



TENDÊNCIA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CERRADO BRASILEIRO (2004 – 2024)

Claudinei Alves de Ávila¹
Maurício José Alves Bolzam²

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise da variabilidade climática no Cerrado brasileiro, investigando tendências e padrões das variáveis temperatura, precipitação e umidade relativa do ar durante o período de 2004 a 2024 em 12 municípios representativos do domínio morfoclimático Cerrado. A pesquisa utilizou dados meteorológicos diários do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), aplicando análises estatísticas, espectrais e espaciais com foco na caracterização de extremos climáticos e possíveis impactos de fenômenos de larga escala como o El Niño. Os resultados revelaram intensificação crescente dos eventos climáticos extremos no Cerrado, com tendências heterogêneas nas variáveis analisadas, evidenciando processo contínuo e espacialmente desigual de alterações nos regimes térmico e pluviométrico regionais. As transformações territoriais recentes, como expansão urbana, mineração e substituição de ecossistemas naturais por monoculturas, são fatores determinantes na alteração climática regional.

Palavras-chave: Antropoceno, Cerrado, Mudanças climáticas.

RESUMEN

Este artículo presenta un análisis de la variabilidad climática en el Cerrado brasileño, investigando las tendencias y patrones de temperatura, precipitación y humedad relativa durante el período 2004-2024 en 12 municipios representativos del dominio morfoclimático del Cerrado. La investigación utilizó datos meteorológicos diarios del Instituto Nacional de Meteorología (INMET), aplicando análisis estadísticos, espectrales y espaciales centrados en la caracterización de los extremos climáticos y los posibles impactos de fenómenos a gran escala como El Niño. Los resultados revelaron una creciente intensificación de los eventos climáticos extremos en el Cerrado, con tendencias heterogéneas en las variables analizadas, evidenciando un proceso continuo y espacialmente desigual de cambios en los regímenes térmicos y de precipitación regionales. Las recientes transformaciones territoriales, como la expansión urbana, la minería y la sustitución de ecosistemas naturales por monocultivos, son factores determinantes del cambio climático regional.

Palabras clave: Antropoceno, Cerrado, Cambio climático.

ABSTRACT

This article presents an analysis of climate variability in the Brazilian Cerrado, investigating trends and patterns of temperature, precipitation, and relative humidity variables during the period from 2004 to 2024 in 12 municipalities representative of the Cerrado morphoclimatic domain. The research used daily

¹ Mestrando do Curso de Geografia da Universidade Federal de Jataí (UFJ) - GO, claudinei.avila@ufj.edu.br;

² Professor orientador: Doutor, Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas da UFJ - GO, mauricio_bolzam@ufj.edu.br



meteorological data from the National Institute of Meteorology (INMET), applying statistical, spectral, and spatial analyses focusing on the characterization of climate extremes and possible impacts of large-scale phenomena such as El Niño. The results revealed a growing intensification of extreme climate events in the Cerrado, with heterogeneous trends in the analyzed variables, evidencing a continuous and spatially unequal process of changes in regional thermal and rainfall regimes. Recent territorial transformations, such as urban expansion, mining, and the replacement of natural ecosystems with monocultures, are determining factors in regional climate change.

Keywords: Anthropocene, Cerrado, Climate change.

INTRODUÇÃO

As Mudanças Climáticas Globais (MCG), intensificadas pela emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxidos de nitrogênio (N_2O), configuram-se como um dos principais desafios socioambientais do século XXI. Seus efeitos têm sido amplamente discutidos pela comunidade científica internacional, dada a crescente vulnerabilidade de sistemas naturais e produtivos, especialmente nas regiões tropicais. Entre os impactos mais relevantes estão o aumento da frequência e intensidade de eventos extremos, alterações nos ciclos hidrológicos e comprometimento da resiliência ecológica de diversos domínios morfoclimáticos.

No contexto brasileiro, as projeções climáticas apresentadas pelo IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change), e aplicadas a escalas nacionais por autores como Nobre (2005) e Nobre et al. (2005), apontam para riscos expressivos, incluindo a desertificação progressiva do semiárido nordestino e a possível savanização da Amazônia. O Cerrado, segundo maior domínio morfoclimático do país e considerado um hotspot de biodiversidade, também se encontra em situação crítica, sobretudo por sua importância estratégica para a segurança hídrica nacional e sua crescente pressão antrópica vinculada à expansão agropecuária e à mineração.

A percepção social sobre os efeitos das MCG tem se ampliado nas últimas décadas, conforme demonstrado por Giulio et al. (2019), revelando avanços no reconhecimento do problema por parte da população e dos tomadores de decisão. No entanto, ainda persiste uma lacuna significativa entre a conscientização e a efetiva implementação de medidas de adaptação e mitigação, especialmente em territórios marcados por profundas desigualdades socioambientais, como é o caso do Cerrado brasileiro.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo analisar as tendências climáticas recentes (2004–2024) em doze cidades representativas do Cerrado, por meio da



avaliação de indicadores como temperatura do ar e precipitação. Busca-se compreender as transformações socioespaciais em curso e suas implicações ambientais, relacionando as anomalias observadas a fatores antrópicos regionais, como urbanização desordenada, desmatamento, uso intensivo do solo agrícola e atividades mineradoras.

Além disso, adota-se uma abordagem territorial integrada, que articula as dimensões climática, ecológica e socioeconômica, de forma a interpretar os efeitos locais das mudanças globais em múltiplas escalas. Tal perspectiva permite analisar como as dinâmicas de uso e ocupação do solo influenciam a manifestação dos extremos climáticos, contribuindo para o agravamento da vulnerabilidade ambiental em diferentes contextos municipais do domínio morfoclimático.

METODOLOGIA

O presente estudo baseou-se em dados meteorológicos diários de temperatura do ar (máxima e mínima), umidade relativa e precipitação, obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), abrangendo o período de 2004 a 2024. Foram selecionadas doze estações meteorológicas (automáticas) localizadas no setor sul e sudeste do Cerrado (GO, MG, MS, DF e SP), em municípios representativos de transições biofísicas com a Mata Atlântica e o Planalto Paulista. A escolha considerou integridade das séries ($\leq 25\%$ de faltantes), continuidade operacional e representatividade regional.

Para a caracterização das tendências e extremos climáticos, foram adotados indicadores reconhecidos pela literatura científica, tais como: a maior temperatura mínima anual, a menor temperatura máxima anual, a temperatura máxima absoluta (TXx), o maior volume de chuva em 24 horas (RX1day), a precipitação total anual e o índice de intensidade diária de precipitação (SDII). Tais variáveis permitem avaliar alterações nos regimes térmico e pluviométrico, com ênfase nos eventos extremos e na variabilidade interanual.

As análises foram conduzidas com base em procedimentos estatísticos robustos, combinando estatística descritiva, análise de tendência e técnicas espectrais. As tendências temporais das variáveis climáticas foram estimadas pelo estimador de Theil–Sen, testadas quanto à significância pelo teste não paramétrico de Mann–Kendall (MK) e ajustadas para autocorrelação serial por meio do método de pre-whitening de Yue–Pilon. Para cada município e indicador, foram determinados o coeficiente de inclinação (β ; unidade/ano), a estatística τ de



Kendall e o p-valor correspondente, adotando-se o controle de falsas descobertas (FDR de Benjamini–Hochberg) quando aplicável.

A variabilidade interanual e os padrões cíclicos foram investigados por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT) e da Transformada Wavelet Contínua (Morlet), permitindo identificar oscilações dominantes e períodos de maior energia espectral nas séries. Essa abordagem possibilitou avaliar a influência de fenômenos climáticos de larga escala, especialmente o El Niño–Oscilação Sul (ENSO). Para essa finalidade, utilizou-se o Oceanic Niño Index (ONI) como parâmetro de referência na qualificação da intensidade e duração dos episódios de El Niño e La Niña, considerando defasagens de até seis meses na correlação com as variáveis meteorológicas analisadas.

Cabe destacar que, diante da indisponibilidade de normais climatológicas completas e padronizadas para todas as estações no intervalo clássico de 30 anos (1961–1990), optou-se por considerar a variação interna do próprio período de 2004–2024 como base comparativa. Essa abordagem permitiu avaliar a magnitude das alterações internas na série, sem recorrer a séries históricas de referência externa que comprometeriam a homogeneidade dos dados.

Embora não tenha sido realizada modelagem estatística formal de causalidade (como regressões múltiplas ou análises de componentes principais), buscou-se interpretar os resultados à luz de evidências empíricas consolidadas na literatura científica. A relação entre as anomalias climáticas e os fatores antrópicos foi estabelecida com base na sobreposição espaço-temporal entre as séries meteorológicas e os padrões de uso e ocupação do solo de cada município. Essa estratégia caracteriza uma abordagem inferencial de natureza territorial, que integra elementos climáticos, físicos e socioeconômicos com o objetivo de compreender os processos ambientais em múltiplas escalas e contextos regionais.



REFERENCIAL TEÓRICO

O termo Antropoceno designa a era geológica contemporânea, marcada pelo reconhecimento de que as atividades humanas se tornaram a principal força de transformação dos sistemas naturais da Terra. Diferentemente das épocas anteriores, em que as mudanças ambientais resultavam de processos geofísicos e biológicos naturais, o Antropoceno caracteriza-se pela ação direta da sociedade sobre os ciclos biogeoquímicos, os sistemas climáticos e a dinâmica ecológica global. Essa condição evidencia a transição para uma nova fase do sistema terrestre, em que o ser humano passa a atuar como agente geológico e climático, modificando fluxos de energia e matéria em escala planetária (Crutzen; Stoermer, 2000; Steffen et al., 2018).

Essa redefinição da relação entre humanidade e natureza implica mudanças estruturais e cumulativas no funcionamento do sistema Terra. Mais do que a simples emissão de gases de efeito estufa ou o aumento da temperatura média global, o Antropoceno representa uma reconfiguração sistêmica das interações entre sociedade e ambiente, na qual os processos econômicos e tecnológicos passaram a condicionar o equilíbrio climático e ecológico. As atividades humanas alteram de forma progressiva os fluxos de energia, matéria e água que sustentam a vida, instaurando novos padrões de instabilidade ambiental e dependência de recursos naturais.

Nessa nova condição planetária, marcada pela intensificação das pressões antrópicas, torna-se evidente a interdependência entre processos biofísicos e dinâmicas socioeconômicas. O crescimento urbano, a intensificação agropecuária e a exploração mineral configuram-se como vetores centrais de perturbação climática, promovendo desequilíbrios que se manifestam em múltiplas escalas espaciais e temporais. Essas práticas não apenas modificam o clima em níveis local e regional, mas também geram mecanismos de retroalimentação (feedbacks) que ampliam a vulnerabilidade ecológica e reduzem a resiliência dos ecossistemas, sobretudo em regiões tropicais de transição climática, como o Cerrado brasileiro, onde os efeitos do Antropoceno tornam-se particularmente evidentes (Steffen et al., 2018; Nobre et al., 2005).

Compreender o clima nesse contexto implica adotar uma abordagem sistêmica, que reconheça o caráter dinâmico e interdependente entre fatores naturais e antrópicos. O clima deve ser interpretado como um sistema complexo, no qual interações contínuas entre a atmosfera, a biosfera, a litosfera e as ações humanas modulam processos biofísicos e retroalimentações ambientais (Nobre et al., 2005). Essa perspectiva integradora permite



interpretar as transformações ambientais contemporâneas não como fenômenos isolados, mas como expressão da crescente interconexão entre sociedade e natureza, situando o ser humano como agente ativo na reconfiguração dos equilíbrios planetários.

Nesse panorama global de mudanças, o Cerrado brasileiro assume papel central. Ocupando aproximadamente 22% do território nacional, o domínio morfoclimático é reconhecido como a savana mais biodiversa do planeta (Strassburg et al., 2017) e cumpre função estratégica na regulação hídrica continental. Tal importância decorre das características edáficas e fisiológicas de sua vegetação, marcada por raízes profundas e solos porosos que favorecem a infiltração e a recarga dos aquíferos (Ab'Saber, 2017; Sano et al., 2019). Contudo, essa relevância ambiental contrasta com a magnitude das transformações que o domínio morfoclimático tem sofrido nas últimas décadas.

A expansão da fronteira agropecuária, sobretudo nas regiões Centro-Oeste e Matopiba (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), provocou a conversão de mais de 50% da cobertura vegetal original do Cerrado (Strassburg et al., 2017; Hofmann et al., 2021). A substituição da vegetação nativa por monoculturas mecanizadas, especialmente soja, milho e algodão, altera o balanço energético da superfície, reduz a evapotranspiração, aumenta o albedo e compromete a reciclagem de umidade, resultando em elevação das temperaturas e redução da precipitação (Spera et al., 2016; Lapola et al., 2020). Esses processos não apenas modificam o clima local, mas também afetam a dinâmica atmosférica regional, interferindo na circulação de massas de ar e na formação de sistemas convectivos.

A literatura científica recente evidencia que o Cerrado vem passando por um processo de aridificação progressiva, no qual a combinação entre mudanças climáticas globais e uso intensivo do solo cria um ciclo de retroalimentação: o desmatamento reduz a umidade e a cobertura vegetal, o que aumenta o calor superficial e, consequentemente, acelera a perda de resiliência ecológica (Cattelan et al., 2024; Hofmann, 2024). Dessa forma, o domínio morfoclimático, historicamente reconhecido como amortecedor climático e hídrico do Brasil Central, passa a apresentar sinais de instabilidade atmosférica e hidrológica, caracterizados por maior frequência de secas severas, eventos de calor extremo e irregularidade das chuvas.

Essas transformações, entretanto, não se restringem ao meio rural. A urbanização acelerada do Cerrado constitui um vetor adicional de alteração climática regional. As cidades, muitas vezes expandidas de forma desordenada e sem planejamento ambiental, intensificam fenômenos como as Ilhas de Calor Urbanas (ICU), caracterizadas por temperaturas médias mais



elevadas do que as zonas rurais adjacentes (Amorim, 2020). A impermeabilização do solo, a escassez de áreas verdes e o uso de materiais de alta capacidade térmica, como o asfalto e o concreto, favorecem a retenção de calor e reduzem a ventilação, ampliando o aquecimento noturno e alterando o microclima urbano. Assim, a urbanização também se consolida como variável climática, capaz de modificar o balanço energético local e intensificar os efeitos das mudanças globais.

De modo análogo, a intensificação da agropecuária em larga escala tem gerado o que alguns autores denominam “clima antrópico”, resultado direto das modificações impostas ao uso da terra. A irrigação extensiva, por exemplo, eleva a umidade atmosférica local e pode favorecer a formação de chuvas convectivas, enquanto o desmatamento e a degradação de pastagens reduzem a evapotranspiração e aumentam as temperaturas superficiais (Pereira et al., 2018; Ribeiro et al., 2019). Essa dualidade reforça o papel determinante das atividades humanas, tanto urbanas quanto rurais, na reconfiguração dos fluxos atmosféricos e hídricos, afetando a amplitude térmica, a distribuição das chuvas e a dinâmica da umidade relativa.

A variabilidade climática do Cerrado, contudo, não depende apenas de fatores locais. Ela é amplamente modulada por teleconexões oceânico-atmosféricas, especialmente pelo El Niño–Oscilação Sul (ENSO), cuja influência é decisiva sobre os regimes térmicos e pluviométricos regionais (Grimm, 2003; Reboita; Santos, 2014). Durante episódios de El Niño, o aquecimento anômalo do Pacífico Equatorial reduz a precipitação e eleva as temperaturas, sobretudo nas porções central e meridional do domínio morfoclimático; em contrapartida, La Niña tende a aumentar as chuvas e intensificar os contrastes térmicos (Campos; Chaves, 2020; Kim et al., 2025). Tais oscilações interferem diretamente na disponibilidade hídrica, nos períodos de plantio agrícola e na ocorrência de incêndios florestais.

Evidências recentes (Serrão et al., 2025; Cattelan et al., 2024) indicam que a interação entre o ENSO e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) tem se tornado mais instável nas últimas décadas, alterando a sazonalidade das chuvas e ampliando a duração das estações secas. Essa instabilidade é agravada pela perda de vegetação e pelo aquecimento regional, que reduzem a capacidade do Cerrado de modular o próprio clima. Assim, o domínio morfoclimático se consolida como um sistema climático sensível e vulnerável, onde os efeitos locais das mudanças globais são amplificados por transformações antrópicas internas.

Os processos analisados demonstram que o Cerrado constitui um laboratório natural do Antropoceno, no qual se manifestam de forma nítida as interações entre clima, uso do solo e



ação humana. O uso e a cobertura da terra configuram-se como fatores determinantes na organização climática regional, alterando o balanço energético, a circulação atmosférica e a dinâmica hídrica. Tal condição reforça a necessidade de compreender o clima sob uma perspectiva geossistêmica e territorial integrada, conforme proposto por Bertrand (1971) e Ab'Saber (2017), que articulam as dimensões físicas e sociais na produção do espaço geográfico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das séries históricas de 2004 a 2024 revelou um processo crescente de intensificação dos eventos climáticos extremos no domínio morfoclimático do Cerrado. As tendências observadas nas variáveis de precipitação, temperatura e umidade relativa demonstram comportamentos heterogêneos, porém consistentes, refletindo a complexa interação entre fatores locais e a variabilidade climática global. Esses padrões espaciais estão fortemente modulados por transformações antrópicas regionais, como a urbanização acelerada, as atividades mineradoras, a expansão da fronteira agrícola e a substituição da vegetação nativa por pastagens degradadas ou monoculturas. Tal configuração reforça a sensibilidade do Cerrado frente aos impactos combinados da mudança climática e do uso da terra, com destaque para a influência da Oscilação Sul–El Niño (ENSO), cuja atuação é notadamente marcante sobre os regimes térmico e pluviométrico do domínio morfoclimático.

A amostra analisada abrange doze cidades distribuídas nas porções sul e sudeste do domínio morfoclimático do Cerrado, envolvendo os estados de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Distrito Federal e São Paulo. Essa região representa uma zona de transição climática de grande relevância científica, onde se sobrepõem características tropicais e subtropicais, com altitudes variando entre 500 e 1200 metros e precipitação média anual de 1200 a 1700 mm. Tais condições expressam a complexa interação entre relevo, uso da terra e processos atmosféricos regionais.



Tabela 1 – Cidades estudadas e características gerais

Fonte: elaboração própria, com base em dados do INMET (2004–2024)

Cor	Município/UF	Latitude (°S)	Longitude (°W)	Altitude (m)	Código INMET	Período de Operação	Anos de Dados	Status
●	Araxá (MG)	19,59	46,93	1018	A505	2004–2024	21	Operante
●	Belo Horizonte (MG)	19,88	43,97	854	A521	2006–2024	19	Operante
●	Brasília (DF)	15,79	47,93	1159	A001	2004–2024	21	Operante
●	Campo Grande (MS)	20,45	54,72	528	A702	2004–2024	21	Operante
●	Catalão (GO)	18,17	47,96	900	A034	2008–2024	17	Operante
●	Divinópolis (MG)	20,14	44,89	796	A564	2017–2024	8	Operante
●	Goiânia (GO)	16,67	49,25	727	A002	2004–2024	21	Operante
●	Jataí (GO)	17,88	51,71	582	A016	2007–2024	18	Operante
●	Marília (SP)	22,21	49,95	660	A763	2017–2024	8	Operante
●	Montes Claros (MG)	16,73	43,83	646	A506	2004–2024	21	Operante
●	Uberaba (MG)	19,75	47,93	778	A568	2017–2024	8	Operante
●	Uberlândia (MG)	18,92	48,26	875	A507	2004–2024	21	Operante

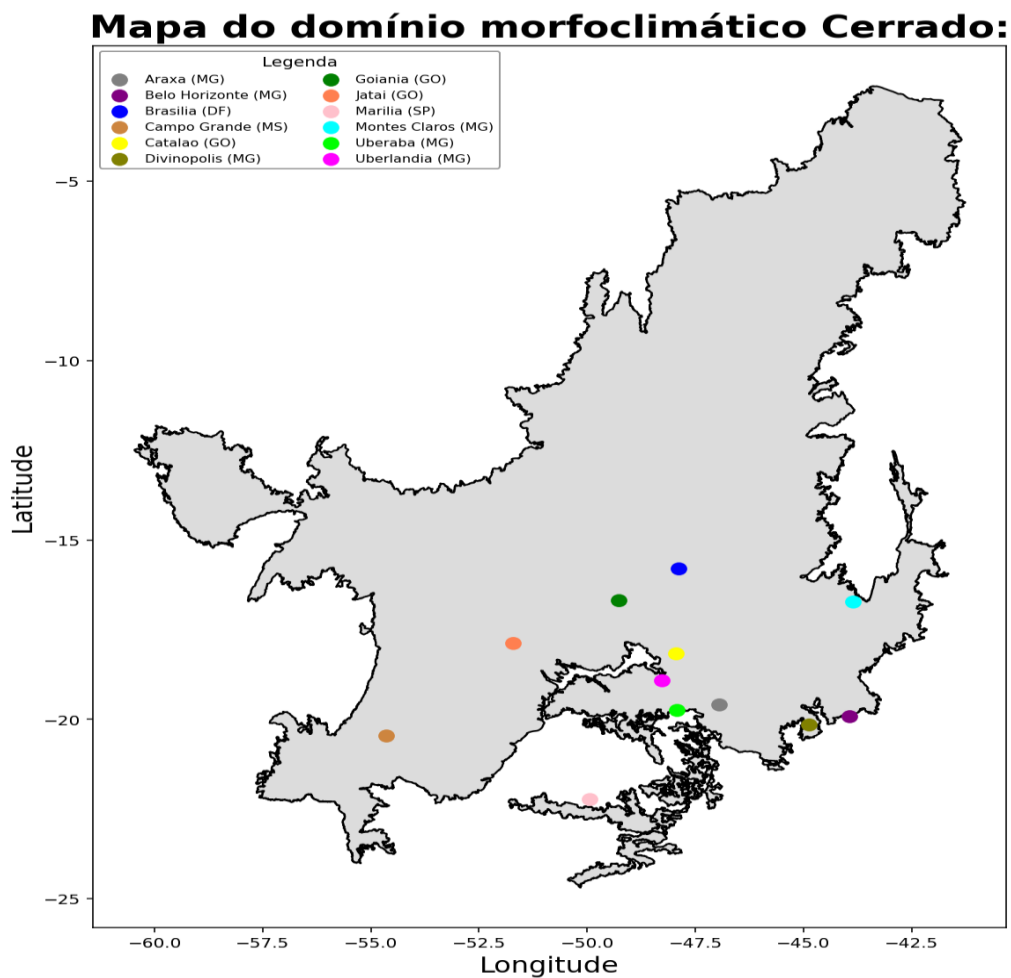


Figura 1 – Mapa das cidades estudadas, sul e sudeste do Cerrado

Fonte: elaboração própria, com base em dados do INMET (2004–2024)



- **Precipitação**

As tendências de precipitação apresentaram forte heterogeneidade entre os municípios analisados, refletindo tanto diferenças nas condições de uso e cobertura do solo quanto a influência de fenômenos climáticos de escala global. A análise dos índices de maior precipitação diária (RX1day) e das somas mensais e anuais (Figuras 2, 3 e 4) evidencia o aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos em cidades como Jataí (GO), com incremento de aproximadamente 65%, Uberlândia (MG), com elevação de 55%, e Divinópolis (MG), com acréscimo de até 75 mm/dia. Padrão semelhante foi registrado em Brasília (DF), onde a urbanização intensa e a impermeabilização do solo contribuíram para o aumento de cerca de 40% nos eventos de chuva intensa. Em contraposição, reduções expressivas foram verificadas em Belo Horizonte (MG), Campo Grande (MS) e Uberaba (MG), com quedas de até 60% no RX1day, associadas à degradação de pastagens e à perda de cobertura vegetal.

O índice de intensidade média das chuvas (SDII) também demonstrou elevação após 2015 em Uberlândia (MG), Uberaba (MG), Montes Claros (MG) e Divinópolis (MG), revelando uma tendência de maior concentração das precipitações em períodos curtos, o que favorece o aumento do escoamento superficial e da erosão. A influência da variabilidade climática tropical do Pacífico foi igualmente evidente: durante os episódios de El Niño, registrou-se incremento dos extremos pluviométricos em Jataí (GO), Uberlândia (MG) e Montes Claros (MG), enquanto as fases frias (La Niña) corresponderam a reduções acentuadas desses eventos em Campo Grande (MS), Uberaba (MG) e Belo Horizonte (MG).

Além da variabilidade climática, as intervenções antrópicas exerceram papel decisivo na modulação regional da precipitação. Em Divinópolis (MG) e Marília (SP), a expansão de sistemas de irrigação agrícolas alterou o balanço hídrico e o microclima, favorecendo a formação de sistemas convectivos locais e intensificando os eventos de precipitação. Em Catalão (GO), por outro lado, a mineração provocou processos de degradação e desertificação que paradoxalmente resultaram em eventos mais intensos de precipitação extrema, aumento de cerca de 55 mm/dia, evidenciando uma instabilidade atmosférica associada à perda de equilíbrio ecossistêmico.

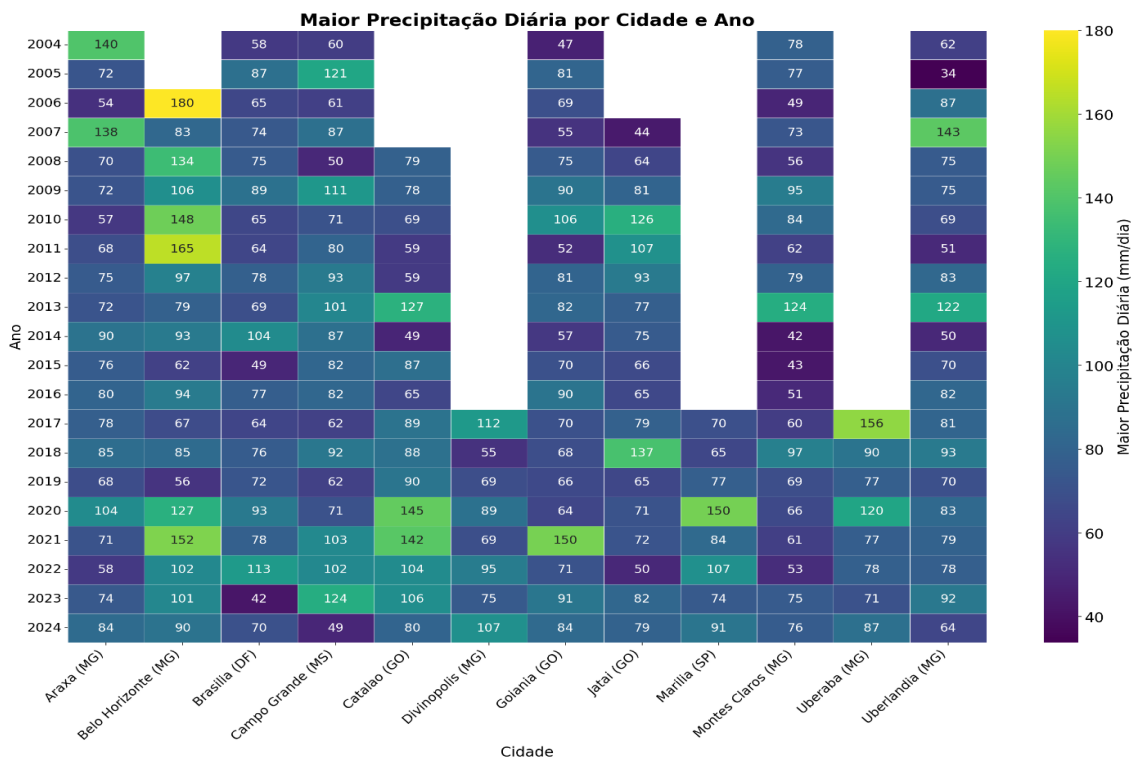


Figura 2 – Heatmap: Maior precipitação diária por cidade e ano (2004–2024)

Fonte: elaboração própria, com base em dados do INMET

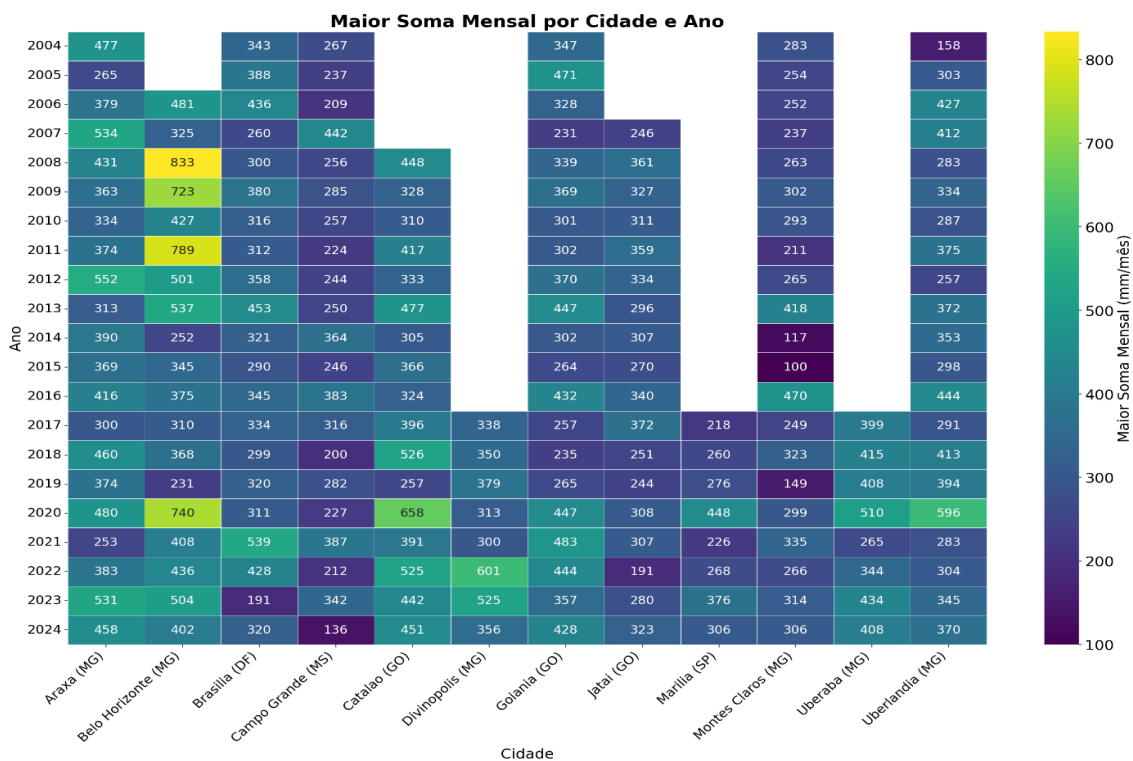


Figura 3 – Heatmap: Maior soma mensal por cidade e ano (2004–2024)

Fonte: elaboração própria, com base em dados do INMET

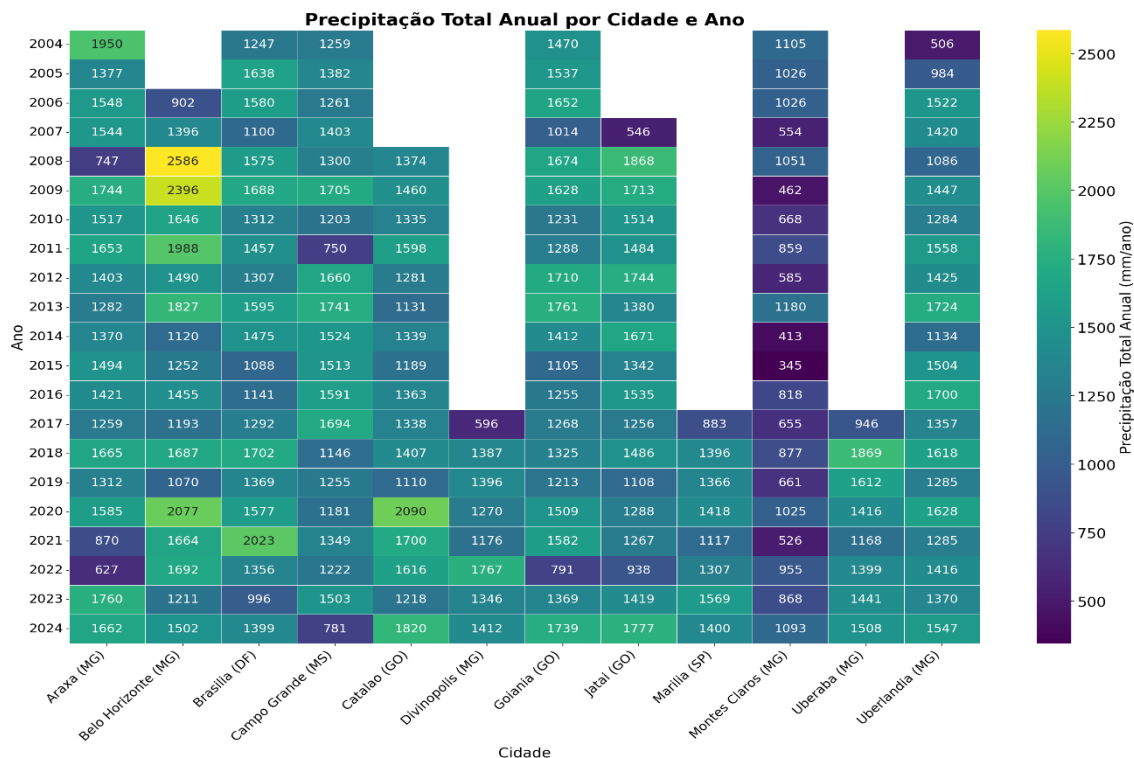


Figura 4 – Heatmap: Precipitação total anual por cidade e ano (2004–2024)

Fonte: elaboração própria, com base em dados do INMET

- **Temperatura**

No que tange à temperatura, os dados indicam uma tendência geral de aquecimento, embora com particularidades locais. Conforme os heatmaps da maior temperatura mínima anual (Figura 5) e da menor temperatura máxima anual (Figura 6), observa-se um aquecimento noturno progressivo em diversas cidades, especialmente em 2020 e 2023-2024. Cidades como Montes Claros (MG), com elevação de 2,2 °C na temperatura média, e Belo Horizonte (MG), com +2,0 °C, registraram os aumentos mais expressivos. Este aquecimento está associado ao desmatamento para produção de carvão vegetal no caso de Montes Claros (MG) e à intensificação da Ilha de Calor Urbana (ICU) em Belo Horizonte (MG), onde o adensamento verticalizado aprisiona o calor.

Outros municípios também apresentaram aquecimento significativo, como Goiânia (GO), com +1,8 °C devido ao albedo urbano, e Araxá (MG), com +1,5 °C associado à atividade mineradora. As temperaturas máximas absolutas (TXx) também se elevaram de forma notável em Montes Claros (MG), Uberaba (MG) e Belo Horizonte (MG), refletindo os impactos do efeito urbano e das monoculturas. Em contraste, cidades como Goiânia (GO), Marília (SP) e



Jataí (GO) demonstraram relativa estabilidade térmica, apesar da forte variabilidade pluviométrica. A menor temperatura máxima anual apresentou padrões distintos, com elevação em Brasília (DF) e Campo Grande (MS) e redução em Divinópolis (MG) e Jataí (GO), sugerindo uma forte influência das dinâmicas microclimáticas locais sobre a amplitude térmica.

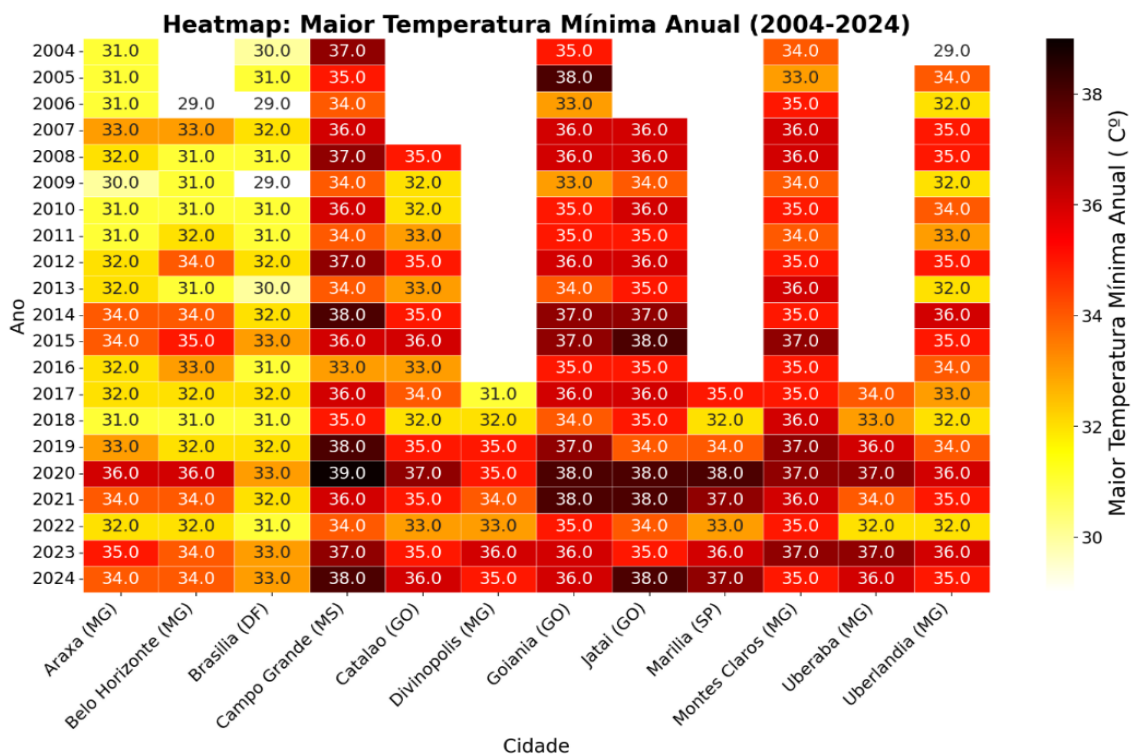


Figura 5 – Heatmap: Maior Temperatura Mínima Anual por Cidade (2004–2024)

Fonte: elaboração própria, com base em dados do INMET

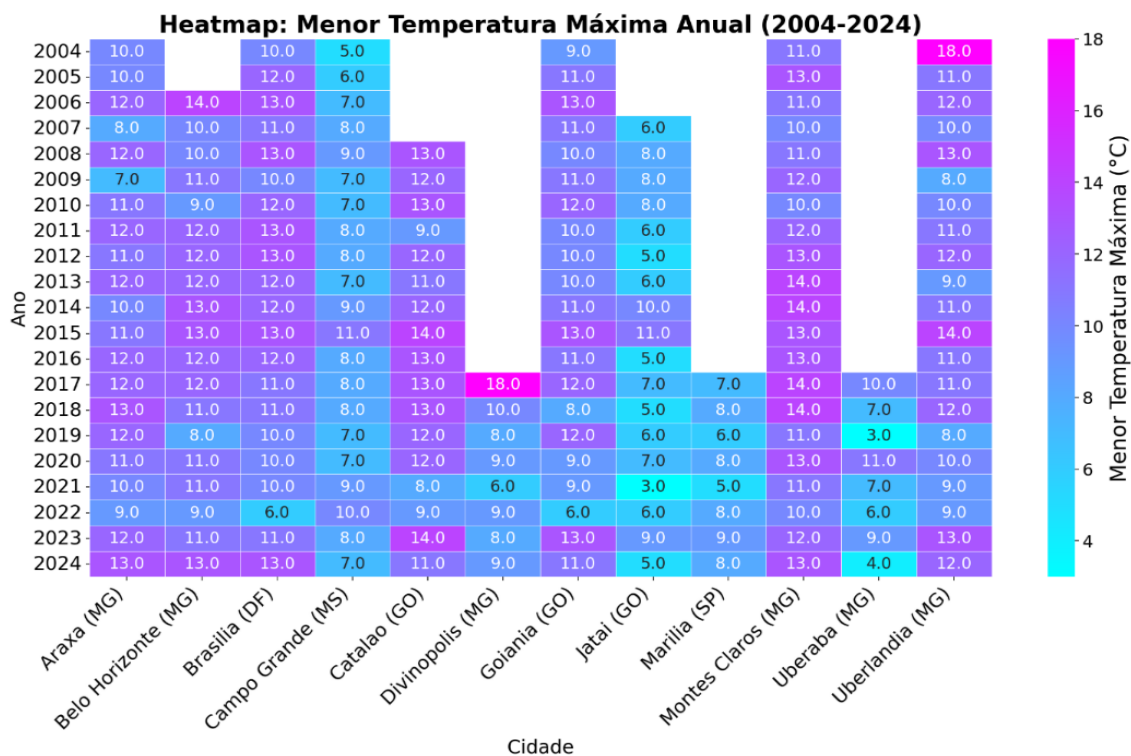


Figura 6 – Heatmap: Menor Temperatura Máxima Anual por Cidade (2004–2024)

Fonte: elaboração própria, com base em dados do INMET

- **Umidade Relativa**

A variável umidade relativa do ar revelou um quadro preocupante de aridificação atmosférica crescente em todo o domínio do Cerrado. Os resultados apontam uma diminuição gradual dos valores mínimos anuais e um aumento expressivo da frequência de dias críticos, com umidade igual ou inferior a 25%, 20% e 15% (Figuras 7, 8 e 9), especialmente a partir de 2015. As áreas em vermelho intenso nos mapas de calor destacam os períodos e locais mais severos, com destaque para Goiânia (GO), Jataí (GO) e Montes Claros (MG), que registraram as condições mais áridas nos anos de 2007, 2010, 2015 e entre 2022–2024.

O aumento de dias com umidade inferior a 15%, limiar crítico para a saúde pública e para o risco de incêndios florestais, foi particularmente notável entre 2020 e 2024. Essa redução está diretamente relacionada a processos de degradação ambiental e mudanças no uso da terra. Em Campo Grande (MS), a substituição de vegetação nativa por pastagens degradadas reduziu a umidade mínima em cerca de 18%. Em Catalão (GO), a mineração provocou queda de aproximadamente 30%, enquanto em Uberaba (MG) e Uberlândia (MG) a expansão da cana-de-açúcar resultou em reduções de 25% e 20%, respectivamente. Mesmo em Divinópolis (MG),



onde o aumento da precipitação poderia sugerir maior disponibilidade hídrica, observou-se diminuição de 12% na umidade mínima, refletindo um desequilíbrio no ciclo hidrológico local.

A combinação entre o aquecimento regional e a queda da umidade relativa intensifica o estresse hídrico, amplia o risco de incêndios e compromete a sustentabilidade dos ecossistemas e da produção agrícola no Cerrado. Essa tendência evidencia a necessidade de políticas públicas voltadas à conservação da cobertura vegetal e à mitigação dos efeitos da urbanização e das atividades econômicas sobre o microclima regional.

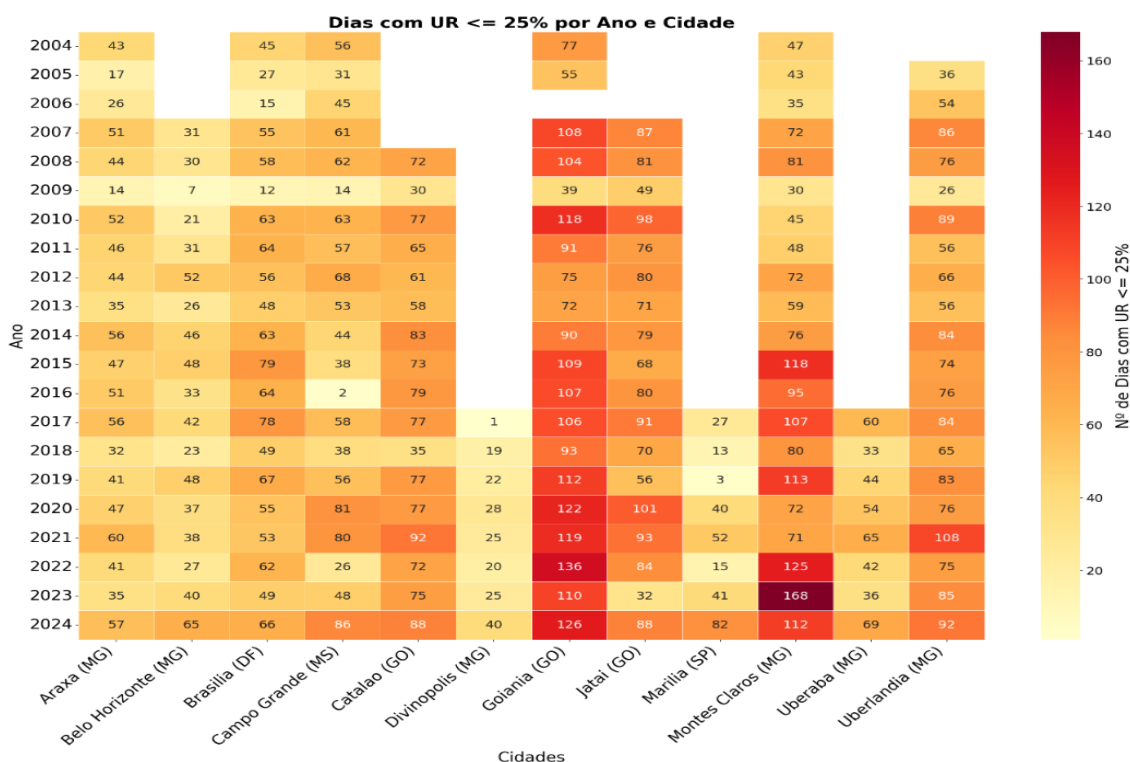


Figura 7 – Heatmap: Dias com Umidade Relativa ≤ 25% por Ano e Cidade (2004–2024)

Fonte: elaboração própria, com base em dados do INMET

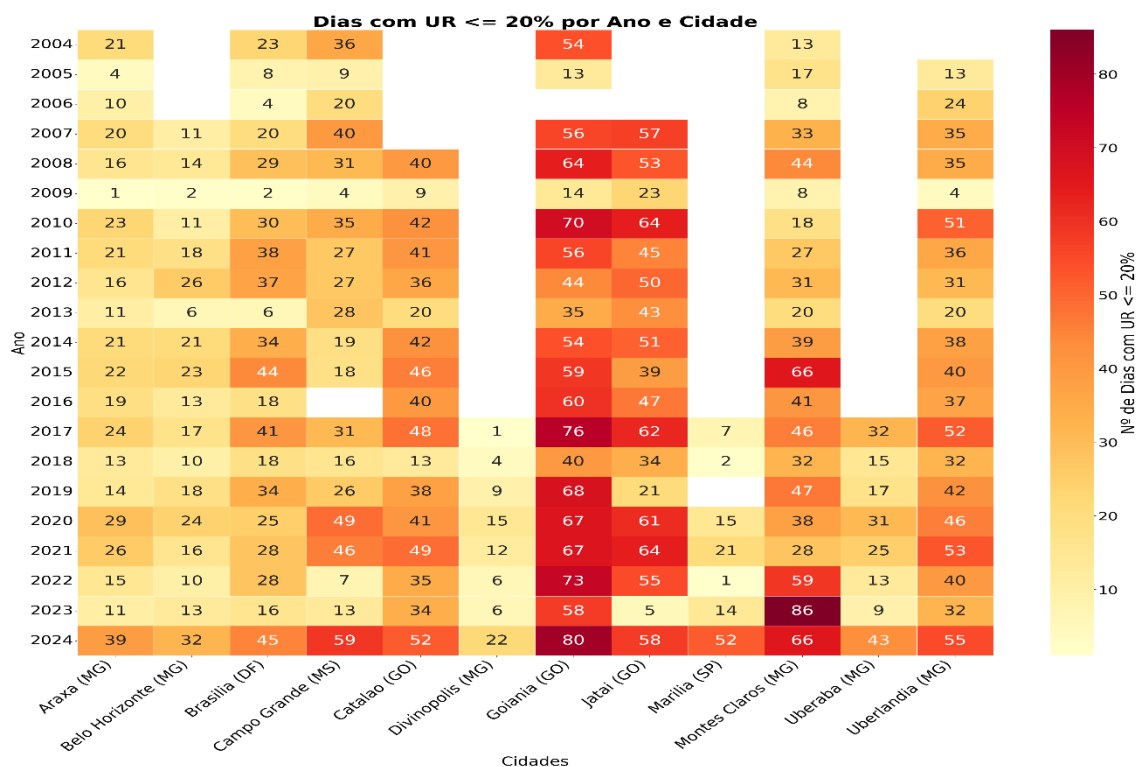


Figura 8 – Heatmap: Dias com Umidade Relativa $\leq$ 20% por Ano e Cidade (2004–2024)

Fonte: elaboração própria, com base em dados do INMET

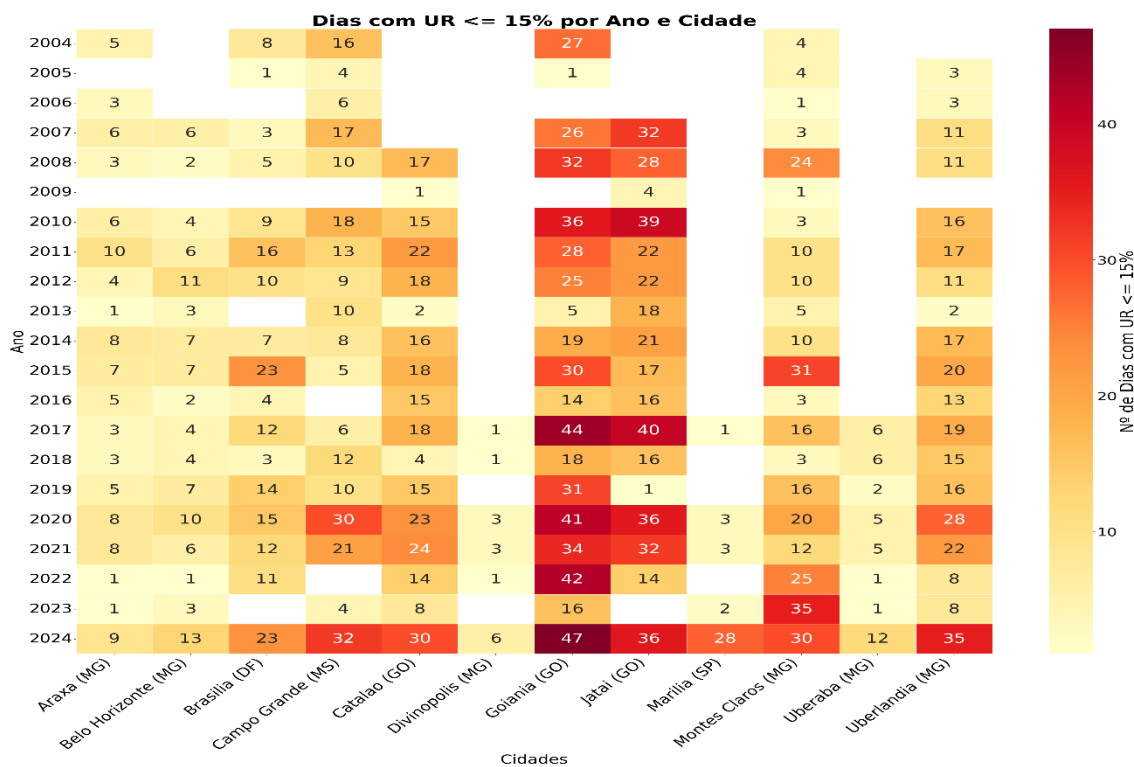


Figura 9 – Heatmap: Dias com Umidade Relativa $\leq$ 15% por Ano e Cidade (2004–2024)

Fonte: elaboração própria, com base em dados do INMET



CONSIDERAÇÕES FINAIS

As evidências empíricas reunidas ao longo deste estudo confirmam um processo contínuo, cumulativo e espacialmente heterogêneo de intensificação dos extremos climáticos no domínio morfoclimático do Cerrado, sobretudo nas regiões sul e sudeste do bioma. As análises integradas das séries históricas entre 2004 e 2024 revelaram tendências significativas de aquecimento, maior concentração da precipitação em eventos intensos e redução progressiva da umidade relativa do ar. Esses resultados indicam que o Cerrado atravessa uma fase de reorganização estrutural de seu regime climático, com efeitos diretos sobre a estabilidade ecológica, a disponibilidade hídrica e a qualidade ambiental.

As transformações territoriais recentes, como a expansão urbana desordenada, a mineração em larga escala, o avanço de monoculturas agrícolas e a degradação de pastagens, mostraram-se determinantes para a alteração dos regimes térmico e pluviométrico regionais. A substituição da vegetação nativa por superfícies impermeáveis e de baixa rugosidade térmica reduz a evapotranspiração e intensifica o armazenamento de calor na superfície, amplificando o fenômeno das ilhas de calor urbanas. Esses processos, quando combinados à variabilidade interanual de grande escala, especialmente a associada ao El Niño–Oscilação Sul (ENSO), resultam em padrões mais irregulares de precipitação, aumento da temperatura média e maior incidência de eventos extremos.

A interpretação integrada dos resultados evidencia que o Cerrado está se tornando progressivamente mais vulnerável a cenários de aridificação e desequilíbrio hídrico. Essa vulnerabilidade não é apenas climática, mas também socioambiental, pois repercute sobre setores essenciais como agricultura, abastecimento urbano, energia e saúde pública. Os episódios de umidade crítica ($\leq 25\%$, $\leq 20\%$ e $\leq 15\%$) e as tendências de aquecimento noturno indicam agravamento das condições de estresse térmico e atmosférico, com potenciais impactos sobre o conforto térmico humano, a produtividade agrícola e a frequência de incêndios florestais.

Diante desse quadro, é urgente a formulação de políticas públicas integradas de mitigação e adaptação, orientadas pela perspectiva territorial. O planejamento urbano deve priorizar o controle da expansão sobre áreas de recarga hídrica e remanescentes de vegetação nativa, assegurando a manutenção da capacidade de infiltração do solo e a regulação térmica local. No meio rural, é fundamental incentivar práticas agrícolas sustentáveis, como o plantio direto, o manejo conservacionista do solo, a adoção de sistemas integrados de lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e a diversificação produtiva, medidas que contribuem para reduzir a vulnerabilidade das



ENANPEGE

XVI Encontro Nacional de Pós-Graduação e
Pesquisa em Geografia

monoculturas e restaurar o equilíbrio hidrológico. A recuperação de áreas degradadas, sobretudo aquelas impactadas pela mineração e pela pecuária extensiva, constitui ação estratégica para reverter processos de desertificação e restaurar a resiliência ecológica regional.

Paralelamente, o fortalecimento de sistemas regionais de monitoramento climático baseados em dados locais, estações meteorológicas de alta resolução e metodologias estatísticas robustas é indispensável para subsidiar decisões de gestão territorial e ambiental. Tais sistemas devem integrar universidades, órgãos públicos e comunidades locais, promovendo a democratização das informações e o uso da ciência aplicada na formulação de políticas de adaptação climática.

Somente por meio de uma abordagem territorial integrada, que articule variáveis ambientais, sociais e econômicas, será possível ampliar a resiliência ecológica e social do Cerrado. Essa perspectiva exige atuação interdisciplinar, planejamento regional de longo prazo e compromisso institucional com a sustentabilidade. A proteção dos serviços ecossistêmicos prestados pelo Cerrado, como a regulação climática, a segurança hídrica e a manutenção da biodiversidade, é condição indispensável para garantir a qualidade de vida das populações que dele dependem e para enfrentar os desafios impostos pela crise climática contemporânea.



REFERÊNCIAS

- AB'SABER, Aziz Nacib. *Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas*. 6. ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2017.
- AMORIM, Margarete Cristina de Almeida. *Clima urbano: fundamentos, métodos e técnicas*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.
- BERTRAND, Georges. *Paisagem e geografia física global: esboço metodológico*. Caderno de Ciências da Terra, n. 13. São Paulo: Instituto de Geografia da USP, 1971.
- CAMPOS, João Batista; CHAVES, Ricardo Ramos. *Climatologia e variabilidade do regime de chuvas no Brasil Central*. Revista Brasileira de Climatologia, Curitiba, v. 26, n. 1, p. 11–30, 2020. DOI: 10.5380/abclima.v26i1.72348.
- CATTELAN, Débora Cristina; et al. *Tendências de aridificação e variabilidade climática no bioma Cerrado brasileiro*. Journal of South American Earth Sciences, v. 134, p. 103.923, 2024. DOI: 10.1016/j.jsames.2024.103923.
- CRUTZEN, Paul J.; STOERMER, Eugene F. *The “Anthropocene”*. Global Change Newsletter, Estocolmo, n. 41, p. 17–18, 2000.
- GRIMM, Alice Maria. *The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences*. Journal of Climate, v. 16, n. 2, p. 263–280, 2003. DOI: 10.1175/1520-0442(2003)016<0263:TENIOT>2.0.CO;2.
- HOFMANN, Gisele Schumann; et al. *Land use change, climate variability and their impact on Cerrado vegetation greenness*. Science of the Total Environment, v. 776, p. 145958, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145958.
- HOFMANN, Gisele Schumann. *Evidências recentes de aridificação no Cerrado e implicações para a resiliência ecológica*. Ambiente & Sociedade, Campinas, v. 27, e0323, 2024. DOI: 10.1590/1809-4422asoc0323r2024.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC, 2023.
- KIM, Kyung-Sook; et al. *Teleconnections of ENSO and the South Atlantic Convergence Zone on South American rainfall regimes*. Climate Dynamics, v. 65, p. 2001–2019, 2025. DOI: 10.1007/s00382-025-06910-5.
- LAPOLA, David M.; et al. *Climate change and land-use change interactions in Brazil's Central Plateau*. Nature Climate Change, v. 10, p. 850–856, 2020. DOI: 10.1038/s41558-020-00932-8.



LAPOLA, David M.; et al. *Human-induced climate pressures in the tropics: implications for biodiversity and ecosystem services*. *Science Advances*, v. 9, n. 3, eabc3456, 2023. DOI: 10.1126/sciadv.abc3456.

MARENGO, José Antônio; et al. *Extreme climatic events in Brazil: future scenarios and potential impacts*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 1–15, 2012. DOI: 10.1590/S0102-77862012000200001.

NOBRE, Carlos A.; et al. *Understanding the climate of Amazonia and the climate of Brazil*. *Geophysical Research Letters*, v. 32, L17705, 2005. DOI: 10.1029/2005GL023437.

PEREIRA, Gabriela M.; et al. *Influência da irrigação no microclima e nas chuvas convectivas no Cerrado brasileiro*. *Revista Brasileira de Climatologia*, Curitiba, v. 22, p. 85–102, 2018. DOI: 10.5380/abclima.v22i0.59321.

REBOITA, Michelle Simões; SANTOS, Isabela Almeida dos. *Teleconexões atmosféricas e padrões climáticos no Brasil*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 1–14, 2014. DOI: 10.1590/0102-778620130055.

RIBEIRO, Rafael S.; et al. *Impactos do desmatamento e da degradação de pastagens na evapotranspiração e temperatura de superfície no Cerrado*. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*, v. 52, p. 67–82, 2019. DOI: 10.5327/Z2176-947820190429.

SANO, Edson E.; et al. *O Cerrado no contexto da conservação da biodiversidade e dos recursos hídricos no Brasil*. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi – Ciências Naturais*, Belém, v. 14, n. 2, p. 113–134, 2019. DOI: 10.46357/bcn.v14i2.203.

SERRÃO, Paulo M.; et al. *ENSO-ZCAS interactions and their impacts on rainfall extremes in Central Brazil*. *Climate Research Letters*, v. 12, e000123, 2025. DOI: 10.5194/crl-12-123-2025.

SPERA, Stephanie A.; et al. *Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier*. *Global Change Biology*, v. 22, n. 10, p. 3405–3413, 2016. DOI: 10.1111/gcb.13337.

STEFFEN, Will; et al. *Trajectories of the Earth System in the Anthropocene*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, Washington, v. 115, n. 33, p. 8252–8259, 2018. DOI: 10.1073/pnas.1810141115.

STRASSBURG, Bernardo B. N.; et al. *Moment of truth for the Cerrado hotspot*. *Nature Ecology & Evolution*, v. 1, n. 99, p. 1–3, 2017. DOI: 10.1038/s41559-017-0099.