

Chuvas erosivas na Amazônia: a utilização de dados CHIRPS para determinação da erosividade das chuvas no município de Codajás, Amazonas

Erosive Rainfall in the Amazon: Using CHIRPS Data to Determine Rainfall Erosivity in the Municipality of Codajás, Amazonas

Lluvias Erosivas en la Amazonía: Uso de Datos CHIRPS para Determinar la Erosividad de las Lluvias en el Municipio de Codajás, Amazonas

João Cândido André da Silva Neto

Universidade Federal do Amazonas

joacandido@ufam.edu.br

Nathália da Costa e Costa

Universidade Federal do Amazonas

costaecostanathalia@gmail.com

Resumo

O presente artigo analisa a erosividade das chuvas no município de Codajás, estado do Amazonas, com base em dados pluviométricos do produto CHIRPS 2.0, no período de 1993 a 2023. A pesquisa tem como objetivo quantificar o potencial erosivo das chuvas, visando integrar modelos preditivos para perda de solos, e consequentemente auxiliar no subsídio para diretrizes para medidas conservacionistas para conservação dos solos. A metodologia incluiu o uso da equação para cálculo da erosividade mensal e anual, seguida de interpolação espacial dos dados por meio da krigagem ordinária. A validação dos dados indicou alta correlação entre as estimativas CHIRPS e as medições da estação meteorológica do INMET ($R^2 = 0,9593$). Os resultados apontam que os meses de março e abril apresentaram os maiores índices de erosividade, com valores superiores a $1600 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$, enquanto os meses de julho a outubro concentraram os menores índices ($<800 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$). A análise espacial revelou que 36% da área do município apresenta erosividade anual superior a $12.500 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, classificando-se como de vulnerabilidade muito alta à erosão hídrica. A identificação de padrões sazonais e espaciais da erosividade pode contribuir para a formulação de políticas públicas e ações conservacionistas direcionadas aos períodos e áreas de maior suscetibilidade ao desencadeamento de processos geodinâmicos nessas áreas. Os resultados ressaltam a importância do monitoramento climático integrado à gestão territorial em regiões na Amazônia brasileira, como o Médio Solimões, onde está localizado o município de Codajás.

Palavras-chave: Chuvas. CHIRPS. Amazônia. Codajás.

Abstract

This article analyzes the rainfall erosivity in the municipality of Codajás, in the state of Amazonas, based on pluviometric data from the CHIRPS 2.0 product, for the period from 1993 to 2023. The research aims to quantify the erosive potential of rainfall in order to integrate predictive models for soil loss and consequently support guidelines for soil conservation practices. The methodology included the use of an equation to calculate monthly and annual erosivity, followed by spatial interpolation of the data through ordinary kriging. Data validation indicated a high correlation between CHIRPS estimates and measurements from the INMET meteorological station ($R^2 = 0.9593$). The results show that March and April recorded the highest erosivity indices, with values exceeding $1600 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ month}^{-1}$, while the period from July to October had the lowest

indices ($<800 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ month}^{-1}$). The spatial analysis revealed that 36% of the municipal area presents annual erosivity above $12,500 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ year}^{-1}$, classifying it as having very high vulnerability to water erosion. Identifying seasonal and spatial patterns of erosivity may contribute to the development of public policies and conservation strategies targeted at the most susceptible periods and areas to geodynamic processes. The results highlight the importance of integrated climate monitoring and territorial management in regions of the Brazilian Amazon, such as the Médio Solimões, where the municipality of Codajás is located.

Keywords: Rain. CHIRPS. Amazon. Codajás.

Resumen

El presente artículo analiza la erosividad de las lluvias en el municipio de Codajás, estado de Amazonas, con base en datos pluviométricos del producto CHIRPS 2.0, en el período de 1993 a 2023. La investigación tiene como objetivo cuantificar el potencial erosivo de las lluvias, con el fin de integrar modelos predictivos de pérdida de suelo y, en consecuencia, apoyar directrices para la implementación de medidas conservacionistas. La metodología incluyó el uso de una ecuación para calcular la erosividad mensual y anual, seguida de la interpolación espacial de los datos mediante kriging ordinario. La validación de los datos indicó una alta correlación entre las estimaciones CHIRPS y las mediciones de la estación meteorológica del INMET ($R^2 = 0,9593$). Los resultados señalan que los meses de marzo y abril presentaron los mayores índices de erosividad, con valores superiores a $1600 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mes}^{-1}$, mientras que los meses de julio a octubre concentraron los índices más bajos ($<800 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mes}^{-1}$). El análisis espacial reveló que el 36% del área del municipio presenta erosividad anual superior a $12,500 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$, clasificándola como de muy alta vulnerabilidad a la erosión hídrica. La identificación de patrones estacionales y espaciales de la erosividad puede contribuir a la formulación de políticas públicas y acciones conservacionistas enfocadas en los períodos y áreas de mayor susceptibilidad a procesos geodinámicos. Los resultados refuerzan la importancia del monitoreo climático integrado a la gestión territorial en regiones de la Amazonía brasileña, como el Medio Solimões, donde se localiza el municipio de Codajás.

Palabras clave: Erosividad. CHIRPS. Amazonía. Codajás.

Introdução

No bioma Amazônia, a cobertura florestal correspondia a 90,25 % da área total em 1985, o que representava cerca de 380 milhões de hectares. Em 2023, esse valor foi reduzido para 77,58 %, correspondente a aproximadamente 327 milhões de hectares. Essa mudança representa uma perda acumulada de cerca de 53 milhões de hectares de vegetação florestal ao longo de 38 anos, evidenciando um processo contínuo de supressão da cobertura vegetal nativa (MAPBIOMAS, 2025).

A expansão da fronteira agropecuária configurou-se como o principal fator de desmatamento na Amazônia, manifestando-se especialmente pela conversão de florestas em pastagens e lavouras mecanizadas, além de práticas madeireiras e implantação de infraestrutura de acesso e ocupação (frotas de uso, estradas, hidrelétricas). (BERENGUER, 2021; MEYFROIDT, 2018; RICHARDS, 2014, GETIRANA, 2024).

Além disso, a contínua retirada da cobertura florestal ameaça aproximar o bioma de um ponto de inflexão ecológico, onde as funções ecológicas possam colapsar, resultando em perda irreversível de biodiversidade e resiliência climática (BERENGUER, 2021).

Estudos demonstram que o uso e ocupação inadequados do solo, associados à intensificação das chuvas devido às mudanças climáticas, têm agravado os processos erosivos em diferentes biomas brasileiros (CREPANI et al., 2012; MERTEN; MINELLA, 2013).

O processo de erosão do solo ocorre mesmo em ecossistemas naturais, mas seu aumento excessivo pode ser associado ao desmatamento das áreas de floresta, à implantação de sistemas agrícolas, que deixam os solos em situação mais vulnerável ao desencadeamento dos processos erosivos.

A erosão origina-se no rompimento do equilíbrio natural no solo, em decorrência da ação de forças advindas de fatores climáticos como chuva e vento, que associado a outros fatores determinam a intensidade do processo erosivo (PRUSKI, 2006).

Lepsch (2002) destaca que os fatores climáticos mais relevantes para a erosão hídrica no Brasil são a distribuição, a quantidade e, principalmente, a intensidade das chuvas. De acordo com o autor, precipitações intensas, concentradas em curtos períodos, promovem maior remoção das camadas superficiais do solo, intensificando os processos erosivos.

Segundo Pruski (2006, p. 42), “os totais anuais precipitados têm pouca relevância no processo de ocorrência da erosão hídrica, sendo muito importante neste a consideração da distribuição do tamanho, a velocidade de queda, o número, momento e a energia cinética das gotas, bem como a intensidade, duração e frequência da chuva”. Essa abordagem reforça que a análise isolada dos totais pluviométricos anuais não é suficiente para compreender os processos de erosão, sendo necessário considerar a distribuição temporal das chuvas e a ocorrência de eventos extremos.

Bertoni e Lombardi Neto (1999) corroboram essa análise ao afirmarem que a intensidade pluviométrica constitui o principal fator climático na indução à erosão hídrica, visto que precipitações mais intensas resultam em maior mobilização e perda de solo.

A chuva, portanto, atua como agente propulsor da energia envolvida na erosão hídrica, tanto pelo impacto direto das gotas sobre a superfície do solo quanto pela força do escoamento superficial, que contribui para o transporte e a remoção das partículas superficiais (PRUSKI, 2006; SILVA; CURI; OLIVEIRA, 2010).

Nesse sentido, o presente trabalho justifica-se por compreender a erosividade das chuvas como um índice que quantifica o potencial de erosão da chuva em um determinado local. Esse índice representa o valor médio anual da capacidade da chuva em erodir o solo de um terreno sem cobertura vegetação.

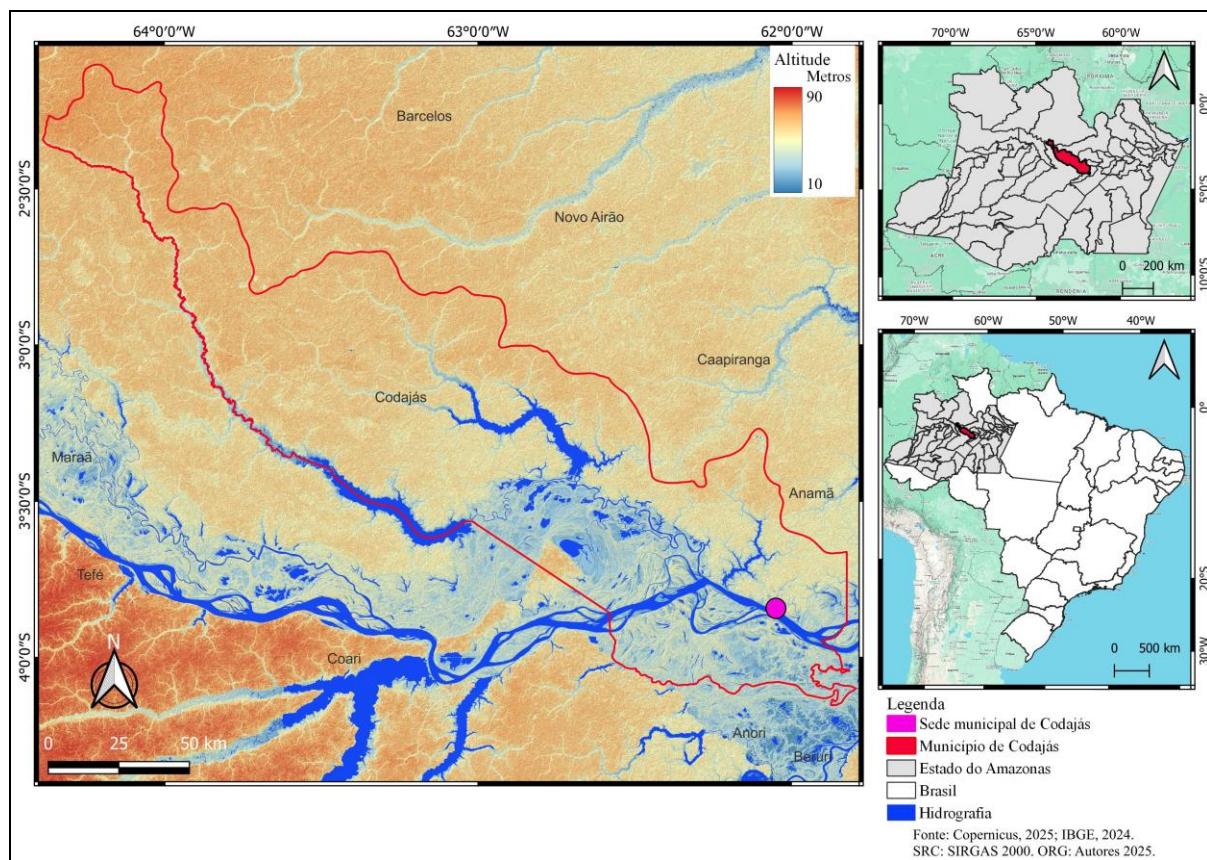
Assim, a análise da erosividade das chuvas, pode contribuir na compreensão das vulnerabilidades das paisagens da região Amazônica, que pode auxiliar em diretrizes para o uso sustentável da terra.

O objetivo do presente trabalho foi analisar a erosividade das chuvas no município de Codajás, Amazonas, a partir uma série histórica de dados de 1993 a 2023, os quais foram obtidos das estimativas de dados mensais e anuais do produto *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations* (CHIRPS 2.0), que constituem-se como conjuntos de dados de precipitação obtidos a partir de observações locais e remotas.

Metodologia

Área de estudo

O município de Codajás apresenta de acordo com o censo de 2022 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) uma população de 23.549 (vinte e três mil quinhentos e quarenta e nove) pessoas, em uma unidade territorial de 18.700,713 km², localizado à margem esquerda do rio Solimões (AM), a oeste de Manaus, capital do estado do Amazonas, com cerca de 240 quilometro de distância (Figura 1).



Conforme o IBGE (2024), a vegetação de Codajás-AM, apresenta dominância de Florestas Ombrófilas Densas, distribuídas em terrenos Aluviais, denominado regionalmente como várzeas, e em Terra Baixa, denominadas terra firme. Essa fisionomia se associa às áreas de campinarana e várzeas, sobretudo em regiões sujeitas a inundações sazonais, evidenciando dinâmicas ecológicas complexas incluindo transição entre formações florestais e campestres.

De acordo com Costa et al., (2022) referentes às características físico-naturais, a área de estudo é constituída sob três unidades geológicas, depósitos aluvionares holocênicos, Terraços holocênicos e Formação Içá.

A formação Içá predomina a área de estudo com 67,92% do município com uma extensão de 12.707 km². Trata-se da formação ou unidade de rocha ígnea ou metamórfica com maior distribuição nos domínios da Província Estrutural Amazônia-Solimões em território brasileiro, representando a principal unidade da constituição da Subprovíncia Estrutural Içá, ou Bacia Cenozoica Içá. (IBGE, 2024).

No que se refere a unidade geológica dos depósitos aluvionares do período holoceno, compreende-se como uma formação marcada por arenito, areia quartzosa, castanhadeira, silte, argila e, localmente turfa (IBGE, 2024). Encontrada principalmente na margem direita do rio Solimões do município de Codajás.

Quanto à unidade geológica dos Terraços holocênicos, por sua vez é descrita como depósitos de planície fluvial do qual seu fundo de canal é constituído de cascalhos lenticulares, areias quartzosas inconsolidadas de barra em pontal, ou seja, em áreas onde o rio forma curvas, além de compostos de argila e silte de transbordamento (IBGE, 2024).

Assim, presentes na margem esquerda do rio Solimões do município de Codajás. No que se refere à geomorfologia da área de estudo é caracterizada pela depressão do Solimões com 68,02% da área do município se estendendo por aproximadamente 1.2726 km² (IBGE, 2024). A depressão do Solimões ou Depressão Amazônica se trata do mais extenso domínio geomorfológico do estado do Amazonas, ocupando mais da metade de sua superfície, é caracterizado por extensos tabuleiros de baixa amplitude do relevo, por isso, denominado como Tabuleiros da Amazônia Centro-Oeste. (DANTAS e MAIA, 2010).

A planície Amazônica por sua vez, é identificada por planícies de inundações e terraços fluviais muito amplos, cujo mesmo pode medir dezenas de quilômetros de largura, encontradas ao longo do troco da bacia hidrográfica do rio Negro-Solimões (DANTAS e MAIA, 2010). Em Codajás apresenta-se com 24,01% da área do município com 4.491 km² de extensão (IBGE, 2024).

Os solos encontrados no município de Codajás, constitui-se principalmente dos Argissolos, sendo o Argissolos Amarelo com 6,34% da área do município com uma extensão territorial

1.185km² aproximadamente, Argissolos Vermelho-Amarelo com 33,54% da área de estudo e aproximadamente 6.275 km² de extensão, tendo como principal característica a forte presença de argila no horizonte A, podendo ser pouco ou muito profundo.

Os Gleissolos Háplico com 13,42% do município, presente em 2.511 km² da área de estudo, Neossolos Flúvicos com 8,69% de sua área e com 1.626 km² do município. Além do solo Plintossolo Argiluvico com 21,08% da área e com extensão de aproximadamente 3.943km², esses três últimos solos são encontrados principalmente nas planícies de inundações e/ou margeando os rios (IBGE, 2024).

Cálculo do Índice de erosividade das chuvas

A erosividade das chuvas foi elaborada a partir dos dados CHIRPS 2.0 (2024), em que se calculou para Manaus as médias mensais anuais de precipitação, e posteriormente implementada a equação (1) proposta por Barbosa et al. (2015) *apud* Lima et al. (2023) (Figura 2):

$$EI = 25,31 * \left(\frac{r^2}{P} \right) + 496,56 \quad (1)$$

Onde:

EI = média mensal do índice de Erosividade (MJ/ha.mm);

r = média mensal de precipitação (mm);

P = média anual de precipitação, (mm).

Para calcular a erosividade anual (R), somaram-se os índices mensais ao longo da série histórica 1993 a 2023 (equação 2).

$$R = \sum EI \quad (2)$$

Onde:

R = erosividade da chuva (MJ/ha.mm/ano);

EI = média mensal do índice de Erosividade.

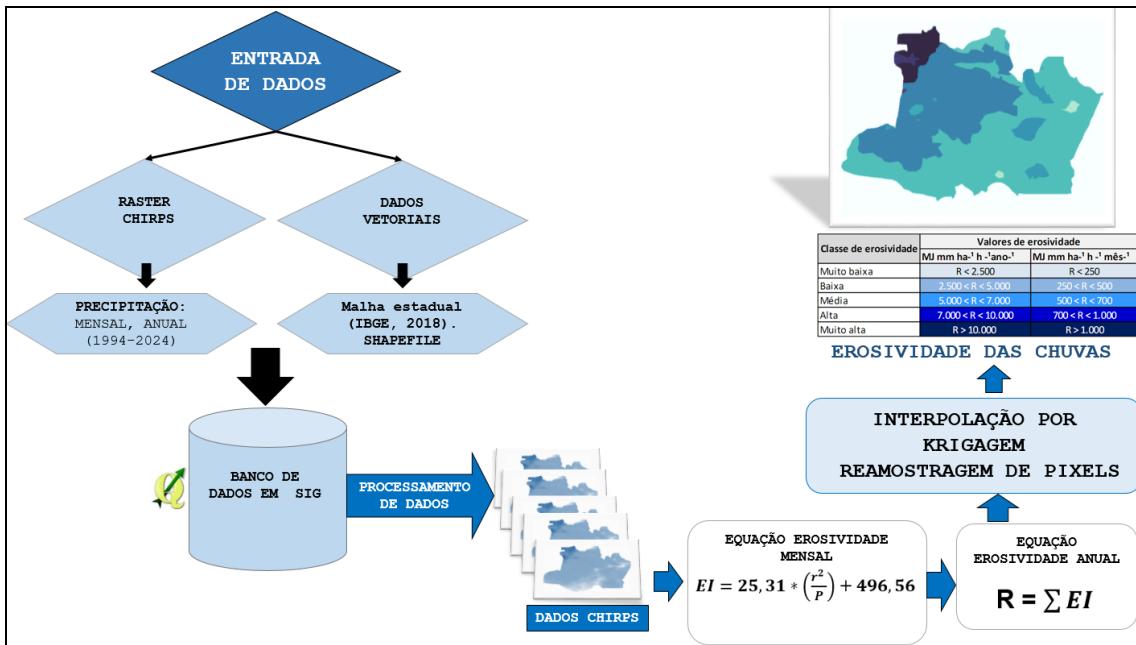


Figura 2- Fluxograma para elaboração da erosividade das chuvas. Fonte: Autores (2025).

A etapa seguinte consistiu na reamostragem dos dados por meio da interpolação por krigagem, que consistiu no redimensionamento dos pixels de 5x5 quilômetros para 1x1 quilômetros.

De acordo com Landim (2000), a krigagem constitui-se como um método geoestatístico robusto que considera a estrutura de autocorrelação espacial inerente às variáveis regionalizadas. Tal abordagem pressupõe a existência de continuidade espacial, permitindo que valores amostrados em pontos específicos da área de estudo sejam utilizados para estimar, com base em modelos estatísticos, os valores da variável de interesse em locais não amostrados. Essa propriedade torna a krigagem uma técnica eficiente para a interpolação espacial em contextos nos quais a distribuição dos dados apresenta dependência espacial.

A principal distinção da krigagem em relação aos demais métodos de interpolação reside na utilização de uma matriz de covariância espacial, a qual permite determinar, de forma estatisticamente fundamentada, os pesos atribuídos às amostras. Além disso, esse método considera explicitamente a redundância dos dados, define criteriosamente a vizinhança a ser utilizada no processo inferencial e fornece uma estimativa do erro associado aos valores interpolados (CAMARGO *et al.* 2001). No presente trabalho foi utilizado a Krigagem Ordinária com modelo de ajuste de semivariograma exponencial.

Resultados e Discussões

Validação dados CHIRPS

Foi realizada a análise do coeficiente de determinação (R^2), buscando compreender a proporção da variância entre os dados CHIRPS, como uma variável dependente, e como que pode ser prevista a partir dos dados da Estação INMET, entendido como uma variável independente.

A partir da análise de correlação observou-se um valor de R^2 igual a 0,9593, que indica que uma grande proporção da variabilidade nos dados CHIRPS que é explicada pela variabilidade nos dados da Estação INMET.

Assim, $R^2=0,9593$ significa que aproximadamente 95,93% da variação nos dados de precipitação do CHIRPS pode ser explicada pela variação nos dados da Estação INMET. Isso sugere uma correlação linear muito forte e positiva entre as duas fontes de dados de precipitação.

Verificou-se que os dados CHIRPS é uma ferramenta confiável para estimar a precipitação em comparação com as medições da estação INMET, é importante ressaltar que apesar da correlação positiva da variabilidade sazonal, os dados CHIRPS são subestimados quando comparados com os dados do INMET.

Costa, et al. (2019), analisaram e compararam a similaridade das informações entre o conjunto de dados CHIRPS e estações meteorológicas espalhadas pelas regiões brasileiras, obtidas pelo INMET/CPTEC, verificou-se um coeficiente de determinação a 93% para a região Norte do Brasil.

É importante destacar que foi utilizada os dados de uma estação do INMET/CPTEC localizada no município de Codajás, enquanto os dados do CHIRPS se referem às médias dos pixels de sua resolução espacial reamostrada (Figura 3).

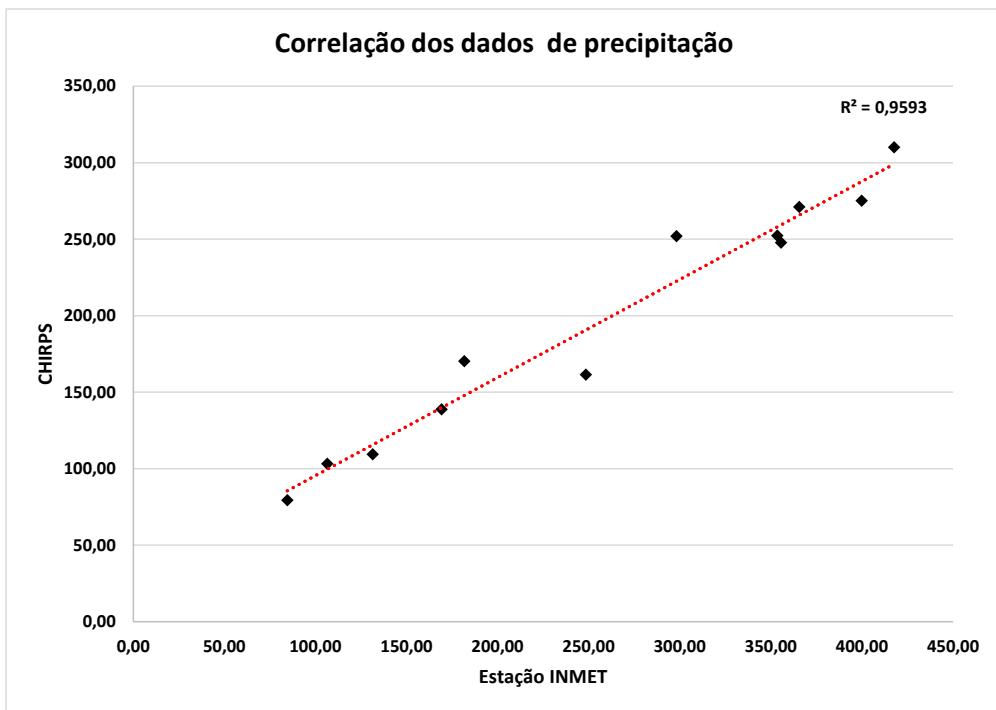


Figura 3- Gráfico de dispersão da correlação dos dados CHIRPS e Estação INMET. Organização: Autores, (2025).

Validação dos dados interpolados por Krigagem

A figura 4 mostra os gráficos de dispersão da validação cruzada a partir da Krigagem ordinária, para cada mês do ano, de Janeiro a Dezembro. Observa-se que os gráficos de dispersão comparam valor observado de erosividade mensal, com valor estimado de erosividade mensal, e inclui uma equação de regressão linear ($e = m x + b$), RMSE (Erro Quadrático Médio) e R² de coeficiente de determinação.

Os dados mostram uma forte correlação positiva entre os valores observados e estimados a partir da interpolação por Krigagem, com R² consistentemente próximos de 1, indicando um bom ajuste para o modelo de Krigagem Ordinária.

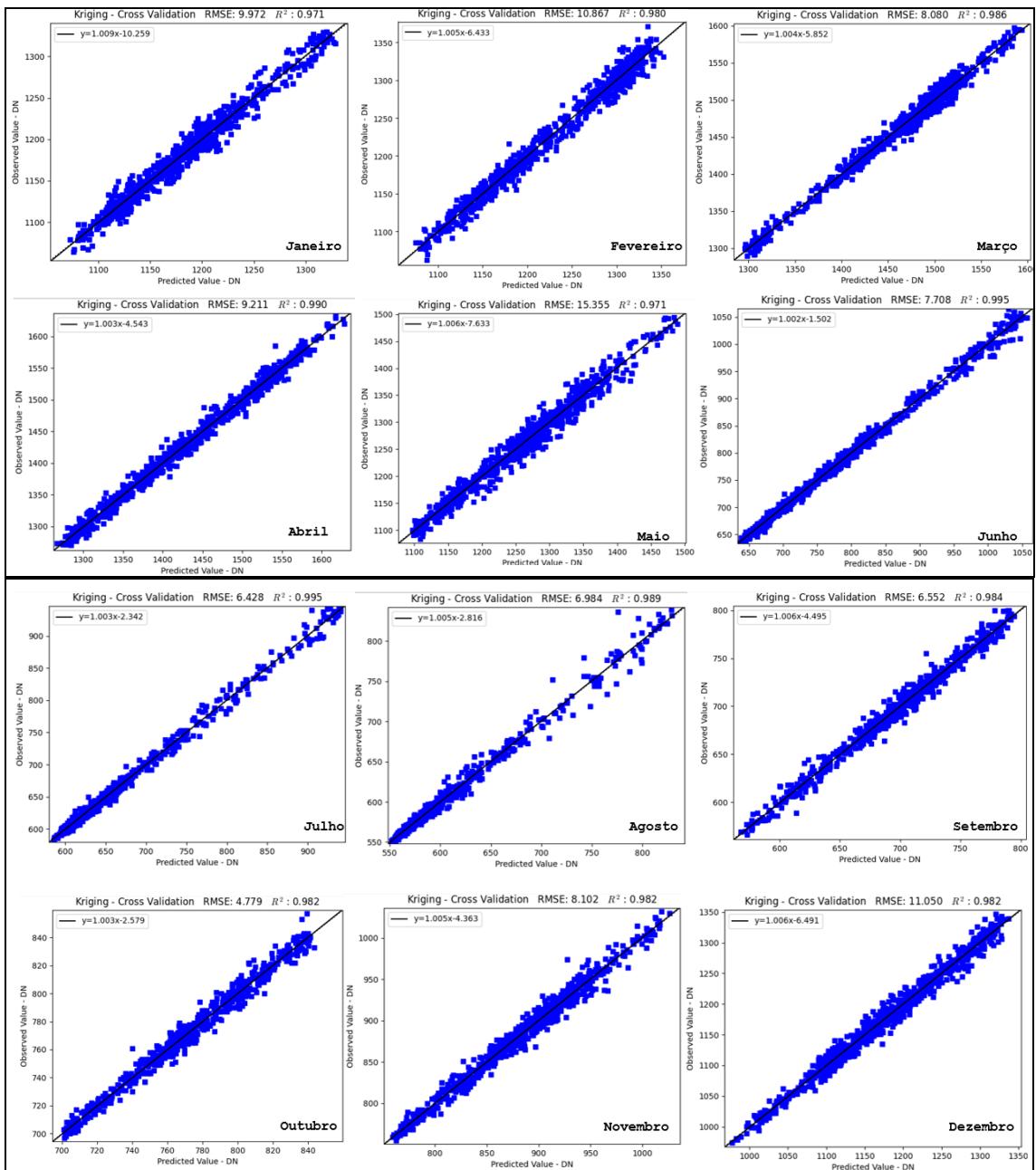


Figura 4- Validação cruzada dos dados observados e estimados da interpolação por Krigagem ordinária para determinar a Erosividade das Chuvas.

Fonte: Autores (2025).

Os resultados mensais do Índice de Moran, variando entre 0,948, Agosto e 0,996 Junho, indicam forte autocorrelação espacial positiva ao longo do ano. O valor mais alto em Junho (0,996) sugere que, neste mês, os valores estimados possuem forte dependência espacial, o que reforça a consistência do modelo para este período. O valor mais baixo, observado em Agosto com 0,948, ainda indica autocorrelação significativa, embora com menor intensidade.

Quanto ao RMSE, indicador de erro médio quadrático, apresenta variação expressiva entre os meses, oscilando de 4,779 em Outubro a 15,355 em Maio. Os menores valores de RMSE, destacados em vermelho na tabela de Junho a Outubro, indicam melhor desempenho do modelo em

termos de precisão, sugerindo que os meses de Julho a Outubro foram os que apresentaram estimativas mais próximas dos valores observados. Em contrapartida, Maio apresentou o índice de 15,355, foi o mês com maior erro, apontando para possíveis maior variabilidade nos dados observados nesse período.

O coeficiente de determinação R^2 , que mede a proporção da variabilidade explicada pelo modelo, mostrou valores consistentemente altos ao longo do ano, variando de 0,971 de Janeiro a Maio, e a 0,995 de Junho e Julho. Isso confirma a elevada capacidade explicativa do modelo, mesmo nos meses com maior erro absoluto (Quadro 1).

Quadro 1- Parâmetros de correlação para Krigagem ordinária.

MESES	I MORAN	RMSE	R ²
JAN	0,973	9,972	0,971
FEV	0,984	10,867	0,980
MAR	0,990	8,080	0,986
ABR	0,973	9,211	0,990
MAI	0,962	15,355	0,971
JUN	0,996	7,708	0,995
JUL	0,987	6,428	0,995
AGO	0,948	6,984	0,989
SET	0,977	6,552	0,9884
OUT	0,980	4,779	0,982
NOV	0,982	8,102	0,982
DEZ	0,985	11,050	0,982

Fonte: Autores (2025).

Análise da erosividade das chuvas em Codajás

A região Norte apresenta um período de chuva entre novembro a maio e estiagem entre junho a setembro, caracterizando deste modo a região brasileira com maior período de chuva e índices de precipitação elevados mesmo na estação seca. (COSTA, et al. 2019).

A precipitação pluviométrica mensal do município de Codajás, apresenta um padrão climático sazonal típico da região amazônica, com acentuada variação na distribuição das chuvas ao longo do ano. Observa-se que os meses de maior precipitação são Março, com pico acima de 410 mm, fevereiro e Abril, ambos com médias próximas ou superiores a 380 mm, caracterizando o ápice da estação chuvosa, que se estende de Janeiro a Maio. Essa elevada concentração de chuvas nesse

período está associada à atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e aos elevados índices de umidade atmosférica da região equatorial.

A partir de Junho, inicia-se uma redução significativa nos volumes pluviométricos, marcando o período seco que se intensifica nos meses de Julho e Agosto, com precipitações inferiores a 100 mm, sendo Agosto o mês mais seco do ano. A partir de setembro, observa-se um aumento gradual das chuvas, indicando o início da transição para a estação úmida. Em Dezembro, os valores já ultrapassam os 340 mm, evidenciando o retorno do período chuvoso. Essa variação anual tem importantes implicações para o planejamento agrícola, a gestão de recursos hídricos e o manejo do solo, especialmente no contexto amazônico, onde a intensificação das chuvas pode contribuir para processos erosivos e aumento do escoamento superficial (Figura 5).

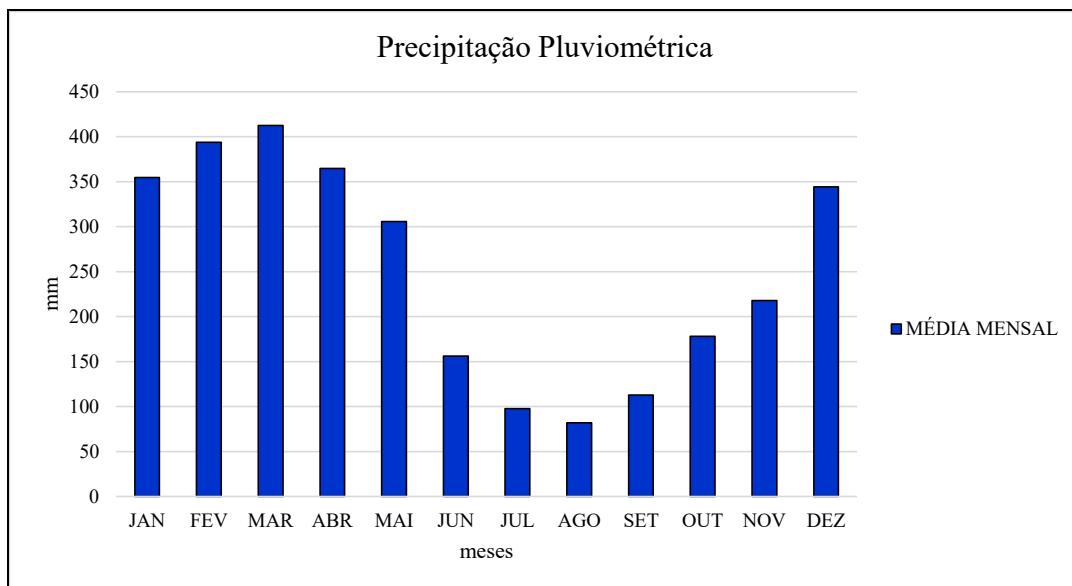


Figura 5- Precipitação média mensal do município de Codajás-AM de 1993 - 2023.
Fonte: INMET. (2025).

A erosividade mensal da precipitação ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ mês^{-1}$) para Codajás, ao longo do ano, de janeiro a dezembro, apresentou variações de 500 a 1650 $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ mês^{-1}$, conforme a figura 6, que permitem a visualização das variações sazonais da erosividade da precipitação na área de estudo.

Quanto à distribuição sazonal, observou no município de Codajás que a erosividade apresenta variações marcantes ao longo do ano, em que verificou-se os meses de junho a outubro apresentam maior proporção de áreas em Km^2 , com menores índices de erosividade variando entre 500 e 800 $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ mês^{-1}$, indicando baixa intensidade de chuvas erosivas no período seco, mostram predominância das classes inferiores a 900 $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ mês^{-1}$, isso sugere que, as chuvas são menos intensas em termos erosivos ao longo desses meses.

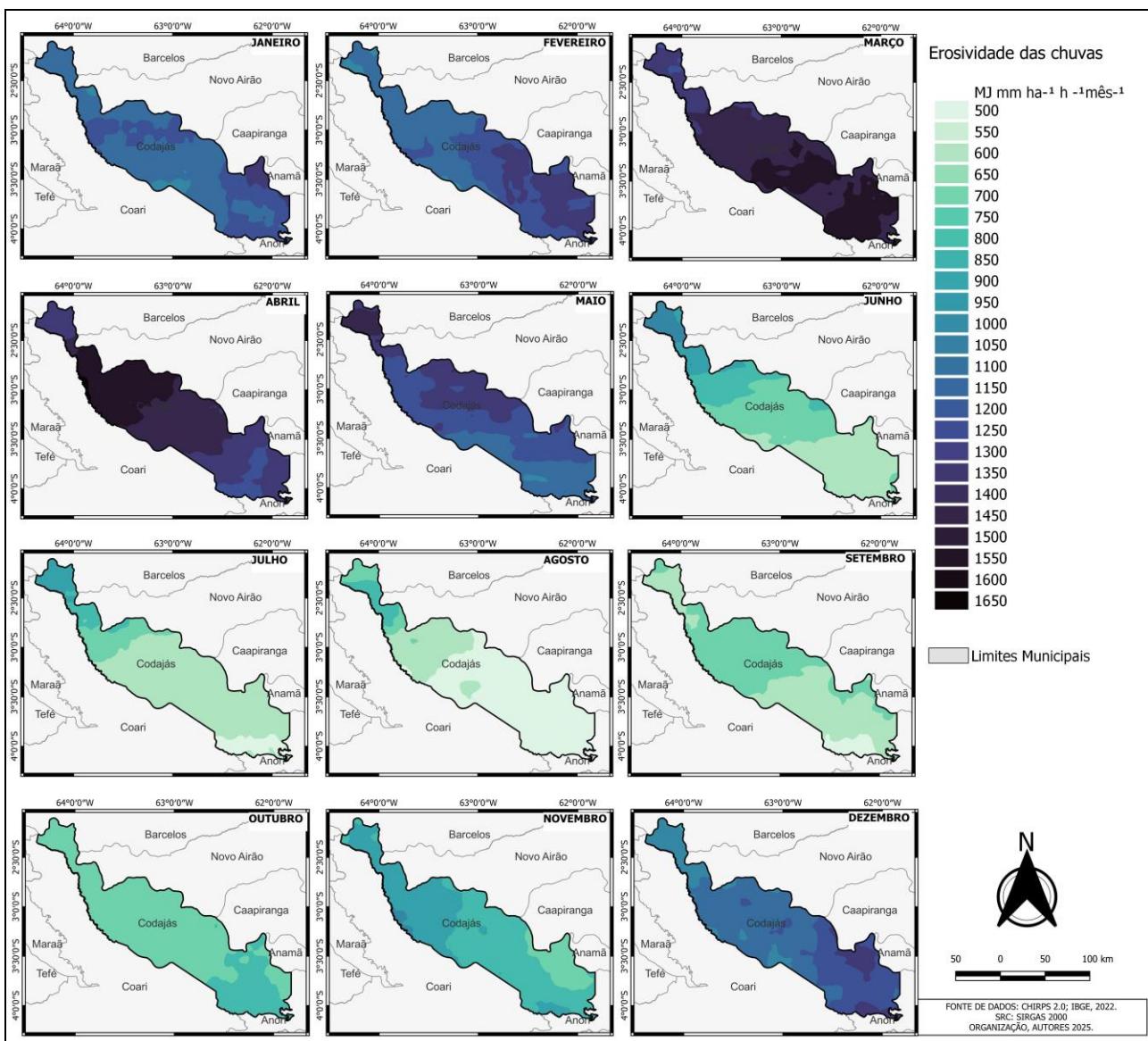


Figura 5- Erosividade mensal das chuvas no município de Codajás-AM.
Organização: Autores (2025).

Os meses de Outubro e Novembro destacam-se por áreas afetadas nas faixas intermediárias de erosividade, $800\text{--}1100\text{ MJ mm ha}^{-1}\text{ h}^{-1}\text{ mês}^{-1}$, refletindo o início do regime chuvoso na região do Médio Solimões.

A partir do mês de Dezembro observa-se o aumento significativo da erosividade das chuvas com índices acima de $1100\text{ MJ mm ha}^{-1}\text{ h}^{-1}\text{ mês}^{-1}$ em área em quilômetros quadrados (km^2), alcançando o índice máximo de $1650\text{ MJ mm ha}^{-1}\text{ h}^{-1}\text{ mês}^{-1}$ em abril.

Chuvas Altamente Erosivas

Quanto à distribuição sazonal da erosividade das chuvas em Codajás verificou-se que Dezembro a Maio uma concentração significativa das maiores classes de erosividade entre 1100 a $1650\text{ MJ mm ha}^{-1}\text{ h}^{-1}\text{ mês}^{-1}$.

No mês de Janeiro verificou-se que 61,66% da área do município de Codajás apresenta classe entre 1100–1200 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$, e 31,5% na classe 1200–1300 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$.

No mês de Fevereiro verificou-se o predomínio das classes de 1100 a 1400, com destaque para 40,18% da área do município de Codajás apresentou a classe 1100–1200 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$, 32,19% da área na classe 1200–1300 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$, e 25,63% da área na classe 1300–1400 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$. (Figura 7).

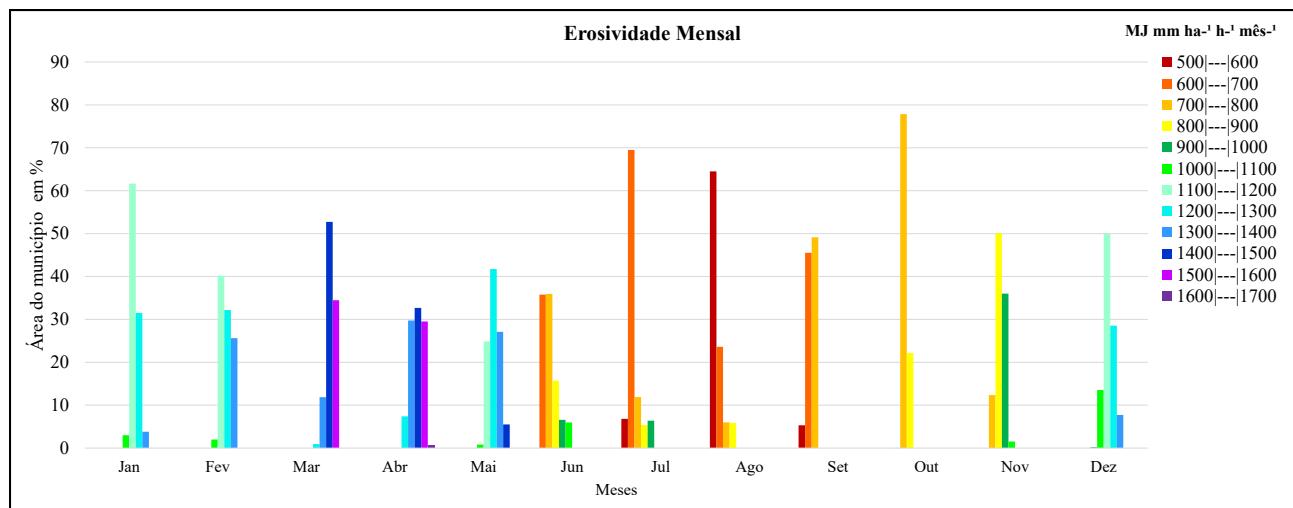


Figura 7- Gráfico da distribuição da erosividade das chuvas por mês.
Organização: Autores (2025).

Os meses de Março e Abril apresentaram os índices mais elevados de erosividade no município de Codajás, apresentando predominantemente classes entre 1300 a 1600 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$.

No mês de Março verificou-se o predomínio das classes de 1400 a 1500 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$, foi observada em 52,72% da área do município de Codajás, a classe 1500–1600 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada 34,46% da área, a classe 1300 a 1400 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 11,86% da área.

Em Abril verificou-se os índices de erosividade das chuvas mais intensos, com predomínio das classes de 1200 a 1300 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foram observadas em 7,41%, da área do município de Codajás, a classe 1300 a 1400 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada 29,76% da área, a classe 1400 a 1500 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 32,68%, da área, a classe 1500 a 1600 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 29,53 % da área, destaca-se que no mês de Abril foi o único mês que apresentou índices superiores à 1650 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ essa classes ocupou menos de 1% da área de estudo.

Maio a classe de 1000 a 1100 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 0,80 % da área do município de Codajás, a classe 1100 a 1200 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 24,85% da área, a classe 1200 a 1300 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 41,75 % da área, a classe 1300 a

1400 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 27,09% da área, a classe 1400 a 1500 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 5,50% da área.

Esses dados indicam que o período chuvoso mais erosivo concentra-se no primeiro semestre, com destaque entre fevereiro e maio, sendo este o período de maior risco de erosão hídrica no município de Codajás.

Meses de transição da erosividade

Os meses de Junho e Novembro apresentam distribuição mista dos índices de erosividade, esses meses marcam a transição entre os regimes seco e chuvoso. Em Junho observa-se a ocorrência de energia erosiva moderada, entre 900 a 1100 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$, embora em percentuais menores. Em Novembro observa-se o retorno gradual das chuvas com maior potencial erosivo entre 900 a 1100 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$.

A transição para o período seco ocorre no mês de Junho a classe de 600 a 700 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 35,79% da área do município de Codajás, a classe 700 a 800 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 35,95% da área, a classe 800 a 900 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 15,70% da área, a classe 900 a 1000 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 6,59% da área, a classe 1000 a 1100 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 5,97% da área.

A transição para o período chuvoso ocorre no mês de Novembro a classe de 700 a 800 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 12,37% da área do município de Codajás, a classe 800 a 900 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 50,09% da área, a classe 900 a 1000 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 36,01% da área, a classe 1000 a 1100 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 1,52% da área.

Meses de Baixa Erosividade

Entre os meses de Julho a Outubro, verifica-se a erosividade concentrada nas classes mais baixas, entre 500 a 800 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$, em Agosto verifica-se 64,51% da área está na classe mais baixa 500–600 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$.

No mês de Julho a classe de 500 a 600 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 6,81% da área do município de Codajás, a classe 600 a 700 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 69,49% da área, a classe 700 a 800 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 11,90% da área, a classe 800 a 900 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 5,40% da área, a classe 900 a 1000 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 6,40% da área.

Em Agosto caracteriza-se por apresentar uma representativa área do município de Codajás com os menores índices de erosividade, a classe de 500 a 600 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$, observada em

64,51% da área, a classe 600 a 700 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$, foi observada em 23,60 % da área, a classe 700 a 800 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 6,01% da área, a classe 800 a 900 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 5,88% da área.

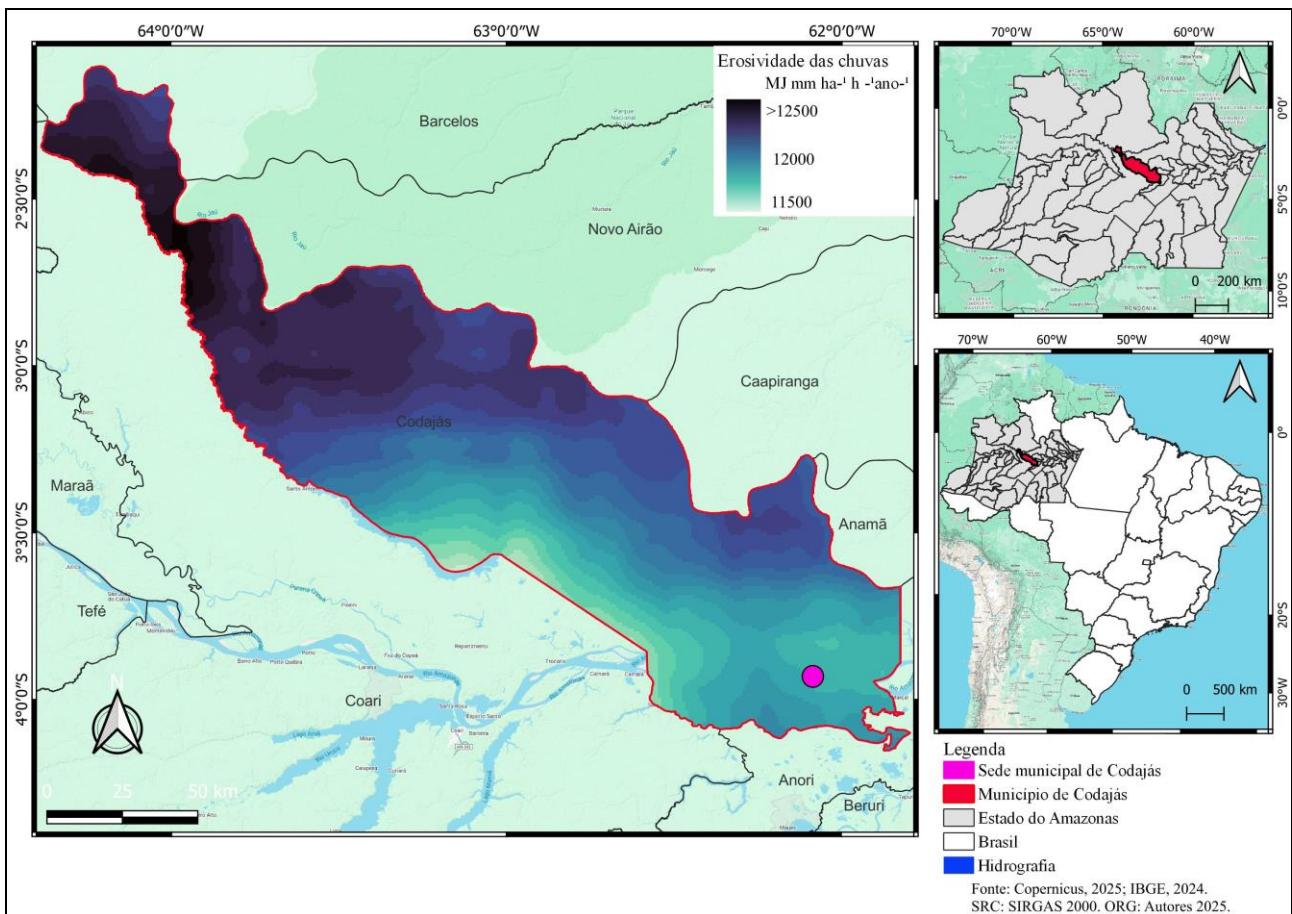
No mês de Setembro a classe de 500 a 600 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 5,32% da área do município de Codajás, a classe 600 a 700 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 45,52% da área, a classe 700 a 800 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 49,16% da área.

Em Outubro a classe de 600 a 700 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 0,02% da área do município de Codajás, a classe 700 a 800 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 77,83% da área, a classe 800 a 900 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} mês^{-1}$ foi observada em 22,14% da área.

A presença significativa de áreas com baixos índices de erosividade das chuvas, indica que o período seco apresenta risco reduzido de perdas de solos por erosão, e outros processos geodinâmicos, normalmente associados à maior intensidade e frequência das chuvas na região Amazônica.

Erosividade Anual

A erosividade das chuvas anuais em MJ mm $ha^{-1} h^{-1} ano^{-1}$ mostra a distribuição espacial categorizada em diferentes faixas no município de Codajás, no estado do Amazonas. Os dados indicam a porcentagem da área que se enquadra nas diferentes categorias de erosividade, onde 36% da área apresenta valores de erosividade > 12500 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} ano^{-1}$, 28% da área apresenta valores de erosividade entre 12000 e 12500 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} ano^{-1}$, 25% da área apresenta valores de erosividade entre 11500 e 12000 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} ano^{-1}$, 6% da área apresenta valores de erosividade entre 11000 e 11500 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} ano^{-1}$, 5% da área apresenta valores de erosividade < 11000 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} ano^{-1}$. (Figura 8).



De acordo com trabalhos de Carvalho (1994) e Silva Neto e Aleixo (2020), se estabeleceu as classes de erosividade e graus de vulnerabilidade das paisagens, conforme erosividade calculada a partir da avaliação numérica do valor médio anual da chuva do local, expresso em $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$, em que é considerado Vulnerabilidade Muito Baixa: $<2500\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$; Baixa: $2500-5000\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$; Moderada: $5000-7000\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$; Alta: $7000-10000\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$; e Muito Alta: $>10000\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$.

Desse modo, a erosividade anual para o município de Codajás é classificada como Muito Alta, por apresentar índices acima de $10000\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$, observando-se que em todos os limites territoriais do município o menor índice é de $11500\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$, e os maiores de $12500\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$.

Considerações finais

No que tange aos procedimentos metodológicos, ressalta-se a utilização dos dados CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), os quais se apresentam como uma alternativa robusta para regiões com baixa densidade de estações meteorológicas, a exemplo do Médio Solimões, onde se insere o município de Codajás. Para a caracterização da erosividade das

chuvas, o processamento dos dados demonstrou a eficácia das técnicas de geoprocessamento, com destaque para os métodos de análise geoestatística, que se mostraram ferramentas adequadas para a manipulação e interpretação de grandes volumes de dados pluviométricos, possibilitando uma representação espacial mais acurada dos padrões erosivos na área de estudo.

A distribuição espacial e temporal da erosividade das chuvas no município de Codajás apresenta relevância significativa para o planejamento do uso e conservação do solo, sobretudo diante da elevada suscetibilidade à erosão hídrica observada nos meses de março e abril. Estes períodos críticos indicam maior risco de perda de solo em áreas desprovidas de cobertura vegetal adequada, o que reforça a necessidade de adoção de práticas conservacionistas ajustadas sazonalmente. A erosividade ao longo do ano evidencia a importância de estratégias de manejo que considerem a dinâmica climática local, com ênfase em medidas de proteção do solo durante os meses de chuvas mais erosivas.

A análise dos padrões mensais revelou que a erosividade atinge seus picos entre março e abril, mantendo relativa estabilidade nos demais meses do período chuvoso. Tal comportamento reforça a necessidade de monitoramento contínuo como ferramenta essencial ao planejamento agrícola e à gestão ambiental. Em áreas com elevada suscetibilidade à erosão, como as margens do rio Solimões, onde se localiza Codajás, esse monitoramento é fundamental para prevenir não apenas a perda de solo, mas também processos geodinâmicos como movimentos de massa e o fenômeno das terras caídas.

Considerando os fatores físico-ambientais da região, como tipos de solo, relevo, litologia e padrões pluviométricos, constata-se que o período entre dezembro e maio representa a fase de maior vulnerabilidade à erosão. Diante disso, recomenda-se a implementação de medidas conservacionistas específicas, como o uso de coberturas vegetais permanentes associadas a práticas agrícolas desenvolvidas pelos produtores locais, além da adoção do sistema de plantio direto com palhada. Tais práticas demonstram-se eficazes na mitigação do impacto erosivo das chuvas, especialmente no primeiro semestre do ano.

Os dados obtidos ao longo da pesquisa podem subsidiar modelos preditivos de perda de solo, a exemplo da RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), além de matrizes de vulnerabilidade e suscetibilidade. A aplicação desses modelos permite a delimitação de zonas críticas e o direcionamento de intervenções técnicas para áreas prioritárias, contribuindo com maior precisão no planejamento do uso da terra e na redução de impactos ambientais negativos.

Por fim, a identificação de padrões sazonais e espaciais da erosividade contribui para a formulação de políticas públicas e estratégias conservacionistas focadas nos períodos e locais de maior vulnerabilidade dessas paisagens. Os resultados obtidos reforçam a importância do

monitoramento climático integrado à gestão territorial, especialmente em áreas da Amazônia brasileira, como a região do Médio Solimões, onde se insere o município de Codajás.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) pelo apoio no âmbito do Programa FAPEAM Produtividade em CT&I – Edital nº 020/2024. À Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação – PROPESP, da Universidade Federal do Amazonas - UFAM. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências

- BARBOSA, A. J. S.; BLANCO, C. J. C.; MELO, A. M. Q. Determinação do fator energético da chuva (R) para Belém-PA. In: **Congresso Internacional De Hidrossedimentologia**, 1., 2015, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: IPH, 2015.
- BERENGUER, E. et al. Drivers and ecological impacts of forest degradation in the Amazon: a synthesis. *Acta Amazônica*, v. 51, n. 1, p. 1–15, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/MBJGDQttMqTvPrQvDMbs4H>. Acesso em: 2 jun. 2025.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 6. ed. São Paulo: Ícone, 1999.
- CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies. In: CÂMARA, G. et al. **Análise espacial de dados geográficos**. São José dos Campos: INPE, 2001. cap. 3.
- CÂMARA, G. et al. Técnicas de inferência geográfica. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (org.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994.
- CHIRPS: **Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations**. 2024. Disponível em: <https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/>. Acesso em: 11 dez. 2024.
- COSTA, J. et al. Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 24, p. 1–15, 2019.
- COSTA, N. C.; FERREIRA, M. S.; SILVA NETO, J. C. A. Análise temporo-espacial do uso da terra e cobertura vegetal na estrada Codajás–Anori, AM. In: SILVA NETO, J. C. A.; WACHHOLZ, F. (org.). **Geotecnologias e análise da paisagem na Amazônia**. São Paulo: Alexa Cultural, 2022. p. 213–232.
- CREPANI, E. et al. **Geotecnologias aplicadas à análise da vulnerabilidade ambiental**. São José dos Campos: INPE, 2012.

CREPANI, E. et al. Zoneamento ecológico-econômico. In: FLORENZANO, T. G. (org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

DANTAS, M. E.; MAIA, M. A. M. Compartimentação geomorfológica. In: MAIA, M. A. M.; MARMOS, J. L. (org.). **Geodiversidade do Estado do Amazonas**. Manaus: CPRM, 2010. p. 27–43.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação dos solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006.

GETIRANA, A. et al. Managing ecosystem services in the Brazilian Amazon: the influence of deforestation and forest degradation in the world's largest rainforest. *Geoscience Letters*, 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/391807052_Managing_ecosystem_services_in_the_Brazilian_Amazon_the_influence_of_deforestation_and_forest_degradation_in_the_world%27s_largest_rain_forest. Acesso em: 3 fev. 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Banco de Informações Ambientais (BDiA)**. 2024. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/>. Acesso em: 30 out. 2024.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados: Codajás**. 2024. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br>. Acesso em: 29 jan. 2024.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa – BDMEP**. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 6 jun. 2025.

LANDIM, P. M. B. Introdução aos métodos de estimativa espacial para confecção de mapas. Rio Claro: UNESP/IGCE, 2000. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

LIMA, E. P. et al. Erosividade da chuva do Brasil. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, n. 286. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2023.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. **Bragantia**, Campinas, v. 51, n. 2, p. 189–196, 1992. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051992000200009>

MAPBIOMAS. **Plataforma de dados: Coleção 9 – Cobertura e uso da terra no Brasil (1985–2023)**. São Paulo: MapBiomass, 2024. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura>. Acesso em: 21 jun. 2025.

MEDEIROS, P. H. A. et al. Estimativas de perdas de solo em diferentes coberturas vegetais na Bacia Experimental de São João do Cariri – PB. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 4, p. 825–833, 2001.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. **Processos hidrossedimentológicos em pequenas bacias hidrográficas rurais: monitoramento e modelagem**. Porto Alegre: UFRGS Editora, 2013.

MEYFROIDT, P. et al. Middle-range theories of land system change. **Regional Environmental Change**, v. 18, p. 627–635, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10113-017-1268-4>. Acesso em: 12 mai. 2025.

PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2006.

RICHARDS, P. et al. Soy expansion and deforestation in South America: updating the discourse. **Land**, v. 3, n. 3, p. 981–1007, 2014. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/3/3/981>. Acesso em: 11 jan. 2025.

ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil: subsídios para planejamento ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SILVA NETO, J. C. A.; ALEIXO, N. C. R. Erosividade da chuva na Região do Médio Solimões, Amazonas, Brasil. **Caminhos de Geografia** (UFU. Online), v. 21, n. 77, p. 1–17, out. 2020.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; OLIVEIRA, A. H. **Perda de solo e qualidade da água em microbacia hidrográfica sob plantio direto e preparo convencional**. Viçosa: UFV, 2010.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning**. **Agricultural Handbook**, n. 537, Washington: USDA, 1978. 58 p.