

The text that follows is a PREPRINT
O texto que segue é uma PREPRINT

Please cite as:

Favor citar como:

Silva, R.A. & P.M. Fearnside. 2025. **Índice de
severidade de seca de Palmer
(PDSI): Conexões com anomalias
nos oceanos tropicais e impactos em
sub-bacias da região amazônica. XXI**
*Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto
(SBSR), 13 a 16 de abril de 2025, Salvador, BA.*
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE),
São José dos Campos, SP (no prelo).

Copyright: INPE

ÍNDICE DE SEVERIDADE DE SECA DE PALMER (PDSI): CONEXÕES COM ANOMALIAS NOS OCEANOS TROPICAIS E IMPACTOS EM SUB-BACIAS DA REGIÃO AMAZÔNICA

Rosimeire Araújo Silva^{1*}, Philip Martin Fearnside¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) - Manaus, AM.

*E-mail: cientistadedados2020@gmail.com

RESUMO

A relação entre as temperaturas da superfície do mar e os eventos climáticos na Amazônia é complexa, com variações nos oceanos tropicais impactando as sub-regiões de forma distinta. Este estudo utiliza a Função Empírica Ortogonal (FOE) para analisar anomalias de temperatura da superfície do mar (ATSM) no Pacífico e Atlântico entre 1950 e 2022, investigando seus efeitos nos períodos secos e úmidos nas sub-bacias amazônicas. O El Niño Central no Pacífico está associado a secas prolongadas, enquanto o El Niño Oriental tem impacto moderado. No Atlântico, o Modo Atlântico Equatorial (MEA) Frio favorecendo chuvas na estação chuvosa, e o Dipolo Positivo intensifica secas em certas bacias. Ambos os oceanos influenciam a variabilidade climática amazônica de maneira complementar e/ou alternada, e a gestão hídrica deve considerar esses efeitos para aprimorar a previsão e mitigação de eventos extremos.

Palavras-chave — Secas extremas, variabilidade climática, temperatura da superfície do mar, El Niño Oscilação sul

ABSTRACT

The relationship between sea temperatures and climate events in the Amazon is complex, with variations in tropical oceans impacting subregions differently. This study uses the Orthogonal Empirical Function (EFO) to analyze sea surface temperature anomalies (SST) in the Pacific and Atlantic between 1950 and 2022, investigating their effects on dry and wet periods in the Amazon sub-basins. The Central El Niño in the Pacific is associated with prolonged droughts, while the Eastern El Niño has a moderate impact. In the Atlantic, the Cold Atlantic Equatorial Mode (AEM) favors rainfall in the wet season, and the Positive Dipole intensifies droughts in certain basins. Both oceans influence Amazonian climate variability in a complementary and/or alternating manner, and water management should consider these effects to improve the prediction and mitigation of extreme events..

Key words — Extreme droughts, climate variability, sea surface temperature, El Niño Southern Oscillation

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a Amazônia tem enfrentado um aumento significativo na frequência de eventos climáticos extremos, como secas e enchentes, o que ressalta a importância de compreender em detalhes suas raízes (1-3). Secas severas na porção norte da Amazônia em geral são desencadeadas por El

Niño, enquanto a porção sul parece ser mais controlada por aquecimento do Atlântico tropical (e.g., Espinoza et al. 2019). Secas no sudoeste da Amazônia causados por aquecimento do Atlântico tropical, como em 2005 e 2010, são agravados se este aquecimento estiver em combinação com um esfriamento no Atlântico Sul tropical(4).

Em estudo mais recente sobre a resposta dos extremos hidrológicos às mudanças climáticas na Bacia Amazônica, (5) sugeriram que as mudanças futuras na precipitação aumentarão a frequência e a magnitude dos extremos hidrológicos na região. No geral, o efeito das condições hidrológicas locais é generalizado, estendendo-se por amplas regiões amazônicas, e isso reforça a importância de levar em conta a topografia e a hidrologia locais para entender melhor a provável resposta e resiliência das florestas ao aumento da frequência de eventos climáticos extremos e temperaturas crescentes. Neste sentido, generalizações simples, como a associação de secas e cheias com o El Niño/La Niña, se tornam inadequadas dependendo do tipo de anomalia e o local dentro da vasta área da Amazônia. Análises das séries históricas de temperatura da superfície do mar nos Oceanos Pacífico e Atlântico, e dos eventos climáticos em cada sub-bacia na região amazônica, permitem identificar as associações entre as temperaturas em diferentes partes dos oceanos e as anomalias climáticas nas diferentes partes da Amazônia. Neste estudo, exploraremos como os dois principais modos de anomalias oceânicas do Pacífico e também do Atlântico influenciam na variabilidade da hidroclimatologia na Amazônia com foco na variabilidade espaço-temporal das sub-bacias da região. A análise busca identificar padrões regionais de períodos secos e úmidos nas subbacias, fornecendo insights espaço-temporais e seus efeitos nas diferentes partes da bacia amazônica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Dados

2.1.1 Temperatura da Superfície do Mar (TSM)
Os dados de TSM são uma série global mensal com resolução de 2° de latitude por 2° de longitude, disponíveis de 1854 até o presente (6) em <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.ersst.v5.html>.

2.1.2 Índices dos Padrões Oceânicos
Os índices de eventos oceânicos são acessíveis em <https://psl.noaa.gov/enso/dashboard.html> e monitoram as regiões do Pacífico e Atlântico com base nas anomalias do TSM. Utilizamos índices do ENOS, do Índice do Atlântico Equatorial (MEA) e do Dipolo do Atlântico Tropical, que é calculado pela diferença entre as anomalias no Atlântico

Norte e Sul.

2.1.3 Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)
O PDSI, desenvolvido por Wayne Palmer em 1965, quantifica a severidade de secas e períodos úmidos com base em anomalias de umidade do solo. Os dados autocalibrados estão disponíveis em <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.pdsi.html>, abrangendo de 1948 a 2014, com resolução de 2,5° de latitude por 2,5° de longitude. Os valores do PDSI refletem desvios da normalidade, onde resultados negativos indicam seca, e positivos, excesso de umidade.

2.2 Metodologia

2.2.1 Funções Ortogonais Empíricas (FOE) (7)
Uma técnica de FOE foi utilizada para identificar modos de variabilidade das anomalias de TSM no Pacífico Tropical e Atlântico Tropical entre 1950 e 2022. Para avaliar a significância estatística, calculamos os graus de liberdade e testamos o t de Student, considerando correlações absolutas de 0,4 como significativas a 95%.

2.2.2 Correlação de Pearson e Transformada Wavelet
Aplicamos a Transformada Wavelet (8), Correlação de Pearson e Coerência aos Componentes Principais (CP) de cada modo oceânico selecionado. O CP, ou coeficiente de expansão, é uma série normalizada usada para identificar escalas de oscilação temporal. Analisamos o espectro de cada CP com a Transformada Wavelet, apresentando as escalas dominantes e o espectro de potência. A Coerência e fase de Ondeletas quantificam a coerência linear entre séries temporais não estacionárias, ajudando a identificar defasagens entre variáveis.

2.2.3 Padrões Espaciais com o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)

Ao correlacionar os CPs com o PDSI, identificamos como cada modo oceânico influencia a seca e a umidade em áreas específicas. O PDSI, que mede umidade do solo e seca, permite avaliar as condições climáticas resultantes da circulação atmosférica. Essa abordagem garante a robustez dos resultados e a validade das conclusões do estudo.

Utilizando o teste t de Student, verificou-se que as correlações absolutas iguais ou superiores a 0,4 são significativas ao nível de confiança de 95%, e utilizando o teste t de Student, verificou-se que as correlações absolutas iguais ou superiores a 0,4 são significativas ao nível de confiança de 95% para o presente estudo.

3. RESULTADOS

3.1 Pacífico Tropical

Os resultados mostram uma análise de Funções Ortogonais Empíricas (FOE) e seus Componentes Principais (CP) para o Pacífico Tropical, evidenciando padrões climáticos. O primeiro modo, que explica 53,9% da variância, apresenta uma anomalia positiva abrangente, especialmente no Pacífico Central (150°W a 120°W), típico de eventos de aquecimento como o El Niño. A Componente Principal 1 (CP1) reflete a evolução desse padrão entre 1950 e 2022, com alternância entre valores positivos (El Niño) e negativos (La Niña),

destacando eventos como 1982-83 e 1997-98.

O segundo modo (FOE2), responsável por 13,3% da variância, apresenta um padrão dipolar, com anomalias negativas a oeste e positivas a leste (120°W a 90°W), características do El Niño Oriental. A CP2 apresenta amplitudes menores, mas uma alternância de fases mais consistente em comparação à CP1.

Para o Pacífico Tropical a CP1 mostrou uma correlação significativa com as anomalias nas regiões Niño 4 (0,90), Niño 3.4 (0,89), Niño 3 (0,86) e Niño 1+2 (0,68). O CP2 apresentou correlações significativas com Niño 1+2 (0,65) e Niño 3 (0,50), mas não com Niño 3.4 (0,27) ou Niño 4 (-0,07). Para as correlações significativas a 95% de confiança, foi realizada uma análise de coerência e fase de ondeletas entre as séries CP1 e CP2 e os índices do ENSO. Dessa forma, a série CP1 (CP2) foi cruzada com os índices das regiões Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4 (Niño 1+2 e Niño 3) respectivamente.

Eventos importantes do El Niño Oriental, como os de 1982-83 e 1997-98, aparecem como picos positivos proeminentes. A coincidência desses eventos com os picos da CP1 sugere que esses grandes El Niños Centrais foram precedidos e/ou sucedido por eventos do tipo El Niño Oriental.

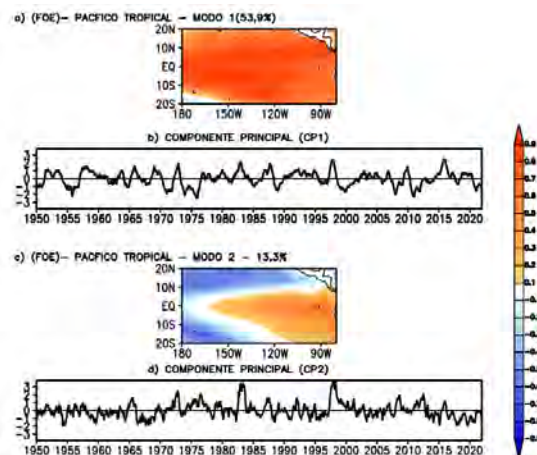


Figura 1 - Padrões espaciais para o primeiro e segundo modo de FOE da ATSM do Oceano Pacífico Tropical no período de 1950 a 2022. a) Modo1 b) Componente Principal do Modo 1. c) Modo 2. d) Componente Principal do Modo 2. Áreas em azul (vermelho) englobam valores negativos (positivos) e contornos (pontilhados) contínuos representam os valores negativos (positivos) significativos ao nível de confiança de 95% usando o teste t de Student.

As fases negativas dos eventos de La Niña Oriental ocorreram em 1954-55, 1959-60, 1967-68, 1987-88 e 2014-15, fazendo com que a região do Niño 1+2 apresentasse temperaturas abaixo da média antes do grande El Niño de 2015. O segundo modo de variabilidade tem menor amplitude, capturando flutuações intra-sazonais.

Uma análise emprega a Transformada Wavelet para investigar a variabilidade temporal do primeiro Componente Principal (CP1) do Pacífico Tropical, evidenciando ciclos em

diferentes escalas. A série temporal do CP1 mostra forte variabilidade interanual, com picos relacionados a eventos de El Niño e La Niña, especialmente após 1980, refletindo a intensificação das características ENOS. O Espectro de Potência de Wavelet revela que a maior energia ocorre em períodos de 2 a 8 anos, com picos entre 1960-2000 e após 2005.

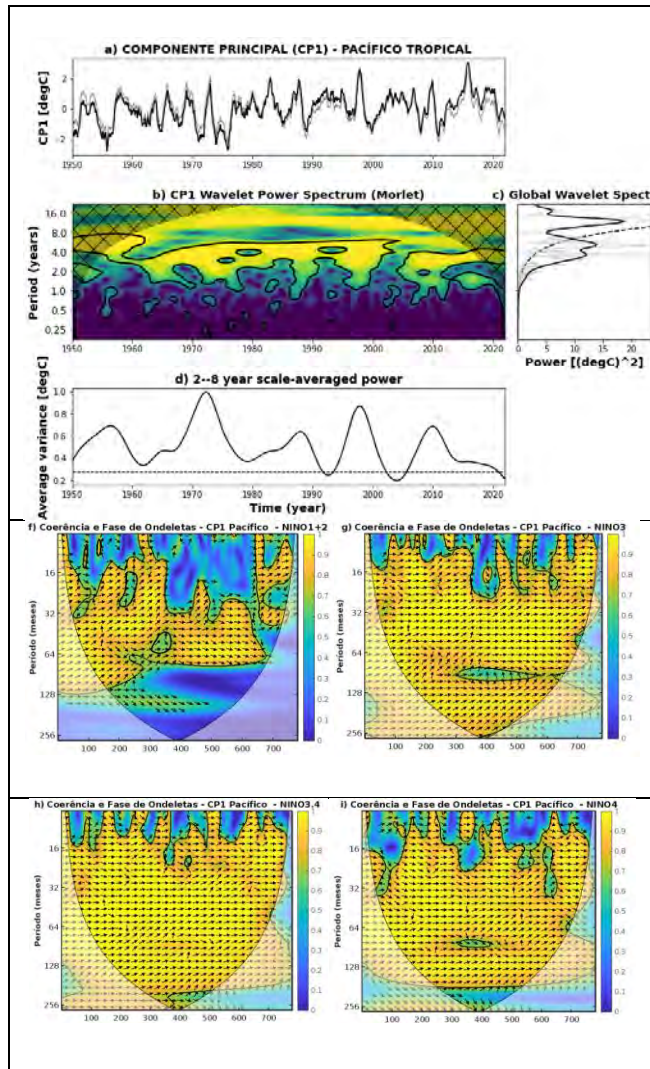


Figura 2 – Transformada em Wavelet para o Primeiro Modo do Pacífico Tropical a) Séries da CP1 original (linha preta) e normalizada (linha cinza); b) Espectro de Potência Local de Ondelela (EPL) para CP1; c) Espectro de Potência Global de Ondelela (EPG) de ATSM do Atlântico em unidades de variância da CP1, à direita da linha estão valores significativos ao nível de 95%. d) Variância Média para Escalas de 2 a 8 anos; f) Coerência e Fase entre a CP1 e o Índice Niño 1+2; g) Coerência e Fase entre a CP1 e o Índice Niño 3; h) Coerência e Fase entre a CP1 e o Índice Niño 3.4; i) Coerência e Fase entre a CP1 e o Índice Niño 4. Contornos contínuos englobam variâncias significativas ao nível de confiança de 95%, e a curva em Ω é o cone de influência.

Na análise de coerência e fase de wavelets, o CP1 apresentou fase com anomalias nas regiões Niño 3, 3.4 e 4 ao longo da

série histórica, enquanto na região Niño 1+2 teve coerência mais restrita, variando de bienal a cinco anos. A série temporal do CP2 revela variabilidade interanual mais frequente do que o CP1, com picos associados aos eventos do El Niño Central, e a Transformada Wavelet aplicada ao CP2 destaca uma concentração significativa na faixa de 1 a 4 anos.

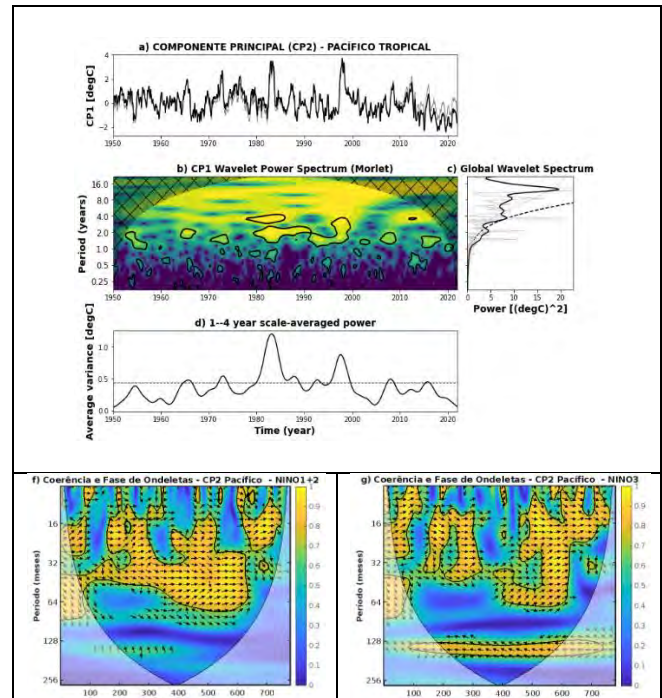


Figura 3 – Transformada em Wavelet para o Segundo Modo do Pacífico Tropical: a) Séries da CP2 original (linha preta) e normalizada (linha cinza); b) Espectro de Potência Local de Ondelela (EPL) para CP2; c) Espectro de Potência Global de Ondelela (EPG) de ATSM do Atlântico em unidades de variância da CP2, à direita da linha estão valores significativos ao nível de 95%. d) Variância Média para Escalas de 1 a 4 anos; f) Coerência e Fase entre a CP2 e o Índice Niño 1+2; g) Coerência e Fase entre a CP2 e o Índice Niño 3. Contornos contínuos englobam variâncias significativas ao nível de confiança de 95%, e a curva em Ω é o cone de influência.

O Espectro Wavelet Global (Figura 3c), que sintetiza a contribuição das diferentes escalas, confirma que a maior concentração de potência ocorre nesse mesmo intervalo. A potência média ajustada para a faixa de 1 a 4 anos (Figura 3d) destaca picos associados a eventos climáticos extremos, como os de 1965-66, 1972-73, 1982-83, 1987-88, 1991-92, 1997-98, 2008-2009 e 2015-16. Esses picos mostram que o CP2 capta a influência direta desses episódios, que impactam não apenas o clima global, mas também a variabilidade hidroclimática na Amazônia.

Uma análise de coerência e fase de ondeletas entre o CP2 e o índice Niño 1+2 (Figura 3f) revela uma forte ligação entre as séries, especialmente na escala do evento. Além disso, na Figura 3g, os resultados com o índice Niño 3 indicam que, embora a CP2 capture principalmente a variabilidade da parte

oriental do Pacífico, ela também reflete uma influência na região central.

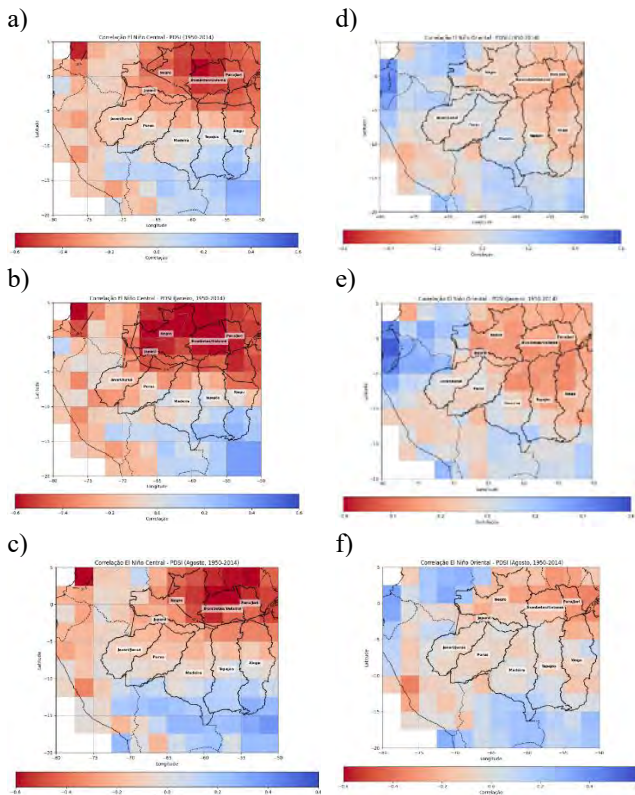


Figura 4 - Padrões de correlações entre o Índice de Severidade de seca de Palmer (PSI) o Pacífico Tropical: a) El Niño Central para Período de 1950 - 2014; b) El Niño Central em Janeiro; c) El Niño Central em Agosto d) El Niño Oriental para Período de 1950-2014; e) El Niño Oriental em Janeiro; f) El Niño Oriental em Agosto. Áreas em azul (vermelho) englobam valores positivos (negativos). Os contornos representam os valores significativos ao nível de confiança de 95% usando teste de t de Student.

Em resumo, o CP2 reflete a dinâmica caracterizada por ciclos mais curtos com conexões diretas com eventos climáticos extremos associados ao ENOS. A oscilação no CP2 ocorre em uma escala de frequência mais alta, com anomalias menos intensas e predominantemente posicionadas na posição oriental do Pacífico. Essa variabilidade tem implicações importantes para a previsão climática e o monitoramento dos impactos nas sub-regiões amazônicas, já que as mudanças nessas fases influenciam diretamente a distribuição de chuvas e a ocorrência de secas na região.

O padrão de correlação entre o El Niño Central (CP1) e o Índice de Seca de Palmer (PSI) nas sub-bacias amazônicas mostra uma resposta transparente. Sub-bacias como Javari, Japurá, Purus, Negro, Trombetas/Uatumã e Paru/Jari apresentam correlações negativas, quedas que enfrentam secas intensas durante eventos de El Niño Central. Em contraste, o sul da bacia amazônica exibe correlações

positivas, aumentando a umidade tanto na média anual quanto sazonal. As subbacias do Madeira, Tapajós e Xingu apresentam correlações erradas, com sinais negativos, fracos ao norte e positivos ao sul.

O El Niño Oriental, por sua vez, tem efeitos moderados e menos intensos nas áreas mais afetadas pelo El Niño Central, com correlações positivas na região oeste da Amazônia. Isso indica um aumento de umidade, enquanto em anos de La Niña Oriental pode ocorrer seca no Alto Rio Negro, especialmente em janeiro.

Em resumo, o El Niño Central causa impactos mais significativos e homogêneos, resultando em secas severas ao norte e leste, enquanto o sul é menos afetado ou beneficiado pela umidade. O El Niño Oriental apresenta um padrão variável, com efeitos menos intensos e distribuídos de forma heterogênea. Essas diferenças têm implicações para a previsão climática e a gestão de recursos nas subbacias amazônicas, ressaltando a importância de abordagens regionais adaptadas às características de cada modo climático.

4.2 Oceano Atlântico Tropical

As análises de Funções Ortogonais Empíricas (FOE) para a região do Atlântico (70W - 10E; 20°S-20°N) de 1950 a 2022 identificam modos de variabilidade que explicam cerca de 47,2% e 19,6% da variância total. As anomalias negativas dominam a bacia oceânica, com intensidade máxima próxima ao Equador, especialmente em 30°W, e os anos mais marcantes foram 1964, 1972, 1976, 1992, 2012 e 2021. Eventos quentes ocorreram em 1968, 1973, 1987, 1998 e 2010. O segundo modo (FOE 2) (Figura 5c) apresenta um padrão dipolar, com anomalias positivas no Atlântico Tropical Norte (centradas em 15°N e 40°W) e negativas no Atlântico Tropical Sul, especialmente entre 15°S e 10°W. Os picos positivos ocorreram em 1973, 1984, 1988, 1993 e 2019, enquanto os negativos estão associados a eventos de Dipolo Negativo, como em 1958, 1970, 1981 e 2005.

A Componente Principal 1 (CP1) do Atlântico correlaciona-se significativamente com anomalias no Modo Atlântico Equatorial (correlação de -0,98), no Niño do Atlântico (-0,77), no Atlântico Tropical Sul (-0,80) e no Atlântico Tropical Norte (-0,66). A CP2 correlaciona-se com o Dipolo do Atlântico (0,97) e também com anomalias no Niño do Atlântico (-0,77), no Atlântico Tropical Norte (0,68) e no Atlântico Tropical Sul (-0,52).

Na Figura 6 a) são apresentadas as séries da CP1 original (linha preta) e normalizada (linha cinza). A análise espectral de ondaleta da CP1 do Atlântico apresentou um pico no espectro global de ondaleta ocorrendo aproximadamente na escala de 1 a 4 anos Figura 6 (c e d). O sinal desta escala não é apresentado de forma significativa para série inteira, porém são notados picos de energia para essa variabilidade por volta de 1960, 1980 e meados de 2000, indicando que em certas épocas a variabilidade interanual foi mais intensa Figura 6 b). O ciclo de alta potência indica que esses picos parecem se repetir a cada 20 anos, o que pode indicar um ciclo ou padrão

multidecadal associado ao Atlântico Tropical.

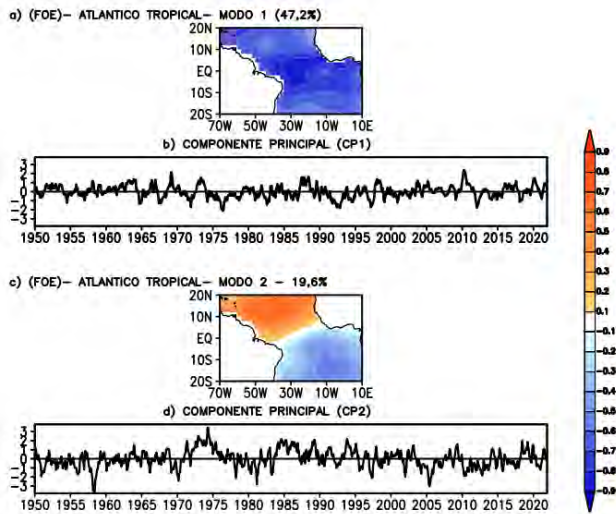


Figura 5 - Padrões espaciais para o primeiro e segundo modo de FOF da ATSM do Oceano Atlântico Tropical no período de 1950 a 2022. a) modo 1 b) Componente Principal do modo 1. c) modo 2. d) Componente Principal do modo 2. Áreas em azul (vermelho) englobam valores negativos (positivos) e contornos (pontilhados) contínuos representam os valores negativos (positivos) significativos ao nível de confiança de 95% usando o teste t de Student.

A Figura 6f mostra o diagrama de coerência e fase de ondeletas entre o Componente Principal 1 (CP1) do Atlântico Tropical e o Modo de Variabilidade do Atlântico Equatorial (MEA). A coerência indica uma forte conexão entre as séries em escalas de 16 a 128 meses (aproximadamente 1,5 a 10 anos). No entanto, entre 16 e 64 meses, CP1 e MEA estão em fases opostas, reflectindo a fase fria do evento, enquanto nas escalas mais longas (64 a 128 meses) há uma defasagem parcial. Isso destaca a importância do MEA na variabilidade interanual e plurianual do A

A Figura 7a apresenta as séries da CP2 original e normalizada, mostrando flutuações intensas entre 1970-1980 e 2000 até os anos recentes, períodos de maior variabilidade do Atlântico Tropical. A análise espectral de ondeleta (Figura 7b) revela um pico na escala de 6 meses a 1 ano, com picos de energia nos períodos de 1954-1961, 1968-1972, 1978-1985, 1989-1992, 1995-1999, 2004-2005, 2009-2011.

Um padrão de variabilidade forte é observado entre 8 e 16 anos, especialmente antes de 1970, destacando a relevância do modo CP2 em escalas multianuais e decadais, embora sua potência não seja constante. A Figura 7c destaca picos de potência em torno de 6 meses a 1 ano, enquanto a Figura 7d mostra a variação da potência média para essa escala ao longo do tempo, com picos notáveis em 1970, 1982, 2009, 2015 e 2020, mostrando oscilações mais intensas associadas às mudanças rápidas na temperatura da superfície do Atlântico Tropical.

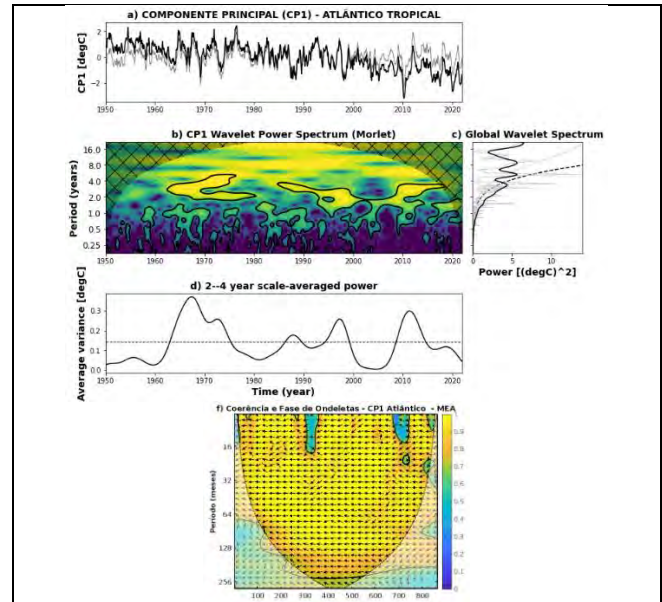


Figura 6 – Transformada em Wavelet para o Primeiro Modo do Atlântico Tropical; a) Série da CP1 original (linha preta) e normalizada (linha cinza); b) Espectro de Potência Local de Ondeleta (EPL) para CP2; (c) Espectro de Potência Global de Ondeleta (EPG) de ATSM do Atlântico em unidades de variância da CP2, à direita da linha estão valores significativos ao nível de 95%. d) Variância Média para Escalas de 1 a 4 anos; f) Coerência e Fase entre a CP2 e o Índice Nino 1+2; g) Coerência e Fase entre a CP1 e o Índice Nino3. Contornos contínuos englobam variâncias significativas ao nível de confiança de 95%, e a curva em Ω é o cone de influência.

O comportamento oscilatório da série ao longo do tempo sugere uma natureza cíclica das flutuações em escalas intrasazonais, interanuais e decadais, mas sem uma periodicidade rígida. Isso sugere que o segundo modo de variabilidade é caracterizado por mudanças rápidas e por oscilações multianuais. Essa análise oferece uma visão detalhada das escalas temporais nas quais o CP2 impacta o Atlântico Tropical, podendo ser relevante para entender a resposta rápida deste modo a fenômenos climáticos regionais e globais. A variação é bastante irregular, indicando que essa faixa temporal pode ser afetada por fatores externos e com interações rápidas.

A análise da coerência e fase de ondeletas revela que o Componente Principal 2 (CP2) do Atlântico está sincronizado com o Dipolo Positivo em escalas de tempo longas (64 a 128 meses), diminuindo que o dipolo influencia as variações climáticas. No entanto, há uma defasagem parcial em alguns momentos, salientando que a resposta do CP2 pode atrasar as reações associadas ao dipolo. O Componente Principal 1 (CP1) do Atlântico apresenta uma forte manifestação com anomalias na região do Modo Atlântico Equatorial (MEA), além de correlações especiais com outras regiões do Atlântico. O CP2 também é fortemente correlacionado com o Dipolo do Atlântico. Essas oscilações influenciam não apenas padrões sazonais, mas também a formação de ciclones

tropicais, eventos de seca severa e a dinâmica climática regional, como mudanças na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e na circulação de Walker e Hadley

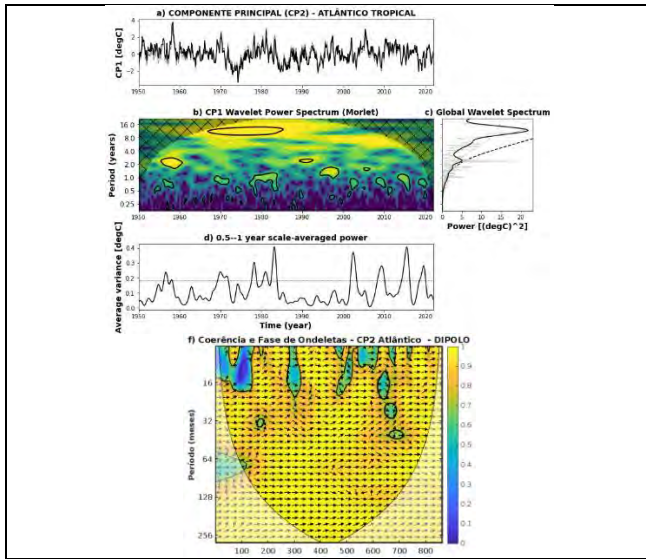


Figura 7 – Transformada em Wavelet para o Segundo Modo do Atlântico Tropical; a) Séries da CP2 original (linha preta) e normalizada (linha cinza); b) Espectro de Potência Local de Ondeleta (EPL) para CP2; (c) Espectro de Potência Global de Ondeleta (EPG) de ATSM do Atlântico em unidades de variância da CP2, à direita da linha estão valores significativos ao nível de 95%. d) Variância Média para Escalas de 1 a 4 anos; f) Coerência e Fase de Ondeleitas - CP2 Atlântico - DIPÓLO

Os padrões de correlação entre o Modo Equatorial Atlântico (MEA) Frio, o Dipolo Positivo do Atlântico e o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) de 1950 a 2014 são apresentados na Figura 8. Em anos de MEA Frio, observe-se magnitude positiva na maior parte da Amazônia, diminuindo condições mais úmidas, especialmente durante o pico da estação chuvosa, beneficiando as sub-bacias do Javari-Juruá, Purus, Madeira, Japurá e Negro. Em agosto, no entanto, as correlações se tornam negativas no centro e nordeste da bacia amazônica, diminuindo condições mais secas, especialmente nas regiões do Médio e Baixo Rio Negro, Trombetas/Uatumã e Paru-Jari. Ao sul, o resfriamento do Atlântico Tropical pode manter a umidade em áreas como Purus e Madeira.

O MEA Frio tem um efeito sazonal na Amazônia, promovendo umidade em janeiro e secas em agosto. Já o Dipolo Positivo do Atlântico apresenta correlações negativas na média anual, indicando condições secas em praticamente toda a Amazônia, especialmente nas bacias do Japurá, Purus, Madeira e Trombetas/Uatumã, com impactos mais intensos antes da estação seca.

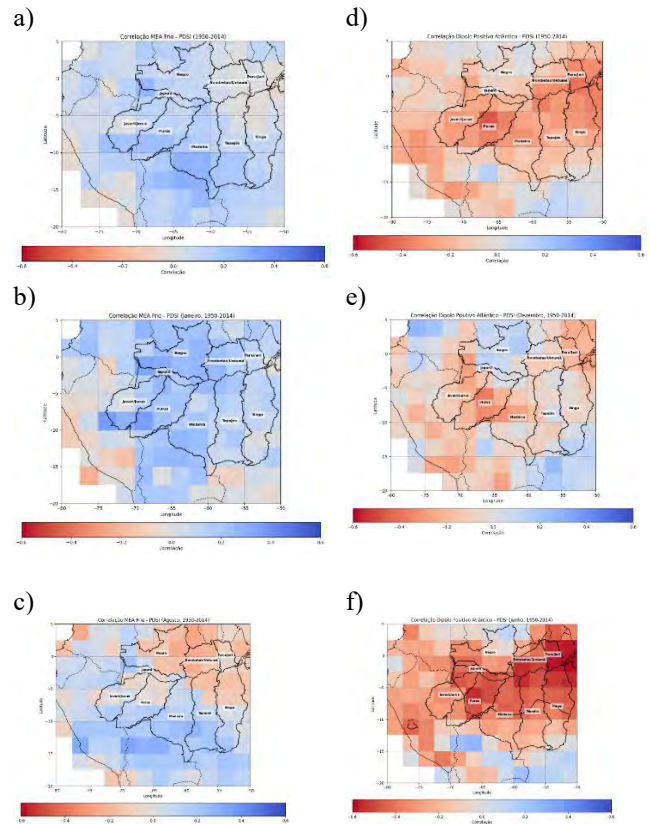


Figura 8 - Padrões de correlações entre o Índice de Severidade de seca de Palmer (PDSI) o Atlântico Tropical: a) MEA Frio para Período de 1950 - 2014; b) MEA Frio em Janeiro; c) MEA Frio em Agosto d) Dipolo Positivo do Atlântico para Período de 1950-2014; e) Dipolo Positivo do Atlântico em Dezembro; f) Dipolo Positivo do Atlântico em Junho. Áreas em azul (vermelho) englobam valores positivos (negativos). Os contornos representam os valores significativos ao nível de confiança de 95% usando teste o t de Student.

Esses padrões indicam que os modos do Atlântico afetam sazonalmente a umidade na Amazônia, com o Dipolo Positivo associado às secas e o MEA Frio à umidade, sendo cruciais para a previsão climática e a gestão de recursos hídricos na região. A compreensão dessas dinâmicas é fundamental para desenvolver estratégias adaptadas e mitigar os impactos sazonais de cada modo climático.

4. DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo confirmam a influência significativa dos oceanos Pacífico e Atlântico na variabilidade climática da Amazônia, especialmente em eventos de seca e umidade nas sub-bacias. A Função Ortogonal Empírica (FOE) ajudou a identificar padrões de anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) no Pacífico e no Atlântico, associando-os a períodos secos e úmidos na região. Embora os oceanos estejam em conjunto na modulação do clima amazônico, seus efeitos variam

conforme o modo de variabilidade e as características das subbacias.

No Pacífico, o El Niño Central (primeiro modo FOE) é o principal responsável pelas secas prolongadas, afetando subbacias no norte e centro da Amazônia, como Japurá e Rio Negro. Os eventos severos de El Niño, como os de 1982-83 e 1997-98, são significativos para déficits hídricos. O El Niño Oriental, por sua vez, causa efeitos mais localizados e moderados, com sensibilidade variando conforme a sub-bacia.

No Atlântico, o Modo Equatorial Atlântico (MEA) Frio favorece condições úmidas durante a estação chuvosa, mas pode induzir secas moderadas na transição para a estação seca, especialmente nas sub-bacias do Médio e Baixo Rio Negro. Em contrapartida, bacias como Purus e Madeira são menos sensíveis a essas flutuações, mantendo alta umidade. O Dipolo Positivo tem um impacto sazonal, promovendo umidade nas sub-bacias do Japurá e Negro durante a estação chuvosa, mas intensificando as secas na transição para a estação seca.

O Pacífico gera amplas secas, enquanto o Atlântico modula esses eventos, podendo amplificar ou atenuar os impactos. Para a gestão hídrica, é essencial considerar essas influências oceânicas para melhorar a previsão e mitigação de eventos extremos, especialmente com o aumento projetado na frequência e intensidade de secas devido às mudanças climáticas, o que pode orientar políticas públicas para a adaptação da infraestrutura e conservação dos recursos hídricos.

5. CONCLUSÕES

Os resultados ressaltam a complexidade das interações climáticas entre o Pacífico e o Atlântico Tropical, evidenciando sua influência na variabilidade climática regional e nos eventos extremos na Amazônia.

A análise das Funções Ortogonais Empíricas (FOE) e dos Componentes Principais (CP) inclui dois modos de aquecimento associados ao El Niño-Oscilação Sul (ENOS): o El Niño Central (Modoki), que intensifica secas nas subbacias amazônicas, e o El Niño Oriental (Canônico), ligado a grandes eventos históricos, afetando a distribuição das secas, especialmente na bacia do Alto Rio Negro.

A diferença entre esses modos é consistente com a literatura, embora padrões de variabilidade espaço-temporal necessitem de mais investigação para atualização e mitigação de impactos climáticos.

No Atlântico Tropical, os principais modos são o Modo Equatorial Atlântico (MEA) e o Dipolo do Atlântico. O MEA Frio aumenta a umidade na estação chuvosa em áreas como Purus e Madeira, mas pode agravar secas no Médio e Baixo Rio Negro durante a transição para a estação seca. O Dipolo Positivo está associado a secas severas, especialmente nas bacias do Purus, Japurá e Trombetas, durante a transição para a estação seca.

Esses padrões operam em diferentes escalas temporais: o El Niño Central de 2-8 anos, o El Niño Oriental de 1-4 anos,

o MEA de 2 a 4 anos e o Dipolo com ciclos curtos de 6 meses a 1 ano. A variabilidade do Pacífico e do Atlântico afeta sistemas atmosféricos como o ZCIT e as circulações de Walker e Hadley, impactando o clima amazônico.

Compreender a interação entre ENOS e o Atlântico é crucial para prever a intensidade e duração de eventos climáticos extremos na Amazônia. A resposta heterogênea das sub-bacias demonstra a necessidade de monitoramento contínuo e análises robustas para melhorar a gestão de recursos hídricos e a mitigação das secas. O desenvolvimento de modelos climáticos mais precisos, que considerem essas interações, é essencial para o planejamento ambiental e adaptação às mudanças climáticas futuras, destacando a importância de considerar a influência simultânea dos oceanos na gestão hídrica.

8. REFERÊNCIAS

1. Garcia BN, Libonati R, Nunes AMB. Extreme drought events over the Amazon Basin: The perspective from the reconstruction of South American Hydroclimate. *Water* (Switzerland). 2018;10(11).
2. Espinoza JC, Ronchail J, Marengo JA, Segura H. Contrasting North-South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Clim Dyn* [Internet]. 2019;52(9–10):5413–30. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>
3. Espinoza JC, Marengo JA, Schongart J, Jimenez JC. The new historical flood of 2021 in the Amazon River compared to major floods of the 21st century: Atmospheric features in the context of the intensification of floods. *Weather Clim Extrem*. 2022;35.
4. Cox PM, Harris PP, Huntingford C, Betts RA, Collins M, Jones CD, et al. Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution. *Nature*. 2008;453(7192):212–5.
5. Marca-Zevallos MJ, Moulatlet GM, Sousa TR, Schiatti J, Coelho L de S, Ramos JF, et al. Local hydrological conditions influence tree diversity and composition across the Amazon basin. *Ecography*. 2022;2022(11).
6. Smith TM, Reynolds RW, Peterson TC, Lawrimore J. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880-2006). *J Clim*. 2008;21(10):2283–96.
7. North GR, Bell TL, Cahalan RF, Moeng FJ. Sampling Errors in the Estimation of Empirical Orthogonal Functions. Vol. 110, *Monthly Weather Review*. 1982. p. 699–706.
8. Alexandridis AK, Zapranis AD. Wavelet neural networks: a practical guide. *Neural Netw* [Internet]. 2013;42:1–27. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23411153>