

Tendências de mudanças climáticas e eventos extremos de temperatura e precipitação em Goiás e no Distrito Federal (1980 a 2020)

Climate change trends and extreme temperature and precipitation events in Goiás and the Federal District (1980 to 2020)

Tendencias del cambio climático y eventos extremos de temperatura y precipitación en Goiás y el Distrito Federal (1980 a 2020)

Guilherme Cardoso da Silva

Bacharel em Ecologia e Análise Ambiental e Mestrando em Geografia pela Universidade Federal de Goiás, UFG, Brasil
guilherme_card1@hotmail.com

Diego Tarley Ferreira Nascimento

Bacharel, Mestre e Doutor em Geografia, Professor Adjunto da Universidade Federal de Goiás, UFG, Brasil.
Professor Credenciado ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (Mestrado e Doutorado) da UFG e Professor Colaborador do Programa de Pós-Graduação em Geografia (Mestrado) da Universidade Estadual de Goiás (UEG)
diego_nascimento@ufg.br

RESUMO

As mudanças climáticas são inequívocas, generalizadas, aceleradas, irreversíveis e sem precedentes históricos, com eventos climáticos extremos registrados em todas as regiões do planeta, causando impactos adversos nas esferas ambientais, econômicas e sociais. A pesquisa teve como objetivo identificar os eventos extremos e detectar as tendências de mudanças climáticas no estado de Goiás e Distrito Federal, utilizando dados de temperatura do ar e precipitação pluviométrica de uma série temporal de 40 anos (1980 a 2020) registrados por oito estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para tanto, foram empregados índices desenvolvidos pelo Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices (ETCCDMI), vinculado à Organização Mundial de Meteorologia (OMM). Foram calculados 17 índices com o software R, por meio da extensão Rclimdex. Para os índices relacionados a precipitação, os dados apontam uma tendência negativa com significância estatística alta em apenas algumas estações. Para o caso dos índices relacionados à temperatura, observa-se tendência positiva com alta significância estatística em todas as estações analisadas, o que demonstra incremento das temperaturas máximas e mínimas ao longo da série temporal analisada.

PALAVRAS-CHAVE: Aquecimento Global. Tendências Climáticas. Rclimdex.

SUMMARY

Climate change is unequivocal, widespread, accelerating, irreversible and without historical precedent, with extreme climatic events recorded in all regions of the planet, causing adverse environmental, economic and social impacts. The aim of this research was to identify extreme events and detect climate change trends in the state of Goiás and the Federal District, using air temperature and rainfall data from a 40-year time series (1980 to 2020) recorded by eight conventional meteorological stations of the National Meteorological Institute (INMET). To this end, indices developed by the Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices (ETCCDMI), linked to the World Meteorological Organisation (WMO), were used. Seventeen indices were calculated with the R software, using the Rclimdex extension. For the precipitation-related indices, the data shows a negative trend with high statistical significance in only a few stations. In the case of the temperature-related indices, a positive trend with high statistical significance was observed at all the stations analysed, which shows an increase in maximum and minimum temperatures over the time series analysed.

KEYWORDS: Global Warming. Climate Trends. Rclimdex.

RESUMEN

El cambio climático es inequívoco, generalizado, acelerado, irreversible y sin precedentes históricos, con eventos climáticos extremos registrados en todas las regiones del planeta, causando impactos ambientales, económicos y sociales adversos. El objetivo de esta investigación fue identificar eventos extremos y detectar tendencias de cambio climático en el estado de Goiás y en el Distrito Federal, utilizando datos de temperatura del aire y precipitación de una serie temporal de 40 años (1980 a 2020) registrados por ocho estaciones meteorológicas convencionales del Instituto Nacional de Meteorología (INMET). Para ello, se utilizaron índices desarrollados por el Equipo de Expertos en Detección, Monitoreo e Índices de Cambio Climático (ETCCDMI), vinculado a la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Diecisiete índices se calcularon con el programa informático R, utilizando la extensión Rclimdex. En el caso de los índices relacionados con la precipitación, los datos muestran una tendencia negativa con alta significación estadística sólo en unas pocas estaciones. En el caso de los índices relacionados con la temperatura, se observó una tendencia positiva con alta significación estadística en todas las estaciones analizadas, lo que muestra un aumento de las temperaturas máximas y mínimas a lo largo de la serie temporal analizada.

PALABRAS CLAVE: Calentamiento global. Tendencias climáticas. Rclimdex.

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento das características e variabilidades (espaço-temporais) dos elementos climáticos é crucial para o planejamento e desenvolvimento das atividades humanas, contribuindo para diagnósticos e prognósticos que visam a prevenção de danos materiais e perdas de vidas.

De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), as ações humanas têm uma influência inegável nas mudanças climáticas globais. O relatório destaca que essas mudanças são generalizadas, aceleradas, irreversíveis e sem precedentes históricos. Além do aumento da temperatura média e do nível dos oceanos, as atividades humanas têm provocado eventos climáticos extremos em todo o mundo, como ondas de calor, fortes precipitações, secas e ciclones tropicais.

A Região Centro-Oeste do Brasil, com sua economia centrada na agropecuária, é especialmente vulnerável a essas mudanças. As irregularidades climáticas, como chuvas imprevisíveis e aumento de temperaturas, resultam em perdas de safras agrícolas e impactos na criação de gado (CASSOL; BOHNER, 2012), com consequentes prejuízos na produção e geração de renda.

Além disso, os eventos extremos e as mudanças climáticas afetam a disponibilidade hídrica para abastecimento doméstico e para geração de energia elétrica, acarretando impactos adversos relacionados ao nexus água-alimento-energia (HOFF, 2011; RODRIGUES, 2017). Segundo Hoff (2011), as mudanças climáticas acentuarão a pressão sobre os recursos naturais, aumentando a demanda de água, energia e alimentos, especialmente em comunidades e ecossistemas menos resilientes e já afetados pela escassez de água (MARENGO et al., 2009).

Não obstante, é importante frisar que, para o contexto do Centro-Oeste brasileiro, os cenários futuros apresentados no AR06 (IPCC, 2021) apontam para um clima ainda mais quente e seco, com tendência de aumento de ondas de calor e possíveis mudanças no regime de chuvas – esta última não necessariamente associada ao volume de chuvas, mas principalmente com relação ao atraso no início do período chuvoso, levando a períodos de estiagem mais longos e intensos.

Dessa forma, percebe-se que as mudanças climáticas e os eventos climáticos extremos podem prejudicar e até mesmo inviabilizar a segurança hídrica, alimentar e energética, afetando, assim, o desenvolvimento econômico, o bem-estar socioambiental e até mesmo a sobrevivência humana.

Por esse motivo, tem-se como objetivo geral identificar os eventos extremos e as tendências de mudanças climáticas relacionadas a temperatura e precipitação em estações meteorológicas distribuídas no estado de Goiás e no Distrito Federal, para o período de 1980 a 2020 (40 anos). Para isso, são empregados os índices padronizados desenvolvidos pelo Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices (ETCCDMI), vinculado a Organização Mundial de Meteorologia (OMM), para averiguar possíveis tendências de mudanças climáticas e detectar eventos extremos ao longo desse intervalo temporal.

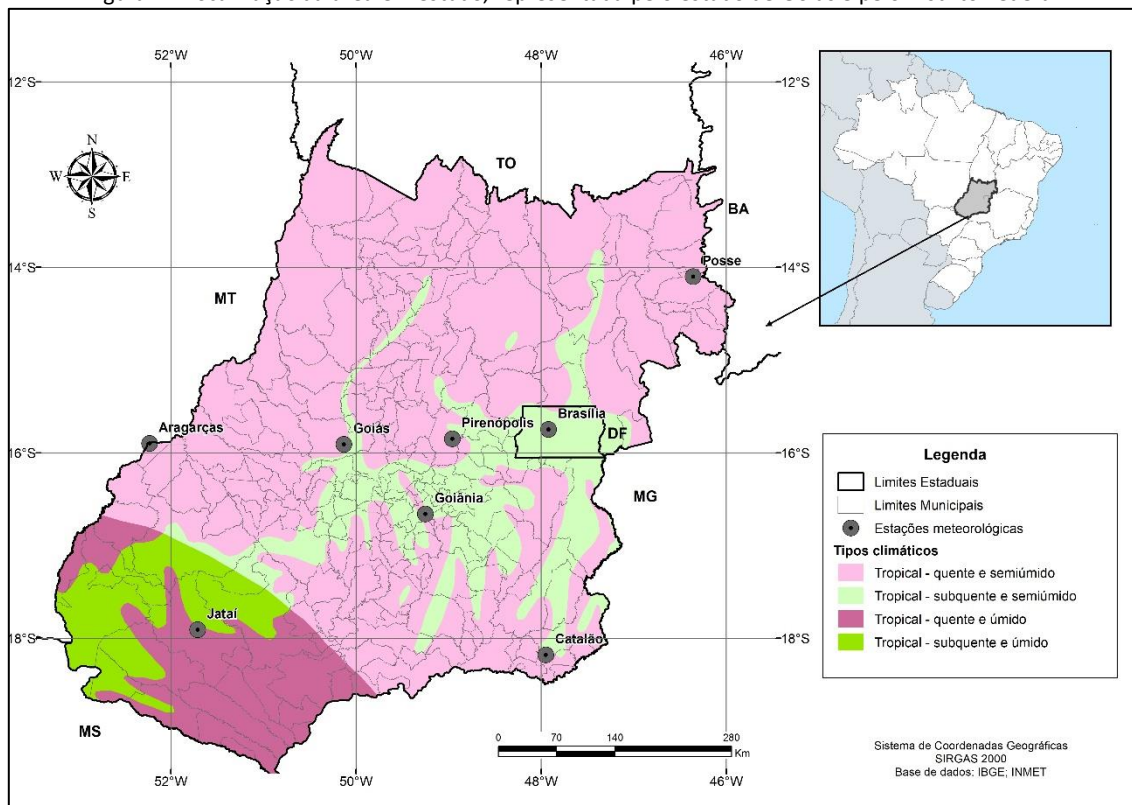
O propósito principal é confirmar os cenários de mudanças climáticas apresentados pelo IPCC para o estado de Goiás e o Distrito Federal, além de verificar variações nos padrões e tendências entre diferentes localidades na área de estudo, que representam diversas tipologias climáticas. O trabalho visa contribuir para diagnósticos e prognósticos climáticos na região.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Localização e breve caracterização da área em estudo

A área em estudo se refere ao estado de Goiás e ao Distrito Federal, em área contígua, situados na Região Centro-Oeste do Brasil – Figura 1, abrangendo uma extensão de 351.650 km² (cerca de 4% do território nacional), sendo 340.242km² referentes à Goiás e 5.760km² ao Distrito Federal. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística para 2023, a área em apreço soma uma população de 9.872.296 habitantes, dos quais 71% estão em Goiás e 29% no Distrito Federal.

Figura 1 – Localização da área em estudo, representada pelo estado de Goiás e pelo Distrito Federal



Fonte: próprios autores.

Conforme apontado por Nimer (1979), a região na qual se encontra a área em estudo apresenta temperatura média anual de 22°C, com 24°C para o mês mais quente e 18°C para o mais frio. O mesmo autor indica a média de precipitação anual variando, espacialmente, entre 1.750 a 1.550 mm, com período de estiagem de quatro meses, referente aos meses de maio a agosto.

Também de acordo com o mapa da Figura 1, percebe-se que a tipologia climática predominante em Goiás e no Distrito Federal é o Tropical quente e semiúmido, com média de temperatura maior que 18°C em todos os meses do ano e existência de 4 a 5 meses secos – condição que retrata a localização das estações de Posse, Aragarças, Goiás, Pirenópolis, Goiânia e Catalão. Ainda ocorre na área em estudo a tipologia climática denominada como Tropical quente e úmido, com a existência de apenas 3 meses secos – exemplificada pela estação de Jataí. Por fim, indicadas em tonalidades de verde, há a presença de clima Tropical subquente, com média de temperatura entre 15 e 18°C em pelo menos um mês do ano. Na área em estudo,

essa tipologia é principalmente associada a condição semiúmida, isto é, de 4 a 5 meses seco, conforme retratado pela estação meteorológica de Brasília-DF.

Luiz (2012) e Nascimento e Oliveira (2020) apontam que o clima da região é definido pelas características fisiográficas e, principalmente, pela atuação de sistemas atmosféricos de origem equatorial e tropical, com incursões de sistemas de origem polar, que repercutem dois períodos bem definidos: primavera/verão chuvoso e quente, decorrente do predomínio da massa Equatorial continental (mEc) e da Zona da Convergência do Atlântico Sul (ZCAS); e outono/inverno com temperaturas mais amenas e seco, por conta do predomínio da massa Tropical atlântica (mTa) e incursões da massa Polar, ambas em estado continentalizado.

2.2 Procedimentos Metodológicos

Para o desenvolvimento do estudo, foram utilizados os dados diários de precipitação e temperatura (máxima e mínima) provenientes de oito estações convencionais situadas no estado de Goiás e no Distrito Federal que são operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (Figura 1). A escolha por apenas tais estações se deve ao fato de serem as detentoras de mais longa série temporal de dados e maior consistência dos dados dentre aquelas existentes na área em apreço.

Para a detecção de eventos extremos e de tendências de mudanças climáticas foram empregados índices desenvolvidos pelo *Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices* (ETCCDMI), vinculado à Organização Mundial de Meteorologia (OMM). Os índices têm o objetivo de indicar, mensurar e detectar variabilidades e mudanças nos parâmetros climáticos através de índices padronizados, assegurando a observação e comparação na escala global. Os mesmos foram desenvolvidos durante um workshop realizado entre 3 e 6 de junho de 1997, em Asheville, Nort Carolina (EUA), que contou com a participação de 100 participantes, de 23 países (KARL, NICHOLLS, GHAZI, 1999). Uma descrição completa pode ser consultada no relato completo (PETERSON, et al., 2001) ou a partir da síntese (PETERSON, 2005) do workshop.

Os índices padronizados do ETCCDMI/OMM são comuns na literatura científica internacional (MANTON et al., 2001; VICENT et al., 2005; ALEXANDER et al., 2006; HAYLOCK et al., 2006; TORETI; DESIATO, 2008; HERRERA; PINZÓN, 2012; ARAÚJO; SANTOS, NASCIMENTO, 2015; WANG et al., 2017; RAHMAN, SENKBEIL, KELLINGS, 2023). No caso do Brasil, tais índices foram aplicados para diferentes trabalhos voltados às regiões ou localidades em seu interior no Centro-Oeste (SANTOS, et al., 2006; REBELLO, SALES, 2008; ALMEIDA, 2012), Norte (ALMEIDA, et al., 2016; SANTOS, et al., 2021), Sudeste (ZANDONADI et al., 2016), Nordeste (SANTOS, et al., 2009; SILVA, MONTENEGRO, SOUZA, 2017) e Sul (SILVA et al., 2015; ELY; FORTIN, 2020).

Dentre os 27 índices propostos pelo ETCCDMI/OMM, dezessete foram empregados no estudo, sendo dez associados à temperatura do ar e sete à precipitação (Quadro 1). Para cálculo dos índices, foi definida uma série temporal comum a todas as estações, que abrangeu o período de 1980 a 2020, totalizando 40 anos. Os dados para cálculo dos índices foram organizados em planilhas de Excel, seguindo adequações necessárias para a inserção na extensão Rclimdex do programa R. Isso incluiu a substituição de valores inexistentes por “-99.9”.

Quadro 3 – Relação dos índices de detecção de tendência de mudanças climáticas empregados

Sigla	Nome	Descrição	Unidade
TXx	Maior Temperatura Máxima	Valor mensal máximo da temperatura máxima diária	°C
TXn	Menor Temperatura Máxima	Valor mensal mínimo da temperatura máxima diária	°C
TNx	Maior Temperatura Mínima	Valor mensal máximo da Temperatura mínima diária	°C
TNn	Menor Temperatura mínima	Valor mensal mínimo da temperatura mínima diária	°C
TX10p	Dias frios	Percentual de dias em que a temperatura máxima diária ficou abaixo do percentil 10	Dias
TX90p	Dias quentes	Percentual de dias em que a temperatura máxima diária ficou acima do percentil 90	Dias
TN10p	Noites frias	Percentual de dias em que a temperatura mínima diária percentil 10	Dias
TN90p	Noites quentes	Percentual de dias em que a temperatura mínima diária ficou acima do percentil 90	Dias
WSDI	Duração de períodos quentes	Quantidade de dias com pelo menos 6 dias consecutivos em que a temperatura máxima diária ficou acima do percentil 90	Dias
CSDI	Duração de períodos frios	Quantidade de dias com pelo menos 6 dias consecutivos em que a temperatura mínima diária ficou abaixo do percentil 10	Dias
RX1day	Quantidade máxima de precipitação em 1 dia	Volume máximo de precipitação em um dia	mm
Rx5day	Quantidade máxima de precipitação em 5 dias	Volume máximo de precipitação em cinco dias	mm
R10	Número de dias com precipitação intensa	Número de dias em um ano com precipitação superior a 10 mm	Dias
R20	Número de dias com precipitação muito intensa	Número de dias em um ano com precipitação superior a 20 mm	Dias
CDD	Número de Dias Consecutivos Secos	Número máximo de dias consecutivos com precipitação inferior a 1 mm	Dias
CWD	Número de Dias Consecutivos Úmidos	Número máximo de dias consecutivos com precipitação superior a 1 mm	Dias
PRCPTOT	Precipitação Total	Precipitação anual total	mm

Fonte: organizado pelos autores

As tendências de mudanças climáticas foram analisadas considerando tendências lineares calculadas pelo método de mínimos quadrados (slope) superiores ao erro padrão de estimativa (STD). Tendências foram consideradas estatisticamente significativas com valores de p (p-value) abaixo de 0,05, indicando alta significância, e entre 0,05 e 0,1, indicando boa significância estatística, conforme calculado pelo teste “t” Student.

Os resultados foram apresentados por meio de tabelas e mapas, permitindo uma compreensão visual das tendências de mudanças climáticas nas estações analisadas. Essa abordagem facilita a interpretação e visualização dos resultados para os diversos índices considerados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta os índices de detecção de tendências em mudanças climáticas para estações meteorológicas em Goiás e no Distrito Federal no período de 1970 a 2022. Para os índices associados à temperatura, há um predomínio de tendências positivas, indicando incremento, com valores superiores ao erro padrão de estimativa e significância estatística alta ou boa. Nos índices relacionados à precipitação, predominam tendências negativas, embora com valores abaixo do erro padrão e poucas exceções de significância estatística.

Tabela 1 – Índices de detecção de tendências em mudanças climáticas para estações selecionadas em Goiás e no Distrito Federal para o período de 1980 a 2020

Índices	Aragarças Slope	Brasília Slope	Jataí Slope	Pirenópolis Slope	Catalão Slope	Goiânia Slope	Goiás Slope	Posse Slope
TXx	0,085	0,087	0,072	0,095	0,087	0,081	0,078	0,077
TXn	0,043	0,083	0,077	0,088	0,068	0,086	0,080	0,023
TNx	0,042	0,067	0,036	0,038	0,065	0,084	0,070	0,070
TNn	0,012	0,049	0,020	0,034	0,054	0,089	-0,015	0,014
TX10p	-0,368	-0,350	-0,224	-0,289	-0,334	-0,460	-0,458	-0,302
TX90p	0,744	0,676	0,591	0,832	0,598	0,805	1,097	0,617
TN10p	-0,024	-0,436	-0,361	-0,389	-0,559	-0,347	-0,352	-0,357
TN90p	0,146	0,509	0,474	0,430	0,771	0,696	0,591	0,457
WSDI	0,473	0,636	0,417	0,654	0,527	0,679	0,940	0,307
CSDI	-0,152	-0,330	-0,165	-0,691	-0,300	-0,164	-0,429	-0,259
RX1day	0,075	0,269	0,284	-0,269	-0,070	0,311	-1,100	-0,454
Rx5day	-0,590	0,709	0,123	-1,216	-1,107	0,085	-1,346	-0,623
R10	-0,179	-0,184	-0,185	-0,190	-0,101	-0,196	-0,362	-0,346
R20	-0,079	-0,049	-0,081	-0,059	-0,037	-0,130	-0,201	-0,218
CDD	0,274	0,537	0,385	0,293	0,569	0,812	0,553	0,350
CWD	0,009	-0,043	-0,065	-0,019	-0,017	-0,041	-0,026	-0,109
PRCPTOT	-7,070	-2,687	-4,170	-3,639	-4,704	-3,582	-13,719	-10,826

Fonte: próprios autores, com base em dados do INMET e cálculos realizados no RCLimDEX. Obs. tendências positivas verde e negativas em vermelho, com valores superiores ao erro padrão de estimativa em negrito e sublinhado; e significância estatística alta em cinza escuro (p-value < 0,05) e boa significância estatística em cinza claro (p-value entre 0,05 e 0,1).

Como se pode observar pela Tabela 1, os índices de maior temperatura máxima (TXx), menor temperatura máxima (TXn) e Maior temperatura mínima (TNx) demonstram tendência de incremento em praticamente todas as estações analisadas (exceção da estação de Posse, para o índice TXn), com valores superiores ao erro padrão e alta significância estatística.

Apesar de ser observado o predomínio de tendência de incremento para o índice de menor temperatura mínima (TNn), o mesmo apresenta valores acima do erro padrão apenas para estações de Pirenópolis, Catalão, Brasília e Goiânia – com boa significância estatística para as duas primeiras e alta significância para as duas últimas.

Dessa forma, os índices de mudanças climáticas apontam para incremento dos maiores e menores valores de temperatura máxima. Para o caso das temperaturas mínimas, o incremento é, sobretudo, para os maiores valores. Luiz (2012) também corrobora os resultados encontrados, uma vez que a autora demonstra um sucessivo incremento estatisticamente significativo da temperatura máxima e, principalmente, mínima para a cidade de Goiânia-GO, considerando o período de 1961 a 2008.

Para o índice de quantidade de dias quentes no ano (TX90p) também se observa tendências positivas com alta significância estatística para todas estações. O predomínio de tendência positiva também é observado para o índice de quantidade de noites quentes (TN90p), com alta significância em praticamente todas estações, exceto para a estação de Aragarças, onde verifica-se tendência positiva, mas sem significância estatística.

Por sua vez, para o índice da duração do período quente (WSDI), constata-se tendência positiva em todas as estações, com boa significância estatística para a estação de Posse e alta significância nas demais. Portanto, além do incremento dos valores máximos e mínimos de temperatura máxima e dos maiores valores de temperatura mínima, há também um incremento na quantidade de dias e noites quentes na área em estudo, corroborando os resultados alcançados por Santos et al. (2006) para Goiânia, Catalão e Brasília; Rebello et al. (2008) contemplando o Distrito Federal; Almeida (2012) para diversas localidades na Região Centro-Oeste e; Luiz (2012), em estudo de caso para Goiânia.

Dentre os índices relacionados à temperatura do ar, o de quantidade de dias (TX10p), e noites frias (TN10p) e o de duração do período frio (CSDI) são os únicos que demonstraram tendências negativas, predominando valores acima do erro padrão e alta significância estatística em praticamente todas as estações. Isso reflete que enquanto a quantidade dos dias e noite e duração dos períodos quentes estão elevando, os dias, as noites e os períodos frios estão em declínio.

De maneira geral, em relação aos índices relacionados à precipitação, percebe-se boa e alta significância estatística apenas em relação ao R10, que diz respeito aos dias com precipitação intensa superior a 10mm, em termos de tendência negativa. Tal cenário está em consonância ao que é evidenciado por Santos et al. (2006), para as estações de Goiânia, Catalão e Brasília, uma vez que os autores afirmam não terem sido percebidas tendências significativas para índices de precipitação.

Dentre os índices de precipitação, a tendência positiva é verificada apenas para a quantidade de dias consecutivos secos (CDD), porém com alta significância estatística somente para a estação de Goiânia. É possível observar o predomínio de tendências negativas (diminuição) em relação ao número de dias com precipitação intensa, superior a 10mm (R10) e 20mm (R20), para o número de dias consecutivos úmidos (CWD) e também no caso da precipitação total anual (PRCPTOT).

Apesar da boa significância estatística do CWD apenas na estação de Jataí e de boa significância em Aragarças e de alta em Goiás e Posse no caso de PRCPTOT, a tendência negativa desses dois índices sugere uma redução do período chuvoso e do volume de precipitação. Essa condição contrasta com as observações de Almeida (2012).

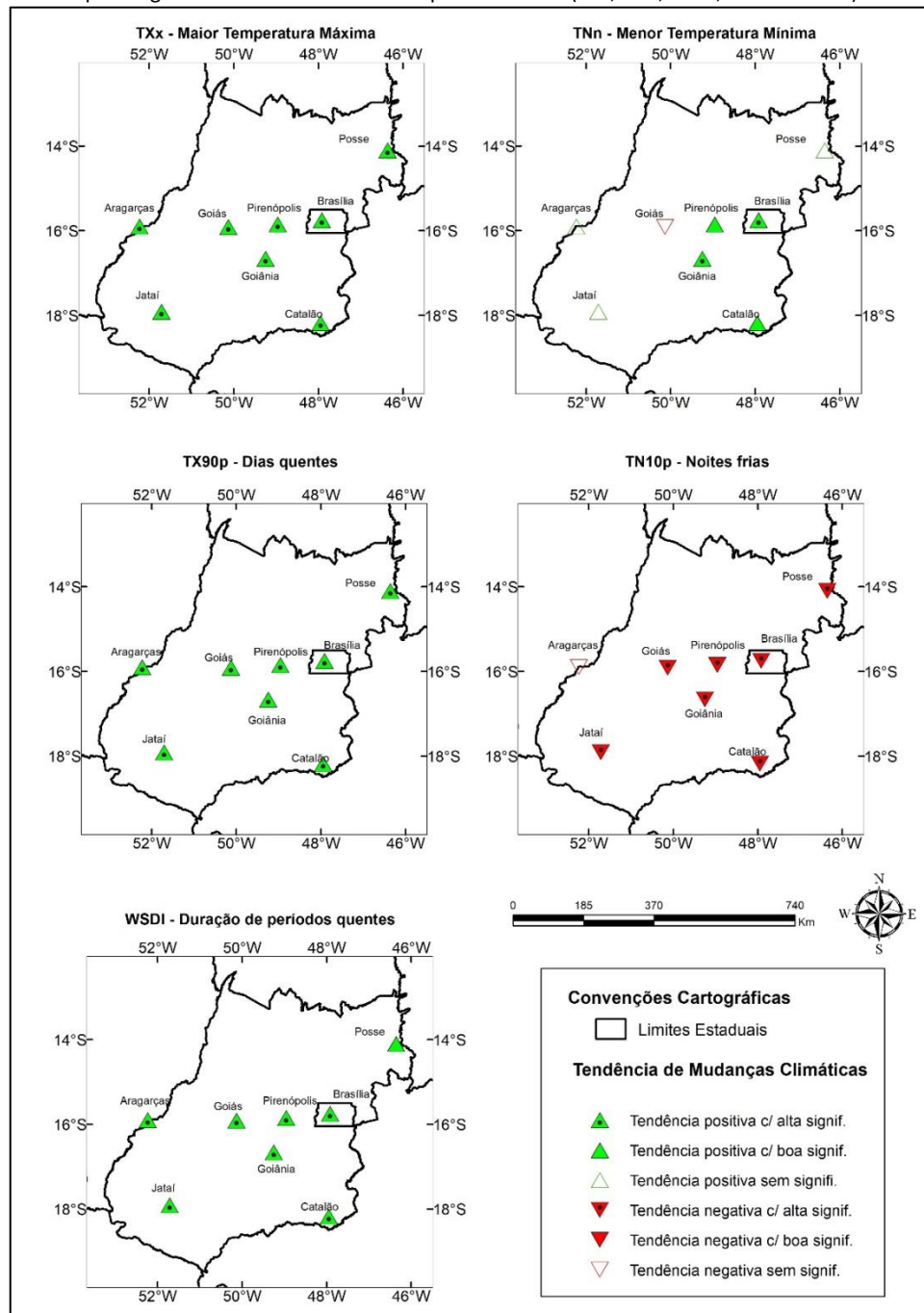
Para o R10, os valores de tendência são superiores ao erro padrão de estimativa em todas estações, com boa significância estatística para as estações de Aragarças, Jataí, Pirenópolis e Goiânia, e alta significância para Goiás e Posse. No caso do R20, a tendência supera o erro padrão apenas nas estações de Jataí, Goiânia, Goiás e Posse, com significância estatística alta nas três últimas.

De acordo com os mapas da Figura 2, que demonstram a ocorrência de tendência (positivas ou negativas) de mudanças climáticas entre as estações meteorológicas situadas em Goiás e no Distrito Federal, percebe-se para o caso do índice TXx (maior temperatura máxima) predomínio de tendências positivas com alta significância estatística em todas as estações.

Os dados apontam máximo valor de maior temperatura máxima de 42,2°C, registrado na estação de Aragarças em 2015, seguido pelo valor de 41,6°C em Goiás no ano de 2012 e de 40°C em Goiânia no ano de 2015. Destaca-se que tais valores também foram encontrados para Goiânia por Nascimento, Lima e Cruz (2019) e para as demais localidades de por Deus e

Nascimento (2021)

Figura 2 – Variação espacial das tendências de mudanças climáticas em Goiás e no Distrito Federal de 1980 a 2020 para alguns índices associados à temperatura do ar (TXx, TNn, TX90, TN10 e WSDI)



Fonte: próprios autores, com base nos dados do INMET processados no RCLimDEX.

Para o índice TNn (menor temperatura mínima), o mapa indica tendência positiva com alta significância estatística apenas nas estações de Brasília e Goiânia, com boa significância nas estações de Catalão e Pirenópolis, e tendência positiva, porém abaixo do erro médio de estimativa, em Jataí e Aragarças, e tendência negativa, porém também abaixo do erro médio de estimativa em Goiás.

Os maiores registros anuais de temperatura mínima foram de 16°C no ano de 1984 para a estação de Posse, de 15,6°C verificado na estação de Goiás em 2015 e de 14,8° registrado

no ano de 1999 na estação de Aragarças em 1980. Por sua vez, os menores registros anuais de temperatura mínima foram de $-1,0^{\circ}\text{C}$ no ano de 1988 na estação de Jataí, de $1,9^{\circ}\text{C}$ no ano de 2012 em Goiás e de $2,8^{\circ}\text{C}$ registrado em 1994 em Catalão – sendo a primeira e a última localidade situadas nas porções sudoeste e sudeste de Goiás, respectivamente, por onde massas de ar de origem polar encontram mais facilidades para entrarem no território goiano, conforme destacado por Nascimento (2016).

Com relação ao índice TX90p (dias quentes), de acordo com o mapa, observa-se tendência positiva com alta significância estatística para todas as estações, indicando aumento do número de dias com temperaturas elevadas em todas localidades da área em estudo. Os maiores registros anuais foram de 65,18% do ano de 2016 com temperaturas elevadas para a estação de Brasília, seguido de 62,7% do ano de 2010 para estação de Goiás e 49,4% do ano de 2016 em Pirenópolis.

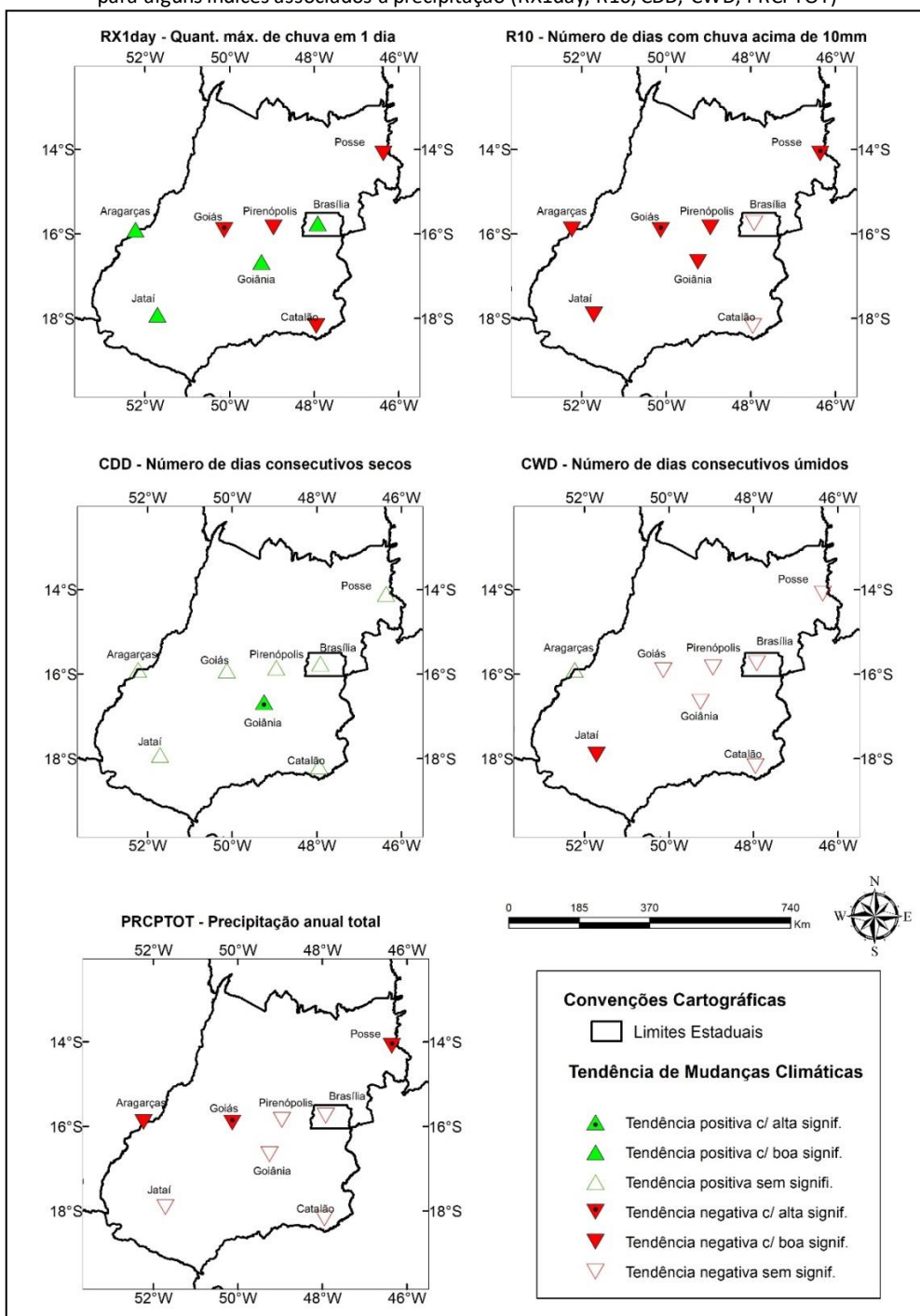
Para o índice TN10p (noites frias), diferentemente dos demais elementos anteriormente descritos, o mapa demonstra que todas as estações apresentam tendência negativa com alta significância estatística, o que indica que as noites quentes estão diminuindo cada vez mais. No tocante ao índice WSDI (duração de períodos quentes), percebe-se tendência positiva em todas estações, com alta significância estatística na quase maioria delas, com exceção da estação de Posse, na qual observa-se boa significância estatística.

Com relação aos índices de precipitação, os mapas da Figura 3 retratam predomínio da tendência negativa para o R10 (número de dias com chuva acima de 10mm), CWD (número de dias consecutivos úmidos) e PRCPTOT (precipitação total). Todavia, apenas no caso do primeiro índice há o predomínio de estações com boa ou alta significância estatística – na qual as estações de Brasília e Catalão chegam a representar tendências inferiores ao erro padrão de estimativa. No caso do CWD apenas a estação de Jataí mostra boa significância estatística, e do PRCPTOT apenas a estação de Aragarças mostra boa significância e as de Goiás e Posse alta significância estatística.

Por sua vez, o CDD (número de dias consecutivos secos) mostra tendência positiva em todas estações, porém com alta significância estatística apenas para a estação de Goiânia. Por fim, o RX1day (quantidade máxima de precipitação em um dia) apresenta-se de maneira heterogênea entre as estações analisadas, com tendência positiva com boa significância estatística nas estações de Aragarças, Jataí, Goiânia e Brasília e tendência negativa com boa significância em Pirenópolis, Catalão e Posse e alta significância em Goiás.

Ao considerar os valores extremos de quantidade máxima de chuvas em um dia (RX1day), destaque deve ser destinado ao registro de 174mm em Posse, no ano de 1994; seguido pelos valores de 167,3mm verificado em Pirenópolis no ano de 1989 e de 169,7mm em Goiás para o ano de 1992. Em fato, eventos intensos de precipitação têm causado corriqueiros eventos de enchente, inundação e alagamentos, mesmo em cidades de médio e pequeno porte. A cidade de Goiás, por exemplo, é palco de recorrentes e cíclicos eventos de enchentes associadas à eventos extremos de precipitação, desde o ano de 1782 (CAVALCANTI; LOPES; PONTES, 2008). De mesma forma, Deus e Nascimento (2016) retratam recorrentes manchetes de jornais divulgando prejuízos e repercussões diversas associadas a chuvas extremas em cidades de pequeno porte, lembrando o caso de Pirenópolis.

Figura 3 – Variação espacial das tendências de mudanças climáticas em Goiás e no Distrito Federal de 1980 a 2020 para alguns índices associados à precipitação (RX1day, R10, CDD, CWD, PRCPOT)



Fonte: próprios autores, com base nos dados do INMET processados no RCLimDEX

Para o índice CDD (dias consecutivos secos), o máximo valor anual de dias consecutivos secos verificado foi de 156 dias para a estação de Posse, no ano de 1998; seguido de 147 dias no ano de 2004 para estação de Brasília e de 146 dias para a estação de Aragarças em 1988. Os menores registros foram de 24 dias no ano de 1992 para estação de Jataí, seguido de 31 dias no ano de 2009 para estação de Catalão e de 34 dias em Pirenópolis no ano de 2006.

Para o índice PRCPOT (precipitação total anual), os máximos registros anuais de precipitação foram de 2.437,9mm no ano de 1983 para estação de Aragarças, seguido de 2.424,6mm no ano de 1992 para estação de Goiás e 2.417,6mm em 1989 na estação de

Pirenópolis, ao passo que os valores mínimos anuais registrados foram de 812,9mm no ano de 2007 para a estação de Posse, seguido de 920,1mm no ano de 1984 para estação de Catalão e de 996,4mm em Brasília no ano de 1986.

Os resultados indicados no presente estudo estão de acordo com a literatura consultada. Em um estudo voltado ao Cerrado, Hofmann et al. (2021) destacam que bioma está se tornando mais quente e seco. Os autores apontaram para o aumento de 4°C da temperatura máxima em outubro, entre 1961 e 2019, com previsão de incremento de até 6°C, até 2050. Em relação à temperatura mínima, aos autores apontam um aumento de 2,8°C no período supracitado, com previsão de elevar até 4,2°C até 2050.

Apesar de se valerem de dados de diferentes localidades e de distintas séries temporais e técnicas estatísticas, diversos autores convergem no sentido de destacarem o incremento das temperaturas, diminuição da umidade relativa do ar e da precipitação, para o contexto do Centro-Oeste, contemplando desde o bioma Cerrado (HOFMANN et al., 2021; RODRIGUES et al., 2022) ou para localidades nesta Região (ALMEIDA, 2012; MARCUZZO; ROMERO, 2013; SANTOS et al., 2006; BARRETO, 2008; DEUS; NASCIMENTO, 2016; 2017; NASCIMENTO; SANTOS; BARROS, 2011; LUIZ, 2012; NASCIMENTO; LIMA; CRUZ, 2019; DEUS; NASCIMENTO; 2021). Assim, os resultados encontrados estão alinhados ao que foi verificado pela literatura especializada, corroborando os cenários do IPCC que indicam para a área em estudo um clima mais quente e seco e maior intensidade e recorrência de eventos extremos de chuvas e de temperatura máxima.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização dos índices de detecção e monitoramento de mudanças climáticas se mostrou bastante oportuna para retratar as tendências de incremento e diminuição das variáveis meteorológicas em estações selecionadas no estado de Goiás e no Distrito Federal. Percebe-se nítido padrão de tendências positivas com alta significância estatística para os índices associados à temperatura máxima e mínima do ar, conforme observado para a maior temperatura máxima (TXx), menor temperatura máxima (TXn), maior temperatura mínima (TNx), quantidade de dias e noites quentes e para a duração de períodos quentes. No caso da menor temperatura mínima (TNn), também se observa tendência positiva, mas com valores acima do erro padrão de estimativa e com boa significância estatística em apenas quatro estações (Pirenópolis, Catalão, Brasília e Goiânia).

Um cenário bastante diferente foi percebido quando considerados os índices associados à precipitação pluvial, sendo que apesar de ser evidenciado o predomínio de tendência negativa no número de dias com precipitação intensa (de 10mm, R10; e de 20mm, R20), do número de dias consecutivos úmidos (CWD) e da precipitação total (PRCPTOT), apenas em algumas estações a significância estatística da tendência é boa ou alta.

Além das tendências observadas junto à série de 40 anos considerada no estudo (1980 e 2020), foi possível destacar eventos extremos, tais como de maior temperatura máxima (TXx) de 42,2°C (em Aragarças no ano de 2015), de menor temperatura mínima (TNn) de -1°C (em Jataí no ano de 1988), de quantidade máxima de precipitação em um dia (RX1day) de 174mm (em Posse no ano de 199), do número de dias consecutivos secos (CDD) de 156 dias (em Posse no ano de 1998) e de precipitação total anual (PRCPTOT) de 2.437,9mm (em Aragarças no ano de 1983).

Os apresentados no estudo estão em consonância com aqueles apresentados pela literatura e também pelo que indica o sexto relatório do IPCC (AR06), que é sem precedente e generalizado o incremento da temperatura do ar, com relatos de eventos climáticos extremos em toda parte do planeta. Tendo como base os alertas do referido relatório, a tendência é de maior ocorrência e intensidade de eventos climáticos associados à elevadas temperatura na Região Centro-Oeste do Brasil, também, com possível modificação do regime de chuvas, porém, sem predomínio de boa ou alta significância estatística em todas estações analisadas.

Por fim, destaca-se a necessidade de estudos complementares, que possam contemplar análise mais complexas e verticalizadas em índices específicos; e ainda que retratam as repercussões socioeconômicas e ambientais das tendências de elevação da temperatura – constatada no presente trabalho, inclusive com alta significância estatística, e da mudança do regime e diminuição do volume de chuvas – verificado também no trabalho, apesar da ausência de significância estatística.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa produtividade em pesquisa ao segundo autor (PQ-2).

6 REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, L. V.; et al. Global Observed Changes in Daily Climate Extremes of Temperature and Precipitation. *Journal of Geophysical Research*, v. 111, D05109, 2006.
- ALMEIDA, C. T.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; DELGADO, R. C.; CUBO, P.; RAMOS, M. C. Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian legal Amazon, 1973–2013. *Int. J. Climatol.*, v. 37, n. 4, p. 2013–2026, 2016.
- ALMEIDA, J. M. V. de. **Índices de monitoramento e detecção de mudanças climáticas na região Centro-Oeste do Brasil**. 2012. 178f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2012.
- ARAÚJO, F. R. C. D.; SANTOS, C. A. C.; NASCIMENTO, F. C. Estudo dos índices extremos de temperatura na bacia hidrográfica do baixo rio Colorado-EUA. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 30, p. 29-36, 2015.
- BARRETO, R. **Identificação de áreas susceptíveis a eventos extremos de chuva no Distrito Federal**. 2008. 162 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Gestão Ambiental e Territorial) – Universidade de Brasília, Departamento de Geografia, Brasília, 2008.
- CASSOL, P. B.; BOHNER, T. Os eventos climáticos e a sua indissociabilidade na saúde e na economia global. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 5, n. 5, p. 653-657, 2012.
- DEUS, R. M. M.; NASCIMENTO, D. T. F. Como a mídia tem noticiado os eventos climáticos extremos no estado Goiás. In: ENCONTRO NACIONAL DE GEÓGRAFOS, 2016, São Luís. Anais..., São Luís: AGB, 2016. p. 38-48.
- DEUS, R. M. M.; NASCIMENTO, D. T. F. Eventos climáticos extremos no estado de Goiás e Distrito Federal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 2021, João Pessoa. Anais do XIV SBCG. João Pessoa: UFPE, 2021. v. 1. p. 2938-2954.
- DEUS, R. M. M.; NASCIMENTO, D. T. F. Os eventos climáticos extremos de Iporá (GO) registrados entre 2013 e 2017. In: Diego Tarley Ferreira Nascimento; Ricardo Junior de Assis Fernandes Gonçalves. (Org.). **Águas do cerrado: gestão, usos e conflitos**. 1ed. Goiânia: Editora Kelps, 2018, v. 1, p. 153-162.
- ELY, D. F.; FORTIN, G. Trend analysis of extreme thermal indices in south Brazil (1971 to 2014). *Theoretical and Applied Climatology*, v. 139, p. 1045–1056, 2020.
- HAYLOCK, M. R.; et al. Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, v. 19, p. 1490-1512, 2006.

- HERRERA, M. C. P.; PINZÓN, C. Caracterización de eventos extremos asociados a la precipitación usando RCLimdex, en la parte central del Departamento de Santander, Colombia. CONGRESO INTERNACIONAL DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE CLIMATOLOGÍA, 8., 2012. *Anais...*, p. 593-601, 2012.
- HOFF, H. **Understanding the Nexus. Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus.** Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.
- HOFMANN, G. S.; CARDOSO, M. F.; ALVES, R. J. V.; WEBER, E. J.; BARBOSA, A. A.; TOLEDO, P. M.; PONTUAL, F. B.; SALLES, L. O.; HASENACK, H.; CORDEIRO, J. L. P.; AQUINO, F. E.; OLIVEIRA, L. F. B. *The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier.* *Global Change Biology*, p. 1-14, 2021.
- IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- KARL, T. R.; NICHOLLS, N.; GHAZI, A. CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary. *Climatic Change*, v. 42, p. 3-7, 1999.
- LUIZ, G. C. **Influência da relação solo-atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados: estudo de caso - município de Goiânia-GO.** 2012. 246 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012.
- MANTON, M. J. et al. Trends in extreme daily rainfall and temperature in southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998. *International Journal of Climatology*, v. 21, p. 269-284, 2001.
- MARCUZZO, F. F. N.; ROMERO, V. Influência do El Niño e La Niña na precipitação máxima diária do estado de Goiás. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.28, n.4, 429-440, 2013.
- MARENGO, J. A. et al. **Impactos de extremos relacionados com o tempo e o clima – Impactos sociais e econômicos.** Boletim do Grupo de Pesquisa em Mudanças Climáticas. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Centro de Ciências do Sistema Terrestre - Edição Especial. 2009.
- NASCIMENTO, D. T. F. **Chuvas no estado de Goiás e no Distrito Federal a partir de estimativas por satélite e circulação atmosférica.** 2016. 200 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.
- NASCIMENTO, D. T. F.; LIMA, L. V. V.; CRUZ, V. P. Episódios e gênese dos eventos climáticos extremos em Goiânia - GO. *Caderno de Geografia*, v.29, n.57, p. 583-608, 2019.
- NASCIMENTO, D. T. F.; OLIVEIRA, I. J. de . Os sistemas atmosféricos atuantes e responsáveis pela gênese das chuvas no estado de Goiás e no Distrito Federal. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 27, p. 747-771, 2020.
- NASCIMENTO, D. T. F.; SANTOS, N. B. F. dos; BARROS, J. R. Evolução da temperatura do ar em Goiânia-GO (1961-2009). In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 2011, João Pessoa-PB. Anais do IV SIC, 2011.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil.** Rio de Janeiro: IBGE, 1979.
- PETERSON, T. C.; FOLLAND, C.; GRUZA, G.; HOGG, W.; MOKSSIT, A.; PLUMMER, N. **Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998-2001.** WMO, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071, Geneva, Switzerland, 2001. 143p.
- PETERSON, T. C. Climate Change Indices. *WMO Bulletin*, v. 54, n. 2, p. 83-86, 2005.
- RAHMAN, M. S.; SENKBEIL, J. C.; KEELLINGS, D. J. Spatial and Temporal Variability of Extreme Precipitation Events in the Southeastern United States. *Atmosphere*, v. 14, e-1301, 2023.
- REBELLO, E. R. G. et al. Observação de mudanças de extremos climáticos (precipitação e temperatura) utilizando o software RCLimDex. Estudo de caso: Distrito Federal. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia. p. 1-6, 2008.
- RODRIGUES, A. A.; MACEDO, M. N.; SILVÉRIO, D. V.; MARACAHIPES, L.; COE, M. T.; BRANDO, P. M.; SHIMBO, J. Z.; RAJÃO, R.; SOARES-FILHO, B.; BUSTAMANTE, M. C. Cerrado deforestation threatens regional climate and water availability for agriculture and ecosystems. *Global Change Biology*, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1111/gcb.16386>
- RODRIGUES, J. C. M. **O nexo água-energia-alimentos aplicado ao contexto da Amazônia Paraense.** 2017. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Belém, 2017.
- SANTOS, C. A. C. dos; BRITO, J. I. B. de; RAO, T. V. R.; MENEZES, H. E. A. Tendências dos índices de precipitação no Estado do Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n. 1, p. 39-47, 2009.
- SANTOS, K. P. C.; CUNHA, A. C.; COSTA, A. C. L.; SOUZA, E. B. Índices de tendências climáticas associados à “ilha de calor” em Macapá-AP (1968-2010). *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 23, 2012.
- SANTOS, L. A. R. dos; LUCIO, P. S.; REBELLO, E. R. G.; BALBINO, H. T.; FORTES, L. T. G.; SALES, N. D. de; DINIZ, F. de A. COSTA, M. C. G.; FERREIRA, D. B.; SALVADOR, M. A. LEANDRO, I. V.; PAULA, T. P. de. Caracterização de extremos

climáticos utilizando o software Rclimdex. Estudo de caso: sudeste de Goiás. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2006, FLORIANÓPOLIS - SC. Anais...., Florianópolis: CBM, 2006.

SILVA, R. O. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SOUZA, W. M. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.22, n.3, p. 579-589, 2017.

SILVA, W. L.; et al. Tendências observadas em indicadores de extremos climáticos de temperatura e precipitação no estado do Paraná. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.30, n.2, 181 - 194, 2015.

TORETI, A.; DESIATO, F. Changes in temperature extremes over Italy in the last 44 years. **International Journal of Climatology**, v. 28, p. 733-745, 2008.

VINCENT, L. A. et al. Observed Trends in Indices of Daily Temperature Extremes in South America 1960-2000. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 18, p. 5011-5023, 2005.

WANG, G.; et al. Trends in extreme temperature indices in Huang-Huai-Hai River Basin of China during 1961–2014. **Theor. Appl. Climatol.**, v. 134, p. 1–15, 2017.

ZANDONADI, L.; ACQUAOTTA, F.; FRATIANNI, S.; ZAVATTINI, J. A. Changes in precipitation extremes in Brazil (Paraná River basin). **Theor. Appl. Climatol.**, v. 123, n. 3/4, p. 741–756, 2016.