



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO - CAMPUS VII
LICENCIATURA EM CIÊNCIAS NATURAIS - BIOLOGIA

**ANÁLISE DAS CORES DO CÉU NO CREPÚSCULO COMO INDICADOR DA
QUALIDADE DO AR DURANTE O PERÍODO DE QUEIMADAS NO MUNICÍPIO
DE CODÓ - MARANHÃO**

Orientadora: Profa. Dra. Camila Campêlo de Sousa

Co-orientação: Prof. Dr. Rosivaldo Xavier da Silva.

Discentes: Brendha Karolyne Lopes Sousa

Társia Allays Lima Xavier Ribeiro

Codó - MA

2026

BRENDHA KAROLYNE LOPES SOUSA
TÁRSIA ALLAYS LIMA XAVIER RIBEIRO

**ANÁLISE DAS CORES DO CÉU NO CREPÚSCULO COMO INDICADOR DA
QUALIDADE DO AR DURANTE O PERÍODO DE QUEIMADAS NO MUNICÍPIO
DE CODÓ - MARANHÃO**

Orientadora: Profa. Dra. Camila Campêlo de Sousa

Co-orientação: Prof. Dr. Rosivaldo Xavier da Silva.

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado à Universidade Federal do
Maranhão como requisito para a obtenção do
título de Licenciada em Ciências Naturais, com
habilitação em Biologia.

Codó – MA

2026

BRENDHA KAROLYNE LOPES SOUSA
TÁRSIA ALLAYS LIMA XAVIER RIBEIRO

**ANÁLISE DAS CORES DO CÉU NO CREPÚSCULO COMO INDICADOR DA
QUALIDADE DO AR DURANTE O PERÍODO DE QUEIMADAS NO MUNICÍPIO
DE CODÓ - MARANHÃO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado à Universidade Federal do
Maranhão como requisito para a obtenção do
título de Licenciada em Ciências Naturais, com
habilitação em Biologia.

Aprovado em: 17de Julho de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Camila Campêlo de Sousa (Orientadora)
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Prof. Dr. Rosivaldo Xavier da Silva (Coorientador)
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB

Prof. Esp. Ramon Sttephano Cavalcante Lima
Universidade Federal do Maranhão – UFMA

Profa. Dra. Ana Paula dos Santos Reinaldo Verde
Universidade Federal do Maranhão – UFMA (Suplente)

Xavier Ribeiro, Társia Allays Lima.

ANÁLISE DAS CORES DO CÉU NO CREPÚSCULO COMO INDICADOR DA QUALIDADE DO AR DURANTE O PERÍODO DE QUEIMADAS NO MUNICÍPIO DE CODÓ - MARANHÃO / Társia Allays Lima Xavier Ribeiro, Brendha Karolyne Lopes Sousa. - 2026.

34 f.

Coorientador(a) 1: Rosivaldo Xavier da Silva.

Orientador(a): Camila Campêlo de Sousa.

Monografia (Graduação) - Curso de Ciências Naturais - Biologia, Universidade Federal do Maranhão, Codó - Ma, 2026.

1. Óptica Atmosférica. 2. Espalhamento de Rayleigh. 3. Espalhamento de Mie. I. Sousa, Brendha Karolyne Lopes. II. Silva, Rosivaldo Xavier da. III. Sousa, Camila Campêlo de. IV. Título.

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho a Deus, à Nossa Senhora, aos nossos pais e familiares, nossos alicerces de amor incondicional e incentivo constante, e aos professores, em especial à Dra. Camila Campêlo de Sousa e ao Dr. Rosivaldo Xavier da Silva, cujos conhecimentos e dedicação foram fundamentais na construção de nossa trajetória acadêmica e profissional.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho é fruto de um esforço que vai além do âmbito acadêmico, contando também com valioso apoio institucional, pessoal e emocional. Portanto, gostaríamos de expressar nossa sincera gratidão a todos que, de diversas maneiras, contribuíram para a conclusão desta jornada.

Aos professores que participaram de nossa formação acadêmica, em especial à Dra. Camila Campelo de Sousa e ao Dr. Rosivaldo Xavier da Silva, bem como a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a construção deste trabalho, manifestamos nosso sincero agradecimento.

Aos colaboradores do Buteco Bistrô Bar, agradecemos pela gentileza, pela disponibilização do espaço e pelo suporte oferecido, que possibilitaram a coleta de dados e a realização eficaz da pesquisa de campo. A paciência e a colaboração de todos foram dignas de destaque.

Eu, Brendha Karolyne Lopes Sousa, agradeço, em particular, a Deus, por me conceder força e sabedoria para superar os desafios. À minha família, que é meu alicerce, especialmente à minha mãe, Lucimar Castro Lopes, exemplo de garra e amor incondicional, que sempre me incentivou a nunca desistir dos meus sonhos; ao meu pai, Antonio Carlos Sousa, por todo o apoio, ensinamentos e por sempre acreditar em mim; às minhas irmãs, Brunna Gabryelle Lopes Sousa e Thays Cristina Ribeiro Alves, pela amizade, companheirismo e por estarem sempre ao meu lado, incentivando-me a seguir em frente. Ao meu esposo, Francisco Wilame da Silva Cunha, pelo amor, paciência e apoio em todos os momentos.

À minha filha Maria Luísa Sousa Cunha, o meu maior presente e a razão da minha força diária. Cada etapa deste trabalho foi realizada pensando em construir um futuro melhor para você. Que esta conquista seja também uma inspiração para que, um dia, você acredite que, com fé, dedicação e amor, é possível vender qualquer desafio.

Aos amigos, agradeço por cada conselho, abraço e palavra de incentivo. Em especial, às minhas colegas de curso, Irlane da Silva e Silva, Lilia Maria da Conceição Vieira, Nivea Maria Mesquita Cariman e Társia Allays Lima Xavier, pela amizade, apoio e por tornarem essa jornada mais leve.

Às instituições de ensino que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação acadêmica e profissional, proporcionando experiências valiosas e enriquecedoras, registro minha gratidão.

Eu, Társia Allays Lima Xavier, agradeço, em particular, a Deus e à minha família, meu suporte inabalável. De modo especial, rendo minha sincera homenagem e gratidão à minha mãe, Tercília Machado Lima Neta, por ser um alicerce de inspiração e resistência, cujo afeto e empenho foram fundamentais para minha persistência. Agradeço também à minha avó, Maria Marques da Cruz Silva, ao meu esposo, Wylían Kelvin Silva Ribeiro, e aos meus irmãos, Thays Adryanne Lima Xavier Melo e Tércio Emanuel Lima Xavier, pelo carinho, apoio e compreensão demonstrados durante os momentos de maior dedicação a este estudo. Minha filha Agnes Xavier Ribiero, que mesmo estando ainda no ventre, me impulsionou, me deu força e coragem para a conclusão desta etapa. O suporte e a paciência de vocês foram essenciais para a superação dos obstáculos.

Aos amigos, pelo apoio espiritual e pelas palavras de encorajamento que tornaram a jornada mais leve e inesquecível. Em especial, agradeço a Mayane Denyse Vieira dos Santos, Laura Fernanda da Silva Matos, Maria Clara Fonseca da Silva, Sara Joana Serra Ribeiro, Susana Serra Ribeiro e Écila Stéfany da Cruz Silva, cujas amizades e compreensões foram refúgios valiosos ao longo do curso. Aos colegas que compartilharam comigo a rotina acadêmica, a troca de conhecimentos e momentos significativos, especialmente Beatriz Moraes Correia, Luiz Luz Aragão e Brendha Karolyne Lopes Sousa, agradeço pela parceria, colaboração mútua e discussões enriquecedoras que impactaram positivamente minha formação e a realização desta pesquisa.

Ao Colégio Olympus Yesi, na pessoa de Jailene dos Santos e Adriana Almeida, agradeço pela valiosa oportunidade de crescimento profissional e pela experiência prática, que contribuíram de maneira significativa para minha formação e para a perspectiva deste estudo.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a nossa formação e para a conclusão deste trabalho, registramos nossos mais sinceros e profundos agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho investiga as causas e variações das cores do céu, com foco nos processos físicos responsáveis por sua formação. A coloração azul predominante do céu diurno é explicada pelo espalhamento de Rayleigh, no qual a luz de menor comprimento de onda, como a azul, é dispersa com maior eficiência pelas moléculas da atmosfera em comparação às cores de maior comprimento de onda, como o vermelho. O estudo analisa, ainda, como a composição atmosférica, a presença de partículas em suspensão e a posição do Sol influenciam a intensidade e a tonalidade das cores observadas, especialmente durante o entardecer. Nos períodos de amanhecer e entardecer, o céu apresenta tonalidades avermelhadas e alaranjadas, fenômeno associado ao espalhamento de Mie - decorrente da presença de partículas maiores na atmosfera - e ao aumento do caminho óptico da luz solar em ângulos mais rasantes. Nesse contexto, esta pesquisa investiga as cores do céu durante o crepúsculo e as formas de dispersão da luz solar, buscando relacionar qualitativamente as variações observadas ao longo dos dias com a ocorrência de queimadas no município de Codó - Maranhão. A análise fundamenta-se nos princípios da óptica atmosférica para interpretar os fenômenos observados. Portanto, são apresentadas considerações sobre a influência da poluição atmosférica na percepção das cores do céu, destacando seu potencial como indicador qualitativo da qualidade do ar. Conclui-se que, durante o período de queimadas, a emissão de fumaça e material particulado altera significativamente as cores observadas no entardecer, podendo servir como um indicativo visual dos níveis de poluição atmosférica nos dias mais críticos.

Palavras-chave: Óptica atmosférica; espalhamento de Rayleigh; espalhamento de Mie.

ABSTRACT

This study investigates the causes and variations of sky colors, focusing on the physical processes responsible for their formation. The predominant blue color of the daytime sky is explained by Rayleigh scattering, in which shorter wavelengths, such as blue light, are more efficiently scattered by atmospheric molecules than longer wavelengths, such as red. The study also analyzes how atmospheric composition, the presence of suspended particles, and the position of the Sun influence the intensity and hue of the observed colors, particularly during sunset. At sunrise and sunset, the sky exhibits reddish and orange tones due to Mie scattering - associated with larger particles in the atmosphere - and the increased optical path of sunlight at low angles. In this context, this research examines sky colors during twilight and the mechanisms of solar light scattering, aiming to qualitatively relate daily variations to the occurrence of biomass burning in the municipality of Codó - Maranhão, Brazil. The analysis is based on principles of atmospheric optics to interpret the observed phenomena. Finally, considerations are presented regarding the influence of air pollution on sky color perception, highlighting its potential as a qualitative indicator of air quality. The results suggest that, during the burning season, smoke emissions and particulate matter significantly affect the colors observed at sunset, serving as a visual indicator of atmospheric pollution levels on critical days.

Keywords: Atmospheric optics; Rayleigh scattering; Mie scattering.

Sumário

INTRODUÇÃO	11
JUSTIFICATIVA.....	13
OBJETIVOS	14
Geral	14
Específicos	14
METODOLOGIA	14
Área de estudo	14
Coleta dos dados	15
Análise dos dados	15
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	16
O céu de Codó.....	16
Clima e condições meteorológicas de Codó ao longo do ano.....	17
Panorama dos focos de queimadas na América do Sul e no Brasil.....	18
Registros fotográficos do Céu de Codó.....	20
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31
REFERÊNCIAS.....	34

INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial, iniciada no final do século XVIII, marcou uma profunda transformação na história da humanidade. Impulsionada pela mecanização da produção, pelo uso intensivo de combustíveis fósseis e pela urbanização acelerada, esse período alterou significativamente os modos de vida e a estrutura econômica mundial. No entanto, tais avanços técnicos e econômicos também trouxeram uma série de impactos ambientais, cujas consequências se intensificam até os dias atuais. A poluição atmosférica nas cidades industriais, a degradação de ecossistemas naturais e a emissão descontrolada de gases de efeito estufa configuraram o início de um processo que, décadas depois, culminaria nas mudanças climáticas globais.

Um dos primeiros efeitos visíveis desse processo foi o aumento da poluição do ar. A queima de carvão mineral, principal fonte energética da época, liberava grandes quantidades de dióxido de enxofre, monóxido de carbono e material particulado. Cidades como Londres e Manchester passaram a conviver com densas nuvens de fuligem, comprometendo a visibilidade e a saúde da população (GOIÁS, s.d.). Paralelamente, a emissão de gases de efeito estufa, especialmente dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), aumentou significativamente desde o início da era industrial, contribuindo para o aquecimento global (GOIÁS, s.d.). Dados do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas indicam que a concentração de CO_2 na atmosfera aumentou mais de 40% desde 1750, sendo um dos principais fatores responsáveis pelo desequilíbrio térmico global (IPCC, 2021).

No contexto brasileiro, as queimadas e os incêndios florestais, especialmente na segunda metade do ano, representam uma das principais fontes de poluição atmosférica. A fumaça gerada nesses eventos contém material particulado fino ($\text{MP}_{2,5}$), monóxido de carbono (CO), ozônio (O_3) e compostos orgânicos voláteis (COVs), substâncias que, ao serem inaladas, podem causar sérios problemas respiratórios e cardiovasculares. Em agosto de 2024, mais de 5,5 milhões de hectares foram queimados no Brasil, afetando áreas de diferentes biomas, além de regiões agrícolas e urbanas (SBPC, 2024). Fatores como seca prolongada, baixa umidade e ondas de calor favorecem a propagação do fogo, alterando significativamente a paisagem e impactando a saúde da população.

Os efeitos da poluição atmosférica são amplamente perceptíveis no cotidiano, incluindo sintomas como irritação das vias respiratórias, ardência nos olhos e agravamento de doenças preexistentes. Registros recentes apontam aumento de internações por problemas respiratórios em diversas regiões do país, além de elevação de casos graves associados à má qualidade do ar (SBPC, 2024). Esse cenário evidencia a relação direta entre queimadas, poluição e saúde pública.

Do ponto de vista científico, a avaliação da qualidade do ar pode ser realizada por meio de

indicadores como a concentração de material particulado, dióxido de nitrogênio (NO_2), dióxido de enxofre (SO_2) e monóxido de carbono (CO). Esses elementos também se relacionam com fenômenos físicos visíveis, como o espalhamento da luz na atmosfera. O espalhamento de Mie, por exemplo, ocorre quando partículas maiores, como poeira e fumaça, interagem com a luz solar, alterando sua trajetória e influenciando a forma como percebemos as cores do céu.

A poluição atmosférica interfere diretamente na aparência do céu, tornando-o menos azul e mais opaco, frequentemente com tonalidades acinzentadas ou avermelhadas, além de reduzir a visibilidade. Durante o crepúsculo, esse efeito torna-se ainda mais evidente. Isso ocorre porque a luz solar percorre um caminho maior na atmosfera, favorecendo o espalhamento dos comprimentos de onda menores, como o azul, enquanto os comprimentos de onda maiores, como o vermelho e o laranja, chegam com maior intensidade ao observador. A presença de partículas de poluição intensifica esse fenômeno, tornando as cores mais acentuadas (SOARES, 2023).

O fenômeno do espalhamento ocorre quando há um desvio, ou alteração do caminho, de uma forma de energia (radiação eletromagnética, partículas, ou até mesmo o som). Nesse contexto, especificamente, falaremos sobre dois fenômenos parecidos: o espalhamento de Rayleigh e o espalhamento de Mie.

O espalhamento de Rayleigh, ou dispersão de Rayleigh, ocorre quando o diâmetro da partícula é muito menor do que o comprimento de onda do fóton que a atinge. O céu azul é um exemplo do espalhamento de Rayleigh. Quando os fótons da luz do Sol se propagam, eles colidem com vários átomos e moléculas gasosas presentes no ar. No momento da colisão, o fóton é absorvido por essa partícula, fazendo seus elétrons vibrarem. A vibração dos elétrons é, então, reemitida na forma de radiação eletromagnética para todas as direções. Já o O espalhamento de Mie acontece com partículas iguais ou maiores do que o comprimento de onda da luz que as atinge. Esse tipo de espalhamento é o mais comum em nuvens e névoas, com partículas de vapor d'água, ou poeira. Ao contrário do espalhamento de Rayleigh, que emite luz com a mesma intensidade para todos os lados, o espalhamento de Mie tem maior intensidade na mesma direção da luz incidente (HOSTI, 2025).

Esse comportamento foi explicado por estudos clássicos da óptica atmosférica, como os de Tyndall (1869), que demonstraram que comprimentos de onda menores são mais facilmente dispersos. Assim, ao nascer e ao pôr do sol, a predominância de cores avermelhadas está associada à maior distância percorrida pela luz solar na atmosfera. A presença de partículas em suspensão, como poeira e fumaça, potencializa esse efeito, intensificando as tonalidades observadas. Além disso, a coloração das nuvens também varia conforme a incidência da luz solar e a composição atmosférica, podendo apresentar tons alaranjados, avermelhados ou acinzentados (BOHREN, 1985).

Considerando o município de Codó - Maranhão, onde há aumento significativo de queimadas durante períodos de seca, a atmosfera local tende a apresentar elevada concentração de material particulado e gases poluentes. Nesse contexto, surge a seguinte questão: de que forma as variações das cores observadas no céu durante o crepúsculo podem servir como indicador visual da qualidade do ar na região?

Diante disso, este estudo propõe analisar a relação entre a coloração do céu e a presença de poluentes atmosféricos, utilizando a observação óptica como uma ferramenta acessível de monitoramento ambiental. A partir dessa perspectiva, busca-se compreender como as mudanças visuais no céu de Codó podem atuar como um indicativo dos níveis de poluição do ar, contribuindo para a conscientização ambiental e para o desenvolvimento de estratégias simples e eficazes de observação.

Considerando esse contexto, torna-se importante caracterizar o município de Codó, localizado na região leste do estado do Maranhão, que possui área territorial de 4.361,6 km² (atualização de 2025). De acordo com o Censo Demográfico de 2022, o município apresenta população de 114.275 habitantes e densidade demográfica de 26,20 habitantes por km². Para o ano de 2025, a população é estimada em 118.283 habitantes (IBGE). Essas informações caracterizam Codó como um município de grande extensão territorial e população distribuída em baixa densidade demográfica, aspectos relevantes para o estudo desta pesquisa.

JUSTIFICATIVA

A variação das cores do céu constitui um fenômeno físico que desperta curiosidade desde a Antiguidade e apresenta relevância multidisciplinar para diversas áreas do conhecimento. A análise desse fenômeno possui aplicações práticas significativas, pois contribui para a compreensão de condições meteorológicas, auxilia em estudos sobre qualidade do ar e mudanças climáticas, além de desempenhar papel importante em áreas como a astronomia, a fotografia e as artes visuais.

No contexto contemporâneo, marcado pelo aumento da poluição atmosférica e pelas intensas transformações ambientais em escala global, torna-se ainda mais relevante compreender como os diferentes componentes da atmosfera influenciam a dispersão da luz solar e, conseqüentemente, as cores observadas no céu. Esse entendimento permite estabelecer relações entre fenômenos ópticos e indicadores ambientais, ampliando as possibilidades de análise e interpretação da qualidade do ar.

Além da contribuição científica, esta pesquisa apresenta relevante caráter educativo, ao incentivar a educação ambiental por meio da compreensão das relações entre as condições atmosféricas, as queimadas e a qualidade do ar. Ao demonstrar que as variações das cores do céu

podem servir como indicadores visuais da presença de partículas em suspensão na atmosfera, o estudo favorece a sensibilização da população para os impactos das atividades antrópicas sobre o meio ambiente, estimulando atitudes conscientes voltadas à preservação ambiental e à melhoria da qualidade de vida.

Dessa forma, este trabalho justifica-se pela necessidade de aprofundar o estudo desse fenômeno complexo, articulando conceitos da física com situações do cotidiano. Além disso, busca demonstrar como a observação das cores do céu pode servir como uma ferramenta acessível para a compreensão de questões científicas relevantes, contribuindo para a conscientização ambiental e para o desenvolvimento de uma percepção crítica sobre os impactos da poluição atmosférica na sociedade contemporânea.

OBJETIVOS

Geral

- Analisar as variações das cores do céu durante o crepúsculo no município de Codó - Maranhão, utilizando-as como indicadores visuais da qualidade do ar, especialmente no período de queimadas.

Específicos

- Investigar a relação entre a presença de partículas atmosféricas provenientes de queimadas e as alterações na coloração do céu durante o crepúsculo;
- Compreender os processos físicos envolvidos na dispersão da luz solar, com ênfase nos espalhamentos de Rayleigh e Mie;
- Avaliar qualitativamente as variações observadas nas cores do céu como indicativo dos níveis de poluição atmosférica;

METODOLOGIA

Área de estudo

As observações de campo foram realizadas no município de Codó - Maranhão, no período de 13 de setembro a 07 de outubro de 2024. Esse intervalo foi selecionado estrategicamente por corresponder ao período crítico de ocorrência de queimadas na região, o que favorece a análise dos efeitos da poluição atmosférica sobre a coloração do céu.

Os registros foram efetuados em três dias por semana, bem como em ocasiões adicionais nas quais foram observadas mudanças significativas nas condições atmosféricas ao longo do dia. As observações ocorreram no intervalo das 17h15 às 18h00, horário próximo ao pôr do sol, momento em que os efeitos do espalhamento da luz são mais evidentes.

O ponto de observação foi fixado em um local elevado, no segundo andar de um estabelecimento comercial (Buteco Bistrô Bar), situado na Avenida Augusto Teixeira, nº 647-739, CEP 65400-000, nas coordenadas geográficas (-4.46098, -43.88807). A escolha desse local deve-se à sua posição estratégica, que proporciona uma ampla visão panorâmica do horizonte urbano. A definição de um ponto fixo de observação teve como objetivo garantir a padronização dos registros e permitir a comparação consistente das imagens ao longo do período analisado.

Coleta dos dados

Durante o período de estudo, foram registradas as condições atmosféricas, incluindo temperatura, presença de nuvens e ocorrência de fumaça, com o objetivo de compreender como esses fatores influenciavam a coloração do céu durante o crepúsculo.

Os registros fotográficos foram realizados utilizando a câmera de um telefone celular acoplada a um tripé, garantindo maior estabilidade e padronização das imagens. A utilização do tripé possibilitou manter o enquadramento do horizonte em todas as observações, assegurando a comparabilidade dos registros obtidos ao longo do período de coleta de dados.

Análise dos dados

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa observacional de abordagem qualitativa, fundamentada em levantamento bibliográfico e documental, com o objetivo de analisar as cores do céu durante o crepúsculo como um indicador da presença de poluentes atmosféricos no município de Codó - Maranhão.

A análise do material fotográfico foi realizada de forma comparativa e qualitativa, com ênfase na observação sistemática das imagens e na pesquisa documental. Os registros obtidos foram confrontados com a literatura científica e com dados referentes aos focos de calor e às concentrações de monóxido de carbono (CO), disponibilizados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), além de informações provenientes de simuladores meteorológicos.

Após a coleta dos dados, foi realizada a seleção das fotografias mais representativas, considerando critérios como a coloração do céu e a presença de fumaça. Essas imagens foram comparadas com o auxílio de gráficos e de simuladores meteorológicos, buscando identificar possíveis relações entre as condições atmosféricas e as variações observadas na coloração do céu.

A análise das fotografias concentrou-se na interpretação qualitativa dos elementos visuais presentes em cada imagem, como cores, tonalidades e distribuição da fumaça, visando à identificação de padrões e à correlação entre as características observadas e os dados atmosféricos disponíveis.

Com base nesses levantamentos, foi possível discutir os resultados à luz da literatura

científica, relacionando-os aos objetivos da pesquisa e à problemática proposta, de modo a compreender a influência das queimadas sobre a coloração do céu e sua utilização como indicador qualitativo da qualidade do ar.

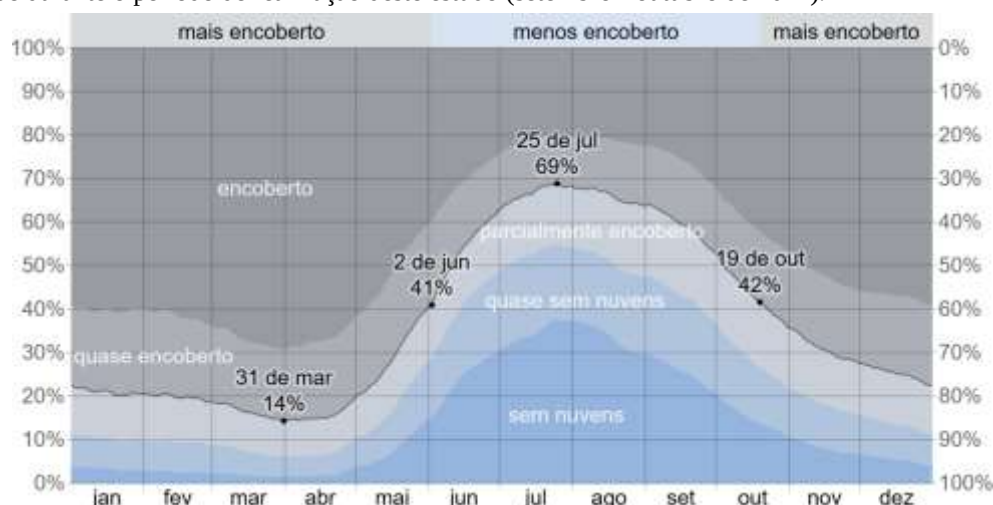
RESULTADOS E DISCUSSÕES

O céu de Codó

O período de setembro é caracterizado pelo aumento das temperaturas e pela intensificação da estação seca em grande parte das regiões Centro-Oeste e Nordeste do Brasil. Nessa época do ano, são frequentes temperaturas que se aproximam dos 40 °C e valores de umidade relativa bastante baixos, condições que favorecem a ocorrência e a propagação de queimadas. Além disso, as primeiras precipitações da primavera ainda ocorrem de forma irregular, não sendo suficientes para modificar o predomínio do tempo seco. Esse cenário resulta da combinação de fatores atmosféricos e oceânicos que limitam a formação de nuvens e a ocorrência de chuvas.

No município de Codó - Maranhão, o período compreendido entre meados de setembro e o início de outubro coincide com uma das épocas de menor cobertura de nuvens ao longo do ano. Conforme apresentado na **Figura 1**, predominam dias com céu limpo ou com pouca nebulosidade, condição que favorece a observação da coloração do céu durante o crepúsculo. Essa característica foi um dos principais critérios para a definição do período de realização desta pesquisa, uma vez que reduz a interferência da nebulosidade na propagação da luz solar, permitindo avaliar com maior confiabilidade a influência do material particulado proveniente das queimadas sobre as cores observadas no céu.

Figura 1 – Variação anual da cobertura de nuvens no município de Codó - Maranhão, evidenciando a menor nebulosidade durante o período de realização deste estudo (setembro - outubro de 2024).



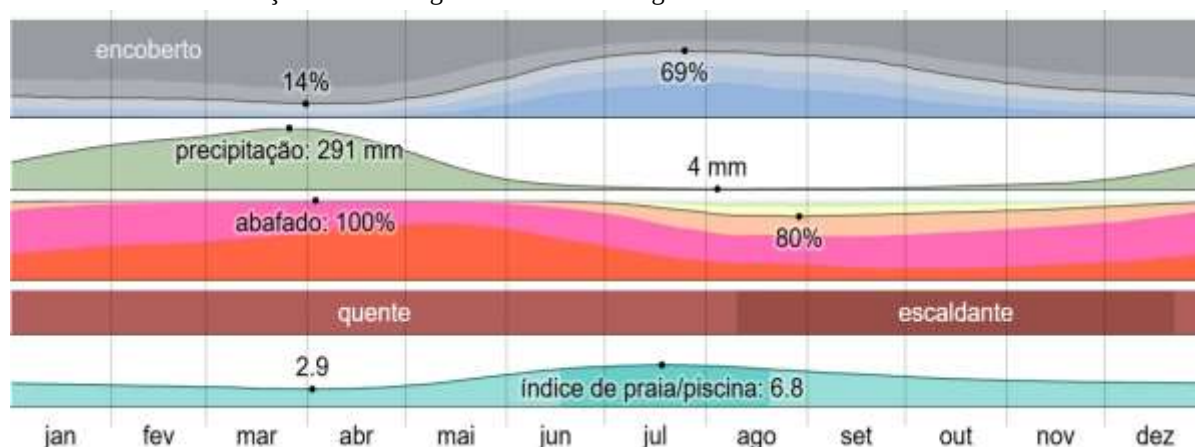
Fonte: Adaptado de WeatherSpark (2025).

A **Figura 1** evidencia que o período de estudo situa-se na transição entre a estação seca e

o início da estação chuvosa, quando a cobertura de nuvens ainda permanece relativamente baixa. Durante esse intervalo, predominam condições de céu limpo ou parcialmente encoberto, favorecendo a incidência direta da radiação solar e a observação das variações de cor durante o pôr do sol. Essas condições atmosféricas são particularmente importantes para esta pesquisa, pois permitem que as alterações na coloração do céu sejam atribuídas, predominantemente, à presença de fumaça e material particulado oriundos das queimadas, minimizando a influência da nebulosidade sobre os fenômenos ópticos observados.

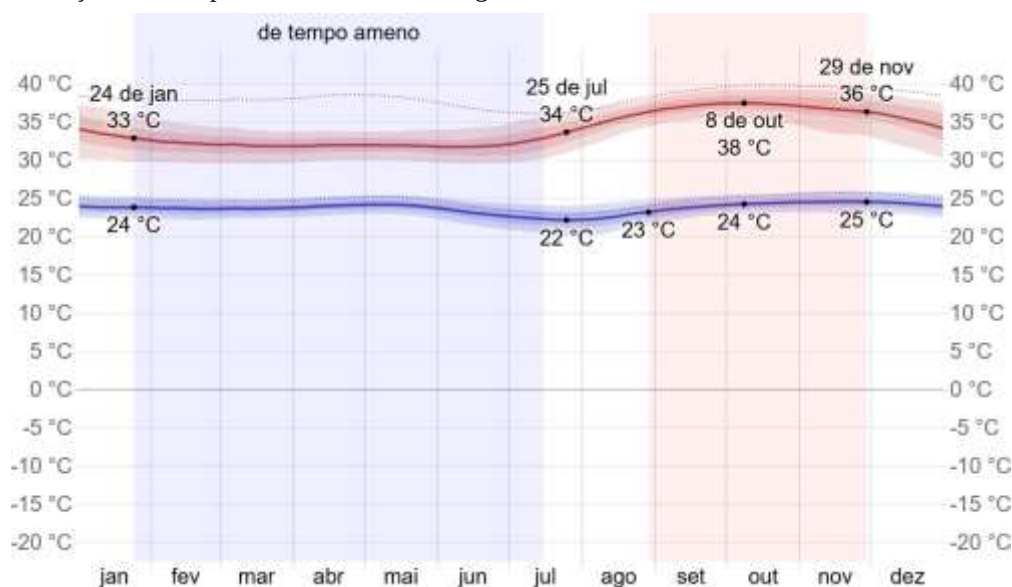
Clima e condições meteorológicas de Codó ao longo do ano

Gráfico 1 – Clima e Condições meteorológicas de Codó ao longo do ano.



Fonte: Adaptado de WeatherSpark (2025).

Gráfico 2 – Variações das temperaturas de Codó ao longo do ano



Fonte: Adaptado de WeatherSpark (2025).

Os **Gráficos 1 e 2** apresentam características climáticas do município de Codó - MA ao longo do ano. Ambos evidenciam a influência da sazonalidade no clima local, destacando períodos distintos de maior e menor precipitação. O **Gráfico 1** mostra uma visão mais ampla das condições meteorológicas, incluindo precipitação, cobertura de nuvens, sensação térmica e índice

de praia/piscina, permitindo identificar uma estação chuvosa concentrada no primeiro semestre e uma estação seca entre junho e outubro. Já o **Gráfico 2** apresenta especificamente a variação das temperaturas máximas e mínimas ao longo do ano, evidenciando que as temperaturas permanecem elevadas durante todos os meses, com pequenas oscilações.

Dessa forma, os gráficos são complementares e demonstram que o município de Codó-MA possui clima quente e semiúmido, caracterizado por temperaturas elevadas ao longo de todo o ano, com duas estações bem definidas: verão (período chuvoso de dezembro a maio) e inverno (período seco de junho a novembro). Entre os meses de agosto a outubro, é comum que o céu permaneça predominantemente aberto ou com poucas nuvens, especialmente durante o dia. Esse período corresponde ao auge da estação seca, quando há pouca formação de nuvens devido à baixa umidade do ar.

Paralelamente às condições climáticas desse período, intensificam-se as atividades de preparo das áreas agrícolas no município. Nesse contexto, é recorrente a queima da vegetação para a limpeza das roças, prática tradicional adotada pelos produtores rurais. Como consequência, ocorre a emissão de fumaça e de material particulado para a atmosfera, contribuindo para a degradação da qualidade do ar. A presença dessas partículas altera processos de dispersão e espalhamento da radiação solar, ocasionando modificações nas cores do céu, especialmente durante o crepúsculo, evidenciando que as variações cromáticas observadas podem ser utilizadas como indicadores das condições de qualidade do ar durante o período de queimadas no município de Codó - MA.

Panorama dos focos de queimadas na América do Sul e no Brasil

As queimadas representam uma das principais fontes de emissão de material particulado e gases poluentes para a atmosfera, afetando diretamente a qualidade do ar e intensificando fenômenos ópticos, como a alteração da coloração do céu durante o crepúsculo. Dessa forma, antes da análise dos registros fotográficos obtidos em Codó, torna-se importante contextualizar o cenário regional das queimadas durante o período de estudo.

Os dados atuais disponibilizados pelo Programa Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), referentes ao período de 1º de janeiro a 24 de fevereiro de 2026, permitem visualizar a distribuição dos focos de calor na América do Sul e entre os estados brasileiros, conforme apresentado na **Figura 2**.

Conforme ilustrado, o Brasil apresenta um número expressivo de focos de calor no contexto sul-americano, ocupando a segunda posição, com 6.325 focos detectados no breve período reportado, ficando atrás apenas da Venezuela (7.373 focos). Esses resultados evidenciam que as queimadas constituem um problema ambiental de grande magnitude em diversos países da América do Sul, especialmente naqueles que possuem extensas áreas de vegetação natural e

clima favorável à propagação do fogo durante os períodos de estiagem.

Figura 2 – Número de focos de calor detectados por país na América do Sul e por estado brasileiro no período de 1º de janeiro a 24 de fevereiro de 2026.

Focos por país		📅 🗓️ 📆 📊 📈 📉
PERÍODO ANUAL: 2026		
Venezuela	7373	
Brasil	6325	
Colômbia	3871	
Argentina	2025	
Paraguay	1225	
Chile	620	
Bolívia	518	
Peru	160	
Guyana	137	
Ecuador	55	
Uruguay	32	
Suriname	30	
French Guiana	4	

Focos por estado		📅 🗓️ 📆 📊 📈 📉
PERÍODO ANUAL: 2026		
PA	1249	
MA	1084	
RR	641	
CE	560	
BA	476	
MT	370	
PI	282	
PE	223	
MG	170	
MS	161	
TO	159	
SC	120	
RN	109	
PB	103	
PR	96	
RS	87	
AL	84	
SE	67	
GO	61	
SP	61	
AM	43	
AP	40	
ES	38	
RJ	21	
RO	16	
AC	4	

Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Programa Queimadas (2026).

No cenário nacional, observa-se que a distribuição dos focos de calor é bastante heterogênea. O estado do Pará apresenta o maior número de registros (1.249 focos), seguido pelo Maranhão, com 1.084 focos detectados, posicionando-se como o segundo estado brasileiro com maior incidência de queimadas no período analisado. Esses dados evidenciam a elevada vulnerabilidade do estado às queimadas e reforçam a importância de estudos voltados à avaliação de seus impactos ambientais.

Considerando que o município de Codó está localizado no estado do Maranhão, este panorama justifica a realização desta pesquisa, uma vez que a elevada ocorrência de queimadas

favorece o aumento da concentração de fumaça e material particulado na atmosfera. Essas partículas modificam os processos de espalhamento da luz solar, influenciando diretamente a coloração observada no céu durante o crepúsculo. Assim, a análise das variações das cores do céu constitui uma abordagem complementar para a avaliação qualitativa da qualidade do ar em períodos de intensa atividade de queimadas. A alta incidência observada no Maranhão, reforça a necessidade de prevenção que não se limite ao período de estiagem convencional, uma vez que a atividade já se mostra intensa logo nas primeiras semanas do ano.

Registros fotográficos do Céu de Codó

Os registros fotográficos tiveram início em 13 de setembro de 2024, às 17h30, marcando o primeiro dia das observações de campo realizadas durante o período de estudo. Nesse momento, a temperatura ambiente era de aproximadamente 37 °C, o céu encontrava-se parcialmente nublado e não havia ocorrência significativa de ventos. As condições atmosféricas observadas já evidenciavam a presença de fumaça próxima ao horizonte, característica típica do período de queimadas na região.

Conforme apresentado na **Figura 3**, é possível observar o Sol em baixa elevação, caracterizando o início do crepúsculo. Nota-se uma discreta gradação na coloração do céu, com predominância de tons amarelados e alaranjados próximos ao horizonte, indicando os primeiros efeitos da interação entre a radiação solar e o material particulado suspenso na atmosfera.

Figura 3 – Primeiro registro fotográfico realizado no município de Codó - Maranhão, em 13 de setembro de 2024, às 17h30, evidenciando o Sol em baixa elevação no horizonte e o início do crepúsculo.



Fonte: Acervo da pesquisa (2024)

Nos primeiros dias de monitoramento, o horizonte ainda apresentava tonalidades azuladas e acinzentadas, enquanto a fumaça se mostrava relativamente pouco dispersa na atmosfera. Embora as temperaturas permanecessem elevadas, a visibilidade do disco solar ainda era preservada, sugerindo uma profundidade óptica moderada (ou *optical depth*, em inglês). Ou seja,

qualitativamente, o aspecto das cores do céu indica o quanto a atmosfera atenua a luz ao longo de seu percurso devido aos processos de espalhamento e absorção por moléculas, aerossóis (fumaça, poeira) e nuvens. Esse comportamento sugere que, apesar da presença de aerossóis provenientes das queimadas, a concentração de partículas em suspensão ainda não era suficiente para provocar um espalhamento intenso da luz solar. Esses registros constituem, portanto, uma referência inicial para a comparação com as observações realizadas nos dias subsequentes, quando o aumento da concentração de fumaça passou a produzir alterações mais pronunciadas na coloração do céu durante o crepúsculo.

Com o objetivo de acompanhar a evolução da coloração do céu ao longo do crepúsculo, foi realizada uma sequência cronológica de registros fotográficos no dia 17 de setembro de 2024, entre 17h44 e 17h50. Durante as observações, a temperatura ambiente era de aproximadamente 33 °C, o céu encontrava-se parcialmente nublado e foi constatada a presença de fumaça próxima ao horizonte, característica típica do período de queimadas na região. A sequência de imagens apresentada na **Figura 4** registra três momentos consecutivos do pôr do sol: (a) Sol tocando a linha do horizonte; (b) Sol parcialmente oculto pelo horizonte; e (c) período imediatamente após o desaparecimento do disco solar.

Figura 4 – Sequência cronológica do pôr do sol registrada em 17 de setembro de 2024, no município de Codó - Maranhão. (a) Sol tocando a linha do horizonte, às 17h44; (b) Sol parcialmente oculto na linha do horizonte, às 17h47; (c) pós-pôr do sol imediato, às 17h50.



Fonte: Acervo da pesquisa (2024).

A sequência fotográfica evidencia a evolução da coloração do céu durante o crepúsculo em um intervalo de aproximadamente seis minutos. Na primeira imagem (**Figura 4a**), o disco solar ainda se encontra completamente visível, produzindo elevada intensidade luminosa e predominância de tons amarelo-alaranjados próximos ao horizonte. Na segunda imagem (**Figura 4b**), observa-se o Sol parcialmente oculto pela linha do horizonte, acompanhado pela redução da luminosidade direta e pelo aumento da predominância de tonalidades alaranjadas e avermelhadas. Na terceira imagem (**Figura 4c**), registrada imediatamente após o

desaparecimento do disco solar, a iluminação direta deixa de ser observada, permanecendo apenas a luz difundida pela atmosfera, o que resulta em um gradiente de cores mais suaves e avermelhadas.

O comportamento observado é compatível com a geometria do pôr do sol para a latitude do município de Codó no mês de setembro, período próximo ao equinócio. Entretanto, destaca-se a persistência de uma intensa faixa luminosa alaranjada e avermelhada acima da linha do horizonte, mesmo após o desaparecimento completo do disco solar. Esse aspecto é consistente com a presença de elevada concentração de partículas em suspensão na atmosfera, provenientes das queimadas, que intensificam o espalhamento da luz solar, principalmente por espalhamento de Mie.

Além disso, observa-se uma redução gradual do contraste entre o horizonte e o céu, bem como uma diminuição da nitidez do relevo distante, características frequentemente associadas ao aumento da concentração de aerossóis atmosféricos. Embora a presença de nuvens exerça influência sobre a distribuição da luminosidade, os registros sugerem que a fumaça desempenhou papel importante na intensificação das tonalidades avermelhadas observadas durante o crepúsculo. Esses resultados corroboram a hipótese de que as partículas emitidas pelas queimadas modificam as propriedades ópticas da atmosfera, alterando a forma como a radiação solar é espalhada. Assim, as variações observadas na coloração do céu durante o pôr do sol reforçam o potencial desse fenômeno como um indicador qualitativo da presença de fumaça e da deterioração da qualidade do ar em períodos de maior ocorrência das queimadas.

Em continuidade às observações realizadas, foi registrada uma nova sequência fotográfica em 19 de setembro de 2024, com o objetivo de acompanhar a evolução da coloração do céu durante o crepúsculo sob diferentes condições atmosféricas (**Figura 5**).

As imagens foram obtidas entre 17h39 e 17h49, período correspondente ao pôr do sol, quando a temperatura local era de aproximadamente 36 °C. Durante as observações, verificou-se a presença de fumaça próxima ao horizonte, característica compatível com o período de queimadas na região.

Ao comparar a sequência apresentada na **Figura 5** com os registros obtidos em 17 de setembro de 2024 (**Figura 4**), observa-se que ambas foram realizadas praticamente nos mesmos horários e no mesmo local de observação, reduzindo a influência da posição aparente do Sol e permitindo uma comparação qualitativa mais consistente das condições atmosféricas.

Na sequência do dia 19 de setembro, nota-se que, desde o primeiro registro (**Figura 5a**), o céu apresenta uma faixa alaranjada mais extensa e intensa nas proximidades do horizonte quando comparada à observada dois dias antes. Além disso, o disco solar apresenta menor contraste em relação ao céu ao seu redor, assumindo uma aparência mais difusa durante sua aproximação da

linha do horizonte. À medida que o Sol se oculta (**Figuras 5b, 5c e 5d**), a luminosidade direta diminui gradativamente, permanecendo, entretanto, uma faixa avermelhada bastante pronunciada mesmo após o desaparecimento completo do disco solar.

Figura 5 – Sequência cronológica do pôr do sol registrada no município de Codó - Maranhão, em 19 de setembro de 2024. (a) 17h39; (b) 17h44; (c) 17h47; (d) 17h49. Os registros foram obtidos sob temperatura aproximada de 36 °C, com presença de fumaça e céu parcialmente nublado.



Fonte: Acervo da pesquisa (2024).

Outro aspecto que merece destaque é a redução da nitidez do horizonte e do relevo ao fundo da paisagem, especialmente nas últimas imagens da sequência. Essa característica é compatível com a presença de uma maior quantidade de partículas em suspensão na atmosfera, que intensificam o espalhamento da luz solar e reduzem a transparência do ar. Embora as fotografias não permitam determinar quantitativamente a concentração de material particulado, o conjunto de evidências visuais sugere que a atmosfera apresentava uma carga de aerossóis superior à observada no dia 17 de setembro.

Sob o ponto de vista da óptica atmosférica, esse comportamento é coerente com o aumento do espalhamento da luz por partículas provenientes da fumaça das queimadas. À

medida que cresce a concentração de aerossóis na atmosfera, aumenta também o espalhamento dos diferentes comprimentos de onda da luz solar, favorecendo a predominância das tonalidades alaranjadas e avermelhadas durante o crepúsculo. Como consequência, o disco solar torna-se menos intenso visualmente, enquanto a faixa colorida próxima ao horizonte tende a permanecer por um intervalo maior de tempo.

É importante destacar que a coloração avermelhada do céu ao pôr do sol constitui um fenômeno natural, decorrente do maior caminho óptico percorrido pela luz solar na atmosfera. Entretanto, quando essa coloração se apresenta mais intensa, mais extensa e acompanhada por redução da visibilidade do horizonte, como observado nos registros de 19 de setembro, ela pode indicar um aumento da concentração de partículas suspensas no ar. Assim, a interpretação das cores do céu deve considerar não apenas a tonalidade observada, mas também sua intensidade, extensão espacial e persistência ao longo do crepúsculo, bem como as condições meteorológicas e a ocorrência de queimadas.

No dia 30 de setembro de 2024 foram realizados novos registros, correspondentes aos horários de 17h42, 17h45 e 17h47. As fotografias foram registradas sob temperatura aproximada de 33 °C, em um dia de baixa nebulosidade e com presença de fumaça no horizonte, condições que favoreceram a observação da evolução da coloração do céu durante a fase final do crepúsculo.

Figura 6 – Sequência cronológica do pôr do sol registrada no município de Codó - Maranhão, em 30 de setembro de 2024. (a) 17h42; (b) 17h45; (c) 17h47. Os registros foram obtidos sob temperatura aproximada de 33 °C, em um dia de pouca nebulosidade e com presença de fumaça no horizonte.



Fonte: Acervo da pesquisa (2024).

Conforme apresentado na **Figura 6**, observa-se que, à medida que o disco solar se aproxima da linha do horizonte, ocorre uma redução progressiva da luminosidade direta, acompanhada pela predominância de tonalidades alaranjadas e avermelhadas. Mesmo após o desaparecimento parcial do Sol, a faixa luminosa próxima ao horizonte permanece bem definida,

evidenciando a continuidade do espalhamento da luz solar pelas partículas presentes na atmosfera.

Em comparação com os registros realizados em 17 e 19 de setembro, verifica-se que o comportamento geral da coloração do céu se mantém, refletindo a influência do aumento do caminho óptico percorrido pela radiação solar durante o crepúsculo. Entretanto, no dia 30 de setembro, a menor cobertura de nuvens proporcionou uma transição de cores mais uniforme e permitiu melhor visualização da evolução da luminosidade ao longo do horizonte. Em contrapartida, a atmosfera apresenta aspecto menos difuso que o observado em 19 de setembro, quando a presença de fumaça aparentava ser mais intensa e provocava maior perda de contraste entre o céu e o horizonte.

Em continuidade ao monitoramento realizado ao longo do período de queimadas, foram efetuados novos registros fotográficos em 02 de outubro de 2024, às 17h41, 17h45 e 17h48, sob temperatura aproximada de 35 °C. Durante as observações, além da presença de fumaça próxima ao horizonte, foi possível identificar visualmente um foco de queimada ativo na direção da área observada, cuja pluma de fumaça elevava-se sobre a paisagem no momento dos registros.

Figura 7 – Sequência cronológica do pôr do sol registrada no município de Codó - Maranhão, em 02 de outubro de 2024. (a) 17h41; (b) 17h45; (c) 17h48. Os registros foram realizados sob temperatura aproximada de 35 °C, evidenciando a presença de fumaça atmosférica e de um foco de queimada ativo no horizonte.



Fonte: Acervo da pesquisa (2024).

A sequência apresentada na **Figura 7** mostra a evolução do crepúsculo durante aproximadamente sete minutos. Na primeira imagem (**Figura 7a**), o disco solar encontra-se imediatamente acima da linha do horizonte, apresentando intensa coloração alaranjada, porém com brilho visual inferior ao observado nos primeiros registros de setembro. Observa-se também uma extensa faixa de coloração avermelhada distribuída ao longo do horizonte, indicando que a luz solar já atravessava uma atmosfera significativamente carregada de partículas em suspensão.

Na segunda imagem (**Figura 7b**), o disco solar aproxima-se ainda mais da linha do horizonte e apresenta coloração vermelho-intensa, enquanto sua luminosidade diminui de forma perceptível. Paralelamente, a pluma de fumaça proveniente da queimada torna-se mais evidente na porção direita da imagem, elevando-se verticalmente antes de sofrer dispersão pela atmosfera. Embora essa pluma represente um foco localizado de emissão, sua presença reforça qualitativamente a existência de fontes ativas de material particulado durante o período de observação.

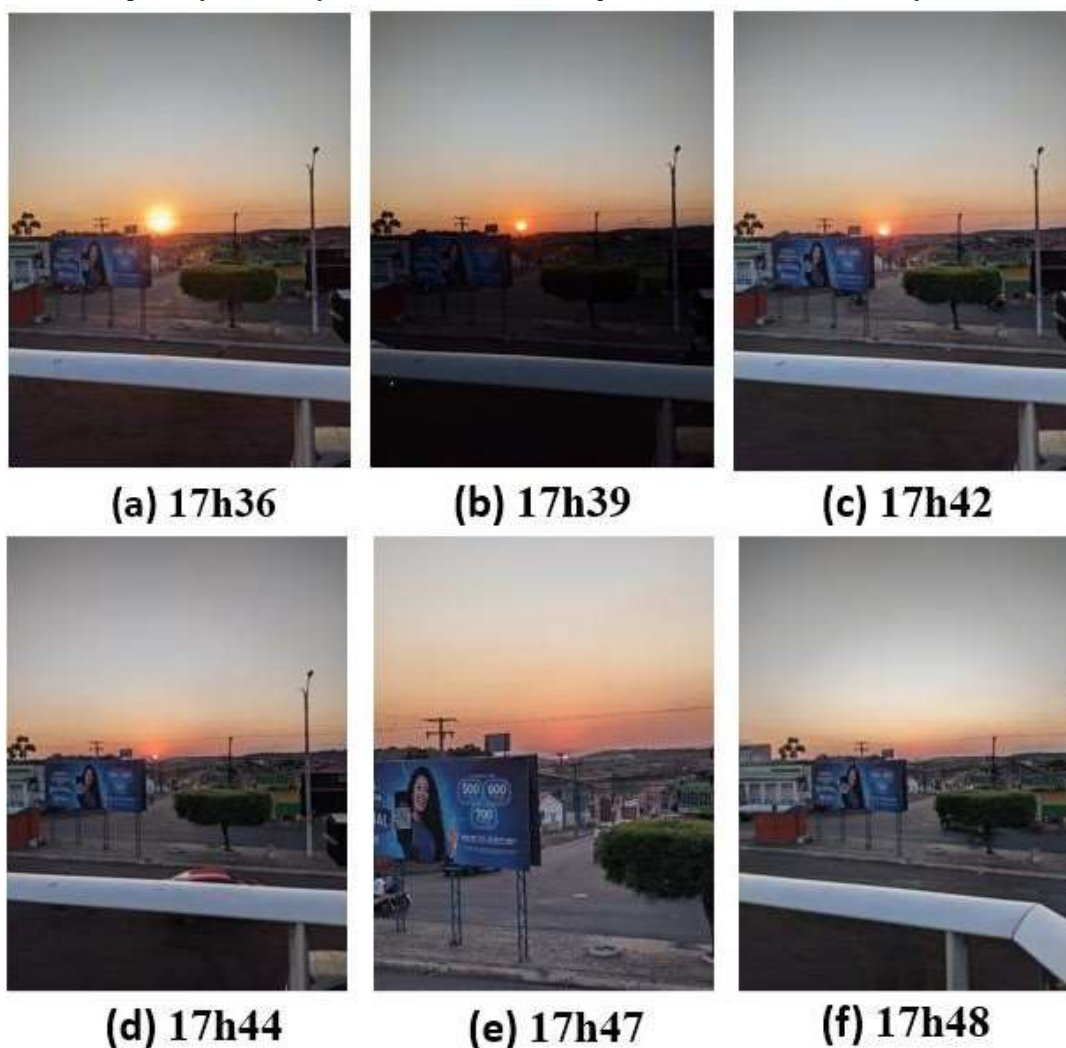
Na terceira imagem (**Figura 7c**), registrada logo após o desaparecimento do disco solar, permanece uma extensa faixa avermelhada e alaranjada sobre o horizonte, enquanto a fumaça continua visível na paisagem. A persistência dessa coloração, mesmo após o ocaso, indica que a radiação solar continuava sendo intensamente espalhada pelas partículas presentes na atmosfera, prolongando visualmente a luminosidade característica do crepúsculo.

Quando comparados aos registros obtidos em 30 de setembro, observa-se que ambos os dias apresentaram baixa nebulosidade, favorecendo a observação dos fenômenos ópticos. Entretanto, no dia 02 de outubro, a presença de um foco de queimada ativo e de uma pluma de fumaça claramente identificável confere maior evidência da influência direta das queimadas sobre a atmosfera local. Além disso, a faixa avermelhada próxima ao horizonte apresenta maior intensidade e extensão, sugerindo uma concentração mais elevada de aerossóis ao longo da trajetória percorrida pela radiação solar.

Em relação ao dia 19 de setembro, as duas sequências apresentam características semelhantes, como a redução da intensidade luminosa do disco solar e a predominância de tonalidades avermelhadas durante o crepúsculo. Contudo, no dia 02 de outubro, a visualização direta da fumaça proveniente de uma queimada fornece um elemento adicional que fortalece a interpretação qualitativa dos registros, estabelecendo uma associação visual entre a emissão de partículas e as alterações observadas na coloração do céu.

A sequência de 04 de outubro de 2024 representa, do ponto de vista qualitativo, um dos registros mais expressivos obtidos durante a campanha de observações. Diferentemente das sequências anteriores, as alterações na coloração do céu e na intensidade luminosa do disco solar tornam-se evidentes ainda quando o Sol se encontra relativamente acima da linha do horizonte. Foram realizados novos registros fotográficos entre 17h36 e 17h48, sob temperatura aproximada de 36 °C e céu com pouca nebulosidade. A sequência apresentada na **Figura 8** registra a evolução do crepúsculo em um intervalo de aproximadamente doze minutos, permitindo acompanhar as modificações na intensidade luminosa do disco solar e na coloração do céu ao longo do pôr do sol.

Figura 8 – Evolução da coloração do céu durante o pôr do sol registrada no município de Codó - Maranhão, em 04 de outubro de 2024. Sequência cronológica dos registros realizados às (a) 17h36, (b) 17h39, (c) 17h42, (d) 17h44, (e) 17h47 e (f) 17h48. Os registros foram obtidos sob temperatura aproximada de 36 °C, em um dia de pouca nebulosidade, com presença de fumaça atmosférica e focos de queimadas observados na direção sul do município.



Fonte: Acervo da pesquisa (2024).

Conforme observado na **Figura 8**, as alterações na aparência do disco solar iniciam-se antes do que foi verificado nas sequências anteriores. No primeiro registro (**Figura 8a**), embora o Sol ainda se encontre relativamente acima da linha do horizonte, sua luminosidade já se apresenta significativamente atenuada, com predominância de tonalidades alaranjadas e perda de brilho quando comparada aos registros obtidos nos dias 17, 19, 30 de setembro e 02 de outubro para horários semelhantes. Essa redução precoce da intensidade luminosa sugere que a radiação solar atravessava uma atmosfera mais carregada de partículas em suspensão.

À medida que o Sol se aproxima do horizonte (**Figuras 8b e 8c**), observa-se um aumento progressivo da intensidade dos tons alaranjados e avermelhados, acompanhado pela redução do contraste entre o disco solar e o céu circundante. No registro das 17h44 (**Figura 8d**), esse comportamento torna-se ainda mais evidente. O disco solar apresenta intensa coloração avermelhada e brilho significativamente reduzido, diferentemente do observado nos dias

anteriores, quando, para o mesmo horário, ainda predominavam tonalidades mais amareladas e uma luminosidade mais intensa. Essa diferença sugere que, nesse dia, o espalhamento e a atenuação da radiação solar ocorreram de forma mais pronunciada.

Nas duas últimas imagens (**Figuras 8e e 8f**), após o desaparecimento do disco solar, permanece uma extensa faixa avermelhada distribuída ao longo do horizonte. Embora esse comportamento seja característico do crepúsculo, a intensidade e a persistência das tonalidades observadas indicam um espalhamento mais intenso da luz solar pelas partículas presentes na atmosfera. Além disso, a observação de focos de queimadas na direção sul do município fornece uma evidência visual adicional da existência de fontes emissoras de fumaça durante o período das observações.

Quando comparada às sequências registradas nos dias anteriores, a de 04 de outubro apresenta o conjunto mais consistente de indícios de degradação da transparência atmosférica. Enquanto nos dias 17 e 30 de setembro o disco solar manteve elevada intensidade luminosa até instantes próximos ao horizonte e, em 19 de setembro, a maior influência da fumaça tornou-se evidente principalmente durante os momentos finais do crepúsculo, no dia 04 de outubro a redução da luminosidade ocorreu de forma antecipada, sendo perceptível ainda com o Sol em maior elevação. Esse comportamento é compatível com uma atmosfera contendo maior quantidade de aerossóis distribuídos ao longo da trajetória óptica da radiação solar.

Sob o ponto de vista da óptica atmosférica, esse resultado está de acordo com o aumento do espalhamento da luz por partículas de fumaça (espalhamento de Mie). A maior concentração de material particulado promove maior atenuação da radiação direta, reduzindo o brilho aparente do disco solar e favorecendo a predominância das componentes de maior comprimento de onda, responsáveis pelas tonalidades alaranjadas e vermelhas observadas durante o crepúsculo. Como consequência, as modificações no espectro de cores tornam-se perceptíveis mais cedo, antes mesmo do Sol atingir a linha do horizonte.

Em conjunto, os registros de 04 de outubro constituem uma das evidências qualitativas mais robustas obtidas durante esta pesquisa. A presença simultânea de focos de queimadas, a atenuação precoce da luminosidade solar, a intensificação das tonalidades avermelhadas e a persistência da faixa luminosa após o ocaso reforçam a hipótese de que as alterações na coloração do céu refletem mudanças nas propriedades ópticas da atmosfera provocadas pelo aumento da concentração de aerossóis. Dessa forma, os resultados fortalecem a utilização da observação sistemática do céu crepuscular como um indicador qualitativo da qualidade do ar, especialmente em períodos de intensa ocorrência de queimadas.

A sequência apresentada na **Figura 9** representa o cenário mais crítico observado durante toda a campanha de monitoramento, evidenciando alterações expressivas na propagação da luz

solar decorrentes da elevada concentração de fumaça na atmosfera. Foram realizados os últimos registros fotográficos em 07 de outubro de 2024, entre 17h35 e 17h46, sob temperatura aproximada de 35 °C e céu com pouca nebulosidade.

Figura 9 – Evolução da coloração do céu durante o pôr do sol registrada no município de Codó - Maranhão, em 07 de outubro de 2024. Sequência cronológica dos registros realizados às (a) 17h35, (b) 17h42, (c) 17h44 e (d) 17h46. Os registros foram obtidos sob temperatura aproximada de 35 °C, em um dia de pouca nebulosidade e intensa presença de fumaça atmosférica.



Fonte: Acervo da pesquisa (2024).

Conforme observado na **Figura 9**, as alterações ópticas da atmosfera tornaram-se perceptíveis ainda no início da sequência. Às 17h35 (**Figura 9a**), o disco solar apresentava luminosidade significativamente reduzida, apesar de ainda permanecer relativamente acima da linha do horizonte, e, diferente dos dias anteriores, a densidade da camada de fumaça sobre Codó foi tamanha que o disco solar foi precocemente ocultado antes mesmo de atingir a linha do horizonte, previsto para após as 17h45. Comparativamente aos registros obtidos nos dias 17 e 30 de setembro, bem como em 02 e 04 de outubro, verifica-se que, para uma posição solar semelhante, o brilho do Sol encontrava-se substancialmente mais atenuado, evidenciando uma atmosfera com menor transparência.

Com o objetivo de sintetizar os resultados obtidos ao longo do período de monitoramento, a **Figura 10** apresenta uma comparação entre registros fotográficos realizados em horários semelhantes, aproximadamente entre 17h44 e 17h45, nos dias 19 e 30 de setembro e 02, 04 e 07 de outubro de 2024. A escolha de imagens obtidas praticamente no mesmo instante do pôr do sol minimiza a influência da posição aparente do Sol sobre a coloração do céu, permitindo uma comparação mais consistente das condições atmosféricas observadas ao longo do período de estudo.

Observa-se que, embora o disco solar ocupe aproximadamente a mesma posição no

horizonte em todas as imagens, ocorre uma evolução gradual na aparência da atmosfera ao longo dos dias analisados. Nos registros de 19 e 30 de setembro, o Sol ainda apresenta brilho relativamente intenso e permanece claramente definido, enquanto o horizonte conserva maior contraste e o céu exibe predominância de tonalidades alaranjadas características do crepúsculo. Apesar da presença de fumaça, a atmosfera ainda preserva uma transparência relativamente elevada, permitindo maior transmissão da radiação solar direta.

Figura 10 – Comparação da evolução da coloração do céu durante o pôr do sol no município de Codó - Maranhão, em registros obtidos aproximadamente às 17h44–17h45 nos dias 19 e 30 de setembro e 02, 04 e 07 de outubro de 2024.



Fonte: Acervo da pesquisa (2024).

Nos registros realizados em 02 e, principalmente, em 04 de outubro, tornam-se evidentes alterações progressivas na intensidade luminosa do disco solar. Para um mesmo horário de observação, verifica-se redução do brilho aparente do Sol, intensificação das tonalidades avermelhadas e diminuição da nitidez da paisagem próxima ao horizonte. Esses aspectos indicam um aumento da extinção da radiação solar ao longo do caminho óptico, compatível com o incremento da concentração de aerossóis provenientes das queimadas.

A situação mais crítica é observada no registro de 07 de outubro, quando o disco solar praticamente desaparece antes mesmo do ocaso astronômico. A atmosfera apresenta aspecto visivelmente mais opaco, com predominância de tonalidades avermelhadas e acinzentadas distribuídas ao longo do horizonte. Esse comportamento evidencia uma redução significativa da transparência atmosférica, indicando que a elevada concentração de fumaça passou a limitar a transmissão da luz solar direta, restando predominantemente a radiação difundida pelas partículas em suspensão.

Sob a perspectiva da óptica atmosférica, a sequência apresentada na Figura 11 demonstra uma evolução consistente dos efeitos produzidos pelo aumento da carga de aerossóis na atmosfera. À medida que cresce a concentração de partículas provenientes das queimadas, aumenta também

o espalhamento e a absorção da radiação solar, reduzindo a intensidade da luz direta que atinge o observador. Como consequência, observa-se uma sequência de modificações ópticas que podem ser entendidas como indicadores ambientais, como: atenuação precoce da luminosidade do disco solar, redução da nitidez do horizonte, predominância crescente de tonalidades avermelhadas, aumento da opacidade atmosférica e desaparecimento antecipado do disco solar antes do horário previsto para o pôr do sol.

Esses resultados demonstram que a evolução das cores do céu durante o crepúsculo acompanhou a intensificação do período de queimadas no município de Codó. A repetição sistemática desses padrões ao longo da campanha de monitoramento evidencia que a coloração do céu não representa apenas uma característica estética da paisagem, mas responde de maneira sensível às alterações na composição da atmosfera. Dessa forma, os registros fotográficos obtidos constituem uma evidência qualitativa de que a degradação da qualidade do ar pode ser inferida por meio da observação da paisagem celeste.

Nesse contexto, os registros obtidos durante esta pesquisa reforçam a hipótese de que as variações na coloração do céu podem ser utilizadas como um indicador qualitativo da qualidade do ar. Embora não substituam as medições realizadas por instrumentos específicos de monitoramento atmosférico, as observações visuais mostraram-se sensíveis às alterações provocadas pela presença de fumaça proveniente das queimadas, evidenciando uma relação consistente entre o aumento da carga de aerossóis na atmosfera e a intensificação das tonalidades avermelhadas observadas durante o crepúsculo. Esses resultados demonstram que a observação sistemática das cores do céu pode constituir uma ferramenta complementar de baixo custo para a percepção de episódios de degradação da qualidade do ar, além de representar um importante recurso para ações de educação ambiental e conscientização da população sobre os impactos das queimadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As queimadas representam um dos principais desafios ambientais da atualidade, contribuindo significativamente para a degradação da qualidade do ar, intensificação das mudanças climáticas e aumento dos riscos à saúde pública. A combustão da biomassa libera grandes quantidades de gases e material particulado na atmosfera, alterando suas propriedades físicas e químicas e comprometendo a qualidade ambiental. Nesse contexto, o monitoramento da qualidade do ar torna-se uma ferramenta indispensável para a compreensão dos impactos ambientais e para o desenvolvimento de estratégias de mitigação.

O presente trabalho teve como objetivo analisar as cores do céu durante o crepúsculo como indicador qualitativo da qualidade do ar no município de Codó - Maranhão, durante o

período de maior ocorrência de queimadas. Os resultados obtidos demonstraram que as alterações observadas na coloração do céu apresentaram comportamento consistente com o aumento da carga de aerossóis na atmosfera, evidenciando uma relação direta entre a intensificação das queimadas e as mudanças nas propriedades ópticas da atmosfera.

Ao longo do período de monitoramento, compreendido entre 13 de setembro e 07 de outubro de 2024, foi possível observar uma evolução gradual das assinaturas cromáticas registradas durante o pôr do sol. Nos primeiros dias de observação predominavam tons amarelo-alaranjados, com disco solar de elevada intensidade luminosa e horizonte relativamente nítido. À medida que o período de queimadas se intensificava, verificou-se uma progressiva redução da transparência atmosférica, caracterizada pela intensificação das tonalidades alaranjadas e avermelhadas, diminuição do brilho aparente do disco solar, perda de contraste do horizonte e aumento da persistência da faixa luminosa após o ocaso.

Os registros obtidos nos primeiros dias de outubro constituíram as evidências mais expressivas dessa evolução. Em especial, no dia 07 de outubro de 2024, observou-se o cenário de maior degradação atmosférica registrado durante toda a campanha de monitoramento. A elevada densidade da camada de fumaça foi suficiente para provocar a atenuação precoce da luminosidade solar e ocultar visualmente o disco solar antes mesmo do horário previsto para o pôr do sol. Esse comportamento representa uma evidência qualitativa do aumento da espessura óptica da atmosfera, decorrente da elevada concentração de partículas provenientes das queimadas, intensificando os processos de espalhamento e absorção da radiação solar.

As alterações observadas encontram respaldo nos princípios da óptica atmosférica discutidos ao longo deste trabalho. O aumento da concentração de partículas em suspensão favorece o espalhamento da radiação de menores comprimentos de onda e reduz a transmissão da luz direta, permitindo que as componentes de maior comprimento de onda, correspondentes às tonalidades alaranjadas e avermelhadas, predominem durante o crepúsculo. Dessa forma, as modificações na coloração do céu refletem alterações nas propriedades ópticas da atmosfera induzidas pela presença de aerossóis provenientes das queimadas.

Nesse contexto, os registros obtidos durante esta pesquisa reforçam a hipótese de que as variações na coloração do céu podem ser utilizadas como um indicador qualitativo da qualidade do ar. Embora não substituam as medições realizadas por instrumentos específicos de monitoramento atmosférico, as observações visuais mostraram-se sensíveis às alterações provocadas pela presença de fumaça, evidenciando uma relação consistente entre o aumento da carga de aerossóis na atmosfera e a intensificação das tonalidades avermelhadas observadas durante o crepúsculo. A repetição desse comportamento ao longo de diferentes dias de monitoramento fortalece essa interpretação e demonstra que a análise sistemática da paisagem

celeste pode funcionar como uma ferramenta complementar para o acompanhamento de episódios de degradação da qualidade do ar.

Além da contribuição científica, este trabalho apresenta relevância prática para municípios como Codó, onde inexitem redes permanentes de monitoramento atmosférico. A utilização de registros fotográficos padronizados do crepúsculo constitui uma metodologia de baixo custo, de fácil aplicação e com elevado potencial para atividades de educação ambiental, divulgação científica e conscientização da população sobre os impactos das queimadas. O monitoramento visual do céu pode ainda auxiliar órgãos públicos e instituições de ensino na identificação de períodos críticos de degradação ambiental, servindo como ferramenta complementar às informações provenientes de satélites e modelos atmosféricos.

Por fim, este estudo amplia o conhecimento sobre a relação entre fenômenos ópticos atmosféricos e a qualidade do ar em uma região ainda pouco investigada sob essa perspectiva. Embora a análise realizada seja predominantemente qualitativa, os resultados obtidos demonstram elevada coerência com os fundamentos físicos da dispersão da luz e com os indicadores de queimadas disponíveis para o período analisado. Como perspectivas futuras, recomenda-se a integração do monitoramento fotográfico do crepúsculo com medições instrumentais de material particulado ($PM_{2.5}$ e PM_{10}), profundidade óptica de aerossóis e irradiância solar, permitindo o desenvolvimento de modelos quantitativos capazes de correlacionar as assinaturas cromáticas do céu com parâmetros objetivos da qualidade do ar.

Conclui-se, portanto, que a observação sistemática da paisagem celeste durante o crepúsculo constitui uma metodologia complementar, acessível e cientificamente fundamentada para o monitoramento qualitativo da qualidade do ar em regiões afetadas por queimadas. Os resultados obtidos ao longo desta pesquisa demonstram que a evolução das cores do céu reflete, de forma consistente, as alterações nas propriedades ópticas da atmosfera provocadas pelo aumento da concentração de aerossóis, reforçando o potencial dessa abordagem como instrumento de monitoramento ambiental, educação científica e sensibilização da sociedade quanto aos impactos das queimadas sobre o meio ambiente e a saúde humana.

REFERÊNCIAS

BOHREN, C.; FRASER, A. B. Colors of the sky. *The Physics Teacher*, v. 23, n. 5, p. 267–272, 1985. Disponível em: <https://doi.org/10.1119/1.2341936>. Acesso em: 16 dez. 2024.

GOIÁS, Márgara. Impactos ambientais da Revolução Industrial e suas consequências no clima global. *TrendClima*, [s.d.]. Disponível em: <https://trendclima.com.br/>. Acesso em: 6 jan. 2026.

HOSTI, B. P. Os espalhamentos de Rayleigh e de Mie. *Espaço-Tempo*, 2025. Disponível em: <https://www.espacotempo.com.br/os-espalhamentos-de-rayleigh-e-de-mie>. Acesso em: 23 jul. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades e Estados: Codó (MA)**. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ma/codo.html>. Acesso em: 23 jul. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Programa Queimadas: situação atual dos focos de calor**. São José dos Campos: INPE, 2026. Disponível em: <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/portal/>. Acesso em: 8 abr. 2026.

IQAIR. **Qualidade do ar no mundo: índice de qualidade do ar (AQI) e poluição do ar por PM2.5 no mundo**. IQAir, [s.d.]. Disponível em: <https://www.iqair.com/world-air-quality>. Acesso em: 7 mar. 2026.

JESÚS CORREIA, J. As cores do céu: the colors of the sky. *Caderno de Física da UEFS*, Feira de Santana, v. 20, n. 2, p. 2403.1–2403.8, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.13102/cadfsuefs.v20i02.9302>. Acesso em: 16 dez. 2024.

LIMA, L. S. Efeito Tyndall. *Revista Ciência Elementar*, v. 2, n. 3, art. 233, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.24927/rce2014.233>. Acesso em: 16 dez. 2024.

MOYA, Isabela. Por que o céu está mais alaranjado? Seca e poluição ajudam a explicar. *CNN Brasil*, 2024. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/>. Acesso em: 12 fev. 2025.

RIBEIRO, Renato Janine; BUSTAMANTE, Mercedes. Impactos ambientais e na saúde causados pelas queimadas no Brasil. *Academia Brasileira de Ciências*, 2024. Disponível em: <https://www.abc.org.br/2024/10/01/impactos-ambientais-e-na-saude-causados-pelas-queimadas-no-brasil/>. Acesso em: 15 out. 2024.

ROBERTI, Débora Regina *et al.* **Física da atmosfera**. 1. ed. Santa Maria: UFSM, NTE, UAB, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/18395>. Acesso em: 16 dez. 2024.

SOUZA, Beto. **Seca veio para ficar no Brasil? Especialistas explicam**. *CNN Brasil*, São Paulo, 12 set. 2024. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/seca-veio-para-ficar-no-brasil-especialistas-explicam/>. Acesso em: 14 out. 2024.

WEATHERSPARK. Clima e condições meteorológicas médias em Codó no ano todo, Maranhão, Brasil. *WeatherSpark*, [s.d.]. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/30641/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Cod%C3%B3-Maranh%C3%A3o-Brasil-durante-o-ano>. Acesso em: 9 out. 2024.