

Monitoramento de chuva em área urbana na Amazônia através do radar meteorológico na plataforma SipamHidro

Rainfall monitoring in urban areas in the Amazon using weather radar on the SipamHidro platform

Cairo Eduardo Carvalho Barreto^{*}, Flávio Augusto Altieri dos Santos^{**}, Raquel Macêdo Lopes Monteiro^{***}, Jean Souza dos Reis^{****}, Edson José Paulino da Rocha^{*****}

^{*}Coordenação de Hidrologia, CENSIPAM, cairobarretoufpa@gmail.com;

^{**}Coordenação de Hidrologia, CENSIPAM, flavio.santos@sipam.gov.br;

^{***}Coordenação de Hidrologia, CENSIPAM, raquelmacedolopes1996@gmail.com;

^{****}Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento, INUMET, jean.dosreis@hotmail.com;

^{*****} Universidade Federal do Pará, eprocha@ufpa.br

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v59i0.93514>

Resumo

O radar meteorológico permite o monitoramento e previsão do deslocamento de tempestades em intervalos de tempo de curto e curtíssimo prazo (nowcasting). O objetivo desta pesquisa é avaliar a eficácia do radar meteorológico para a previsão de eventos extremos de precipitação a partir da aplicação do radar em Área Urbana do SipamHidro. Esta avaliação considerou a tempestade que ocorreu em Manaus no dia 25 de março de 2023. Foram utilizadas as observações de pluviômetros instalados na área urbana de Manaus pelo CEMADEN e as estimativas de precipitação determinadas com o uso do software TITAN. A avaliação baseou-se em cálculos de correlação, representações cartográficas e comparação entre os horários observados e previstos. Os resultados mostram que: a) O evento gerou mais de 135 ocorrências de desastres por extremo de chuva na cidade de Manaus; b) as previsões obtidas pelo radar tendem a subestimar entre 31% e 72% a precipitação observada, mas sua distribuição espacial é similar; c) as correlações entre as precipitações obtidas pelo radar e as observadas nos bairros com pluviômetro foram de $r = 0.59$ a $r = 0.95$, exceto nas proximidades do radar; d) a análise entre os horários previstos e observados indicam uma tendência de antecipação adequada do início da tempestade. Houve correlações significativas entre os dados do radar e os pluviômetros, exceto nas proximidades do radar. Apesar da pouca precisão em medições de chuvas extremas, o radar mostrou potencial como ferramenta de previsão antecipada, destacando a importância do seu desenvolvimento contínuo para melhorar a resposta a eventos extremos em áreas urbanas.

Palavras-chaves:

Redução de riscos e desastres, Precipitações extremas, previsão por Radar.

Abstract

Meteorological radar allows the monitoring and prediction in short and very short-term time intervals of storm movement. The objective of this research is to evaluate the weather radar effectiveness for extreme precipitation events forecasting using the SipamHidro rainfall in urban area application. This assessment was carried out considering the storm that occurred in Manaus

on March 25, 2023. Observations from pluviometers installed in the urban area of Manaus by CEMADEN and estimated precipitation determined using the TITAN software were used. The evaluation was based on Pearson correlation coefficient, cartographic representations and comparison between observed and predicted. The results show that: a) The event generated more than 135 occurrences of disasters due to extreme rain in the city of Manaus; b) forecasts obtained by radar tend to underestimate observed precipitation by between 31% and 72%, but their spatial distribution is similar; c) the correlations between precipitation obtained by radar and observed precipitation in neighborhoods with rain gauges were from $r = 0.59$ a $r = 0.95$, except at the nearby area of the radar; d) the analysis between the predicted and observed times indicates a tendency to adequately anticipate the start of the storm. There were significant correlations between radar data and rain gauges, except in the vicinity of the radar. Despite the lack of precision in extreme rainfall measurements, radar has shown potential as an early forecasting tool, highlighting the importance of its continued development to improve the response to extreme events in urban areas.

Keywords:

Disaster risk reduction, extreme precipitation, Radar forecast.

I. INTRODUÇÃO

O radar meteorológico é uma ferramenta que coleta informações atmosféricas em sua área de alcance através do retorno de pulsos eletromagnéticos emitidos na atmosfera. Esse dispositivo não apenas identifica as formações de nuvens, mas também estima a intensidade da precipitação associada, a estrutura vertical das tempestades e seu deslocamento, desta forma tornou-se uma ferramenta importante e bastante utilizada para o monitoramento de tempestades e para previsão de tempo de curto e curtíssimo prazo (*nowcasting*) de até 2 horas (Han et al., 2009).

A refletividade proveniente das nuvens começou a ser correlacionada com a distribuição do tamanho de suas gotas a partir do estudo de Marshall et al. (1947). Isso levou a uma associação direta com a taxa de precipitação em milímetros por hora. Com base nessas estimativas de intensidade de precipitação (taxa de chuva) e na distância da área chuvosa até um local específico, as autoridades podem tomar medidas preventivas contra tempestades severas (Carvalho et al., 2019; Ochoa-Rodriguez et al., 2019)

No Brasil, observamos um aumento nas ocorrências de desastres hidrológicos, como alagamentos, chuvas intensas, enxurradas, inundações e movimentos de massa. Somente os anos de 2021 e 2022 tiveram um número de ocorrências superior ao registrado em toda a década de 1990, 3.960 e 2.389 ocorrências respectivamente (BRASIL, 2022). O número de pessoas afetadas também aumentou, atingindo 4.848.917 em 2020, 3.916.837 em 2021 e 11.894.018 em 2022 (BRASIL, 2022). O Relatório de Avaliação do Ciclo Hidrológico do IPCC (AR6) indica que o ciclo hidrológico global está se intensificando devido ao

aumento das temperaturas globais, resultando em maior variabilidade na precipitação e eventos mais intensos de chuva e seca (IPCC, 2021). Esse cenário, pode elevar o risco de deslizamentos de terras e inundações repentinas no contexto das alterações climáticas para o Brasil (Marengo et al., 2021).

Com o objetivo de monitorar os riscos hidrometeorológicos na Amazônia Legal, o Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (Cesnipam) iniciou o projeto Sistema Integrado de Monitoramento e Alerta Hidrometeorológico (SipamHidro) em 2014. Esse projeto visa desenvolver e aplicar metodologias de monitoramento de eventos hidrometeorológicos severos na região amazônica. O SipamHidro é uma plataforma digital baseada em arquitetura aberta que integra diversas geotecnologias, metodologias e procedimentos automatizados em um banco de dados. Essa infraestrutura computacional oferece ferramentas para o monitoramento, análise e previsão de eventos hidrometeorológicos (Carvalho et al., 2019).

O módulo de previsão de chuvas em áreas urbanas do SipamHidro desempenha um papel crucial ao gerar previsões de tempestades em uma escala de tempo reduzida, fornecendo informações com uma antecedência de 1 hora. Tal ferramenta é de grande importância para agilizar a compreensão de eventos meteorológicos, tornando as ações de defesa civil e de outras agências, muitas vezes executadas em nível de bairros, mais eficientes e eficazes. Este módulo foi desenvolvido como um sistema cliente-servidor por meio de um serviço web, com o navegador atuando como o principal componente do cliente, usando mapas para as visualizações e interagindo com scripts responsáveis pela aquisição de dados nos servidores de arquivos do PostgreSQL (Carvalho et al., 2019).

O monitoramento de chuvas em áreas urbanas no âmbito do SipamHidro é realizado a partir de dados gerados pelos radares meteorológicos instalados na Amazônia. Esses radares desempenham um papel fundamental na identificação, acompanhamento e previsão de curto prazo (nowcasting) de tempestades que podem representar riscos para a população local, dentro da área de alcance do radar. A ferramenta é funcional e agregada outras informações complementares como imagens do satélite GOES-16 nas bandas do infravermelho, vapor d'água e visível e o modelo de descargas atmosféricas do GLM (Geostationary Lightning Mapper) do mesmo satélite.

A cidade de Manaus é frequentemente exposta a ameaças e danos decorrentes de tempestades, incluindo inundações, alagamentos e movimentos de massa, especialmente nas áreas norte e leste. Esses eventos são registrados em decorrência de alguns aspectos: Um período chuvoso intenso de janeiro a maio (280,8 mm/mês em média); terreno acidentado de encostas íngremes ao norte e à leste da cidade e ao mesmo tempo plano e alagadiço nas porções sul, centro e centro-oeste; terrenos suscetíveis a esses processos geralmente estão ocupados em forma de assentamentos precários, regiões de limitados ou

inexistentes equipamentos urbanos, ocupados por uma população vulnerável do ponto de vista socioeconômico, conforme evidenciado em estudos recentes (CPRM, 2019; Moreira, Mota, 2020; Ramos et al., 2019).

O radar meteorológico de Manaus desempenha um papel fundamental no monitoramento operacional das previsões meteorológicas de curto e curtíssimo prazo conduzidas pelo Censipam. Dados gerados pelo radar são de grande importância para pesquisas relacionadas à análise de eventos climáticos extremos (Farias et al., 2017), à compreensão do comportamento sazonal das tempestades (Giangrande et al., 2023) e ao desenvolvimento de modelos numéricos para previsões meteorológicas que incorporam informações provenientes do radar (de Sousa et al., 2022). Isso possibilita uma notável melhoria na resolução espacial e temporal das previsões de curto prazo relacionadas a tempestades.

O propósito do estudo consistiu em avaliar a eficácia da ferramenta presente no módulo de monitoramento de chuvas em áreas urbanas do SipamHidro na previsão de um evento de precipitação que foi registrada em Manaus em 25 de março de 2023 e resultou em prejuízos para a comunidade local. Dentre os incidentes documentados, incluem-se deslizamentos de terra, inundações, alagamentos e enchentes.

II. METODOLOGIA

O radar meteorológico de Manaus operado pelo Força Aérea Brasileira (FAB) em parceria com o Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (Censipam), é do tipo Doppler banda-S (10 cm de comprimento de onda) com varredura a cada 12 minutos, fica localizado no aeroporto de ponta pelada (sbmn), Manaus-AM. A varredura operacional do radar alcança um raio 240 km, porém a taxa é estima apenas no raio de 120km (Figura 1).

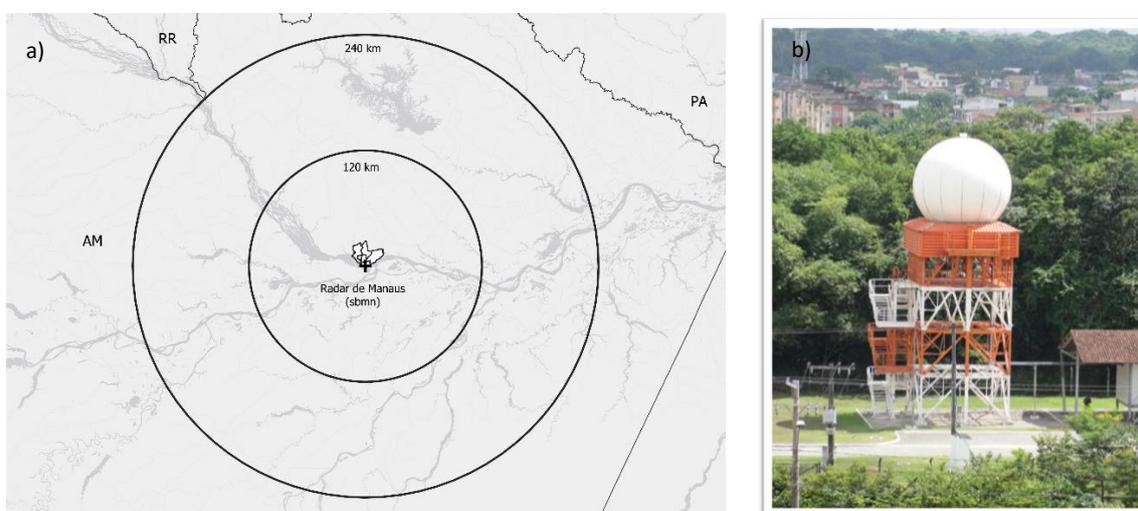


Figura 1: Operacionalização do radar meteorológico de Manaus. a) Localização e raio operacional do Radar. b) Imagem do Radar instalado em Manaus. Fonte: Autores e Censipam, 2023.

O software TITAN (Thunderstorm, Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting), permite extrair os dados medidos e estimados pelo radar meteorológico. A aplicação identifica uma tempestade como sendo uma região contígua tridimensional considerando parâmetros como refletividade, volume, altura e outros, e dados da trajetória como velocidade, previsão de intensificação e outros. Na área espacial de representação os clusters ou células de tempestade serão representadas por elipses ou polígonos no horário *Universal Time Coordinated* (UTC). Além de identificar tempestades, é possível obter previsões dos deslocamentos das células convectivas. O TITAN produz uma previsão com base na extrapolação do comportamento recente dos rastros observados. A previsão de curto prazo da posição e do tamanho das células são baseadas em um ajuste linear ao comportamento recente do trajeto da tempestade (Dixon e Wiener, 1993) (Figura 2).

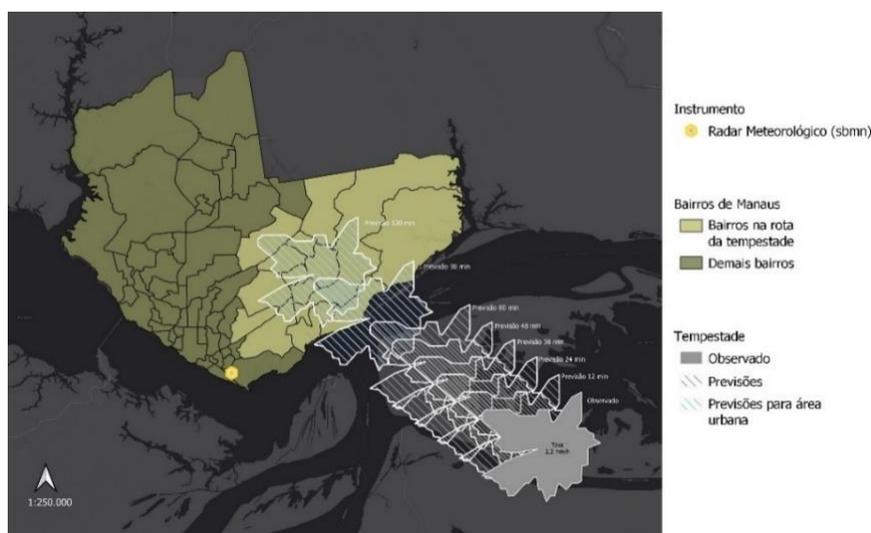


Figura 2: Ilustração da previsão do deslocamento da tempestade pelo TITAN. Fonte: Autores.

Cada formação chuvosa identificada recebe um ID que a acompanha, caso essa tendência de comportamento da trajetória mude, como desmembramento ou fusão de novos núcleos, esta poderá receber um novo ID exclusivo. Os parâmetros para identificação da tempestade neste estudo estão em valores de 35 DBZ de refletividade mínima, volume mínimo de 16 km³, e altura mínima de 2 km e máxima de 30 km. O processo dos dados de rastreamento da tempestade também parte do arquivo MDV (Meteorological Data Volume) do TITAN, convertidos dos dados brutos do Radar, transformados em XML e posteriormente encaminhados ao Banco de Dados e disponibilizados para o SipamHidro por meio de uma API, possibilitando ser acessado como uma camada de visualização no sistema (Carvalho et al., 2019; IPMET, 2005).

O processamento dos dados do radar utiliza quatro ferramentas do projeto Lidar Radar Open Software Environment (LROSE¹): A partir do dado do Radar em *Plan Position Indicator* (PPI) a ferramenta Radx2Grid transforma as coordenadas de grade esférica, coletas pelo radar terrestre, em uma grade regular, coordenadas cartesianas, gerando dados de refletividade em *CAPPI Constant Altitude Plan Position Indicator*. Após esse processo a ferramenta PrecipAccum calcula a taxa de precipitação e a Mdv2Vil estima o conteúdo líquido de água em cada coluna vertical e por fim a PrintMdv transforma os dados de uma grade regular para texto (Carvalho et al., 2019; Lrose-blaze, 2019), como ilustrado na figura 3.

Dentro do Banco de dados do SipamHidro (Figura 3), quando o arquivo de previsão de trajetória (track) faz a interseção com o polígono de área urbana, este gera um novo arquivo com os seguintes atributos: nome do bairro ou cidade da previsão, município correspondente, o radar responsável pela previsão (radar), o id da tempestade identificada, a hora do evento de previsão, o horário observado do radar e a taxa de precipitação. (Carvalho et al., 2019).

O radar pode estimar a quantidade de precipitação no solo realizando uma integração no tempo da taxa de precipitação R (mm/h). A taxa de precipitação da aplicação PrecipAccum em mm/h, é calculada a cada varredura de 12 minutos, de acordo com a quantidade de alvos (nebulosidade) presentes na varredura (Nogueira et al., 2015). A taxa de precipitação aliada a identificação da trajetória da tempestade são as principais funcionalidades do TITAN usadas na aplicação.

¹ Disponível em <https://nsf-lrose.github.io/index.html>.

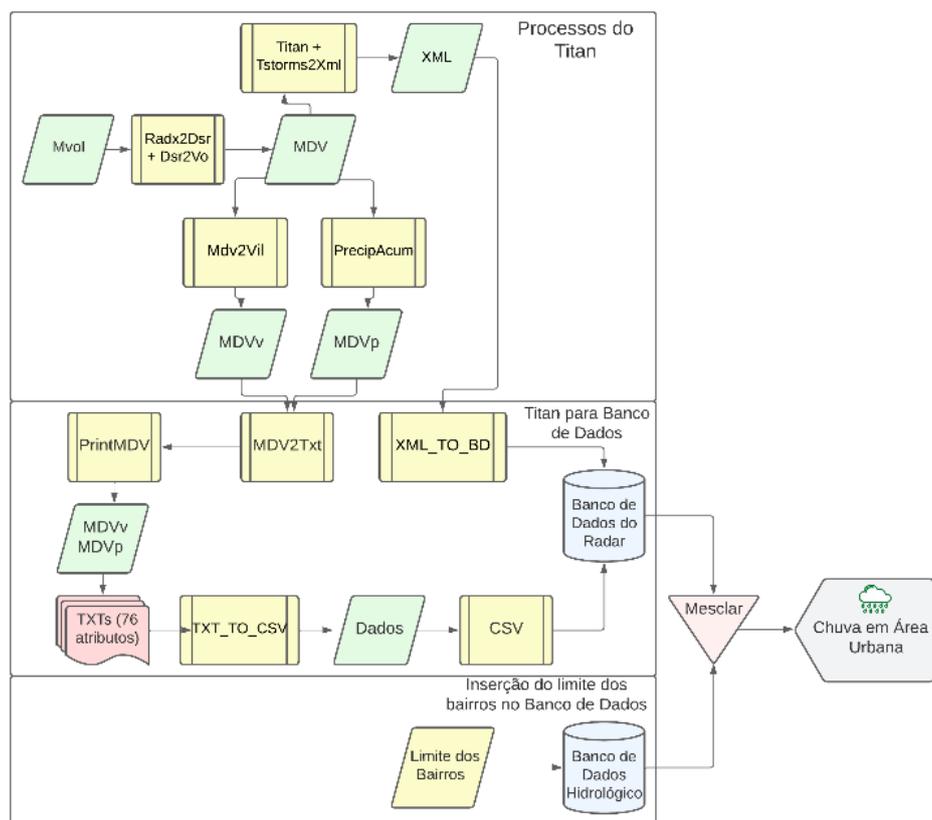


Figura 3: Fluxograma dos processos de obtenção dos dados pelo TITAN e disponibilização do produto na plataforma. Foi dividido em três etapas. Processos do Titan: Aquisição dos dados brutos, transformação da grade e estimativa de precipitação; Conversão e armazenamento: conversão dos dados para texto e armazenamento no banco de dados; Integração com os limites geográficos e interseção com os dados do radar: quando houver intersec entre o polígono da previsão e os bairros, o sistema indicará previsão de precipitação para o bairro. Organização: Autores.

Para avaliar a relação entre a precipitação prevista pelo radar e a observada em solo, foram utilizados oito pluviômetros do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) que estavam operando no dia do evento, até as 16 UTC. Neste horário, o Centro de Cooperação da Cidade (CCC) e a Secretaria Municipal de Segurança Pública e Defesa Social (Semseg) da Prefeitura de Manaus, soltaram notas sobre os desastres ocorridos informando os acumulados de chuva do dia para cada região, disponibilizados pelo Cemaden, momento também em que a tempestade cessou e as estruturas de Defesa Civil começaram a atuar.

Foi usada para identificação de áreas suscetíveis a desastres hidrometeorológicos a Setorização de Áreas de Risco Geológico para Manaus, produzida pelo Serviço Geológico Brasileiro (SGB) e pela Defesa Civil de Manaus (CPRM, 2019). Essa informação geoespacial consiste na identificação e caracterização das porções do território sujeitas a sofrerem perdas ou danos causados por eventos adversos de natureza geológica (SGB, 2021). Os setores foram analisados por bairro para verificação da sua extensão (área), e categorizados por grau de risco. Por estarem em formato ShapeFile serão visualizados e processados com o software Qgis 3.32.3 Lima.

Foram avaliados o tempo de antecipação da tempestade (previsto), a relação entre o acumulado da previsão e acumulado dos bairros e zonas que foram impactados (observado), a relação espacial entre o que foi observado e previsto, nos bairros e zonas, por meio de mapas temáticos e comparação gráfica e análise de correlação. A comparação gráfica e análise estatística foi realizada com o software RStudio 2023.09.0 e a análise e produção cartográfica com o Software Qgis 3.32.3 Lima.

O coeficiente de correlação Pearson (Equação 1) foi a métrica estatística descritiva utilizada para analisar a relação entre os dados previstos pelo radar e o observado em superfície, como usado em Ochoa-Rodriguez et al. (2019), Pappa et al. (2021) e Sebastianelli et al. (2010). O valor de r é um indicador da correlação, neste caso, entre os valores observados e simulados, com amplitude de variação entre -1 e 1 em que o valor 1 indica ajuste perfeito. Neste caso, quanto maior for o valor de r maior será o grau de associação linear entre as variáveis, caso positivo, indica associação linear positiva entre as variáveis, se negativa, indica associação linear negativa entre essas variáveis. Para tanto, foram usados dados dos pluviômetros automáticos do Cemaden para o observado, baixados diretamente na plataforma², e os dados do radar, diretamente do banco de dados do SipamHidro.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Os dados do pluviômetro estão dispostos originalmente em acumulados horários quando não há chuva = 0 ou de dez em dez minutos quando registram chuva > 0. O radar faz a varredura a cada doze minutos e registra no banco quando a taxa é > 0. Para compatibilizar ambos, a previsão e os dados do pluviômetro foram acumulados a cada 30 minutos para normalizar e obter os pares que a análise necessita. Os dados foram analisados apenas quando houve pares correspondentes no formato ($x > 0, y > 0$), (Sebastianelli et al., 2010).

III. RESULTADOS

De acordo com informações disponíveis para a imprensa através do Centro de Comando e Controle (CCC) e da Secretaria de Segurança Pública (Semseg), no dia 25 de março de 2023, até as 18 horas, Manaus registrou mais de 135 ocorrências de desastres por chuvas intensas. Dessas ocorrências, 62 estavam relacionadas a alagamentos, 25 a desabamentos e 22 a deslizamentos. As imagens de satélite (Figura 4) revelam a presença de células convectivas com grande desenvolvimento vertical na região de Manaus, com temperaturas no topo das nuvens variando entre -80°C e -70°C. Essas condições foram observadas no período entre as 10:00 e as 17:00 UTC.

² <http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/>

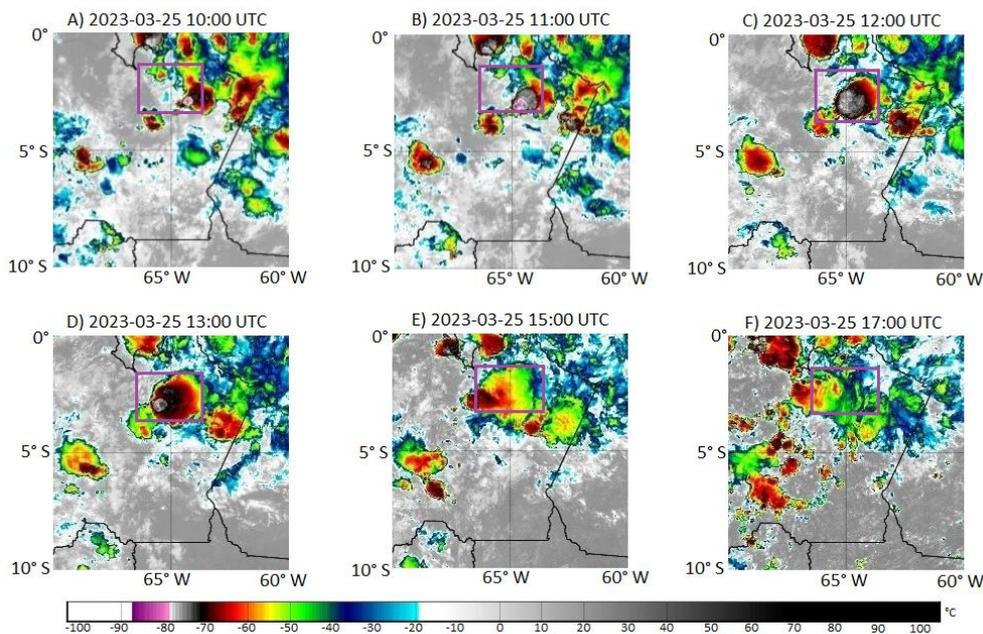


Figura 4 - Imagens de Satélite do GOES-16 no canal 13 (Infravermelho) em 25 de março de 2023: A) 10:00 UTC; B) 11:00 UTC; C) 12:00 UTC; D) 13:00 UTC; E) 15:00 UTC; e F) 17:00 UTC. As cores na legenda representam as temperaturas em °C no topo das nuvens. O retângulo indica a região da cidade de Manaus (3,11° S; 60,025° W).

Fonte: INPE, CPTEC e NOAA.

As ocorrências por chuva intensa por chuva intensa de maior severidade foram registradas na zona Leste, nos bairros Armando Mendes (Comunidade da Sharp) e Gilberto Mestrinho. Outras ocorrências também foram atendidas nos bairros do Zumbi, Japiim (Comunidade Manaus 2000), São José Operário e Jorge Teixeira (Comunidade Nova Floresta). Segundo a imprensa, também houve registros nos bairros Jorge Teixeira (Comunidade Nova Floresta), Tancredo Neves, Distrito Industrial I, Parque 10 de Novembro e Colônia Antônio Aleixo (Figura 5).

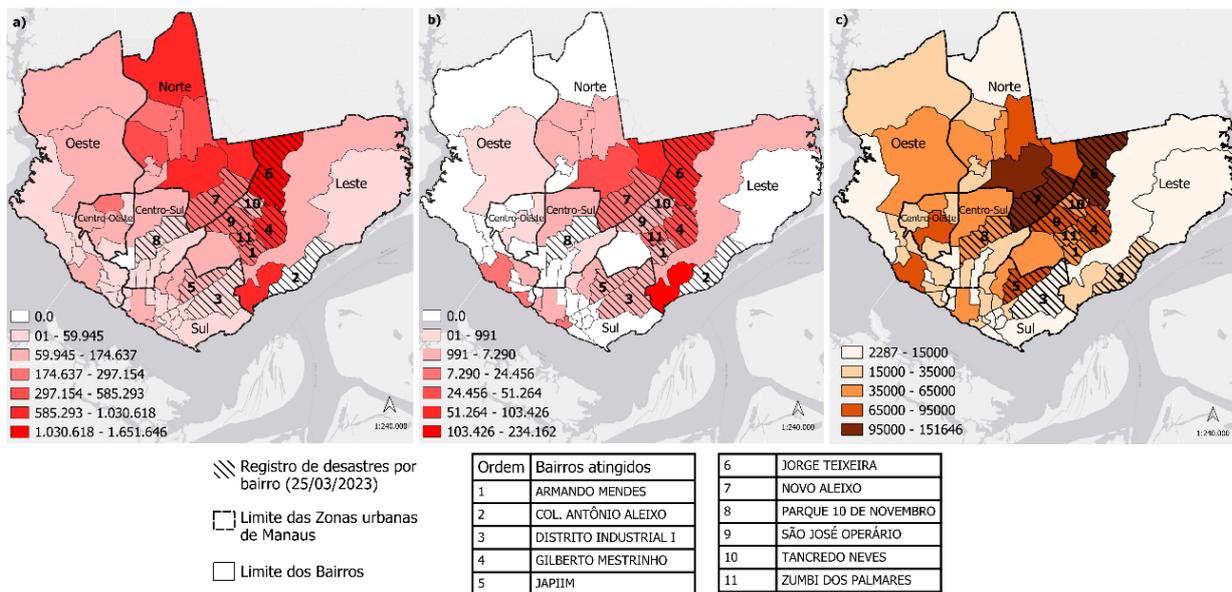


Figura 5: Mapa do total de áreas de risco (CPRM), densidade demográfica por bairro com os registros de ocorrências de desastres no dia 25/03/2023. a) Soma de áreas de risco por Bairro (m²); b) Soma de áreas de risco R4 por Bairro (m²); c) densidade demográfica por bairro.

Fonte: SGB, Defesa Civil de Manaus e Censipam.

Ao observar a figura 5, é possível identificar que algumas ocorrências foram localizadas em bairros que apresentam as maiores concentrações de áreas classificadas como setores de risco, incluindo aqueles com a classificação de grau de risco muito alto (R4), conforme designado pelo SGB e Defesa Civil de Manaus (CPRM, 2019). Notavelmente, a Zona Leste, que foi a região mais afetada pelos desastres de acordo com o CCC, abriga três dos seis bairros de Manaus com a maior concentração de áreas classificadas como setores de risco, sendo o bairro Jorge Teixeira o mais proeminente, e que registrou ocorrências de desastres em 25 de março de 2023. Além disso, essa região inclui dois dos três bairros de toda a cidade com a maior concentração de áreas classificadas como setores de risco muito alto, sendo o bairro Mauzinho o mais destacado, embora não tenha registrado ocorrências no dia 25 de março de 2023.

No dia do evento, todos os bairros de Manaus registraram chuvas conforme previsto. Entre os 15 bairros (Figura 6) que acumularam as maiores taxas diárias previstas, 10 estão localizados na região leste, que foi a mais afetada pelas tempestades, conforme relatado pelas autoridades e pela imprensa. Dos 11 bairros onde a prefeitura e a imprensa relataram impactos devido à chuva, 9 estão entre os 17 bairros com as maiores taxas de chuva previstas. Considerando que todas as previsões foram um evento sucesso, ou seja, houve correspondência entre o previsto e o observado, identificamos que o horário da previsão por bairro coincide com os dados observados nas estações meteorológicas de superfície do Cemaden na Zona Leste de Manaus.

Os bairros Puraquequara (150,9 mm) e Distrito Industrial II (137,7 mm), que acumularam as maiores previsões de chuva consecutivamente, são bairros de baixa densidade populacional e grande

extensão territorial, o que resulta em uma ampla área de cobertura para previsões de tempestade e pouquíssimos setores de risco. Os bairros Parque 10 de Novembro e Japiim estão incluídos na lista devido às ocorrências de desastres registradas, embora não estejam entre os que apresentaram as previsões mais volumosas pelo radar, esses registros tiveram um impacto significativo na população. É relevante destacar que esses bairros estão localizados nas proximidades do radar, o que os coloca dentro da área de cobertura conhecida como "cone cego" ou cone do silêncio.

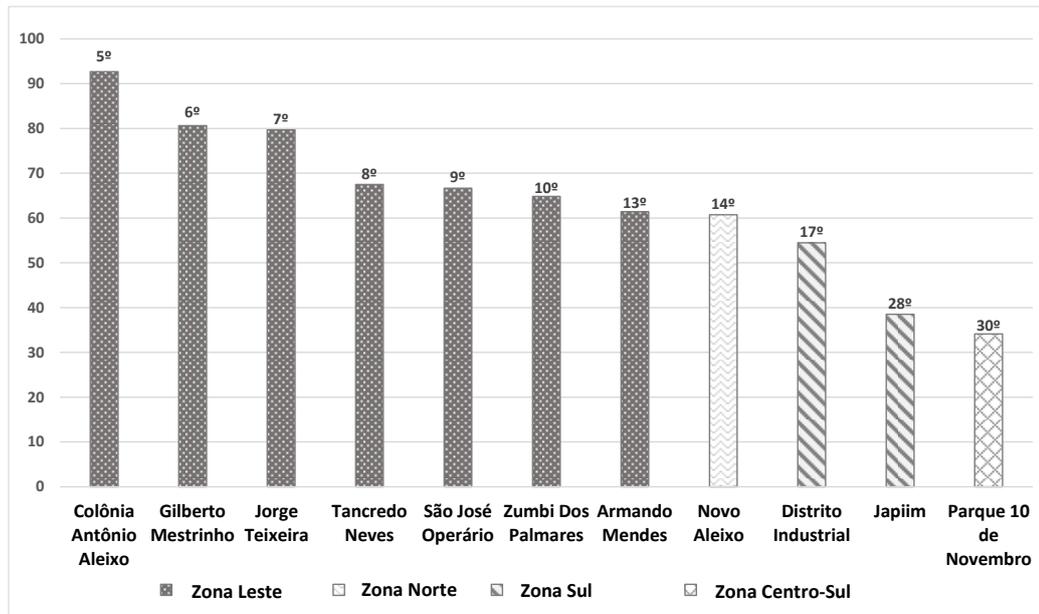


Figura 6: Ordem dos acumulados de precipitação em milímetros (eixo Y), pela previsão por bairros com registros de ocorrências de desastres. Fonte: CENSIPAM; CCC.

Em uma nota direcionada ao Centro de Controle de Chuvas (CCC) da Prefeitura de Manaus em 2023, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) divulgou informações sobre o acumulado de chuva nas áreas urbanas de Manaus com base nas leituras de seus pluviômetros até as 16h UTC (12h). Os valores correspondentes foram os seguintes: Zona Leste de 122 milímetros, Zona Norte de 89 milímetros, Zona Oeste de 54 milímetros, Zona Centro-Sul de 85 milímetros (média das regiões no entorno), Zona Sul de 47 milímetros, e Zona Centro-Oeste de 82 milímetros. Esses dados foram então comparados com as estimativas de chuva acumuladas feitas pelo Sistema Titan para o mesmo período e áreas (Figura 7) usando o método de caracterização diária de chuva de Gouvea et al. (2018).

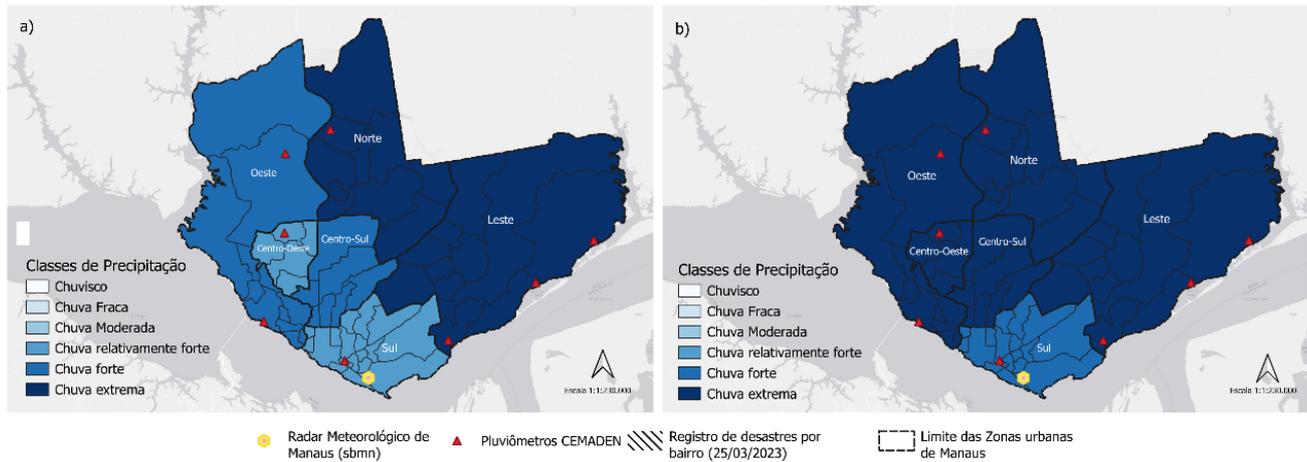


Figura 7: Distribuição espacial dos acumulados por equipamento de coleta: Radar Meteorológico (a) e (b) Pluviômetro. Fonte: CEMADEN e CENSIPAM.

A previsão da aplicação subestimou o observado em 31% para a zona leste (83,7mm), 39% para a zona norte (54,30mm), 52% (5,9mm) para zona oeste (25,9mm), 67% para as zonas centro-sul (27,9mm) e zona sul (15,5mm) e 72% para a zona centro-oeste (23,1mm). Embora a precipitação estimada tenha tendido a subestimar os valores observados pelos pluviômetros, a sua distribuição espacial por zonas mostrou-se igual, com exceção das zonas Oeste e Centro-Oeste, onde houve uma diferença notável. A zona Leste, mais uma vez, apresentou uma considerável variação nos dados em relação aos demais. Mais à frente essa diferença é justificada e melhor apresentada.

No que diz respeito à antecipação do início da tempestade, as previsões iniciais do radar meteorológico (Quadro 1) para os bairros de Puraquequara, Colônia Antônio Aleixo e Mauzinho indicaram o início das chuvas entre 01h:06 e 01h:30 horas. Já nos Bairros Tarumã, Santa Etelvina e Redenção, a previsão antecipou o início das chuvas no período de 01h a 1h:30 horas.

Ao comparar os horários previstos pelo radar com os observados pelos pluviômetros, notou-se uma diferença de tempo variando entre 10 a 20 minutos a mais nos bairros de Puraquequara, Colônia Antônio Aleixo e Mauzinho, e uma diferença de 24 a 47 minutos nos bairros Tarumã, Santa Etelvina e Redenção. É relevante ressaltar que essas foram as primeiras previsões, e as previsões subsequentes tendem a se aproximar dos horários observados, à medida que incorporam novas características do comportamento da tempestade.

Quadro 1 – Comparação entre os horários previstos pela aplicação e observado pelo pluviômetro das duas primeiras tempestades.

Bairro	Tempestade	Observado Radar (hora em UTC)	Hora da Previsão (hora em UTC)	Observado Pluviômetro (hora em UTC)
Puraquequera	1	09h24	10h:54	10h:30
	2	09h:36	10h:36	
Colônia Antônio Aleixo	1	09h:24	10h:54	10h:40
	2	09h:36	10h:36	
Mauazinho	1	09h:24	10h:54	10h:40
	2	10h:36	11h:00	
Tarumã	1	10h:12	12h:12	11h:40
	2	10h:36	12h:06	
Santa Etelvina	1	10h:12	12h:12	11h:30
	2	10h:36	11h:36	
Redenção	1	10h:12	12h:12	11h:20
	2	10h:36	12h:06	

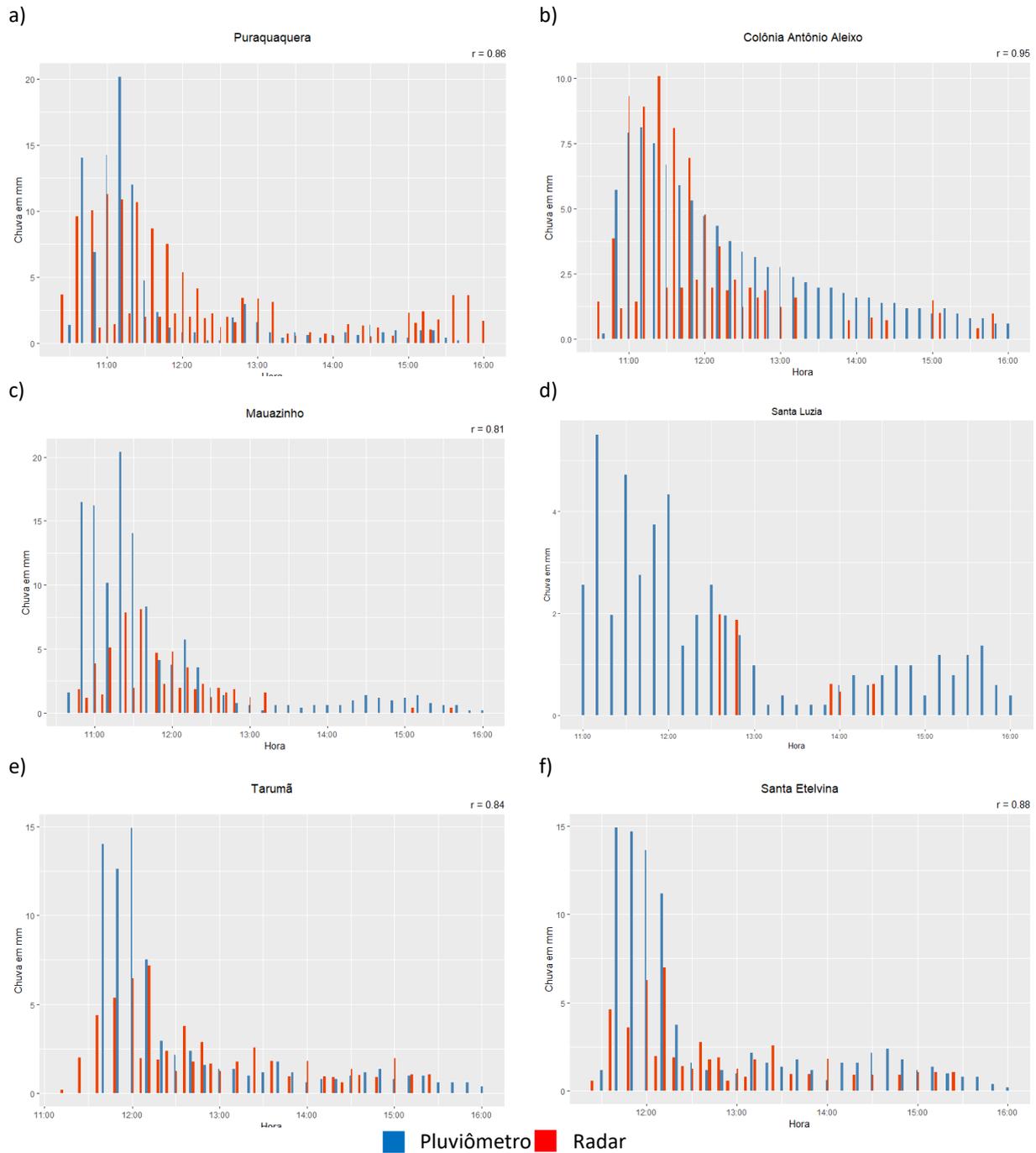
Fonte: CENSIPAM

Ao analisar graficamente os dados observados em comparação com as previsões do radar (Figura 08), foi observado que, em geral, as previsões tendem a subestimar os valores observados. No nível dos bairros, destaca-se que Colônia Antônio Aleixo (Figura 8b), e Puraquequera (Figura 8a), na Zona Leste, demonstraram as melhores correspondências tanto em termos dos registros de chuva (mm/h) quanto previsões horárias (hh:mm). Em seguida, os bairros Tarumã (Figura 8e), e Santa Etelvina (Figura 8f), na Zona Norte, apresentaram uma boa concordância entre os horários previstos, porém uma concordância menor para acumulados mais elevados.

Nos bairros de Mauazinho (Figura 8c), na Zona Leste, e Redenção, na Zona Centro-Oeste, apesar da previsão ter acertado o horário de início da tempestade, houve uma subestimação na quantidade de chuva prevista para acumulados mais elevados e não foi prevista a duração completa do evento. Por outro lado, nos bairros de compensa (Figura 8g), na Zona Oeste, e Santa Luzia (Figura 8d), na Zona Sul, observou-se uma considerável discrepância entre os dados observados e as previsões do radar.

Não houve correlação entre os dados observados e as previsões no entorno do radar, em Santa Luzia (Figura 8d), a 2,1km e em Compensa (Figura 8g) a 8,6km, próximo e na direção do centro urbano de Manaus. Como observado em Sebastianelli et al. (2010), foi constatada nenhuma ou pouca correlação em áreas nas imediações do radar ou nas proximidades com obstáculos verticais, como edifícios, causando interferências por alvos terrestres. Harrison, Driscoll e Kitchen, (2000) explicam que os feixes de radar podem se refletir em objetos terrestres, resultando em ruídos e, por conseguinte, retornando medições imprecisa das precipitações. Dentre essas regiões estão as Zonas Sul (Bairro Santa Luzia), Centro-Sul e

Centro-Oeste (Bairro Redenção) e parte da Região Oeste (Bairro Compensa), essas especificidades acabaram impactando as previsões.



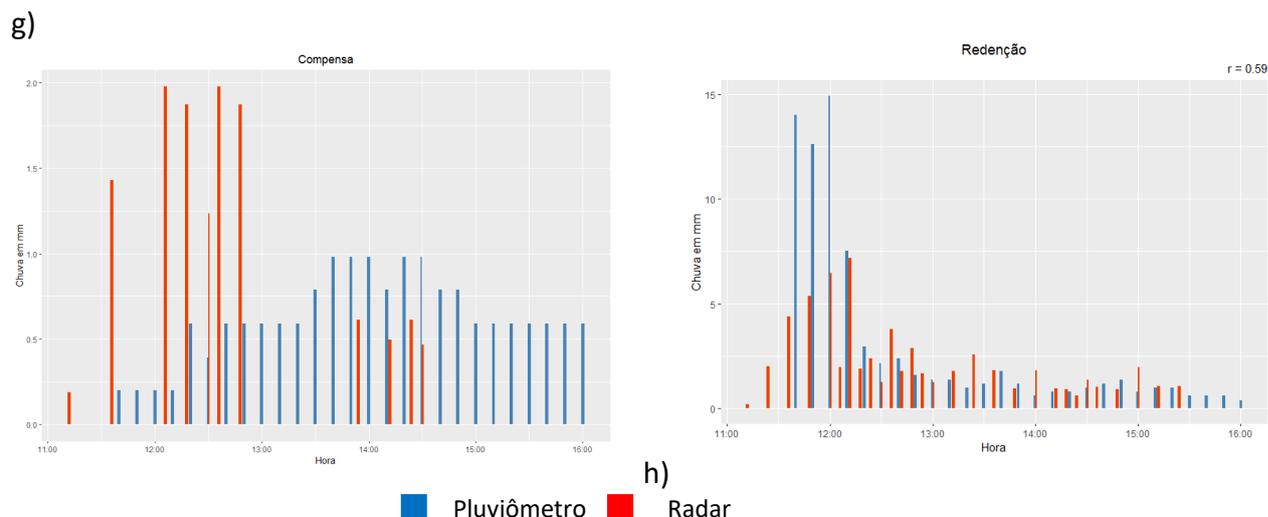


Figura 8: Comparação gráfica entre os registros de chuva da previsão e os observados em pluviômetros e suas correlações onde houve pares registro nos dois equipamentos. Fonte: Censipam e Cemaden.

A alta correlação em Antônio Aleixo $r = 0.95$, Santa Etelvina $r = 0.88$, Puraquequara $r = 0.86$, Tarumã $r = 0.84$ e Mauzinho $r = 0.81$ justifica-se pela adequada distância entre o radar e os bairros, entre 6Km e 18Km, pouca interferência de ruído por obstáculos terrestres e pela correlação de dados de precipitação acumulados de 30 em 30 minutos. Em Sebastianelli et al. (2010) que caracteriza erros de medições do radar pela distância do alvo, foi observado que a correlação começa a aumentar a partir de 6km e vai até 62km, mantendo-se na faixa de $r = 0.6$. Pappa et al. (2021), que também usou o coeficiente de correlação para analisar a eficiência de previsões do radar, considerou bons resultados as altas correlações acima de $r = 0.8$.

Para Redenção $r = 0.59$, apesar de se tratar de uma correlação aceitável (Sebastianelli et al., 2010), é necessário investigar sua diferença entre as demais. Sabe-se apenas que este pluviômetro está na direção de obstáculos terrestres que podem afetar o sinal, porém a uma distância que possivelmente não interfere na varredura em azimute, logo, é premeditado afirmar que isto seja relevante para este resultado. Considerando que há algumas particularidades na mensuração e compatibilização para a comparação do quantitativo de chuva em dois equipamentos distintos, como o pluviômetro e o radar (Ochoa-Rodriguez et al., 2019; Sebastianelli et al., 2010), outros detalhes podem ser considerados no ajuste entre dos dados para esta área.

Apesar da falta de precisão nas medições de chuva em magnitudes extremas (mm/h), como observado em estudos anteriores (Ochoa-Rodriguez et al., 2019), a aplicação demonstrou ter potencial para atuar como uma ferramenta de previsão antecipada de eventos adversos de tempo. A análise revelou que a aplicação apresentou predominantemente uma correlação muito forte e forte entre a previsão e o observado em solo, antecipando o evento em pelo menos 1 hora e 6 minutos para os bairros de

Mauazinho e Puraquequara, e 1 hora e 16 minutos para o bairro Colônia Antônio Aleixo. Nos demais bairros onde não havia pluviômetros para fins de comparação, a aplicação conseguiu antecipar o evento para mais de 41 bairros até as 10h UTC.

IV. CONCLUSÃO

Este estudo buscou avaliar a eficácia do módulo de monitoramento de chuvas em áreas urbanas do SipamHidro na previsão de um evento de precipitação registrado em Manaus, em 25 de março de 2023. Os resultados revelam uma série de insights cruciais para o entendimento da capacidade da ferramenta em antecipar eventos adversos de tempo e aprimorar a gestão de riscos em áreas urbanas.

O módulo de previsão de chuvas, integrado ao SipamHidro, demonstrou ser uma ferramenta vital para a antecipação de tempestades em uma escala de tempo reduzida, fornecendo informações com uma antecedência de aproximadamente 1h hora. A análise temporal entre os horários previstos e observados destacou esta tendência de antecipação adequada do início da tempestade, com variações de tempo dentro de uma faixa aceitável, 32 minutos entre previsto e observado para 2 horas de antecipação, em Tarumã, e até 6 minutos para 1 hora de antecipação em Puraquequara. Essa capacidade de antecipação, particularmente em bairros como Mauazinho, Puraquequara e Colônia Antônio Aleixo, evidencia a utilidade prática da ferramenta na gestão de eventos climáticos severos, antecipando ações emergenciais como alertas, sinais sonoros, mobilização dos órgãos de defesa civil direcionado à bairros com maior potencial de danos com maior, antecipação do potencial do desastre, entre outras medidas.

A comparação entre as previsões do radar meteorológico e os dados observados indicou que, em geral, houve uma subestimação dos valores previstos, especialmente em áreas como Compensa e Santa Luzia, por limitações físicas e de localização do radar. No entanto, destacam-se as correspondências mais precisas nos bairros de Colônia Antônio Aleixo, Santa Etelvina, Puraquequara, Tarumã e Mauazinho indicando uma eficácia notável nessas localidades. A distribuição espacial da precipitação, embora tenha apresentado similaridade com as previsões em grande parte da cidade, revelou diferenças notáveis nas zonas Oeste e Centro-Oeste. Essas discrepâncias podem fornecer percepções valiosas para melhorar a precisão das previsões nessas áreas específicas.

Embora tenha sido observada uma pequena imprecisão entre as medições de chuvas em magnitudes extremas, a aplicação do módulo demonstrou um potencial significativo como ferramenta de previsão antecipada. A alta correlação entre as previsões e os dados observados, especialmente em áreas estratégicas, ressalta a importância da continuidade do desenvolvimento e refinamento dessa tecnologia para aprimorar a capacidade de previsão e resposta a eventos climáticos adversos em áreas urbanas. Este

estudo contribui para o avanço na compreensão das complexidades envolvidas na previsão de eventos climáticos em contextos urbanos e destaca a necessidade contínua de inovação e aprimoramento das ferramentas existentes.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Gestor e Operacional do Sistema da Amazônia (CENSIPAM) pelas condições materiais e dados para o desenvolvimento da pesquisa. Os autores também gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pela concessão da bolsa de desenvolvimento tecnológico – DTI-B.

V. REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. Atlas Digital de Desastres no Brasil. Brasília: MDR, 2022. <<http://atlasdigital.mdr.gov.br/>>
- CARVALHO, M.; VIEIRA, A.; CRUZ, M.; NAZARÉ, A.; SANTOS, F.; DIAS, D.; Monitoramento de Tempestades através de Radar Meteorológico no SipamHidro. In: WORKSHOP DE COMPUTAÇÃO APLICADA À GESTÃO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS (WCAMA), 10., 2019, Belém. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2019. p. 176-179. ISSN 2595-6124. DOI: <https://doi.org/10.5753/wcama.2019.6434>
- CHUVAS deste sábado superam as do dia 12/3 e no acumulado do mês, índice já ultrapassa o esperado para março. Por Prefeitura de Manaus, Manaus-AM, ano 2023, 23 Abril 2023. Disponível em: <<https://www.manaus.am.gov.br/noticias/nota/chuvas-deste-sabado-superam-as-do-dia-12-3-e-no-acumulado-do-mes-indice-ja-ultrapassa-o-esperado-para-marco/>>
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Mapeamento das áreas de risco geológico da zona urbana de Manaus (AM). Manaus: CPRM, 2019. [Relatório Técnico]
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Guia de procedimentos técnicos do Departamento de Gestão Territorial / Organizado por Julio Cesar Lana et al. [...] – Brasília: CPRM, 2021. 1 recurso eletrônico: <https://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/22262>
- DIXON, M. WIENER, G. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—A radar-based methodology. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, v. 10, n. 6, p. 785-797, 199
- FARIAS, C. S.; VEIGA, J. A. P.; OLIVEIRA, E.; QUEIROZ, M. R. (2017). An analysis of the extreme rainfall case occurred in manaus during september 30TH 2013. *Ciência e Natura*, 39(2), 436–450. <https://doi.org/10.5902/2179460X22693>
- GIANGRANDE, S. E.; BISCARO, T. S.; PETERS, J. M. Seasonal controls on isolated convective storm drafts, precipitation intensity, and life cycle as observed during GoAmazon2014/5. *Atmospheric Chemistry Physics*, 23, 5297–5316, 2023 <https://doi.org/10.5194/acp-23-5297-2023>
- GOUVEA, R. L.; CAMPOS, C. C.; MENEZES, J. T.; MOREIRA, G. F. Análise de frequência de precipitação e caracterização de anos secos e chuvosos para a bacia do rio itajá. *revista brasileira de climatologia*. No 14. Vol. 22. ISSN:2237-8642 (Eletrônica) DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v22i0.55276>

HAN, L.; FU, S.; ZHAO, L.; ZHENG, Y.; WANG, H.; LIN, Y.; HAN, L.; FU, S.; ZHAO, L.; ZHENG, Y.; WANG, H.; LIN, Y. 3D Convective storm identification, tracking, and forecasting—an enhanced titan algorithm. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, v. 26, n. 4, p. 719–732, 2009. ISSN 0739-0572. Disponível em: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2008JTECHA1084.1>

HARRISON, D.; DRISCOLL, S.; KITCHEN, M. Improving precipitation estimates from weather radar using quality control and correction techniques. *Meteorological Applications*, 6, pp 135-144, 2000. <https://doi.org/10.1017/S1350482700001468>

IPMET-UNESP, Instituto de Pesquisas Meteorológicas. Transferência de Tecnologias para Aplicação Direta ao Monitoramento e Nowcasting Usando os Radares MeteorológicoS Doppler do IPMET-UNESP. [Relatório Técnico]. Jaqueline Murakami Kokitsu Coordenador: Dr. Gerhard Held outubro/2005.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001

MARENGO, J. A.; CAMARINHA, P. I. A.; LINCOLN M. D.; Fabio. BETTS, R. A. Extreme Rainfall and Hydro-Geo-Meteorological Disaster Risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C Global Warming Scenarios: An Analysis for Brazil. *Frontiers in Climate*. Vol. 3, 2021. DOI: 10.3389/fclim.2021.610433; ISSN: 2624-9553. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fclim.2021.610433>

MARSHALL, J. S.; LANGILLE, R. C.; PALMER, W. Measurement of rainfall by radar. *Journal of Meteorology*, v. 4, p. 186-192, 1947.

MICHAEL, M. B.; DIXON, M. JAVORNIK, B.; LEE, W. C.; LEE, B. M.; DEHART, J.; CHA, T. LROSE-BLAZE-2019. nsf-Irose/Irose-blaze: Irose-blaze-20190105 (Irose-blaze-20190105). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2532758>

MOREIRA, A. M.; MOTA, M. A. Santos. Valoração Econômica de Danos Causados por Inundações na Cidade de Manaus nos Últimos 20 Anos (1999-2018). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 02, p. 855-869, 2020.

OCHOA-RODRIGUEZ, S.; WANG, L. P.; WILLEMS, P.; ONOF, C. A Review of radar-rain gauge data merging methods and their potential for urban hydrological applications. *Water Resources Research*. Volume 55, Issue8. August 2019. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018WR023332>

PAPPA, A.; BOURNAS, A.; LAGOUVARDOS, K.; BALTAS, E. Analysis of the Z-R relationship using X-Band weather radar measurements in the area of Athens. *Acta Geophysica*, 69(4), 1529–1543. doi:10.1007/s11600-021-00622-5

RAMOS, C. M.; TORRES, A. P.; PEREIRA, I. N. A.; FROTA, C. A. Geotechnical characteristics of mass movements in Manaus – Am. *International Journal for Innovation Education and Research*, Dhaka, Bangladesh, v. 7, n. 12, p. 15–27, 2019. DOI: 10.31686/ijer.vol7.iss12.1838.

RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>

SEBASTIANELLI, S.; RUSSO, F.; NAPOLITANO, F.; BALDINI, L. Comparison between radar and rain gauges data at different distances from radar and correlation existing between the rainfall values in the adjacent pixels. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 7, 5171–5212, 2010. doi:10.5194/hessd-7-5171-2010.

SHERMAN, G. 'QGIS - A Free and Open Source Geographic Information System' (Viena: GNU - Free Software Foundation, Inc., 2002), p. <http://www.qgis.org/en/site/>

SOUZA, P. M. M.; VENDRASCO, E. P.; SARAIVA, I. et al. Impacto da Assimilação de Dados de Radar na Simulação de um Evento de Chuva Forte sobre Manaus na Amazônia Central. Puro Aplic. Geophys. 179 , 425–440 (2022). <<https://doi.org/10.1007/s00024-021-02901-0>>