Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

INFLUÊNCIA DE TELECONEXÕES NA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL DO CERRADO BRASILEIRO

Teleconnections influence on Precipitation of Brazilian Cerrado

Influencia de las Teleconexiones en la Precipitación Pluvial del Cerrado Brasileño

Camila Bertoletti Carpenedo
Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Paraná (UFPR)
camila.carpenedo@ufpr.br

Carlos Batista da Silva
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo (USP)
krlosbatist@gmail.com

Resumo: Teleconexões são conexões à distância, que explicam a relação entre anomalias distantes entre si, tipicamente da ordem de 1.000 km, abrangendo extensas áreas geográficas. Assim, o objetivo deste estudo é avaliar como as teleconexões influenciam a precipitação pluvial no Cerrado brasileiro. Através de análise de correlação linear sazonal (entre o verão de 1980 e a primavera de 2019) com a precipitação pluvial (CPC/NOAA), a teleconexão trópico-trópico (anomalias de TSM nas regiões do Niño) mostra que cada região do Niño e estação do ano afetam de forma distinta a precipitação pluvial no Cerrado. A teleconexão trópico-subtrópico (Dipolo do Atlântico Sul) mostra um predomínio de correlação positiva no norte do Cerrado e de correlação negativa (positiva) no sul durante o inverno e primavera (verão e outono). A teleconexão trópico-extratrópico (Modo Anular Sul - SAM) mostra um predomínio de correlação positiva em relação à correlação negativa. O modelo estocástico sugere que cerca de 30% da precipitação pluvial do Cerrado no outono e inverno esteja associada ao SAM e às anomalias de TSM nas regiões do Niño.

Palavras-chave: Variabilidade climática. El Niño-Oscilação Sul. Dipolo do Atlântico Sul. Modo Anular Sul.

Abstract: Teleconnections are remote connections, which explain the relationship between anomalies distant from each other, typically on the order of 1,000 km, covering large geographic areas. Thus, the objective of this study is to evaluate how teleconnections influence precipitation in the Brazilian Cerrado. Through seasonal linear correlation analysis (between summer 1980 and spring 2019) with precipitation (CPC/NOAA), the tropic-tropic teleconnection (SST anomalies in El Niño regions) shows that each El Niño region and season affect differently the precipitation in the Cerrado. The tropic-subtropic teleconnection (South Atlantic Dipole) shows a predominance of positive correlations in the northern Cerrado and negative (positive) correlations in the southern Cerrado, during winter and spring (summer and autumn). The tropic-extratropic teleconnection (Southern Annular Mode - SAM) shows a predominance of positive correlations in relation to negative correlations. The stochastic model suggests that about 30% of the precipitation in the Cerrado, in autumn and winter, is associated with SAM and SST anomalies in the El Niño regions.

Keywords: Climatic variability. El Niño-Southern Oscillation. South Atlantic dipole. Southern Annular Mode.

Resumen: Las teleconexiones son conexiones de larga distancia, que explican la relación entre anomalías distantes entre sí, típicamente del orden de 1000 km, que cubren grandes áreas geográficas. Así, el objetivo de este estudio es evaluar cómo las teleconexiones influyen la precipitación en el Cerrado brasileño. A través del análisis de correlación lineal estacional (entre el verano de 1980 y la primavera de 2019) con la precipitación (CPC/NOAA), la teleconexión trópico-trópico (anomalías de TSM en las regiones Niño) muestra que cada región y estación del Niño afecta de manera diferente la precipitación en el Cerrado. La teleconexión trópico-subtrópico (Dipolo del Atlántico Sur) muestra un predominio de correlación positiva en el norte del Cerrado y correlación negativa (positiva) en el sur durante el invierno y primavera (verano y otoño). La teleconexión trópico-extratrópico (Modo Anular del Sur - SAM) muestra un predominio de la correlación positiva en relación a la correlación negativa. El modelo estocástico sugiere que alrededor del 30% de las precipitaciones del Cerrado en otoño e invierno están asociadas al SAM y a anomalías de TSM en las regiones del Niño.

Palabras clave: Variabilidad climática. El Niño-Oscilación Sur. Dipolo del Atlántico Sur. Modo Anular Sur.

Submetido em: 26/04/2021
Aceito para publicação em: 20/01/2021
Publicado em: 16/02/2022

1. INTRODUÇÃO

O Cerrado brasileiro é um bioma de savana tropical-estacional do tipo peino-pirobioma, ou seja, marcada pela ocorrência natural do fogo (COUTINHO, 2016). Este bioma está localizado ao longo do planalto central. Entretanto, nas bordas mais ao sul, o Cerrado expande até os municípios de Campo Mouro e Jaguariaíva, no Paraná, enquanto em direção a oeste chega até a Bolívia, na região de Beni (COUTINHO, 2016).

O ciclo anual da precipitação pluvial no Cerrado brasileiro apresenta características marcadas de estação seca e úmida (SILVA; KOUSKY, 2012). Mais de 50% do total anual da chuva ocorre durante o verão, no leste e centro do país (SILVA; KOUSKY, 2012). Esta mesma região recebe menos de 5% da precipitação pluvial total anual no inverno. Estas características de inverno seco e verão chuvoso são típicas de um Sistema de Monção (RAO; CAVALCANTI; HADA, 1996; KOUSKY; ROPELEWSKI, 1997). Um Sistema de Monção é identificado através da mudança na direção do vento em baixos níveis entre verão e inverno, associada a variações no gradiente térmico horizontal entre continentes e oceanos devido à diferença de calor específico (MECHOSO et al., 2005; SILVA; KOUSKY, 2012).

A variabilidade da precipitação pluvial na região tropical do Brasil ocorre devido a variações nos padrões atmosféricos climatológicos e nos sistemas atmosféricos atuantes, os quais são influenciados especialmente pela variabilidade de baixa frequência. Uma causa provável da variabilidade de baixa frequência na atmosfera é a forçante devido às anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) através da interação oceano-atmosfera, as quais são consideradas de maior importância em escalas de tempo sazonal a interanual devido à grande inércia térmica da camada de mistura da superfície oceânica (HOLTON, 2004). Mudanças na atmosfera tropical associadas às variações de TSM podem engatilhar respostas na atmosfera global via teleconexões (GRIMM; AMBRIZZI, 2009). As teleconexões são conexões à distância, que explicam a relação entre anomalias distantes entre si, tipicamente da ordem de 1.000 km, abrangendo extensas áreas geográficas (GRIMM; AMBRIZZI, 2009). Neste ponto de vista, a atmosfera atua como uma ponte entre a região forçante oceânica e as regiões remotas através da dispersão e propagação de ondas de Rossby para os extratrópicos e da perturbação das Células de Hadley e Walker (GRIMM; AMBRIZZI, 2009).

No Brasil, a variabilidade interanual da precipitação pluvial está associada principalmente ao El Niño-Oscilação Sul (ENOS), o qual explica 23,5% da sua variância

(GRIMM, 2009). O ENOS é um fenômeno de interação oceano-atmosfera, em que a componente oceânica é denominada de El Niño (fase quente) ou La Niña (fase fria) e a componente atmosférica de Oscilação Sul.

Outro modo de variabilidade climática com potencial de afetar a precipitação pluvial no Brasil é o Dipolo do Atlântico Sul, o qual é marcado por uma relação inversa entre as anomalias de TSM no nordeste do Atlântico Sul, ao longo da costa oeste equatorial da África, e no sudoeste do Atlântico Sul, ao longo da costa do Brasil, Uruguai e Argentina (NNAMCHI; LI; ANYADIKE, 2011). Quando as anomalias de TSM são positivas (negativas) no Atlântico Sul tropical (subtropical), o que caracteriza a fase positiva do Dipolo do Atlântico Sul, há movimento do ar convergente (divergente) em superfície (NNAMCHI; LI; ANYADIKE, 2011; NNAMCHI; LI, 2011). Assim, o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e os ventos alísios de sudeste são enfraquecidos (NNAMCHI; LI; ANYADIKE, 2011), resultando em um deslocamento anômalo para sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT; GREEN; MARSHALL, 2017). O padrão oposto é observado na fase negativa do Dipolo do Atlântico Sul.

As chuvas no país também são influenciadas pelo modo de variabilidade climática Modo Anular Sul (*Southern Annular Mode* – SAM), o qual é caracterizado por anomalias de pressão zonalmente simétricas e fora de fase entre as latitudes médias e altas do Hemisfério Sul. Quando as anomalias de pressão são negativas (positivas) nas altas (médias) latitudes austrais, o que caracteriza a fase positiva do SAM, os ventos de oeste em cerca de 60°S são fortalecidos (THOMPSON; WALLACE, 2000; GILLETT; KELL; JONES, 2006) e há um aumento na frequência de frentes frias e ciclones extratropicais ao redor do continente antártico (RUDEVA; SIMMONDS, 2015). O padrão oposto é observado na fase negativa do SAM.

Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar como as teleconexões trópico-trópico, trópico-subtrópico e trópico-extratrópico afetam a precipitação pluvial no Cerrado brasileiro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O período de análise compreende de dezembro de 1979 a novembro de 2019.

As séries temporais mensais de TSM da versão *Extended Reconstructed Sea Surface Temperature* (ERSST) *v5* foram obtidas do *Climate Prediction Center/National Oceanic and Atmospheric Administration* (CPC/NOAA) para as regiões do Niño 1+2 (0°-10°S, 90°W-80°W),

Niño 3 (5°N-5°S, 150°W-90°W), Niño 3.4 (5°N-5°S, 170°W-120°W) e Niño 4 (5°N-5°S, 160°E-150°W).

O índice mensal do Dipolo do Atlântico Sul foi obtido de Nnamchi, Li e Anyadike (2011) e Nnamchi e Li (2011), definido como a diferença entre a anomalia normalizada de TSM no Polo Nordeste (20°W-10°E e 0°-15°S) e no Polo Sudoeste (10°-40°W e 25°S-40°S) do Atlântico Sul.

O índice SAM mensal foi obtido do CPC/NOAA. Este índice é construído através da projeção das anomalias diárias de altura geopotencial em 700 hPa ao sul de 20°S, padronizadas pelo desvio padrão do índice mensal, sobre o principal modo do SAM.

A precipitação pluvial para o Cerrado brasileiro foi obtida do *CPC Global Unified Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation* (NOAA/OAR/ESRL PSL), com espaçamento horizontal global de 0,5° x 0,5°. Este dado é obtido através de mais de 30.000 estações meteorológicas. O controle de qualidade é feito por meio de comparações com registros históricos, observações de satélite e de radar e previsões de modelos numéricos.

Inicialmente todas as séries temporais foram tratadas através da remoção da tendência linear e da sazonalidade. Posteriormente foram calculadas as médias dos índices e os acumulados sazonais da precipitação pluvial.

Para avaliar a teleconexão trópico-trópico, trópico-subtrópico e trópico-extratrópico foi calculada a correlação linear espacial entre as anomalias de precipitação pluvial no Cerrado brasileiro e as anomalias de TSM por região do Niño, o índice do Dipolo do Atlântico Sul e o índice SAM, respectivamente. A correlação foi realizada também com defasagem no tempo, considerando a ocorrência da precipitação pluvial uma (lag=1) e duas (lag=2) estações posteriores à observação do índice climático sazonal. Assim, lag=0 significa que a precipitação pluvial é observada durante a ocorrência do índice. A significância estatística das correlações foi obtida através do teste t-Student, ao nível de significância de 5%.

Para verificar a representatividade estatística de cada índice climático na precipitação pluvial do Cerrado brasileiro, foram construídos modelos estocásticos de simulação a partir da técnica de regressão linear múltipla para as estações do ano. O coeficiente de determinação (R^2) encontrado em cada experimento da análise de regressão linear, do ponto de vista da estatística, sugere a explicação da variável observada (chuvas sazonais no

Cerrado brasileiro) pelas variáveis independentes (anomalias de TSM nas regiões do Niño, Dipolo do Atlântico Sul e SAM). A precipitação pluvial foi normalizada pela desvio padrão.

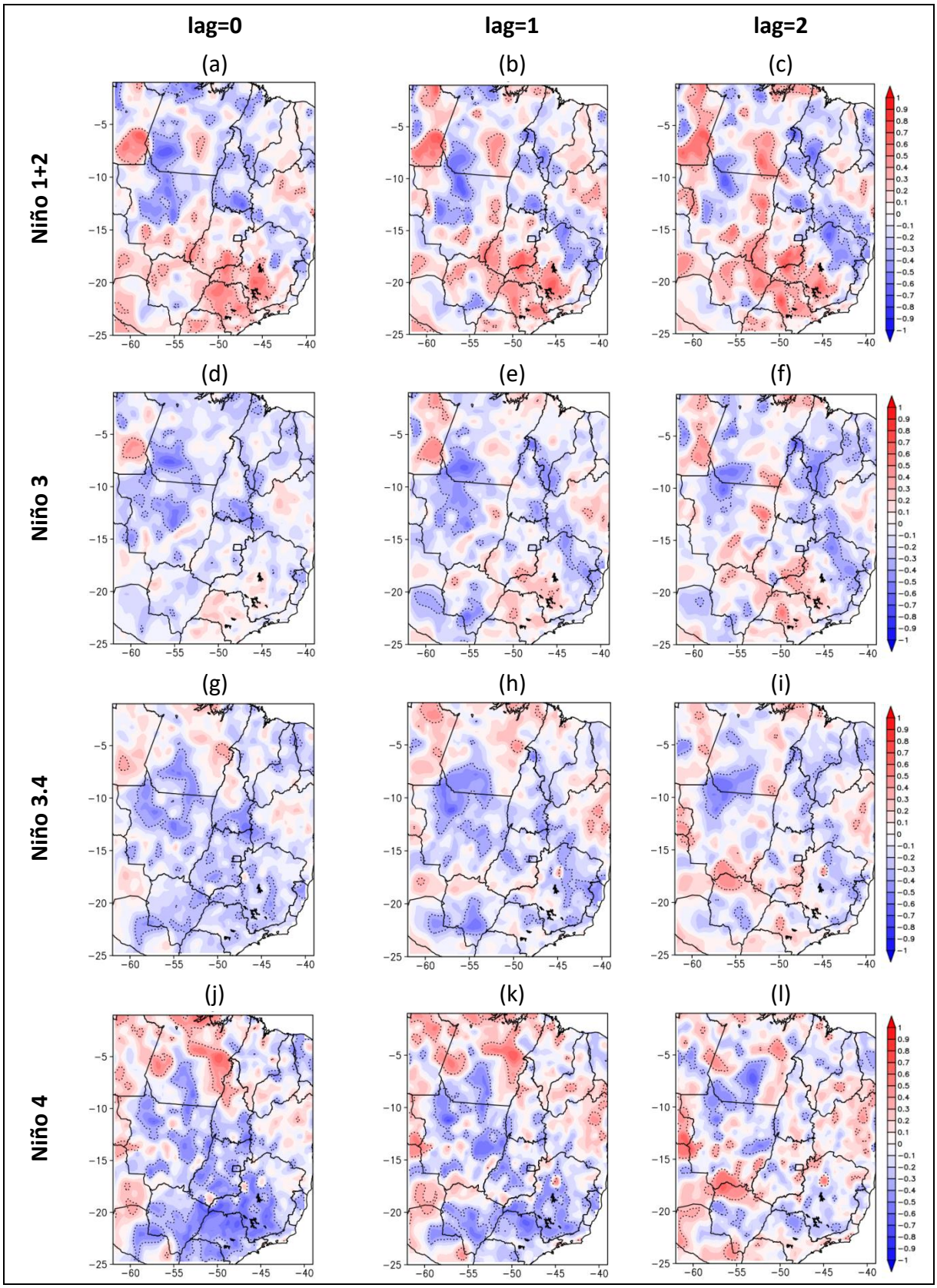
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Teleconexão trópico-trópico: El Niño-Oscilação Sul

Na primavera (lag=0) é observada correlação positiva de r=0,4 entre as anomalias de TSM nas regiões do Niño 1+2 e Niño 3 e as chuvas no estado de São Paulo, Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, extremo leste do Mato Grosso e noroeste da Bahia (Figuras 1a, 1d). Os valores positivos de correlação sugerem que aumento (redução) da TSM mais a leste do Pacífico equatorial causaria maiores desvios positivos (negativos) de chuva durante a primavera no Cerrado brasileiro. Por outro lado, no centro-oeste do Mato Grosso, sul da Bahia e em parte do Tocantins e Maranhão (Goiás e Mato Grosso do Sul) há correlação negativa de r=-0,4 quando associada à região do Niño 1+2 (Niño 3) (Figuras 1a, 1d). Estes resultados sugerem uma relação inversa entre as anomalias de TSM e a precipitação pluvial, ou seja, à medida que a TSM aumenta (reduz), as anomalias de chuva nas áreas supracitadas diminuem (aumentam).

Para as associações entre as anomalias de TSM nas regiões do Niño 3.4 e Niño 4, correlação negativa de r=-0,4 é observada em quase todo o Cerrado brasileiro, com exceção da faixa oeste da Bahia (Figuras 1g, 1j). Estes resultados sugerem que as anomalias negativas (positivas) de TSM no Pacífico equatorial centro-oeste contribuem com os desvios positivos (negativos) de precipitação pluvial em grande parte do Cerrado brasileiro. No lag=1 e lag=2 os padrões espaciais de correlação positiva são mantidos para as associações com as regiões do Niño 1+2 e Niño 3. Entretanto, sinais de r=-0,4 significativos passam a ser observados no norte de Minas Gerais e no sul dos estados da Bahia, Maranhão e Piauí (Figuras 1b-c e 1e-f, respectivamente). Para as regiões do Niño 3.4 e Niño 4, os padrões de correlação no lag=1 se assemelham aos do lag=0 (Figuras 1h, 1k). Já no lag=2 é possível verificar perdas de sinais significativos e redução nos valores de correlação para r=-0,2, assim como o surgimento de áreas com sinais positivos de correlação acima de r=0,3 (Figuras 1i, 1l).

Figura 1 - Correlação linear no *lag=0* (coluna da esquerda), *lag=1* (coluna central) e *lag=2* (coluna da direita) entre a precipitação pluvial nos estados que abrangem o Cerrado brasileiro e as anomalias de TSM nas regiões do (a, b, c) Niño 1+2, (d, e, f) Niño 3, (g, h, i) Niño 3.4 e (j, k, l) Niño 4 para a estação da primavera de 1980 a 2019. Áreas pontilhadas indicam correlações significativas ao nível de 5%.



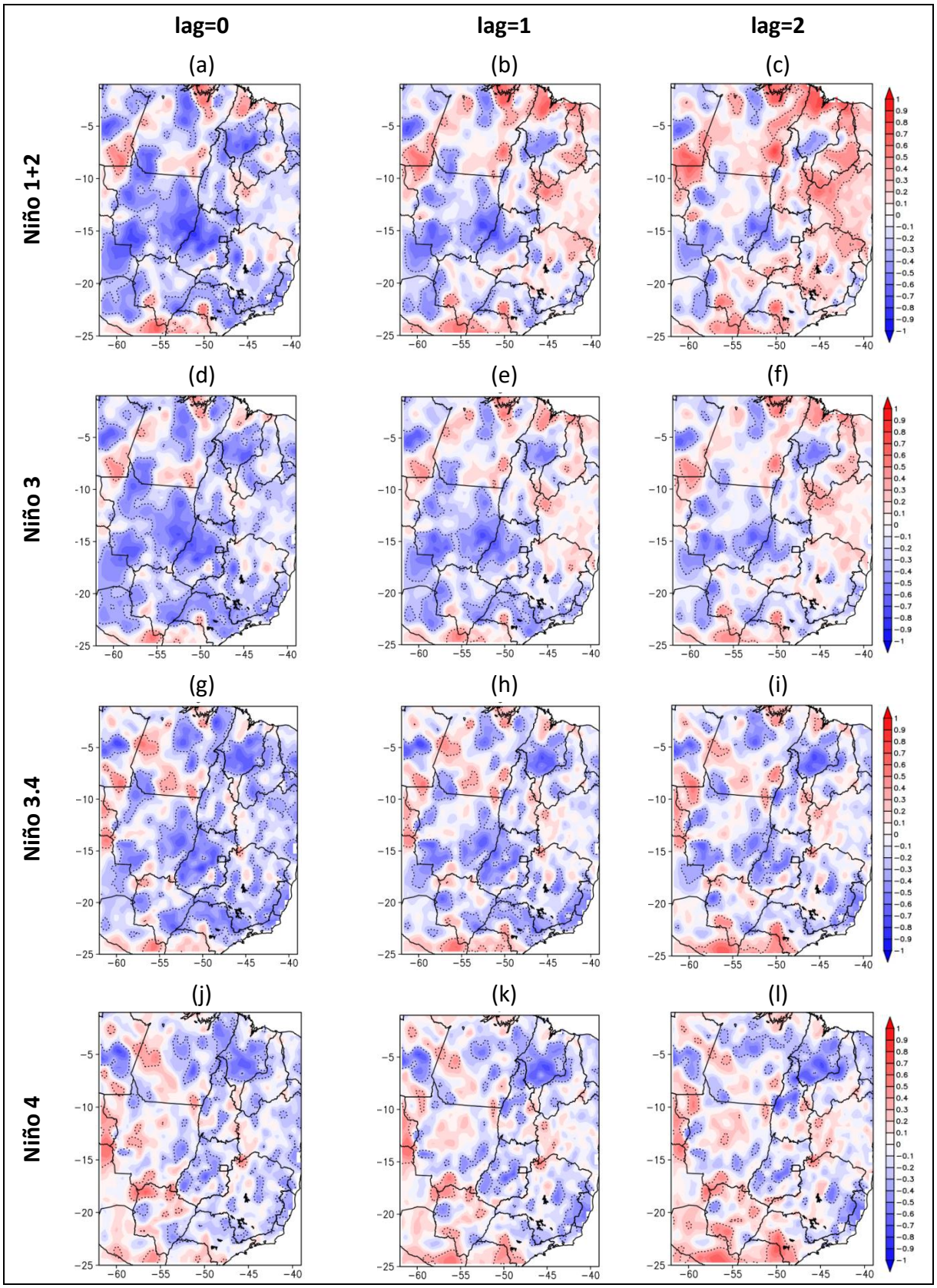
Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

No verão (lag=0), r=-0,5 predomina em São Paulo, Goiás, Mato Grosso, Tocantins e Maranhão associada às regiões do Niño 1+2 e Niño 3 (Figuras 2a, 2d). Nas regiões do Niño 3.4 e Niño 4 há uma redução espacial das correlações significativas (Figuras 2g, 2j). Estes resultados sugerem reduções (aumentos) das chuvas no Cerrado brasileiro em qualquer posição espacial da TSM quente (fria) no Pacífico equatorial durante o verão. No lag=1 persiste correlação negativa associada às regiões do Niño 3.4 e Niño 4 (Figuras 2h, 2k). Por outro lado, a correlação associada às regiões do Niño 1+2 e Niño 3 reduz significativamente e/ou inverte o sinal quando comparada ao lag=0 (Figuras 2b, 2e). Isso ocorre sobretudo no leste do Cerrado (Minas Gerais, Bahia e Piauí). No lag=2 apenas o centro de Goiás, norte do Tocantins e centro-sul do Maranhão mantem os mesmos sinais de correlação negativa para todas as regiões do Niño. Nas demais áreas nota-se diminuição (aumento) de correlação negativa (positiva) significativa para São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás (leste do Cerrado e norte do Maranhão e do Piauí) (Figuras 2c, 2f, 2i, 2l).

No outono (lag=0), correlação negativa (positiva) menor (maior) que r=-0,5 (r=0,5) é observada entre as anomalias de TSM de todas as regiões do Niño e as chuvas na faixa leste e centro-norte (sul e oeste) do Cerrado (Figuras 3a, 3d, 3g, 3j). As diferenças são observadas em relação à redução (aumento) dos sinais negativos (positivos) no extremo norte-noroeste (sul e oeste) à medida que as anomalias de TSM são de áreas mais distantes da costa oeste da América do Sul (região do Niño 3.4 e Niño 4) (Figuras 3g, 3g). Estes resultados sugerem que durante eventos de aquecimento no Pacífico equatorial centro-oeste no outono haja um dipolo de precipitação pluvial na América do Sul central. Este dipolo seria caracterizado por chuvas acima (abaixo) da média a oeste (a leste). O contrário seria observado para eventos frios de TSM. Para o lag=1 e lag=2 é possível observar poucas modificações em relação ao padrão espacial de correlação no lag=0 (Figuras 3b-c, 3e-f, 3h-i, 3k-l).

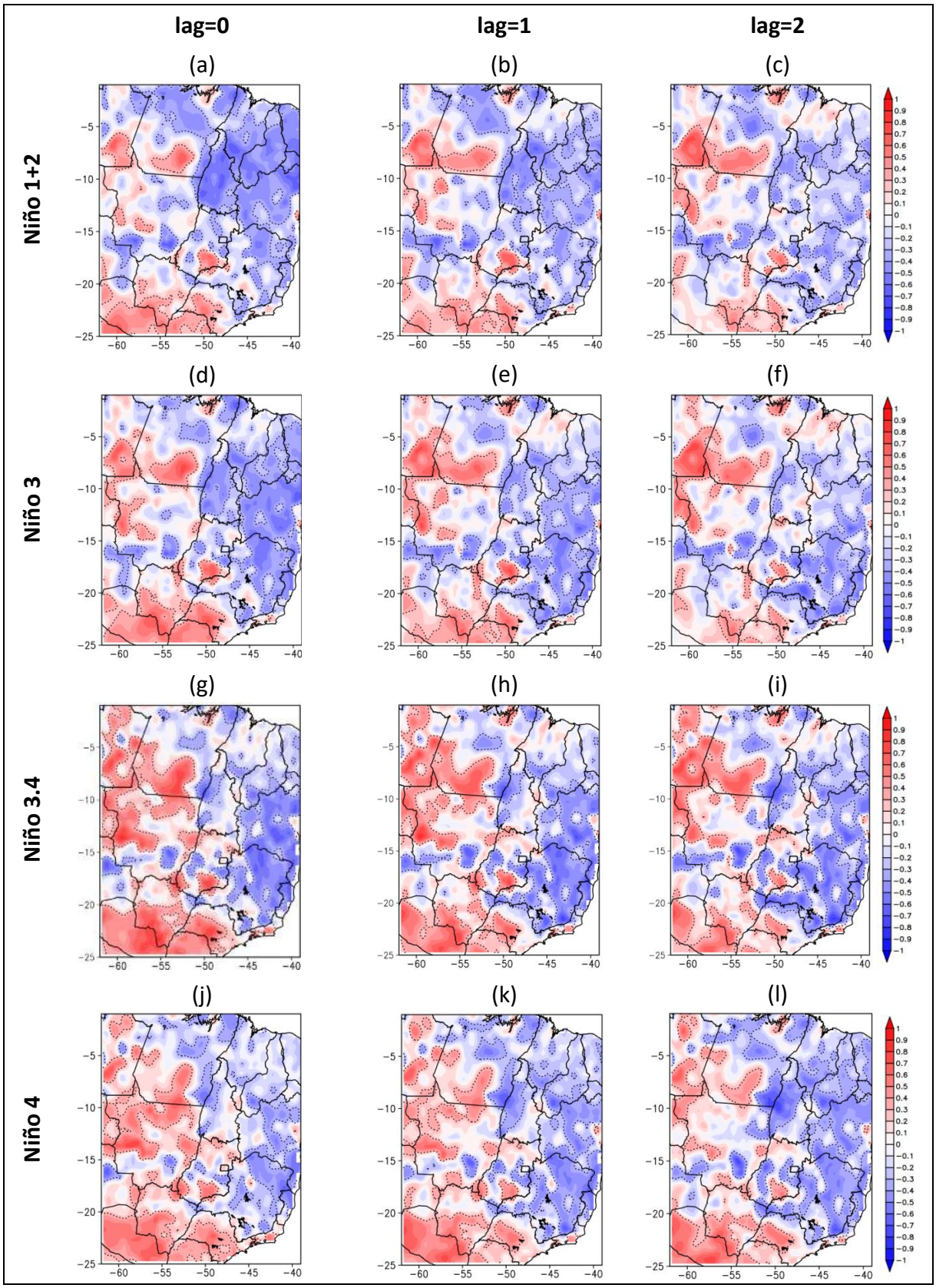
No inverno (lag=0), correlação negativa de r=-0,5 no sul do Cerrado brasileiro são associados às regiões do Niño 3.4 e Niño 4. Nas regiões centro-nordeste do Cerrado, correlação negativa (positiva) é observada quando as chuvas são associadas às regiões do Niño 1+2 e Niño 3 (Niño 3.4 e Niño 4), conforme as Figuras 6a e 6d (Figuras 4g e 4j). No lag=1 e lag=2, poucas modificações podem ser observadas em relação ao padrão do lag=0. Apenas sinais associados à região do Niño 4 apresentam enfraquecimento (fortalecimento) em suas significâncias no sul (norte) do Cerrado, principalmente nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul (Maranhão e Piauí) (Figuras 4b-c, 4e-f, 4h-l, 4k-l).

Figura 2 - Correlação linear no lag=0 (coluna da esquerda), lag=1 (coluna central) e lag=2 (coluna da direita) entre a precipitação pluvial nos estados que abrangem o Cerrado brasileiro e as anomalias de TSM nas regiões do (a, b, c) Niño 1+2, (d, e, f) Niño 3, (g, h, i) Niño 3.4 e (j, k, l) Niño 4 para a estação do verão de 1980 a 2019. Áreas pontilhadas indicam correlações significativas ao nível de 5%.



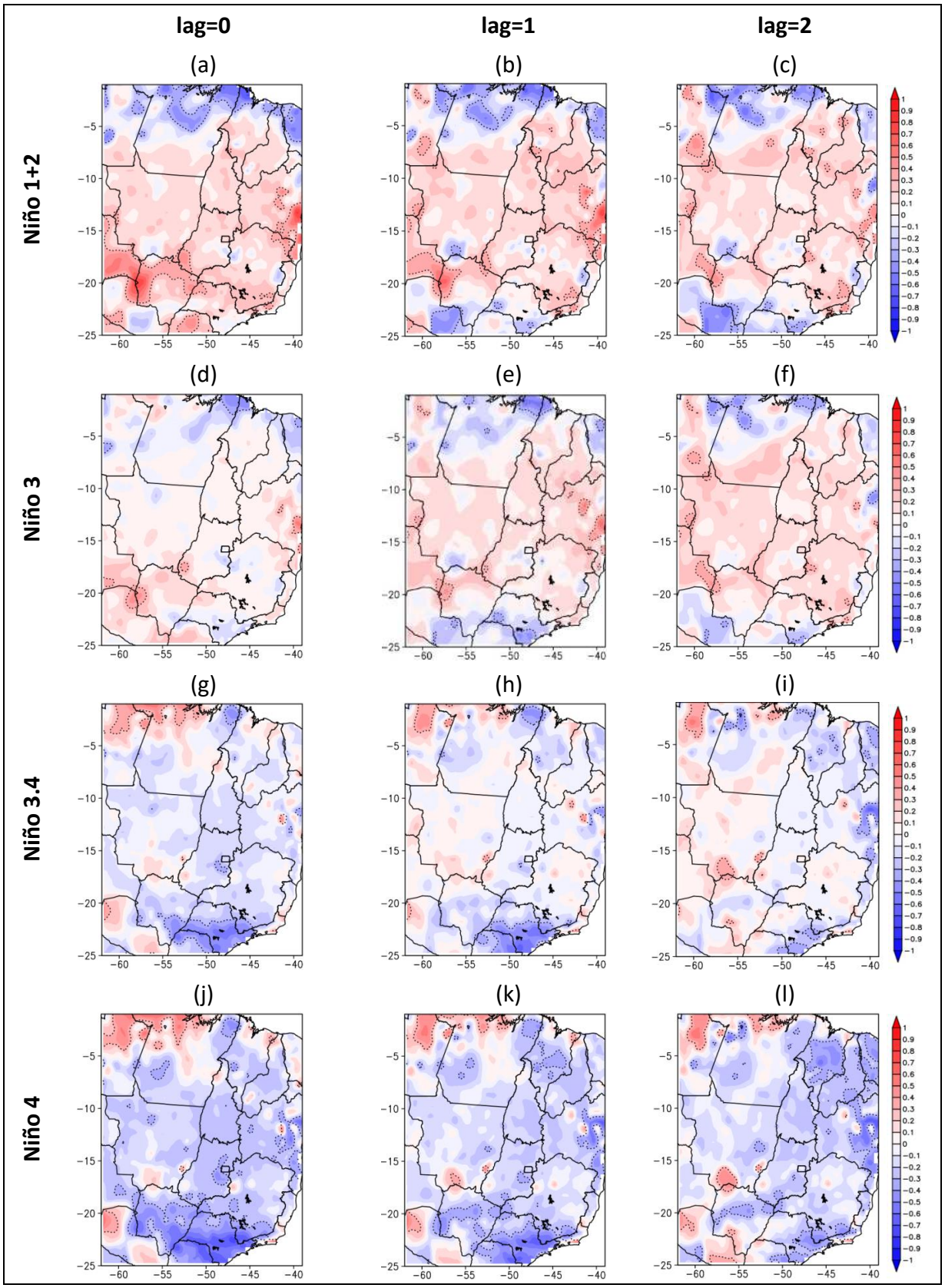
Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Figura 3 - Correlação linear no lag=0 (coluna da esquerda), lag=1 (coluna central) e lag=2 (coluna da direita) entre a precipitação pluvial nos estados que abrangem o Cerrado brasileiro e as anomalias de TSM nas regiões do (a, b, c) Niño 1+2, (d, e, f) Niño 3, (g, h, i) Niño 3.4 e (j, k, l) Niño 4 para a estação do outono de 1980 a 2019. Áreas pontilhadas indicam correlações significativas ao nível de 5%.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Figura 4 - Correlação linear no lag=0 (coluna da esquerda), lag=1 (coluna central) e lag=2 (coluna da direita) entre a precipitação pluvial nos estados que abrangem o Cerrado brasileiro e as anomalias de TSM nas regiões do (a, b, c) Niño 1+2, (d, e, f) Niño 3, (g, h, i) Niño 3.4 e (j, k, l) Niño 4 para a estação do inverno de 1980 a 2019. Áreas pontilhadas indicam correlações significativas ao nível de 5%.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

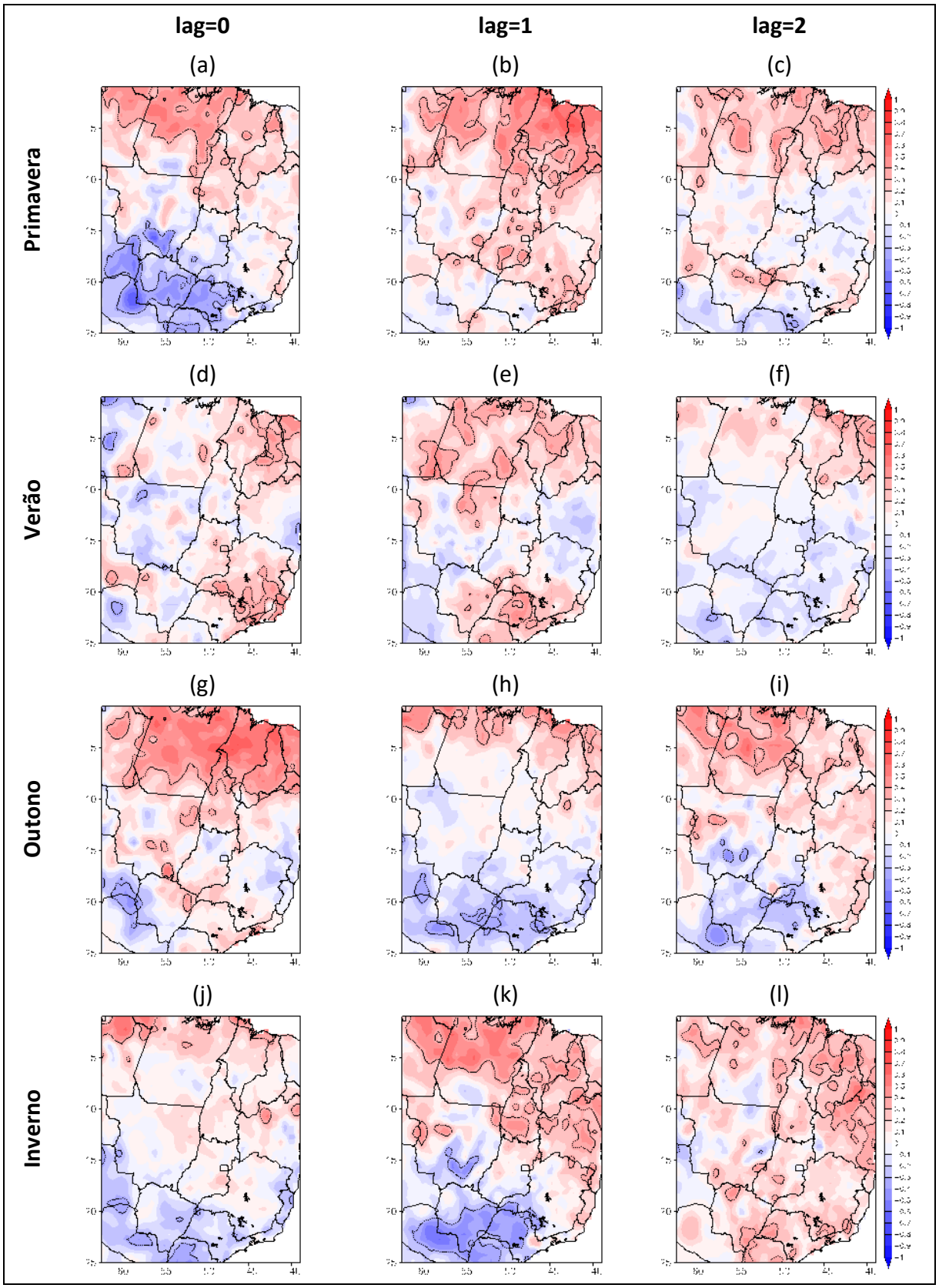
3.2. Teleconexão trópico-subtrópico: Dipolo do Atlântico Sul

A teleconexão trópico-subtrópico da precipitação pluvial no Cerrado brasileiro pode ser observada por meio da correlação sazonal com o índice do Dipolo do Atlântico Sul (Figura 5). Durante a primavera (lag=0, Figura 5a) a correlação é positiva no norte do Cerrado (áreas pontuais no nordeste do Mato Grosso e sudoeste do Tocantins, centro e norte do Maranhão), com máxima correlação de r=0,5. Por outro lado, a correlação é negativa no sul do Cerrado (estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e sul do Mato Grosso), além de áreas pontuais no oeste de Minas Gerais e sul de Goiás, com máxima correlação de r=-0,6 no Mato Grosso. No lag=1 (Figura 5b), a correlação positiva no norte do Cerrado apresenta uma maior abrangência espacial sobre o Maranhão e centro-norte do Tocantins em relação ao lag=0, além de áreas no sul do Piauí, oeste da Bahia, Mato Grosso e Goiás. A máxima correlação é de r=0,7 no Maranhão. No lag=2 (Figura 5c), a intensidade e as áreas de correlação positiva reduzem significativamente em relação ao lag=1, persistindo no Maranhão, norte do Mato Grosso do Sul, sul de Goiás e oeste de Minas Gerais, com máximo de r=0,4.

No verão (lag=0, Figura 5d) a correlação é positiva em Minas Gerais, no norte de Goiás e do Maranhão, de até r=0,5 no oeste de Minas Gerais. No lag=1 (Figura 5e), a correlação permanece positiva, abrangendo o estado de São Paulo, oeste de Minas Gerais, extremo sul de Goiás, centro-sul do Mato Grosso do Sul e centro-norte do Maranhão. No lag=2 (Figura 5f), correlação positiva ocorre somente no norte do Maranhão e no sul do Piauí.

No outono (lag=0, Figura 5g) a correlação é positiva em grande parte do norte do Cerrado (estado do Maranhão, norte do Tocantins e sul do Piauí), além de áreas no Mato Grosso e leste do Mato Grosso do Sul, com máxima correlação de r=0,8 no Maranhão. No lag=1 (Figura 5h) persiste correlação positiva no norte do Cerrado, porém de menor intensidade e área de abrangência, abarcando somente o norte do Maranhão. Correlação negativa pode ser observada no Mato Grosso do Sul, de até r=-0,4. No lag=2 (Figura 5i) existe uma redução das áreas de correlação positiva sobre o Cerrado, abrangendo áreas pontuais no Maranhão, norte do Tocantins e nordeste do Mato Grosso, além de correlação negativa no sul do Mato Grosso, nordeste do Mato Grosso do Sul e oeste de Minas Gerais.

Figura 5 - Correlação linear no lag=0 (coluna da esquerda), lag=1 (coluna central) e lag=2 (coluna da direita) entre a precipitação pluvial nos estados que abrangem o Cerrado brasileiro e o índice do Dipolo do Atlântico Sul na (a, b, c) primavera, (d, e, f) verão, (g, h, i) outono e (j, k, l) inverno de 1980 a 2019. Áreas pontilhadas indicam correlações significativas ao nível de 5%.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

No inverno (lag=0, Figura 5j) há correlação positiva (negativa) pontualmente no norte do Maranhão e oeste da Bahia (leste do Mato Grosso do Sul). Por outro lado, no lag=1 (Figura 5k) as correlações são abrangentes sobre o Cerrado brasileiro, sendo positivas no norte (nordeste do Mato Grosso, Tocantins, oeste da Bahia, sul do Piauí e Maranhão) e negativas no sul (sul do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, oeste de Minas Gerais e São Paulo), com máxima correlação de r=-0,5 no Mato Grosso. No lag=2 (Figura 5l) existe uma redução das áreas de correlação com significância estatística, sendo positivas em áreas dos estados de Goiás, Mato Grosso, Tocantins, oeste da Bahia, sul do Piauí e Maranhão.

No norte do Cerrado (Maranhão, sul do Piauí, oeste da Bahia, Tocantins Mato Grosso e Goiás) a correlação é predominantemente positiva, uma vez que na fase negativa (positiva) do Dipolo do Atlântico Sul as anomalias negativas (positivas) de TSM no Polo Nordeste do Atlântico Sul favorecem o deslocamento para norte (para sul) da ZCIT (*e.g.*, GREEN; MARSHALL, 2017), resultando em anomalias negativas (positivas) de precipitação pluvial no norte do Cerrado brasileiro. No sul do Cerrado (São Paulo, oeste de Minas Gerais e Mato Grosso do Sul), a correlação é negativa durante o inverno e primavera (primavera lag=0, outono lag=1 e 2 e inverno lag=0 e 1). A correlação negativa é observada, pois na fase negativa (positiva) do Dipolo do Atlântico Sul, com as anomalias de TSM positivas (negativas) no Polo Sudoeste do Atlântico Sul, há convergência (divergência) de ar em superfície (NNAMCHI; LI; ANYADIKE, 2011; NNAMCHI; LI, 2011), o que favorece (desfavorece) os movimentos ascendentes, formação de nuvens e precipitação pluvial no sul do Cerrado brasileiro. Por outro lado, as correlações são positivas no sul do Cerrado durante o verão e outono (primavera lag=1 e 2, verão lag=0 e 1, outono lag=0 e inverno lag=2), pois o ASAS está afastado da costa leste do Brasil nesse período, sendo enfraquecido (fortalecido) na fase positiva (negativa) do Dipolo do Atlântico Sul (NNAMCHI; LI; ANYADIKE, 2011), favorecendo (desfavorecendo) a passagem de frentes frias e ciclones extratropicais em direção às latitudes tropicais do país. Tais sistemas atmosféricos contribuem para o aporte de umidade na Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS; BOMBARDI et al., 2014).

3.3. Teleconexão trópico-extratrópico: Modo Anular Sul

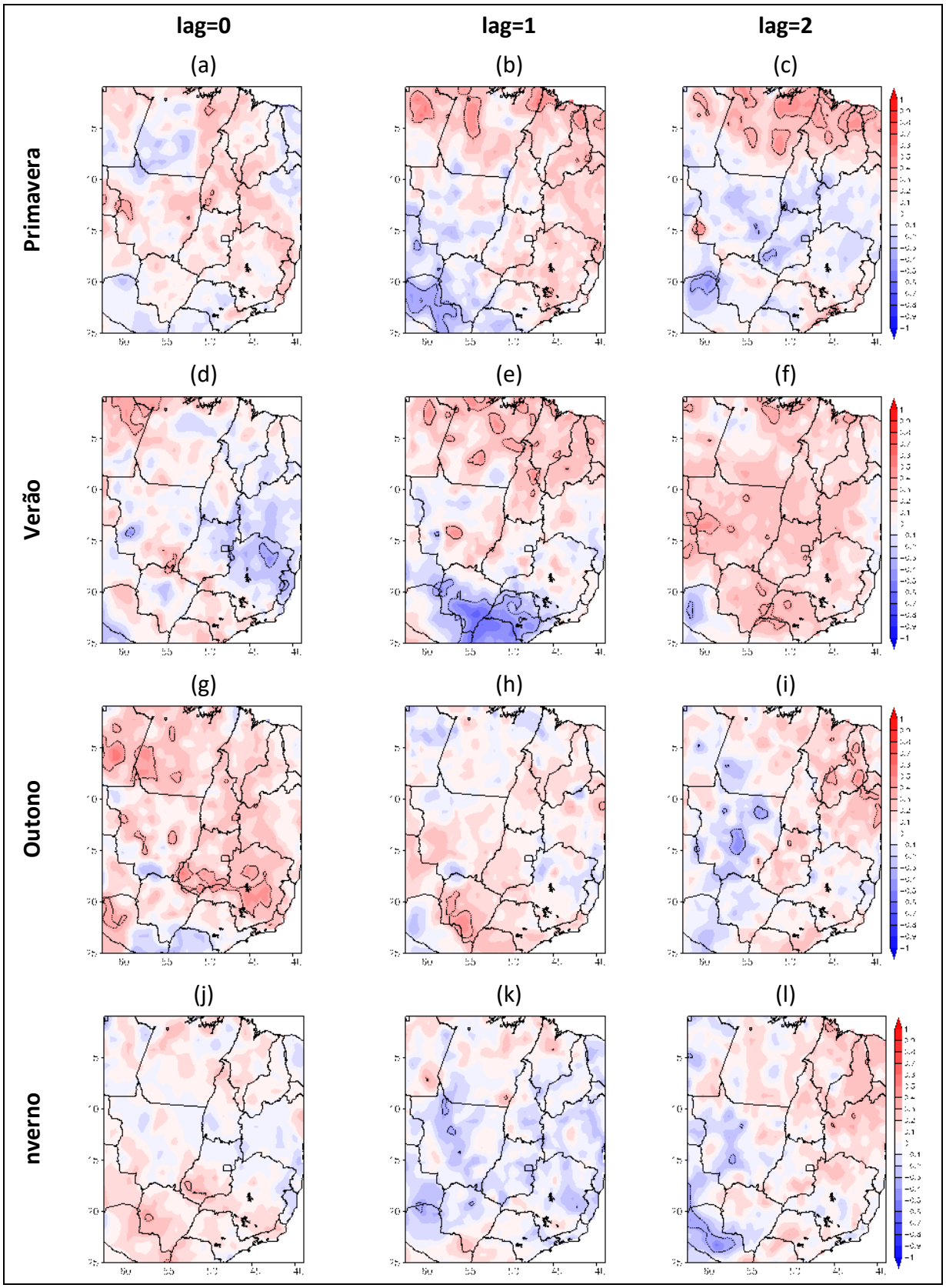
A teleconexão trópico-extratrópico da precipitação pluvial no Cerrado brasileiro pode ser observada através da correlação sazonal com o índice SAM (Figura 6). Na primavera

(lag=0, Figura 6a), a correlação é positiva no sul do Tocantins e no oeste do Mato Grosso, indicando que redução (aumento) da chuva está associada à polaridade negativa (positiva) do SAM. No lag=1 (Figura 6b) a correlação é positiva no norte do Maranhão. No lag=2 (Figura 6c) as áreas de correlação são mais abrangentes sobre o Cerrado brasileiro em relação ao lag=1, sendo positivas no Maranhão (até r=0,5) e negativas no sudoeste de Goiás e no leste do Mato Grosso, indicando que redução (aumento) da precipitação pluvial está associada à polaridade positiva (negativa) do SAM. No verão (lag=0, Figura 6d) a correlação é positiva no extremo oeste de Minas Gerais e entre o sudeste do Mato Grosso e o norte do Mato Grosso do Sul, enquanto é negativa no norte de Minas Gerais e no oeste do Mato Grosso. No lag=1 (Figura 6e) as correlações são positivas no centro do Mato Grosso, Tocantins e Maranhão, enquanto em grande parte do estado de São Paulo e Mato Grosso do Sul as correlações são negativas (até r=-0,6). No lag=2 (Figura 6f) as correlações se invertem em São Paulo e Mato Grosso do Sul, permanecendo positivas no Mato Grosso e no norte do Maranhão.

No outono (lag=0, Figura 6g), a correlação é positiva em Minas Gerais, sul de Goiás, Mato Grosso e áreas pontuais do Tocantins, de até r=0,5. No lag=1 (Figura 6h) a correlação é positiva somente no sudoeste do Mato Grosso do Sul (até r=0,5). No lag=2 (Figura 6i) a correlação é positiva em áreas pontuais no norte de Goiás, sul do Piauí e norte do Maranhão e negativa no Mato Grosso. No inverno (lag=0, Figura 6j) a correlação é positiva no sul de Goiás e no oeste do Mato Grosso do Sul. No lag=1 (Figura 6k) há correlações negativas em áreas pontuais no norte do Mato Grosso do Sul, enquanto no lag=2 (Figura 6l) há correlação negativa (positiva) em área pontual no sul do Mato Grosso (oeste da Bahia).

O predomínio de correlações positivas em relação às negativas está de acordo com estudos prévios. Na fase ativa do Sistema de Monção da América do Sul, a fase negativa (positiva) do SAM está associada a ZCAS mais fraca (intensa) e menos (mais) persistente (ROSSO et al., 2018; VASCONCELOS; PIZZOCHERO; CAVALCANTI, 2019), pois a passagem de sistemas sinóticos sobre a Região Sul do Brasil é favorecida na fase negativa do SAM (RUDEVA; SIMMONDS, 2015). Assim, existe um menor transporte de umidade na região da ZCAS e um enfraquecimento da atividade convectiva tropical (ROSSO et al., 2018; VASCONCELLOS; PIZZOCHERO; CAVALCANTI, 2019). Na Região Norte e Nordeste do país a correlação positiva é explicada devido ao fato que na fase negativa (positiva) do SAM, o ASAS está posicionado anomalamente para norte (sul), assim como a ZCIT, contribuindo com redução (aumento) das chuvas nestas Regiões (CARPENEDO; AMBRIZZI, 2020).

Figura 6 - Correlação linear no lag=0 (coluna da esquerda), lag=1 (coluna central) e lag=2 (coluna da direita) entre a precipitação pluvial nos estados que abrangem o Cerrado brasileiro e o índice SAM na (a, b, c) primavera, (d, e, f) verão, (g, h, i) outono e (j, k, l) inverno de 1980 a 2019. Áreas pontilhadas indicam correlações significativas ao nível de 5%.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

3.4. Simulação estocástica da precipitação pluvial

Os resultados apresentados mostram correlações estatisticamente significativas, o que sugere a possibilidade de representação da precipitação pluvial no Cerrado brasileiro através das anomalias de TSM nas regiões do Niño, do Dipolo do Atlântico Sul e do SAM.

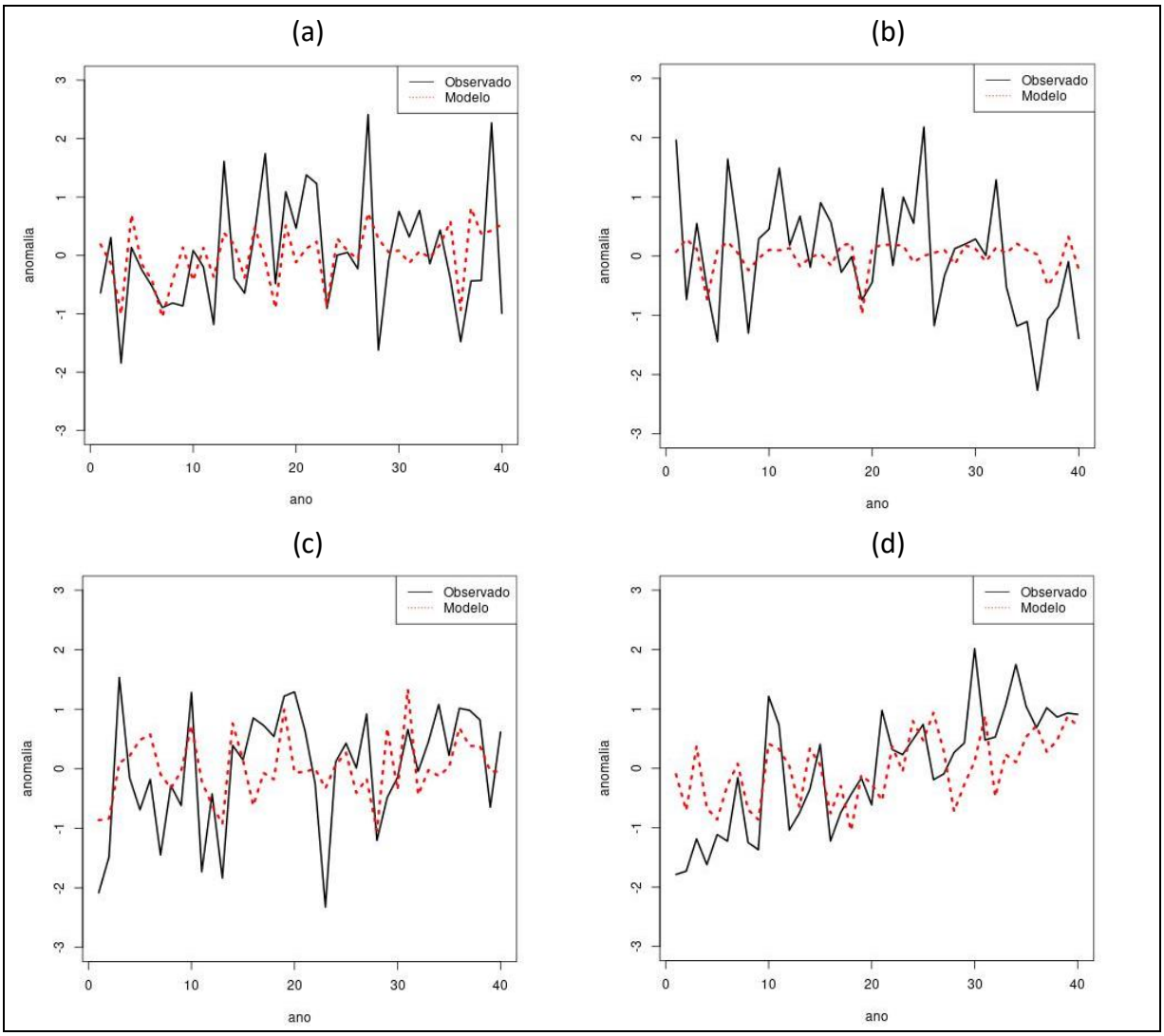
Na primavera (Figura 7a), o modelo estocástico melhor ajusta as chuvas no Cerrado brasileiro com as variáveis independentes de anomalias de TSM nas regiões do Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4. Nesta simulação, o coeficiente de determinação sugere que tais variáveis independentes possam explicar até 27% da precipitação pluvial no Cerrado durante a primavera.

No verão (Figura 7b), o modelo estocástico apresenta os piores resultados em relação às demais estações do ano. Com coeficiente de determinação de quase R^2=0,10, apenas as anomalias de TSM nas regiões do Niño 1+2 e Niño 3 apresentam ajustes lineares com 90% de significância estatística. Estes resultados sugerem que apenas 10% da precipitação pluvial observada no Cerrado durante o verão estaria associada às anomalias de TSM nas regiões do Niño 1+2 e Niño 3. Os outros 90% da variabilidade das chuvas estariam relacionados a outros mecanismos físicos e dinâmicos locais, regionais e/ou globais, os quais precisam ser melhor investigados.

A simulação estocástica da precipitação pluvial no Cerrado brasileiro para o outono (Figura 7c) apresenta R^2=0,32, tendo a variável independente índice SAM provendo os melhores ajustes lineares, com significância estatística acima de 99%. Do ponto de vista da estatística, o resultado do coeficiente de determinação sugere que 32% das chuvas do Cerrado durante o outono estão associadas à variabilidade do SAM. Contudo, estudos dinâmicos, como os apresentados por Rudeva e Simmonds (2015) e Carpenedo e Ambrizzi (2020), precisam ser realizados para a comprovação dos resultados aqui apresentados.

O modelo estocástico elaborado para a simulação das chuvas de inverno no Cerrado (Figura 7d) apresenta coeficiente de determinação igual a R^2=0,34 e está linearmente mais bem ajustado às variáveis independentes índice SAM e anomalias de TSM em todas as regiões do Niño. A significância estatística esteve acima de 95% durante todas as etapas da simulação. Os dados apresentados neste experimento estatístico sugerem que 34% da variabilidade das chuvas de inverno no Cerrado brasileiro estejam associadas ao SAM e às anomalias de TSM nas quatro regiões do Niño.

Figura 7 - Anomalia normalizada de precipitação pluvial no Cerrado brasileiro observada (linha preta) e simulada (linha vermelha) na (a) primavera, (b) verão, (c) outono e (d) inverno.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

4. CONCLUSÕES

Neste estudo foi investigado como as teleconexões afetam a precipitação pluvial sazonal no Cerrado brasileiro através da análise de correlação linear espacial e da construção de modelos estocásticos de simulação entre a precipitação pluvial (CPC/NOAA) e os índices climáticos (anomalias de TSM nas regiões do Niño, Dipolo do Atlântico Sul e SAM).

A teleconexão trópico-trópico entre as chuvas no Cerrado brasileiro e as anomalias de TSM nas quatro regiões do Niño indica que cada região possivelmente se associe de forma distinta à precipitação pluvial no Cerrado. Da mesma forma, uma mesma região do Niño pode influenciar de forma diversa a precipitação pluvial na área de estudo. Entre o

inverno e o verão, as anomalias negativas (positivas) de TSM nas regiões do Niño 3.4 e Niño 4 estão associadas com chuvas acima (abaixo) da média no centro-sul e em áreas pontuais do leste do Cerrado. Por outro lado, no outono os padrões de precipitação pluvial associados às anomalias de TSM nas regiões do Niño 3.4 e Niño 4 são opostos. Nas regiões do Niño 1+2 e Niño 3 é observada correlação positiva (negativa) no centro-sul (norte) durante a primavera e outono. No inverno (verão) há predomínio de correlação positiva (negativa) em quase todo o Cerrado. No lag=1 e lag=2 há áreas com correlação semelhante ao observado no lag=0 e áreas com sinal invertido.

A teleconexão trópico-subtrópico entre a precipitação pluvial no Cerrado brasileiro e o Dipolo do Atlântico Sul apresenta predomínio de correlação positiva no norte do Cerrado, o que sugere que a fase negativa (positiva) do Dipolo do Atlântico Sul resulta em anomalias negativas (positivas) de precipitação pluvial, provavelmente associada à posição anômala da ZCIT para norte (para sul). No sul do Cerrado, no inverno e primavera a correlação é negativa, possivelmente associada à convergência (divergência) de ar em superfície, favorecendo (desfavorecendo) a precipitação pluvial. Por outro lado, no verão e outono a correlação é positiva, possivelmente associada ao enfraquecimento (fortalecimento) do ASAS, o que fortalece (enfraquece) a atividade da ZCAS.

A teleconexão trópico-extratrópico entre a precipitação pluvial no Cerrado brasileiro e o índice SAM apresenta predomínio de correlação positiva em relação à correlação negativa, possivelmente associada a menor (maior) atividade da ZCAS na fase negativa (positiva) do SAM, além de um deslocamento anômalo do ASAS e da ZCIT para norte (sul), resultando em anomalias negativas (positivas) de precipitação pluvial no norte do Cerrado.

O modelo de simulação estocástica sugere que parte da precipitação pluvial observada no Cerrado brasileiro possivelmente seja influenciada pela variabilidade dos modos climáticos de baixa frequência investigados neste estudo, especialmente no outono e inverno. Segundo os resultados obtidos a partir do coeficiente de determinação (R^2), pouco mais de 30% das chuvas no outono e inverno estariam associadas ao SAM e às anomalias de TSM nas quatro regiões do Niño.

REFERÊNCIAS

BOMBARDI, Rodrigo José; CARVALHO, Leila Maria Vespoli de; JONES, Charles; REBOITA, Michelle Simões. Precipitation over eastern South America and the South Atlantic Sea surface temperature during neutral ENSO periods. **Climate Dynamics**, v.42, p.1553-1568, 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-013-1832-7

CARPENEDO, Camila Bertoletti; AMBRIZZI, Tércio. Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul associado ao Modo Anular Sul e impactos climáticos no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.35, n.4, p.1-9, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/0102-77863540066

COUTINHO, Leopoldo Magno. **Biomas brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 160 p. ISBN 9788579752544.

GILLETT, Nathan; KELL, T.; JONES, Philip. Regional climate impacts of the Southern Annular Mode. **Geophysical Research Letters**, v.33, n.23, p.1-4, 2006. DOI: https://doi.org/10.1029/2006GL027721

GREEN, Brian; MARSHALL, John. Coupling of Trade Winds with Ocean Circulation Damps ITCZ Shifts. **Journal of Climate**, v.30, n.12, p.4395-4411, 2017. DOI: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0818.1

GRIMM, Alice Marlene. Variabilidade interanual do clima no Brasil. In: CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Albuquerque; FERREIRA, Nelson Jesus; JUSTI DA SILVA, Maria Gertrudes Alvarez; SILVA DIAS, Maria Assunção Faus (org.). **Tempo e Clima no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. cap. 22, p.353-374. ISBN 9788586238925.

GRIMM, Alice Marlene; AMBRIZZI, Tércio. Teleconnections into South America from the Tropics and Extratropics on Interannual and Intraseasonal Timescales. In: VIMEUX, Francoise; SYLVESTRE, Florence; KHODRI, Myriam (org.). **Past Climate Variability in South America and Surrounding Regions:** From the Last Glacial Maximum to the Holocene. 1. ed. Dordrecht: Springer, v.14, 2009. cap. 7, p.159-191. DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-2672-9

HOLTON, James Reed. **An Introduction to Dynamic Meteorology**. 4. ed. Amsterdam: Elsevier, 2004. 535 p. ISBN 0123540151.

KOUSKY, Vernon; ROPELEWSKI, Chester. **The tropospheric seasonally varying mean climate over the Western Hemisphere (1975-1995)**. NCEP/Climate Prediction Center Atlas, n.3, 1997. 135 p.

MECHOSO, Carlos Roberto; ROBERTSON, Andrew; ROPELEWSKI, Chester; GRIMM, Alice Marlene. The American Monsoon Systems: An Introduction. In: CHANG, Chih-Pei; WANG, Bin; LAU, Gabriel Ngar-Cheung (eds.). **The global monsoon system:** Research and Forecast. Genebra: World Meteorological Organization, 2005. Part B, cap. 13, p.197-206.

NNAMCHI, Hyacinth; LI, Jianping. Influence of the South Atlantic Ocean Dipole on West African summer precipitation. **Journal of Climate**, v.24, n.4, p.1184-1197, 2011. DOI: https://doi.org/10.1175/2010JCLI3668.1

NNAMCHI, Hyacinth; LI, Jianping; ANYADIKE, Raymond. Does a dipole mode really exist in the South Atlantic Ocean? **Journal of Geophysical Research**, v.116, n.D15, 2011. DOI: https://doi.org/10.1029/2010JD015579

RAO, Vadlamudi Brahmananda; CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Albuquerque; HADA, Kioshi. Annual variation of rainfall over Brazil and water vapor characteristics over South America. **Journal of Geophysical Research**, v.101, n.D21, p.26539-26551, 1996. DOI: https://doi.org/10.1029/96JD01936

ROSSO, Flávia Venturini; BOIASKI, Nathalie Tissot; FERRAZ, Simone Erotildes Teleginski; ROBLES, Tiago Capello. Influence of the Antarctic Oscillation on the South Atlantic Convergence Zone. **Atmosphere**, v.9, n.11, p.1-19, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/atmos9110431

RUDEVA, Irina; SIMMONDS, Ian. Variability and Trends of Global Atmospheric Frontal Activity and Links with Large-Scale Modes of Variability. **Journal of Climate**, v.28, n.8, p.3311-3330, 2015. DOI: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00458.1

SILVA, Viviane; KOUSKY, Vernon. The South American Monsoon System: Climatology and Variability. In: WANG, Shih-Yu; GILLIES, Robert (eds.). **Modern Climatology**. Londres: InTech, 2012. cap. 5, p.123-152. DOI: https://doi.org/10.5772/38565

THOMPSON, David; WALLACE, John. M. Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month Variability. **Journal of Climate**, v.13, n.5, p.1000-1016, 2000. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2

VASCONCELLOS, Fernanda Cerqueira; PIZZOCHERO, Renan Martins; CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Albuquerque. Month-to-month impacts of Southern Annular Mode over South America climate. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v.41, n.1, p.783-792, 2019. DOI: https://doi.org/10.11137/2019_1_783_792