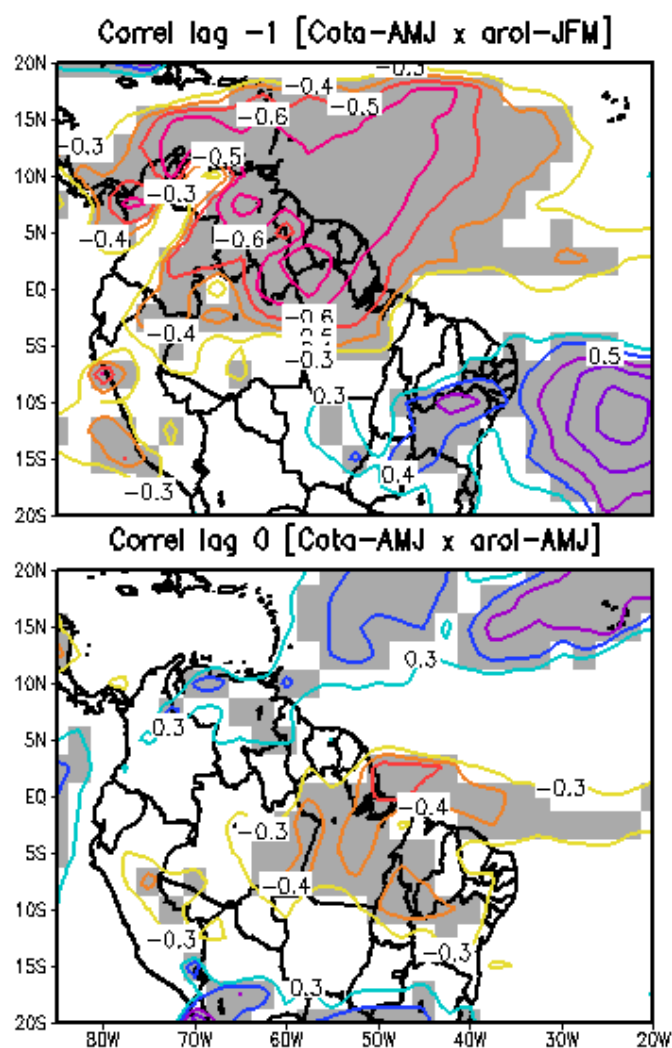


Figura 08. Mapas de correlação entre a série de anomalias da cota em Santarém e a grade de anomalias e ROL para o lag -1 (cota no trimestre AMJ x ROL no trimestre JFM) e para o lag 0 (cota no trimestre AMJ x ROL no trimestre AMJ). Áreas em cinza indicam correlações significantes acima de 90%.

A Figura 09 mostra a correlação entre a cota e a precipitação sobre a Amazônia.

Para o lag -1, verificam-se correlações positivas numa grande área sobre o norte do Pará e do Amazonas, demonstrando que a cota do rio em Santarém depende diretamente da chuva que ocorre na calha norte.

Para o lag 0, observa-se uma maior correlação sobre o Pará, sendo que o padrão espacial sugere a influência da ZCIT e da ZCAS.

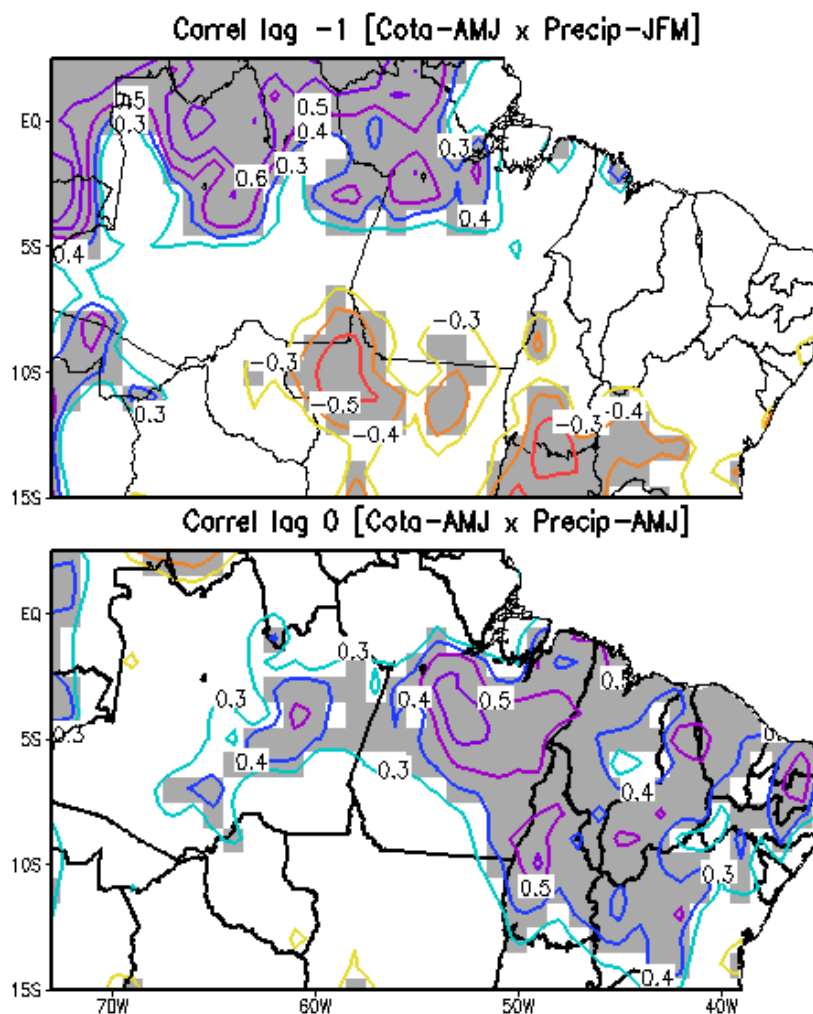


Figura 09. Mapas de correlação entre a série de anomalias da cota em Santarém e a grade de anomalias e precipitação para o lag -1 (cota no trimestre AMJ x precipitação no trimestre JFM) e para o lag 0 (cota no trimestre AMJ x precipitação no trimestre AMJ). Áreas em cinza indicam correlações significantes acima de 90%.

4.3 COMPOSIÇÕES DE EVENTOS EXTREMOS DE VAZANTE E CHEIA

Nesta parte investigam-se os anos em que a cota do rio em Santarém apresentou eventos extremos, com base no método das composições. Esses eventos extremos foram selecionados com base na Figura 6, sendo os anos extremos de vazante (**anos – ou comp(-)**) definidos com aqueles que apresentaram valores de anomalias padronizadas abaixo de -1,5 desvios padrões. Os anos extremos de cheia (**anos + ou comp(+)**) foram definidos como aqueles que apresentaram valores de anomalias padronizadas acima de +1,5 desvios padrões.

Os **anos – ou comp(-)** foram: 1980, 1981, 1983 e 1998.

Os **anos +** ou **comp(+)** foram: 1990, 1999, 2006, 2008 e 2009.

Fazendo-se as composições de todos os **anos -** e todos os **anos +**, mencionados acima, foram plotados os valores médios de cota e precipitação em Santarém, Figura 10.

A composição dos anos + mostra claramente valores de precipitação acima da média ocorrendo nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro, março e maio. Já as composições de anos - mostram precipitação abaixo da média ocorrendo sequencialmente nos meses de dezembro a junho.

O outro gráfico mostra que as composições positivas indicam as maiores cheias, ou seja, estão acima da média ocorrendo praticamente em todos os meses, exceto em outubro. Já a composição - mostra o nível do rio abaixo da média, em todo o período.

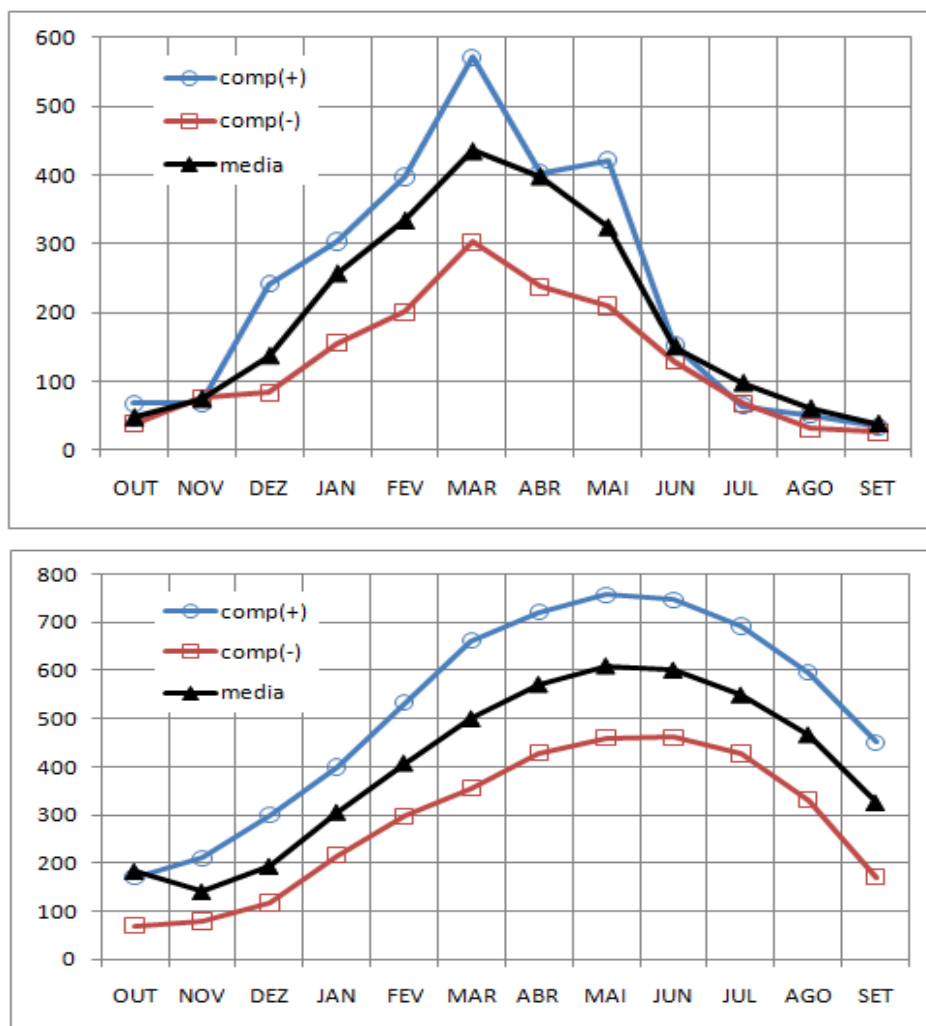


Figura 10: Composições de médias mensais de precipitação e cota e das padronizadas da cota (desvio padrão) em Santarém, correspondentes aos anos em que se verificaram cheias (comp+) e vazantes (comp(-)) extremas.

Os gráficos a seguir mostram as anomalias de PRP e cota dos eventos extremos representados na figura 10.

A figura 11 mostra a composição de anomalias positivas de PRP onde encontram-se acima de zero, pela maior parte do período, correspondentes aos meses de outubro, dezembro a maio, o maior valor encontrado foi no mês de março com anomalia de 1,1. A composição de anomalia negativa manteve-se abaixo de zero por quase todo o período, exceto em novembro.

O outro gráfico mostra a anomalia de cota, em que a composição positiva iniciou-se com o único mês pouco abaixo de zero que foi em outubro, a partir daí se manteve acima, com maior valor em março, com anomalia de quase 2,0. A composição negativa por todos os meses se manteve abaixo de zero, apresentando uma mínima no mês de maio.

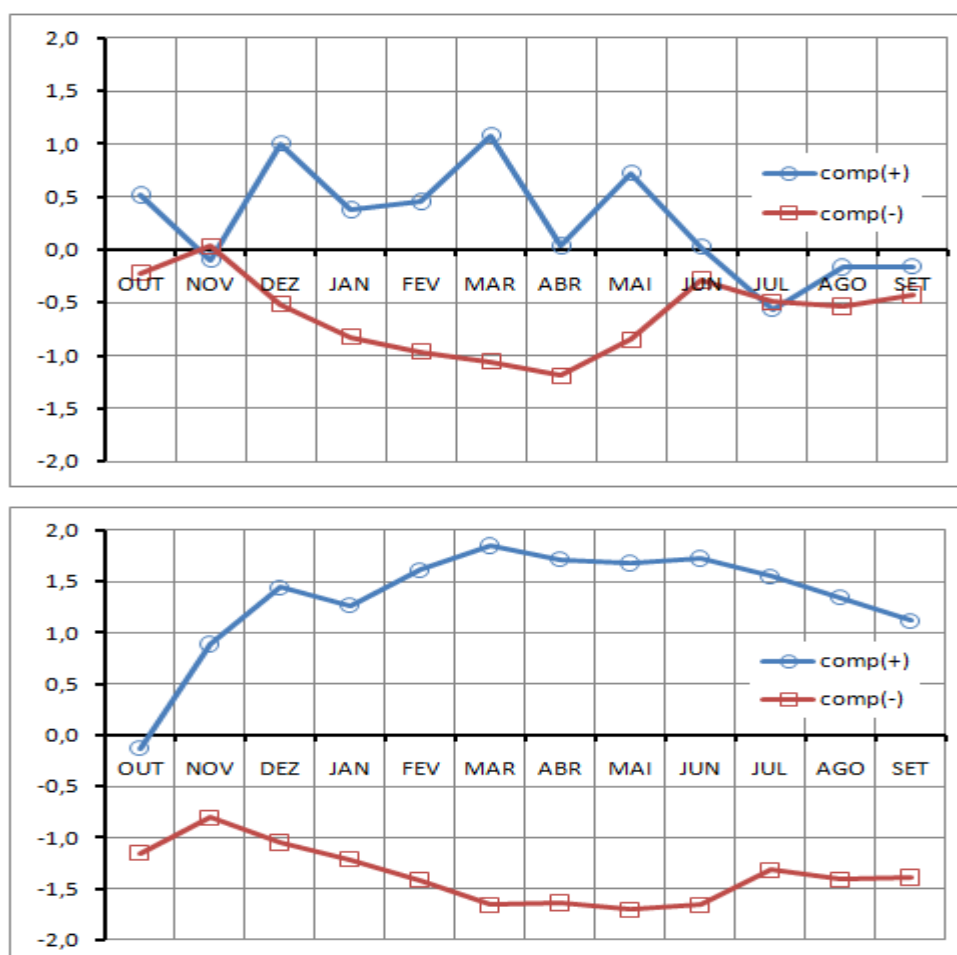


Figura 11. Composições da anomalias de PRP e cota mensal (figura acima) e das padronizadas da PRP e cota (desvio padrão) em Santarém, correspondentes aos anos em que se verificaram cheias (comp(+)) e vazantes (comp(-)) extremas.

Nas imagens a seguir mostram as composições positivas de ROL, TSM e PRP nos meses de JFM.

A composição positiva em JFM mostra que nos dados de ROL indicam valores negativos na região norte e noroeste do Pará com anomalia de -7,5, e boa parte do oceano Atlântico Norte o que favorece no aumento do nível do rio por apresentar maior nebulosidade.

A anomalia de precipitação em JFM mostra valores positivos por grande parte do estado do Amazonas, exceto no sul e sudeste dessa região, no estado do Pará observa-se anomalias positivas mais para o noroeste e no centro do estado, não apresentando muita intensidade apesar da TSM encontra-se em fase negativa no Oceano Pacífico equatorial, caracterizando uma La Niña, e o Atlântico tropical com valores de TSM positiva, não tão acentuado. O que indica um tempo de resposta de 3 meses para que este fenômeno influencie na PRP e cota no estado do Pará.

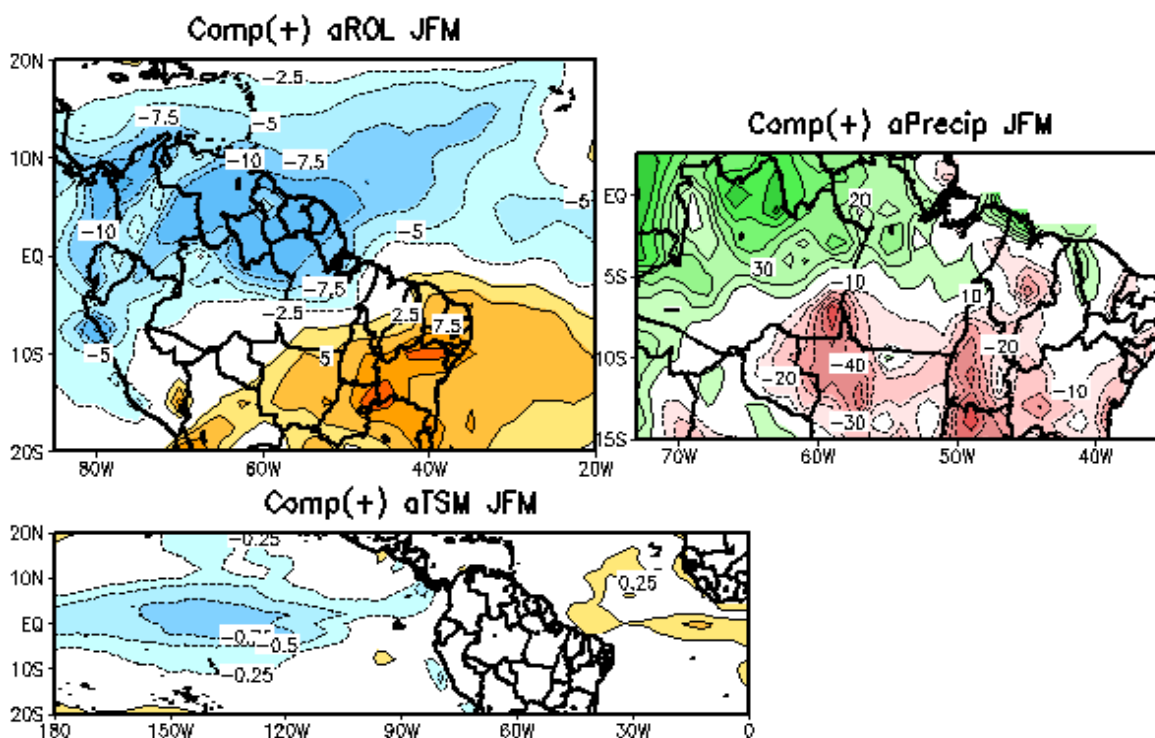


Figura 12. Composições positivas de anomalias de ROL, TSM e PRP em JFM.

Analisando o ROL em AMJ encontra-se anomalia negativa em boa parte do Atlântico tropical, o que indica a presença da ZCIT com sua maior atuação no estado do Pará, o que provoca altos níveis de PRP, que pode ser visto na figura 13, a PRP encontra-se intensa por boa parte do estado do Pará com menores valores no noroeste e sudoeste do estado, estes elevados valores de precipitação estende-se para grande parte do nordeste brasileiro.

E a TSM em AMJ se apresenta mais aquecida tanto no Oceano Pacífico tropical com pouca intensidade com pequena parte apresentando $0,25^{\circ}$, quanto no Atlântico Norte e Sul bem com uma maior área de aquecimento também com $0,25^{\circ}$. Apesar dessas TSMs mais elevadas, sabe-se que esse período foi o mais chuvoso no estado do Pará, portanto confirma-se o tempo de resposta do Fenômeno La Niña observado na figura 12.

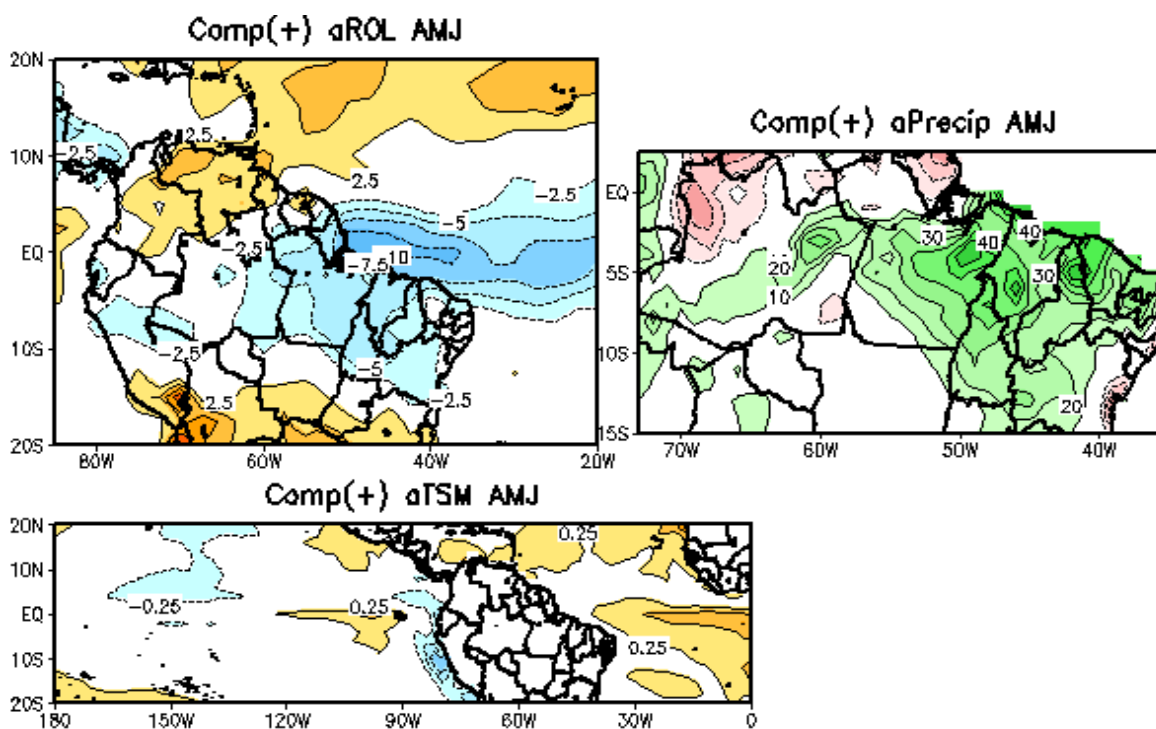


Figura 13. Composições positivas de anomalias de ROL, TSM e PRP em AMJ.

A figura 14 mostra a fase mais seca, que são as composições negativas. Analisando o ROL no período de JFM, observa-se grande parte do Pará e do Atlântico equatorial com anomalia positiva, o que indica pouca nebulosidade e conseqüentemente menor cota na

região envolvida, com menor intensidade no sul do Pará. A TSM do oceano Pacífico encontra-se na fase positiva o que indica o fenômeno El Niño, sendo assim ocorre pouca PRP, onde pode ser observado na figura 13, em que boa parte da Região amazônica apresenta baixos níveis de PRP, com uma pequena área no sudoeste do Pará e sudeste do Amazonas com PRP positiva.

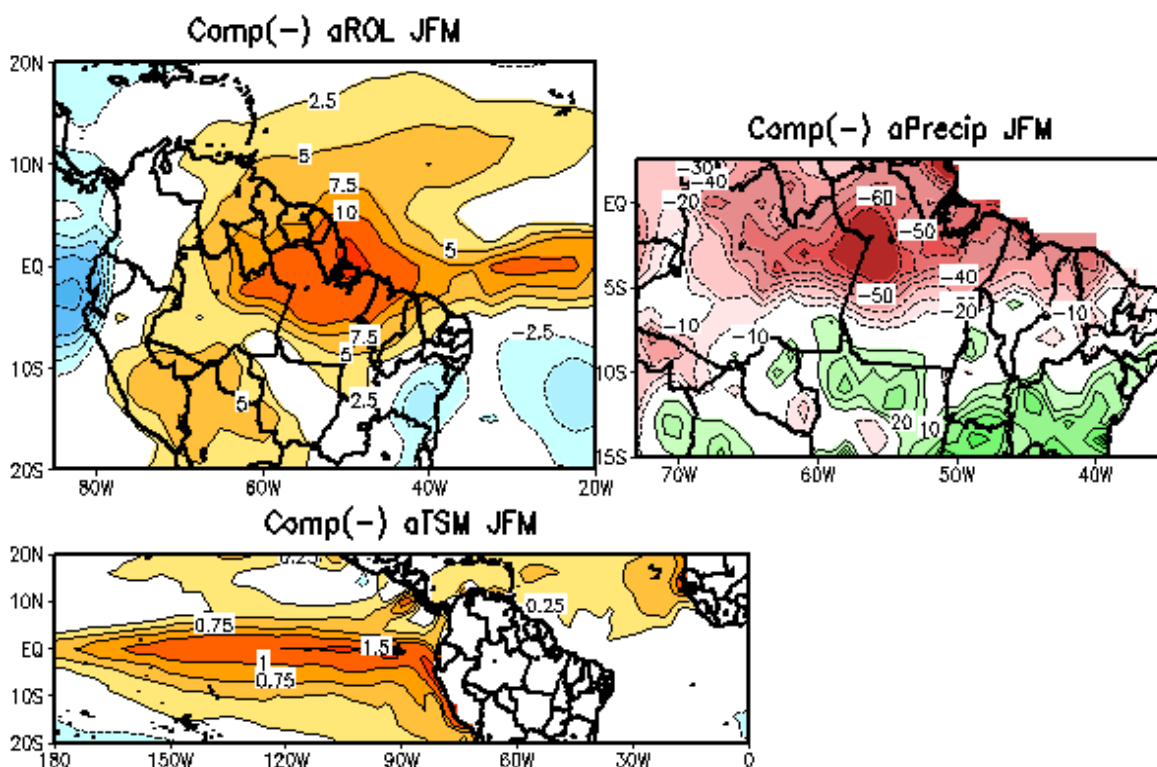


Figura 14. Composições negativas de anomalias de ROL, TSM e PRP em JFM.

Na figura 15 observa-se que os valores de ROL estão positivos por todo o estado do Pará, boa parte do Amazonas e nordeste do Brasil, o que indica muito pouca nebulosidade. Agravando ainda mais a seca a TSM do oceano Pacífico equatorial encontra-se aquecida, chegando a atingir $1,5^{\circ}$, e o Atlântico Norte com anomalia positiva de até $0,25^{\circ}$, e o Atlântico Sul.

A anomalia de precipitação neste período, em praticamente todo o Pará encontra-se negativa o menor valor encontrado foi de -70 .

E a anomalia de TSM continua aquecida no Pacífico equatorial, o que se caracteriza a fase de El Niño, e também com TSM positiva no Atlântico Norte e o Atlântico Sul com uma menor área mais resfriada.

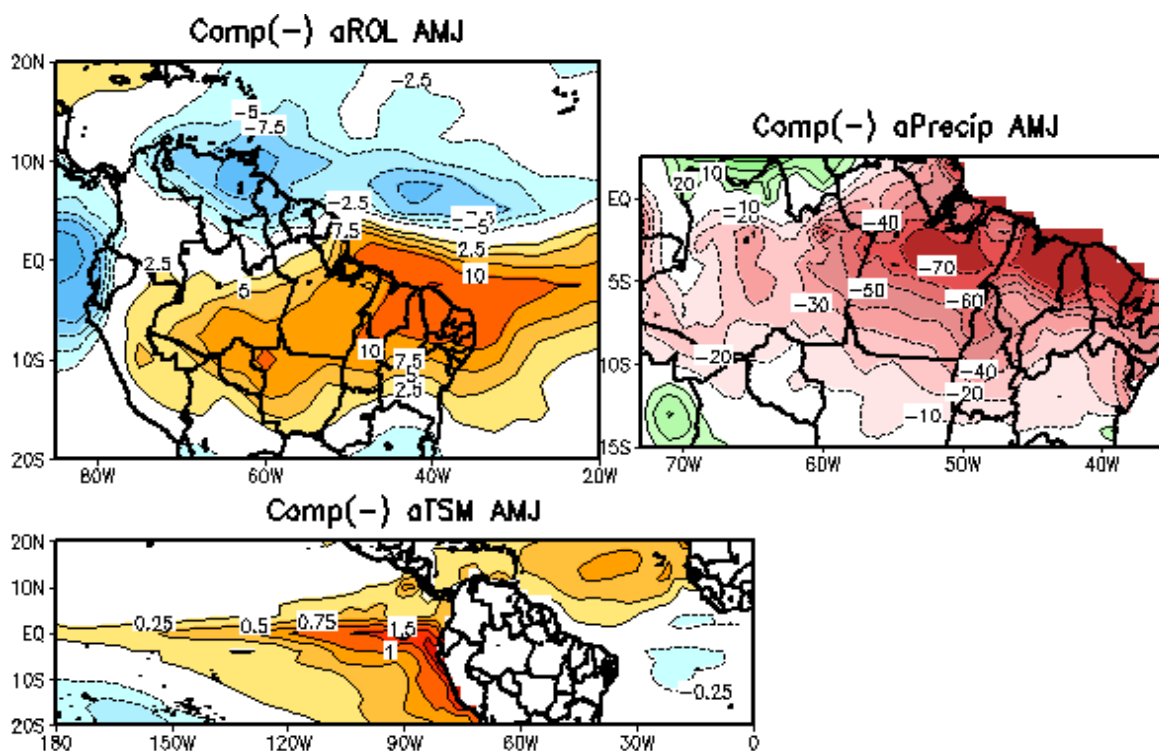


Figura 15. Composições negativas de anomalias de ROL, TSM e PRP em AMJ.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho estudou a variabilidade de precipitação e cota do rio Tapajós em Santarém, com dados da agência nacional da água (ANA), analisando o período de 1969 a 2009. Nesses anos em questão, o ano que se destacou com a maior cota do rio foi o de 2009, no mês de maio com 819 cm e a menor foi em 1995, com 5 cm no mês de outubro. A climatologia mostrou que o período mais chuvoso foi de fevereiro a maio, e o menos chuvoso foi de julho a novembro. O comportamento trimestral dos anos em questão mostrou que, o trimestre com a maior cota do rio foi em abril, maio e junho, e a menor, ou seja, o período de seca foi no trimestre de outubro novembro e dezembro. Nas anomalias padronizadas da cota para os trimestres de AMJ durante os anos de 1969 a 2009, pode ser observado que nos primeiros anos em estudados a anomalia da cota era negativa, e os últimos anos estudados a anomalia se tornou positiva, o que indica um aumento do nível do rio Tapajós.

As condições de ROL e TSM mostraram que esses fatores têm um tempo de resoste de aproximadamente três meses para causar influencias em Santarém, observou-se que nos meses onde a TSM do Pacífico estava mais resfriada, não causava tanta precipitação, mas após três meses, apesar da TSM do Pacífico ter aumentado, foi o período de maior enchente na região em estudo. Para que esses condição favoráveis de precipitação ocorram nos meses seguintes a TSM do Pacífico equatorial, a do Atlântico e o ROL tem que está com anomalia negativa.

Observou-se também que a intensificação da precipitação, o nível do rio começa a elevar-se lentamente até atingir a cota máxima, no final do período chuvoso.

REFERÊNCIAS

- CAVALCANTI, I. F. A. et al. Global climatological features in a simulation using the CPTECCOLA AGCM. *Journal of Climatology*, v.15, n.21, p.2965-2988. 2002.
- CHOU, S. C. et al. Validation of the coupled Eta/SSiB model over South America. *Journal of Geophysical Research*, v.107, D20, 8088. 2002.
- COELHO, C. A. S.; DRUMOND, A. R. M.; AMBRIZZI, T. Estudo climatológico sazonal da precipitação sobre o Brasil em episódio extremo da Oscilação Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.14, n.1, p.49-65. 1999.
- COHEN, J. C. P.; DIAS, M. A. F. S.; NOBRE, C. A. Aspectos climatológicos das linhas de instabilidade na Amazônia. *Climanálise – Boletim de Monitoramento e Análise Climática*, v.4, n.11, p.34-40. 1989.
- FISCH, G.; MARENGO, J. M.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. *Acta Amazônica*, v.28, n.2, p.101-126. 1998.
- GAN, M. A.; KOUSKY, V. E. Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano Atlântico Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.1, p.19-28. 1986.
- GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J. Precipitation Anomalies in Southern Brazil Associated with El Niño and La Niña Events. *Journal of Climate*, v.2, p.2863-2980. 1998.
- HARRISON, D. E.; LARKIN, N. K. El Niño-Southern Oscillation sea surface temperature and wind anomalies 1946-1993. *Review of Geophysics*, v.36, p.353-399. 1998.
- HIGGINS, R. W. et al. Improved United States precipitation quality control system and analysis. NCEP/Climate Prediction Center Atlas 7, 40p. 2000.
- KAYANO, M. T.; RAO, V. B.; MOURA, A. D. Tropical circulations and the associated rainfall anomalies during two contrasting years. *Journal of Climatology*, v.8, p.477-488. 1988.
- KOUSKY, V. E.; KAYANO, M. T.; CAVALCANTI, I. F. A. A review of the Southern oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies. *Tellus*, v.36A, p.490-504, 1984.
- MARENGO, J. A.; HASTENRATH, S. Case studies of climatic events in Amazon basin. *Journal of Climate*, v.6, n.4, p.617-627. 1993.

MOLION, L.C.B, BERNARDO, S.O. Uma Revisão da Dinâmica das Chuvas no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

MOLION. Aquecimento Global, El Niños, Manchas Solares, Vulcões e Oscilação Decadal do Pacífico. 1997.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of SST, wind stress and rainfall over the tropical Atlantic and South America. *Journal of Climate*, v.9, p.2464-2479. 1996.

OLIVEIRA, D. N. Praia de Alter do Chão no período de enchente. 2009. Disponível em: <<http://www.>>. Acesso em <http://vicenteadeodato.blogspot.com/2009/04/praias-eleitas-mais-linda-do-brasil-e-de.html>.

PEREIRA, M. **Praia de Alter do Chão no período de seca**. 2009. Disponível em: <<http://www.>>. Acesso em <http://belezamacoronga.blogspot.com/2009/09/santarem-para-brasil-amazonia.html>.

QUADRO, M. F. L. *Estudo de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul*. 1994, 123f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São Paulo. 1994.

RAPHAEL, L. A. Localização do município de Santarém 2006. Disponível em: <<http://www.>>. Acesso em http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Para_Municip_Santarem.svg

ROCHA, H. R.; NOBRE, C. A.; BARROS, M. C. Variabilidade natural de longo prazo no ciclo hidrológico da Amazônia. *Climanálise – Boletim de Monitoramento e Análise Climática*, v.4, n.12, p.36-42. 1989.

SILVA, V. B. S. et al. An improved gridded historical daily precipitation analysis for Brazil. *Journal of Hydrometeorology*, v.8, p.847-861. 2007.

SOUSA, E. P. P. *Relações entre as anomalias de TSM do Atlântico e Pacífico e as precipitações na Amazônia oriental*. 2004. 80f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São Paulo, 2004.

SOUZA, E. B. et al. On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960-1998. *Acta Amazônica*, v.30, n.2, p.305-318. 2000.

SOUZA, E. B. *Um estudo observacional sobre o padrão do dipolo de anomalias de TSM no Oceano Atlântico Tropical*. 1997. 110f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São Paulo, 1997.

TRENBERTH K. E. The definition of the El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**. V. 78, 1997.

TRENBERTH, K. E. The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.78, n.12, p.2771-2777. 1997.

WALISER, D. E.; GAUTIER, C. A satellite-derived climatology of the ITCZ. *Journal of Climate*, v.6, n.11, p.2162-2174. 1993. longwave radiation. *Journal of Climate*, v.11, p.137-164. 1998.