TELECONEXÕES ATMOSFÉRICAS E VAZÃO FLUVIAL NA BACIA AMAZÔNICA BRASILEIRA POR MEIO DE MAPAS DE CORRELAÇÃO LINEAR[1]

ATMOSPHERIC TELECONNECTIONS AND STREAMFLOWS IN THE BRAZILIAN AMAZON BASIN USING LINEAR CORRELATION MAPS

TELECONEXIONES ATMOSFÉRICAS Y FLUJO DE RÍOS EN LA CUENCA AMAZÓNICA BRASILEÑA UTILIZANDO MAPAS DE CORRELACIÓN LINEAL

Leila Limberger
Doutora. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste.
leila.limberger@unioeste.br

Maria Elisa Siqueira Silva
Docente. Universidade de São Paulo - USP
elisasiq@usp.br

RESUMO

A presente pesquisa busca compreender como variados padrões de teleconexões atmosféricas atingem diferentes áreas da bacia amazônica brasileira. Para isso, foram utilizadas as técnicas estatísticas de análise de cluster para definição de áreas homogêneas de variabilidade de vazão dos rios amazônicos. Foram definidas cinco sub-regiões: Norte, Amazonas-Foz, Oeste, Sul e Central. Para analisar a associação entre a variabilidade da vazão e sua associação com anomalias da temperatura da superfície do mar (TSM) global, foram calculados os mapas de correlação linear com defasagem temporal entre as variáveis para as sub-regiões Norte e Sul. As duas sub-regiões apresentaram valores distintos nos mapas de correlação linear com defasagem temporal, indicando que a aplicação dessa técnica é adequada para a identificação de áreas oceânicas correlacionadas com variáveis hidrometeorológicas nos continentes. A sub-região Norte apresentou associação maior com o Pacífico, enquanto a sub-região Sul, com o Atlântico.

Palavras–chave: análise de cluster; sub-região Norte; sub-região Sul; correlação linear; temperatura da superfície do mar.

[1] Esse artigo é resultado e contém partes da tese desenvolvida pela primeira autora, e orientada pela segunda autora. A referência completa é Limberger, L. (2015). *Variabilidade da vazão de regiões homogêneas da bacia hidrográfica amazônica brasileira: teleconexões com temperatura da superfície do mar (TSM) de 1976-2010.* Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geografia Física da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.

ABSTRACT

This paper analyzes how different patterns of atmospheric teleconnections affect diverse areas of the Brazilian Amazon basin. To that end, statistical techniques of cluster analysis were used to define homogeneous areas of variability in the flow of Amazon rivers. Five sub-regions were defined: North, Amazon-Mouth, West, South and Central. To understand the association between flow variability and its association with global sea surface temperature (SST) anomalies, linear correlation maps with time lag between the variables for the North and South subregions were calculated. Both subregions showed distinct values in the linear correlation maps with time lag, indicating that the application of this technique is appropriate for identifying oceanic areas correlated with hydrometeorological variables on the continents. The North sub-region displayed a greater association with the Pacific, while the South sub-region with the Atlantic.

Keywords: cluster analysis; North sub-region; South sub-region; linear correlation; sea surface temperature.

RESUMEN

Esta investigación analiza como distintos patrones de teleconexiones atmosféricas afectan diversas áreas de la cuenca del río Amazonas brasileño. Para ello, se utilizaron técnicas estadísticas de análisis de conglomerados para definir áreas homogéneas de variabilidad del flujo de los ríos amazónicos. Se definieron cinco subregiones: Norte, Amazonas-Desembocadura; Oeste, Sur y Central. Para comprender la asociación entre la variabilidad del flujo y su asociación con anomalías de la temperatura global de la superficie del mar (TSM), se calcularon mapas de correlación lineal con tiempo de retardo entre las variables para las subregiones Norte y Sur. Ambas subregiones mostraron valores diferentes en los mapas de correlación lineal con tiempo de retardo, lo que indica que la aplicación de esta técnica es adecuada para identificar áreas oceánicas correlacionadas con variables hidrometeorológicas en los continentes. La subregión Norte se asoció más con el Pacífico, mientras que la subregión Sur, con el Atlántico.

Palabras clave: análisis de conglomerados; subregión Norte; subregión Sur; correlación lineal; temperatura de la superficie del mar.

INTRODUÇÃO

O sistema climático (ou sistema superfície-atmosfera - SSA) é composto por cinco elementos básicos, sendo: a atmosfera, o oceano, a criosfera, os continentes com

sua hidrologia e biosfera, todos interagindo em processos de retroalimentação positiva ou negativa (KAGAN, 1995). Dentre esses elementos, os oceanos se destacam por cobrirem a maior parte da superfície terrestre e participarem de forma significativa no armazenamento e trocas energéticas com a atmosfera. Segundo Wells (1998, p. 320) "todas as escalas de movimentação atmosférica são envolvidas pela transferência de energia entre oceano e atmosfera"; por isso, a temperatura da superfície do mar responde pela variabilidade de muitos fenômenos atmosféricos, direta ou indiretamente.

Portanto, identificar anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) torna-se chave para compreender fenômenos atmosféricos, já que o oceano é o grande responsável pela variabilidade climática da circulação atmosférica, seja nos trópicos ou nas altas latitudes. As alterações de TSM e seus reflexos na atmosfera podem se constituir tanto de interações ar-mar anômalas ou mudanças sazonais da quantidade de energia, “todavia, uma vez que um evento de interação ar-mar é desenvolvido, o oceano tenderá a manter o padrão por um período de um a alguns meses” (WELLS, 1998, p. 326).

Alterações na superfície do mar podem influenciar anomalias atmosféricas em locais bastante distantes da anomalia oceânica original, ou podem ainda ter efeitos globais. Mas os padrões de variabilidade de TSM nas escalas interanuais ou maiores são resultado de uma combinação de processos atmosféricos e oceânicos (DESER *et al*., 2010). Analisando-se a questão atmosférica deve-se considerar a velocidade do vento, nebulosidade e umidade como reguladores da troca de energia com a superfície do mar. Já quando se analisa o oceano, o transporte de calor pelas correntes marítimas, a mistura vertical e profundidade da camada limite afetam a TSM. A associação entre a variabilidade de TSM e a variabilidade climática em algum ponto remoto do planeta é conhecida como "teleconexão" pela literatura meteorológica (DESER *et al*., 2010).

Teleconexão refere-se a um "recorrente e persistente padrão de anomalia de pressão e circulação de grande escala que cobre vastas áreas geográficas" (AMBRIZZI, 2003, p. 1). Este conceito é aceito na atualidade de forma ampla e pode ser considerado como um retrato da evolução da compreensão das interações entre oceano e atmosfera. Os padrões de teleconexão são, normalmente, de escalas planetárias, envolvendo oceanos e continentes, cobrindo distâncias da ordem de milhares de

quilômetros e apresentam estruturas de padrões de onda geograficamente dependentes (GRIMM e AMBRIZZI, 2009).

Há pelo menos dois séculos são verificados eventos onde alterações nas condições dos oceanos repercutem na atmosfera continental, ou mesmo condições "inversas" são verificadas em dois locais diferentes no globo; Ambrizzi (2003) cita o exemplo do missionário Saabye, da Groenlândia, que notou tendências contrárias de temperatura entre o norte da Europa e a Groenlândia. Mas somente em 1935, o termo "teleconexão" foi utilizado pela primeira vez por Anders Angstrom. A ligação entre pressão ao nível do mar, temperatura do ar e do mar e precipitação em alguns locais do globo, mostrando um padrão de teleconexão global, estendendo-se pelo hemisfério sul e grande parte do hemisfério norte foi feita por Walker (1923, 1924, 1928), e Walker e Bliss (1932, 1937) que definiram a "Oscilação Sul" (HOREL e WALLACE, 1981; AMBRIZZI, 2003).

Os estudos de teleconexão têm evoluído desde então, combinados com a evolução da termodinâmica, da computação, da coleta e armazenamento de dados meteorológicos e especialmente com a maior compreensão sobre a propagação de ondas planetárias. Vale destacar os trabalhos de Hoskins e Karoly (1981) e Simmons (1982), que dentre outras contribuições, mostram a propagação de ondas em um modelo barotrópico, a atuação do jato subtropical de inverno como "guia de onda" e os principais pontos de distúrbios ligados às regiões de saídas dos jatos. Juntamente, destaca-se o trabalho de Horel e Wallace (1981) que mostrou a possibilidade de propagação de trens de onda (teleconexão) do equador para as latitudes médias. Estas ondas se propagariam em direção aos polos, curvando-se para leste e finalmente ao longo do equador, formando uma "rota em grande círculo".

Wallace e Gutzler (1981) são considerados precursores de uma série de outras pesquisas que firmam cientificamente o termo "teleconexão". Os autores organizaram um conjunto de técnicas para o estudo dos fenômenos de teleconexão e analisaram a correlação entre a pressão ao nível do mar e o campo de altura geopotencial em 500 hPa durante o inverno do hemisfério. Como forma de apresentar as correlações, os autores

inovaram com a apresentação de **mapas de correlação**, muito utilizados posteriormente para esse tipo de estudos.

Blackmon *et al.* (1984a) encontraram resultados sustentados por uma série de estudos que estavam sendo produzidos na época (HOSKINS [1983]; HOSKINS e KAROLY [1981]; HOSKINS *et al.* [1977]; SIMMONS *et al.* [1983], dentre outros) e que ampliavam o conhecimento sobre o comportamento das ondas planetárias de Rossby. O principal resultado do trabalho de Blackmon *et al.* (1984a) foi compreender a estrutura e o padrão de deslocamento de ondas em eventos com escalas temporais diferentes (maiores de 30 dias, de 10 a 30 dias e de 2,5 a 6 dias). Em um artigo do mesmo ano, Blackmon *et al.* (1984b) acrescentaram uma técnica aos estudos de teleconexão: **a correlação com defasagem temporal (*lag-correlation*)**, uma técnica que contribui sobremaneira para a compreensão dos efeitos de anomalias de TSM sobre diversas regiões do globo com o passar do tempo.

A consolidação dessa técnica de elaboração de mapas de correlação linear é tamanha que é considerada, juntamente com a técnica de Funções Ortogonais Empíricas (FOE) como as principais a serem utilizadas em estudos de teleconexões atmosféricas (CAVALCANTI e AMBRIZZI, 2021).

Embora muitos estudiosos tenham se dedicado a buscar mais esclarecimentos de como se dá a interação oceano-atmosfera, e quais os principais padrões de anomalias de TSM que afetam a variabilidade do clima global, ainda restam inúmeras lacunas nesse âmbito do conhecimento. Uma delas é em relação aos efeitos combinados de diferentes áreas de TSM com anomalias ativas no mesmo período, e para isso, é necessário o estudo da variabilidade de TSM global, sem priorizar somente algumas áreas já exploradas pela literatura.

Visando ampliar o conhecimento científico nessa carência identificada, no presente trabalho serão discutidas as principais alterações de TSM que podem causar anomalias de precipitação na bacia amazônica brasileira. O foco principal é apresentar a técnica de mapas de correlação linear com defasagem temporal aplicada aos dados de vazão da bacia hidrográfica amazônica brasileira. O objetivo é compreender como

diferentes padrões de teleconexões atmosféricas atingem diferentes áreas da bacia amazônica brasileira.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados no presente estudo foram:

a) vazão mensal para a bacia amazônica, obtidos do sistema Hidroweb/ANA (Agência Nacional de Águas) para o período de 1976-2010;

b) dados mensais de TSM da Reanálise I do NCEP/NCAR (KALNAY *et al.*, 1996), com resolução espacial de dois graus, originalmente obtidos para o período de janeiro de 1854 a julho de 2013. Esses dados foram obtidos pelo *site* do *Climatic Data Center/National Oceanic and Atmospheric Administration*, CDC/NOAA;

Os dados de vazão do Hidroweb/ANA foram consistidos, sendo adotadas para a presente análise somente as estações que apresentaram, no mínimo, 20 anos de registros (não necessariamente de forma sequencial), com não mais do que 30% de dados faltantes em toda a série histórica (1976 a 2010). Os dados faltantes foram preenchidos com a climatologia mensal.

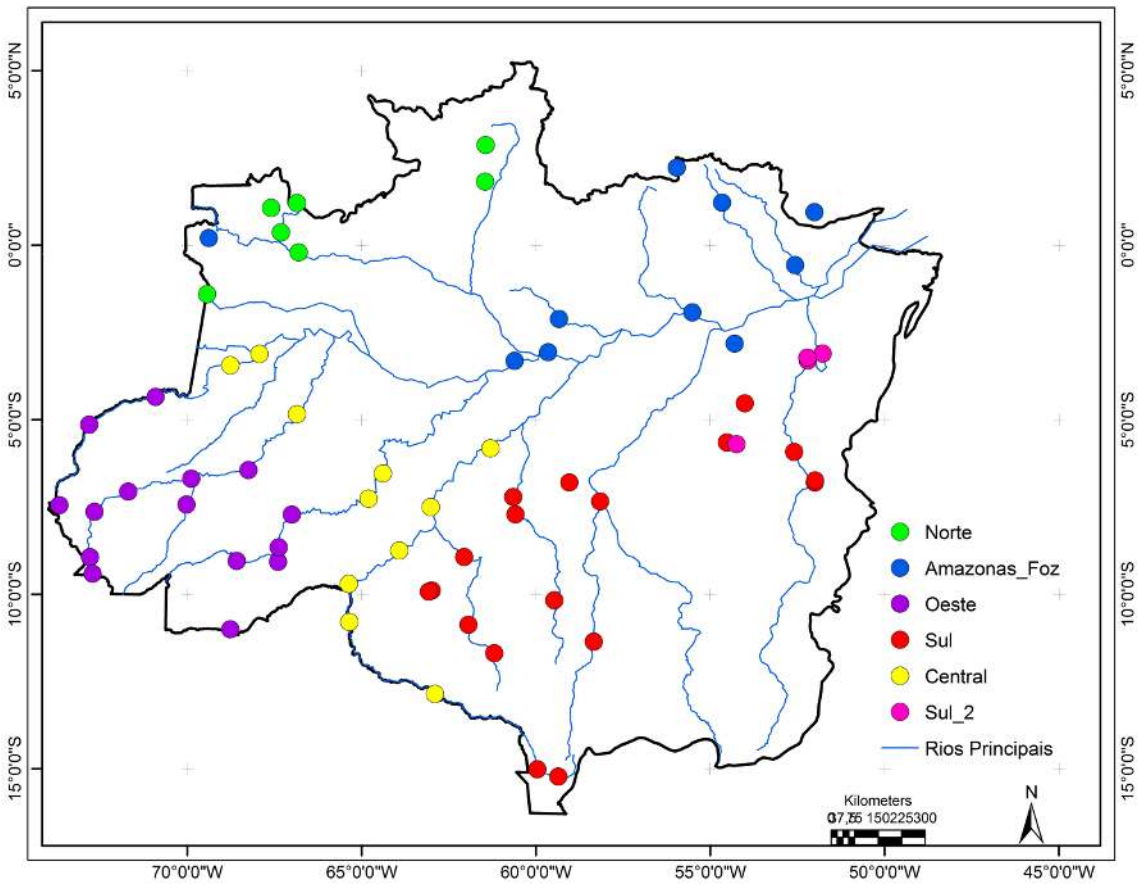
A vazão, de modo geral, é obtida a partir do nível das águas, observado com a ajuda da régua linimétrica ou registrado pelo linígrafo. "A relação nível-vazão deve ser estabelecida por medições diretas em diversas situações de descarga, podendo, em geral, ser consubstanciada graficamente pela curva de descarga ou curva-chave da seção. Esta relação pode ser unívoca ou não, constante ou variável com o tempo, dependendo das condições locais." (PINTO, 1976, p. 182). No entanto, através do material disponibilizado pela ANA, em seu *site*, não foi possível identificar qual o método utilizado para coletar os dados, tanto de precipitação quanto de vazão. Mas como se trata de uma rede ampla, com vários períodos em que os dados começaram a ser registrados, acredita-se que sejam coletados através de métodos diferenciados e disponibilizados aos usuários.

Sub-regiões Homogêneas - Análise De Cluster

Compreendendo que a análise pontual de postos de vazão com a TSM global poderia produzir correlações artificiais, uma vez que a bacia cobre uma vasta extensão do território brasileiro, o uso dos dados de apenas um posto fluviométrico poderia caracterizar a variabilidade não climática, mas oriunda da variabilidade local, relativa às particularidades do terreno, do uso da terra ou de outros aspectos não diretamente ligados ao clima, optou-se por analisar os dados de vazão de forma espacializada. Para tanto, foi necessário adotar a técnica de Análise de Agrupamento (*Cluster Analysis*), uma análise multivariada, cujo objetivo é "separar dados em grupos que não são conhecidos de antemão" (WILKS, 2006, p. 549). Segundo Hair *et al.* (2005, p. 391) a análise de agrupamento "é muito mais uma arte do que uma ciência", pois "é a única técnica multivariada que não estima a variável estatística e empiricamente, mas ao invés disso usa a variável estatística como especificada pelo pesquisador" (HAIR *et al*., 2005, p. 384). Por esse motivo, é muito importante ao pesquisador conhecer os dados para poder diferenciar um "bom agrupamento" de um "mau agrupamento". O método definido para realizar a análise de agrupamento foi o Ward por correlação de Pearson, que é a medida da soma dos quadrados dos desvios em relação à média entre os agrupamentos. A aplicação desta técnica aos dados de vazão ocorreu pela utilização do software *Statistica* 8.0 da *StatSoft*. Pela análise de agrupamento aplicada aos dados de vazão, foi possível definir 5 (cinco) grupos, considerando-se o terceiro nível de agrupamento.

A espacialização dos postos fluviométricos, feita através do uso do software *ArcGis*, associada aos resultados da análise de agrupamento, permitiu a subdivisão da bacia Amazônica em cinco sub-regiões, tal como indicado na Figura 1. As cinco sub-regiões de vazão para a bacia amazônica brasileira foram denominadas: Norte, Amazonas-Foz, Oeste, Sul e Central.

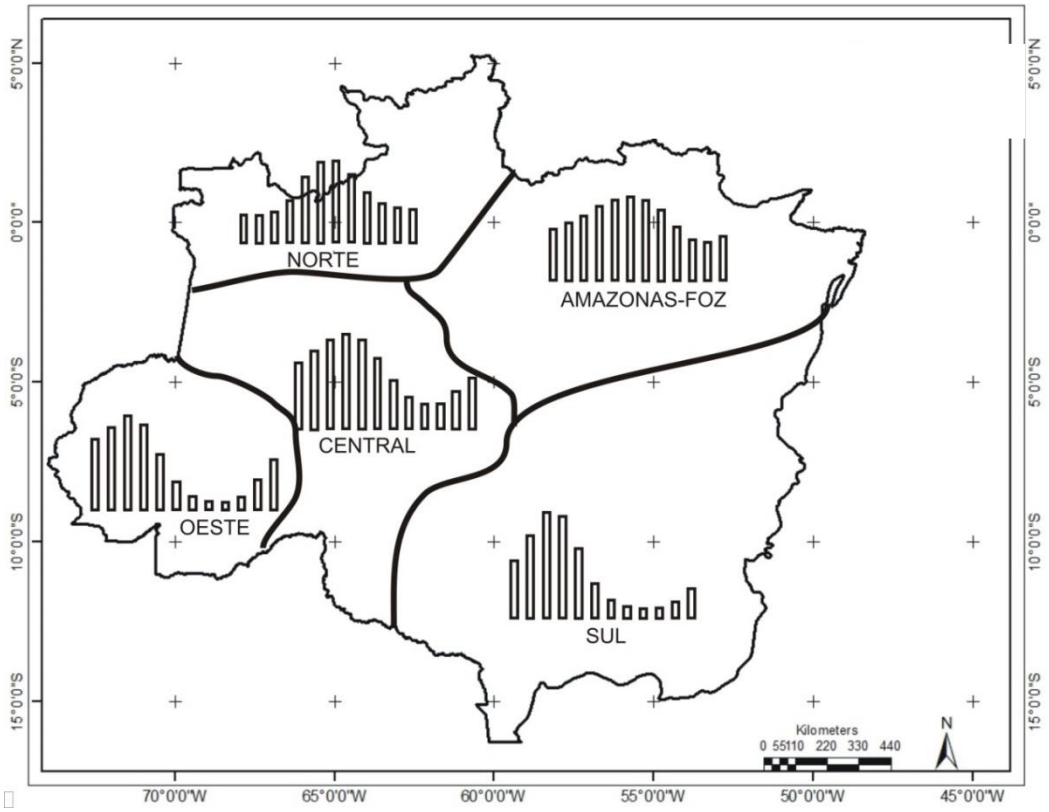
Figura 1 - Espacialização dos resultados da análise de agrupamento para a variável vazão em cinco sub-regiões: Norte, Amazonas-Foz, Oeste, Sul, Central e Sul_2.



Fonte: Dados mensais obtidos do sistema Hidroweb/ANA, para o período de 1976 a 2010.

A definição dos limites das sub-regiões foi feita com o auxílio do software *Corel Draw 12*, tendo sido considerados, qualitativamente, a delimitação das bacias hidrográficas e os resultados das análises de agrupamento, tanto de vazão quanto de precipitação. O resultado é apresentado na Figura 2, indicando a média do ciclo anual da vazão para cada sub-região.

Figura 2 – Vazão média anual para cada sub-região da bacia amazônica brasileira para o período de 1976 a 2010.



Mapas de Correlação Linear

Os mapas de correlação linear começaram a ser usados nos estudos sobre teleconexões a partir da década de 1980, inicialmente por Wallace e Gutzler (1981). Na presente pesquisa, esses mapas mostram onde ocorrem as maiores correlações de TSM com relação à variabilidade da vazão de cada sub-região da bacia Amazônica.

A correlação linear entre a TSM global e os dados de vazão média para cada sub-região foi realizada por meio do software *NCAR Command Language* (NCL). Os cálculos de correlação linear foram realizados entre as séries temporais com (*lag* 1 a 9) e sem defasagem temporal (*lag* 0). No caso de defasagem temporal, a série de vazão foi sempre deslocada à frente da série de TSM. A significância estatística dos valores de correlação linear foi avaliada pela aplicação do teste-t para significâncias superiores a 90, 95 e 99%.

Para a realização desse cálculo foi removida a tendência e a sazonalidade dos dados através dos comandos *dtrend_leftdim* e *calcMonAnomTLL*, respectivamente, no software *NCL*. A sazonalidade foi removida para que fossem correlacionadas somente a

variabilidade interanual, tanto da TSM quanto da vazão. A tendência linear de longo prazo é normalmente removida das séries temporais de forma a desconsiderar os efeitos de mudanças globais. O cálculo da correlação linear foi realizado aplicando-se o comando *esccr* do *NCL* aos dados de vazão e TSM, com 9 *lags* (ou seja, para 10 meses, *lags* de 0 a 9).

Média da TSM em Áreas Oceânicas

Optou-se por utilizar médias de TSM em detrimento do uso de índices climáticos, devido aos resultados dos mapas de correlação que indicavam áreas variadas para cada uma das sub-regiões, visto que nem sempre as áreas com maiores valores de correlação correspondiam às áreas de índices já calculados por institutos ou outros pesquisadores. Conjuntamente, objetiva-se ampliar a análise para além dos índices, buscando definir áreas específicas de TSM que possam influenciar a vazão de cada uma das sub-regiões.

Para calcular a média das áreas de TSM mais bem correlacionadas com a vazão das cinco sub-regiões homogêneas, foi utilizado o GrADS, que permite o cálculo de áreas quadriláteras. Utilizando os mapas de correlação em um mapa-mundi para definição das coordenadas, foram escolhidas as áreas com correlação linear mais forte para cada sub-região. Assim, cada sub-região está associada a diferentes áreas de TSM nos oceanos.

Após a definição das áreas de TSM e a extração das respectivas médias, a esses valores, aplicaram-se testes de correlação linear de Pearson, correlacionando-os aos dados de vazão de cada sub-região; para esse cálculo, a todos os dados foram utilizadas médias móveis de 3 e 6 meses, além dos valores sem média móvel. Aos valores de correlação linear foram aplicados testes de significância de t-Student.

RESULTADOS

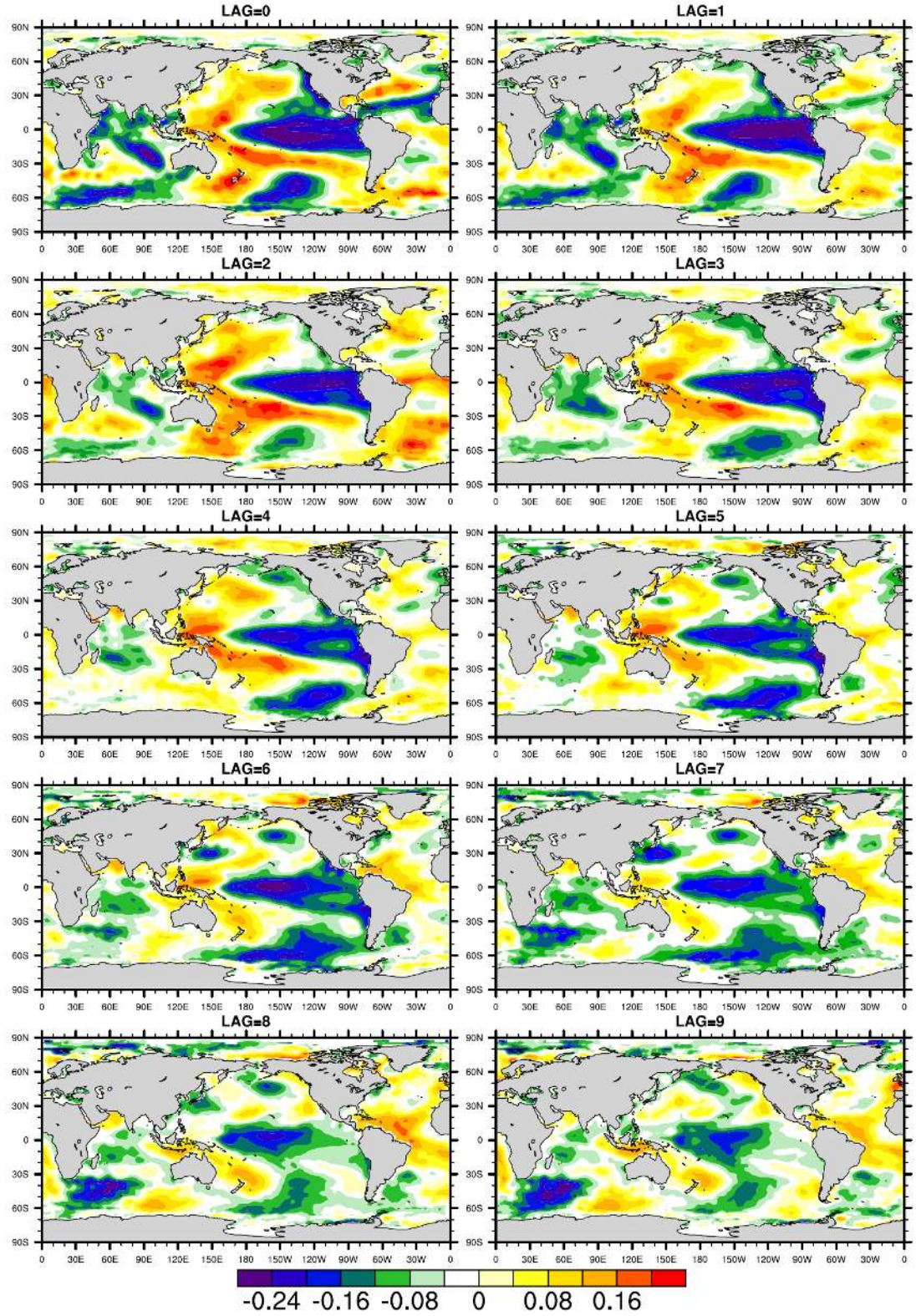
Nesse item são analisados os resultados dos mapas de correlação linear com defasagem temporal para as sub-regiões Norte e Sul da bacia Amazônica, definidas no item 2.1, visando evidenciar as potencialidades de análise a partir dessa técnica.

Relação entre TSM e Vazão da Sub-região Norte da Bacia Amazônica Brasileira

A sub-região Norte recebe água do rio Uaupés (que ao confluir com o rio Içana dá origem ao rio Negro), que nasce na Colômbia, e entra no Brasil pela cidade de Iauaretê. Esta sub-região é a que apresenta as menores taxas totais de vazão, sendo constituída em grande parte por pequenos rios.

Sem considerar intervalo temporal entre os dados correlacionados (*lag* 0), verifica-se que a vazão da sub-região Norte apresenta os maiores valores absolutos de correlação com a TSM do Pacífico Equatorial centro-leste, incluindo a região dos Niños (valores negativos inferiores a - 0,24), mostrando com bastante evidência o "padrão ferradura" que caracteriza o padrão espacial da Oscilação Decenal do Pacífico (ODP), como apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Correlação linear entre TSM e dados de vazão mensal da sub-região Norte (1978-2010).



O padrão de ferradura, com valores negativos no setor centro-leste do Pacífico Equatorial e positivos nas áreas adjacentes subtropicais e de latitudes médias do Pacífico Sul e Norte, enfraquece-se com o aumento da defasagem temporal entre as duas variáveis correlacionadas, TSM e vazão. Campos espaciais para correlação com mais de cinco meses de intervalo temporal apresentam o padrão de ferradura com valores mais fracos. A região ao sul do Pacífico Sul, entre 120ºO e 150ºO, apresenta valores negativos de correlação.

A bacia Indo-Atlântica (sul da África do Sul), próxima à Antártica, também apresenta importante correlação, com valores negativos. A vazão da região Norte igualmente apresenta correlação linear negativa com a região tropical do Atlântico Norte, numa faixa que se estende do Caribe até o extremo oeste do continente africano. Ao norte desta região oceânica, no Atlântico Norte Subtropical, adjacente à costa leste do EUA, observam-se valores positivos de correlação. A TSM da região de latitudes altas do Atlântico Sul apresenta correlação positiva com a vazão da sub-região Norte da bacia amazônica sem defasagem temporal. O padrão espacial do GMAT aparece de forma enfraquecida no caso de correlação com a vazão para esta sub-região: são notadas correlações positivas e negativas com valores fracos nas regiões tropicais dos oceanos Atlântico Norte e Sul, exceto para o intervalo de dois meses, mostrando valores positivos mais intensos. Nesta região tropical, os valores de correlação diminuem gradativamente com o aumento do intervalo temporal entre as duas variáveis consideradas.

Assim, enquanto o Pacífico Equatorial se comporta de maneira a suprimir a precipitação e, consequentemente, diminuir a vazão da sub-região Norte em períodos de anomalias positivas de TSM, o Atlântico Tropical Norte favorece a precipitação e a vazão em períodos de anomalias positivas. Portanto, em situações de El Niño, com águas aquecidas no Pacífico Equatorial, a precipitação e vazão seriam suprimidas na sub-região Norte e, em situações de La Niña, seriam intensificadas. Com relação ao Atlântico Tropical Norte, associa-se o resultado da correlação positiva ao deslocamento da ZCIT para norte quando as águas desta porção do oceano estão mais aquecidas. Sugere-se que o padrão de anomalias positivas no sul do Atlântico Sul indique apenas que este padrão oceânico esteja associado ao padrão do Atlântico Tropical Norte, permitindo a instalação

de um padrão com anomalias positivas de TSM e anomalias positivas de chuva na região Norte, o que está associado a padrões de TSM obtidos da aplicação da análise de componentes principais a dados de TSM do Atlântico (DESER *et al.*, 2010). Desta forma, o Atlântico Tropical Norte aparece como um elemento importante nessa análise. Águas mais quentes no Atlântico Tropical Norte induzem o deslocamento da ZCIT para norte e enfraquecem os alísios de nordeste e a subsequente advecção de umidade a partir do Atlântico Tropical Norte para o sul e oeste da bacia amazônica durante o verão austral (MARENGO *et al*., 2008; ESPINOZA *et al.*, 2014; LINAGE *et al*., 2014). Assim, quando a ZCIT se posiciona mais ao norte do que em média, há menor precipitação na porção sul da bacia amazônica e no nordeste brasileiro e maior precipitação na porção norte da bacia amazônica.

A correlação forte no Pacífico Sul (com mesmo sinal e valor similar ao valor obtido para as regiões de Niño) pode ser atribuída à alta associação entre o *Southern Annular Mode* (SAM) e o ENOS (com valores absolutos de correlação maiores que 0,5 em vários pontos de longitude nas latitudes de extensão do gelo polar) verificada por Pezza *et al*. (2012). Os autores afirmam que, apesar de se verificar alta similaridade entre os padrões de variabilidade dos dois índices (ao que chamam de variabilidade sincrônica), não se pode estabelecer causalidade a essa similaridade. Para eles, SAM e ENOS são interligados em termos das suas respostas observadas no campo de gelo marinho, com expansão ou retração da extensão do gelo com mesmo padrão, assim como na intensidade dos ciclones, principalmente por efeitos não-lineares. Porém, continua muito incerto se SAM e ENOS operam em conjunto nos seus mecanismos geradores de respostas no gelo marinho, ou se as respostas finais no campo de gelo marinho são similares devido a um modo preferencial de onda estacionária em latitudes altas, ao redor de toda a Antártica. Mélice e Servain (2003) também afirmam que tal correlação entre a Antártica e o ENOS pode existir. Os autores levantam a possibilidade de o ENOS ter sua origem na região do Mar de Ross, devido ao aumento/diminuição do gelo, visto que os autores encontraram correlação de 0,6 entre a TSM da região do Mar de Ross e o IOS com defasagem de oito meses. Mélice e Servain (2003) verificaram correlações de 0,43 e 0,62 para os períodos de 1964-81 e 1985-98, respectivamente, entre o Atlântico Tropical Sul (TS) e o IOS, com

o IOS defasado à frente da TSM, confirmando eventualmente a importância do Atlântico Tropical Sul na definição dos eventos ENOS. Os autores sugerem que há uma ligação entre a TSM do Mar de Ross, o Atlântico Tropical Sul e, em seguida, os eventos ENOS. Afirmam, no entanto, que essa teoria ainda carece de mais elementos para comprovação e que sequer conseguiram identificar com precisão um padrão físico de teleconexão, sugerindo dois: o deslocamento para leste das ondas de Kelvin ou uma ligação direta pela circulação na alta troposfera.

Com base nos resultados obtidos no presente estudo e na bibliografia consultada, pode-se sugerir que as regiões de TSM que mais influenciam linearmente a vazão na sub-região Norte seriam o Pacífico Equatorial centro-leste e o Atlântico Norte, porém isso será mais bem analisado a seguir.

Procurando entender como se dá a relação entre cada uma das áreas mais bem correlacionadas, procedeu-se ao cálculo da média da TSM nestas áreas, identificadas na Figura 4.

A Tabela 1 apresenta os valores da correlação entre a vazão na sub-região Norte e os valores mensais de TSM médios, sem suavização e com suavização com média móvel (MM) de 3 e 6 meses. Das áreas de TSM selecionadas, as que mais explicam a variabilidade da vazão mensal na sub-região Norte, com dados de média simples, são as regiões de TSM Pacífico Sul (r = -0,374), Niño (r = -0313) e Atlântico Tropical Norte (r = 0,275). Quando calculada a correlação a dados com média móvel de 3 meses, acrescentam-se às regiões de TSM já citadas o Atlântico Central (r = 0,239) e Atlântico Tropical Sul (r = 0,570). A região Pacífico Tropical Sul somente apresenta correlação significativa com os dados de vazão para média móvel de 6 meses (r = 0,360). De alguma forma, considera-se o papel importante de todas as regiões de TSM selecionadas como bem correlacionadas com a vazão da sub-região Norte. Ademais, destaca-se a importância da suavização dos dados para que alguns padrões emerjam, bem como o caso da região do Atlântico Central, que teve os sinais dos valores de correlação invertidos com a aplicação da média móvel. Acredita-se que o uso da média móvel, nesse caso de dados mensais de uma série de 35 anos de dados, seja necessário, exatamente para permitir a averiguação de correlações nem sempre tão diretas entre a TSM e a vazão.

Figura 4 - Áreas oceânicas cuja TSM é bem correlacionada (|r| > 0,2) com a vazão da sub-região Norte da bacia Amazônica brasileira, no período de 1976 a 2010.

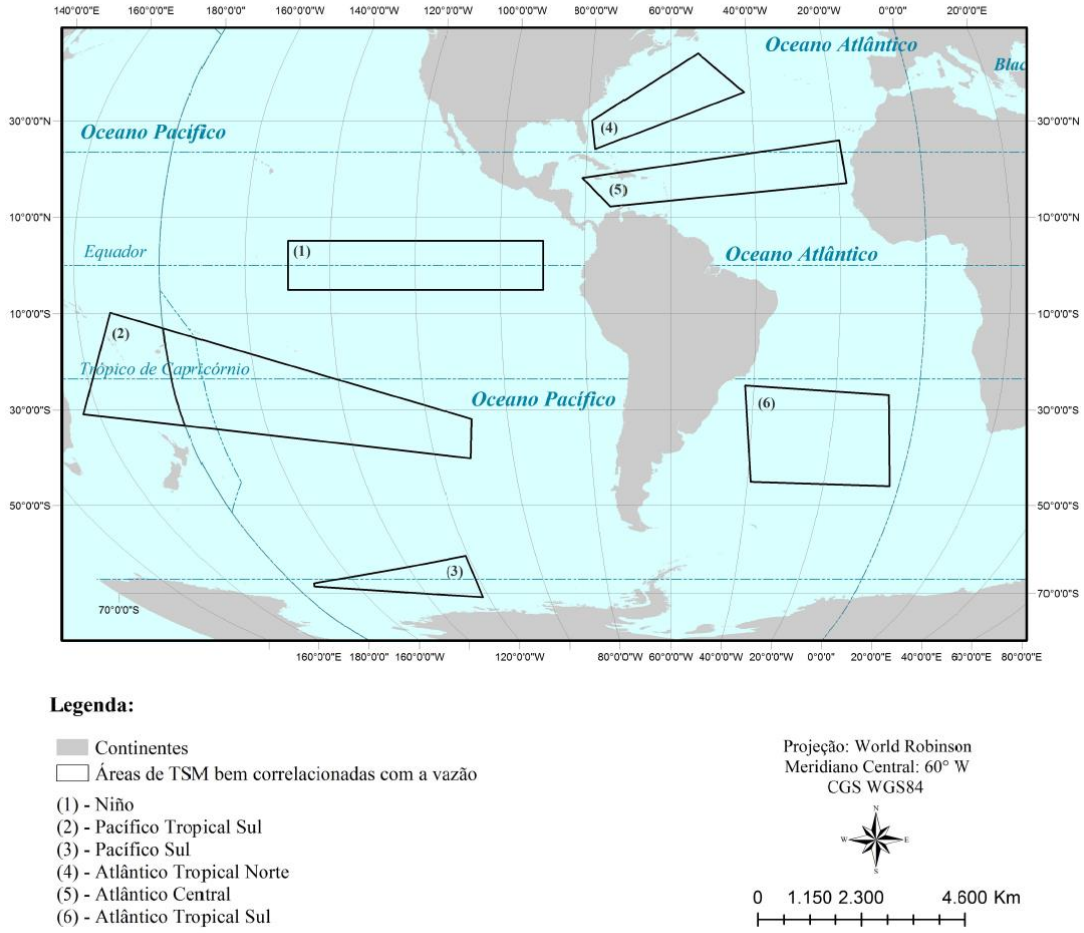


Tabela 1 - Correlação linear entre vazão mensal e valores mensais de TSM para áreas oceânicas bem correlacionadas da sub-região Norte da bacia amazônica, para o período de 1976 a 2010, com média móvel (MM) de 0 a 6 meses. Valores em negrito são significativos estatisticamente ao nível 90 % (t-crítico = 1,307), segundo o teste t-Student

Áreas de TSM	**Correlação com a vazão da sub-região Norte**		
bem correlacionadas	**MM = 0 meses**	**MM = 3 meses**	**MM = 6 meses**
Atlântico Central	r = -0,204	**r = 0,239**	**r = 0,322**
Atlântico Tropical Norte	**r = 0,275**	**r = 0,237**	**r =0,442**
Atlântico Tropical Sul	r = 0,201	**r = 0,570**	**r = 0,597**
Niño (Pacífico Equatorial)	**r = -0,313**	**r = -0,485**	**r = -0,381**
Pacífico Sul	**r = -0,374**	**r = -0,254**	**r = -0,352**
Pacífico Tropical Sul	r = 0,006	r = 0,220	**r = 0,360**

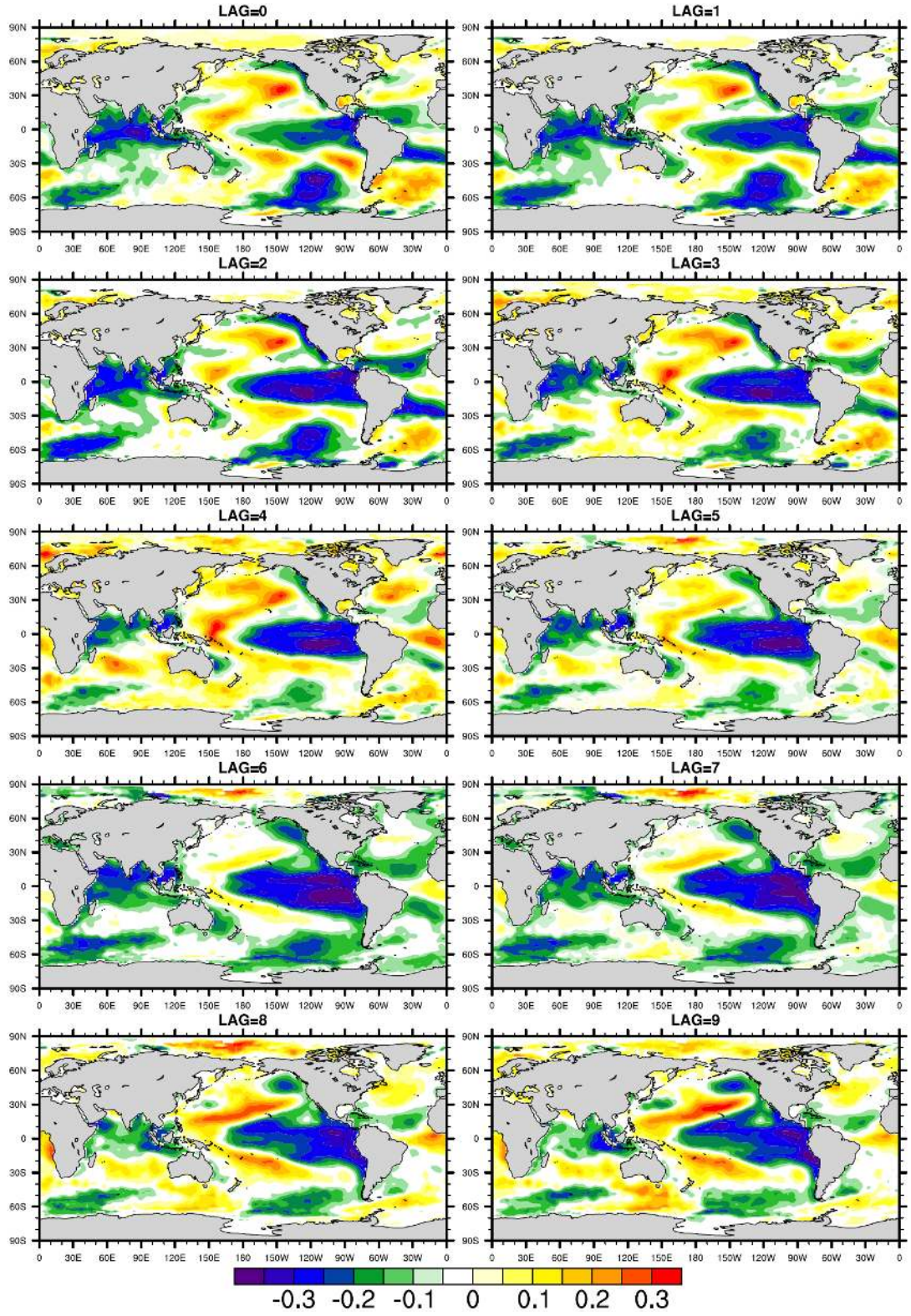
Relação entre TSM e Vazão da Sub-região sul da Bacia Amazônica Brasileira

A sub-região Sul da bacia amazônica brasileira teve grande alteração no uso do solo durante o período considerado, devido ao desmatamento ocorrido a partir dos anos de 1960-70 com as frentes pioneiras oriundas do centro-sul do Brasil (LIMBERGER *et al.*, 2021). Além de se situar no centro do continente sul-americano, parte desta sub-região encontra-se em uma zona climática de transição, entre os climas equatorial e tropical do Brasil, o que contribui para que haja a maior amplitude no ciclo anual, tanto de chuva quanto de vazão se comparada às demais sub-regiões consideradas. A sub-região Sul tem como principais rios constituintes o Tapajós e o Xingu, afluentes da margem direita do Amazonas.

Quando se analisa a correlação linear entre a TSM e a vazão para esta sub-região, na Figura 5, verifica-se que a região do Índico, Pacífico Sul, Pacífico Equatorial e Atlântico Sul tropical apresentam sinal negativo de correlação, que se enfraquece com a defasagem temporal, exceto a região do Pacífico Equatorial, que tem a correlação negativa aumentada. As áreas que indicam correlação positiva são o Pacífico Norte e Sul tropical (configurando-se um padrão semelhante ao de "ferradura" em associação com a correlação negativa no Pacífico Equatorial centro-leste) e o Atlântico Sul subtropical, entre as latitudes de 30º e 60ºS, que se enfraquece com a defasagem temporal, após o intervalo de quatro meses entre a TSM e a vazão. Apesar de haver áreas oceânicas que, em média, manifestem os sinais positivos e negativos mencionados, indicando relação linear entre elas, a modulação dos valores de correlação em relação à defasagem temporal nas diversas áreas oceânicas apresenta diferentes fases. A TSM do sul do Pacífico Sul demonstra correlação mais intensa com a vazão da sub-região Sul para defasagens de até dois meses, enquanto a TSM do Pacífico Equatorial exibe os maiores valores para três meses de defasagem. As áreas de correlação negativa do Atlântico tropical associadas à variabilidade da vazão têm maior significância para defasagens de até três meses. As áreas com correlação positiva no setor subtropical do Atlântico Sul também sinalizam os maiores valores de correlação com a vazão para defasagens de até três meses. A razão para a manutenção da correlação no tempo pode ser explicada fisicamente, já que o Atlântico tropical se associa com a vazão desta sub-região através da posição da ZCIT.

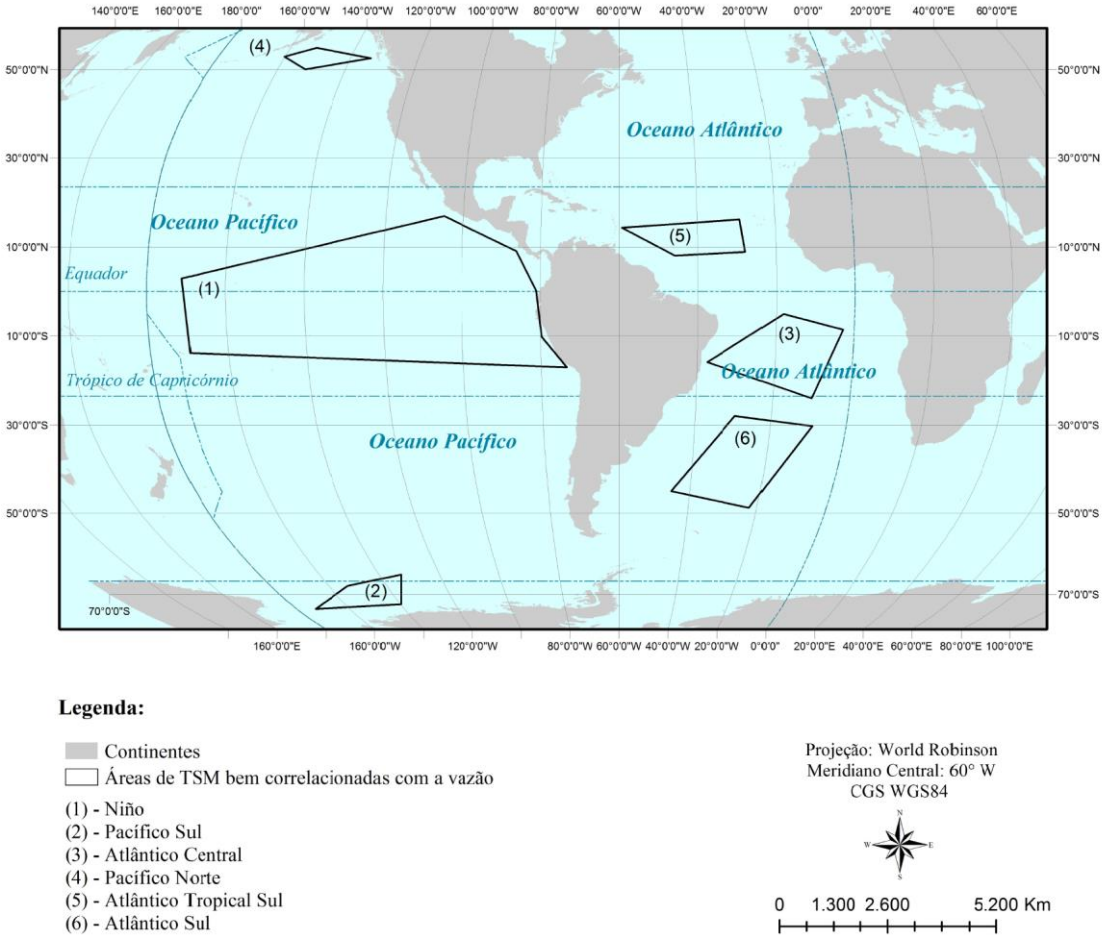
Para *lag* de até 2 meses, as águas mais aquecidas do Atlântico Equatorial ficam em uma estreita faixa centrada em 10º S, contribuindo para que a ZCIT fique nesta posição. Conforme há o aumento da defasagem entre a vazão e a TSM, os valores altos e positivos de correlação entre vazão e TSM no Atlântico Equatorial ocupam uma faixa ligeiramente mais larga, o que sugere que as várias posições da ZCIT sobre as águas mais aquecidas do Atlântico Equatorial podem contribuir para o aumento da vazão da sub-região Sul.

Figura 5 - Correlação linear entre TSM e dados de vazão mensal da sub-região Sul para o período de 1976 a 2010.



Procurando entender detalhadamente a relação entre vazão e a TSM das áreas mais bem correlacionadas, foram definidas seis áreas oceânicas, sendo denominadas Niño (Pacífico Equatorial), Pacífico Sul, Atlântico Central, Pacífico Norte, Atlântico Tropical Sul e Atlântico Sul, tendo seus limites apresentados na Figura 6.

Figura 6 - Áreas oceânicas bem correlacionadas (1976-2010) com a vazão da sub-região Sul da Amazônia.



Para verificar de forma mais específica a associação entre a TSM das áreas selecionadas e a vazão da sub-região Sul, foram efetuados cálculos de correlação linear entre os dois conjuntos de dados, verificando-se a significância estatística pelo teste t-Student, conforme se verifica na Tabela 3. Para os dados sem suavização (MM = 0 meses), as regiões de TSM com correlação significativa são o Atlântico Central (r = -

0,484) e o Atlântico Tropical Sul (r = -0,387). Porém, com o avanço da defasagem temporal, com média móvel de 3 meses, todas as áreas oceânicas têm correlação significativa com a vazão, sendo o maior valor registrado para a região Atlântico Central (-0,446), e o menor, para o Pacífico Norte (-0,227). Para os dados com média móvel de 6 meses, somente o Pacífico Norte não apresenta valores de correlação significativos com a vazão da sub-região Sul. Portanto, todas as regiões escolhidas, especialmente para a suavização com média móvel de 3 meses, são significativas para a explicação da variabilidade da vazão para a sub-região Sul, inclusive para a elaboração de um modelo estocástico de previsão.

Tabela 3 - Correlação linear entre vazão mensal e valores mensais de TSM para áreas oceânicas bem correlacionadas da sub-região Sul da bacia amazônica, para o período de 1976 a 2010, com média móvel (MM) de 0 a 6 meses. Valores em negrito são significativos estatisticamente ao nível de 90% (t-crítico = 1,307), segundo o teste t-Student.

Áreas de TSM bem correlacionadas	**Correlação com a vazão da sub-região Sul**		
	MM = 0 meses	**MM = 3 meses**	**MM = 6 meses**
Atlântico Central	**r = -0,484**	**r = -0,446**	**r = -0,597**
Atlântico Sul	r = 0,118	**r = 0,257**	**r = 0,294**
Atlântico Tropical Sul	**r = -0,387**	**r = -0,409**	**r = -0,435**
Niño - Pacífico Equatorial	r = -0,212	**r = -0,366**	**r = -0,224**
Pacífico Norte	r = -0,170	**r = -0,227**	r = -0,079
Pacífico Sul	r = -0,004	**r = 0,283**	**r = 0,614**

DISCUSSÃO

Comparando, separadamente, os mapas de correlação das sub-regiões analisadas, verifica-se que os resultados foram diferentes para cada uma delas. Na Tabela 4, para os dados sem média móvel (MM0), a vazão da sub-região Sul teve valores significativos de correlação linear com o Pacífico Sul, Niño e Atlântico Tropical Norte, enquanto a sub-região Norte teve a variabilidade da vazão mais explicada pelo Atlântico Central e Atlântico Tropical Sul.

Tabela 4 - Maiores valores de correlação (significativos para teste t-Student 90%) de TSM com vazão para cada sub-região sem média móvel (MM0).

Sub-região Norte	Sub-região Sul
Pacífico Sul r=-0,374	Atlântico Central r=-0,484
Niño – Pacífico Equatorial r=-0,313	Atlântico Tropical Sul r=-0,387
Atlântico Tropical Norte r=0,275	

Quando se analisam os valores para MM3 (Tabela 5) também se verifica que a ordem e o valor das áreas de TSM mais bem correlacionadas variam para as duas sub-regiões analisadas. A sub-região Norte tem sua variabilidade associada com Atlântico Tropical Sul e a região do Niño, enquanto a sub-região Sul é mais associada com Atlântico Central e Atlântico Tropical Sul.

Tabela 5 - Maiores valores de correlação (significativos para teste t-Student 90%) de TSM com vazão para cada sub-região (MM3).

Sub-região Norte	Sub-região Sul
Atlântico Tropical Sul r = 0,570	Atlântico Central r = -0,446
Nino r = -0,485	Atlântico Tropical Sul r = -0,409
Pacífico Sul r = -0,254	Nino r = -0,366
Atlântico Central r = 0,239	Pacífico Sul r = 0,283
Atlântico Tropical Norte r = 0,237	Atlântico Sul r = 0,257
	Pacífico Norte r = -0,227

Esses resultados indicam que os padrões de teleconexões atmosféricas atingem de formas diferentes as duas sub-regiões da bacia amazônica abordadas na presente pesquisa. Essa constatação foi possível a partir da identificação, nos mapas de correlação linear, das áreas de TSM mais bem correlacionadas com a vazão para cada sub-região. A sub-região Norte está mais associada à variabilidade do Pacífico, que tem a circulação da célula de Walker alterada quando da ocorrência de eventos ENOS, afetando diretamente a chuva e vazão naquela área, enquanto a sub-região Sul, está mais ligada ao Atlântico, sendo que anomalias nesse oceano afetam o posicionamento da ZCIT, o que pode alterar os elementos hidrometeorológicos que atingem essa porção da bacia amazônica brasileira.

CONCLUSÕES

A presente pesquisa apresentou técnicas estatísticas para estudos de teleconexões atmosféricas associadas à vazão de rios da bacia amazônica brasileira. Definiram-se áreas homogêneas de variabilidade de vazão a partir da análise de cluster. Nesse estudo analisaram-se duas sub-regiões das cinco definidas: a sub-região Norte a sub-região Sul. As médias de vazão dessas duas sub-regiões foram correlacionadas com a TSM global para o período de 1976 a 2010 e verificaram-se diferentes resultados para ambas.

A vazão da sub-região Norte tem valores de correlação linear maiores com a TSM do Pacífico do que a sub-região Sul, que se relaciona em maior intensidade à variabilidade do Atlântico. Isso pode ser explicado fisicamente pela associação direta do clima da área mais ao norte da bacia amazônica com a circulação da célula de Walker, que é afetada por eventos de ENOS, enquanto a sub-região sul tem sua variabilidade interanual melhor explicada pelo posicionamento da ZCIT, que se associa com anomalias de TSM no Atlântico.

Essa diferença de resultados demonstra que o uso de mapas de correlação linear, embora desprezando as interações não-lineares entre os fenômenos atmosféricos, é uma técnica importante e adequada para estudos de teleconexões, pois permite a identificação de detalhes da associação da circulação atmosférica dos diferentes locais com o comportamento oceânico.

REFERÊNCIAS

AMBRIZZI, T. **El Niño/Oscilação Sul e teleconexões atmosféricas no hemisfério austral.** São Paulo: USP/IAG, 2003. (Tese de Livre-Docência).

BLACKMON, M. L., LEE, Y.-H; J. M.; WALLACE, J. M.: Horizontal structure of 500 mb height fluctuations with long, intermediate and short time scales. **Journal of Atmospheric Science**, vol. 41, p. 961-979, 1984a.

___, ____, ____; HSU, H. -H. Time variations of 500 mb height fluctuations with long, intermediate, and short time scales as deduced from lag correlation statistics. **Journal of Atmospheric Science**, v. 41, p. 981-991, 1984b.

CAVALCANTI, I. F. A.; AMBRIZZI, T. Teleconexões e suas influências no Brasil In__: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, J. **Clima das regiões brasileiras e variabilidade climática.** São Paulo: Oficina de Textos, 2021, p. 145-161.

DESER, C.; ALEXANDER, M. A.; XIE, S.-P.; PHILLIPS, A.S. Sea Surface Temperature variability: patterns and mechanisms. **Annual Review of Marine Science**. v. 2, p. 115-143, 2010.

ESPINOZA, J.C. et al. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. **Environmental Research Letters.** v. 9, p. 124007 (9p.), 2014.

GRIMM, A.M.; AMBRIZZI, T. Teleconnections into South America from the Tropics and Extratropics on Interannual and Intraseasonal timescales. In__: VIMEUX, F.; SYLVESTRE, F.; KHODRI, M. **Past climate variability in South America and Surrounding Regions:** from the last glacial maximum to the Holocene. 14ed. USA: Springer, 2009, p. 159-191.

HAIR, J.F. et al. **Análise multivariada de dados**. 5ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HOREL, J.D.; WALLACE, J.M. Planetary-Scale Atmospheric Phenomena associated with the Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**. Vol. 109, p. 813-89, abr. 1981.

HOSKINS, B. J. Dynamical processes in the atmosphere and the use of models. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**. Vol. 109, p.1–21, 1983.

HOSKINS, B. J.; KAROLY, D. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. **Journal of Atmosphere Science**. v. 38, p. 1179-1196, 1981.

HOSKINS, B.J. et al. Energy dispersion in a barotropic atmosphere. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**. v.103, p. 553-567, 1977.

KAGAN, B. A. **Ocean-atmosphere interaction and Climate Modeling.** Tradução M. A. Chazin. Cambridge: Cambrigde University Press, 1995.

KALNAY, E. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**. v. 77, n. 3, p.437-471, mar. 1996.

LIMBERGER, L.; SILVA, M.E.S.; PEREIRA, G.; CARDOZO, F. S.; MATAVELI, G.A.V.; LIMA, B.S. Streamflow and precipitation trends in the Brazilian Amazon basin and their association with Pacific decadal oscillation and deforestation. **Theoretical and Applied Climatology**. Vol. 146, p. 511-526, 2021. pages 511–526.

LINAGE, C. de; FAMIGLIETTI, J. S.; RANDERSON, J. T. Statistical prediction of terrestrial water storage changes in the Amazon Basin using tropical Pacific an North Atlantic sea surface temperatures anomalies. **Hydrology and Earth System Sciences**. Vol. 18, p. 2089-2102, 2014.

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

MÉLICE, J.-L; SERVAIN, J. The tropical Atlantic meridional SST gradient index and its relationships with the SOI, NAO and Southern Ocean. **Climate Dynamics**. N. 20, p. 447–464, 2003.

PEZZA, A. B.; RASHID, H.A.; SIMMONDS, I. Climate links and recent extremes in antarctic sea ice, high-latitude cyclones, Southern Annular Mode and ENSO. **Climate - Dynamics**. v. 38, p. 57-73, 2012.

PINTO, N.L.S.(org.) **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1976.

SIMMONS, A.J. et al. Barotropic wave propagation and instability, and atmospheric teleconnection pattern. **Journal of Atmospheric Sciences**. v.40, n. 6, p. 1363-1391, jun. 1983.

SIMMONS, A.J. The forcing of stationary wave motion by tropical diabatic heating. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**. v.108, p. 503-534, 1982.

WALLACE, J.M.; GUTZLER, D.S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. **Meteorological Weather Review**. v.109, p. 785-812, 1981.

WELLS, N. **The atmosphere and ocean: a physical introduction**. 2ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1998.

WILKS, D.S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences.** 2ed. San Diego - CA: Elsevier, 2006.

Recebido em setembro de 2021.

Revisão realizada em outubro de 2021.

Aceito para publicação em dezembro de 2021.