

AVALIAÇÃO DE COMPLETUDE PELA METODOLOGIA DE STEPP (1972) DA REGIÃO NORTE DO BRASIL – ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE RISCO SÍSMICO (PSHA).

Enzo Dias ¹; Raphael Viola ²; Frederico Gomes ³

Resumo – O Brasil, embora não seja considerado uma região sísmicamente ativa, tem vivenciado um aumento significativo nos estudos sísmicos nos últimos anos. Esse avanço foi impulsionado pela atualização das normas brasileiras, que passaram a apresentar definições e exigir requisitos mínimos para análises sísmicas, como a NBR 15421 (2023), NBR 13028 (2024) e NBR 13029 (2024). Nesse contexto, este estudo objetiva avaliar a completude dos terremotos registrados na região Norte do Brasil, uma região continental estável (SCR), aplicando a metodologia de Stepp (1972). A análise de completude é um dos componentes fundamentais em Análises Probabilísticas de Risco Sísmica (PSHA), especialmente em regiões de baixa atividade sísmica, onde a escassez de registros e a qualidade dos dados representam desafios significativos. O tratamento dos dados envolveu a remoção de sismos dependentes (*aftershocks* e *foreshocks*), utilizando as técnicas de *declustering* propostas por Gardner e Knopoff (1974), Uhrhammer (1986) e Gruenthal (*apud* Van Stiphout, 2012). Este estudo contou com a coleta, análise e processamento de 513 sismos na região Norte do Brasil do ano de 1832 até 2023, utilizando como base o Boletim (v2024May09) do Catálogo Sísmico Brasileiro (SISBRA), disponível pelo centro de sismologia da Universidade de São Paulo (USP).

Palavras-Chave – Análise Probabilística de Ameaça Sísmica; PSHA; *Catálogo Sísmico Brasileiro* (SISBRA); *técnicas de declusterização*, Gardner and Knopoff; Gruenthal; Uhrhammer; Stepp; Análise de completude.

Abstract – Brazil, although not considered a seismically active region, has experienced a significant increase in seismic studies in recent years. This advancement has been driven by the update to Brazilian standards, which now require definitions and minimum requirements for seismic analyses, such as NBR 15421 (2023), NBR 13028 (2024), and NBR 13029 (2024). In this context, this study aims to evaluate the completeness of earthquakes recorded in the northern region of Brazil, a stable continental region (SCR), applying the methodology proposed by Stepp (1972). Completeness analysis is one of the fundamental components in Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), especially in regions of low seismic activity, where data scarcity and data quality represent significant challenges. Data processing included the removal of dependent earthquakes (*aftershocks* and *foreshocks*), using declustering techniques proposed by Gardner and Knopoff (1974), Uhrhammer (1986), and Gruenthal (*apud* Van Stiphout, 2012). This study involved the collection, analysis, and processing of 513 earthquakes in the Northern region of Brazil from year 1832 to 2023, based on the Bulletin (v2024May09) of the Brazilian Catalog Bulletin from SISBRA, made available by the Seismology Center of the University of São Paulo (USP).

Keywords – *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*; PSHA; *Earthquake Catalog*; SISBRA; *declustering techniques*; Gardner and Knopoff; Gruenthal; Uhrhammer; Stepp; *completeness analysis*.

¹ Eng., M.Eng PUC Minas, UFOP, Belo Horizonte - MG, enzosd98@gmail.com, enzo.dias@aluno.ufop.edu.br

² Eng., M.Eng PUC Minas, Belo Horizonte - MG, raphaelviola.eng@gmail.com

³ Eng., UFMG, Belo Horizonte - MG, fredericotacio@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A elaboração de um estudo sísmico de PSHA envolve a avaliação detalhada dos dados sísmicos da região em estudo. Esta etapa é fundamental para que a análise se baseie nas informações mais representativas possíveis da atividade sísmica local.

A avaliação dos dados sísmicos começa com a coleta de registros históricos de terremotos, que incluem informações sobre a magnitude, localização e profundidade dos eventos sísmicos. Esses dados são obtidos de diversas fontes, como catálogos sísmicos, redes de monitoramento sísmico e estudos geológicos. A qualidade e a abrangência dos dados são fatores determinantes para a confiabilidade da análise.

Uma vez coletados os dados sísmicos, é necessário realizar o processo de *declustering* do catálogo. Este processo visa remover eventos sísmicos dependentes, como sismos precursoros (*foreshocks*) e réplicas (*aftershocks*), que podem distorcer a estimativa da taxa de ocorrência de terremotos independentes. Diversas técnicas de *declustering*, incluindo o método de Gardner e Knopoff (1974), Uhrhammer (1986) e Gruenthal (*apud* van Stiphout, 2012) e outras, foram propostas por estudiosos anteriores. Esses métodos são aplicados para desenvolver um catálogo sísmico de eventos naturais e independentes que melhor representem a sismicidade da região de estudo.

Para estimar a taxa de recorrência de terremotos em uma região, é importante que esses dados também sejam avaliados qualitativamente quanto à sua completude e precisão (Fenton *et al.*, 2006). A análise de completude geralmente utilizada segue a metodologia de Stepp (1972).

Este estudo apresentará a avaliação de completude da região Norte do Brasil, utilizando como base de dados o boletim do Catálogo Sísmico Brasileiro (SISBRA). Além disso, abordará o processo prévio de *declustering* realizado no catálogo, empregando os métodos de Gardner e Knopoff (1974), Uhrhammer (1986) e Gruenthal (*apud* van Stiphout, 2012). Esses três métodos utilizam a técnica de janelas espaço-temporais para identificar os eventos dependentes (sismos precursoros e réplicas), que envolve a definição de janelas de tempo e distância ao redor de cada evento sísmico principal, dentro das quais os eventos subsequentes são considerados dependentes.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

Este estudo apresenta a avaliação de completude da região Norte do Brasil. Devido à menor concentração populacional e à infraestrutura menos desenvolvida, há uma escassez de estudos sísmicos na região Norte em comparação com outras regiões do Brasil, como o Sudeste (Assumpção *et al.*, 2016). A Figura 1 apresenta os eventos sísmicos registrados na região Norte do Brasil, com base no Catálogo Sísmico Brasileiro (SISBRA). Ressalta-se que o catálogo disponibiliza um banco de dados brutos, sem qualquer tipo de tratamento, exibindo dados de eventos dependentes, duplicados e induzidos.

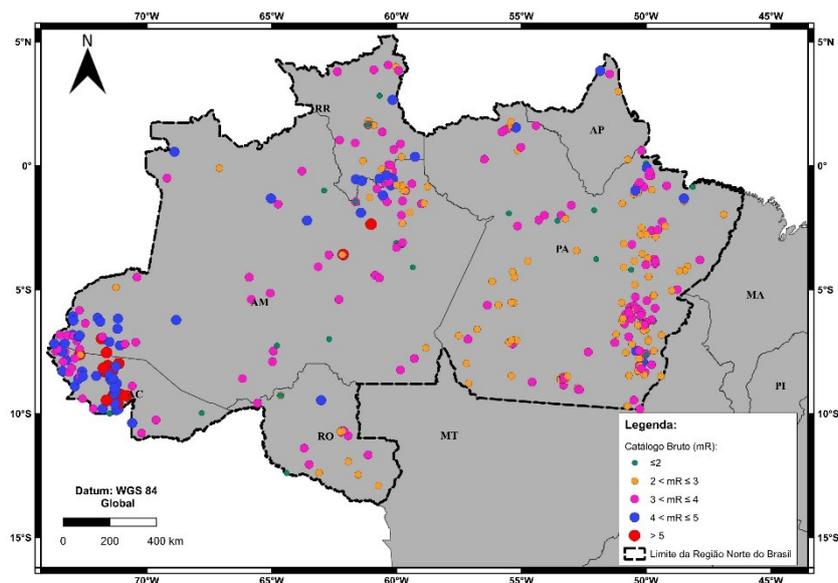


Figura 1. Eventos sísmicos sem tratamento registrados na região Norte do Brasil –
Fonte: Catálogo Brasileiro (SISBRA - v2024May09).

2.1. Catálogo SISBRA

O catálogo sísmico bruto fornecido pelo SISBRA, recortado para a região Norte, conta com 513 eventos sísmicos, fornecendo dados registrados em magnitude m_R . Esta unidade de medida fornece medida de escala regional para terremotos rasos (crostais), na faixa de distância de 200 a 1500 km, medida com amplitude máxima em toda a sequência de onda P (Assumpção, 1983; Assumpção *et al.*, 2014).

Para tratamento preliminar dos dados, foram removidos 8 eventos sísmicos de natureza induzida (detonação) e 28 com magnitude nula, resultando em um catálogo limpo com 477 registros de evento. Os eventos de natureza induzida foram identificados a partir de comentários feitos na própria consolidação fornecida no catálogo original do SISBRA, enquanto os eventos de magnitude nula foram removidos manualmente a partir de filtragem dos dados.

Na Figura 2 apresenta-se disposição espacial destes eventos após a filtragem dos dados do catálogo sísmico limpo.

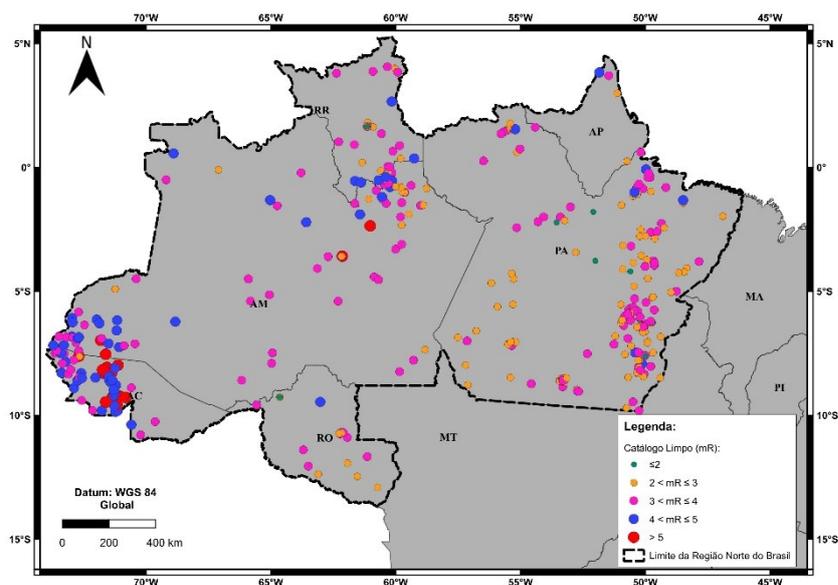


Figura 2. Catálogo limpo de eventos sísmicos, registrados na região Norte do Brasil -
Fonte: Catálogo Brasileiro (SISBRA - v2024May09).

3. DECLUSTERING

Foram realizadas análises de sensibilidade dos métodos de *declustering* para avaliar o impacto de diferentes métodos de *declustering* sobre o catálogo sísmico limpo — no qual foram removidos os sismos com magnitude nula e os eventos identificados como induzidos pelos comentários do catálogo SISBRA. Foram considerados três métodos baseados em janelas espaço-temporais (space-time-window methods): Gardner e Knopoff (1974), Gruenthal (*apud* Van Stiphout, 2012) e Uhrhammer (1986).

Com o objetivo de atender as condições estatísticas de uma distribuição de Poisson, frequentemente utilizada para descrever a ocorrência temporal de sismos, o catálogo limpo foi submetido ao processo de *declustering*, de forma a isolar os eventos estatisticamente independentes e distinguir os sismos principais de seus possíveis sismos precursoros (*foreshocks*) e réplicas (*aftershocks*).

A identificação de eventos dependentes (precursores e réplicas) e independentes baseou-se na aplicação dos três métodos mencionados, que verificam se um sismo principal de magnitude M e seus possíveis sismos precursoros ou réplicas ocorrem dentro de uma janela de tempo $t(M)$ e distância $d(M)$. A Equação (1) e Equação (2) apresentam as formulações correspondentes aos métodos de Gardner e Knopoff (1974); Equação (3) e Equação (4) referem-se ao método de Gruenthal (*apud* Van Stiphout, 2012); e Equação (5) e Equação (6) ao método de Uhrhammer (1986), respectivamente, considerando t em dias e d em quilômetros.

- Gardner e Knopoff (1974):

$$d = 10^{0,1238M+0,983} \quad \text{Equação (1)}$$

$$t = \begin{cases} 10^{0,032M+2,7389}, & \text{se } M \geq 6,5 \\ 10^{0,5409M-0,547}, & \text{se } M < 6,5 \end{cases} \quad \text{Equação (2)}$$

- Gruenthal (*apud* Van Stiphout, 2012):

$$d = e^{1,77+(0,037+1,02M)^2} \quad \text{Equação (3)}$$

$$t = \begin{cases} |e^{-3,95+(0,62+17,32M)^2}|, & \text{se } M \geq 6,5 \\ 10^{2,8+0,024M}, & \text{se } M < 6,5 \end{cases} \quad \text{Equação (4)}$$

- Uhrhammer (1986):

$$d = e^{-1,024+0,804M} \quad \text{Equação (5)}$$

$$t = e^{-2,87+1,235M} \quad \text{Equação (6)}$$

As figuras Figura 3, Figura 4 e Figura 5 apresentam, respectivamente, a quantidade de eventos do catálogo sísmico da região Norte do Brasil, após a aplicação das técnicas de desclusterização de Gardner e Knopoff (1974), Gruenthal (*apud* Van Stiphout, 2012) e Uhrhammer (1986) ao catálogo limpo. A Tabela 1 resume a quantidade de eventos após cada etapa de processamento do catálogo sísmico.

Tabela 1. Resumo quantitativo dos eventos sísmicos remanescentes após a limpeza e *declustering*, para cada um dos três métodos de *declustering*.

Método de <i>declustering</i>	Catálogo Bruto	Catálogo Limpo	Nº de eventos após <i>declustering</i>	Figura
Gardner e Knopoff (1974)			371	Figura 3
Gruenthal (<i>apud</i> Van Stiphout, 2012)	513	477	333	Figura 4
Uhrhammer (1986)			432	Figura 5

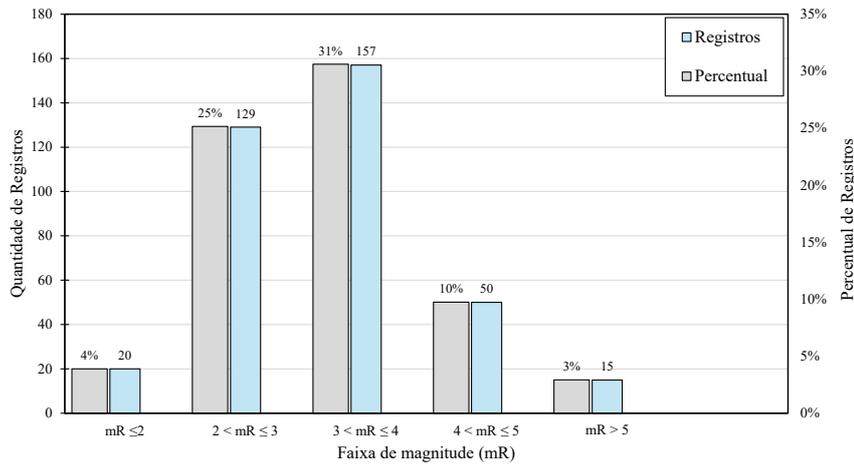


Figura 3. Eventos sísmicos na região Norte do Brasil após remoção de eventos induzidos, nulos e dependentes (precursores e réplicas), segundo a metodologia proposta por Gardner e Knopoff (1974) - Fonte: Catálogo Sísmico Brasileiro (SISBRA - v2024May09).

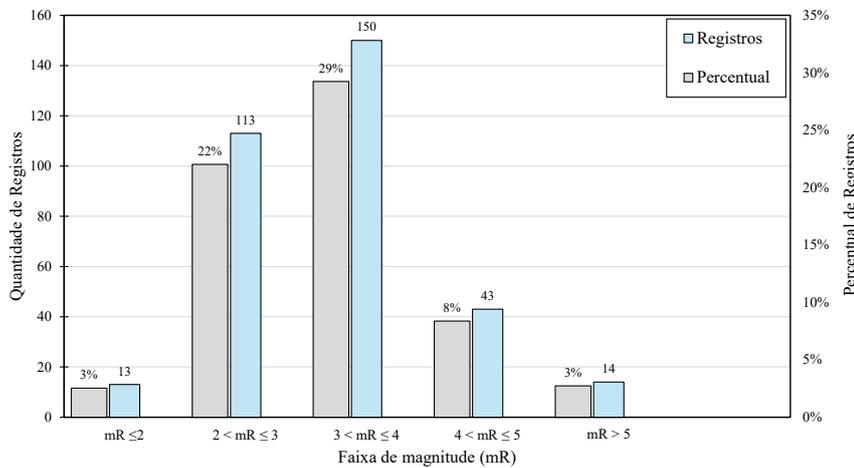


Figura 4. Eventos sísmicos na região Norte do Brasil após remoção de eventos induzidos, nulos e dependentes (precursores e réplicas), segundo a metodologia proposta por Gruenthal (apud van Stiphout, 2012) - Fonte: Catálogo Sísmico Brasileiro (SISBRA - v2024May09).

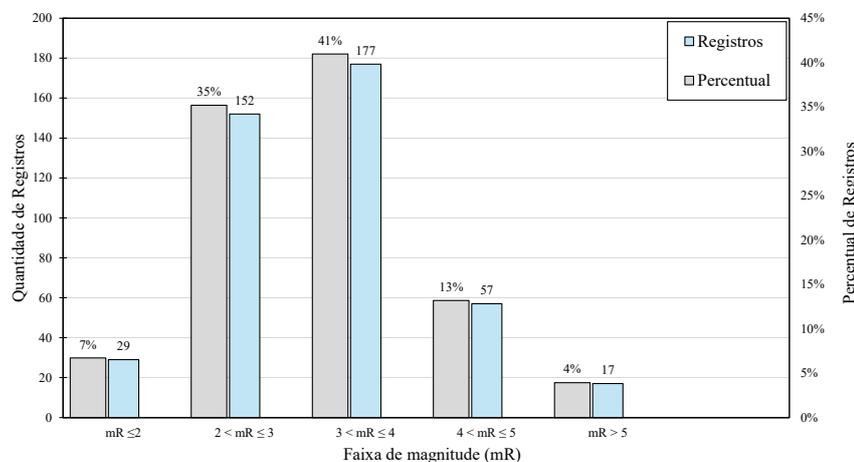


Figura 5. Eventos sísmicos na região Norte do Brasil após remoção de eventos induzidos, nulos e dependentes (precursores e réplicas), segundo metodologia proposta por Uhrhammer (1986) - Fonte: Catálogo Sísmico Brasileiro (SISBRA - v2024May09).

4. COMPLETENESS ANÁLISE – STEPP (1972)

A análise de completude foi realizada de forma estatística, seguindo a metodologia de Stepp (1972), utilizando o catálogo limpo para a região Norte do Brasil.

O método de Stepp (1972) avalia a taxa de ocorrência de eventos sísmicos em função da magnitude e do tempo, com o objetivo principal de identificar os períodos nos quais o registro de eventos é estável e confiável. O método assume a estacionariedade dos processos sísmicos, ou seja, que as taxas de ocorrência de eventos permanecem constantes ao longo do tempo. Nessa abordagem, todos os eventos sísmicos são agrupados em intervalos discretos de magnitude, sendo cada um tratado como um processo pontual ao longo do tempo.

A variância (σ_λ^2) é estimada modelando os eventos sísmicos como uma distribuição de Poisson. Se $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ representam o número de sismos por intervalo de tempo unitário, então a estimativa não enviesada da taxa média por intervalo de tempo unitário (λ) é expressa pela Equação (7), enquanto a variância (σ_λ^2) é definida pela Equação (8).

$$\lambda = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Equação (7)}$$

$$\sigma_\lambda^2 = \left(\frac{\lambda}{n}\right) \quad \text{Equação (8)}$$

onde, n = intervalo de tempo unitário ($n = 5$ anos neste estudo).

A metodologia de Stepp (1972) sugere que o desvio padrão (σ_λ) é proporcional a $\frac{1}{\sqrt{T}}$, caso os dados estejam dentro do período de completude / completeza, e, com base na Equação (8), o desvio padrão (σ_λ) pode ser expresso pela Equação (9).

$$\sigma_\lambda = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{\Delta T}} \quad \text{Equação (9)}$$

onde, T = comprimento da amostra.

A Figura 6 e Figura 7 apresentam os gráficos que resumem os anos de completude estimados pela metodologia de Stepp (1972) para as faixas de magnitude de 2,0 a 5,5 m_R utilizando o catálogo desclusterizado, da região Norte do Brasil, pela metodologia de Gardner e Knopoff (1974). A Tabela 2 apresenta um resumo do ano de completude / completeza para cada intervalo de magnitude, conforme estimado com base na metodologia de Stepp (1972) para a região Norte do Brasil, também utilizando o catálogo desclusterizado pela metodologia de Gardner e Knopoff (1974).

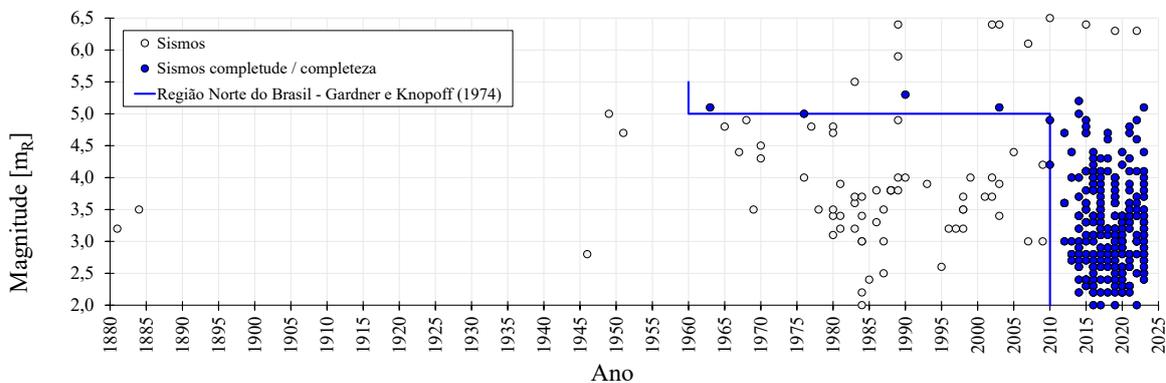


Figura 6. Períodos de completude por faixa de magnitude estimados segundo Stepp (1972) – Catálogo desclusterizado pela metodologia de Gardner e Knopoff (1974).

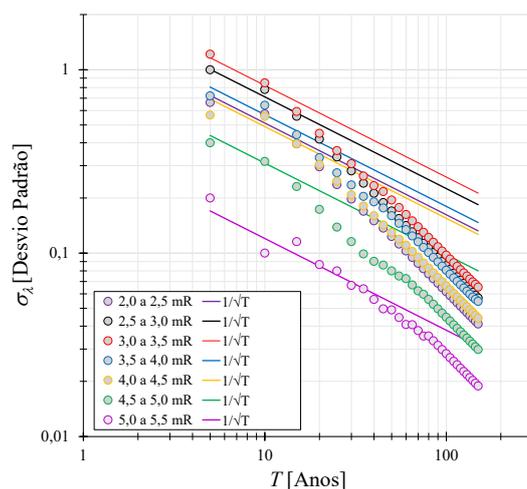


Figura 7. Compilação dos plots de Stepp (1972) para diferentes faixas de magnitude – Catálogo desclusterizado pela metodologia de Gardner e Knopoff (1974).

Tabela 2. Resumo dos anos de completude para a região Norte do Brasil, estimados com base na metodologia de Stepp (1972), considerando o catálogo desclusterizado pela metodologia de Gardner e Knopoff (1974).

Intervalo de magnitude [m_R]	Ano de Completude / Completeza [Ano]
2,0 – 2,5	2010
2,5 – 3,0	2010
3,0 – 3,5	2010
3,5 – 4,0	2010
4,0 – 4,5	2010
4,5 – 5,0	2010
5,0 – 5,5	1960

A Figura 8 e Figura 9 apresenta os gráficos que resumem os anos de completude estimados pela metodologia de Stepp (1972) para as faixas de magnitude de 2,0 a 5,5 m_R utilizando o catálogo desclusterizado, da região Norte do Brasil, pela metodologia de Gruenthal (*apud* Van Stiphout, 2012). A Tabela 3 apresenta um resumo do ano de completude / completeza para cada intervalo de magnitude, conforme estimado com base na metodologia de Stepp (1972) para a região Norte do Brasil utilizando o catálogo desclusterizado pela metodologia de Gruenthal (*apud* Van Stiphout, 2012).

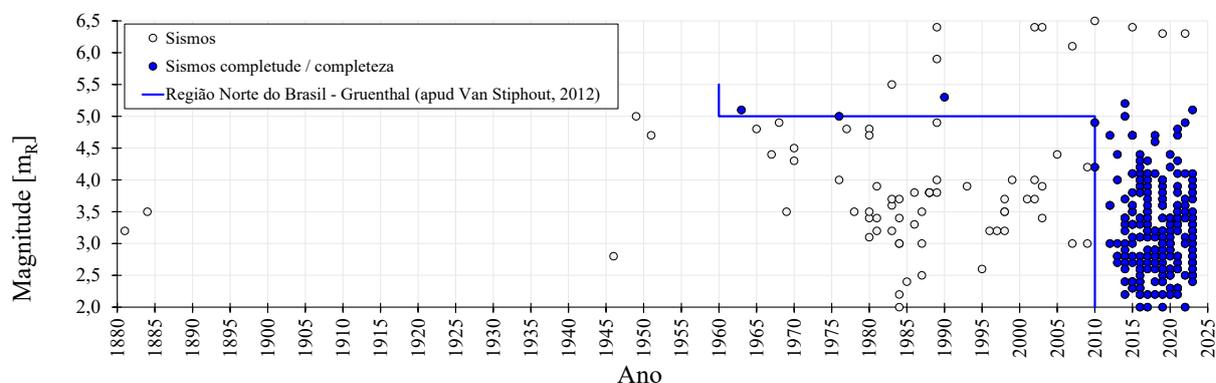


Figura 8. Períodos de completude por faixa de magnitude estimados segundo Stepp (1972) – Catálogo desclusterizado pela metodologia de Gruenthal (*apud* Van Stiphout, 2012).

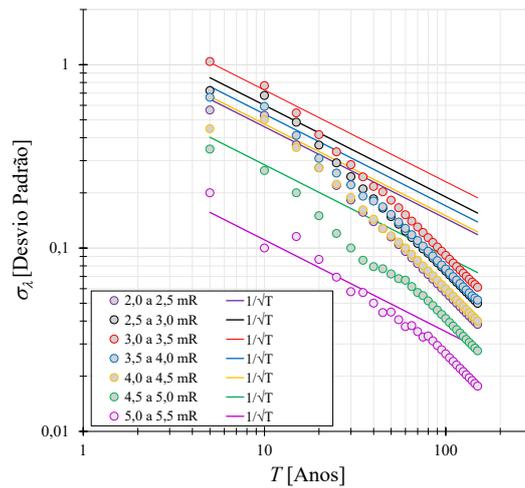


Figura 9. Compilação dos plots de Stepp (1972) para diferentes faixas de magnitude – Catálogo desclusterizado pela metodologia de Gruenthal (*apud* Van Stiphout, 2012).

Tabela 3. Resumo dos anos de completude para a região Norte do Brasil, estimados com base na metodologia de Stepp (1972), considerando o catálogo desclusterizado pela metodologia de Gruenthal (*apud* Van Stiphout, 2012).

Intervalo de magnitude [m_R]	Ano de Completude / Completeza [Ano]
2,0 – 2,5	2010
2,5 – 3,0	2010
3,0 – 3,5	2010
3,5 – 4,0	2010
4,0 – 4,5	2010
4,5 – 5,0	2010
5,0 – 5,5	1960

A Figura 10 e Figura 11 apresentam os gráficos que resumem os anos de completude estimados pela metodologia de Stepp (1972) para as faixas de magnitude de 2,0 a 5,5 m_R utilizando o catálogo desclusterizado, da região Norte do Brasil, pela metodologia de Uhrhammer (1986). A Figura 11 apresenta um resumo do ano de completude / completeza para cada intervalo de magnitude, conforme estimado com base na metodologia de Stepp (1972) para a região Norte do Brasil utilizando o catálogo desclusterizado pela metodologia de Uhrhammer (1986).

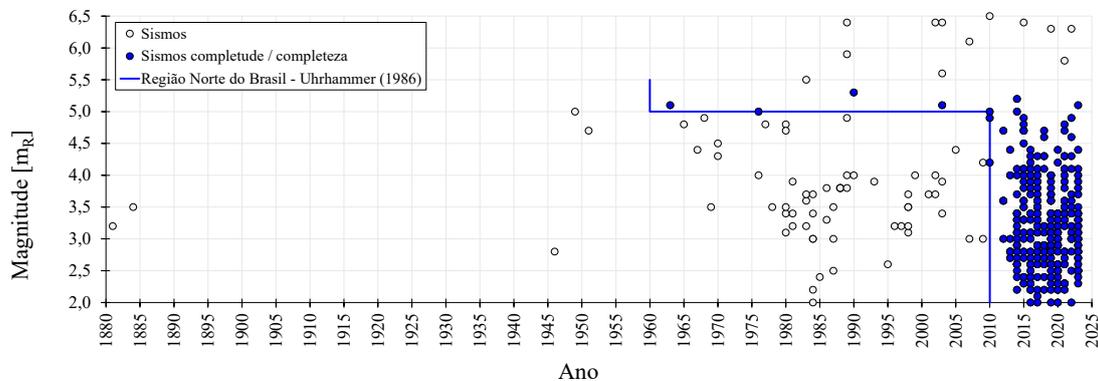


Figura 10. Períodos de completude por faixa de magnitude estimados segundo Stepp (1972) – Catálogo desclusterizado pela metodologia de Uhrhammer (1986).

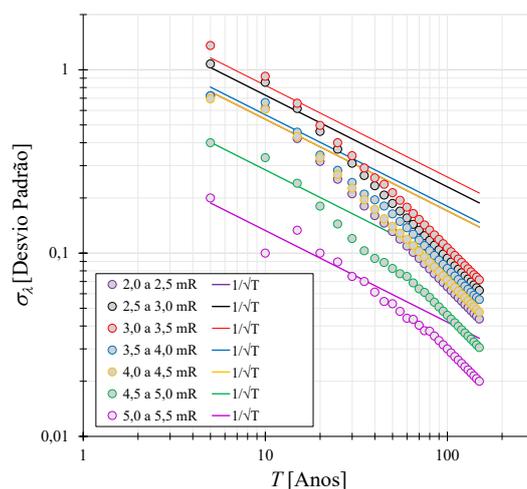


Figura 11. Compilação dos plots de Stepp (1972) para diferentes faixas de magnitude – Catálogo desclusterizado pela metodologia de Uhrhammer (1986).

Tabela 4. Resumo dos anos de completude para a região Norte do Brasil, estimados com base na metodologia de Stepp (1972), considerando o catálogo desclusterizado pela metodologia de Uhrhammer (1986).

Faixa de magnitude [m_R]	Ano de Completude / Completeza [Ano]
2,0 – 2,5	2010
2,5 – 3,0	2010
3,0 – 3,5	2010
3,5 – 4,0	2010
4,0 – 4,5	2010
4,5 – 5,0	2010
5,0 – 5,5	1960

5. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo determinar a completude da região Norte do Brasil, utilizando os dados do boletim do catálogo sísmico do SISBRA e aplicando três métodos de *declustering*: Gardner e Knopoff (1974), Uhrhammer (1986) e Gruenthal (*apud* Van Stiphout, 2012).

Foram conduzidas análises de sensibilidade comparando o processamento do catálogo sísmico por três métodos de desclusterização, baseados em janelas espaço-temporais. Conforme apresentado na Tabela 1 os critérios de Gardner e Knopoff resultaram na remoção intermediária de eventos sísmicos, situando-se entre a menor remoção de eventos observada em Uhrhammer e a remoção mais expressiva de eventos observada em Gruenthal. A aplicação de diferentes métodos resultou em variações nos sismos classificados como dependentes (precursores e réplicas) ou independentes, aspecto relevante para as análises probabilísticas de ameaça sísmica (PSHA).

Os anos de completude estimados com base na metodologia de Stepp (1972), considerando os três catálogos após processo de limpeza e *declustering* apresentaram os mesmos anos de completude (Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4). Isso indica que a seleção do método de *declustering* teve pouco impacto na estimativa dos anos de completude para cada faixa de magnitude, quando comparando os resultados entre as três metodologias. Essa convergência pode estar associada a quantidade de eventos remanescentes após a limpeza do catálogo e aplicação dos métodos de *declustering*.

Conforme pode ser observado na Figura 10, houve um aumento considerável na detecção de sismos a partir de 2012. Esse aumento significativo de registros está relacionado com o aprimoramento da Rede Sismográfica Brasileira a partir de 2008 (Bianchi *et al.*, 2018). A baixa quantidade de registro de eventos sísmicos registrados antes de 2008 dificulta a avaliação da completude devido a menor quantidade de dados, especialmente para eventos de maior magnitude.

Além disso, dados históricos de sismos também são frequentemente incompletos ou imprecisos, dificultando a construção de um catálogo sísmico. Esses fatores combinados tornam desafiadora a estimativa e avaliação da completude, essencial para entender e evitar vieses sobre a verdadeira frequência e distribuição dos sismos ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- ASSUMPÇÃO, M. (1983) "A regional magnitude scale for Brazil" in Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 73, nº 1, p. 237–246. Disponível em: <<https://doi.org/10.1785/BSSA0730010237>>. Acesso em: 25 mar. 2025.
- ASSUMPÇÃO, M.; FERREIRA, J.M.; BARROS, L.V.; BEZERRA, F.H.; FRANÇA, G.S.; BARBOSA, J.R.; MENEZES, E.A.S.; RIBOTTA, L.C.; PIRCHINER, M.; NASCIMENTO, A.F.; DOURADO, J.C. (2014) "Intraplate seismicity in Brazil" in Intraplate Earthquakes, edited by Pradeep Talwani, Cambridge University Press, Capítulo 3, p. 50–71. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/CBO9781139628921.004>>. Acesso em: 25 mar. 2025.
- ASSUMPÇÃO, M.; PIRCHINER, M.; DOURADO, J. C.; BARROS, L. V. (2016) "Terremotos no Brasil: preparando-se para eventos raros" in Boletim SBGf, nº 96, p. 25–29. Disponível em: <http://www.sbgf.org.br/home/images/Boletim_96-2016.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2025.
- ASSUMPÇÃO, M.; CARVALHO, J.M.; DIAS, F.L.; DROUET, S.; BARBOSA, J.R.; BIANCHI, M.B.; COLLAÇO, B.B. (2022) "Magnitude relations between the teleseismic mb, the regional mR and Mw for intraplate earthquakes in Brazil" in Journal of South American Earth Sciences, Vol. 120, Artigo 104038. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104038>>. Acesso em: 29 de mar. 2025.
- BIANCHI, M.B.; ASSUMPÇÃO, M.; ROCHA, M.P.; CARVALHO, J.M.; AZEVEDO, P.A.; FONTES, S.L.; DIAS, F.L.; FERREIRA, J.M.; NASCIMENTO, A.F.; FERREIRA, M.V.; COSTA, I.S.L. (2018) "The Brazilian Seismographic Network (RSBR): Improving Seismic Monitoring in Brazil" in Seismological Research Letters, Vol. 89, nº 2A, p. 452–457. Disponível em: <<https://doi.org/10.1785/0220170227>>. Acesso em: 29 mar. 2025.
- FENTON, C.H.; ADAMS, J.; HALCHUK, S. (2006) "Seismic hazards assessment for radioactive waste disposal sites in regions of low seismic activity" in Geotechnical & Geological Engineering, Vol. 24, p. 579–592.
- GARDNER, J.K.; KNOPOFF, L. (1974) "Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?" in Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 64, nº 5, p. 1363–1367. Disponível em: <<https://doi.org/10.1785/BSSA0640051363>>. Acesso em: 4 de abr. 2025.
- RSBR – Rede Sismográfica Brasileira (2025) "RSBR – Rede Sismográfica Brasileira" in <http://rsbr.on.br/>. Acesso em: 29 de mar. 2025.
- STEPP, J.C. (1972) "Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard" in Proceedings of the 1st International Conference on Microzonation, Seattle, Vol. 2, p. 897–910.
- STIPHOUT, T.; ZHUANG, J.; MARSAN, D. (2012) "Seismicity declustering" in Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis. Disponível em: <<https://doi.org/10.5078/corssa-52382934>>. Acesso em: 4 abr. 2025.
- UHRHAMMER, R. (1986) "Characteristics of northern and southern California seismicity" in Earthquake Notes, Vol. 57, p. 21.