



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS
EMBRAPA - UFPA - MPEG**

PATRÍCIA MALCHER CHAVES

**ESTUDO OBSERVACIONAL SOBRE OS EVENTOS DE SECA METEOROLÓGICA
E HIDROLÓGICA NA REGIÃO DE MARABÁ-PA NO SUDESTE DA AMAZÔNIA
ORIENTAL**

BELÉM – PARÁ

2011

PATRÍCIA MALCHER CHAVES

**ESTUDO OBSERVACIONAL SOBRE OS EVENTOS DE SECA METEOROLÓGICA
E HIDROLÓGICA NA REGIÃO DE MARABÁ-PA NO SUDESTE DA AMAZÔNIA
ORIENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi, Embrapa Amazônia Oriental, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Física do Clima.

Orientador: Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza.

BELÉM-PARÁ

2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

C512e Chaves, Patrícia Malcher

Estudo observacional sobre os eventos de seca meteorológica e hidrológica na região de Marabá-Pa no sudeste da Amazônia Oriental / Patrícia Malcher Chaves; Orientador, Everaldo Barreiros de Souza. – 2011

72 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi e EMBRAPA, Belém, 2011.

1. Secas – Marabá (PA). 2. Dinâmica da atmosfera. 3. Pacífico equatorial. 4. Atlântico tropical. I. Souza, Everaldo Barreiros de, Orient. II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 20º ed.: 551.5773098115

PATRÍCIA MALCHER CHAVES

**ESTUDO OBSERVACIONAL SOBRE OS EVENTOS DE SECA METEOROLÓGICA
E HIDROLÓGICA NA REGIÃO DE MARABÁ-PA NO SUDESTE DA AMAZÔNIA
ORIENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi, Embrapa Amazônia Oriental, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

Data da aprovação:

Banca Examinadora:

Prof. Everaldo Barreiros de Souza - Orientador
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará - UFPA

Profa. Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo - Membro
Doutora em Agronomia
Museu Paraense Emílio Goeldi - MPEG

Prof. Edson José Paulino da Rocha - Membro
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará - UFPA

Dr. José Maria Brabo Alves – Membro Externo
Doutor em Engenharia Civil – Recursos Hídricos
Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME

Ao meu amado esposo Jonas Chaves,
por toda compreensão, dedicação e carinho.

AGRADECIMENTOS

O trabalho a seguir é fruto de um processo que contou com a colaboração de várias pessoas, sem as quais a sua execução não seria viável. Reservou-se este espaço para agradecer a algumas delas.

Agradeço primeiramente ao meu Deus, pelo seu amor e pela sua fidelidade em cumprir todas as promessas feitas a mim. Sem a sua boa mão, certamente não conseguiria chegar aqui. Obrigado Senhor.

Quero deixar registrada toda a minha gratidão e amizade ao meu orientador e Professor Dr. Everaldo Barreiros, pela orientação maravilhosa concedida a mim, por todo seu conhecimento científico compartilhado. Jamais vou esquecer-me de sua ajuda.

Aos meus pais Pedro e Arlene Costa, pelo amor e por todo incentivo que recebi durante a realização desse trabalho.

Ao meu adorável esposo e eterno namorado Jonas Chaves, pelo seu amor, carinho e acima de tudo pela compreensão que teve comigo nos momentos em que estive ausente.

Ao corpo docente do Programa de Pós – Graduação em Ciências Ambientais, pelos conhecimentos repassados através das disciplinas.

À FAPESPA através da parceria com a VALE, pela concessão da bolsa de Mestrado (através do edital 021/2009).

Aos membros da banca, Prof. Edson José Paulino da Rocha, Prof^a. Lurdes Ruivo e ao Dr. José Maria Brabo Alves, pela disponibilidade e contribuição neste trabalho.

À Rede Estadual de Previsão Climática e Hidrometeorológica do Pará (RPCH), pela concessão de dados e pela estrutura física para realizar este trabalho.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a Agência Nacional de Águas (ANA) pelo fornecimento dos dados.

À turma de Mestrado de 2009, por todo companheirismo e pelos conhecimentos repassados. Adorei está com vocês durante esses anos.

Aos meus amigos, Iraneide Silva, Helen Cunha, Elane Lemos, Antonio e Gleyciano Teixeira, por todos os conhecimentos compartilhados, por todo carinho e amizade que construímos durante esses anos. Valeu!

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, ficam meus sinceros agradecimentos.

O Tempo da colheita

Eu creio na promessa de Deus pra mim
Tudo que me prometeu ele irá cumprir
Já contemplo sua benção bem perto de mim
Passe o tempo que passar eu já vejo a minha benção chegar

Chegou o tempo da colheita pra mim
Não paro eu só quero agora seguir
Chegou uma nova história a marca de Jesus sobre mim.

(Edna Mark's)

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi investigar os aspectos observacionais dos eventos de seca meteorológica e hidrológica na região de Marabá localizada no sudeste do Pará na Amazônia oriental. Utilizou-se uma base de dados mensais de precipitação e cota no período de 1971 a 2010. Os eventos de seca meteorológica foram selecionados através de índices de precipitação negativa (segundo a metodologia do índice de anomalia de chuva- IAC) e os eventos de seca hidrológica do rio Tocantins foram baseados em índices extremos de cota fluviométrica abaixo do normal (através da metodologia da anomalia padronizada). Para as condições de seca meteorológica, os eventos concentram-se em sua grande maioria nas categorias de seca Fraca (FRA) e Moderada (MOD), com maior frequência de seca FRA nos meses de Fevereiro (38%), Junho (37%) e Dezembro (34%), enquanto que a seca MOD é mais frequente em Agosto (39%), Setembro (42%) e Outubro (32%). Quanto aos eventos de seca hidrológica (cota fluviométrica abaixo do normal) do rio Tocantins, os resultados mostram que a ocorrência mensal dos eventos é aleatória e pode ser observado ao longo de todo ano, independente do mês ser de enchente ou vazante. A duração dos eventos não apresenta regularidade ao longo do período estudado. Quanto à estrutura dinâmica dos padrões oceânicos e atmosféricos de grande escala associados aos eventos de seca meteorológica e hidrológica observaram-se que os eventos estão relacionados com um padrão de aquecimento (El Niño) no Pacífico equatorial e condições de aquecimento no Atlântico tropical norte, cujas condições oceano-atmosféricas de grande escala propiciam a intensificação tanto do ramo descendente zonal da célula de Walker como do ramo descendente meridional da célula de Hadley, que induzem a inibição significativa da atividade convectiva, explicando consequentemente a ocorrência dos eventos de seca na região. Analisou-se também a relação entre os eventos de seca e o registro de focos de calor (queimadas) na região de Marabá, durante os anos de 2000 a 2009, sendo que a correlação em torno de 43% confirma a sinergia entre seca e queimada, ou seja, a floresta torna-se mais inflamável sob condições de déficit hídrico.

Palavras-chave: Seca. Dinâmica da atmosfera. Pacífico equatorial. Atlântico tropical. Marabá-PA.

ABSTRACT

The objective of the present work is to investigate observational aspects of the meteorological and hydrological drought in the region of Marabá located in the southeast of Pará in eastern Amazon. We used precipitation and river stream monthly data for the 1971 to 2010 period. The meteorological drought events were selected from categories of the negative values based on methodology of the precipitation anomaly index-IAC. The hydrological drought events were selected from fluviometric data below normal based on standardized anomaly index. For the meteorological drought conditions, the events are concentrated mostly in the categories of Weak drought (FRA) and Moderate (MOD), with higher frequency of FRA events in February (38%), June (37%) and December (34%), while the MOD events are more frequent in August (39%), September (42%) and October (32%). For the hydrological drought events of the Tocantins River, the results show that the monthly occurrence of events is random and can be observed throughout the year, so that the duration of the events present no regularity over the period studied. The dynamic structure associated with meteorological and hydrological drought are related to a large-scale pattern of El Niño in the equatorial Pacific and warmer conditions in the tropical north Atlantic, whose large-scale ocean-atmospheric conditions present intensification in both the atmospheric descending branch of the zonal Walker cell and meridional Hadley cell, which induce significant inhibition of tropical convective activity, thus explaining the occurrence of drought events in the region. Furthermore, it was analyzed the relationship between the drought events and vegetation fires (burning) points in the Marabá region during years 2000 to 2009, and the correlation of around 43% confirms the synergy between drought and fire, ie, the forest becomes more flammable under conditions of hydric deficit.

Key-Words: Drought. Atmospheric Dynamics. Equatorial Pacific. Tropical Atlantic Ocean. Marabá-PA.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Climatologia mensal (1961-1990) da precipitação pluviométrica da Amazônia. As cores no mapa indicam as subdivisões nos quadrantes noroeste, sudoeste, sudeste e nordeste para representar o ciclo pluviométrico anual.....	19
Figura 2. Esquemática da cadeia de fenômenos resultantes de um evento de seca e seus impactos.....	24
Figura 3. Área de estudo com destaque para a região de Marabá-PA dentro da sub-bacia do Tocantins Araguaia.....	28
Figura 4. Climatologia (média 1973-2010) da precipitação pluviométrica (mm) em Marabá para as médias a) mensais e b) sazonais.....	33
Figura 5. IAC estimado em Marabá durante os meses de Janeiro a Dezembro de 1973 a 2010.....	34
Figura 6. Frequência relativa (%) dos eventos de seca FRA, MOD e FOR observados em Marabá para: a) valores mensais e b) sazonais.....	36
Figura 7. Precipitação (mm) observada em Marabá para as composições dos eventos de seca fraca (FRA) e moderada (MOD) correspondentes as médias a) mensais e b) sazonais.....	37
Figura 8. Desvios percentuais (%) da precipitação observada em Marabá para as composições dos eventos de seca fraca (FRA) e moderada (MOD) correspondentes as médias a) mensais e b) sazonais.....	38
Figura 9. Desvio percentual (%) da precipitação para as composições dos eventos de seca fraca (FRA) nos meses de a) Jan, b) Fev, c) Mar, d) Abr, e) Mai, f) Jun, g) Jul, h) Ago, i) Set, j) Out, l) Nov e m) Dez. O contorno em verde mostra o domínio da sub-bacia do Tocantins/Araguaia, o quadrado verde destaca a região de Marabá e as linhas em azul indicam a drenagem dos rios principais. Foram plotados somente os desvios negativos de precipitação nos intervalos de -15, -30, -50 -70 e -90%.....	40
Figura 10. Desvio percentual (%) da precipitação para as composições dos eventos de seca moderada (MOD) nos meses de a) Jan, b) Fev, c) Mar, d) Abr, e) Mai, f) Jun, g) Jul, h) Ago, i) Set, j) Out, l) Nov e m) Dez. O contorno em verde mostra o domínio da	

sub-bacia do Tocantins/Araguaia, o quadrado verde destaca a região de Marabá e as linhas em azul indicam a drenagem dos rios principais. Foram plotados somente os desvios negativos de precipitação nos intervalos de -15, -30, -50 -70 e -90%.....	41
Figura 11. Composições sazonais associadas aos eventos de seca FRA no trimestre SON para a) circulação atmosférica zonal associada à célula de Walker, b) circulação atmosférica meridional associada à célula Hadley, c) anomalia de TSM (°C), d) anomalia de ROL (W/m ²).....	43
Figura 12. Idem a Figura 11, porém para o trimestre DJF.	44
Figura 13. Idem a Figura 11, porém para o trimestre MAM.	45
Figura 14. Idem a Figura 11, porém para o trimestre JJA.	46
Figura 15. Composições sazonais associadas aos eventos de seca MOD no trimestre SON para a) circulação atmosférica zonal associada à célula de Walker, b) circulação atmosférica meridional associada à célula Hadley, c) anomalia de TSM, d) anomalia de ROL.	47
Figura 16. Idem a Figura 15, porém para o trimestre DJF.	48
Figura 17. Idem a Figura 15, porém para o trimestre MAM.	49
Figura 18. Idem a Figura 15, porém para o trimestre JJA.	50
Figura 19. Climatologia (média do período de 1971 a 2010) da cota fluviométrica (cm) do rio Tocantins em Marabá para os níveis máximos (azul) e mínimos (vermelho), correspondentes as: a) médias mensais e b) médias sazonais.	51
Figura 20. Médias sazonais da cota fluviométrica (cm) em Marabá para a) níveis máximos e b) mínimos durante o período de 1971/72 a 2009/10.	52
Figura 21. Frequência relativa (%) dos eventos com anomalia padronizada de cota fluviométrica menor do que -1 desvio padrão para: a) valores mensais e b) sazonais.....	56
Figura 22. Composições mensais da a) cota fluviométrica para os níveis máximos e mínimos, incluindo as médias climatológicas; e b) anomalias padronizadas da cota máxima e mínima.	57

Figura 23. Desvio percentual (%) da precipitação para as composições dos eventos extremos mensais de cota abaixo do normal para os meses de a) Out, b) Nov, c) Dez, d) Jan, e) Fev, f) Mar, g) Abr, h) Mai, i) Jun, j) Jul, l) Ago e m) Set. O contorno em verde mostra o domínio da sub-bacia do Tocantins/Araguaia, o quadrado verde destaca a região de Marabá e as linhas em azul indicam a drenagem dos rios principais. Foram plotados somente os desvios negativos de precipitação nos intervalos de -15, -30, -50 - 70 e -90%.....	59
Figura 24. Composições sazonais associadas aos eventos extremos de cota fluviométrica abaixo do normal no trimestre SON para a) circulação atmosférica zonal associada à célula de Walker, b) circulação atmosférica meridional associada à célula Hadley, c) anomalia de TSM (°C), d) anomalia de ROL (W/m ²).....	61
Figura 25. Idem a Figura 24, porém para o trimestre DJF.	62
Figura 26. Idem a Figura 24, porém para o trimestre MAM.	63
Figura 27. Idem a Figura 24, porém para o trimestre JJA.	64
Figura 28. Totais anuais de focos de queimadas (linha preta) estimados pelo INPE e números de eventos de seca FRA, MOD e FOR (linha cinza) mensais registrados na região de Marabá, durante os anos de 2000 a 2009.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação dos eventos de precipitação de acordo com a intensidade do IAC	30
Tabela 2. Listagem dos eventos de seca obtidos pelo método do IAC para cada mês entre os anos de 1973 a 2011. As categorias do evento são fraca (FRA), moderada (MOD) e forte (FOR).	35
Tabela 3. Listagem dos eventos extremos de cota fluviométrica abaixo do normal registrado em Marabá considerando os níveis máximos.	54
Tabela 4. Listagem dos eventos extremos de cota fluviométrica abaixo do normal registrados em Marabá considerando os níveis mínimos.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas

AB – Alta da Bolívia

aTSM – Anomalia da Temperatura da Superfície do Mar

BMDI - Índice de Seca de Bhalme & Mooley

CPC – Climate Prediction Center

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CO₂ – Dióxido de Carbono

DJF – Dezembro, Janeiro e Fevereiro

ENOS - El Niño - Oscilação Sul

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

IAC - Índice de anomalia de chuva

JJA – Junho, Julho e Agosto

MAM – Março, Abril e Maio

MBMDI- Índice de seca de Bhalme & Mooley Modificado

NEB – Nordeste Brasileiro

NCEP - National Centers for Environmental Prediction

PDSI - Índice de Severidade de Seca de Palmer

PNM – Pressão ao Nível Médio do Mar

RPCH - Rede Estadual de Previsão Climática e Hidrometeorológica do Pará

ROL - Radiação de onda longa

SON – Setembro, Outubro e Novembro

SPI - Índice de Precipitação Padronizada

TSM - Temperatura da Superfície do Mar

ZCAS – Zona de convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	REGIME PLUVIOMÉTRICO DA AMAZÔNIA	18
2.2	INFLUÊNCIA DOS OCEANOS TROPICAIS NA PRECIPITAÇÃO AMAZÔNICA.....	21
2.3	SECA.....	21
2.4	MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DE SECA.....	24
3	MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	27
3.2	BASES DE DADOS	28
3.3	ÍNDICE DE ANOMALIA DE CHUVA (IAC)	29
3.4	ANOMALIA PADRONIZADA	30
3.5	COMPOSIÇÕES.....	31
4.	RESULTADOS	32
4.1	ANÁLISE OBSERVACIONAL DOS EVENTOS DE SECA METEOROLÓGICA EM MARABÁ.....	32
4.1.1	Climatologia da precipitação.....	32
4.1.2	Índice de anomalia de chuva (IAC)	33
4.1.3	Comportamento da precipitação regional nos eventos de seca	37
4.1.4	Padrões dinâmicos de grande escala associados aos eventos de seca.....	42
4.2	ESTUDO DO NÍVEL FLUVIOMÉTRICO EM MARABÁ: EVENTOS EXTREMOS ABAIXO DO NORMAL	51
4.2.1	Climatologia e variabilidade	51
4.2.2	Seleção dos eventos de seca hidrológica em Marabá.....	53
4.2.3	Comportamento da cota e precipitação regional.....	56
4.2.4	Padrões dinâmicos associados.....	60
4.3	IMPACTO DOS EVENTOS DE SECA NO ECOSISTEMA (QUEIMADAS).....	65
5.	CONCLUSÕES	66
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia contribui com duas regiões, onde se observam máximos de chuva anual de todo o território brasileiro: uma localizada na porção ocidental (noroeste do Amazonas) e outra na parte oriental (litoral do Amapá e Pará) (GUIMARÃES, 2007). Por causa disso, a grande maioria dos estudos climatológicos abordou análises observacionais da variabilidade pluviométrica interanual e sazonal, com ênfase aos períodos chuvosos.

Entretanto, a Bacia Amazônica também apresenta regime de estiagem ou de seca, caracterizados pela ocorrência de deficiência pluviométrica, tanto durante os meses mais chuvosos (de Dezembro a Maio), como principalmente durante os meses menos chuvosos (de Julho a Outubro) (DE SOUZA; AMBRIZZI, 2003).

O foco do presente trabalho é no estudo das secas. As secas fazem parte da variabilidade natural do clima e podem ser definidas como eventos de deficiência significativa de precipitação (seca meteorológica) por um período de tempo persistente que pode variar de semanas a meses. Em geral, os eventos de seca resultam em sérios impactos sócio-econômicos e ambientais e afetam especialmente as atividades agropecuárias e recursos hídricos, as quais são altamente dependentes do regime de chuvas.

No Brasil, o estudo das secas é mais aprofundado para a região do Nordeste Brasileiro (MOURA; SHUKLA, 1981; KUCHARSKI; HASTENRATH, 2008), sul-sudeste do Brasil (CAVALCANTI; SOUZA; KOUSKY, 2001; SANSIGOLO, 2004; BLAIN; BRUNINNI, 2007), sendo que as investigações científicas nessa temática especificamente para a Amazônia ainda são incipientes. Exceção foram os estudos de caso dos eventos extremos de seca registrados em 1926 (WILLIAMS; DALL'ANTONIA, 2005) e 2005 (MARENGO et al., 2008) na Amazônia.

A seca registrada na Amazônia em 2005 provocou impactos severos na população ribeirinha, em virtude do nível dos rios Solimões, Negro e Madeira terem atingido mínimos históricos, sendo considerado um dos eventos mais extremos dos últimos 100 anos na Amazônia ocidental, devido grande parte das cidades do Acre, Rondônia e Amazonas terem decretado estado de calamidade pública (MARENGO, 2008).

Eventos extremos, como a seca de 2005 registrada no oeste e sudoeste da Amazônia, num cenário futuro de mudança climática (induzido pelas altas emissões globais de gases do efeito estufa na atmosfera) podem se tornar mais frequentes (MARENGO, 2007). Sendo

assim, atualmente há uma preocupação mundial acerca dos prognósticos de clima futuro, os quais apontam aumento na frequência de eventos climáticos extremos (secas, inundações, por exemplo) em todo planeta, devido à problemática do aquecimento global e mudanças climáticas de acordo com o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007).

Em particular, para a Amazônia vários modelos globais e regionais indicam retração do ciclo anual da pluviometria com o período chuvoso mais curto e estação seca mais prolongada, com diminuição em torno de 30% na intensidade da chuva em toda bacia (MARENGO et al., 2009). Não há dúvidas de que a diminuição da precipitação, especialmente durante a estação seca (de Junho a Novembro), tal como foi registrado na seca de 2005, é potencialmente mais agravante (NIJSSEN et al., 2001), particularmente numa região altamente vulnerável do ponto de vista social e ambiental como é a Amazônia.

A Amazônia abriga a maior bacia hidrográfica do globo, sendo que a variabilidade fluviométrica (variação da cota/vazão dos rios, isto é, os períodos de enchente e vazante) é regulada primariamente pela variabilidade da precipitação pluviométrica (ROCHA, 2001). Em outras palavras, a chuva é a principal entrada de água no sistema hidrológico da Amazônia (SANTOS, 2008). A maioria das cidades amazônidas situa-se às margens dos rios, sendo que a ocorrência de secas meteorológicas/hidrológicas com eventos de vazante intensa nos rios proporcionam grandes transtornos nas atividades de transporte fluvial, pesca e produção agrícola (agricultura familiar), com sérios impactos sociais e econômicos.

Portanto, torna-se relevante o desenvolvimento de estudos observacionais que visam o melhor entendimento científico das causas e características regionais associadas às secas e estiagens na Amazônia. Este é o foco do presente trabalho, sendo que a abordagem será realizada particularmente para a região sudeste do Pará, com ênfase na cidade de Marabá-PA situado às margens do rio Tocantins. Esta região encontra-se inserida no conhecido 'arco do desmatamento' e as diversas formas de uso e ocupação da Terra (agricultura, pecuária, indústria madeireira, pólos industriais de siderurgia, etc) induziram uma explosão demográfica e urbanização intensa durante as últimas duas décadas.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é investigar os aspectos observacionais dos eventos de seca meteorológica (anomalias negativas de precipitação) e de seca hidrológica (eventos extremos de nível fluviométrico abaixo do normal) na região de Marabá-PA, sudeste da Amazônia oriental.

Os objetivos específicos são:

- a) Identificar e caracterizar os eventos de seca meteorológica em Marabá, baseado em índices de precipitação negativa, quantificando a frequência mensal e intensidade dos eventos, bem como o comportamento da precipitação regional e a estrutura dinâmica dos padrões oceânicos e atmosféricos associados;
- b) Identificar e caracterizar os eventos de seca hidrológica do rio Tocantins na região de Marabá, baseado em índices extremos de cota fluviométrica abaixo do normal, analisando a frequência mensal, comportamento da pluviometria regional, assim como a estrutura dinâmica dos padrões oceânicos e atmosféricos associados;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 REGIME PLUVIOMÉTRICO DA AMAZÔNIA

A característica intrínseca do clima da Amazônia é a presença de um amplo espectro de variações no tempo e espaço da atividade convectiva tropical (formação de nuvens) e da precipitação pluviométrica, as quais se tornam as variáveis climáticas mais importantes da região (DE SOUZA et al., 2009).

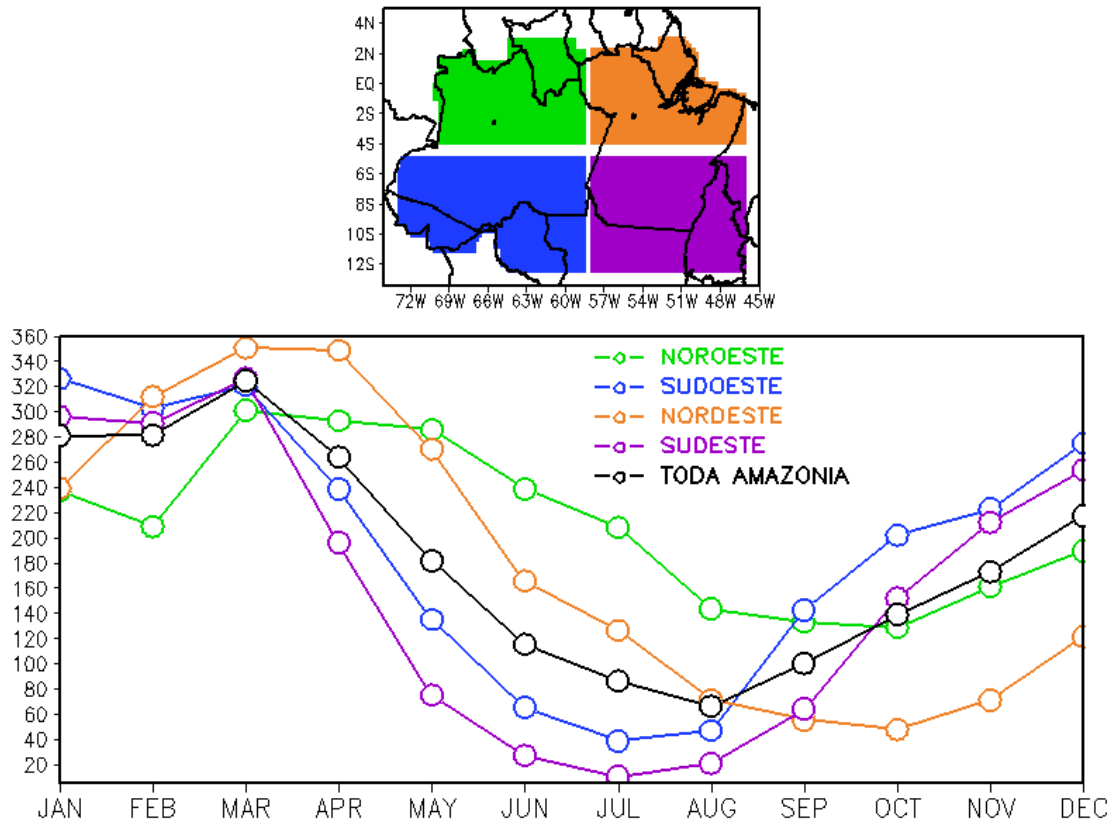
Do ponto de vista das estações sazonais no Hemisfério Sul, o regime de chuva da Amazônia exibe máximos anuais bem pronunciados durante os meses do verão (Dezembro, Janeiro e Fevereiro – DJF) e outono (Março, Abril e Maio – MAM), sendo que os mínimos anuais ocorrem durante os meses de inverno (Junho, Julho e Agosto – JJA) e primavera (Setembro, Outubro e Novembro – SON).

O regime pluviométrico da Amazônia não é homogêneo, apresentando alta variabilidade espacial e temporal condicionadas à interação de diferentes mecanismos ou sistemas atmosféricos. Isso pode ser visualizado na Figura 1 que mostra a climatologia mensal da precipitação durante o decorrer do ano considerando a Amazônia como um todo, bem como sua subdivisão nos setores (ou quadrantes) noroeste, sudoeste, nordeste e sudeste. Tipicamente, a região amazônica como um todo (ver linha preta, Figura 1) apresenta os meses mais chuvosos (levando-se em consideração o limiar de 200 mm) ocorrendo sequencialmente em Março, Fevereiro, Janeiro, Abril e Dezembro. Inversamente, os meses menos chuvosos (chuva abaixo de 150 mm) ocorrem sequencialmente em Agosto, Julho, Setembro, Junho e Outubro. Em geral, os meses de Maio e Novembro caracterizam o período de transição de uma estação a outra.

Algumas diferenças regionais são evidenciadas quando se analisa a evolução da chuva climatológica anual nos quadrantes da Amazônia. A região Noroeste (linha verde, Figura 1) não apresenta um período seco pronunciado ao longo do ano. Nas regiões Sudoeste e Sudeste (linhas azul e lilás, respectivamente, Figura 1) verifica-se o início da estação chuvosa entre os meses de Outubro e Novembro, além de uma mudança muito abrupta no final da estação chuvosa (de Abril para Maio). Na região Nordeste (linha laranja, Figura 1) observam-se os maiores valores de chuva mensal durante a estação chuvosa, que se estende

até Maio e Junho, sendo que o período seco se processa entre Agosto e Novembro, diferente das demais regiões.

Figura 1. Climatologia mensal (1961-1990) da precipitação pluviométrica da Amazônia. As cores no mapa indicam as subdivisões nos quadrantes noroeste, sudoeste, sudeste e nordeste para representar o ciclo pluviométrico anual.



Fonte: De Souza, Lopes e Azambuja (2009).

Durante os meses do verão (DJF), os máximos de chuva observados sobre a porção centro-sul da Amazônia (Acre, Rondônia, Tocantins, norte do Mato Grosso e centro-sul do Amazonas e Pará) são diretamente associados à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCAS forma uma banda de nebulosidade convectiva com orientação Noroeste/Sudeste desde a Amazônia até a região Sudeste do Brasil e Oceano Atlântico, e constitui-se no principal sistema meteorológico precipitante do verão brasileiro (DE SOUZA; AMBRIZZI, 2003). Neste período tem-se também a influência da Alta da Bolívia, a circulação atmosférica girando no sentido anti-horário nos altos níveis da troposfera (FIGUEROA et al., 1995).

Durante o outono (MAM), em decorrência da diminuição dos episódios de ZCAS, ocorre uma diminuição relativa da precipitação na parte sul/sudeste da Amazônia (DE SOUZA; AMBRIZZI, 2003). Em compensação, observa-se a intensificação e generalização da precipitação sobre a porção central e nordeste da Amazônia. Essa intensificação da precipitação deve-se a atuação direta da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) atingindo sua posição climatológica mais austral em março (NOBRE; SHUKLA, 1996; DE SOUZA; NOBRE, 1998), sendo, portanto, o principal sistema meteorológico indutor de chuva na Amazônia, durante o pico da estação chuvosa (DE SOUZA; ROCHA, 2006). Neste período, a precipitação também é favorecida pela formação da convecção tropical e a atuação de Linhas de Instabilidade, as quais induzem a formação de aglomerados convectivos de meso escala que resultam em grande variabilidade espacial das chuvas, ocasionando o surgimento de vários núcleos de elevada precipitação. As Linhas de Instabilidade se formam na região costeira, preferencialmente, no período da tarde, devido à circulação de brisa, deslocando-se, basicamente, de leste para oeste (COHEN et al., 1995).

Durante os períodos de inverno (JJA) e primavera (SON) a migração sazonal da ZCIT seguindo o deslocamento aparente do sol para o Hemisfério Norte, bem como a predominância do ramo descendente da circulação atmosférica de Hadley sobre a porção centro-sul da Amazônia impede a formação de nebulosidade convectiva profunda, resultando na ausência de chuva devido a sistemas de grande escala sobre a região (LOPES, 2009). Assim sendo, verifica-se forte redução na pluviometria ao longo da Amazônia, sendo que no centro-sul do Pará a diminuição pluviométrica é mais pronunciada em JJA, enquanto que na faixa leste e nordeste do Pará isto ocorre durante SON. Portanto, grande parte da região apresenta índices pluviométricos inferiores a 100 mm em média, caracterizando assim o período seco Amazônico. As chuvas do período seco, JJA e SON, associam-se a sistemas de meso escala, tais como aglomerados convectivos e Linhas de Instabilidade que promovem pancadas de chuva de forma isolada ao longo da região (FISCH et al., 1998).

A Amazônia abriga a maior bacia hidrográfica do globo, sendo que a variabilidade fluviométrica (variação da cota/vazão dos rios, isto é, os períodos regulares de enchente e vazante) é regulada primariamente pela variabilidade da precipitação pluviométrica (MARENGO; TOMASELLA; UVO, 1998; ROCHA, 2001). Em outras palavras, a chuva é a principal entrada de água no sistema hidrológico da Amazônia (SANTOS, 2008). Marengo (2005) analisou o ciclo hidrológico da Amazônia e reportou que, em geral, anos com

deficiência de precipitação associado a episódios de El Niño no Pacífico e um padrão de aquecimento/resfriamento anômalo sobre bacia norte/sul do Oceano Atlântico, resultam em níveis fluviométricos também deficientes sobre grande parte da bacia hidrográfica da Amazônia.

2.2 INFLUÊNCIA DOS OCEANOS TROPICAIS NA PRECIPITAÇÃO AMAZÔNICA

Considerando o contexto da dinâmica climática tropical, sabe-se que a variabilidade pluviométrica interanual 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 interhemisférico de anomalias de temperatura da superfície do mar (aTSM) sobre o Oceano Atlântico intertropical (NOBRE; SHUKLA, 1996; DE SOUZA et al., 2000). Através de mudanças significativas nos padrões da circulação atmosférica associados às células de Walker e de Hadley (DE SOUZA; KAYANO; AMBRIZZI, 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 regional de chuva na Amazônia.

As análises observacionais conduzidas por De Souza, Kayano e Ambrizzi (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**) em grande parte da Amazônia.

2.3 SECA

A seca é um fenômeno climático que afeta drasticamente uma região, além de provocar graves danos econômicos e sociais. Seca corresponde a uma característica temporária do clima de uma região, provocada pela ocorrência de precipitações pluviométricas abaixo da normal, por certo período de tempo, o que não deve ser confundido

com aridez que é uma característica permanente do clima, resultante de normais pluviométricas muito baixas.

Em geral as secas são designadas em função dos fatores naturais que as causam. Dentre outros, pode-se citar o clima da região, as distribuições espacial e temporal das precipitações, a capacidade de armazenamento de água pelo solo, as flutuações dos lençóis freáticos subterrâneos e a qualidade de água armazenada a superfície ou corrente, o que torna extremamente difícil a formulação de uma definição consensual de seca. A seca difere de outros desastres naturais por seu processo se dar de forma lenta e ter seu início e fim de difícil determinação. Por ser um processo lento, freqüentemente a seca não atrai a atenção da comunidade, persistindo seu impacto mesmo depois do término do evento. As secas normalmente atingem uma vasta extensão espacial e temporal (MOLINA; LIMA, 1999).

A seca é percebida de diferentes maneiras em regiões com características climáticas variadas e com diferentes níveis de utilização de água. Isso contribui de forma negativa para uma definição rigorosa de seca que seja aceita universalmente e de um modelo uniforme para abordagem de seu estudo (FERNANDES et al., 2009).

Porém, todos os estudos relacionam as secas com situações de escassez de água, resultado de precipitação deficiente, elevada evapotranspiração e demasiada exploração dos recursos hídricos ou de uma combinação destes parâmetros.

Existem várias maneiras de se definir seca, isso depende do tipo de estudo que está sendo realizado. Existem quatro tipos de secas (meteorológica, hidrológica, agrícola e socioeconômica), porém todas estão relacionadas com a deficiência de precipitação. Embora outros tipos de secas estejam sendo abordadas nesta revisão, para este estudo serão estudadas apenas as secas do tipo meteorológica (anomalias negativas de precipitação) e hidrológica (eventos extremos de nível do rio abaixo do normal).

Seca Meteorológica: A seca meteorológica é uma consequência do efeito de fenômenos atmosféricos na redução da pluviometria da região. Caracteriza-se pela falta de água induzida pelo desequilíbrio entre a precipitação e a evaporação, a qual depende de outros elementos como a velocidade do vento, temperatura, umidade do ar e insolação.

Seca hidrológica: As secas hidrológicas caracterizam-se quando os recursos hídricos de uma determinada região não são capazes de suprir adequadamente os seus usuários, configurando assim, uma situação de escassez em nível quantitativo. No contexto de uma

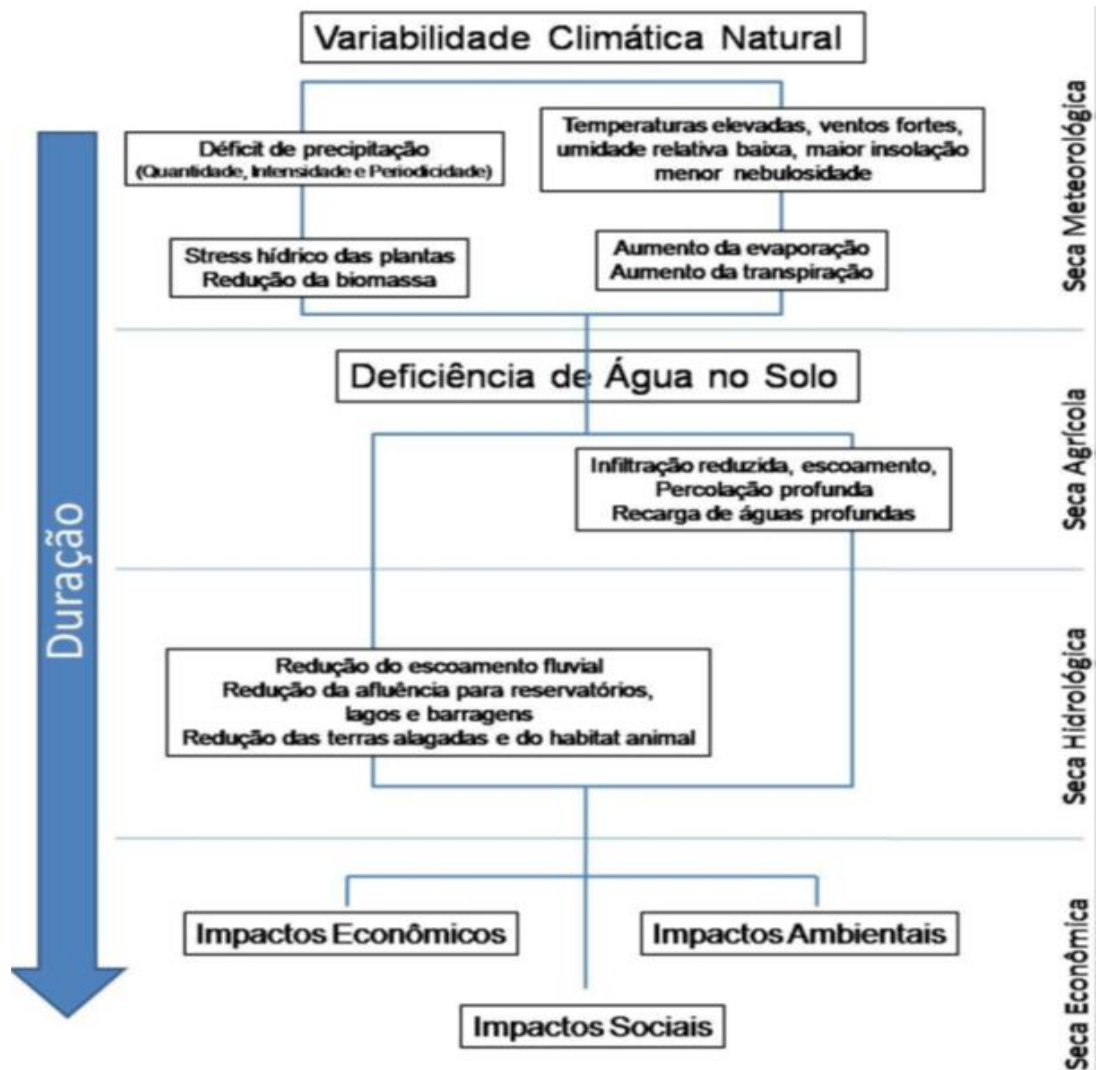
bacia hidrográfica densamente industrializada, com alta concentração de atividades industriais e diversidade de demanda pelo uso da água (incluindo a expansão urbana e agrícola), a ocorrência de um evento de seca hidrológica pode gerar graves desequilíbrios hidrológicos, sócio-econômicos e ambientais, levando ao surgimento de conflitos pelo uso da água (PIRES, 2003).

Seca Agrícola: As secas dos tipos meteorológica e hidrológica estão relacionadas diretamente aos impactos na agricultura, gerando assim, a seca agrícola. Esse tipo de seca relaciona-se basicamente à disponibilidade de água no solo para suprir o crescimento e desenvolvimento das plantas. A falta de umidade no solo junto à cultura pode afetar a germinação, o crescimento e o desenvolvimento da planta, afetando assim o rendimento final da cultura. A seca agrícola geralmente manifesta-se após a seca meteorológica, mas antes da seca hidrológica (PIRES, 2003).

Seca Socioeconômica: A seca socioeconômica está associada com o impacto desse fenômeno sobre as atividades humanas, entre esses, os impactos diretos e indiretos na produção agrícola e outras atividades econômicas. Esse fenômeno está relacionado quando o déficit de água induz a falta de bens ou serviços (energia elétrica, alimentos, entre outros) em razão de um volume de água insuficiente, causado pela má distribuição das chuvas, aumento no consumo, e também de uma má administração dos recursos hídricos.

A Figura 2 apresenta uma esquematização da possível evolução temporal na cadeia de fenômenos resultantes de uma seca, desde a seca meteorológica até a socioeconômica. Inicia-se com a seca meteorológica, a qual desencadeia uma série de eventos que resultam em uma seca agrícola e, mais tarde, em função da longa duração do período da seca, torna-se uma seca hidrológica com impactos na afluência para reservatórios e lagos. E por fim, ocorre a seca socioeconômica, ocasionando impactos nos setores sociais, ambientais e econômicos. A dimensão e a gravidade do problema são basicamente dependentes da extensão e da duração da seca meteorológica.

Figura 2. Esquematização da cadeia de fenômenos resultantes de um evento de seca e seus impactos.



Fonte: Fernandes et al. (2009), adaptado de Silva, Santo e Pires (2005).

2.4 MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DE SECA

Muitos índices têm sido desenvolvidos e adaptados com o objetivo de quantificar os aspectos climatológicos das secas. Dentre vários, os índices mais utilizados para avaliar eventos de seca são: Índice de Severidade de Seca de Palmer, Índice de Precipitação Padronizada, Índice de Seca de Bhalme & Mooley, Métodos dos Percentis e Índice de Anomalia de Chuva, os quais são sumarizados abaixo.

Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI): O índice de Palmer é um indicador de seca meteorológica. Esse índice deve ser calculado com base em uma série histórica de pelo menos trinta anos de dados de precipitação e outras variáveis. O PDSI é baseado na equação do balanço hídrico levando em consideração a evapotranspiração, escoamento e condições de água no solo. Esse índice varia de -4 e +4, com isso são estabelecidas as diversas classes do índice conforme a intensidade do PDSI. O uso desse índice para monitorar eventos de secas pode ter limitações, como por exemplo a estimativa da evapotranspiração potencial utilizando o método de Thornthwaite (que é uma aproximação), bem como a sensibilidade da capacidade de água no solo (que requer conhecimento das propriedades do solo).

Índice de Precipitação Padronizada (SPI): McKee, Doesken e Kleist, (1993) desenvolveram o SPI para monitorar o déficit de precipitação no armazenamento de água nos reservatórios, na umidade do solo, no escoamento dos rios e na água subterrânea. O SPI quantifica o déficit de precipitação para diversas escalas de tempo que evidencia o impacto da seca na disponibilidade de fontes de água. O cálculo do índice SPI para qualquer local é baseado no registro de precipitação de longo prazo ajustado a uma distribuição de probabilidade. Para o cálculo do SPI, deve-se utilizar uma base de dados de precipitação com pelo menos 30 anos, sendo ajustado por meio da distribuição gama, que posteriormente é transformada em uma distribuição normal (média zero e variância unitária). Neste índice a seca ocorre sempre que o valor do SPI é continuamente negativo, atingindo uma intensidade igual ou menor que menos um (-1,0) e a seca termina quando o valor do SPI se torna positivo. A classificação do índice é feita com base na intensidade do SPI, permitindo caracterizar não somente as secas, mas também os períodos mais úmidos. Esse índice tem a grande vantagem de padronizar a análise, permitindo comparar regiões distintas, como por exemplo regiões com climas mais úmidos e chuvosos com regiões mais áridas e secas.

Índice de Seca de Bhalme & Mooley (BMDI): Bhalme e Mooley (1980) encontraram alguns problemas ao aplicarem o PDSI para estudar as secas nas regiões tropicais da Índia, pois o mesmo não mostrou-se um bom indicador das condições de umidade, principalmente nos períodos secos. Com isso desenvolveram o BMDI, com a finalidade de avaliar a intensidade de seca utilizando apenas dados de precipitação. Os cálculos do BMDI e

do PDSI são semelhantes, com apenas algumas diferenças relacionadas à do parâmetro de umidade no algoritmo de Palmer por um índice bem mais simples de precipitação mensal.

Índice de Seca de Bhalme & Mooley Modificado (MBMDI): Este índice representa uma tentativa de melhoria e adaptação do índice BMDI às condições climáticas regionais. O cálculo do BMDI considera apenas a pluviometria, logo não é indicado para condições regionais. O índice de seca de Bhalme & Mooley modificado demonstrou uma sensível variação de umidade do solo e um bom desempenho na identificação dos períodos secos e úmidos, além disso, mostrou um bom desempenho no grau de severidade de seca (AZEVEDO; SILVA, 1995). A metodologia do MBMDI é a mesma que a do BMDI, quando refere-se a determinação de eventos de seca utilizando o índice de umidade acumulada, porém o MBMDI obtém-se o índice de umidade através do balanço hídrico.

Métodos dos Percentis: A técnica dos Quantis ou Percentis foi utilizada no trabalho pioneiro de Pinkayan (1966) apud Xavier; Silva; Rebello, (2002) que se destinava a avaliar a ocorrência de anos secos e chuvosos sobre extensas áreas continentais. Por outro lado, para o Nordeste brasileiro, Xavier (1999) empregou tal metodologia para tratar o problema da classificação e monitoração da ocorrência de anos secos e chuvosos no estado do Ceará.

Índice de Anomalia de Chuva (IAC): Rooy (1965) desenvolveu o IAC incorporando um procedimento de classificação do evento baseado na ordenação das magnitudes do índice. Pela comunidade científica o IAC é considerado simples pela sua facilidade em determinar as anomalias extremas de chuva (positivas e negativas). Vários estudos utilizaram a metodologia do IAC em regiões distintas, tais como para a bacia do rio Paraíba (ARAÚJO; MORAES NETO; SOUSA, 2009), Ceará (FREITAS, 2004 e 2005), bacia do Mundaú (SILVA, D. et al., 2007), rio São Francisco (GONÇALVES et al., 2006), Mato Grosso do Sul (SOUZA; ALBUQUERQUE; LOPES, 2006), dentre outras.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

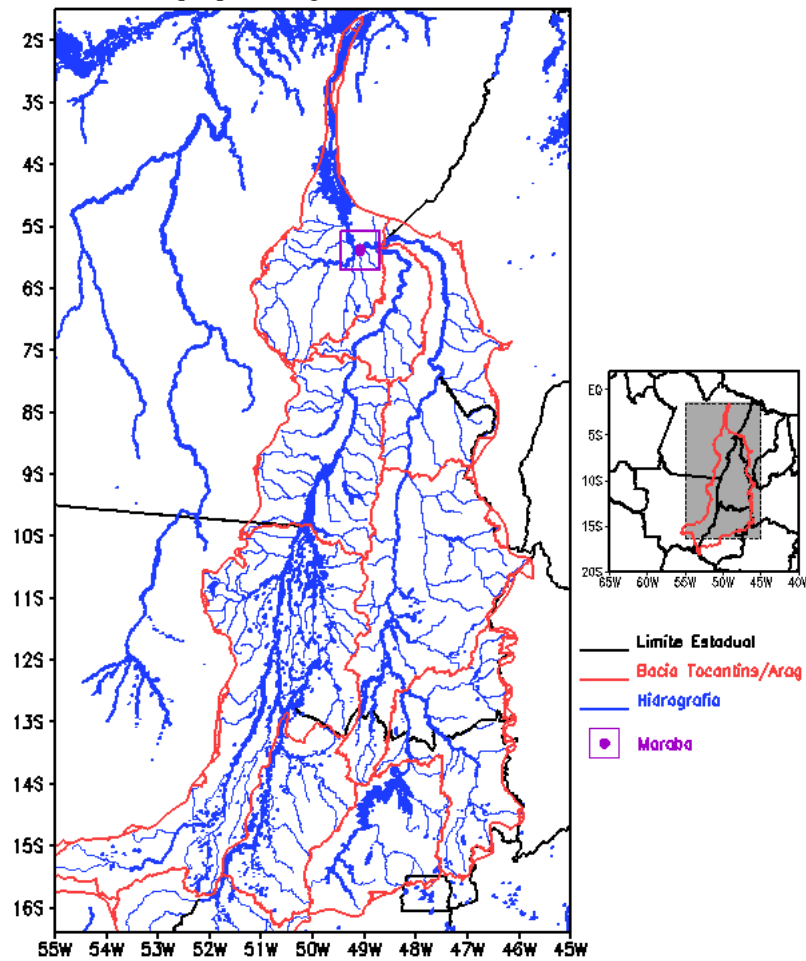
A Figura 3 mostra a região de estudo considerada no presente trabalho com destaque para a região de Marabá-PA (localização: latitude $-05^{\circ} 22'$ e longitude $-49,07'$) dentro da sub-bacia do Tocantins-Araguaia. A região de Marabá situada no sudeste do estado do Pará, à margem esquerda do rio Tocantins, é um município que abrange uma área de 15.157,90 Km² com uma população de 233.462 pessoas de acordo com o IBGE 2010.

A Região Hidrográfica dos Rios Tocantins e Araguaia é uma das mais extensas do território brasileiro e possui cerca de 921.000 km² (cerca de 11% do território nacional). Essa bacia abrange terras das regiões Centro-Oeste (parte do Distrito Federal, Goiás e Mato Grosso), Nordeste (parte do Maranhão) e Norte (Tocantins e parte do Pará), como mostra a Figura 3.

A Bacia Hidrográfica do Tocantins-Araguaia limita-se com bacias de alguns dos maiores rios do Brasil, ou seja, ao Sul com a do Paraná, a Oeste, com a do Xingu e a leste, com a do São Francisco e grande parte de sua área está na região Centro Oeste, desde as nascentes dos rios Araguaia e Tocantins até sua confluência, na divisa dos estados de Goiás, Maranhão e Pará (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA, 2006). Trata-se de uma região que vem sendo ocupada de forma mais intensa desde as décadas de 60 e 70 a partir da expansão da fronteira agropecuária. Sua localização e abundância de recursos naturais especialmente dos recursos hídricos conferem à região um caráter estratégico para o desenvolvimento do país. Além do avanço da atividade agropecuária e da exploração mineral, a região apresenta grande potencial para aproveitamento hidrelétrico e transporte hidroviário.

O clima predominante na região é o tropical, apresentando temperaturas médias anuais de 26°C. Apresenta dois períodos climáticos bem definidos: o chuvoso, que vai de Outubro a Abril representando aproximadamente 90% da precipitação, e o período seco, de Maio a Setembro, apresentando umidade relativa do ar muito baixa (ANA, 2006).

Figura 3. Área de estudo com destaque para a região de Marabá-PA dentro da sub-bacia do Tocantins Araguaia.



3.2 BASES DE DADOS

Esta pesquisa utilizou os dados pontuais do município de Marabá com a precipitação pluviométrica fornecida pela estação meteorológica do INMET e a cota do Rio Tocantins fornecida pela estação fluviométrica da ANA/ Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Ambos dados são mensais, sendo que a precipitação corresponde ao período de 1973 a 2010 e a cota ao período de 1971 a 2010.

Utilizaram-se também os dados em ponto de grade de precipitação obtidos do *Climate Prediction Center* (CPC) pertencente ao *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) dos EUA. Estes dados encontram-se documentados em Silva, V. 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, métodos e procedimentos metodológicos dos

dados do CPC podem ser encontrados em Silva, V. et al. (2007). Os dados do CPC no período de 1974 a 2010 serão usados para investigar o comportamento da precipitação regional no domínio espacial que engloba a região de Marabá.

Também foram utilizados dados de focos de calor (queimadas) no período de 2000 a 2009, com o propósito de investigar a relação entre eventos de secas e queimadas na região de Marabá. Esses dados são estimados via satélites pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e encontram-se disponíveis em (<http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas>).

Os dados atmosféricos e oceânicos usados para investigar os aspectos dinâmicos de grande escala foram:

- 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).
- Dados de vento (componentes u e v), Omega (velocidade vertical), pressão ao nível médio do mar (PNM) oriundos da reanálise NCEP/NCAR (KALNAY et al., 1996).

3.3 ÍNDICE DE ANOMALIA DE CHUVA (IAC)

O Índice de Anomalia de Chuva (IAC) foi desenvolvido por Rooy (1965) e incorpora um procedimento de classificação para ordenar magnitudes de anomalias de precipitações positivas e negativas. Esse índice é considerado muito simples, dada a sua facilidade de procedimento computacional, que consiste da determinação de anomalias extremas. Rooy (1965) descreve que o índice visa tornar o desvio da precipitação em relação à condição normal de diversas regiões passíveis de comparação. O cálculo do IAC é feito através das seguintes expressões:

$$IAC = 3 \left[\frac{(p-\bar{p})}{\bar{m}-\bar{p}} \right] \quad \text{ou} \quad IAC = -3 \left[\frac{(p-\bar{p})}{(\bar{x}-\bar{p})} \right]$$

Sendo que:

p = Precipitação observada (mm);

\bar{p} = Precipitação climatológica média (mm);

\bar{m} = Representa a média histórica dos dez valores mais altos;

\bar{x} = Representa a média histórica dos dez valores mais baixos;

A Tabela 1 mostra a classificação do IAC, cuja intensidade permite atribuir à intensidade do evento que pode variar de uma condição extremamente úmida até uma condição de seca severa. Para o escopo do presente trabalho, utilizaremos somente as categorias de seca fraca, moderada, forte e severa obtidas pela aplicação do IAC nos dados de precipitação mensal de Marabá.

Tabela 1. Classificação dos eventos de precipitação de acordo com a intensidade do IAC

Intensidade do IAC	Classificação
≥ 4	Extremamente úmido
3 a 3,99	Umidade alta
2 a 2,99	Umidade moderada
0,5 a 1,99	Umidade baixa
-0,49 a 0,49	Normal
-1,99 a -0,5	Seca fraca
-2 a -2,99	Seca moderada
-3 a -3,99	Seca forte
≤ -4	Seca severa

3.4 ANOMALIA PADRONIZADA

Aplicou-se o cálculo da anomalia padronizada ou normalizada nos dados mensais de cota do rio em Marabá, com o objetivo de selecionar os eventos extremos de nível do rio abaixo do normal. A anomalia padronizada é dada pela expressão:

$$AP = \frac{(q-\bar{q})}{\sigma}$$

Sendo q a cota em um determinado mês, \bar{q} e σ são as respectivas climatologias e desvio padrão referentes ao período de 1971 a 2010.

Os valores da AP oscilam entre -4 e +4 desvios padrões. Para o presente estudo os eventos extremos de cota abaixo do normal foram definidos pela ocorrência do $AP \leq -1$ desvio padrão, de tal forma a selecionar somente os eventos que realmente encontram-se fora do padrão de variabilidade considerado normal.

3.5 COMPOSIÇÕES

A técnica de composições, que representa uma média de vários eventos selecionados por um critério objetivo, é útil para se investigar os padrões médios associados a um determinado fenômeno recorrente.

De posse dos eventos de seca, selecionados pelo IAC aplicado nos dados mensais de precipitação de Marabá, foram montadas composições mensais para avaliar o comportamento da precipitação regional e dos padrões dinâmicos (variáveis atmosféricas e oceânicas) associados.

Similarmente, de posse dos eventos extremos de nível do rio abaixo do normal, selecionados pela AP aplicada nos dados mensais de cota em Marabá, foram construídas as composições mensais para se investigar a evolução dos padrões regionais de precipitação e das características dinâmicas de grande escala associadas.

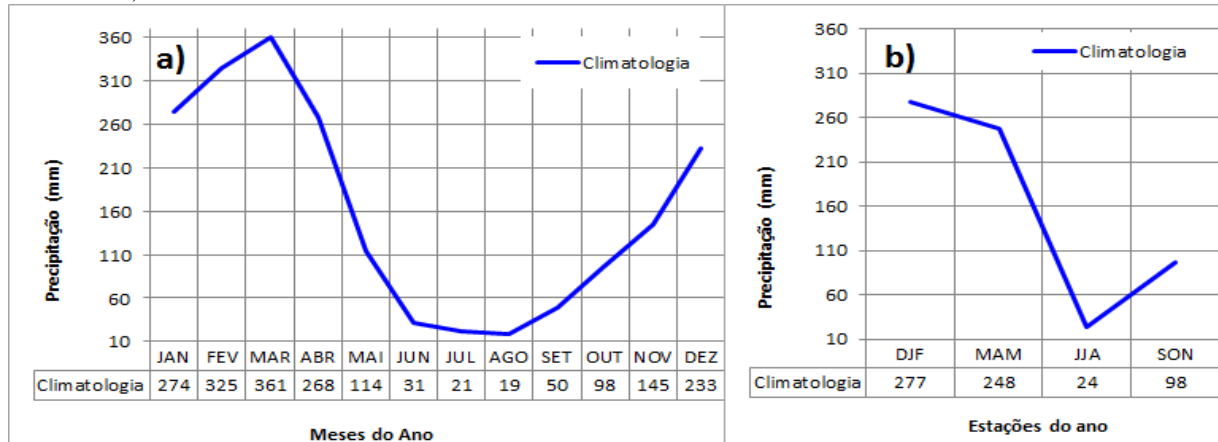
4. RESULTADOS

4.1 ANÁLISE OBSERVACIONAL DOS EVENTOS DE SECA METEOROLÓGICA EM MARABÁ

4.1.1 Climatologia da precipitação

A climatologia da precipitação pluviométrica em Marabá foi obtida tomando-se a média do período de 1973 a 2010, ou seja, os aspectos climatológicos referem-se à média dos últimos 38 anos. A Figura 4 mostra a evolução da precipitação pluviométrica, em mm, considerando as médias mensais e sazonais para a região de Marabá. Na Figura 4a verifica-se que a partir do mês de Setembro os volumes mensais de precipitação começam a aumentar progressivamente até atingir o valor máximo anual no mês de Março. A precipitação sobe de 50 mm em Setembro para 361 mm em Março. Depois desse pico, verifica-se uma transição brusca e rápida com a diminuição dos volumes mensais de precipitação iniciando em Abril (268 mm) e atingindo o valor mínimo anual em Agosto, com 19 mm. Nas médias sazonais, nota-se claramente que o trimestre mais chuvoso ocorre no verão (DJF) com média de 277 mm, seguido do período de outono (MAM) com 248 mm. No inverno (JJA) tem-se o trimestre mais seco do ano com média de 24 mm e em seguida a transição para a primavera (SON) com 98 mm. Portanto, evidencia-se nas médias climatológicas mensais e sazonais que a região de Marabá apresenta sazonalidade de precipitação bastante acentuada com ciclo anual bem definido, sendo que o período chuvoso, volume de chuva acima de 200 mm, ocorrendo entre os meses de Dezembro a Abril e período seco, volume de chuva abaixo de 100 mm, durante os meses de Junho a Outubro. Maio caracteriza-se pela transição do período chuvoso para o seco e Novembro a transição do período seco para o chuvoso.

Figura 4. Climatologia (média 1973-2010) da precipitação pluviométrica (mm) em Marabá para as médias a) mensais e b) sazonais.



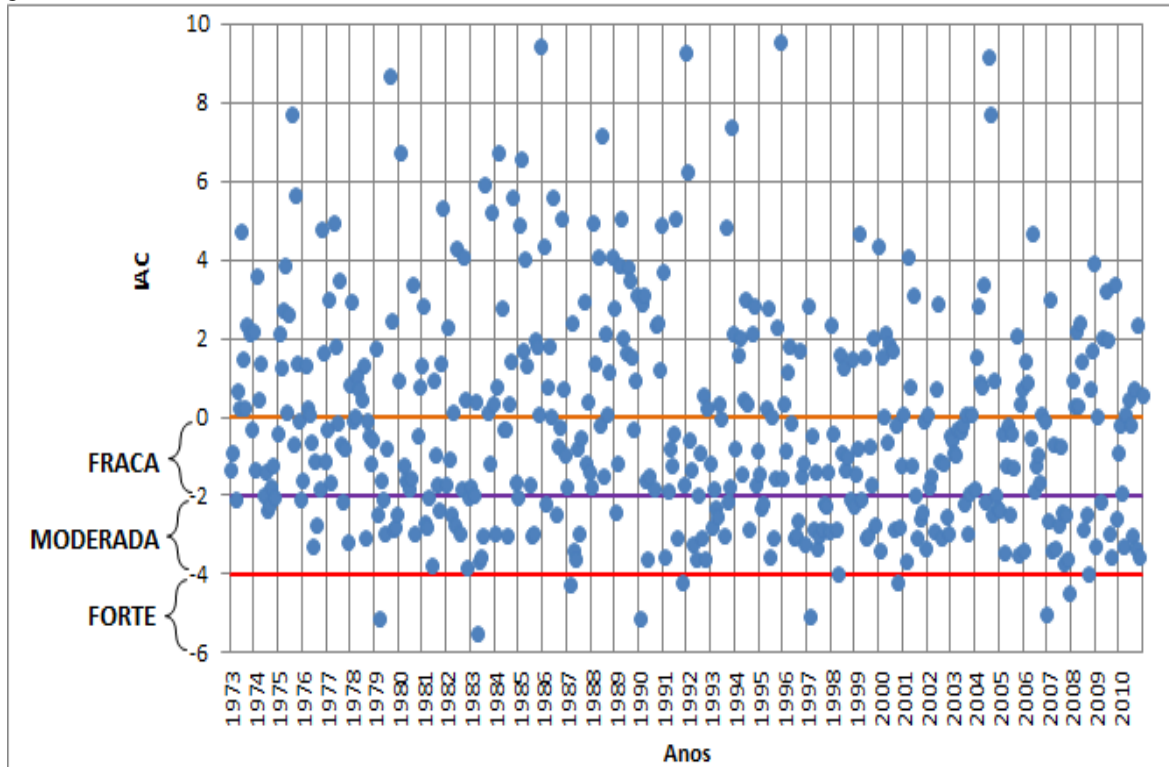
4.1.2 Índice de anomalia de chuva (IAC)

A aplicação da metodologia do IAC nos dados mensais de precipitação de Marabá resultou na série temporal mostrada na Figura 5, sendo que os eventos de seca classificados como fraca – FRA (índices entre 0 e -2), moderada – MOD (índices entre -2 e -4) e forte – FOR (índice menor do que -4) foram selecionados entre o período de 1973 a 2010.

Na Figura 5 nota-se grande variabilidade temporal do IAC no período estudado, com valores oscilando entre índices positivos e negativos, independente do período do ano. Em particular, os índices negativos, que indicam a ocorrência de precipitação abaixo do normal, concentram-se em sua grande maioria nas categorias de seca FRA e MOD. Eventos de seca FOR são bem esporádicos, conforme ilustra a Figura 5.

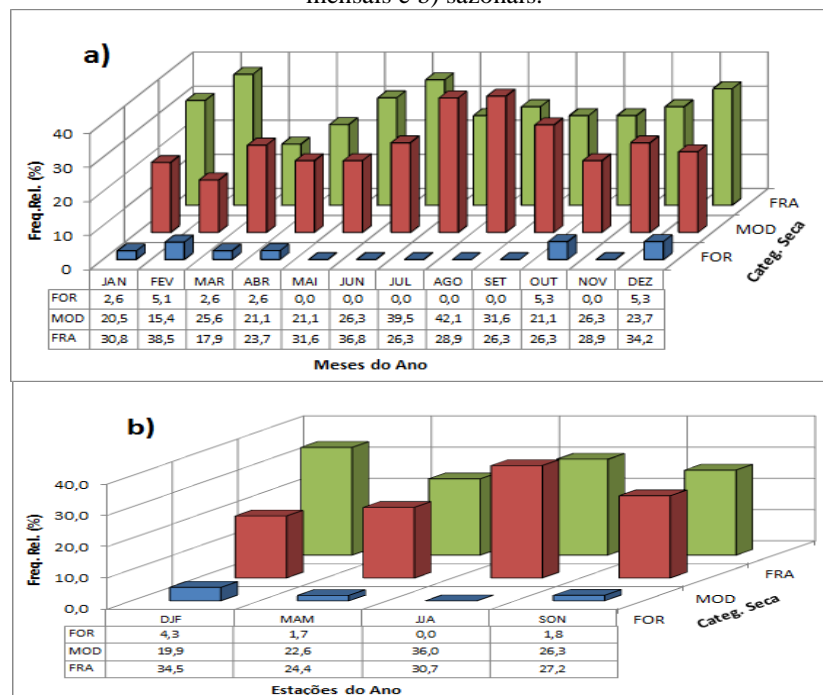
Na Tabela 2 enumeram-se os meses de ocorrência dos eventos de seca nas categorias FRA, MOD e FOR em que o critério objetivo da intensidade do IAC foi atingido, durante o período de 1973 a 2010. Tais eventos de seca FRA e MOD serão usados para montar as composições observacionais e investigar o comportamento da precipitação regional, bem como os padrões dinâmicos oceano-atmosfera associados. Em virtude dos eventos de seca FOR serem isolados em diferentes meses de alguns anos, não é possível conduzir um estudo aprofundado.

Figura 5. IAC estimado em Marabá durante os meses de Janeiro a Dezembro de 1973 a 2010.



Na Figura 6 observa-se a frequência relativa dos eventos de seca ocorridos na região de Marabá para cada mês do ano. A Figura 6a mostra que na categoria seca forte (FOR) os meses com maior frequência foram os meses de Fevereiro, Outubro e Dezembro, com pouco mais de 5% de ocorrência em cada mês. Nos meses de Maio, Junho, Julho, Agosto e Setembro não ocorreram eventos de seca FOR. É interessante notar que os meses que não apresentaram eventos de seca forte, representam os meses em que o índice pluviométrico é muito baixo do ponto de vista da climatologia. Na Figura 6a, nota-se uma grande variabilidade mensal nas categorias de seca moderada (MOD) e fraca (FRA) ao longo do ano. Na categoria de seca FRA os meses de maior frequência são Fevereiro com 38,5%, Junho com 36,8 % e Dezembro com 34,2%. Na categoria de seca MOD observam-se frequências máximas nos meses de Junho, Agosto e Setembro com percentagens de 39,5%, 42,1% e 31,6%, respectivamente. O mês de menor frequência de seca FRA é Março com 17,9% e o mês de menor frequência de seca MOD é Fevereiro com 15,4%. Em termos das médias sazonais, verifica-se que os eventos de seca FRA são mais frequentes no trimestre de DJF com 34,5% e em JJA com 30,7%. Os eventos de seca MOD apresentam maior frequência trimestral no período de JJA (36%) e nos outros trimestres a diferença é pequena.

Figura 6. Frequência relativa (%) dos eventos de seca FRA, MOD e FOR observados em Marabá para: a) valores mensais e b) sazonais.

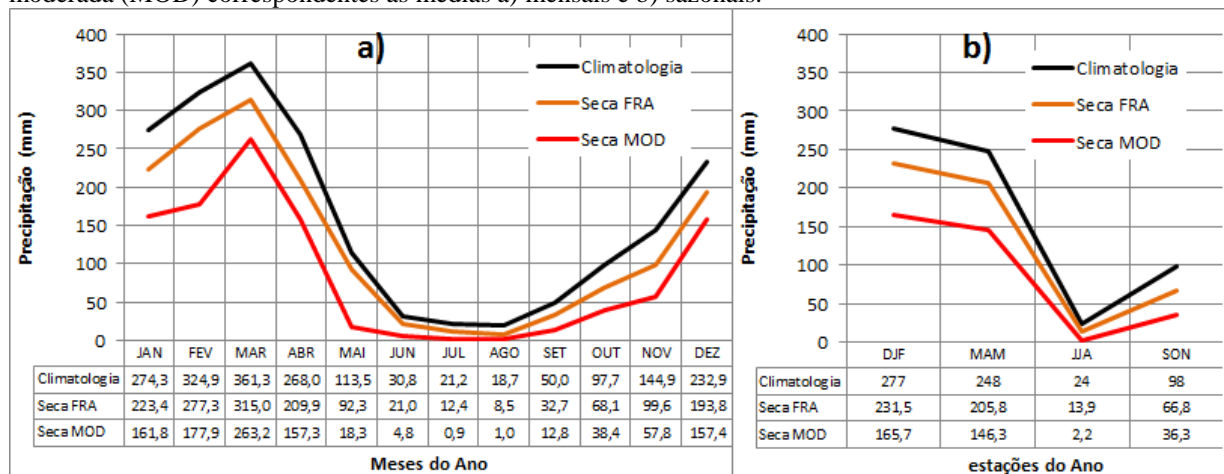


4.1.3 Comportamento da precipitação regional nos eventos de seca

Baseado nas composições dos eventos de seca nas categorias FRA e MOD, conforme listagem na Tabela 2, investigou-se o comportamento mensal da precipitação em Marabá associado à média de todos os eventos selecionados.

Na Figura 7a tem-se o comportamento mensal da precipitação associada aos eventos de seca FRA e MOD, comparados aos valores médios climatológicos ao longo do ano. Visualmente, evidencia-se a ocorrência de precipitação sistematicamente abaixo da média em todos os meses do ano na região de Marabá. Esse padrão de chuva deficitária também é claramente perceptível nas médias sazonais mostradas na Figura 7b, sendo que a diferença entre o volume de chuva média climatológica e a precipitação dos eventos de seca FRA e MOD é maior nos período de DJF e MAM.

Figura 7. Precipitação (mm) observada em Marabá para as composições dos eventos de seca fraca (FRA) e moderada (MOD) correspondentes as médias a) mensais e b) sazonais.



A Figura 8 mostra a quantificação em termos percentuais de quanto à chuva diminui em Marabá, em relação à média climatológica, durante os eventos de seca FRA e MOD. Comparativamente, os desvios negativos (precipitação abaixo da média climatológica) são claramente mais impactantes para os eventos de seca MOD, principalmente nos meses de Maio a Agosto.

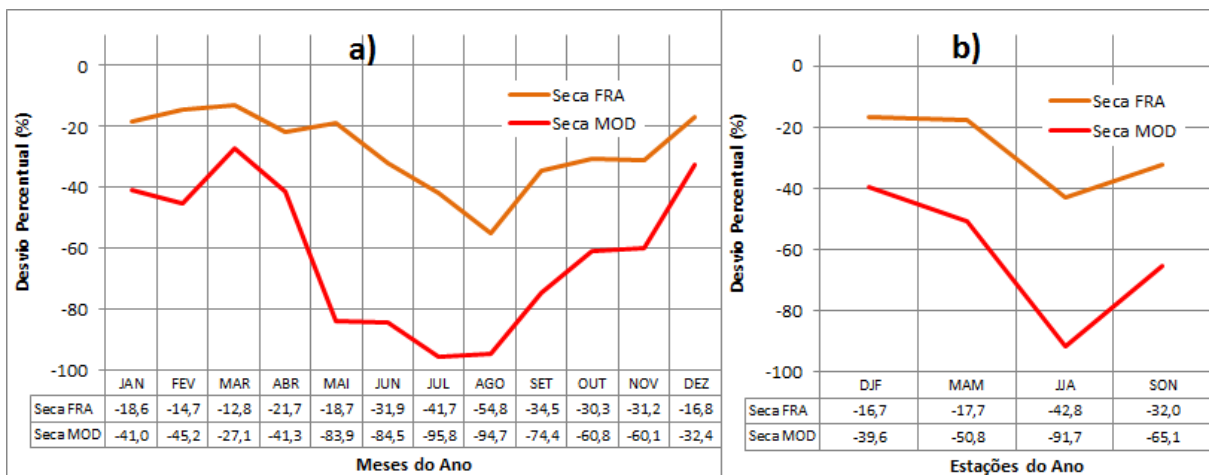
Considerando os eventos de seca FRA, observa-se que a diminuição de chuva com desvios negativos oscila em torno dos 20% durante os meses Janeiro a Maio. Os meses de Junho, Julho e Agosto caracterizam-se como os meses de maior impacto da seca com desvios

negativos em torno de -31 a -54%. Portanto, para os episódios de seca FRA, Agosto é o pior mês no que se refere ao déficit de chuva em Marabá. De Setembro a Dezembro os desvios percentuais negativos de precipitação variam de -34% a -16% (Figura 8a).

Por outro lado, os desvios negativos de precipitação associados aos eventos de seca MOD oscilam em torno de -40% nos meses de Janeiro a Abril, com subsequente declínio intenso para valores de aproximadamente -80% a -95% de diminuição de chuva durante os meses de Maio a Agosto. Os valores mais críticos de precipitação deficitária ocorrem nos meses de Julho e Agosto, com diminuição em torno de 95% na precipitação mensal. A partir de Setembro, os desvios negativos passam a apresentar -74% até o mês de Dezembro com -32% (Figura 8a).

No que concerne aos desvios negativos de precipitação considerando as médias sazonais (Figura 8b), verifica-se claramente que no trimestre de JJA os valores são mais expressivos com redução de chuva em torno de 40% para eventos de seca FRA e de 90% para os eventos de seca MOD. Em DJF e MAM, a diminuição pluviométrica é em torno de 17% nas secas FRA e de 40 a 50% nas secas MOD. Em SON a chuva diminui em torno de 30% nas secas FRA e de -65% nas secas MOD.

Figura 8. Desvios percentuais (%) da precipitação observada em Marabá para as composições dos eventos de seca fraca (FRA) e moderada (MOD) correspondentes as médias a) mensais e b) sazonais.



Com o objetivo de se investigar a extensão espacial dos eventos de seca registrados na região de Marabá, analisam-se as Figuras 9 e 10 com a distribuição espacial dos desvios percentuais de precipitação para cada mês do ano, correspondentes as composições dos

eventos de seca FRA e MOD, respectivamente. Em geral, observa-se consistência entre os resultados da distribuição espacial dos desvios de precipitação (Figuras 9 e 10) e os valores pontuais de desvios de chuva em Marabá (Figura 8) na indicação de que os meses mais críticos ocorrem em Junho, Julho e Agosto.

Nos eventos de seca FRA, os desvios negativos de precipitação oscilam entre -15% e -30% na região próxima a Marabá, abrangendo parte do leste do Pará e norte do Tocantins, durante os meses de Janeiro a Março (Figura 9a, 9b, 9c). Nestas mesmas regiões, os desvios negativos atingem valores entre -30 e -50% nos meses de Abril e Maio (Figura 9d e 9e). Nos meses de Junho, Julho e Agosto, os desvios pluviométricos se intensificam para valores entre -70 e -90% e atingem áreas espaciais maiores que abrangem o sul-sudeste do Pará e praticamente todo o estado do Tocantins (Figura 9f, 9g, 9h). Em Setembro, a área com desvio negativo entre -50 e -70% fica restrita ao sul do Pará (Figura 9i). No restante dos meses, de Outubro a Dezembro, os desvios negativos na região de Marabá são da ordem de -15 e -30% (Figura 9j, 9l, 9m).

Similarmente, porém, para os eventos de seca MOD (Figura 10), observa-se em geral uma intensificação e generalização dos desvios negativos de precipitação na região sul-sudeste do Pará e maior parte do Tocantins. De Janeiro a Abril, os desvios negativos de chuva oscilam entre -15 e -50% (Figura 10a, 10b, 10c, 10d). Maio, Junho, Julho e Agosto são caracterizados como os meses de maior impacto negativos das secas MOD, com praticamente toda a bacia do Tocantins apresentando déficit pluviométrico significativo, em torno de -70 e -90% (Figura 10e, 10f, 10g, 10h). Nos meses subsequentes, de Setembro a Dezembro, os desvios voltam a diminuir para valores entre -30 e -50% de chuva abaixo da média climatológica (Figura 10i, 10j, 10l, 10). Portanto, os episódios de secas MOD registradas em Marabá se estendem por toda o estado do Tocantins e sul-sudeste do Pará.

Figura 9. Desvio percentual (%) da precipitação para as composições dos eventos de seca fraca (FRA) nos meses de a) Jan, b) Fev, c) Mar, d) Abr, e) Mai, f) Jun, g) Jul, h) Ago, i) Set, j) Out, l) Nov e m) Dez. O contorno em verde mostra o domínio da sub-bacia do Tocantins/Araguaia, o quadrado verde destaca a região de Marabá e as linhas em azul indicam a drenagem dos rios principais. Foram plotados somente os desvios negativos de precipitação nos intervalos de -15, -30, -50 -70 e -90%.

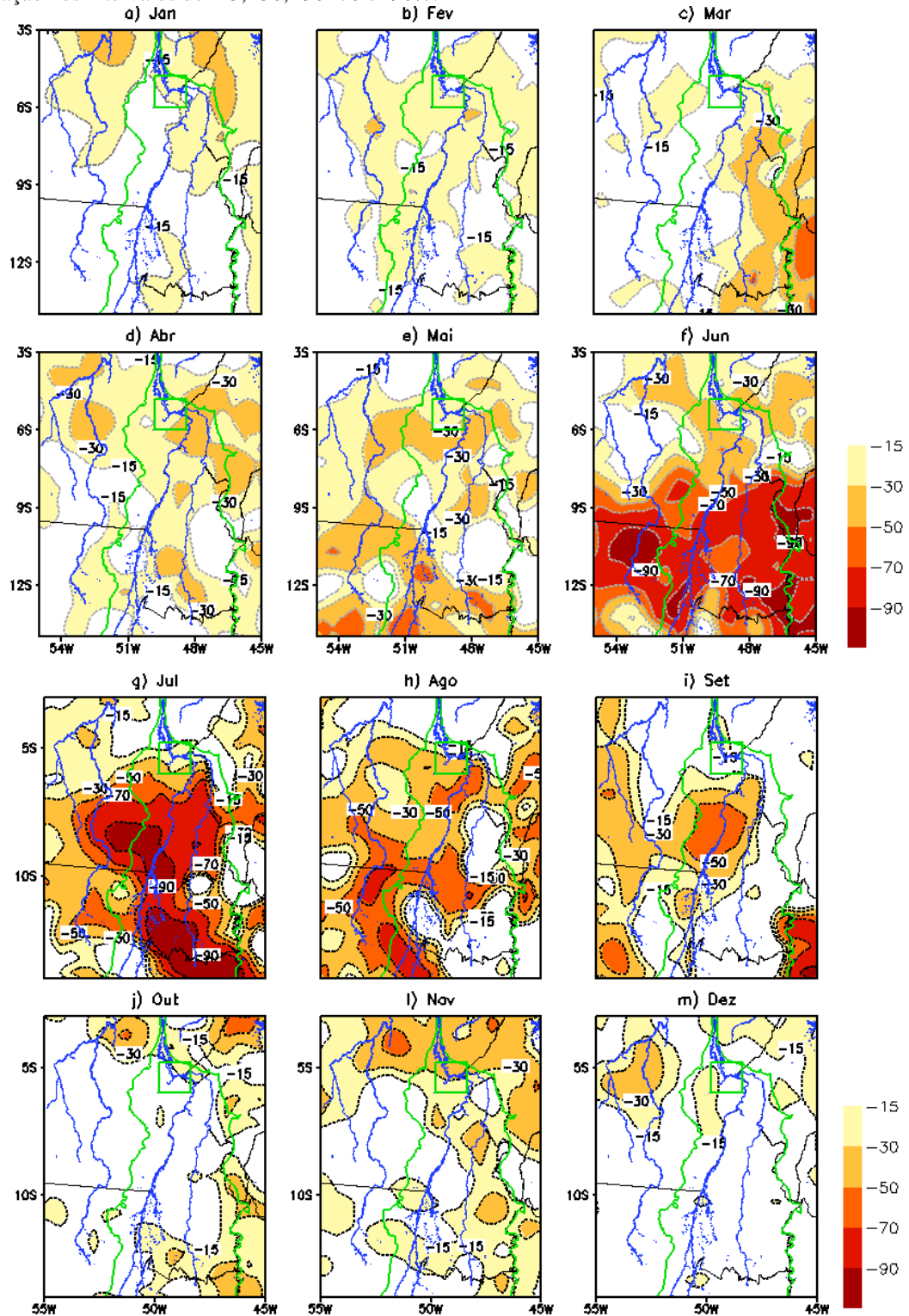
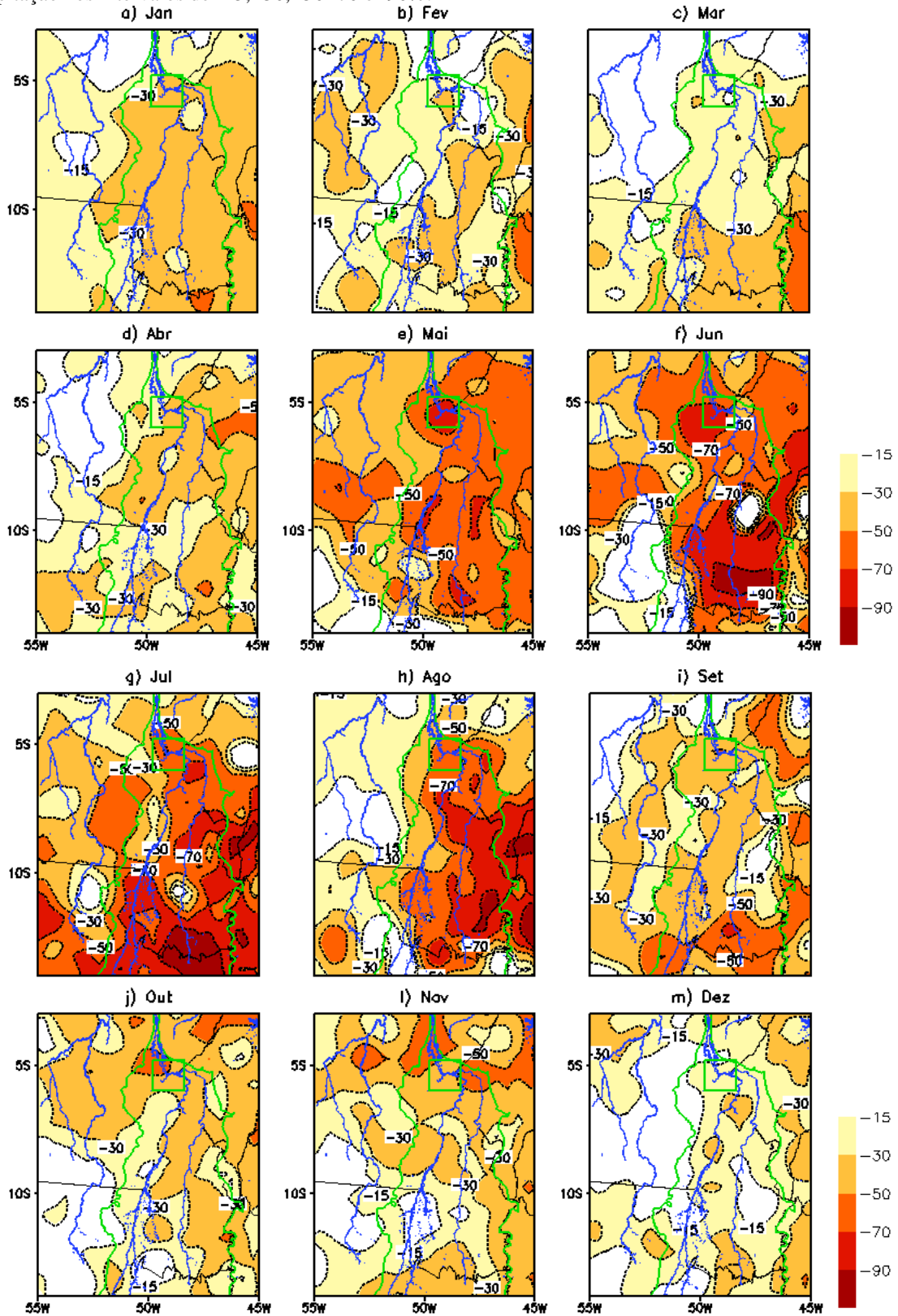


Figura 10. Desvio percentual (%) da precipitação para as composições dos eventos de seca moderada (MOD) nos meses de a) Jan, b) Fev, c) Mar, d) Abr, e) Mai, f) Jun, g) Jul, h) Ago, i) Set, j) Out, l) Nov e m) Dez. O contorno em verde mostra o domínio da sub-bacia do Tocantins/Araguaia, o quadrado verde destaca a região de Marabá e as linhas em azul indicam a drenagem dos rios principais. Foram plotados somente os desvios negativos de precipitação nos intervalos de -15, -30, -50 -70 e -90%.

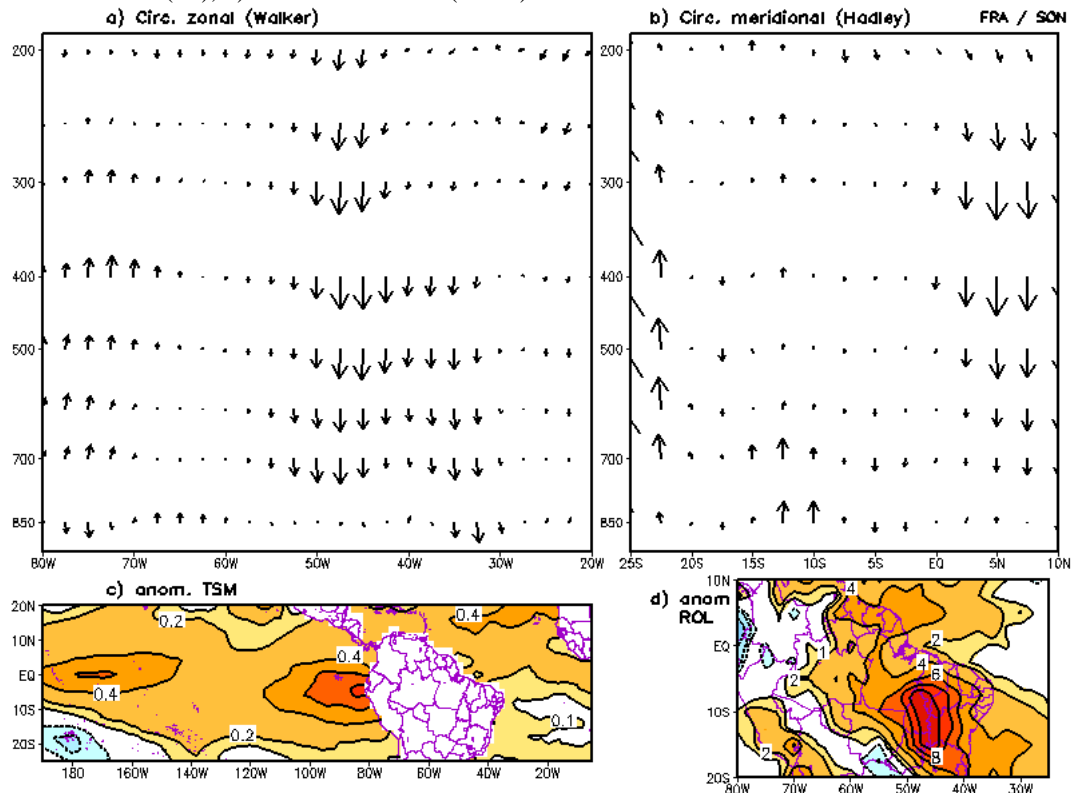


4.1.4 Padrões dinâmicos de grande escala associados aos eventos de seca

Com o objetivo de descrever a estrutura dinâmica dos padrões oceânicos e atmosféricos de grande escala, associados aos eventos de seca FRA e MOD registrado na região de Marabá, foram montadas e analisadas os mapas das composições sazonais dos padrões anômalos de TSM sobre as bacias do Pacífico e Atlântico, das anomalias de ROL que indicam o padrão de convecção tropical, bem como da circulação atmosférica de Walker (no plano zonal, longitude x altura) e de Hadley (no plano meridional, latitude x altura).

Com respeito aos eventos de seca FRA no período de SON, observa-se que a diminuição de chuva na região de Marabá associa-se a um padrão de aquecimento anômalo, ou seja, presença de anomalias positivas de TSM, na bacia tropical do Oceano Pacífico, principalmente no setor central em torno de 180° - 160° W e também no setor leste entre 100° e 80° W, próximo à costa oeste da América do Sul. Esse aquecimento no Pacífico assemelha-se a fase de formação dos episódios El Niño (Figura 11c). No Oceano Atlântico, o padrão observado mostra a presença de anomalias positivas de TSM na bacia norte (Figura 11c). O corte vertical da circulação atmosférica no plano zonal, longitude x altura em níveis de pressão, da célula de Walker mostra a manifestação de uma grande área de anomalias de ar descendente (vetor de cima para baixo) em toda a coluna troposférica sobre a porção equatorial da Amazônia, entre 80° e 40° W (Figura 11a). Na secção vertical da circulação atmosférica no plano meridional, latitude x altura em níveis de pressão, da célula de Hadley percebe-se que a subsidência é restrita na baixa troposfera sobre região entre o Equador e 5° S (Figura 11b). A configuração das anomalias positivas de ROL indica uma grande área de inibição de convecção tropical, associada à subsidência de grande escala, atingindo a região Nordeste do Brasil e Amazônia (Figura 11d), sendo que as anomalias são mais intensas no oeste da Bahia, Tocantins e sul do Pará.

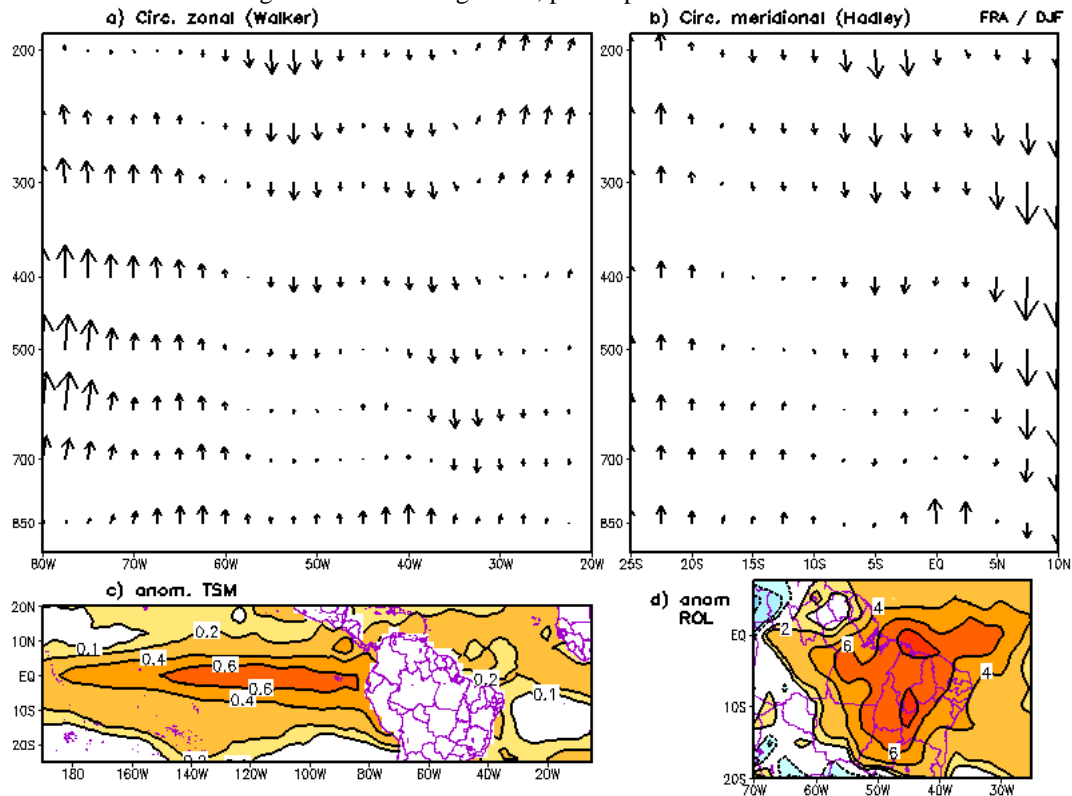
Figura 11. Composições sazonais associadas aos eventos de seca FRA no trimestre SON para a) circulação atmosférica zonal associada à célula de Walker, b) circulação atmosférica meridional associada à célula Hadley, c) anomalia de TSM ($^{\circ}\text{C}$), d) anomalia de ROL (W/m^2).



A estrutura dinâmica de grande escala associada aos eventos de seca FRA no período de DJF é ilustrada na Figura 12. Observa-se sobre a bacia tropical do Oceano Pacífico uma grande área contendo anomalias positivas de TSM (águas oceânicas mais quentes do que o normal), cuja configuração indica a manifestação do fenômeno El Niño na sua fase de maturação (Figura 12c). No Oceano Atlântico nota-se anomalias positivas de TSM em toda a bacia norte e anomalias neutras na bacia sul (Figura 12c). Embora não o padrão de anomalias de TSM não seja inverso entre as bacias norte e sul do Atlântico, ou seja, não percebe-se claramente a configuração de Dipolo, mesmo assim o gradiente térmico inter-hemisférico aponta para o Hemisfério Norte mantendo a condição desfavorável à descida da banda de convecção associada à ZCIT. Os padrões de circulação troposférica associada às células de Walker e de Hadley mostram anomalias descendentes na coluna vertical entre 700 e 200 hPa sobre a região da Amazônia (Figuras 12a, 12b). Esses padrões de ar anormalmente subsidentes associados ao El Niño relacionam-se a ocorrência de inibição da convecção na

Amazônia oriental e Nordeste do Brasil, indicadas pela grande área contendo anomalias positivas de ROL (Figura 12d).

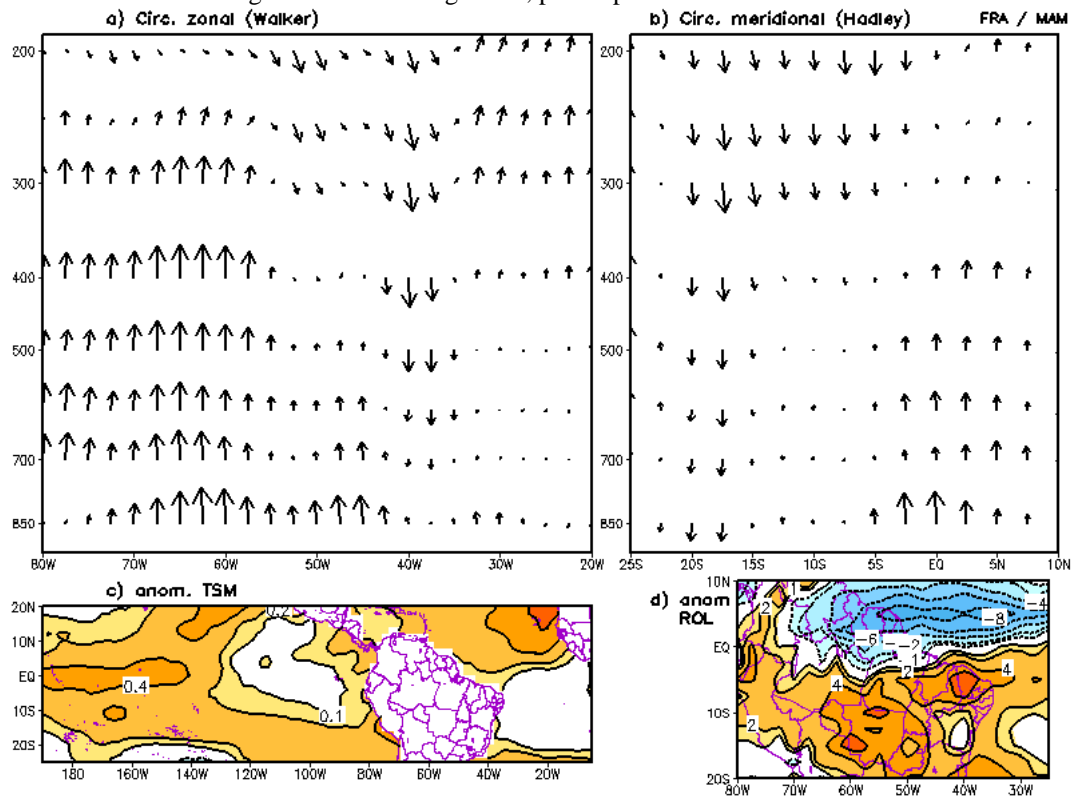
Figura 12. Idem a Figura 11, porém para o trimestre DJF.



A Figura 13 resume a estrutura dinâmica dos eventos de seca FRA no período de MAM. No Oceano Pacífico o padrão de aquecimento anômalo, ou seja anomalias positivas de TSM, ocorre na porção oeste da bacia, entre 180° e 140° W, indicando a fase de enfraquecimento dos episódios El Niño (Figura 13c). Por outro lado, não percebe-se claramente a configuração inversa do Dipolo no Atlântico intertropical, porém a presença de anomalias positivas de TSM na bacia norte e anomalias neutras na bacia sul associam-se a manifestação do gradiente térmico inter-hemisférico apontado para o Atlântico Norte. Tais características mantêm a atuação da convecção associada à ZCIT sobre o Atlântico equatorial norte, conforme mostra as anomalias de ROL (Figura 13d) com a banda zonal de anomalias negativas de ROL relacionada a posição da ZCIT influenciando apenas o norte do Pará e Amapá. Na secção vertical da célula de Walker tem-se a predominância de anomalias ascendentes na coluna troposférica sobre o Pacífico oeste (coincidente com as águas anomalmente quentes) e a subsidência compensatória ocorrendo na coluna vertical sobre a

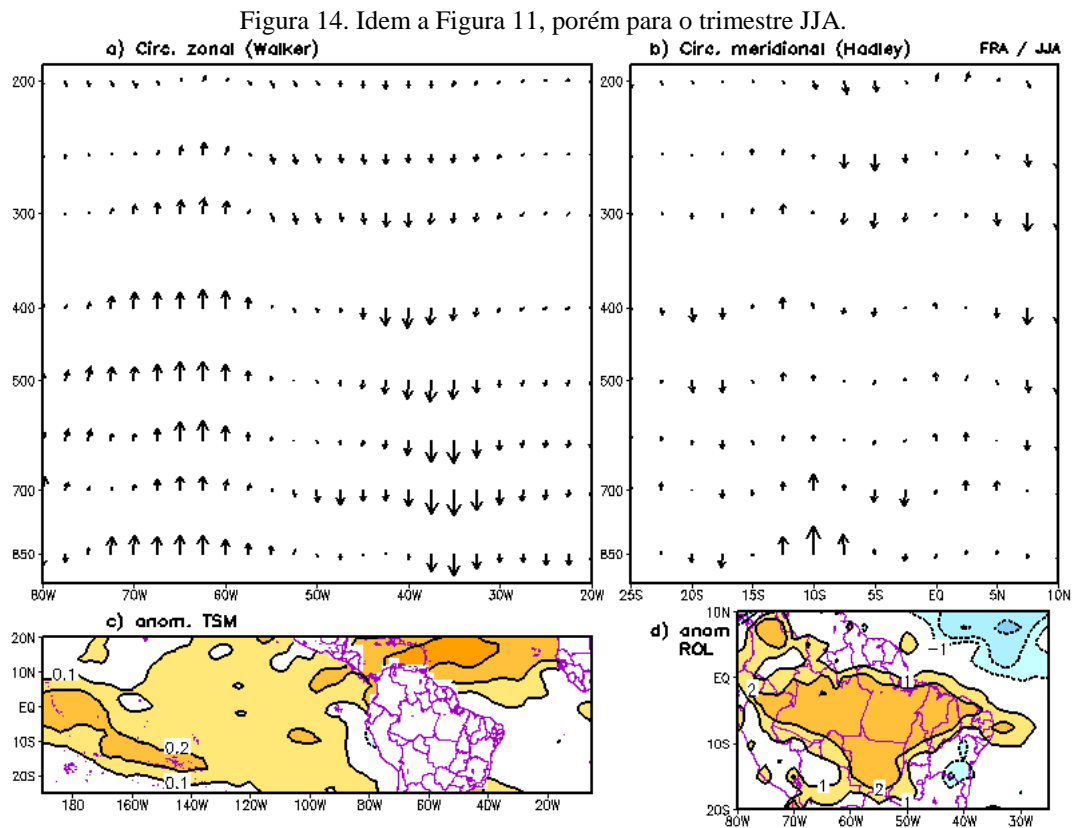
Amazônia oriental, centrada em 40°W (Figura 13a). A secção vertical da célula de Hadley também mostra anomalias de vento descendente sobre a Amazônia e anomalias ascendente na região equatorial e Atlântico norte (Figura 13b). Tais padrões anômalo induzem no setor sul da Amazônia e Nordeste a presença de anomalias positivas de ROL indicando ausência de formação de nuvens convectivas e explica a falta de chuva relacionada aos eventos de seca FRA em Marabá.

Figura 13. Idem a Figura 11, porém para o trimestre MAM.



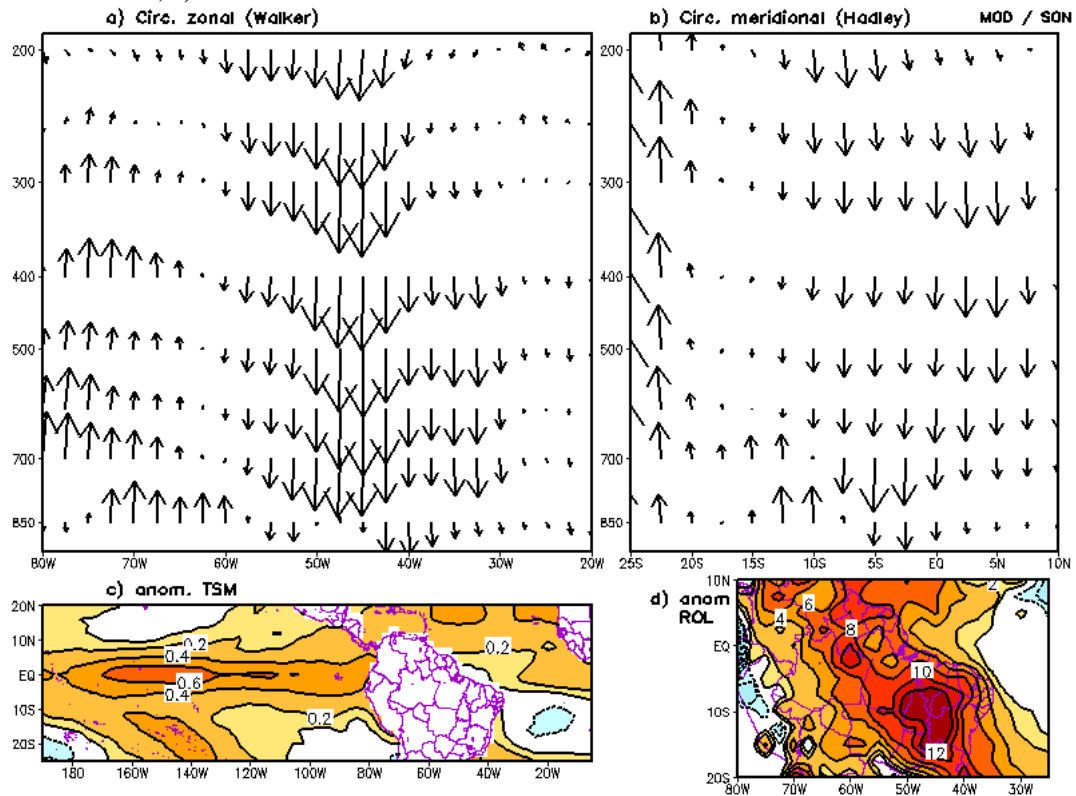
Os padrões dinâmicos de grande escala associados aos eventos de seca FRA no trimestre de JJA mostram um padrão de TSM levemente mais quente do que o normal sobre o Oceano Pacífico tropical, anomalias de TSM com fraca intensidade, indicando que não há a presença do fenômeno El Niño (Figura 14c). No Oceano Atlântico as anomalias são claramente mais intensas, com a predominância de anomalias positivas de TSM na bacia norte, enquanto que a bacia sul do Atlântico predominam condições em torno do normal (Figura 14c). Em termos da circulação troposférica, nota-se no plano da célula de Walker uma grande área contendo anomalias de vento descendente atingindo toda a coluna vertical sobre a Amazônia e Nordeste do Brasil (Figura 14a). A célula de Hadley não possui uma

configuração de anomalias descendentes restritas a coluna centrada entre 0 e 5°S (Figura 14b). Tais padrões associam-se a presença de uma grande área contendo anomalias positivas de ROL, ou seja, inibição da convecção tropical, em toda a bacia Amazônica (Figura 14d).



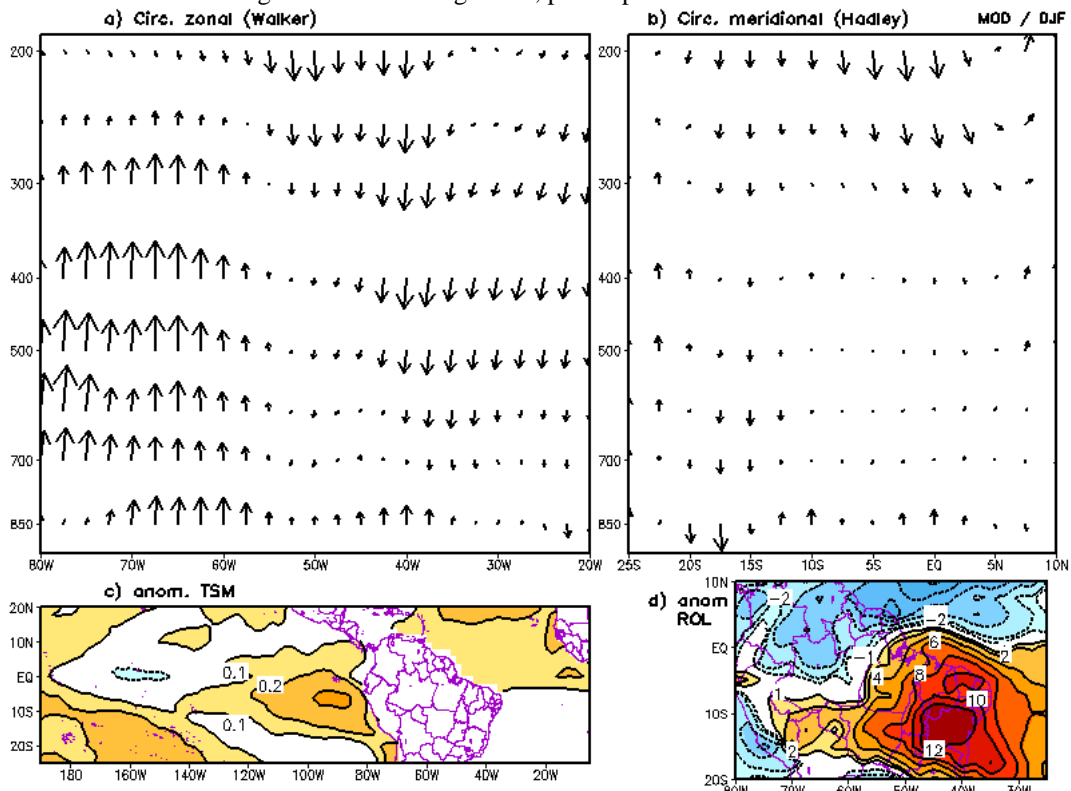
Com relação aos aspectos dinâmicos de grande escala nos eventos de seca MOD durante o período de SON (Figura 15), observa-se claramente a presença das características associadas ao fenômeno El Niño sobre o Pacífico, anomalias positivas de TSM cobrindo toda a bacia equatorial, já na sua fase de maturação (Figura 15c). No Oceano Atlântico percebe-se a predominância de anomalias positivas de TSM na bacia norte, enquanto na bacia sul observam-se anomalias negativas de TSM (Figura 15c). Ambas as seções verticais de circulação de Walker e de Hadley mostram a predominância de ramo atmosférico anormalmente descendente sobre a Amazônia (Figura 15a, 15b). Tais padrões são fortemente inibidores para a formação de convecção tropical sobre a Amazônia, conforme mostra a Figura 15d com a presença de uma grande área contendo anomalias positivas de ROL englobando toda a porção tropical do Brasil.

Figura 15. Composições sazonais associadas aos eventos de seca MOD no trimestre SON para a) circulação atmosférica zonal associada à célula de Walker, b) circulação atmosférica meridional associada à célula Hadley, c) anomalia de TSM, d) anomalia de ROL.



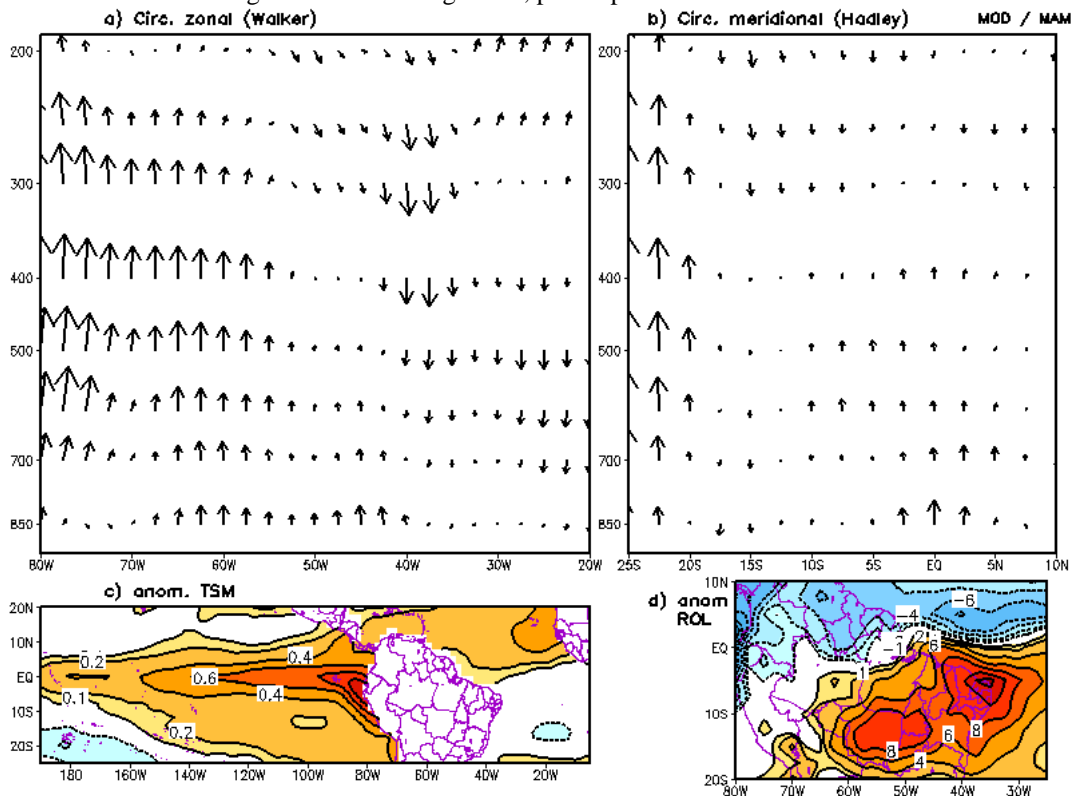
A Figura 16 ilustra as características dinâmicas associadas aos eventos de seca MOD registrados em Marabá durante o trimestre DJF. No Oceano Pacífico, as anomalias positivas de TSM indicam a presença do El Niño com padrão de aquecimento anômalo ocorrendo principalmente no setor leste da bacia, entre 120° e 80° W (Figura 16c). No Oceano Atlântico persiste a presença de aquecimento anômalo, TSM positivas, atingindo a maior parte da bacia norte, enquanto que na bacia sul predominam condições neutras (Figura 16c). O padrão de ar anormalmente subsidente na coluna troposférica sobre a Amazônia é mais perceptível na circulação de Walker (Figura 16a) do que na circulação de Hadley (Figura 16b). A configuração das anomalias de ROL mostra convecção acima do normal (anomalias negativas) associada à ZCIT influenciando o norte do Amapá e Atlântico norte, enquanto que na maior parte da Amazônia e Nordeste do Brasil predominam anomalias positivas de ROL indicando a inibição de nuvens convectivas, explicando assim a ocorrência de seca MOD, ou seja, precipitação anormalmente abaixo do normal.

Figura 16. Idem a Figura 15, porém para o trimestre DJF.



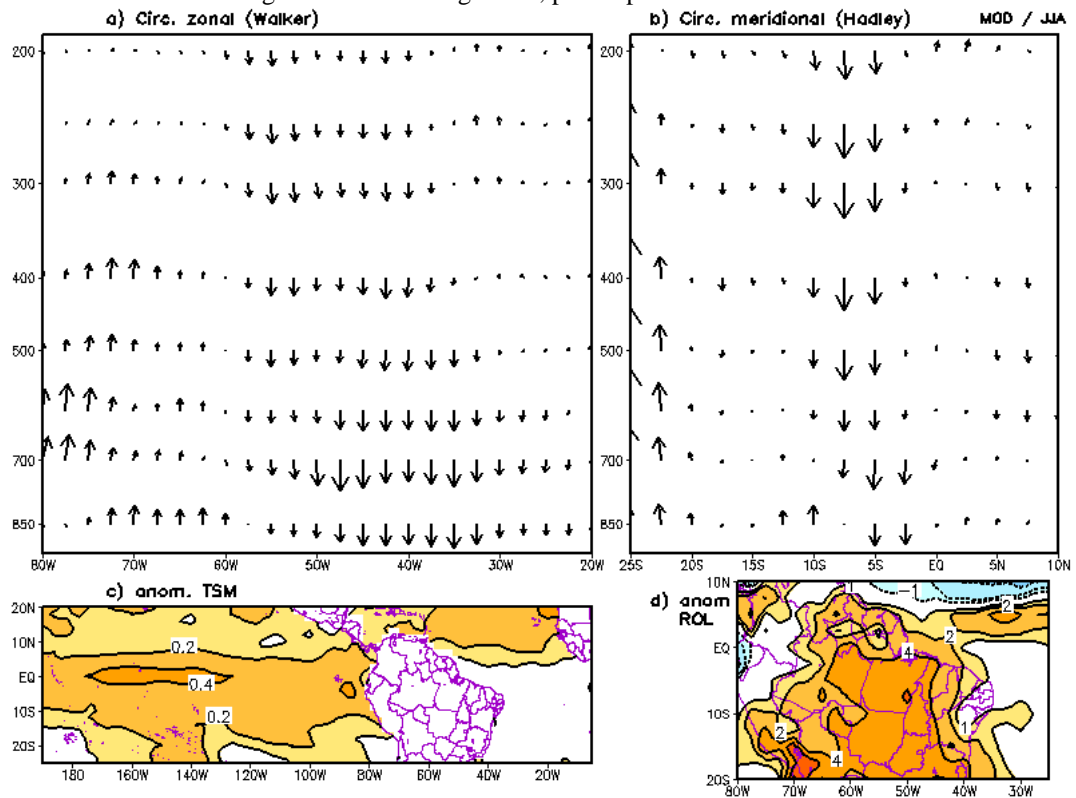
A Figura 17 destaca as principais características da dinâmica tropical associada aos eventos de seca MOD em Marabá durante o período de MAM. Nota-se claramente a presença do fenômeno El Niño, anomalias positivas de TSM englobando toda a porção tropical do Oceano Pacífico (Figura 17c). No Atlântico tem-se a configuração do Dipolo em sua fase positiva, ou seja, presença concomitante de anomalias positivas de TSM (águas mais quentes do que o normal) e anomalias negativas de TSM na bacia equatorial sul (águas mais frias do que o normal), cuja configuração associa-se com a presença da banda de nebulosidade da ZCIT em posições sobre o Atlântico norte. De fato, as anomalias negativas de ROL indicam a posição da ZCIT zonalmente sobre o Atlântico norte (Figura 17d), enquanto que toda a região Amazônica e Nordeste do Brasil apresenta anomalias positivas de ROL associada a inibição de atividade convectiva, com consequente ausência de chuva que caracterizou o período de seca MOD em Marabá. Em termos da circulação troposférica na coluna vertical, nota-se ramo de ar anormalmente descendente sobre a Amazônia associada principalmente à célula de Walker (Figura 17a).

Figura 17. Idem a Figura 15, porém para o trimestre MAM.



Na Figura 18 observa-se que as principais características da dinâmica associada às secas MOD em Marabá em JJA são a presença de aquecimento anômalo sobre o Pacífico oeste e central, anomalias positivas de TSM entre 180° e 130°W e também sobre o Oceano Atlântico norte. Neste período, nota-se a manifestação de uma grande área contendo movimento descendente tanto da célula de Walker (Figura 18a) como da célula de Hadley (Figura 18b) que se processa em toda coluna troposférica desde os baixos até os altos níveis sobre a Amazônia. Essa subsidência impede a formação de nuvens convectivas profundas, conforme mostra o padrão de anomalias positivas de ROL sobre toda a Amazônia e Nordeste (Figura 18d).

Figura 18. Idem a Figura 15, porém para o trimestre JJA.



4.2. ESTUDO DO NÍVEL FLUVIOMÉTRICO EM MARABÁ: EVENTOS EXTREMOS ABAIXO DO NORMAL

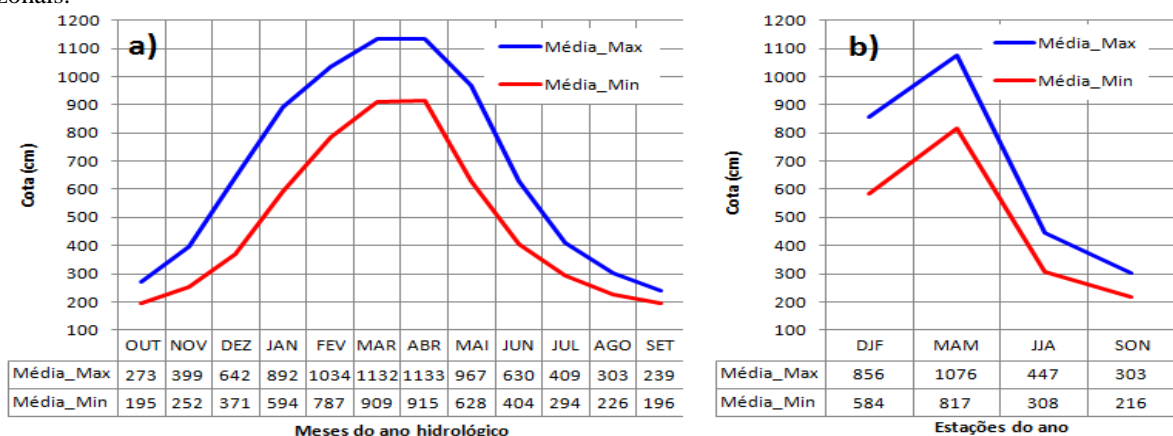
4.2.1 Climatologia e variabilidade

A climatologia do nível fluviométrico do rio Tocantins na região de Marabá, considerando os níveis máximos e mínimos, foi obtida tomando-se a média do período de 1971 a 2010, ou seja, os aspectos climatológicos referem-se à média dos últimos 40 anos. A Figura 19 mostra a evolução mensal e sazonal das cotas máximas e mínimas climatológicas (média 1971-2010) do rio Tocantins na região de Marabá durante o ano hidrológico.

Na Figura 19a nota-se que a cota inicia seu período de subida no mês de Outubro e aumenta progressivamente mês a mês até alcançar o seu nível máximo anual (pico anual) nos meses de Março e Abril, quando observam-se cotas entre 1132/1133 cm e 909/915 cm. Em Maio o nível do rio já começa a descer com declínio rápido de Junho em diante até atingir o valor mínimo anual no mês de Setembro, com valores de cota entre 196/239 cm.

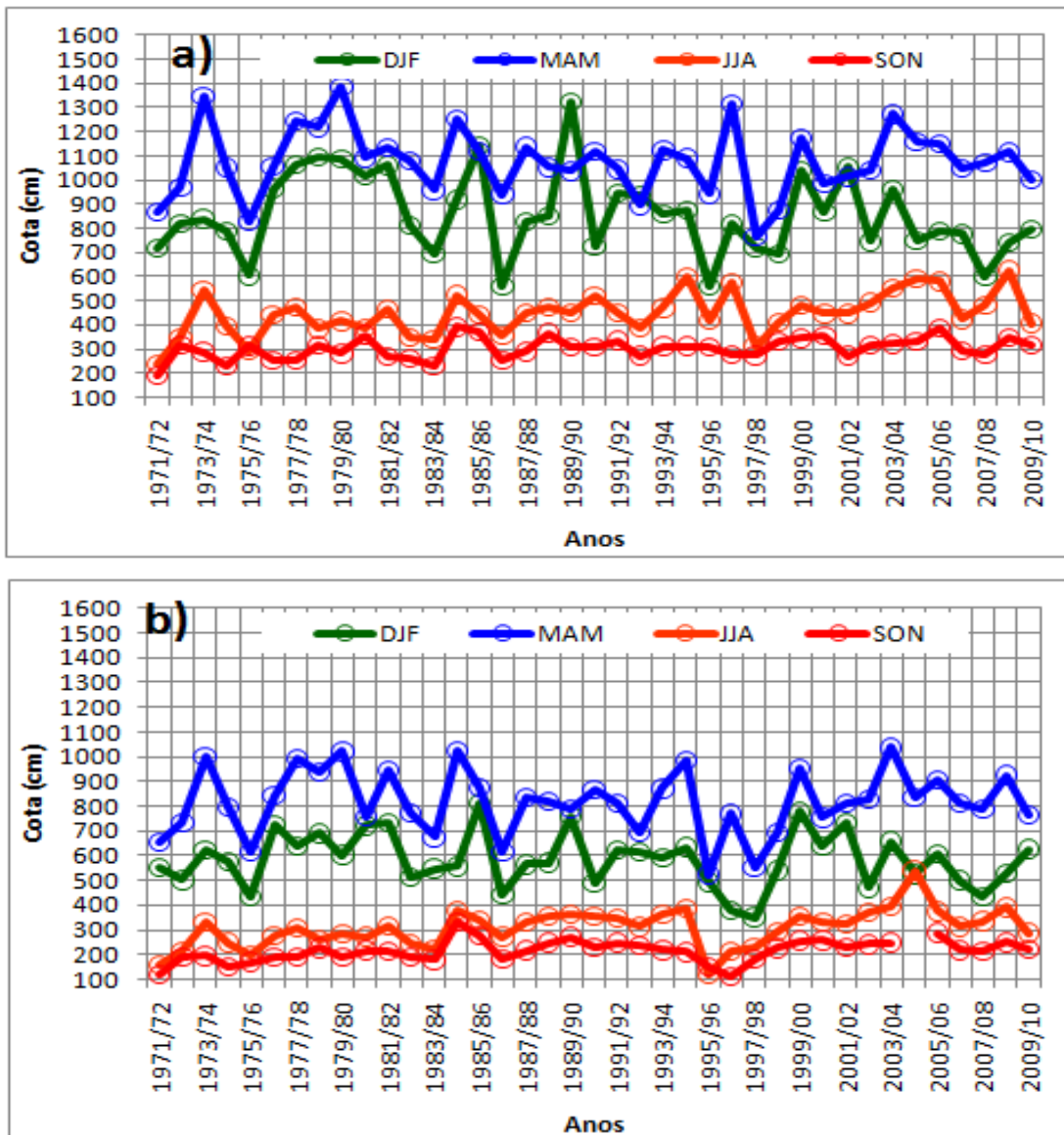
Considerando as climatologias sazonais (Figura 19b), verifica-se claramente que o máximo anual ocorre no trimestre MAM, quando a cota atinge 817/1076 cm, sendo que no trimestre anterior, ou seja, DJF, os valores das cotas oscilam entre 584 e 856 cm, quando ocorre o máximo secundário anual. No trimestre de JJA o nível do rio é bem mais baixo, com valores entre 308 e 447 cm. Em SON observa-se o valor mínimo anual com valores de cota entre 216 e 303 cm. Portanto, em termos sazonais, o **período de enchente** do rio Tocantins em Marabá deflagra-se nos trimestres de DJF e MAM, enquanto que o **período de vazante** processa-se nos trimestres de JJA e SON.

Figura 19. Climatologia (média do período de 1971 a 2010) da cota fluviométrica (cm) do rio Tocantins em Marabá para os níveis máximos (azul) e mínimos (vermelho), correspondentes as: a) médias mensais e b) médias sazonais.



A Figura 20 mostra as médias sazonais dos níveis máximos (Fig. 20a) e mínimos (Fig. 20b) registrados em Marabá durante cada ano do período estudado, entre 1971/72 a 2009/10. Nota-se um comportamento fluviométrico bastante variável de ano para ano, o que indica a presença de alta variabilidade sazonal e interanual naquela região. Novamente, percebe-se que as cotas sazonais registradas nos períodos de DJF e MAM destacam-se na parte superior da escala de intensidade da Figura, caracterizando claramente o período de enchente do rio Tocantins. Inversamente, as cotas sazonais de JJA e SON concentram-se na parte inferior da escala de intensidade, indicando a ocorrência do período de vazante do rio.

Figura 20. Médias sazonais da cota fluviométrica (cm) em Marabá para a) níveis máximos e b) mínimos durante o período de 1971/72 a 2009/10.



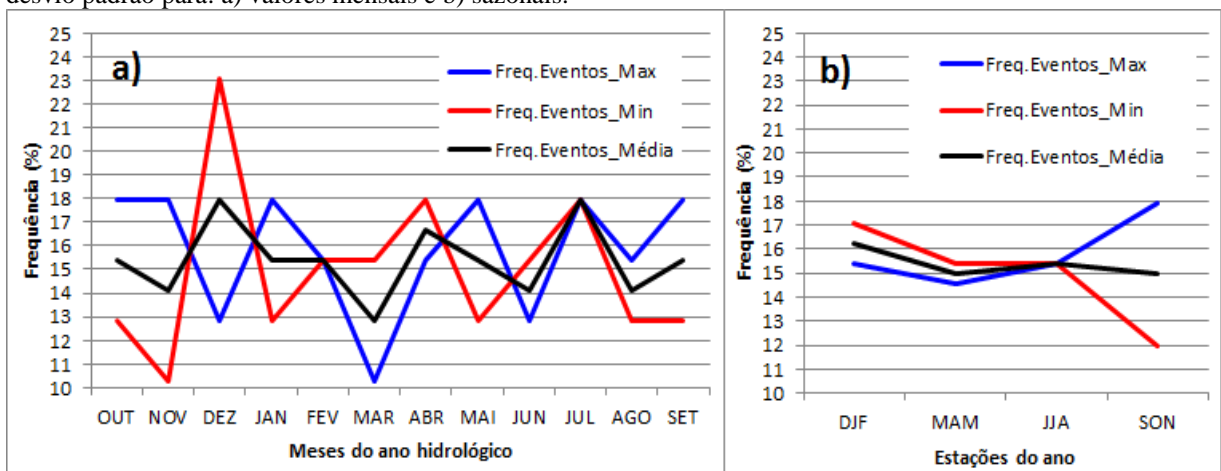
4.2.2 Seleção dos eventos de seca hidrológica em Marabá

Neste trabalho as secas hidrológicas na região de Marabá são definidas pela ocorrência de eventos extremos que apresentaram cota do rio abaixo do normal. Assim sendo, tais eventos extremos são selecionados pelo critério de ocorrência da anomalia padronizada da cota fluviométrica mensal menor do que -1 desvio padrão. Esse critério foi aplicado para os níveis máximos e mínimos mensais em todo período de dados (1971/72 a 2009/10). O limiar do índice menor do que -1 desvio padrão indica que o evento realmente não encontra-se dentro do padrão de variabilidade considerado normal, caracterizando-o assim como um evento extremo.

Baseado neste critério, foram selecionados e listados nas Tabelas 3 e 4 os eventos extremos de cota abaixo do normal registrados nos dados mensais de cota máxima e mínima durante o período de 1971/72 a 2009/2010. Nestas Tabelas percebe-se que a ocorrência mensal dos eventos é aleatória e pode ser observado ao longo de todo ano, independente do mês ser de enchente ou vazante do rio. A duração dos eventos não apresenta regularidade ao longo do período estudado. Destacam-se os anos de 1971/72, 1975/76, 1995/96, 1997/98 e 1998/99 quando verificou-se que a duração dos eventos persistiu por mais de 4 meses, particularmente no período de vazante do rio, ou seja, entre os meses de Maio a Setembro.

Na Figura 21 tem-se a frequência relativa dos eventos extremos com cota abaixo do normal. Na Figura 21a, percebe-se diferença relativamente significativa quando comparam-se as frequências mensais obtidas nos dados de cota máxima e mínima, principalmente nos meses de Outubro, Novembro, Dezembro, Janeiro e Março. Nos demais meses, Fevereiro, Abril, Junho e Julho a diferença é pequena. De maneira geral, não há um mês ou período sazonal (Figura 21b) em que destaca-se a ocorrência dos eventos extremos de nível fluviométrico abaixo do normal, ou seja, tais eventos podem ocorrer ao longo de todo ano.

Figura 21. Frequência relativa (%) dos eventos com anomalia padronizada de cota fluviométrica menor do que -1 desvio padrão para: a) valores mensais e b) sazonais.



4.2.3 Comportamento da cota e precipitação regional

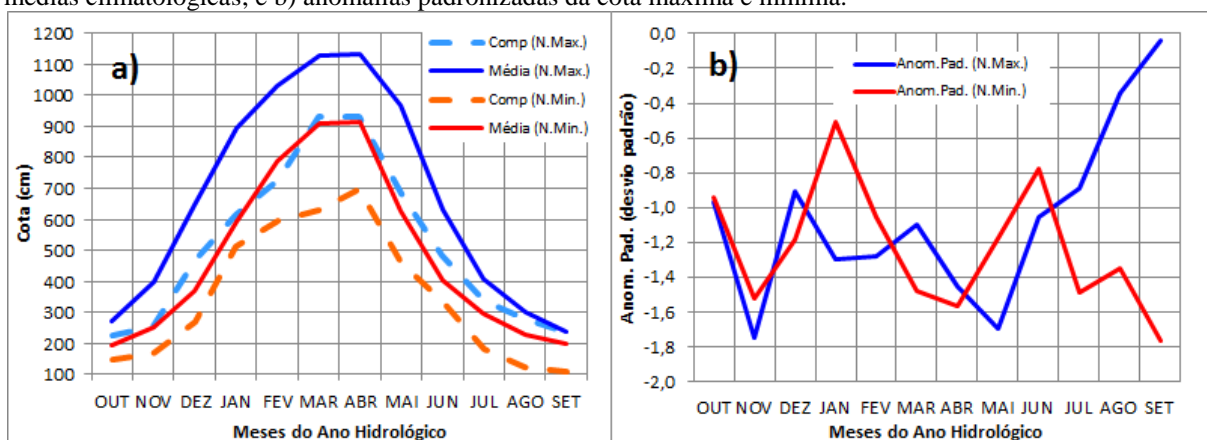
Baseado nas composições dos eventos extremos selecionados, conforme critério supramencionado, investigam-se os aspectos observacionais relativos ao comportamento médio mensal do nível fluviométrico do rio Tocantins em Marabá e da precipitação regional.

A Figura 22a ilustra a evolução mensal da cota (composição média para todos os eventos extremos) para os valores máximos (linha azul pontilhada) e mínimos (linha laranja pontilhada) e sua comparação em relação à climatologia (média 1971-2010) média máxima (linha azul contínua) e mínima (linha azul contínua). Durante os eventos extremos, observam-se valores de cota, máxima e mínima, bem abaixo da sua respectiva normal climatológica ao longo de todo o ano hidrológico, sendo que o pico ocorre em Março e Abril. É interessante

notar que a cota para o nível máximo (linha azul pontilhada) observada nos eventos extremos é reduzida para os valores da média climatológica correspondente aos níveis mínimos.

A Figura 22b mostra em termos quantitativos, através da anomalia padronizada, a evolução mensal da cota máxima e mínima em Marabá, associada aos eventos extremos. Para os níveis máximos, os meses mais críticos (anomalias abaixo de -1,5 desvio padrão) de cota muito abaixo do normal são Novembro e Maio, enquanto que para os níveis mínimos isso ocorre nos meses de Novembro, Março, Abril, Julho, Agosto e Setembro.

Figura 22. Composições mensais da a) cota fluviométrica para os níveis máximos e mínimos, incluindo as médias climatológicas; e b) anomalias padronizadas da cota máxima e mínima.



Em princípio, cada mês de cota abaixo do normal em Marabá, durante um evento extremo, associa-se a redução ou déficit (indicadas pelas anomalias negativas de precipitação) de chuva na área de drenagem da sub-bacia do rio Tocantins, particularmente nas regiões situadas no centro-norte do Tocantins e sul-sudeste do Pará, conforme análise conduzida na Figura 23 que mostra os desvios percentuais de precipitação sobre a região de estudo para cada mês do ano hidrológico.

Os eventos de seca hidrológica registrados durante os meses de Outubro, Dezembro e Fevereiro apresentam um padrão similar associado com a falta de chuva principalmente no centro-sul do estado de Tocantins, ao longo da calha dos rios Araguaia e Tocantins, onde verificam-se desvios negativos de precipitação entre -15 e -30% (Figura 23a, 23c, 23e).

Novembro e Janeiro são meses de configuração parecida, ou seja, os extremos de cota abaixo do normal ocorrem em associação ao déficit pluviométrico atingindo grande parte do

Tocantins e sul-sudeste do Pará, com desvios percentuais negativos entre -30 e -50% (Figura 23b, 23d).

A Figura 23c mostra que os eventos de cota abaixo do normal ocorrem quando a precipitação é reduzida em torno de -15 a -30% numa região restrita ao sul do Pará e centro do Tocantins, englobando o setor médio dos rios Araguaia e Tocantins.

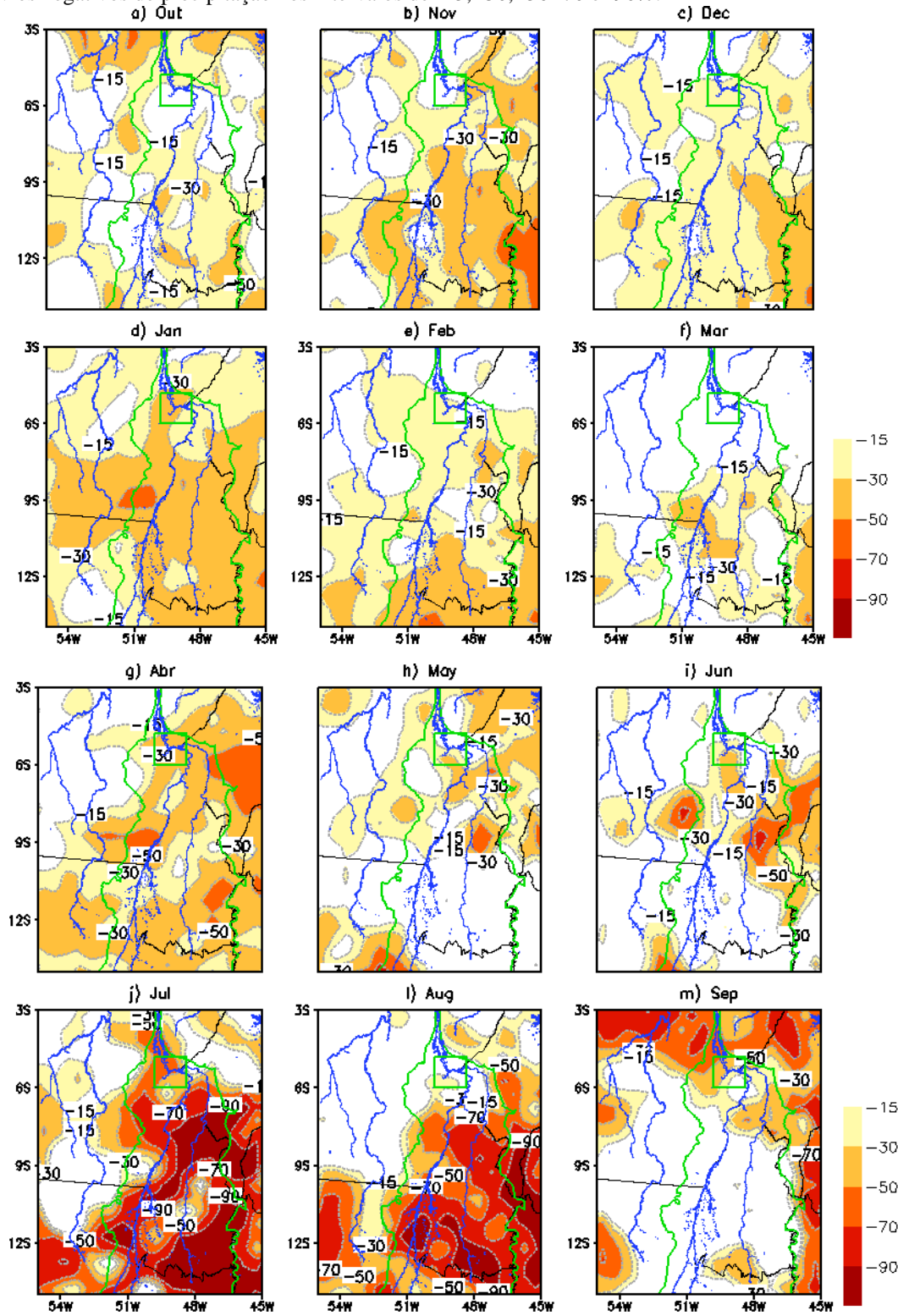
Os eventos extremos registrados em Abril caracterizam-se pela presença de desvios negativos de precipitação ocorrendo sobre o sul-sudeste do Pará e todo estado do Tocantins, com percentuais negativos entre -30 e -50% (Figura 23g).

As Figuras 23h e 23i indicam que os meses de Maio e Junho apresentam configurações similares de ocorrência de seca hidrológica associados com a diminuição de chuva regional no setor norte do Tocantins e sudeste do Pará, onde observam-se déficit pluviométrico variando em torno de -15 a -50%.

Os eventos de cota abaixo do normal nos meses de Julho e Agosto mostram a configuração espacial de desvio percentuais mais intensos e generalizados na região de estudo, ou seja, associam-se com déficit pluviométrico intenso englobando o sul-sudeste do Pará e todo estado do Tocantins, com desvios entre -50 e -90% (Figura 23j, 23l).

Em Setembro, notam-se desvios percentuais negativos de precipitação entre -30 e -50%, os quais restringem-se ao norte do Tocantins e sudeste do Pará (Figura 23m).

Figura 23. Desvio percentual (%) da precipitação para as composições dos eventos extremos mensais de cota abaixo do normal para os meses de a) Out, b) Nov, c) Dez, d) Jan, e) Fev, f) Mar, g) Abr, h) Mai, i) Jun, j) Jul, l) Ago e m) Set. O contorno em verde mostra o domínio da sub-bacia do Tocantins/Araguaia, o quadrado verde destaca a região de Marabá e as linhas em azul indicam a drenagem dos rios principais. Foram plotados somente os desvios negativos de precipitação nos intervalos de -15, -30, -50 -70 e -90%.

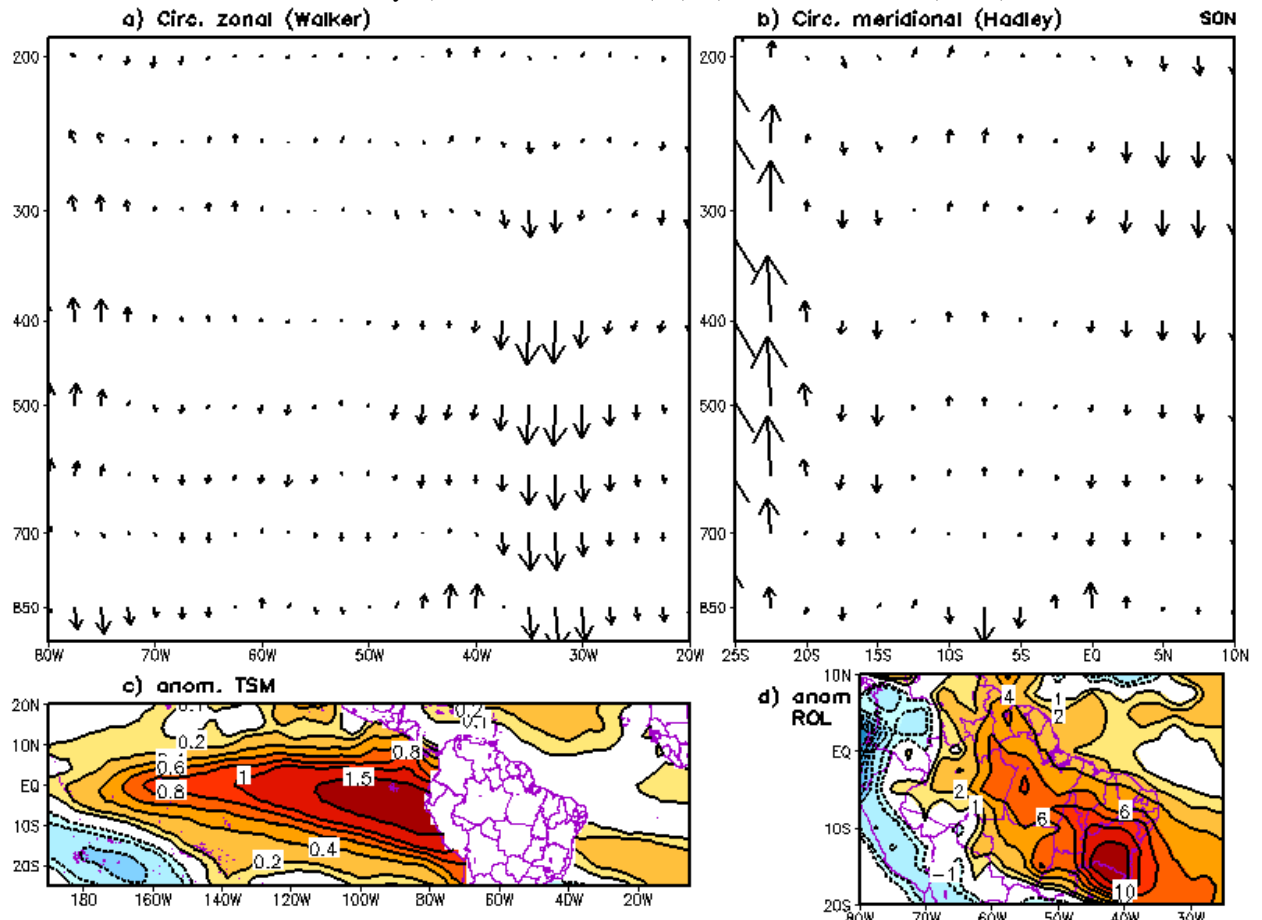


4.2.4 Padrões dinâmicos associados

Com o objetivo de descrever a estrutura dinâmica dos padrões oceânicos e atmosféricos de grande escala, associados aos eventos extremos de cota abaixo do normal, foram montadas e analisadas os mapas das composições sazonais da circulação atmosférica de Walker/Hadley, anomalias de TSM nos Oceanos Pacífico e Atlântico e anomalias de ROL para verificar os padrões de convecção relacionados a ZCAS e ZCIT.

A Figura 24 ilustra os aspectos dinâmicos associados ao período de SON. Observa-se claramente a manifestação do fenômeno El Niño sobre Pacífico, com anomalias positivas de TSM englobando toda bacia oceânica tropical (Figura 24c). Associado ao aquecimento anômalo do El Niño verifica-se a modificação na configuração da célula de Walker, com um forte ramo anormalmente descendente sobre a coluna troposférica sobre a região da Amazônia (Figura 24a). Em termos da circulação meridional da célula de Hadley, também verificam-se áreas com subsidência ao sul da Amazônia (Figura 24b). Na Figura 24d nota-se a presença de uma grande área contendo anomalias positivas de ROL, com orientação noroeste-sudeste, que indica atividade convectiva anormalmente enfraquecida, explicando a ocorrência da precipitação deficitária e os eventos extremos de cota pluviométrica abaixo do normal.

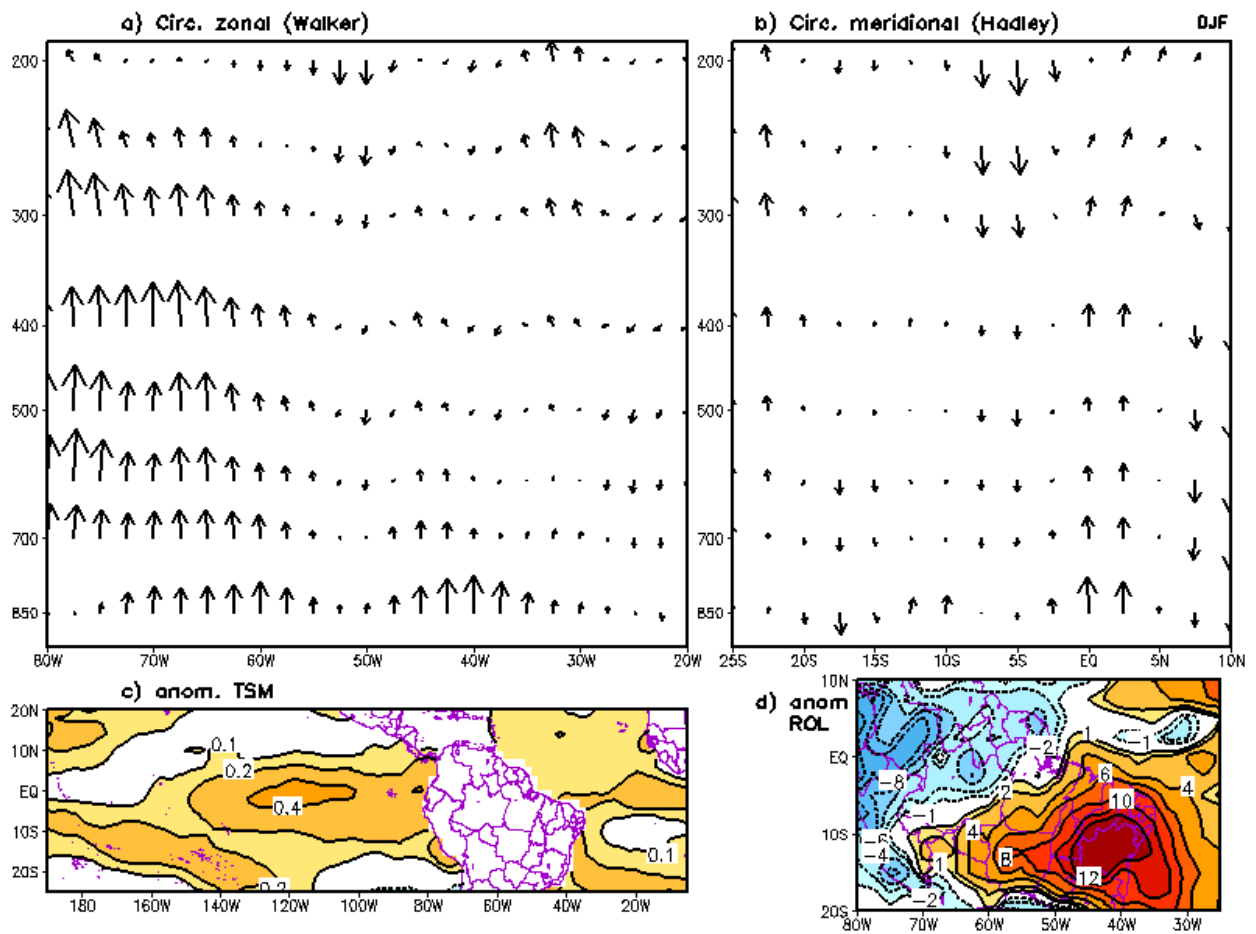
Figura 24. Composições sazonais associadas aos eventos extremos de cota pluviométrica abaixo do normal no trimestre SON para a) circulação atmosférica zonal associada à célula de Walker, b) circulação atmosférica meridional associada à célula Hadley, c) anomalia de TSM ($^{\circ}\text{C}$), d) anomalia de ROL (W/m^2).



O comportamento da dinâmica de grande escala no trimestre DJF associado aos eventos extremos de cota abaixo do normal é apresentado na Figura 25.

Sobre o Oceano Pacífico tropical observam-se anomalias positivas de TSM, indicando a presença do fenômeno El Niño com aquecimento anômalo mais intenso no setor centro-leste da bacia (Figura 25c). Associado às anomalias positivas do El Niño a circulação de Walker mostra o ramo ascendente sobre a bacia do Pacífico, mas não nota-se o ramo descendente sobre a Amazônia (Figura 25a). No plano meridional da célula de Hadley verifica-se claramente um ramo ascendente sobre o Atlântico norte e inversamente um ramo anormalmente subsidente sobre a Amazônia, centrado entre 0° e 5°S (Figura 25b). Essa subsidência parece associar-se ao padrão térmico do Atlântico, com a presença de anomalias positivas de TSM na faixa equatorial (Figura 25c). Tais padrões anômalos resultam na supressão da atividade convectiva tropical indicada pela predominância de anomalias positivas de ROL encobrendo a Amazônia oriental e Nordeste do Brasil (Figura 25d).

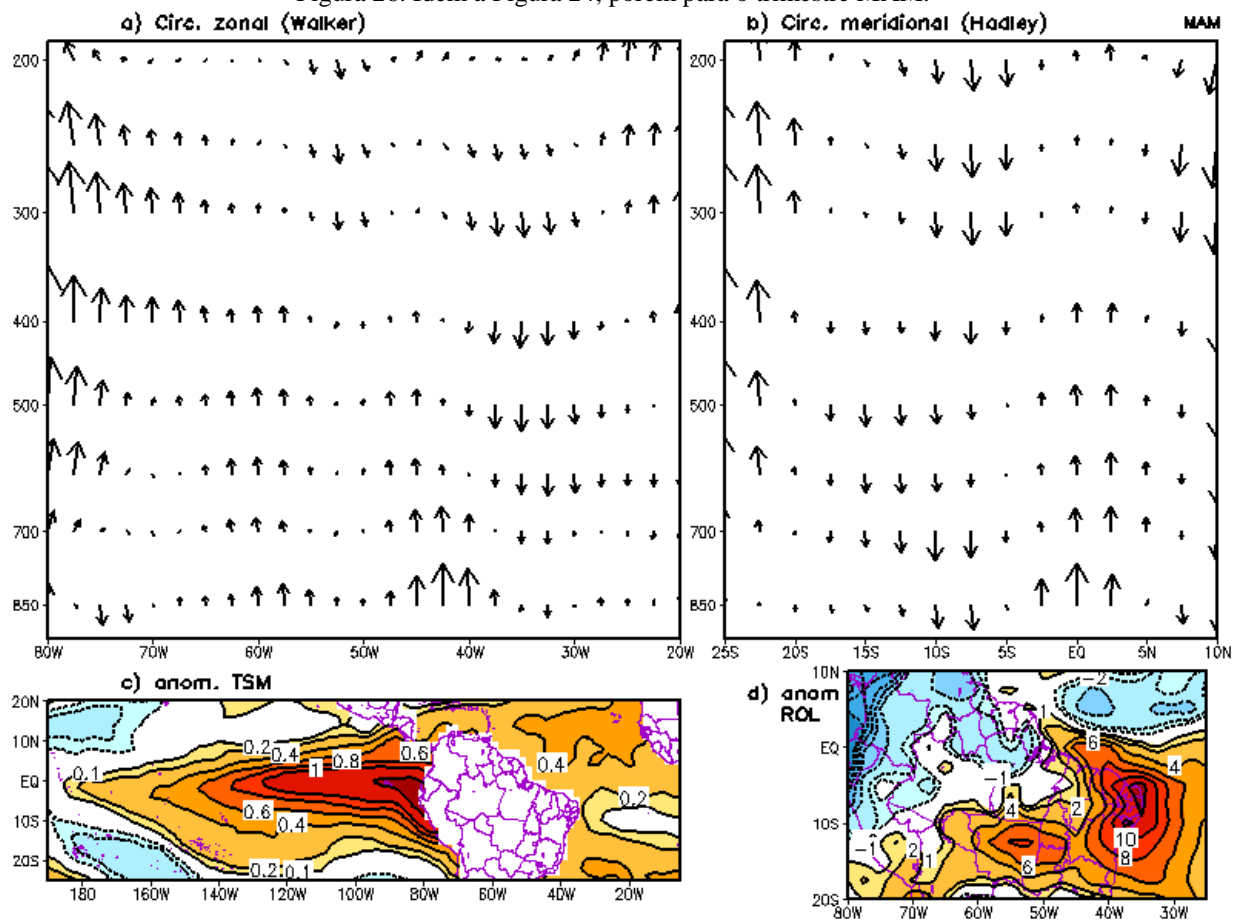
Figura 25. Idem a Figura 24, porém para o trimestre DJF.



Para o trimestre MAM os aspectos dinâmicos de grande escala demonstram novamente a modulação do fenômeno El Niño em sua fase madura sobre o Oceano Pacífico, conforme indica a Figura 26c com a presença de uma grande área contendo anomalias positivas de TSM cobrindo toda região oceânica tropical. A configuração dos padrões anômalos do El Niño interferem no padrão de circulação atmosférica da célula de Walker com movimentos ascendentes sobre o Pacífico e movimento descendente sobre a Amazônia, sendo que a subsidência de grande escala ocorre entre 40° e 30°W, principalmente (Figura 26a). Na circulação meridional da célula de Hadley também nota-se claramente o ramo anormalmente descendente sobre a Amazônia e ramo ascendente sobre o atlântico Norte (Figura 26b), os quais relacionam-se diretamente ao gradiente térmico no Atlântico intertropical apontando para o Hemisfério Norte, em virtude da presença de anomalias positivas de TSM na bacia norte e condições neutras sobre a bacia sul (Figura 26c). Consequentemente, verificam-se anomalias positivas de ROL, ou seja, convecção tropical anormalmente suprimida, no sul da

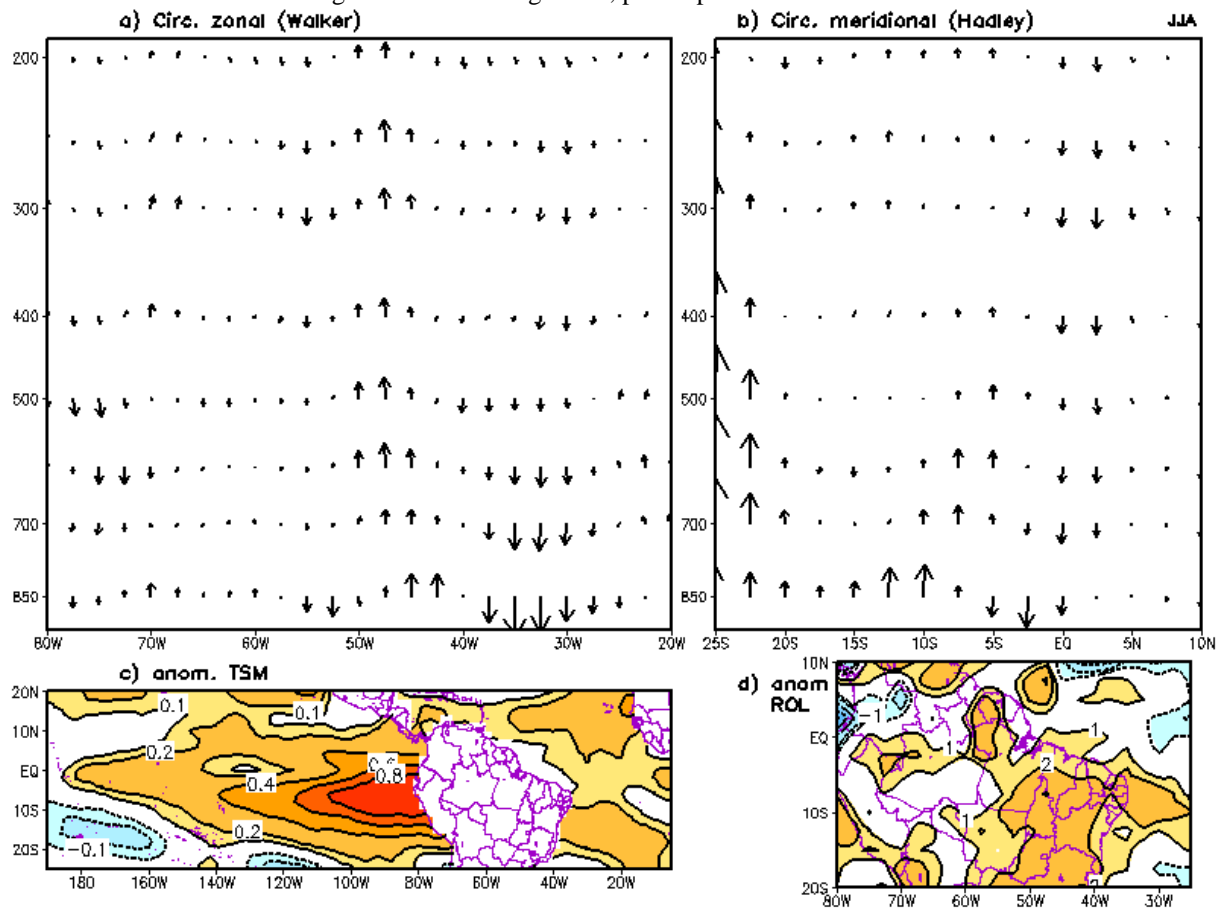
Amazônia e Nordeste do Brasil (Figura 26d), explicando as condições de precipitação abaixo do normal que conduziram os eventos de seca hidrológica na região de Marabá.

Figura 26. Idem a Figura 24, porém para o trimestre MAM.



A distribuição espacial das anomalias de TSM nos Oceanos Pacífico e Atlântico equatorial no trimestre JJA é verificado na Figura 27c. Observam-se anomalias positivas de TSM na bacia do Pacífico Equatorial, cuja característica assemelha-se aos episódios El Niño, com intensificação mais para o setor centro-leste da bacia. Associado as condições de El Niño tem-se a subsidência de grande escala sobre a região da Amazônia (Figura 27a) que provoca a inibição da atividade convectiva, indicada pela presença das anomalias positivas de ROL sobre a Amazônia oriental (Figura 27d).

Figura 27. Idem a Figura 24, porém para o trimestre JJA.

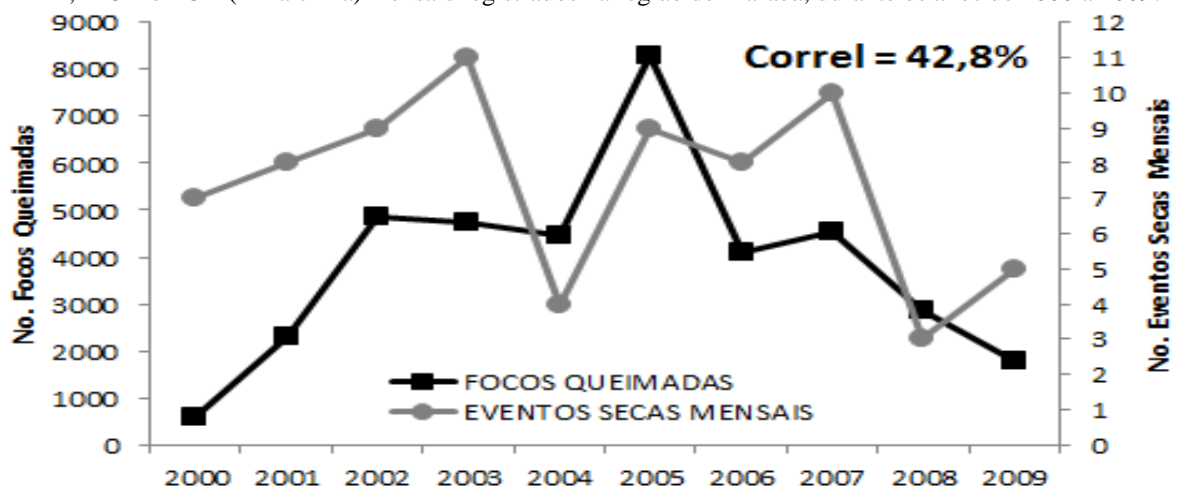


4.3. IMPACTO DOS EVENTOS DE SECA NO ECOSISTEMA (QUEIMADAS)

Os eventos de seca, dependendo da sua extensão e duração, podem induzir impactos diretos no ecossistema amazônico, em particular, na cobertura florestal. Isso ocorre devido a sinergia entre o clima regional e a floresta (COCHRANE ; LAURANCE, 2008), de tal forma que as condições de umidade muito baixa e temperatura alta, associadas aos episódios de seca, ressecam a cobertura vegetal, tornando a floresta mais susceptível à ocorrência de fogo, ou seja, a seca torna a floresta mais inflamável, sendo portanto, uma condição natural para as queimadas na região (ARAGÃO et al., 2008).

Assim sendo, procurou-se analisar se existe alguma relação entre os eventos de seca na região de Marabá e o registro de focos de calor (queimadas) estimados via satélite pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (<http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas>). A Figura 28 ilustra a variabilidade interanual do número de eventos mensais de seca FRA, MOD e FOR (obtidos pelo IAC) e os totais anuais de focos de queimadas na região de Marabá, durante os anos de 2000 a 2009. A correlação positiva em torno de 43% confirma a sinergia entre seca e queimada, ou seja, a floresta torna-se mais inflamável sob condições de déficit hídrico, conforme apontou Cochrane e Laurance (2008). Nota-se claramente o aumento anual de eventos de seca concomitante ao aumento de focos de calor durante os anos de 2000 a 2002, os quais diminuem 2003 e 2004, volta a subir em 2005 e diminuem no período de 2007 a 2009 (Figura 28).

Figura 28. Totais anuais de focos de queimadas (linha preta) estimados pelo INPE e números de eventos de seca FRA, MOD e FOR (linha cinza) mensais registrados na região de Marabá, durante os anos de 2000 a 2009.



5. CONCLUSÕES

Um das justificativas para a realização desse trabalho é a falta de estudos relacionados com eventos de secas na Amazônia, nos quais a maioria das investigações abordaram as condições de precipitação acima do normal, ou seja, anos chuvosos. Também sabe-se que os estudos sobre a dinâmica das secas tropicais são bem documentados para a região do Nordeste Brasileiro. Assim sendo, o presente trabalho apresenta uma contribuição importante à climatologia da Amazônia no que concerne as características climatológicas associadas aos eventos de seca meteorológica e hidrológica observados sobre a região de Marabá no sudeste do Pará, Amazônia oriental.

A aplicação do índice de anomalia de chuva (IAC) nos dados mensais e sazonais de precipitação permitiu a caracterização dos eventos de secas FRA, MOD e FOR registrados na região de Marabá. Os resultados mostraram que os eventos mais relevantes encontram-se na categoria FRA e MOD, sendo que verificou-se que os eventos de seca FRA são mais frequentes nos meses de Fevereiro, Junho e Dezembro. Na categoria seca MOD os eventos são mais frequentes nos meses de Agosto, Setembro e Outubro. Considerando o período sazonal observou-se que os trimestres DJF e JJA foram os trimestres que apresentaram maiores frequências de seca FRA e os eventos de seca MOD são mais frequentes no período JJA.

Os resultados referentes aos eventos de seca hidrológica (índices extremos de cota fluviométrica abaixo do normal) do rio Tocantins na região de Marabá, mostraram que a ocorrência dos eventos é aleatória e podem ocorrer ao longo de todo ano, independente se o período é de enchente ou vazante do rio. A duração dos eventos também não apresentou regularidade ao longo da série dos dados estudados. Observou-se também que para os níveis máximos os meses mais críticos de cota muito abaixo do normal são Novembro e Maio e para os níveis mínimos os meses críticos são Novembro, Maio, Abril, Julho e Agosto, sendo que os picos ocorrem nos meses de Março e Abril.

Quanto à estrutura dinâmica dos padrões oceânicos e atmosféricos de grande escala associados aos eventos de seca meteorológica e hidrológica observaram-se que os eventos estão relacionados com um padrão de aquecimento (El Niño) no Pacífico equatorial e condições de aquecimento no Atlântico tropical norte, cujas condições oceano-atmosféricas de grande escala propiciam a intensificação tanto do ramo descendente zonal da célula de

Walker como do ramo descendente meridional da célula de Hadley, associados com inibição significativa da atividade convectiva (anomalias negativas de ROL) explicando consequentemente a ocorrência dos eventos de seca em nível regional.

Embora a região de Marabá seja conhecida pelos episódios anuais de enchentes do rio Tocantins, as análises observacionais conduzidas no presente trabalho também evidenciaram que esta região apresenta eventos de seca significativa. Ou seja, a região de Marabá também é vulnerável aos eventos de seca meteorológica e hidrológica, cujas magnitudes são consideráveis e com consequente impactos sociais e ambientais, tais como o aumento dos focos de queimadas registrados na região que ocorrem concomitantemente aos episódios de secas mensais.

É importante ressaltar que as possíveis mudanças climáticas que vem ocorrendo na Amazônia, indicadas por simulações de modelos climáticos globais e regionais mostram diminuição da precipitação particularmente na porção oriental. Se, a precipitação diminuir durante a estação seca, o impacto das mudanças climáticas no regime hidrológico e no próprio ecossistema será ainda mais agravante, ou seja, tem-se um problema ambiental que compromete tanto a sociedade como a natureza amazônica.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil) (ANA). **A região hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia**. Brasília, DF: Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos, 2006.
- ARAGÃO, L.E.O.C.; MALHI, Y.; BARBIER, N.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y.; ANDERSON, L; SAATCHI, S. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society B** v. 363, p. 1779–1785, 2008.
- ARAÚJO, L. E.; MORAES NETO, J. M.; SOUSA, F. A. S. Classificação da precipitação da precipitação anual e da quadra chuvosa da bacia do rio Paraíba utilizando índice de Anomalia de Chuva (IAC). **Ambi-Água**, Taubaté, v. 4, n. 3, p. 93-110, 2009.
- AZEVEDO, P. V. de; SILVA, V. P. R. da. Índice de seca de Bhalme & Mooley: uma adaptação regional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 8., 1995, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1995. p. 696-699.
- AZEVEDO, P. V.; SILVA, V. P. R. Índice de seca para a microrregião do Agreste da Borborema, no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 91, p. 66-72, 1994.
- BHALME, H. N.; MOOLEY, D. A. Large-scale drought/floods and monsoon circulation. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 108, n. 8, p. 1197-1211, 1980.
- BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Análise comparativa dos índices de seca de Palmer, Palmer adaptado e índice padronizado de precipitação no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22, n.1, 105-111, 2007.
- CAVALCANTI, I. F. A. ; SOUZA, C. A. ; KOUSKY, V. E. . Droughts in Brazil during summer and fall 2001 and associated atmospheric circulation features. **Climanálise** (São José dos Campos), Cachoeira Paulista, SP, 2001.
- COCHRANE, M.A.; LAURANCE, W.F. Synergisms among Fire, Land Use, and Climate Change in the Amazon. **Ambio**, v. 37, n. 7–8, p.522-527, 2008.

COHEN, J. C. P., et al. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: a case study. **Monthly Weather Review**, v. 123, p. 3163-3174, 1995.

DE SOUZA et al. Precipitação climatológica sobre a Amazônia oriental durante o período chuvoso: observações e simulações regionais com o RegCM3. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.2, 111-124, 2009.

DE SOUZA, E. B.; AMBRIZZI, T. Pentad precipitation climatology over Brazil and the associated atmospheric mechanisms. **Climanálise**, v. 1, 2003.

DE SOUZA, E. B.; KAYANO, M.T.; AMBRIZZI, T. Intraseasonal and submonthly variability over the eastern Amazon and Northeast Brazil during the autumn rainy season. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 81, p. 177-191, 2005.

DE SOUZA, E.B.; KAYANO, M.T.; AMBRIZZI, T. The regional precipitation over the eastern Amazon/northeast Brazil modulated by tropical Pacific and Atlantic SST anomalies on weekly timescale. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 2, p. 113–122, 2004.

DE SOUZA, E. B.; KAYANO, M. T.; TOTA, J.; PEZZI, L.; FISCH, G.; NOBRE, C. On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960-1998. **Acta Amazonica**, v. 30, n. 2, p. 305-318, 2000.

DE SOUZA, E.B.; LOPES, M.N.G.; AZAMBUJA, A.M.S. **Apostila de climatologia da Amazônia oriental: parte I – climatologia de precipitação regional do estado do Pará**. Belém: UFPA, 2009. 18p.

DE SOUZA, E.B.; NOBRE, P. Uma revisão sobre o Padrão de Dipolo no Oceano Atlântico tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 13, n. 1, p. 31-44, 1998.

DE SOUZA, E.B.; ROCHA, E.J.P. Diurnal variations of rainfall in Bragança-PA (eastern Amazon) during rainy season: mean characteristics and extreme events. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3a, p. 142-152, 2006.

FERNANDES, D. S. et al. **Índices para a Quantificação da Seca**. Goiás: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Arroz e Feijão, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2009.

- FIGUEROA, S. N., et al. Simulation of the summer circulation over the South American region with an ETA coordinate model. **Journal of the Atmospheric Sciences** 52: 1573–1584, 1995.
- FISCH, G., et al. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazônica**, v.28, n.2, p.101-126. 1998.
- FREITAS, M. A. S. A Previsão de secas e a gestão higronegética: o caso da Bacia do Rio Parnaíba no Nordeste do Brasil. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE REPRESAS Y OPERACIÓN DE EMBALSES, 2004, Puerto Iguazú. **Anais**. Puerto Iguazú: CACIER, 2004. v. 1. P. 1-1.
- FREITAS, M. A. S. Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semi-áridas. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. suplem., p. 84-95, 2005.
- GONÇALVES, W. A.; CORREIA, M. F.; ARAÚJO, L. E.; DA SILVA, D. F.; ARAÚJO, H. A. Vulnerabilidade climática do Nordeste Brasileiro: uma análise de eventos extremos na zona semi-árida da bacia do São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: CALESA/UFSC, 2006.
- GUIMARÃES, D.P. Identificação do local mais chuvoso do Brasil. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n 2-3, 2007.
- KALNAY, E. et al. NCEP/NCAR 40-year Reanalysis project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, p. 437-471, 1996.
- KUCHARSKI, F., HASTENRATH, S. Teleconnection mechanisms of Northeast Brazil droughts: modeling and empirical evidence. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, .n. 2, p. 115-125, 2008.
- LIEBMANN, B.; SMITH, C. A. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.77, p.1275-1277. 1996

LOPES, M.N.G. **Aspectos regionais da variabilidade de precipitação no Estado do Pará: estudo observacional e modelagem climática em alta resolução**. 2009. 117 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

MARENGO, J.A. Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon Basin Water Budget. **Climate Dynamics**, n. 24: p. 11-22, 2005.

MARENGO, J.A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade. Caracterização do clima atual e definição de alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. (Série Biodiversidade, 26).

MARENGO, J.A.; JONES, R.; ALVES, L.M.; VALVERDE, M.C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v. 29, p. 2241-2255, 2009.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; TOMASELLA, J.; CARDOSO, M. F.; OYAMA, M. D. Hydro-climatic and ecological behaviour of the drought of Amazonia in 2005. **Philosophical Transactions Royal Society B**. v. 363, p.1773–1778, 2008.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; UVO, C. Trends in streamflow and rainfall in tropical South America: Amazonia, eastern Brazil, and northwestern Peru. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 1775-1784, 1998.

MARENGO, J. A. et al. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v. 21, p. 495-516, 2008.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to the time scale. In CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8. , 1993, Anaheim, CA. **Proceedings**. Boston: American Meteorological Society, 1993. p. 179- 184.

MOLINA, P. A.; LIMA, L. T. M. Estudo de secas agrícolas no Nordeste Brasileiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13. , 1999, Belo Horizonte. Água

em quantidade e qualidade: o desafio do próximo milênio: **Anais**. Belo Horizonte: ABHR, 1999. 1 CD-ROM.

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, p. 2653-2675, 1981.

NIJSSEN, B.; O'DONNELL, G.M.; HAMLET, A.F.; LETTENMAIER, D.P. "Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change". **Climate Change**, p.143 – 175, 2001.

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.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (IPCC). **Mudanças Climáticas 2007**: impactos, adaptação e vulnerabilidade. Bruxelas, 2007.

PALMER, W. C. **Meteorological drought**. Washington: US Weather Bureau Res., 1965. 58 p.

PIRES, V. **Frequência e intensidade de fenômenos meteorológicos extremos associados a precipitação**. 2003. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia da Terra) – Universidade de Lisboa, Portugal, 2003.

REYNOLDS, R.W. et al. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. **Journal of Climate**, v. 15, p. 1609–1625, 2002.

ROCHA, E.J. **Balço de umidade e influências de condições de contorno superficiais sobre a precipitação da Amazônia**. 2001. Tese (Doutorado) - INPE, São José dos Campos, 2001.

ROOY, M. P. A rainfall anomaly index independent of time and space. **Notos**, Pretoria, v. 14, p. 43-48, 1965.

SANSIGOLO, C.A. Análise comparativa do desempenho dos índices de seca de Palmer (PSDI) e da precipitação normalizada (SPI) em Piracicaba-SP (1917-2001). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 3, p. 237-242, 2004.

SANTOS, D.M. **Análise e modelagem hidrometeorológica na bacia do rio Tocantins em Marabá-PA**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - UFPA, MPEG, EMBRAPA, 2008.

SILVA, A.; SANTO, F.; PIRES, V. **A seca em Portugal: prevenção, monitorização e mitigação**. 2005. Disponível em: <<http://www.panda.igeo.pt/pancfs/seca2005/FatimaEspiritosanto.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2010.

SILVA, D. F.; ARAÚJO, L. E.; KAYANO, M. T.; SOUSA, F. de A. S. Avaliação dos impactos da variabilidade climática na distribuição pluviométrica da Bacia do Rio Mundaú através do IAC. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS E TECNOLÓGICOS, 2., 2007, Santos. **Anais...** Santos: [s.n.], 2007.

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

SOUZA, A.; ALBUQUERQUE, B. F. C.; LOPES, T. C. S. P. um estudo do índice de Bhalme & Mooley - IBM(Bhalme & Mooley, 1980); Índice de Anomalia de Chuva – IAC (Rooy,1965) para o Estado de Mato Grosso do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2006.

WILLIAMS, E., DALL'ANTONIA, A. The drought of the century in the Amazon basin: an analysis of the regional variation of rainfall in South America in 1926. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 231-238, 2005.

XAVIER, T. M. B. S., et al. Caracterização de Períodos secos ou excessivamente chuvosos no Estado do Ceará através da Técnica dos Quantis: 1964-1998. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 14, n.2, p.63-78, 1999.

XAVIER, T. M. B. S.; SILVA, J. F.; REBELLO, E. R. G. **A técnica dos quantis e suas aplicações em Meteorologia, Climatologia e Hidrologia, com ênfase para as Regiões Brasileiras**. Brasília: Thesaurus, 2002. p. 51.