MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2025/02.04.12.21-RPQ

DIRETRIZES PARA A IMPLEMENTAÇÃO DO NOWCASTING NO BRASIL

Andrea Salome Viteri Lopez
Bruno Zanetti Ribeiro
Carlos Augusto Rodriguez Morales
Deydila Michele Bonfim dos Santos
Diego Pereira Enoré
Éder Paulo Vendrasco
Edmilson Dias de Freitas
Ernani de Lima Nascimento
Guilherme Schild
Ivan Saraiva
Izabelly Carvalho da Costa
Laís Alves Santos
Maicon Eirolico Veber
Márcio Nirlando Gomes Lopes
Rachel Ifanger Albrecht
Thiago Souza Biscaro
Vinicius Banda Sperling
Vitor Goede

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD2USNNW34T/4CSKRJL>

INPE
São José dos Campos
2024

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 1216/2024/SEI-INPE):
Presidente:
Dr. Thales Sehn Korting - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)
Membros:
Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Heyder Hey - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
BIBLIOTECA DIGITAL:
Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:
Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2025/02.04.12.21-RPQ

DIRETRIZES PARA A IMPLEMENTAÇÃO DO NOWCASTING NO BRASIL

Andrea Salome Viteri Lopez
Bruno Zanetti Ribeiro
Carlos Augusto Rodriguez Morales
Deydila Michele Bonfim dos Santos
Diego Pereira Enoré
Éder Paulo Vendrasco
Edmilson Dias de Freitas
Ernani de Lima Nascimento
Guilherme Schild
Ivan Saraiva
Izabelly Carvalho da Costa
Laís Alves Santos
Maicon Eirolico Veber
Márcio Nirlando Gomes Lopes
Rachel Ifanger Albrecht
Thiago Souza Biscaro
Vinicius Banda Sperling
Vitor Goede

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD2USNNW34T/4CSKRJL>

INPE
São José dos Campos
2024

Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

CONTEÚDO

SUMÁRIO EXECUTIVO **3**
QUALIFICAÇÃO DO PROBLEMA **4**
1. INTRODUÇÃO **7**
2. GRUPO DE TRABALHO DADOS OBSERVACIONAIS **9**
2.1. Radares meteorológicos 10
2.1.1 Descrição dos radares meteorológicos em território nacional 10
2.1.2 Recomendações sobre a configuração dos radares meteorológicos e o uso de seus dados para estimativa de precipitação 16
2.2. Dados e produtos do satélite geoestacionário GOES 22
2.3. Dados de descargas elétricas 25
2.4 Dados de estações meteorológicas 30
2.5 Dados de radiossondagem 31
2.6 Integração dos dados 33
2.7 Rastreamento dos sistemas precipitantes 35
3. GRUPO DE TRABALHO MODELAGEM NUMÉRICA **39**
3.1 Introdução 39
3.2 Estado da previsão numérica voltada para o prognóstico de curto/muito curto prazo e nowcasting de tempestades convectivas no Brasil 42
3.3 Recomendações para a previsão numérica no Brasil voltada ao prognóstico de curto/muito curto prazo e ao nowcasting 44
3.3.1 Previsão por Ensemble com modelo de resolução relativamente baixa (mesoescala) 45
3.3.3 Mesoanálise atualizada a cada 1 h (~12 km de espaçamento horizontal) 46
3.3.4 Previsão determinística com modelo de convecção permitida e assimilação de dados de radar e descargas elétricas 47
3.4 Conclusões e recomendações 48
4. GRUPO DE TRABALHO TEMPO SEVERO E ALERTAS **51**
4.1 Introdução 51
4.2 Estado dos avisos e alertas meteorológicos no Brasil 51
4.3 Recomendações 59
4.3.1 Nomenclatura 59
4.3.2 Organização do sistema de nowcasting no Brasil 59
4.3.3 Fenômenos que devem ser alertados 60
4.3.4 Alerta de Tempestade Severa 62
4.3.5 Aviso de curto prazo (até de 12 horas de antecedência) 65
4.3.6 Ferramenta para envio do alerta em ambiente operacional 66
5. GRUPO DE TRABALHO FORMAÇÃO E CAPACITAÇÃO **67**
5.1 Introdução 67
5.2 Webinars 67
5.3 Material de treinamento do COMET 68

5.4 Workshop....72
6. GRUPO DE TRABALHO VERIFICAÇÃO.... 73
6.1 PRETS - Plataforma de Registro de Eventos de Tempo Severo....73
6.1.1 Introdução....73
6.1.2 O Relato de Tempo Severo.... 74
6.1.3 Incerteza no relato.... 75
6.1.4 Controles de qualidade....76
6.2 Satélite Ambiental....77
CONSIDERAÇÕES FINAIS.... 81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.... 82

SUMÁRIO EXECUTIVO

Através da PORTARIA Nº 663, DE 15 DE DEZEMBRO DE 2022 (https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-663-de-15-de-dezembro-de-2022-451334376) o Diretor do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, no uso de suas atribuições legais, conforme o disposto na Portaria/MCT nº 407, de 29 de junho de 2006, e tendo em vista o disposto no Processo SEI nº 01340.004810/2022-61, constituiu o Comitê Científico de *Nowcasting*, no âmbito do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, vinculado à Coordenação-Geral de Ciências da Terra - CGCT, com o objetivo de reunir os principais cientistas brasileiros, especialistas no assunto, que serão responsáveis por elaborar as diretrizes para a implementação e operacionalização da previsão de tempo de curto e curtíssimo prazo (também chamada de previsão imediata ou *nowcasting*) no país. O Comitê Científico de Nowcasting foi coordenado por Izabelly Carvalho da Costa (membro interno) e pela vice-coordenadora Rachel Ifanger Albrecht (membro convidada).

As diretrizes para a implementação e operacionalização do *nowcasting* abrangem as seguintes áreas de discussão:

I. configuração dos radares meteorológicos e produtos derivados;
II. configuração dos produtos de satélites meteorológicos;
III. produtos de previsão numérica por *ensemble* e em alta resolução;
IV. definições dos fenômenos atmosféricos que devem ser alertados, incluindo os limiares de intensidade severa e o formato dos alertas para os tomadores de decisão e a população;
V. organização de treinamento e capacitação de pessoal para a realização do *nowcasting*;
VI. validação do *nowcasting* de eventos de tempo severo.

Para tratar das áreas mencionadas acima, o Comitê foi subdividido em grupos de trabalho (GT), sendo eles: Dados Observacionais; Modelagem Numérica; Tempo Severo e Alertas; e Formação e Capacitação. Juntos, os GTs trazem neste documento um levantamento do estado atual da Meteorologia Nacional e apresenta

sugestões de diretrizes para a implementação e operacionalização do *nowcasting* no Brasil.

QUALIFICAÇÃO DO PROBLEMA

A meteorologia cada vez mais está presente na vida da população e nas ações dos indivíduos, seja para programações de curto prazo como para planejamentos em longos períodos. Com o avanço das tecnologias e uso difundido de *smartphones*, as informações de tempo se tornaram cada vez mais acessíveis. Adicionalmente, praticamente todos os noticiários, sejam eles escritos, eletrônicos, via rádio ou televisão, reservam espaço para divulgação da previsão do tempo. O setor econômico também compreendeu a importância do tempo e clima e passou a investir fortemente em produtos climáticos para o planejamento do plantio, planejamento energético, gestão de recursos hídricos, entre outros. Recentemente, a empresa B3 e o Instituto Nacional de Meteorologia firmaram protocolo de intenções, que prevê acesso amplo, de uma das principais empresas de infraestrutura de mercado financeiro no mundo, às informações do banco de dados meteorológicos do órgão (ESCOBAR, 2023). O objetivo é apoiar o desenvolvimento de novos produtos para o setor de seguros; corroborando na redução dos custos para o produtor rural e para toda a sociedade. O setor de saúde também vem realizando inúmeras pesquisas com a finalidade de associar fatores de tempo e clima com as condições do paciente.

Fenômenos atmosféricos intensos são responsáveis por vários desastres naturais que ocorrem no país e no mundo. No Brasil, no período entre 1991 e 2012, ocorreram cerca de 38.996 registros de desastres naturais, sendo que 8.515 (22%) ocorreram na década de 1990, 21.741 (56%) ocorreram na década de 2000 e apenas nos anos de 2010, 2011 e 2012 o número foi de 8.740 (22%). Embora os números indiquem aumento dos registros ao longo dos anos, os autores do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, do Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres, da Universidade Federal de Santa Catarina não sustentam a afirmação de elevação no número de desastres naturais no país, visto que a fragilidade do Sistema de Defesa Civil não priorizava a atualização dos registros. De

acordo com o Observatório dos Desastres Naturais, é possível subentender que esta fragilidade ainda está presente em nossas organizações, visto que dos 5.570 municípios do país, apenas 2.132 (cerca de 38%) possuem Coordenação Municipal de Defesa Civil.

A ausência desta organização ou do conjunto dos órgãos (Coordenação Municipal de Defesa Civil, Corpo de Bombeiros e Núcleos Comunitários de Defesa Civil) e ações (Plano de Contingência, Mapeamento de Áreas de Risco, Plano de Redução de Riscos e Plano Diretor com prevenção para enchentes) reflete em inúmeras situações de emergência e elevados gastos públicos. Entre os anos de 2003 e 2018 foram mais de 32.121 decretos que geraram cerca de R$173,65 bilhões em gastos entre os anos de 2012 e 2015 (LIBERATO, 2019). De acordo com as decretações, os desastres mais frequentes estão relacionados a eventos de chuva intensa e a estiagem.

Os desastres naturais podem ser considerados como o impacto de um fenômeno natural extremo ou intenso sobre um sistema social, que gera danos físicos e econômicos. Podem ser de natureza biológica (epidemias, infestações de insetos), geofísica (terremotos, vulcões, movimento de massa), hidrológica (inundações, enchentes) e meteorológica (secas, temperaturas extremas, tempestades severas). Existem desastres súbitos ou de evolução aguda, como por exemplo terremotos, inundações, granizo e ventos fortes; graduais ou de evolução crônica (ex.: estiagem) e por combinações de eventos parciais (ex.:. acidentes de trânsito em decorrência de outros eventos). No mundo, as inundações lideram o ranque de desastres naturais, contribuindo com aproximadamente 33% dos casos, seguido das tempestades (23%), secas (23%), epidemias (15,2%), terremotos e tsunamis (7%), deslocamentos de massa (4,5%), erupções vulcânicas (1,4%) e avalanches (0,7%) (MARCELINO, 2008; TOMINAGA et al., 2009). No Brasil, os eventos que afetam o maior número de pessoas são a estiagem (51,31%), seguidos das enxurradas (20,66%), inundações (12,04%), vendavais (7,07%), granizo (4,20%), movimento de massa (1,79%), alagamentos (1,32%), erosão (0,9%), incêndios (0,48%), tornados (0,12%) e geadas (0,12%). No entanto, os eventos que causam maior número de mortos são a enxurrada (58,15%), seguido dos movimentos de massa (15,60%), inundações (13,40%), estiagem e secas (7,57%),

vendavais (3,74%), alagamentos (0,78%), granizos (0,44%), erosões (0,17%), tornados (0,12%) e incêndios (0,03%) (Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012).

E quando um único evento meteorológico gera uma série de desastres naturais? De acordo com a NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) as tempestades severas podem produzir alguns dos eventos naturais mais destrutivos e mortais da natureza, incluindo tornados, granizo, ventos fortes, raios e inundações. A NOAA classifica uma tempestade como severa, quando produz rajadas acima dos 93 km/h e/ou granizos acima de uma polegada de diâmetro (~2,54 cm) e/ou um tornado. Devido à sua evolução rápida, estes eventos são de difícil previsão, necessitando de monitoramento contínuo. Nos Estados Unidos da América, este monitoramento é realizado pela NWS (*National Weather Service*), com 122 escritórios espalhados pelo país gerando previsões diárias, bem como avisos de tempestades, tornados e inundações, garantindo a integridade de milhares de pessoas. No entanto, o processo de previsão, análise, acompanhamento e emissão de alertas faz parte de um complexo sistema, que conta com uma variedade de sensores e ferramentas, incluindo modelos numéricos de tempo, imagens de satélite, produtos de rede de radares meteorológicos, informações de estações meteorológicas de superfície e de altitude.

Com dimensões continentais, o Brasil é acometido com eventos meteorológicos de todas as escalas, desde grande até escala local (CAVALCANTI et al., 2009). As tempestades severas são observadas diariamente em diversas regiões do país (NASCIMENTO, 2005). O monitoramento de eventos de tempo severo de curto e curtíssimo prazo no Brasil não é prerrogativa de nenhuma Instituição Federal e sequer há uma normatização para emissão de avisos e alertas destes eventos. Alguns estados da federação, por terem passado por situações de perdas de vidas e alto prejuízo material, fazem o monitoramento de eventos meteorológicos de curtíssimo prazo através de suas Defesas Civis (ex.: Santa Catarina e Rio Grande do Sul). A carência de procedimentos padronizados e a falta de meteorologistas qualificados na área de monitoramento de eventos severos em curto e curtíssimo prazo motivou a constituição do Comitê Científico de *Nowcasting,* a partir dos esforços de especialistas brasileiros no assunto de instituições públicas

estaduais e federais. Este comitê tem como premissa elaborar diretrizes para implementação e operacionalização do serviço de previsão de tempo de curto e curtíssimo prazo no país, incluindo o alerta como produto final.

1. INTRODUÇÃO

A operacionalização da previsão e precisão do local e magnitude de eventos extremos necessita de previsões nas diversas escalas de tempo e cada escala de tempo engloba a obtenção de dados e geração de produtos especializados. Cronologicamente, é necessário (OMM, 2017, 2019):

a) A previsão de curto prazo (12-72h), que fornece o panorama geral do estado da atmosfera e tem como ferramenta essencial os modelos numéricos de previsão de tempo que necessitam como dado de entrada variáveis meteorológicas observadas por vários instrumentos e sensores;
b) A previsão de muito curto prazo (2-12h), também obtida por modelos numéricos, mas que fornece a atualização em escalas de tempo usuais de 1 a 3 horas e resolução espacial de poucos quilômetros (1-3 km);
c) A previsão de curtíssimo prazo (0-2h), ou nowcasting, focada em fornecer previsões em tempo real (ou quase) e de alta resolução (< 1 km) de eventos locais e de mesoescala em curtos períodos de tempo. Isso inclui a atualização rápida (< 1h) de dados observacionais sobre tempestades, precipitação intensa, vento forte, granizo, tornados e visibilidade (nevoeiro), e necessita da análise de modelos numéricos com atualizações na menor escala temporal (idealmente < 1 hora) e espacial (< 1 km) possíveis.
d) A emissão de avisos e alertas meteorológicos de potenciais eventos severos para a população e tomadores de decisão em diversos setores da sociedade e economia, sendo este o produto final do *nowcasting*.

Logo, um previsor de *nowcasting* não necessita apenas de observações de vários instrumentos e sensores e previsões de modelos numéricos, mas de ferramentas de previsão e monitoramento em um **sistema integrado**. O sistema integrado apresenta todas as variáveis no mesmo espaçamento de tempo e grade,

onde as informações das previsões individuais são avaliadas de acordo com o desempenho de cada componente, com o principal propósito de aprimorar a capacidade da previsão. O previsor de *nowcasting* também necessita que o seu produto final, isto é, seus avisos e alertas meteorológicos, alcancem o usuário imediatamente para que o tempo de resposta seja o maior possível. Neste sentido, neste documento os GTs reúnem a descrição dos componentes e direcionamentos necessários para a implementação do nowcasting no país. Mais especificamente:

- Seção 2: descreve detalhadamente o conjunto de dados (radares meteorológicos, satélites, redes de detecção de descargas elétricas (raios), estações de superfície, perfis de vento e radiossondagens) necessários para *nowcasting*, as limitações dos dados existentes no Brasil e soluções para o problema.
- Seção 3: descreve o estado da previsão numérica do tempo (PNT) no país e os modelos numéricos disponíveis de alta resolução espacial e resoluções temporais voltadas para o *nowcasting* (0-2h), muito curto (2-12h) e curto (12-72h) prazo.
- Seção 4: apresenta o estado atual da organização da meteorologia operacional brasileira, atuais metodologias utilizadas para envio de avisos e alertas referentes a tempestades convectivas e uma análise crítica dos avisos e alertas enviados para situações de tempestades severas no Brasil.
- Seção 5: aponta para a necessidade da capacitação e formação dos meteorologistas para terem a habilidade especializada de *nowcasting*.
- Seção 6: descreve a necessidade de se manter um banco de dados de registros de ocorrência de eventos severos para fins de documentação e verificação.

Ao final do documento, os GTs resumem os principais pontos e apontam sugestões de diretrizes e encaminhamentos para a implementação de nowcasting no Brasil. Embora o nowcasting possa abranger qualquer tipo de evento, este documento foca principalmente nas diretrizes relacionadas à previsão de eventos convectivos de precipitação, como tempestades e perigos associados (e.g., altas taxas de precipitação, granizo, ventos fortes).

2. GRUPO DE TRABALHO DADOS OBSERVACIONAIS

As observações são o ingrediente fundamental para o monitoramento e previsão de condições meteorológicas perigosas e para a verificação das previsões. Segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM), um **sistema especialista de nowcasting** projetado para previsão de tempestades e suas adversidades (e.g., precipitação, granizo, ventos fortes, tornados e microexplosões) deve priorizar as seguintes bases de dados observacionais (OMM, 2017): (a) **dados de satélite**, ainda sob condições de "céu-claro," para estimar parâmetros pré-convectivos, como a estabilidade atmosférica, bem como para monitorar a formação, desenvolvimento e deslocamento das nuvens; (b) **dados de radares meteorológicos**, que permitem a identificação de tempestades e padrões de precipitação, a avaliação de sua intensidade, trajetória e a localização e deslocamento das linhas de convergência na camada limite; (c) **dados de descargas elétricas** para quantificar tendências de intensificação e localizar tempestades elétricas, acompanhando sua evolução em áreas não captadas pelos radares. Além disso, **observações em altitude** (radiossondagens e perfiladores de sensoriamento remoto) de temperatura, umidade e ventos são utilizadas para criar perfis de cisalhamento vertical do vento e estabilidade atmosférica, auxiliando na estimativa do tipo de tempestade que pode se formar. Adicionalmente, dados provenientes de **estações de superfície** são empregados para monitorar possíveis variações na estabilidade atmosférica. A Tabela 1 fornece uma análise detalhada da aplicação de diferentes tipos de observações na emissão de alertas e no monitoramento de fenômenos meteorológicos específicos, incluindo também os modelos numéricos regionais discutidos pelo GT de Modelagem Numérica na Seção 3.

Tabela 1: Ranqueamento da utilidade do tipo de observação/produto para emissão de avisos e monitoramento para fenômenos meteorológicos específicos. Adaptado de OMM (2017).

Fenômeno	Estações de superfície	Rede densa de estações	Observações em altitude	Satélite	Descargas elétricas	Radares	Modelos Numéricos Regionais
Localização de tempestades	4	2	5	1*	1	1	3

Precipitação							
intensidade	2	2	5	3	5	1	5
enxurrada	4	1	5	3	5	1	3
extensa região	4	1	5	2	5	1	2
Granizo							
presença	5	2**	3	2	1	1	4
tamanho	5	2**	3	3	5	1	4
Tornado	6	5	5	4	5	1	5
Microexplosão	5	2	5	4	5	1	4

Notas:
1 Na maioria das vezes pode ser usado para emitir alertas.
2 Pode ser usado para emitir um alerta.
3 Pode ser usado para emitir um aviso.
4 Em ocasiões limitadas pode ser usado para emitir um aviso.
5 Útil apenas quando combinado com outras observações.
6 Utilidade limitada mesmo quando combinada com outras observações.
* Embora os avisos possam ser feitos sobre a localização de tempestades, a localização geralmente não é tão específica quanto com radar ou descargas elétricas.
** Estações que incluem observações de granizo, como METAR.

Baseado nesta recomendação da OMM, o GT de Dados Observacionais deste Comitê Científico de Nowcasting reuniu nesta seção uma descrição detalhada e recomendações sobre os seis itens de tipos de observação da Tabela 1 considerando a rede de observação em território nacional.

2.1. Radares meteorológicos

2.1.1 Descrição dos radares meteorológicos em território nacional

O GT fez um levantamento dos radares meteorológicos pertencentes a órgãos nacionais e estaduais (Tabela 2). São 54 radares cobrindo aproximadamente 55% do território nacional (Figura 1a).

O INPE recebe dados operacionalmente de 34 radares (DECEA, CENSIPAM, CEMADEN, CEMIG, Secretaria de Defesa Civil de Santa Catarina (SDC SC), INEA e FUNCEME, Figura 1b). Este GT analisou as estratégias de varredura destes radares. Foram identificados diversos problemas, entre eles, o mais simples de ser

resolvidos é o tempo de repetição de varredura que pode ser reduzido em até 50% para os radares com abertura de feixe entre 1,8 e 2 graus que utilizam varredura com repetição de 10 ou 12 minutos, sem perda da qualidade de dados.

Tabela 2: Lista de radares meteorológicos no Brasil, incluindo a instituição responsável, banda do radar e tipo de polarização.

Radar	Instituição	Banda	Tipo (SP = polarização simples, DP = polarização dupla)
EM OPERAÇÃO			
Gama - DF *	DECEA	S	SP
Pico do Couto - RJ *	DECEA	S	SP
Morro da Igreja - SC *	DECEA	S	SP
Santiago - RS *	DECEA	S	SP
Canguçu - RS *	DECEA	S	SP
São Roque - SP *	DECEA	S	SP
Petrolina - PE *	CEMADEN	S	DP
São Francisco - MG *	CEMADEN	S	DP
Almenara - MG *	CEMADEN	S	DP
Maceió - AL *	CEMADEN	S	DP
Salvador - BA *	CEMADEN	S	DP
Três Marias - MG *	CEMADEN	S	DP
Natal - RN *	CEMADEN	S	DP
Jaraguari - MS *	CEMADEN	S	DP
Santa Teresa - ES *	CEMADEN	S	DP
Macaé - RJ *	INEA	S	DP
Guaratiba - RJ *	INEA	S	DP
Lontras - SC *	SDC SC	S	DP
Chapecó - SC *	SDC SC	S	DP
Araranguá - SC *	SDC SC	X	DP
Joinville - SC *	SDC SC	X	DP
Fortaleza - CE *	FUNCEME	X	SP
Quixeramobim - CE *	FUNCEME	S	SP

Recife - PE	APAC	X	DP
São Luís - MA *	CENSIPAM	S	SP
Manaus - AM *	CENSIPAM	S	SP
São Gabriel da Cachoeira - AM *	CENSIPAM	S	SP
Porto Velho - RO *	CENSIPAM	S	SP
Macapá - AP *	CENSIPAM	S	SP
Boa Vista - RR *	CENSIPAM	S	SP
Tabatinga - AM *	CENSIPAM	S	SP
Tefé - AM *	CENSIPAM	S	SP
Cruzeiro do Sul - AC *	CENSIPAM	S	SP
Santarém - PA *	CENSIPAM	S	SP
Teixeira Soares - PR	SIMEPAR	S	SP
Cascavel - PR	SIMEPAR	S	DP
Curitiba - PR	SIMEPAR	X Mini	DP
Niterói - RJ	Defesa Civil Niterói	X	DP
Sumaré - RJ	Alerta Rio	C	SP
Salesópolis - SP	CTH	S	DP
Mateus Leme - MG *	CEMIG	C	DP
Bauru - SP	IPMET	S	SP
Presidente Prudente - SP	IPMET	S	SP
São José dos Campos - SP	IACIT	S	DP
Aracruz - ES	Vale do Rio Doce	S	DP
Carajás - PA	Vale do Rio Doce	X	DP
São Luiz - MA	Vale do Rio Doce	X	SP
São Paulo - SP	Cientec	X	DP
São Paulo - SP	USP	X Mini	DP
Goiânia - GO	Defesa Civil de Goiânia	X Mini	DP
Alcântara - MA	CLA	X	DP
PREVISTOS			
Ilhabela - SP	UNESP	X	DP
Petrópolis - RJ	INEA	X	DP

Campinas - SP	UNICAMP	X	DP
Belém - PA	DECEA	S	DP
Rio Branco - AC	DECEA	S	DP
Vilhena - RO	DECEA	S	DP
Chapada dos Guimarães - MT	DECEA	S	DP
Serra do Cachimbo - PA	DECEA	S	DP

Nota: * Radares que o INPE recebe os dados operacionalmente.

a)

Figura 1: a) Cobertura espacial dos radares meteorológicos em operação e os previstos no país; b) Cobertura espacial dos radares meteorológicos em operação e recebidos no INPE.

Os problemas encontrados foram compilados em relatórios e enviados para cada instituição que possui radar (Anexo 1). Importante mencionar que nesse processo de envio e avaliação dos relatórios por parte das instituições, o GT identificou a falta de profissionais especializados em radar em praticamente todas as instituições que possuem radares, o que tem dificultado a interlocução, e mostra a importância da formação de profissionais nesta área.

Os formatos de dados utilizados por todos os radares são lidos pelas bibliotecas mais comuns disponíveis para manipulação de dados (PyART (HELMUS; COLLIS, 2016), wradlib (HEISTERMANN; JACOBI; PFAFF, 2013), NASA's Radar Software Library (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA, 2017; WOLFF; KELLEY, 2009)). Notou-se que o radar de Mateus Leme-MG, operado pela CEMIG necessita de um pré-processamento, já que seu volume scan vem separado em 2 arquivos. Outro problema notado neste radar é a interferência sofrida por redes WLAN, fenômeno comumente observado em radares banda-C.

Conforme apresentado na Figura 2, nota-se que o efeito de interferência é acentuado em observáveis de dupla polarização, visto que a transmissão de sinais de comunicação é feita em polarização vertical. **A aquisição de novos radares banda-C é fortemente contraindicada por este comitê**, visto que mesmo com a regulação do uso de faixas de frequências pelos órgãos competentes, há interferência de sinais de telecomunicação nos radares. Estudos mostram que na Europa 50% dos equipamentos de telecomunicações com possível interferência na banda-C não seguem as normas das agências regulatórias (ELECTRONIC COMMUNICATIONS COMMITTEE, 2017). Recomendações desse tipo já foram feitas para todos os operadores de radares em todo o mundo (SALTIKOFF et al., 2016).

Figura 2: Interferência de redes WLAN no radar banda-C da CEMIG em Mateus Leme.

Os radares mais antigos (DECEA e CENSIPAM) apresentam oscilações entre 0,5 e 1 grau em relação a elevação nominal durante o reposicionamento da antena entre as elevações, chegando a apresentar um setor de até 90 graus (¼ de observação) sem o correto posicionamento da antena. Os valores reais de elevação estão codificados no cabeçalho de cada raio, o que possibilita o uso do valor real no processamento dos produtos como CAPPI e campos de precipitação. Porém, este fato deve ser conhecido pelos operadores e verificado nos algoritmos de processamento.

A maioria dos radares analisados apresentam *staggering* em suas PRFs (Pulse Repetition Frequency) na razão de ⅘, exceto os radares do CENSIPAM que usam ⅔. Embora o uso de *staggering* de ⅔ resulta em uma velocidade não ambígua menor, o resultado obtido apresenta menos ruídos, e o *unfolding* pode ser feito através de pós-processamento.

2.1.2 Recomendações sobre a configuração dos radares meteorológicos e o uso de seus dados para estimativa de precipitação

Considerando que a maioria dos radares brasileiros foram adquiridos com o propósito de monitoramento e nowcasting, a recomendação desse comitê, compartilhada com todas as instituições, é para diminuir o tempo de repetição da varredura para 5 minutos, manter estratégias de "*staggered PRF*" apenas nas elevações mais baixas (no máximo nas primeiras 4 elevações, ou até até 5 graus), e utilizar uma única PRF nas outras elevações, possibilitando o aumento da velocidade da antena sem perda de qualidade dos dados. De acordo com a Figura 3, uma taxa de amostragem M de 25 amostras por raio garante um desvio padrão entre 1 e 2 dBZ, dependendo da variância (isto é, da largura espectral) observada dentro do volume iluminado. Estudos experimentais colocam um valor de M igual a 15 para um desvio de 1 dBZ (MUELLER; KENNEDY; BRUNKOW, DAVID A., 1989). Quanto maior a largura espectral, menor o número de amostras necessárias para um mesmo desvio padrão, e valores de largura espectral (σ_v) em situações de chuva encontram-se acima de 2 m^2/s^2. Os valores de σ_{vn} apresentados na figura

correspondem ao valor de σ_v normalizado pela largura de Nyquist, conforme a equação $\sigma_{vn} = 2T_s\sigma_v/\lambda$. Para um radar banda-S e PRF de 600 Hz, um valor de σ_v de 2 m^2/s^2 equivale a um valor aproximado de σ_{vn} de 0,06 m/s. A título de comparação, a rede de radares NEXRAD, dos EUA, utiliza 30 amostras por raio como valor mínimo para varreduras volumétricas.

Figura 3: Relação entre o número de amostras M e o desvio padrão da refletividade para diferentes valores de largura espectral normalizada (FUKAO; HAMAZU, 2014)

Para as elevações altas (acima de 6 graus) pode-se aumentar gradualmente ainda mais a PRF, já que os feixes nessas elevações não sofrem com restrição de alcance, cobrindo 18 km de altitude. As estratégias de varredura propostas são apresentadas nas Figuras 4 e 5, e nas Tabelas 3 e 4. Os parâmetros podem ser revisados de acordo com o objetivo de cada instituição, mas o imperativo é ter um volume a cada 5 minutos. Os resultados apresentados aqui aplicam-se aos radares banda-S, que compreendem a maioria dos radares operacionais no Brasil (Tabela 2). Outro aspecto verificado foi a resolução radial, que depende da largura de pulso utilizada. Larguras de pulso maiores aumentam a sensibilidade do radar, mas por outro lado, impedem o uso de PRFs altas (diminuindo então o alcance máximo) e fazem o tamanho do volume amostrado aumentar. Na média, os radares brasileiros

usam uma resolução radial entre 250 e 500 metros, com largura de pulso de 1 µs. Recomendamos o uso de uma resolução radial de 250 m (quando possível) e largura de pulso acima de 1 µs como configuração padrão (2 µs quando possível), valores que podem ser utilizados com PRFs abaixo de 1000 Hz. Para PRFs acima de 1000 Hz, e dependendo do hardware do radar, apenas pulsos curtos (0.5 µs) podem ser usados, dada a relação entre PRF e largura de pulso.

Figura 4: Estratégia proposta para radares banda-S com antena de 1 grau de abertura. A última elevação deverá ser removida caso a instituição faça questão de manter uma varredura de vigilância de 400 km.

Tabela 3: Estratégia proposta para radares banda-S com antena de 1 grau de abertura, indicando velocidade da antena, alcance, PRF, e número de amostras.

Ângulo de elevação [grau]	PRF1 [Hz]	PRF2 [Hz]	Range Máximo [km]	Velocidade da antena [grau/s]	N° de Amostras PRF1	N° de Amostras PRF2	N° de Amostras Totais	Tempo de varredura [s]
0,5	600	400	250	10	30	20	50	36
1,4	600	400	250	10	30	20	50	36
2,3	600	400	250	10	30	20	50	36
3,2	600	400	250	10	30	20	50	36
4,1	750	0	200	15	50	0	50	24
5,1	800	0	187,5	16	50	0	50	22,5
6,5	1000	0	150	20	50	0	50	18
8,3	1200	0	125	24	50	0	50	15

10,5	1200	0	125	24	50	0	50	15
13	1200	0	125	24	50	0	50	15
16	1200	0	125	24	50	0	50	15
							Tempo (11 elevações) [s]	268,5
							Tempo (10 elevações) [s]	253,5
1	375	0	400	12	31,25		Tempo (vigilância) [s]	30
							Tempo (10 elevações + vigilância) [s]	283,5

Figura 5: Estratégia proposta para radares banda-S com antena de 2 graus de abertura (DECEA e CENSIPAM). Nessa estratégia já está contabilizado o tempo necessário para a varredura de vigilância requerido por essas instituições.

Tabela 4: Estratégia proposta para radares banda-S com antena de 2 graus de abertura, indicando velocidade da antena, alcance, PRF, e número de amostras.

Ângulo de elevação [grau]	PRF1 [Hz]	PRF2 [Hz]	Range Máximo	Velocidade da antena [grau/s]	N° de Amostras PRF1	N° de Amostras PRF2	N° de Amostras Totais	Tempo de varredura [s]
1	600	400	250	10	30	20	50	36
3	600	400	250	10	30	20	50	36
5	600	400	250	10	30	20	50	36

7	1000	0	150	20	50	0	50	18
9	1000	0	150	20	50	0	50	18
11	1000	0	150	20	50	0	50	18
14	1000	0	150	20	50	0	50	18
17	1000	0	150	20	50	0	50	18
20	1000	0	150	20	50	0	50	18
							Tempo (9 elevações) [s]	216
1	375	0	400	12	31,25		Tempo (vigilância) [s]	30
							Tempo (9 elevações + vigilância) [s]	246

Há uma grande variabilidade da precipitação ao longo do Brasil, em parte ditada pela distribuição de tamanho de gotas de chuva, o que impacta diretamente a qualidade da estimativa de precipitação feita por radares meteorológicos, principalmente os de polarização simples. Para a região de Manaus, Wang et al. (2018) estudaram a variabilidade desta distribuição de acordo com a estação e tipo de sistema precipitante (convectivo ou estratiforme). Para algumas regiões do país os dados das campanhas do projeto CHUVA (MACHADO et al., 2014) podem ser usados para a melhor compreensão das propriedades microfísicas e distribuição de tamanho de gotas dos sistemas precipitantes. Com base nessas distribuições pode-se então desenvolver relações entre a refletividade medida pelo radar (Z) e a taxa de precipitação (R), mais adequadas para cada localidade, conhecidas como relações Z-R. Essas relações são operacionalmente usadas para estimar os campos de chuva nos produtos dos radares meteorológicos. Elas são simples expressões de potência da forma $Z = a\ R^b$, tal que *a* e *b* são parâmetros dependentes dos processos de formação da precipitação, que possuem grande variabilidade regional (ROSENFELD; ULBRICH, 2003). Os dados coletados pelo Projeto CHUVA estão disponíveis para livre acesso (http://ftp.cptec.inpe.br/chuva/) e foram coletados para as cidades de Alcântara/MA, Fortaleza/CE, Belém/PA, São José dos Campos/SP,

Santa Maria/RS, e Manaus/AM. As relações Z-R para algumas das localidades das campanhas do Projeto CHUVA WANG et al., 2018 para a cidade de Manaus) encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5: Relações Z-R calculadas a partir de dados observados durante as campanhas do Projeto CHUVA.

Região	Relação Z-R
Alcântara/MA	$Z = 362\ R^{1,32}$
Fortaleza/CE	$Z = 311\ R^{1,31}$
Belém/PA	$Z = 336\ R^{1,32}$
São José dos Campos/SP	$Z = 337\ R^{1,38}$
Manaus/AM	$Z = 174\ R^{1,56}$
	$Z = 344\ R^{1.4}$

Independentemente da relação Z-R usada, é imperativo que radares de dupla polarização façam uso dessa capacidade e utilizem relações KDP-R e ZDR/KDP-R (RYZHKOV; GIANGRANDE; SCHUUR, 2005). O uso dessas relações melhora significativamente a estimativa de precipitação de chuvas intensas, e ao não usá-las, o operador do radar não está justificando o investimento em um equipamento com essa capacidade, que tem um custo muito mais elevado do que um radar de polarização simples. Todos os radares de dupla polarização possuem a opção de geração de campos de precipitação utilizando esses algoritmos, não sendo necessária nenhuma configuração mais elaborada pelos operadores, nem alterações nas receitas já utilizadas. Um exemplo da melhoria atingida com o uso de relações utilizando observáveis polarimétricos é apresentada na Figura 6, para o caso ocorrido em 18 e 19 de fevereiro de 2023 no litoral norte de SP, onde foram observados, em pluviômetros, acumulados de mais de 600 mm em 24 horas. Nota-se que o acumulado utilizando apenas relações Z-R não atinge nem a metade do valor acumulado utilizando relações polarimétricas.

Para os radares de polarização simples, na falta de relações Z-R calculadas com uso de disdrômetros, sugere-se o uso da relação Z-R utilizada pelo sistema NEXRAD dos EUA, em que *a* = 300 e *b* = 1,4 ($Z = 300\ R^{1,4}$). Estes valores de *a* e *b* irão aumentar os valores de precipitação no caso de refletividades altas, diminuindo a subestimação de acumulados de chuva em situações de chuva convectiva. No caso de radares banda-X, é primordial que os dados passem por um processo de correção de atenuação antes do uso dos dados para estimativas de precipitação, sob a pena de uma alta subestimação dos valores estimados.

Figura 6: Acumulado de precipitação utilizando o radar do CTH, na esquerda, utilizando uma relação Marshall-Palmer, e na direita, utilizando relações Z/ZDR/KDP-R.

2.2. Dados e produtos do satélite geoestacionário GOES

Os satélites GOES de nova geração (a partir do GOES-16), possuem um imageador multiespectral de 16 canais, denominado ABI (Advanced Baseline Imager). As informações de diversos canais desse imageador podem ser combinadas utilizando uma técnica chamada de “composição RGB”, com o propósito de realçar a presença e evolução de fenômenos relevantes, tais como neblina, poeira, focos de incêndio, fumaça, neve/gelo, plumas de cinzas vulcânicas, propriedades das nuvens, temperatura da massa de ar, características de umidade,

convecção profunda entre outros. Essas imagens RGB são criadas pela combinação de dois ou mais canais do ABI, por meio de diferenças de canais ou operações mais complexas, resultando em componentes de cores vermelho, verde e azul. O resultado final de uma composição RGB destaca características atmosféricas e de superfície, dependendo da receita escolhida, tornando visíveis detalhes que seriam difíceis ou demorados de identificar utilizando apenas imagens de um único canal. Ao combinar os dados desses canais e mapeá-los nos canais de cores RGB, uma imagem em cores falsas é criada, onde as cores representam diferentes características ou propriedades meteorológicas. Por exemplo, o produto *Cloud Phase RGB* utiliza o canal de 1,6 µm como vermelho, 2,3 µm como verde, e 0,64 µm como azul. Maiores contribuições no vermelho significam nuvens com alto conteúdo de água, contribuições no verde significam nuvens com hidrometeoros pequenos, e no azul, nuvens espessas com alto conteúdo de gelo. Um exemplo dessa composição é apresentado na Figura 7.

Figura 7: composição RGB Cloud Phase, para o estado de São Paulo. Tons azulados representam nuvens altas, tons amarelados nuvens com gotículas pequenas, tons rosa nuvens com gotículas grandes.

Além das composições RGB, é possível obter informações de sondagens atmosféricas utilizando o imageador multiespectral do satélite GOES-16. Estas

sondagens são obtidas usando o algoritmo variacional unidimensional (1DVAR) baseado nas medições dos canais infravermelho do ABI em conjunto com as previsões a curto prazo do modelo GFS (NOAA Global Forecast System) como parâmetro inicial a ser ajustado (SCHMIT et al., 2019). Dessa forma, é possível obter perfis de temperatura e umidade bem como água precipitável em situações de céu claro. Com base nesses perfis, são derivados índices que indicam a instabilidade da atmosfera tais como Lifted Index (LI), Convective Available Potential Energy (CAPE), Total Totals (TT), K index (KI) e Showalter Index (SI). Apesar de não ser um sondador, os produtos têm a vantagem de ter ampla cobertura (Full Disk), com boa resolução temporal (10 minutos) e espacial (10 km) permitindo assim a avaliação de índices de instabilidade para regiões onde não há informações de radiossondagens. Os resultados mostram que o produto tem boa linearidade em relação às observações. Na Figura 8, são apresentadas comparações entre alguns dos índices de instabilidade estimados e os calculados a partir de observações para as estações de lançamento de radiossondagens sul-americanas ao longo do ano de 2022 no horário de 12 UTC.

Figura 8: Comparação entre índices de instabilidade gerados a partir do produto de sondagens atmosféricas do satélite GOES-16 e radiossondagens.

2.3. Dados de descargas elétricas

O Brasil é o país com a maior incidência de descargas elétricas no mundo (ALBRECHT et al., 2016), resultando em uma média de 132 mortes por ano, direta ou indiretamente causadas por raios (CARDOSO et al., 2014). No contexto da previsão de curtíssimo prazo, os dados de descargas elétricas totais, abrangendo a combinação das descargas intranuvem (IN) e nuvem-solo (NS), desempenham um papel crucial na aprimoração dos sistemas de previsão e alerta de tempo severo. A

atividade elétrica está diretamente associada à presença de graupel e granizo dentro das nuvens e à intensidade das correntes ascendentes. As descargas IN geralmente manifestam-se como os primeiros raios durante os estágios iniciais da tempestade, ocorrendo alguns minutos após o início da formação de graupel e granizo. A frequência de descargas NS aumenta na maturação e no final do ciclo de vida da tempestade (GOODMAN et al., 1988; KREHBIEL, 1981)|. Em quase todos os casos, a atividade de descargas IN predomina sobre a atividade total de raios (WILLIAMS, 2001). Um rápido aumento na atividade elétrica (*lightning-jump*, em inglês) dentro de uma tempestade frequentemente antecipa a ocorrência de fenômenos severos, como granizo, ventos fortes e tornados (GATLIN; GOODMAN, 2010; SCHULTZ et al., 2017; SCHULTZ; PETERSEN; CAREY, 2011).

No Brasil, há 5 redes de detecção de descargas elétricas em solo e 1 sensor óptico a bordo de satélite, e a Tabela 6 resume as principais características (ALBRECHT; CECIL; GOODMAN, 2014). **Para o *nowcasting* de tempo severo e monitoramento de atividade elétrica, as redes que detectam descargas elétricas totais são as mais apropriadas, sem necessidade de distinção entre os tipos de descargas.** Entretanto, para o setor elétrico, a informação do tipo de descarga (i.e, NS) é de extrema importância.

Ao monitorar a frequência de ocorrência e a extensão (área de abrangência) das descargas elétricas, o sistema de *nowcasting* pode realizar várias funções essenciais: (i) identificar áreas com risco de descargas elétricas em solo e risco para aeronaves; (ii) prever a intensificação ou enfraquecimento da tempestade; (iii) antecipar a severidade quando ocorrem aumentos súbitos na atividade elétrica; (iv) rastrear a tempestade com atualizações quase em tempo real (menos de 1 minuto); e (v) servir como uma fonte principal de dados quando dados de radar e satélite estão indisponíveis.

A integração dos dados de descargas elétricas com outras informações meteorológicas oferece uma compreensão abrangente da evolução das tempestades e possíveis eventos severos associados. Por exemplo, o rastreamento das tempestades baseado em campos de refletividade do radar meteorológico ou de temperatura de brilho de satélites juntamente com a atividade elétrica, permite a identificação de correntes ascendentes intensas e probabilidade de ocorrência de

tempo severo. Uma tempestade que apresenta um súbito aumento da atividade elétrica (mais de 10 raios por minuto e taxa de raios acima de 2 desvios-padrão em 10 minutos) é uma tempestade que produz muito gelo (principalmente graupel e granizo) e potencialmente severa, com alta probabilidade de ocorrência de granizo em solo, ventos fortes, e até tornado. A Figura 9 ilustra a atividade elétrica (raios acumulados em 10 minutos) e o conteúdo de gelo, derivado da refletividade do radar meteorológico, em uma supercélula que gerou granizo em solo em pelo menos 3 cidades do Rio Grande do Sul em 14 de outubro de 2015. Esta super célula foi rastreada com o campo de refletividade juntamente com a atividade elétrica. Este exemplo mostra claramente o aumento contínuo do conteúdo integrado de gelo para enormes valores de até 12 x 10^6 kg, juntamente com o súbito aumento da atividade elétrica que antecede a ocorrência de granizo em solo nas três cidades.

A Figura 10 mostra a atividade elétrica nesta mesma supercélula, mas com maior resolução temporal, permitido apenas com os dados em tempo quase real de descargas elétricas, integrada a cada 1 minuto. Com a acululação em maior resolução temporal, podemos utilizar algoritmos de nowcasting de tempo severo com o monitoramento da derivada temporal da atividade elétrica, conhecidos como *lightning-jump* (GATLIN; GOODMAN, 2010; SCHULTZ et al., 2017; SCHULTZ; PETERSEN; CAREY, 2011). Neste exemplo, as linhas tracejadas em vermelho representam alertas de tempo severo nos momentos em que a supercélula ultrapassa 10 raios por minutos e um aumento de dois desvios-padrão (2-σ) em sua variação temporal. Em média, é observado um alerta de possível ocorrência de tempo severo entre 10 e 40 minutos antes da ocorrência de granizo em solo (SPERLING, 2018).

Figura 9: Ciclo de vida total do conteúdo de gelo e raios totais acumulados a cada 10 minutos para a supercélula de tempestade ocorrida no dia 14 de outubro de 2015 das 1600 às 1900 UTC. O retângulo cinza hachurado representa o momento em que a tempestade começa a sair da área de alcance (250 km) do radar meteorológico de Santiago/RS. Os asteriscos marcam os momentos dos registros de granizo (fotos) nos municípios de Restinga Seca/RS, aproximadamente, às (a) 1730 UTC, (b) 1800 UTC e em (c) Cachoeira do Sul/RS as 1810 UTC. Fonte: SPERLING (2018).

Figura 10: Ciclo de vida das descargas elétricas totais a cada 1 minuto para a supercélula de tempestade ocorrida no dia 14 de outubro de 2015. As linhas vermelhas pontilhadas são os alertas de tempo severo baseados no algoritmo na versão 2-sigma do algoritmo *lightning-jump*. As fotos correspondem aos registros de granizo na superfície (asteriscos azuis) nos municípios de Restinga Seca/RS, aproximadamente, às (a) 1730 UTC, (b) 1800 UTC e em (c) Cachoeira do Sul/RS as 1810 UTC. Fonte: SPERLING (2018).

Tabela 6: Sistemas de localização de descargas elétricas operando em solo no Brasil e a bordo de satélite. Fonte: Adaptado de ALBRECHT et al (2014).

Rede	Frequência usada	Tipo de descargas detectadas	Área de cobertura*
RINDAT (Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas) (1)	LF	Principalmente NS	Sudeste e Sul do Brasil, e parte do Centro-Oeste
LINET (LIghtning location NETwork) (2)	VLF, LF	Raios totais (IN + NS, com distinção)	Estado de São Paulo
ENGLN (Earth Networks Global Lightning Network) / ENTLN (Earth Networks Total Lightning Networks) (3)	ELF-HF	Raios totais (IN + NS, com distinção)	Todo Brasil
Vaisala GLD360 (Global Lightning Dataset 360) (4)	VLF	Raios totais (IN + NS, com distinção)	Todo Brasil
STARNET (Sferics Timing and Ranging NETwork) (5)	VLF	Principalmente NS	Todo Brasil
WWLLN (World Wide Lightning Location Network) (6)	VLF	Principalmente NS	Todo Brasil
GOES-16 GLM (Geostationary Lightning Mapper) (7)	Infravermelho próximo	Raios totais (IN + NS, sem distinção)	Todo Brasil

Notas:

* Considerando extensão de máxima eficiência de detecção homogênea da rede em território brasileiro.

(1) Detalhes técnicos sobre a rede RINDAT e eficiência de detecção podem ser encontrados em PINTO et al. (2009) e NACCARATO e PINTO (2009). A rede RINDAT obteve a denominação de BRASILDAT (Brazilian Lightning Detection Network) em meados dos anos 2000, referenciando à integração de três redes regionais (SIDDEM, SIPAM e RINDAT) de sensores LPATS e IMPACT, conforme descrito em NACCARATO e PINTO (2009) e PINTO et al. (2007). Essa denominação posteriormente foi adotada para a rede ENGLN/ENTLN conforme descrito no item (3) abaixo.

(2) Detalhes técnicos sobre a rede LINET e eficiência de detecção podem ser encontrados em BETZ et al. (2009).

(3) Em 2014, as detecções da rede ENTLN foram combinadas com as detecções da rede WWLLN, ganhando a denominação de ENGLN. ENGLN e ENTLN compõem o mesmo conjunto de dados e de sensores, sendo BRASILDAT a denominação dada aos dados coletados exclusivamente no território nacional (Dr. Kleber Naccarato - INPE, comunicação pessoal). Detalhes técnicos sobre a rede ENGLN/ENTLN e eficiência de detecção podem ser encontrados em ZHU et al. (2022), DIGANGI et al. (2022), VIRTS et al. (2024), MARCHAND et al (2019), RUDLOSKY, (2015).

(4) Detalhes técnicos sobre a rede Vaisala GLD360 e eficiência de detecção podem ser encontrados em SAID e MURPHY (2016), , 2023), NACCARATO et al., (2010) e VIRTS et al. (2024). A rede GLD360 classifica as descargas atmosféricas usando um método de classificação multiparâmetro e usa apenas o pico de corrente e a polaridade como um *proxy* quando a descarga não está próxima de um sensor, fornecendo orientações úteis sobre o tipo de descarga (Dr. Ryan Said - Vaisala Inc., comunicação pessoal).

(5) Detalhes técnicos sobre a rede STARNET e eficiência de detecção podem ser encontrados em MORALES et al. (2014) e MORALES (2019).

(6) Detalhes técnicos sobre a rede WWLLN e eficiência de detecção podem ser encontrados em DOWDEN et al. (2002), LAY et al. (2004), ABARCA et al. (2010) e HUTCHINS et al. (2012).

(7) Detalhes técnicos sobre o GOES-16 GLM e eficiência de detecção podem ser encontrados em RUDLOSKY e VIRTS (2021), RUDLOSKY et a. (2020), VIRTS et al. (2024), BATEMAN e MACH (2020), MARCHAND et al. (2019) e GOODMAN et al. (2013)

2.4 Dados de estações meteorológicas

Diariamente, o INPE recebe dados de estações de superfície de diferentes instituições, com frequência horária ou diária (Figura 11). No total são recebidos os dados referentes a 12.320 estações, sendo 9.124 estações com dados horários. Destas estações mencionadas, aproximadamente 80% possuem apenas dados de precipitação.

Na seção 3.3.4 o GT de Modelagem Numérica aborda a importância dos dados de estações de superfície na geração da mesoanálise, ressaltando que os dados devem estar disponíveis para serem assimilados pelo sistema no máximo 30 minutos após o horário de observação. Além disso, os dados de estações são importantes na verificação dos eventos severos associados a rajadas de vento intensa e chuva intensa.

O GT recomenda que além de uma manutenção regular das estações, sejam instaladas novas estações de superfície, com medições de precipitação, temperatura, umidade e vento, nas áreas onde são observadas uma baixa densidade, por exemplo, nas Regiões Norte e Centro-oeste do país.

Figura 11: Localização das estações de superfície recebidas diariamente no INPE com frequência horária (pontos em azul) e diária (pontos em verde).

2.5 Dados de radiossondagem

Radiossondagens são observações fundamentais no sistema de previsão de tempo e *nowcasting*. Os dados são assimilados em modelos numéricos e são utilizados para analisar as condições atmosféricas em situações de tempo severo.

O Brasil tem estações de radiossondagem em diversos pontos do país, mas há várias regiões sem cobertura de radiossondagens (Figura 12). Exemplos incluem o oeste de SC e sul do PR, sul do MS, norte e oeste de SP, sul de GO, sul de MG, além de boa parte do interior do Nordeste e oeste da região Norte. Radiossondagens nessas regiões teriam o potencial de melhorar os produtos de previsão numérica de tempo. Além disso, as radiossondagens seriam úteis no monitoramento de tempo severo, em particular no centro-sul do Brasil.

Outro grande problema no Brasil é que as radiossondagens operacionais são feitas as 0000 e 1200 UTC, ou 21:00h e 09:00h local (horário de Brasília). Contudo, a maior parte das tempestades no Brasil ocorrem no período da tarde, ou seja, sem cobertura dos horários de 0000 e 1200 UTC. Portanto, o GT recomenda que, além da ampliação da rede de estações de radiossondagem, seja possível a realização de radiossondagens no horário de 1800 UTC em dias em que tempo severo significativo é esperado. Radiossondagens as 1800 UTC seriam de extrema importância no envio de avisos e alertas de curto e curtíssimo prazo.

Figura 12: Localização das estações de radiossondagens no Brasil.

2.6 Integração dos dados

2.6.1 Plataformas de disseminação, integração e visualização

Uma **<u>única</u>** plataforma de aquisição e distribuição de dados que dê aos meteorologistas acesso único aos produtos de radar e satélite, dados de previsão do tempo em grade, observações pontuais e produtos de previsão e alerta feitos automaticamente e pelo meteorologista. (ex.: *Advanced Weather Interactive Processing System* (AWIPS) - https://www.unidata.ucar.edu/software/awips2/). O

INPE possui uma ferramenta em fase de desenvolvimento denominada “Plataforma de *Nowcasting*” (Figura 13), mas ainda carece de correções e implementações de outros tipos de dados. A parte de visualização de dados de radar e satélite está bem avançada, e a implementação de mais radares na ferramenta é algo trivial, mas a implementação dos dados de modelos, radiossondas e outros dados observados ainda se encontra em estágio inicial. Para retomar o desenvolvimento dessa ferramenta o ideal seria a contratação de desenvolvedores, já que hoje o INPE não conta com pessoal suficiente, dedicado para atender a essa demanda. Além disso, a ferramenta carece de uma versão offline para processamento de dados locais sem dependência de serviço web externo. Um protótipo da versão web se encontra em https://nowcasting.cptec.inpe.br/.

Figura 13: Plataforma de Nowcasting em desenvolvimento pelo INPE.

Sobre a disseminação de dados, o GEONETCast faz parte de um projeto multi-institucional para recepção e transmissão de dados ambientais de diversos provedores (ex.: INPE, EUMETSAT, NOAA). O GEONETCast é um sistema global de disseminação de informações ambientais, de baixo custo, que transmite dados de satélites meteorológicos e ambientais, dados in situ, e produtos gerados pelos centros operacionais.

A transmissão é feita através de satélites de comunicação comerciais utilizando suas capacidades de radiodifusão em banda larga para multiusuários, provendo informações em tempo quase real. O padrão usado na transmissão é o *Digital Video Broadcasting* - Satellite (DVB-S). A rede GEONETCast Americas é a componente ocidental do GEONETCast, cujo objetivo é permitir uma melhor disseminação, aplicação e exploração de dados ambientais e produtos para diversas áreas de benefícios sociais definidas pelo *Group on Earth Observations* (GEO), incluindo agricultura, energia, saúde, clima, tempo, amenização dos efeitos de desastres, biodiversidade, recursos hídricos e ecossistemas.

O sistema apresenta um custo inferior ao da compra de uma estação convencional de recepção de dados de satélite, disseminando informações de toda a constelação de satélites e produtos ambientais associados. Por utilizar comunicação via satélite a recepção dos dados independe da internet, o que o torna especialmente útil em prover acesso a dados ambientais em locais remotos onde a cobertura da internet é nula ou limitada.

2.7 Rastreamento dos sistemas precipitantes

Com o intuito de se visualizar e rastrear fenômenos atmosféricos associados a eventos extremos, tais como chuvas intensas, granizos entre outros, o GT avaliou dois algoritmos, dentre os mais diversos disponíveis, que permitem detectar, caracterizar, acompanhar e prever o deslocamento de sistemas convectivos com base em informações de radares meteorológicos, são eles: TITAN (*Thunderstorm Identification Tracking Analysis & Nowcasting*) (DIXON; WIENER, 1993) e TATHU (*Tracking and Analysis of Thunderstorms*) (UBA et al., 2022). Estes algoritmos têm a capacidade de fornecer, de forma automática e para cada sistema convectivo, as características que descrevem sua evolução espaço-temporal. A escolha destes dois algoritmos se deu pela ampla utilização em duas das instituições de ensino e pesquisa participantes deste comitê científico.

No processamento de dados com o TITAN, os dados do radar do CENSIPAM localizado em Manaus são primeiro convertidos para um sistema de coordenadas cartesianas, formato MDV (Meteorological Data Volume), com uma grade horizontal

de 480 km × 5026 km centrada no radar, uma grade vertical que se estende a 17 km e um espaçamento da grade de 1.2 e 1 km na horizontal e 1 km na vertical. Os dados são então processados com o TITAN, que identifica as tempestades como uma região contínua tridimensional para a qual a refletividade do radar excede um limiar específico.

A análise buscou avaliar o comportamento dos algoritmos ao identificar os sistemas convectivos nas imagens de radar considerando o limiar de 35 dBz, bem como a previsão de deslocamento para intervalos de tempo de 12, 24, 36 e 48 minutos no dia 8 de setembro de 2014.

A Figura 14 apresenta uma comparação entre os métodos, no qual, ambos foram capazes de identificar diversos sistemas convectivos e prever o deslocamento para os tempos seguintes. Apesar da semelhança, algumas nuances podem ser observadas. A geometria (em verde nas Figuras 14b e 14c) dos SCs tende a ser mais próxima do observado nas saídas do TATHU, uma vez que, o TITAN suaviza os campos de refletividade. Em contrapartida, foi possível observar maior quantidade de extrapolação (em vermelho nas Figuras 14b e 14c) associado aos sistemas convectivos identificados no TITAN em relação ao TATHU.

Figura 14: (a) Campo de refletividade do radar do CENSIPAM localizado em Manaus considerando o limiar de 35 dBz; (b) e (c) são referentes aos sistemas convectivos identificados (verde) e as previsões (vermelho) para Δt = 12, 24, 36, 48 minutos para os algoritmos TATHU e TITAN, respectivamente.

Para avaliar o comportamento estatístico das previsões foram utilizados os parâmetros POD (Probability of Detection), FAR (False Alarm Rate) e CSI (Critical Success Index) conforme definido pela *American Meteorological Society* (AMS, https://glossary.ametsoc.org/wiki/Skill) (Figura 15). Também, foram analisados apenas os SCs que configuram continuidade, ou seja, SCs identificados em uma imagem e que estão presentes na imagem anterior sem que houvesse sobreposição/divisão com outros SCs.

Figura 15: Boxplot com as estatísticas das previsões (POD, FAR e CSI), na esquerda TATHU e na direita TITAN.

Em geral, os dois modelos têm comportamentos muito semelhantes. Dessa forma, o GT optou por utilizar o TATHU como solução para automatizar o rastreio e a análise do ciclo de vida de SCs a partir de refletividade radar. Esta ferramenta foi totalmente desenvolvida no INPE, no âmbito da Divisão de Satélites e Sensores Meteorológicos (DISSM) e Divisão de Previsão de Tempo e Clima (DIPTC) da Coordenação-Geral de Ciências da Terra – CGCT/INPE. Como destaques, esta solução compreende diversas características, a notar: utilização de técnicas de Geoinformática, banco de dados espaciais como auxílio à análise computacional dos SCs, arquitetura de software extensível o qual permite a adição de novas funcionalidades e melhorias de modo eficiente.

3. GRUPO DE TRABALHO MODELAGEM NUMÉRICA

3.1 Introdução

A previsão numérica do tempo é uma ferramenta extremamente útil e necessária no apoio à prevenção e mitigação dos diversos impactos econômicos e sociais decorrentes de desastres naturais, como enxurradas, enchentes, deslizamentos de encostas, tempestades geradoras de granizo, vendavais, tornados, entre outros. Contudo, dadas as limitações desta ferramenta, em particular no tocante à especificação de condições iniciais e de contorno apropriadas nos modelos, às parametrizações de processos físicos de escala sub-grade, e ao tempo de processamento e pós-processamento das soluções numéricas, configurações específicas são necessárias para cada objetivo de seu uso operacional. Realizar a previsão numérica do tempo em escala temporal de dias e semanas é diferente de fazer previsão para as próximas horas. Cada escala temporal e espacial exige configurações diferentes do modelo numérico e demanda informações de diferentes plataformas de observação que irão definir o sucesso da previsão. Portanto, ao propor um sistema de previsão numérica de tempo, é importante definir a abrangência espacial e temporal de interesse dessa previsão, implementando, inclusive, diferentes suites operacionais para cada estágio da evolução do sistema meteorológico de interesse. Esta seção tem como propósito fazer um apanhado do que existe hoje em termos de previsão numérica do tempo no Brasil e propor abordagens apropriadas com o propósito de prever sistemas meteorológicos convectivos desde os primeiros indícios de sua formação (previsão por ingredientes) até seu acompanhamento e previsão para as próximas horas (previsão de curtíssimo prazo).

É importante definir alguns conceitos para o melhor entendimento deste documento. Previsão de curto prazo é a previsão realizada com antecedência de 12 a 72 horas, a qual se baseia principalmente na identificação da presença de ingredientes meteorológicos reconhecidamente necessários para a formação dos

fenômenos atmosféricos que se deseja prognosticar. Para esse tipo de previsão, são utilizados modelos numéricos com convecção parametrizada e espaçamento horizontal de grade superior a ~6 km. Modelos com espaçamento menor que 4 km e convecção permitida (ausência de parametrização de convecção), são capazes de fornecer uma previsão explícita (ou quase explícita) da formação e do ciclo de vida de tempestades convectivas e são usados para complementar a abordagem baseada em ingredientes. Previsão de muito curto prazo é a previsão com antecedência de 2 a 12 horas e utiliza modelos numéricos com alta resolução, geralmente com espaçamento de grade de 2 km ou menor. Este tipo de previsão utiliza assimilação de dados que fornecem informação em escala convectiva, como dados de radar e descargas elétricas e geralmente são executados em ciclos de assimilação de dados em alta frequência (por volta de 15-30 minutos). Previsão de curtíssimo prazo é a previsão feita com 0-2 horas de antecedência, também chamada de nowcasting. Esta previsão tipicamente se baseia na evolução dinâmica ou apenas na extrapolação das condições atuais da atmosfera, como de uma tempestade indicada no radar. Em termos de produtos advindos da modelagem numérica, ferramentas como a mesoanálise (i.e., retrato tridimensional das condições atuais da atmosfera em mesoescala, atualizado em intervalos horários, e obtido da análise objetiva combinando dados observados em tempo real e uma solução numérica antecedente válida para o mesmo horário das observações) podem suplementar as ferramentas de extrapolação linear do movimento das tempestades em apoio ao envio de alertas. Além disso, modelos de convecção permitida com assimilação de dados não convencionais, como dados de radar e de descargas elétricas, são extremamente importantes para representar o estado atual da atmosfera, levando em consideração as tempestades já existentes. Isto permite uma melhor representação de processos não lineares que influenciam a evolução dinâmica, nas poucas horas seguintes, dos sistemas convectivos já em andamento.

Todas as abordagens mencionadas até agora são consideradas determinísticas, ou seja, apresentam apenas uma possibilidade de solução para a evolução das tempestades. Contudo, sabe-se que a atmosfera tem natureza caótica e a melhor forma de representar esse tipo de sistema dinâmico não linear é de maneira probabilística. Neste contexto, existe a abordagem conhecida como

previsão por conjuntos ou por *ensemble*, que é um conjunto de execuções de modelos com condições iniciais ligeiramente diferentes (e/ou emprego de uma série de parametrizações físicas distintas), o que permite gerar produtos como a probabilidade de ocorrência de algum fenômeno. Este tipo de previsão é ainda mais relevante quando estamos tratando de escalas convectivas, onde o crescimento de erros na solução numérica devido a instabilidades não lineares e tridimensionais é ainda mais acentuado.

Com base no conhecimento científico na área e na experiência operacional adquirida por outros países com mais tradição no *nowcasting*, são propostos quatro pontos principais necessários para uma eficaz aplicação operacional da modelagem numérica da atmosfera para *nowcasting* no Brasil. Os pontos 1 e 2 têm foco na previsão de curto prazo, enquanto que os pontos 3 e 4 na previsão de muito curto prazo.

1) Previsão por *ensemble* com ~10-12 km de espaçamento horizontal de grade;
2) Previsão determinística com modelo numérico em escala de convecção permitida com 3 km de espaçamento horizontal de grade;
3) Mesoanálise atualizada a cada 1 h com ~15 km de espaçamento horizontal de grade;
4) Previsão determinística com modelo numérico em escala de convecção permitida e assimilação de dados não convencionais que representem a convecção, como dados de radar e descargas elétricas, com espaçamento de grade de ~1 km.

A Seção 3.2 faz uma síntese do atual estado da previsão numérica do tempo operacional no Brasil e a Seção 3.3 discute em mais detalhes os 4 pontos supracitados. A Seção 3.4 discute ações práticas para operacionalizar o que foi sugerido e propõe uma ordem de prioridades para sua implementação.

3.2 Estado da previsão numérica voltada para o prognóstico de curto/muito curto prazo e *nowcasting de* tempestades convectivas no Brasil

Como discutido anteriormente, dispor de uma previsão meteorológica por *ensemble* é fundamental para indicar a incerteza no prognóstico de determinada situação meteorológica e para a identificação dos possíveis cenários, sobretudo em previsões na escala convectiva. Muitos países têm investido em previsões por conjunto, tanto de baixa resolução (10-20 km de espaçamento horizontal de grade) quanto alta resolução (< 4 km de espaçamento horizontal de grade), porém, nenhuma instituição operacional no Brasil executa um *ensemble* com espaçamento horizontal desejável para a previsão por ingredientes (~10-12 km). Neste sentido, a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) executa operacionalmente o modelo numérico *Weather Research and Forecast* (WRF) duas vezes ao dia (inicializações às 00 UTC e 12 UTC) com 20 km de espaçamento horizontal com 3 opções distintas de parametrização de cumulus para o estado do Ceará (http://www.funceme.br/?page_id=2657). Esta é uma iniciativa útil para a previsão de tempo, que busca explorar a diversidade das soluções numéricas como função da escolha de diferentes esquemas de parametrização. Contudo, o baixo número de membros (três) limita a extração de estatísticas que caracterizam um verdadeiro *ensemble* multifísico. Além do *ensemble* de iniciativa da FUNCEME, o INPE executa atualmente o modelo WRF com resolução horizontal de 7 km e mais dois modelos regionais com 8 km de resolução horizontal: o Eta e o BRAMS. Tais modelos são utilizados para gerar um produto *ensemble* multimodelo com 6 membros ao utilizar duas inicializações diariamente (00Z e 12Z). No domínio global, no INPE há também o modelo BAM em modo de ensemble com 11 membros com perturbações nas condições iniciais, porém este modelo apresenta apenas 100 km de resolução horizontal e 42 níveis na vertical. Com tal resolução, torna-se um modelo útil para escalas sazonais e subsazonais, mas não para previsões de curto prazo. Uma limitação na implementação operacional de *ensembles* em mesoescala tipicamente é o recurso computacional disponível. Porém, à medida que o poder computacional de alto desempenho torna-se mais acessível, esta implementação é

possível e desejável. Da mesma forma, não há no Brasil a execução operacional de previsão por *ensembles* de mais alta resolução. Portanto, é fundamental implementar um sistema de previsão numérica do tempo de curto prazo (em mesoescala) por *ensemble* no Brasil e esta é uma iniciativa planejada a ser implementada pelo INPE associada ao desenvolvimento do modelo comunitário MONAN.

Um modelo com convecção permitida e espaçamento horizontal de ~3 km é extremamente importante, pois fornece informações sobre a organização da convecção que modelos com convecção parametrizada não podem fornecer. Atualmente, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) executa o modelo COSMO com 2,7 km de espaçamento de grade duas vezes ao dia (inicializações às 00 UTC e 12 UTC) para uma série de regiões brasileiras (https://vime.inmet.gov.br/). Contudo, o conjunto de variáveis e parâmetros disponibilizados via pós-processamento na página deste produto numérico não atende a demanda específica da previsão de curto/curtíssimo prazo de tempestades convectivas. Para tal propósito há a necessidade da disponibilização de variáveis pós-processadas (algumas requerendo estatísticas extraídas a partir da sua evolução a cada passo de tempo de integração numérica) que indiquem características sobre o modo convectivo e intensidade das tempestades, como o fator de refletividade simulado de radar, e as magnitudes máximas da corrente ascendente e da helicidade da corrente ascendente, por exemplo. Suítes operacionais com modelos numéricos com espaçamento horizontal de grade igual ou menor de 3 km também já foram testadas em alguns outros centros operacionais de meteorologia, porém geralmente em caráter experimental (i.e., sem continuidade operacional), e/ou com saídas não acessíveis a usuários externos. Desta forma, é altamente desejável a implementação operacional de um modelo numérico para essa escala de previsão para todo o país que, além de fornecer previsões que atendam à demanda da previsão convectiva em curto prazo e em *nowcasting*, também disponibilize aos centros meteorológicos regionais condições iniciais para executarem modelos locais em altíssima resolução (p.ex., 1 km de espaçamento de grade).

A mesoanálise é uma análise objetiva em mesoescala atualizada, tipicamente, em intervalos horários, e que emprega a informação advinda da

previsão de um modelo de resolução horizontal relativamente baixa (da ordem de 10-12 km) e assimila novas observações logo que estas tornam-se disponíveis em tempo real, gerando uma análise mais próxima possível das condições atuais da atmosfera. Essa mesoanálise pode ser utilizada, por exemplo, para determinar a probabilidade de intensificação de uma tempestade que esteja se movendo em direção a um ambiente mais favorável ao aumento de severidade da convecção. No Brasil, não há nenhuma iniciativa neste sentido. Essa é uma implementação que envolve um certo nível de complexidade, principalmente quanto à necessidade de baixa latência na disponibilização dos dados observados. Além disso, por ser um sistema que precisa de atualização rápida, geralmente a cada hora, também exige grande disponibilidade computacional. Ainda em que pese estes desafios, a importância e necessidade da mesoanálise para a previsão convectiva de curtíssimo prazo tornam imperativa a implementação de tal sistema. Algumas recomendações para a criação de uma mesoanálise no Brasil são apresentadas na próxima seção.

Quanto a um modelo determinístico com convecção explícita e assimilação de dados de radar e descargas elétricas, não existe no Brasil nenhuma instituição em que um sistema deste tipo execute operacionalmente e forneça acesso público às saídas numéricas, apesar de haver algum investimento em pesquisa por parte de algumas instituições. Certamente este é um sistema que deve ser executado localmente pelos centros regionais cobrindo a área de interesse de cada centro. Contudo, o INPE/CPTEC como centro nacional, planeja operar um sistema desse tipo como piloto em uma região específica para apoiar na operação e no desenvolvimento e pesquisa para o aprimoramento do sistema e disseminação aos centros regionais e estaduais de meteorologia.

3.3 Recomendações para a previsão numérica no Brasil voltada ao prognóstico de curto/muito curto prazo e ao nowcasting.

As recomendações abaixo levam em consideração a atual capacidade computacional existente no país e os objetivos pretendidos para a implementação operacional do *nowcasting* no Brasil a curto e médio prazos. Como o INPE/CPTEC é

a instituição brasileira designada para a implementação de modelos numéricos de previsão de tempo e clima, assume-se aqui que as propostas serão implementadas por esta instituição.

3.3.1 Previsão por *Ensemble* com modelo de resolução relativamente baixa (mesoescala)

Propõe-se a criação de um ensemble com uma versão de fronteira aberta do modelo comunitário MONAN (*Model for Ocean-laNd-Atmosphere PredictioN*) com um mínimo de 10 membros para um domínio que cubra todo o Brasil com espaçamento horizontal de aproximadamente 12 km e 45 níveis verticais. Os membros do *ensemble* devem ser inicializados todos os dias às 0000 UTC e produzir previsões de até 84 h (i.e., até às 1200 UTC de três dias depois). Quanto às condições iniciais, em um primeiro momento podem ser utilizadas análises do *ensemble* do *Global Ensemble Forecast System* (GEFS), cujos dados são globais e estão disponíveis de maneira gratuita. Outra possibilidade é utilizar algum método de perturbação para utilizar a própria previsão do modelo global MONAN do INPE/CPTEC. Futuramente, quando o INPE/CPTEC tiver seu próprio *ensemble* global com o MONAN, este pode ser substituto da condição inicial do sistema proposto aqui.

3.3.2. Previsão determinística com modelo de convecção permitida

Propõe-se também a implementação de uma versão regional do MONAN determinístico com espaçamento horizontal de pelo menos 3 km e sem acionamento de esquema de parametrização de convecção. Esse modelo executaria por 36 h a partir de 0000 UTC do corrente dia. Alguns testes sugerem que 50 níveis verticais no modelo seriam suficientes para a previsão de tempestades. A grade do modelo deverá ser grande o suficiente para cobrir todo o país. O modelo determinístico com resolução permitida pode prever a formação de tempestades explicitamente, o que

permite gerar produtos como refletividade simulada, helicidade da corrente ascendente e taxa horária de precipitação.

Dado que existem diferenças grandes entre o clima no centro-norte e no centro-sul do país, em um cenário ideal com a existência de recursos computacionais, é possível executar esse modelo com convecção permitida em dois domínios. Um domínio cobriria o centro-sul do país, com parametrizações condizentes com o tempo em latitudes subtropicais, e outro domínio que cobriria o centro-norte do Brasil, com parametrizações ideais para os trópicos. Esses dois domínios teriam uma faixa no centro do Brasil em comum e executariam independentemente.

As condições iniciais e de contorno para este modelo, em um sistema ideal, deveriam ser geradas a partir de assimilação de dados com o próprio modelo. Como a assimilação de dados aumentaria o custo computacional, em um primeiro momento é possível utilizar dados do modelo global executado no CPTEC, o MONAN, como condição inicial. Ressalta-se, contudo, que é fundamental o Brasil investir em assimilação de dados no modelo regional. Os grandes centros de previsão de tempo em todo o mundo contam com seus modelos regionais com assimilação de dados, dada sua imensa importância. Os modelos regionais com assimilação de dados têm a capacidade de assimilar dados que não foram utilizados no processo realizado pelo modelo global, seja pelo corte na janela de assimilação, pelo *thinning* (processo de redução da quantidade de dados assimilados por serem altamente correlacionados) ou simplesmente pela maior disponibilidade de dados locais. Como os modelos regionais geralmente possuem maior resolução, o cálculo das inovações no processo de assimilação também é mais preciso.

3.3.3 Mesoanálise atualizada a cada 1 h (~12 km de espaçamento horizontal)

Propõe-se a implementação de uma mesoanálise, que é basicamente um modelo com resolução horizontal relativamente baixa (espaçamento horizontal de 12 km), que gera uma análise utilizando dados obtidos (principalmente dados de

superfície) em tempo real. Essa mesoanálise pode ser implementada com o modelo WRF, que tem um sistema de assimilação de dados eficaz e de fácil implementação operacional (GSI - já implementado no CPTEC). Posteriormente, quando o MONAN com assimilação de dados estiver totalmente operacional no CPTEC, esta pode ser a opção natural para substituir o sistema com o WRF.

O maior limitante na implementação da mesoanálise é a latência dos dados observados, como de estações de superfície. Como a mesoanálise tenta reproduzir as condições atuais da atmosfera, o sistema se torna inútil para o *nowcasting* se os dados observados levarem muito tempo para serem disponibilizados. Portanto, é de fundamental importância implementar medidas para reduzir a latência e prover um fluxo operacional desses dados de tal forma que dados de diferentes fontes possam ser concentrados em uma única instituição que os disponibilizará para a geração da mesoanálise em tempo quase real. Dados de estações de superfície, por exemplo, devem estar disponíveis para serem assimilados pelo sistema no máximo 30 minutos após o horário de observação. Atualmente o INPE tem avançado na implementação de um sistema que supriria essa necessidade e poderia ser o ponto focal de distribuição desses dados.

Apesar de todos os dados públicos de estações de superfície não estarem atualmente concentrados e disponíveis em tempo real ou quase real, em um primeiro momento seria desejável ter uma mesoanálise empregando os dados disponíveis. Assim, essa ferramenta pode ser explorada para uso operacional e pesquisa enquanto o problema de latência e concentração dos dados não são resolvidos.

3.3.4 Previsão determinística com modelo de convecção permitida e assimilação de dados de radar e descargas elétricas

Propõe-se a implementação de uma suíte de previsão determinística, com um modelo com espaçamento horizontal < 3 km, que gere previsões de até 12 h a partir de análises produzidas com assimilação de dados de radar e/ou descargas elétricas. O objetivo deste sistema é gerar previsões explícitas da evolução das tempestades

em tempo quase real, pois o modelo assimila a posição das tempestades conforme identificadas pelo radar e/ou satélite.

Como citado anteriormente, este sistema no CPTEC deve ser pensado como um laboratório para desenvolvimento e pesquisa com o intuito de apoiar a implementação do mesmo nos centros regionais de meteorologia. Nestes centros este sistema cobriria apenas sua área de interesse e utilizaria como condição de fronteira e inicial os dados dos modelos de menores resoluções executados no centro nacional (CPTEC).

Um dos principais limitantes na implementação deste sistema é a falta de uniformidade dos dados de radar. Como os radares no Brasil são operados por diferentes instituições que fazem diferentes uso desta ferramenta, não há uma receita comum entre os radares. Por essa razão, a otimização do uso destes dados no processo da assimilação de dados seria obtida através da uniformização das receitas dos radares.

Outro fator importante é a baixa qualidade dos dados de velocidade radial no Brasil. Esta característica está associada às receitas implementadas operacionalmente, que beneficiam bons dados de refletividade em detrimento à qualidade dos dados de velocidade radial.

Além dos problemas citados relacionados às receitas dos radares, ressalta-se também a necessidade de uma padronização do controle de qualidade destes dados. Atualmente os centros geradores de dados de radar aplicam controles mínimos automaticamente, de acordo com o programa implementado no sistema de aquisição dos dados. Contudo, uma metodologia mais robusta e abrangente deveria ser discutida e explorada para a otimização do uso destes dados no processo de assimilação.

3.4 Conclusões e recomendações

Este documento detalha quatro itens considerados fundamentais para a implementação, no Brasil, da previsão numérica do tempo, aplicada à previsão convectiva em curto prazo e ao *nowcasting*. Neste tocante, o Brasil atualmente encontra-se em desvantagem quando comparado com outros países da América do

Sul. Um exemplo disto é a recente implementação pelo *Servicio Meteorológico Nacional* (SMN; https://www.smn.gob.ar/modelos) da Argentina de um *ensemble* com modelo em escala de convecção permitida, utilizando espaçamento horizontal de 4 km. Outros países com menos recursos que o Brasil, como o Uruguai, também estão em processo de implementação de modelos com convecção permitida para *nowcasting*[1]. Dessa maneira, um esforço no Brasil deve ser fomentado para a aceleração da implementação da previsão numérica do tempo (determinística e por *ensemble*) nas escalas de movimento pertinentes ao prognóstico convectivo em curto prazo e *nowcasting*. Esta iniciativa deve ser vista como parte integrante de uma ação para que o país mantenha a sua tradicional condição de líder regional na área de desenvolvimento de produtos de previsão numérica do tempo. Além disso, essas ferramentas ajudarão a prover à população um serviço meteorológico de maior qualidade ante às mudanças climáticas em curso, que devem realçar o impacto de eventos de tempo severo.

Dada a grande necessidade de recursos computacionais e humanos para a implementação operacional proposta neste documento, é interessante classificar o grau de prioridade para a implementação de cada um dos 4 itens descritos acima. Além da capacidade computacional, considerar-se-á também a viabilidade de implementação dessas ferramentas em centros regionais e estaduais de meteorologia, dando maior prioridade àquelas que têm maior complexidade e seriam mais difíceis de serem implementadas em centros regionais.

Seguindo o que foi discutido acima, considera-se que a prioridade número 1 seria um *ensemble* como citado na seção 3.1, tanto pelo custo computacional quanto pelo recurso humano necessário para a implementação de tal sistema. Este sistema seria implementado com uma versão regional do MONAN (fronteira aberta). Em segundo seria a mesoanálise, pela complexidade descrita anteriormente, com o envolvimento de assimilação de dados, recurso computacional e disponibilidade dos dados a serem assimilados com baixa latência. Atualmente o CPTEC seria o ponto focal ideal para prover esses dados em tempo quase real para esse sistema. Por envolver assimilação de dados e o MONAN não estar atualmente preparado para

[1] Nestor Santayana (*Instituto Uruguayo de Meteorología* - Inumet), comunicação pessoal, 19 de dezembro de 2023.

executar operacionalmente com assimilação, sugere-se o uso do modelo regional WRF com o sistema de assimilação GSI, já em uso no CPTEC. A execução do modelo em alta resolução com convecção permitida seria a próxima prioridade, considerando que para áreas limitadas os centros regionais são capazes de executar esses modelos. O CPTEC poderia implementar esse sistema futuramente com o MONAN na versão regional ou com a própria versão global com grade refinada sobre o Brasil com espaçamento de grade de ~3 km quando houver maturação do desenvolvimento do MONAN global e disponibilidade de recurso computacional. O sistema de alta resolução e assimilação de dados não convencionais, como radar e descargas elétricas, seria o item menos prioritário, principalmente pelo fato de ser um sistema local, que deve ser implementado no próprio centro regional, geralmente usando seu próprio radar. No CPTEC propõe-se ter esse sistema apenas para desenvolvimento e pesquisa para apoiar os centros regionais sem, de fato, emitir previsões numéricas para a população. Neste sistema-laboratório o CPTEC faria uso de suas versões do MONAN para gerar condições de contorno e iniciais, demonstrando para os demais centros a capacidade de fazer previsão de curtíssimo prazo. No futuro, quando o uso do MONAN com o sistema de assimilação JEDI estiver operacional e tivermos capacidade de utilizar o MONAN-JEDI para assimilação e previsão usando dados de radar e descargas elétricas, o sistema aqui proposto pode migrar para a versão MONAN-JEDI.

Além de investimento nos modelos numéricos adequados, é necessária a criação e manutenção de uma página online contendo: 1) produtos derivados dos modelos numéricos para uso operacional e 2) repositório de dados brutos dos modelos para uso público. Essa página permitiria a rápida disseminação das saídas dos modelos numéricos e seria utilizada por meteorologistas previsores em todo o país.

4. GRUPO DE TRABALHO TEMPO SEVERO E ALERTAS

4.1 Introdução

Esta seção apresenta as principais conclusões e sugestões do GT de tempo severo e alertas. Inicialmente, é discutido o estado atual da organização da meteorologia operacional brasileira e as atuais metodologias utilizadas para envio de avisos e alertas referentes a tempestades convectivas (Seção 4.2). Posteriormente, as recomendações do GT são apresentadas (Seção 4.3).

4.2 Estado dos avisos e alertas meteorológicos no Brasil

O GT de tempo severo e alertas fez um levantamento dos avisos e alertas enviados para situações de tempo severo no Brasil. Primeiramente, é preciso esclarecer que não há uma padronização no país do que se entende por “aviso” e “alerta”. Nesta seção serão utilizadas as mesmas nomenclaturas usadas pelas instituições. Na Seção 4.3.1, o GT sugere uma padronização da nomenclatura.

A nível nacional, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) emite avisos para diversos fenômenos meteorológicos, incluindo potencial de tempo severo. As palavras “aviso” e “alerta” são usadas de maneira intercambiável em diversos contextos pelo instituto, mas é recomendável estabelecer uma diferença precisa entre o que se deseja denotar como “aviso” e o que se deseja denotar como “alerta”. Os avisos têm graus de intensidade “Perigo Potencial”, “Perigo” e “Grande Perigo”, porém recomenda-se fornecer aos usuários finais informações mais objetivas que os ajudem a compreender a diferença efetiva entre os graus de intensidade (Figura 16). Estas informações objetivas certamente seriam relevantes para a orientação das diferentes ações a serem tomadas pelos usuários em resposta aos diferentes níveis de intensidade. Além disso, entre os fenômenos para os quais se enviam avisos estão “Tempestades”, “Tempestades de Raios”, “Chuvas Intensas”, “Granizo”, “Vendaval” e “Tornados”, sendo que os tipos “Granizo” e “Tornado” são raramente utilizados, possivelmente porque estão embutidos no conceito de “Tempestade”. “Vendaval” é utilizado também para vento associado a eventos de escala sinótica,

como a passagem de uma frente fria ou um ciclone. Já “Chuvas Intensas” é utilizado para chuvas associadas a tempestades convectivas e também a eventos de mesoescala e/ou escala sinótica (Figura 17). Uma definição objetiva acerca das escalas (temporal e espacial) a que pertencem os fenômenos meteorológicos sendo alertados seria de grande valor para orientar as ações a serem tomadas pelos usuários finais. O INMET não emite alertas de curtíssimo prazo em escala de tempestade (tamanho aproximado de um município), característicos do nowcasting.

Legenda

Ícone Descrição

Perigo Potencial. Situação meteorológica potencialmente perigosa. Cuidado na prática de atividades sujeitas a riscos de caráter meteorológico. Mantenha-se informado sobre as condições meteorológicas previstas e não corra risco desnecessário.

Perigo. Situação meteorológica perigosa. Mantenha-se muito vigilante e informe-se regularmente sobre as condições meteorológicas previstas. Inteire-se sobre os riscos que possam ser inevitáveis. Siga os conselhos das autoridades.

Grande Perigo. Situação meteorológica de grande perigo. Estão previstos fenômenos meteorológicos de intensidade excepcional. Grande probabilidade de ocorrência de grandes danos e acidentes, com riscos para a integridade física ou mesmo à vida humana. Mantenha-se informado sobre as condições meteorológicas previstas e os possíveis riscos. Siga as instruções e conselhos das autoridades em todas as circunstâncias e prepare-se para medidas de emergência.

Figura 16: Exemplo de Aviso Meteorológico emitido pelo INMET. Fonte: INMET

Figura 17: Detalhe do Aviso Meteorológico emitido pelo INMET. Fonte: INMET.

O Centro de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) faz um monitoramento de condições deflagradoras de desastres naturais em todo território nacional. O Cemaden envia alertas de curtíssimo prazo baseados em monitoramento de radares, satélites e pluviômetros. O foco é em alertas associados a enxurradas e deslizamentos de terra, os quais podem ser provocados por tempestades severas, mas o centro não contempla o envio de alertas para ocorrências de granizo, vendavais e tornados. Desde a sua criação, o Cemaden não

tem por finalidade ser um centro meteorológico, explorando igualmente aspectos hidrológicos, geológicos e sociais para estimar o risco de desastre em uma determinada localidade. Há uma equipe de 42 meteorologistas e profissionais de outras áreas responsáveis por realizar o monitoramento do país inteiro (mais precisamente, dos cerca de mil municípios monitorados) (http://www2.cemaden.gov.br/equipe-de-monitoramento/). Portanto, os meteorologistas têm que analisar e monitorar eventos meteorológicos que ocorrem em regimes atmosféricos muito distintos, comumente de maneira simultânea sobre o extenso território do país, e com muitos destes eventos pertencendo à escala convectiva, que é de evolução muito rápida, em particular no verão. Mesmo com o apoio de ferramentas de automação, estes aspectos apontam para um desafio operacional notável. Os alertas enviados pelo Cemaden, assim como os avisos do INMET, são encaminhados, primeiramente, para o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD). O CENAD, por sua vez, repassa os alertas para as Defesas Civis regionais, processo este que requer vários minutos para ser concluído. Todo o procedimento, desde a escala quase continental de monitoramento (hidro)meteorológico, até a latência existente na disseminação dos alertas de potencial para os usuários finais, não é o ideal para a realização adequada do nowcasting propriamente dito e nem para a disseminação eficaz dos alertas baseados no nowcasting. Apesar de ser uma das poucas instituições brasileiras que enviam alertas de curtíssimo prazo, o Cemaden não envia alertas para outros fenômenos associados a tempestades severas, como granizo, rajadas de vento e tornados.

Além dos alertas de curtíssimo prazo, o Cemaden emite diariamente mapas nacionais com o potencial de eventos geo-hidrológicos (enxurradas e deslizamentos de terra) em todo o Brasil, o qual é dividido em mesorregiões (Figuras 18 e 19). As previsões de risco hidrológico são divididas em quatro níveis (“Baixo”, “Moderado”, “Alto” e “Muito Alto”). Os mapas de previsão são indicativos da “possibilidade de ocorrências geo-hidrológicas em ao menos um município das mesorregiões indicadas”. Neste contexto, é recomendável haver uma discriminação objetiva entre os diferentes níveis de probabilidade, para evitar percepções subjetivas e não padronizadas por parte do usuário final do que vem a ser probabilidade baixa,

média, alta, ou muito alta. A veiculação da noção de probabilidade para o usuário final é um desafio importante para qualquer centro de monitoramento e previsão de fenômenos naturais extremos, e que afeta os diferentes níveis de prontidão desejados para a população.

Figura 18: Possibilidade de ocorrência de eventos hidrológicos em ao menos um município das mesorregiões indicadas. Este mapa é elaborado por uma equipe multidisciplinar, levando em consideração os cenários de riscos hidrológicos atuais somados à previsão de chuva. Fonte: CEMADEN.

Figura 19: Possibilidade de ocorrência de deslizamentos em ao menos um município das mesorregiões (e/ou subdivisões regionais) indicadas. Este mapa é elaborado por uma equipe multidisciplinar, levando em consideração as condições dos cenários de riscos geológicos atuais somados à previsão de chuva. Fonte: CEMADEN.

A Defesa Civil do Estado de Santa Catarina, através do Centro Integrado de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CIGERD), mantém uma equipe de meteorologistas responsáveis pelo monitoramento atmosférico a nível estadual. O GT acredita que esse modelo seja o ideal para o Brasil, com equipes de

meteorologistas responsáveis pelo acompanhamento das condições atmosféricas em domínios geográficos mais limitados, no máximo do tamanho de um Estado. Porém, os alertas emitidos pela Defesa Civil de SC são divididos em vários “níveis” conforme a intensidade do fenômeno (moderado, alto, muito alto), além de haver outros tipos de avisos como os “avisos meteorológicos”, “estado de atenção” e “estado de observação”. A demasiada diversidade de expressões pode dificultar o entendimento preciso da informação veiculada, uma vez que os níveis de alerta e os tipos de avisos não contam com uma definição protocolar. Por exemplo, seria desejável haver uma separação clara entre o que é um alerta de nível “alto” e de nível “muito alto”, uma vez que essa diferenciação parece subjetiva, ou seja, ausente de um protocolo definido e informado pelas instituições. Além disso, o excesso de tipos de alertas e avisos pode limitar a resposta da Defesa Civil. Portanto, o GT sugere um tipo único de alerta para tempestades severas, sem estar associado a mais de um nível de intensidade.

De maneira geral, também é recomendável estabelecer uma coordenação da instituição responsável pela emissão de alertas, ou pelo menos uma coordenação muito bem articulada entre as instituições que emitem os alertas. A existência de mais de um órgão emitindo alertas para a mesma região (estado e municípios) pode gerar conflitos de informações e de níveis de alerta. Essa falta de centralização ou de coordenação bem articulada dificulta a identificação da instituição responsável pelo envio (ou não) do alerta e pode fazer com que a mensagem passada à Defesa Civil e à população seja ineficiente, limitando ações efetivas para minimizar os riscos. Dúvidas podem ser geradas para os tomadores de decisão das defesas civis estaduais e municipais quando estes recebem informações de previsão e alerta de órgãos nacionais e estaduais que não seguem os mesmos critérios. Em muitas ocasiões, os órgãos estaduais precisam esclarecer possíveis inconsistências de informação para os tomadores de decisões e população, despendendo um tempo valioso de trabalho.

Um exemplo recente aconteceu em Petrópolis-RJ em 15 de fevereiro de 2022, quando ocorreu chuva muito intensa, enxurrada e muitas fatalidades na cidade. Apesar de Petrópolis ser monitorada pelo Cemaden, existe no RJ um órgão com o mesmo nome de Cemaden (Centro *Estadual* de Monitoramento e Alerta de

Desastres Naturais) que também tem o objetivo de enviar alertas para situações meteorológicas extremas, como a ocorrida em Petrópolis. Dessa maneira, os dois centros dividem responsabilidades e têm um papel redundante no sistema de alertas no Estado, o que é indesejável se houver falta de coordenação e indefinição de atribuições entre as instituições. Uma situação semelhante ocorre em Belo Horizonte, MG, onde há quatro instituições responsáveis por emitir alertas e avisos meteorológicos (Cemaden, Defesa Civil municipal, Igam e INMET, embora os dois últimos sejam restritos a avisos de curto e médio prazo), tornando o sistema de alertas muito ineficiente.

Conforme mostrado acima, alguns pontos merecedores de consideração no Brasil hoje no tocante à emissão de avisos e alertas meteorológicos podem ser resumidos como:

1) Necessidade de uma centralização institucional para exercer a função de emissão de avisos e/ou alertas tanto a nível nacional quanto estadual/regional;
2) Adoção de uma padronização quanto ao que se pretende precisamente veicular com o uso de expressões como “aviso”, “alerta”, etc;
3) Estabelecimento de definições mais claras dos fenômenos sendo alertados e do que se entende por tempestade severa;
4) Emprego de protocolos objetivos, padronizados e específicos para a emissão de alertas com o intuito de reduzir ao máximo a subjetividade individual envolvida no momento de decidir pela emissão ou não do alerta;
5) Implementação, dentro dos centros de meteorologia já existentes, de núcleos dedicados exclusivamente à previsão e ao monitoramento de tempo convectivo severo, permitindo o estabelecimento de equipes especialistas nesta escala de movimento e reduzindo a sobrecarga de atribuições no processo de previsão;
6) Necessidade de reduzir a latência existente entre a identificação de uma condição atmosférica merecedora de alerta e a comunicação deste alerta aos usuários finais.

4.3 Recomendações

4.3.1 Nomenclatura

A primeira recomendação do GT é que exista uma nomenclatura única e padronizada para se referir a alertas e avisos de tempestades severas e fenômenos associados no país. Recomenda-se que a palavra “alerta” seja utilizada *exclusivamente* para se referir a alertas de curtíssimo prazo (0 a *no máximo* 2 horas de antecedência) e à ocorrência de fenômenos de escala local como tempestades convectivas e/ou chuva intensa. Nesse contexto, o alerta deve tipicamente abranger uma área do tamanho aproximado de um município. Recomenda-se que o termo “Aviso” seja dedicado para tratar de fenômenos meteorológicos com impacto no curto prazo (12 a 72 horas de antecedência) e de maior abrangência espacial, com extensão aproximada a da área de um estado. O termo “aviso” também deve continuar sendo utilizado para fenômenos pertencentes a escalas de movimento não associadas à escala típica de *nowcasting*, como ondas de calor, condições críticas de baixa umidade relativa do ar, ou ventos intensos causados por um ciclones em escala sinótica. Essa padronização de linguagem e definição é desejável para que exista uma comunicação eficiente entre os institutos de meteorologia operacional, responsáveis pela emissão de alertas e avisos, e os tomadores de decisão, como a Defesa Civil, e a população.

4.3.2 Organização do sistema de *nowcasting* no Brasil

Em um país do tamanho do Brasil, a maneira mais apropriada de monitorar a ocorrência de tempestades severas é *regionalmente*. Portanto, é recomendável haver núcleos regionais e/ou estaduais de meteorologia responsáveis pelo monitoramento em uma área limitada, com o tamanho máximo de um Estado brasileiro. É importante que estes núcleos de atuação regional, sejam eles de gestão estadual ou parte integrante de uma instituição de esfera nacional (como o INMET), estejam realizando trabalho coordenado, ou seja, esferas nacional e regional devem

ser constituídos por equipes de meteorologistas trabalhando em escala de 24h e que compartilhem um mesmo protocolo de previsão e emissão de alertas em ambas as esferas, como sugerido nas próximas seções deste documento. Em situações de tempo severo é fundamental que estas equipes fiquem exclusivamente dedicadas ao monitoramento e *nowcasting* dos sistemas atmosféricos deflagradores de tempo severo, não sendo atribuídas a elas funções adicionais de análise e previsão de condições atmosféricas não relacionadas a estes sistemas. Alguns Estados brasileiros, como SP, SC, PR, MS, MG e CE, já contam com centros estaduais, embora em alguns desses centros não exista o número de profissionais suficiente para fazer o monitoramento 24h por dia, e na maioria não são emitidos alertas de curtíssimo prazo para tempestades severas. Aos núcleos regionais ou estaduais de *nowcasting* deve ser atribuída a responsabilidade exclusiva pelo envio de alertas de curtíssimo prazo.

Os centros nacionais, por sua vez, não devem ser encarregados de enviar alertas de curtíssimo prazo, ficando essa tarefa a cargo única e exclusivamente dos centros regionais/estaduais. O papel dos centros nacionais nesse contexto é de gerenciar as atividades de nowcasting, amparando os centros regionais com ferramentas e suporte computacional, e emitir avisos de maior abrangência espacial, sem responsabilidade de enviar alertas de curtíssimo prazo. Entretanto, seria importante que os centros nacionais pudessem contar com núcleos regionais responsáveis pelo *nowcasting*, e esses núcleos emitiriam os alertas para as regiões que não contam com os centros estaduais.

Deve-se enfatizar que *o envio de alertas de tempestades severas, ou de qualquer outra condição meteorológica, deve ser de atribuição única e exclusiva de meteorologistas profissionais, conforme disposto no artigo 7 da lei 6.835, de 14 de outubro de 1980*.

4.3.3 Fenômenos que devem ser alertados

O GT propõe que sejam enviados alertas para *tempestades convectivas com* ***potencial*** *de produzir os seguintes fenômenos*:

- Granizo com diâmetro maior que 2 cm e/ou acumulação de granizo no solo;
- Rajada de vento superior a 80 km/h e/ou capaz de causar danos materiais, como queda de árvores e destelhamentos;
- Chuva intensa com taxa de precipitação acima de 40 mm/h, persistindo por pelo menos 10 minutos em um ponto, e/ou capaz de promover inundações repentinas;
- Tornado de qualquer intensidade.

O GT reconhece que o uso desses limiares é subjetivo e se baseia no conhecimento empírico dos fenômenos meteorológicos, além dos limiares utilizados em outros países, como Estados Unidos, Austrália e Argentina. Granizo de 2 cm, por exemplo, dificilmente causa destelhamentos significativos, mas pode causar danos à hortaliças e até mesmo plantações se associado a rajadas de vento intensas. A acumulação de granizo no solo pode ter impactos no trânsito de cidades e em plantações de algumas culturas. Também se reconhece que rajadas de vento menores que 80 km/h são suficientes para causar destelhamentos em algumas construções fracas e queda de árvores, podendo apresentar perigo para a população.

Quanto à chuva intensa, também se reconhece que há uma grande variabilidade regional no que diz respeito à quantidade de chuva e taxa de precipitação que causam transtornos. De acordo com DAVIS (2001), as taxas de precipitação que produzem inundações repentinas podem ser caracterizadas como leves (< 20 mm/h), moderadas (20-50 mm/h) e pesadas (>50 mm/h). Somente a convecção profunda (*Deep Moist Convection* - DMC) pode produzir taxas de precipitação suficientemente altas para produzir inundações repentinas. Foi escolhido um limiar empírico para ser utilizado em um primeiro momento, mas o GT sugere veementemente que se façam estudos do impacto de diferentes taxas de precipitação em diferentes regiões do país. Assim, o limiar inicial de 40 mm/h pode ser adaptado para a realidade de cada região. Como o monitoramento deve ser feito a nível regional, cada núcleo regional ou estadual poderá estipular sua própria taxa de precipitação com base no conhecimento local.

Em relação a tornados, uma alternativa é não mencionar a possibilidade de ocorrência de tornados nos alertas em um primeiro momento. Com o tempo e a maior conscientização da população, além da melhoria dos dados de radares, alertas de tempestades com potencial de tornados podem passar a ser enviados explicitamente.

4.3.4 Alerta de Tempestade Severa

O GT recomenda que seja enviado apenas um tipo de alerta, chamado de "Alerta de Tempestade Severa". Esse alerta não terá níveis de intensidade. Portanto, se houver possibilidade de ocorrer *qualquer um* dos fenômenos listados na Seção 4.3.3 em uma determinada área, nos próximos minutos a no máximo 2h, a população daquela área recebe um Alerta de Tempestade Severa.

O Alerta de Tempestade Severa será acompanhado por um texto sucinto e objetivo onde serão especificados os fenômenos esperados, com base nas características da tempestade associada ao alerta e o tempo de validade deste. Portanto, a interpretação das características de uma tempestade severa com base no radar meteorológico, satélite e informações sobre o ambiente onde a tempestade está, assim como o envio dos alertas, deve ser feita única e exclusivamente por meteorologistas.

Abaixo é apresentado um exemplo de alerta associado a uma tempestade severa capaz de causar granizo grande e rajadas de vento severas:

"***Alerta de tempestade severa*** *capaz de produzir granizo grande e rajadas de vento severas na sua região. Enviado às 15:00 e Válido até 15:45h."*

Outro exemplo de alerta, em que a chuva intensa é o maior perigo, é mostrado abaixo:

"***Alerta de tempestade severa:*** *Tempestade capaz de produzir chuva intensa, alagamentos e enxurradas na sua região. Enviado às 18:30 e válido até 19:10h."*

No corpo do alerta, é necessário indicar o horário em que o alerta foi enviado e o horário de fim da validade do alerta.

Ressalta-se que não há outros tipos de alertas, como “aviso” ou “advertência”, emitidos em curtíssimo prazo (até 2 h de antecedência). Dessa maneira, a comunicação do alerta é mais direta, diminuindo a possibilidade de interpretações errôneas pela população e/ou tomadores de decisões.

O Alerta de Tempestade Severa também será enviado apenas para as áreas que serão afetadas pela tempestade. Apenas uma subregião de um município pode vir a receber um alerta, enquanto que outras subregiões do município não necessariamente o receberão. Também não é necessário indicar a localidade sob efeito do alerta no texto, pois o alerta será enviado apenas para as pessoas/Defesas Civis que estão sob a influência do mesmo.

Um exemplo gráfico e conceitual de Alerta de Tempestade Severa é mostrado abaixo. Este é um caso hipotético onde o meteorologista de plantão identifica no radar uma tempestade potencialmente severa a sudoeste do município de São Paulo, SP. Na Figura 20a, a tempestade é identificada por radar a sudoeste do município de São Paulo e, pela animação das varreduras anteriores, o deslocamento é estimado em direção ao município (para nordeste). A avaliação meteorológica indica que esta tempestade tem potencial de causar tempo severo, portanto é emitido um alerta para a área onde a tempestade está e áreas para onde a tempestade está se deslocando (Figura 20b), o que inclui partes da Zona Sul do município. Neste caso, não é necessário emitir um alerta para o município de São Paulo inteiro, com a população da Zona Norte, por exemplo, não recebendo o Alerta de Tempestade Severa. No tempo seguinte (Figura 20c), a tempestade se desloca dentro do polígono em alerta, sem nenhuma ação necessária além do monitoramento da tempestade. No instante seguinte (Figura 20d), nota-se que a tempestade está se movendo um pouco para a esquerda e está prestes a sair da área alertada recentemente. Portanto, é necessário um novo Alerta de Tempestade Severa para áreas à frente da tempestade (Figura 20e). Agora, parte da Zona Leste do município também está em alerta. No instante seguinte (Figura 20f), a tempestade segue no polígono e nenhuma ação é necessária. Depois (Figura 20g), a tempestade está próximo do limite do polígono sobre a Zona Leste do município, mas o monitoramento da tempestade indica enfraquecimento com o tempo, e a decisão é de que não é necessário um novo Alerta de Tempestade Severa. A

tempestade se afasta do município e enfraquece conforme esperado no próximo instante (Figura 20h), sem ser necessário o envio de outro alerta.

Figura 20: Exemplo de um alerta enviado para uma tempestade hipotética que atinge parte do município de São Paulo, SP. Os círculos verde, amarelo e vermelho são refletividades de 30, 40 e 50 dBZ estimadas por radar meteorológico. Os polígonos preto e magenta simbolizam as áreas sob um "Alerta de Tempestade Severa" existente e recém emitido, respectivamente. A seta indica a direção de movimento da tempestade conforme inferido por radar.

4.3.5 Aviso de curto prazo (até de 12 horas de antecedência)

O GT discutiu a possibilidade de haver um "aviso de curto prazo", enviado com até 12 horas antes da ocorrência de tempo severo, que teria o objetivo de deixar a população de sobreaviso sobre a possibilidade de tempo severo *antes* da formação de tempestades. O aviso teria o mesmo objetivo de um '*watch*', que é utilizado pelo *National Weather Service* dos Estados Unidos. Este tipo de aviso seria muito útil em situações de tempo severo mais generalizado em que é necessário um preparo maior por parte da população e Defesa Civil. Contudo, acredita-se que esse tipo de aviso seria um complicador na operacionalização do sistema de *nowcasting* em um primeiro momento. O GT sugere que esse aviso seja discutido e avaliado conforme haja maior evolução do sistema de *nowcasting*. É importante ressaltar também a necessidade de um trabalho de educação da população para entender e distinguir os avisos dos alertas. Podem receber muito mais avisos que não se concretizarão em alertas, o que pode levar à "descredibilização" de ambos avisos e alerta.

4.3.6 Ferramenta para envio do alerta em ambiente operacional

O GT discutiu potenciais ferramentas que seriam utilizadas para o envio de Alertas de Tempestade Severa. Um dos melhores exemplos de ferramentas é o sistema AWIPS (Advanced Weather Interactive Processing System), que é um software que integra informações meteorológicas de modelos numéricos, radares, satélites e observações com uma interface que permite o meteorologista desenhar polígonos e enviar alertas de curtíssimo prazo. Essa capacidade de desenhar os polígonos e gerar um alerta oficial imediatamente é essencial para que os Alertas de Tempestade Severa sejam enviados o mais rápido possível. Ao desenhar o polígono, o meteorologista tem acesso a várias informações geográficas da região afetada. O GT sugere que seja avaliada a possibilidade de usar o AWIPS ou outro software utilizado pela Defesa Civil, chamado Interface de Divulgação de Alertas Públicos (Idap), que tem capacidades semelhantes.

5. GRUPO DE TRABALHO FORMAÇÃO E CAPACITAÇÃO

5.1 Introdução

Esta seção apresenta as iniciativas realizadas e propostas por este Comitê Científico de *Nowcasting*. Inicialmente foi realizada uma série de Webinars com o objetivo de apresentar estudos científicos e ações aplicadas em outros países a respeito de eventos de tempo severo. Posteriormente, foram elaborados treinamentos em parceria com uma plataforma de educação direcionada à Meteorologia. Como proposta futura, um Workshop direcionado para discussões científicas e técnicas a respeito do tempo severo será proposto.

5.2 Webinars

a. 03.06.2022 - **Joseph Picca** - *NOAA Storm Prediction Center* - *The Utility of Dual-Polarization Weather Radar in Analyzing and Predicting Warm-Season Hazards* - Link de acesso: https://www.youtube.com/watch?v=DvTBnDMVl7U&list=PL__NL_xq4sdfYP8hFkm-HS_d7lx4BfY9c&index=1&pp=iAQB

b. 01.07.2022 - **Pedro Lohigorry** - *Servicio Meteorológico Nacional Argentina - Nowcasting Operations at the National Meteorological Service of Argentina* - Link de acesso: https://www.youtube.com/watch?v=YaTGrR5dK9Y&list=PL__NL_xq4sdfYP8hFkm-HS_d7lx4BfY9c&index=2&pp=iAQB

c. 05.08.2022 - **Burkely Gallo** - *Cooperative Institute for Severe and High-Impact Weather Research and Operations (CIWRO) & NOAA/NCEP/NWS Storm Prediction Center - United States of America* - *Research at the Interface of Operations: Exploring Severe Convective Storm Forecasting and High-Resolution Models in NOAA's Hazardous Weather Testbed* - Link de acesso: https://www.youtube.com/watch?v=FfUpcPdDIp0&list=PL__NL_xq4sdfYP8hFkm-HS_d7lx4BfY9c&index=3&pp=iAQB

d. 02.09.2022 - **Pieter Groenemeijer** - *European Severe Storms Laboratory - ESSL* - *The European Severe Storms Laboratory: A dedicated Centre for Research and Forecaster Training in Europe* - Link de acesso:

https://www.youtube.com/watch?v=hp_zTdXtUJI&list=PL__NL_xq4sdfYP8hFkm-HS_d7lx4BfY9c&index=4&pp=iAQB

e. 07.10.2022 - **Rita Roberts** - *National Center for Atmospheric Research - NCAR* - *Outcomes of the HIGHWAY Lake Victoria Basin Project in East Africa and Implications for a Sustainable Nowcasting and Early Warning System* - Link de acesso: https://www.youtube.com/watch?v=MtCg5Dn9Zk0&list=PL__NL_xq4sdfYP8hFkm-HS_d7lx4BfY9c&index=5&pp=iAQB

f. 04.11.2022 - **Murilo Fretta** - Defesa Civil de Santa Catarina - Brasil - *Civil Defense, Protection, and Risk Management of Santa Catarina State* - Link de acesso: https://www.youtube.com/watch?v=p6Bmd-B9w68&list=PL__NL_xq4sdfYP8hFkm-HS_d7lx4BfY9c&index=6&pp=iAQB

g. 19.12.2022 - **John Cintineo** - *Cooperative Institute of Meteorological Satellite Studies - CIMSS - United States* - *Using AI to Nowcast Convective Weather* - Link de acesso: https://www.youtube.com/watch?v=iq898KrRxkA&list=PL__NL_xq4sdfYP8hFkm-HS_d7lx4BfY9c&index=7&pp=iAQB

h. 03.03.2023 - **David Sills** - *Western University - Canada* - *The Northern Tornadoes Project - Toward a Better Understanding of Severe Local Storms in Canada* - Link de acesso: https://www.youtube.com/watch?v=83zgvx0UK-Y&list=PL__NL_xq4sdfYP8hFkm-HS_d7lx4BfY9c&index=8&pp=iAQB

i. 14.04.2023 - **Bruno Ribeiro** - *University at Albany - United States* - *Severe Storm Reports Databases as Important Tools in Nowcasting Operations: Perspectives from the Brazilian Database* - Link de acesso: https://www.youtube.com/watch?v=cL3Bn-7g_Y4&list=PL__NL_xq4sdfYP8hFkm-HS_d7lx4BfY9c&index=9&pp=iAQB

j. 25.08.2023 - **Kyle Hilburn** - *Cooperative Institute for Research in the Atmosphere (CIRA) & Colorado State University - United States* - *GOES Radar Estimation via Machine Learning to Inform NWP* - Link de acesso: https://www.youtube.com/watch?v=0O_P94pNfuQ&list=PL__NL_xq4sdfYP8hFkm-HS_d7lx4BfY9c&index=10&pp=iAQB

5.3 Material de treinamento do COMET

Conforme descrito anteriormente, o Comitê Científico de *Nowcasting* em parceria com a *COMET's Education and Training* está auxiliando na elaboração de

material didático exclusivamente voltado ao *nowcasting*. O conteúdo destes cursos inclui teoria e produtos de meteorologia por radar e satélite, métodos de *nowcasting*, inteligência artificial, modelagem numérica, além de estudos de casos focados nos eventos de tempo severo no Brasil e Argentina, com exercícios práticos. Esta plataforma dispõe de uma coleção de cursos destinados à comunidade geocientífica e encontra-se hospedada no Website da MetEd (*https://www.meted.ucar.edu/index.php*) da *University Corporation for Atmospheric Research* (UCAR). Os treinamentos são interativos e sem custo; necessitando apenas de cadastro na plataforma para acesso. Este material será a base para pelo menos dois cursos programados: (i) minicurso (dois dias inteiros) de produtos de *nowcasting* usando apenas o satélite GOES-16, em parceria com as atividades de treinamento em satélites da NOAA/WMO RA III, durante a Conferência Pan-Americana de Meteorologia (CPAM - https://www.agenciarn.com/cpam) em São Paulo, no mês de agosto de 2024, e (ii) "NOAA/WMO RA IV *Hybrid Satellite Applications Training Workshop*" e "WMO/WWRP *Nowcasting Workshop*" que acontecerão em conjunto em Buenos Aires, Argentina, no segundo semestre de 2025.

Abaixo segue os treinamentos já existentes sugeridos por este Comitê, filtrados por tópicos e direcionados para realização do serviço de *Nowcasting*.

a. Tempo Severo

   i. a1. *Geostationary Lightning Mapper (GLM) Background and Applications* - Tempo estimado: ~5 horas - Língua: Inglês - Tipo: Curso - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/courses/89
   ii. *Summer Severe Weather* - Tempo estimado: ~22 horas - Língua: Inglês - Tipo: Curso - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/courses/2
   iii. *Principles of Convection I: Buoyancy and CAPE* - Tempo estimado: ~2 horas - Língua: Inglês - Tipo: Lição - Link de acesso: *https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/16*
   iv. *Principles of Convection II: Using Hodographs* - Tempo estimado: ~2 horas - Língua: Inglês - Tipo: Lição - Link de acesso: *https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/136*

v. *Principles of Convection III: Shear and Convective Storms* - Tempo estimado: ~2 horas - Língua: Inglês - Tipo: Lição - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/137

vi. *Tropical-Extratropical Air MAss Interactions in South America* - Tempo estimado: ~1 hora - Língua: Inglês - Tipo: Lição - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/1023

vii. *Tropical Mesoscale Convective Systems* - Tempo estimado: ~1 hora - Língua: Inglês - Tipo: Lição - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/993

viii. *Tropical Severe Local Storms* - Tempo estimado: ~1 hora - Língua: Inglês - Tipo: Lição - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/995

ix. *Severe Convection: Mesoscale Convective Systems* - Tempo estimado: ~4 hora - Língua: Inglês - Tipo: Lição - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/155

x. *A Convective Storm Matrix: Buoyancy/Shear Dependencies* - Tempo estimado: ~4 hora - Língua: Inglês - Tipo: Lição - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/22

b. Radar Meteorológico

b1. *Weather Radar Fundamentals* - Tempo estimado: ~3 horas - Língua: Inglês - Tipo: Lição - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/960

b2. *Radar Signatures for Severe Convective Weather* - Tempo estimado: ~2 horas - Língua: Inglês - Tipo: Lição - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/193

b3. *Señales de radar características de tiempo convectivo severo* - Tempo estimado: ~4 horas - Língua: Espanhol - Tipo: Lição - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/965

c. Meteorologia por Satélite

c1. *Satellite Skills Building: Skill 1 - Surface Features* - Tempo estimado: ~20 horas - Língua: Inglês - Tipo: Curso - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/courses/95

c2. *Satellite Skills Building: Skill 2 - Cloud Types and Characteristics* - Tempo estimado: ~30 horas - Língua: Inglês - Tipo: Curso - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/courses/97

c3. *Satellite Skills Building: Skill 3 - Broadscale, Synoptic, and Mesoscale Systems* - Tempo estimado: ~27 horas - Língua: Inglês - Tipo: Curso - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/courses/98

c4. *Satellite Skills Building: Skill 4 - Atmospheric Phenomena* - Tempo estimado: ~25 horas - Língua: Inglês - Tipo: Curso - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/courses/99

c5. *Satellite Skills Building: Skill 5 - Derived Fields and Derived Products* - Tempo estimado: ~17 horas - Língua: Inglês - Tipo: Curso - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/courses/100

c6. *Satellite Skills Building: Skill 6 - Oceanic Features and Systems* - Tempo estimado: ~7 horas - Língua: Inglês - Tipo: Curso - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/courses/102

c7. *Satellite Skills Building: Skill 7 - Satellite and Numerical Weather Prediction Comparison* - Tempo estimado: ~13 horas - Língua: Inglês - Tipo: Curso - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/courses/101

c8. *Productos Satelitales para Evaluar el Mantenimiento Convectivo* - Tempo estimado: ~2 horas - Língua: Espanhol - Tipo: Lição - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/10217

c9. *GOES-R Series Faculty Virtual Course: Severe Storms* - Tempo estimado: ~1 hora - Língua: Ingês - Tipo: Lição - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/1370

c10. *GOES-R Series Faculty Virtual Course: Geostationary Lightning Mapper* - Tempo estimado: ~1 hora - Língua: Ingês - Tipo: Lição - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/1381

d. Modelagem Numérica

d1. *NWP Training Series: Introduction* - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/courses/19

d2. *NWP Training Series Course 1: NWP Basics and Background* - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/courses/21

d3. *NWP Training Series Course 2: Using and Adding Value to NWP in the Forecast Process* - Link de acesso: https://www.meted.ucar.edu/education_training/courses/22

e. Hidrologia/Inundações

e1. *Monitoring for Potential Flash Flood & Debris Flow Threats* - Tempo estimado: ~1 hora - Língua: Ingês - Tipo: Lição - Link de acesso: *https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/10162*

f. Meio ambiente e Sociedade

f1. *Analyzing and Evaluating Risk* - Tempo estimado: ~2 horas - Língua: Ingês - Tipo: Lição - Link de acesso: *https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/10072*

5.4 Workshop

O Comitê Científico de *Nowcasting* entende que há necessidade de evento científico recorrente no país com foco no assunto de tempo severo. O evento sugerido é de caráter internacional e tem como premissa abordar temas relacionados há tempestades severas, hidrologia/inundações, meio ambiente e sociedade, radar meteorológico, satélite, entre outros.

A execução do referido evento não foi possível em decorrência de questões orçamentárias das instituições participantes no referido Comitê Científico. No entanto, este Comitê Científico está envolvido no planejamento de três eventos: (i) uma sessão temática em *nowcasting* durante a Conferência Pan-Americana de Meteorologia (CPAM - https://www.agenciarn.com/cpam) que acontecerá em agosto de 2024, (ii) "NOAA/WMO RA IV *Hybrid Satellite Applications Training Workshop*" e "WMO/WWRP *Nowcasting Workshop*" que acontecerão em conjunto em Buenos Aires, Argentina, no segundo semestre de 2025, e (iii) o "WMO/WWRP *Symposium on Nowcasting and Very-Short Range Forecasting*" que deverá ocorrer em 2025 na Coréia do Sul, juntamente com a "AMS *Conference on Radar Meteorology*".

6. GRUPO DE TRABALHO VERIFICAÇÃO

6.1 PRETS - Plataforma de Registro de Eventos de Tempo Severo

6.1.1 Introdução

Para que uma metodologia de previsão de tempo severo seja implementada e melhorada ao longo do tempo, é fundamental que haja documentação da ocorrência de eventos severos. Os registros de tempo severo são importantes para informar meteorologistas operacionais sobre a ocorrência de tempo severo em tempo real e para validar as previsões e alertas. Assim, é necessário a criação e manutenção de um banco de dados de registros de tempo severo.

A PRETS (Plataforma de Registro de Eventos de Tempo Severo), criada em junho de 2018, tem mantido um banco de registros voluntariamente nos últimos 5 anos. Registros de granizo, vendavais e tornados são coletados a partir de mídias sociais, relatos de observadores treinados, caçadores de tempestades e de notícias. Todos os registros passam por um rigoroso controle de qualidade que determina o horário e a localização exata da ocorrência de tempo severo com base em imagens de radar e satélite.

Conforme o sistema de nowcasting é desenvolvido no Brasil, espera-se que meteorologistas operacionais em órgãos estaduais/regionais possam contribuir com a manutenção do banco de dados. Esses órgãos geralmente têm acesso a populações locais e relatos de tempo severo mais detalhados. Esse procedimento também é importante para aumentar a consciência dos meteorologistas operacionais quanto às ocorrências de tempo severo e validar suas previsões.

A Figura 21 mostra o mapa com as ocorrências de 1 de junho de 2018 até 31 de agosto de 2023. Essa iniciativa também está sendo importante para evidenciar que a manutenção de um banco de dados é possível em termos operacionais e trará inúmeros benefícios à meteorologia brasileira no médio e longo prazo. Em vista disso, propõe-se a criação de uma plataforma online onde seja possível inserir novos relatos de tempo severo no Brasil e ter acesso aos relatos passados na forma de um banco de dados.

Figura 21: Mapa total de relatos de tempo severo nos últimos 5 anos, 1 de junho de 2018 até 31 de agosto de 2023. Fonte: PRETS.

6.1.2 O Relato de Tempo Severo

Os relatos surgem a partir da procura, feita por voluntários e técnicos na área, em bancos de notícias (sites especializados, blogs, redes sociais, fotos, informações dos bombeiros, defesas civis municipais, companhias elétricas) referentes a ocorrência de condições adversas de tempo.

Na plataforma são incluídos relatos de granizo (GRA), ventos intensos (VEN; não associados a tornados), tornados (TOR).

Granizo: Todos os tamanhos de granizo são relatados. Quando não se sabe o tamanho, o campo é preenchido com 0.0. Poderá ser registrado, também, acumulado de granizo. Ou seja, quando o granizo forma acúmulo no solo. Deverão ser registradas granizadas >=2cm de espessura em uma superfície plana. Camadas de granizo, que foram acumulados pelo vento, junto a muros, paredes, etc… não entrarão como este quesito.

Vento: Os registros de vento só são relatados quando se trata de danos causados pelo vento (árvores caídas, destelhamentos, queda de postes, muros, etc…) e/ou registro de rajada de vento em 10 m de mais de 80 km/h (22,2 m/s) por uma estação meteorológica. Se há medida da intensidade do vento esta é colocada na intensidade, se não, a intensidade é preenchida com 0.0.

Tornados: Tornados só são relatados quando há *certeza* de que um tornado ocorreu, ou seja, quando foi observada a circulação próxima ao solo e uma nuvem funil associada. Em casos de incerteza da ocorrência de tornado, relata-se como VEN e escreve-se na descrição que há *suspeita* de tornado. Se houver uma análise do evento por especialistas in locu é possível preencher a intensidade com a escala EF (*Enhanced Fujita*; https://pt.wikipedia.org/wiki/Escala_Fujita_melhorada), que vai de 0 a 5.

6.1.3 Incerteza no relato

A grande maioria dos relatos carrega uma incerteza em termos de localização e horário de ocorrência. Por isso, uma alternativa é atribuir a cada relato um nível de incerteza baseado no maior erro possível na localização e horário.

Opções de erro no horário: +- 1 min, 5 min, 15 min, 30 min, 1 h, 3h

Opções de erro na localização: < 100 m, < 1 km, < 3km, < 5 km, < 10 km, < 20 km, < 50 km, < 100 km.

6.1.4 Controles de qualidade

Uma vez que a plataforma tem o objetivo de ser aberta ao público no futuro, é necessário haver um controle de qualidade dos relatos recebidos. O controle de qualidade proposto separa os relatos em 4 tipos em função da confiabilidade, e é inspirado no controle utilizado pelo *European Sereve Weather Database* (https://www.essl.org/cms/european-severe-weather-database/eswd-quality-control/). O relato bruto recebido pela plataforma tem uma qualidade Q0, ou seja, não foi validado por um meteorologista. Quando o meteorologista verifica que de fato houve uma tempestade convectiva no local relatado, é possível requalificar para Q1, ou seja, é um relato *plausível*. Se o relato foi enviado por uma pessoa treinada e/ou foi relatado por mídia com alta confiabilidade, e há *certeza* de que o relato ocorreu de fato, o relato é caracterizado como Q2. E quando há uma validação em campo por uma equipe especializada e detalhamento sobre o tipo de fenômeno e o local de ocorrência, o relato é Q3, que é o maior nível de qualidade. Para fins de pesquisa, por exemplo, é melhor utilizar relatos com Q2 ou Q3, pois há certeza do ocorrido.

Abaixo está um exemplo de relato de tempo severo. Cada relato consiste de uma linha de um arquivo CSV (*comma-separated values*), e podem ser lidos facilmente por programas que trabalham com tabelas (e.g., Microsoft Excel ou Libre Office Calc) e linguagens de programação.

DATA;HHMM;INC_MM;LAT;LON;INC_KM;MUNICIPIO;ESTADO;TIPO;INTENSIDADE;QUALIDADE;DESCRICAO

*20230811;1400;20;-31.1989;-51.6431;3;Camaquã;RS;GRA;11.0;1;*Granizo na localidade de Praia do Areal. Tamanho estimado por foto.

Os dados do relato acima são os seguintes:

Data:	11 de Agosto de 2023
Horário:	14:00 UTC
Incerteza no horário (min):	+- 20 min
Latitude:	31°11'56.0"S
Longitude:	51°38'35.2"O
Incerteza na localização (km):	< 3 km

Município: Camaquã

Estado: Rio Grande do Sul

Tipo de evento: Granizo (GRA)

Intensidade: 11,0 cm (diâmetro)

Nível de qualidade: 1 (relato por observador não treinado in locu)

Descrição/informações: Rajada de vento medida no aeroporto SBPA.

6.2 Satélite Ambiental

A confirmação da ocorrência de um evento de tempo severo (granizo, vendaval ou tornado) está diretamente ligada à presença humana no local desta ocorrência. Isto é, para sabermos se um evento severo ocorreu, precisamos do reporte de alguma pessoa. Essa ligação direta, pessoa / relato, gera um viés no banco de dados de tempo severo atrelado diretamente com a densidade populacional de uma determinada região. Atualmente, há ferramentas de sensoriamento remoto que nos possibilitam identificar fenômenos de tempo severo em áreas com baixa densidade populacional ou desabitadas. São eles os satélites ambientais. Os satélites ambientais de órbita polar ajudam a identificar mudança abrupta no estado padrão da vegetação, e com eles, pode-se identificar rastros de tornados, rastros por macro e micro explosões, rastros por granizo associado a vento intenso em áreas com vegetação permanente e até mesmo em áreas de cultivos. Alguns satélites que possibilitam este uso são: Landsat, Planet, Sentinel e imagens do Google Earth. Por exemplo, no Brasil alguns pesquisadores já usam este tipo de ferramenta para a identificação de rastros de destruição por tornados (LOPES; NASCIMENTO, 2020).

Portanto, a partir da validação através das imagens de radar meteorológico, satélite meteorológico e satélite ambiental, pode-se identificar estes fenômenos severos em áreas desabitadas, melhorando assim o banco de registros de tempo

severo no país. Abaixo as Figuras (22, 23, 24 e 25) ilustram alguns exemplos de danos provocados por granizo, vendaval e tornado no Brasil.

Figura 22: Dano com características **helicoidais em lavoura deixado por um dos tornados que** atingiram **o norte do Rio Grande do Sul em 12 de julho de 2023.** Fonte: PLANET LABS INC. (2023).

Figura 23: Rastro por tornado em mata nativa no evento de tornado do dia 12 de julho de 2023 no RS. Fonte: PLANET LABS INC. (2023).

Figura 24: Visão geral de rastro de danos divergentes provocados por downbursts associado com grande quantidade de granizo em um evento de tempo severo no dia 22 de abril de 2022 no Paraná. Fonte: PLANET LABS INC. (2023).

Figura 25: Zoom de rastro de danos divergentes provocados por downbursts associado com grande quantidade de granizo em um evento de tempo severo no dia 22 de abril de 2022 no Paraná. Fonte: PLANET LABS INC. (2023).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este documento apresentou diversas observações relativas às técnicas utilizadas no *nowcasting*, incluindo sua implementação operacional, envio de alertas, e validação de casos observados. Podemos destacar os seguintes pontos como sendo requisitos principais para um sistema robusto de nowcasting:

- Padronização do procedimento de envio e definições de avisos e alertas;
- Organização regional do *nowcasting*, porém com uma governança nacional;
- Padronização das receitas de radares meteorológicos;
- Unificação dos bancos de dados meteorológicos;
- Desenvolvimento de novos produtos para monitoramento de tempo severo;
- Desenvolvimento de modelos numéricos e produtos derivados com foco em tempo severo;
- Desenvolvimento de uma ferramenta operacional para nowcasting (web e local);
- Estabelecimento de trabalho coordenado nas esferas nacional e regional/estadual;
- Comunicação efetiva (emprego de protocolos objetivos, padronizados e específicos para a emissão de alertas);
- Ampliação do banco de registros de tempo severo;
- Capacitação de profissionais.

Espera-se que este documento sirva como um guia para todas as ações na área de *nowcasting* no Brasil. As iniciativas de *nowcasting* já existentes em instituições regionais e nacionais podem utilizar as sugestões deste documento para melhorar seus procedimentos operacionais. Novas instituições ou implementações de *nowcasting* em instituições já existentes também irão se beneficiar com o uso deste documento. Acreditamos que havendo um esforço conjunto e coordenado no país para implementar um sistema de *nowcasting* robusto e eficiente, o Brasil estará muito mais preparado para lidar com desastres naturais derivados de eventos meteorológicos extremos, desastres que tendem a se tornar cada vez mais frequentes e intensos, devido não apenas às mudanças climáticas, mas também à expansão urbana não planejada e ocupação de áreas de risco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABARCA, S. F.; CORBOSIERO, K. L.; GALARNEAU, T. J. An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115, n. D18, p. 2009JD013411, 27 set. 2010.

ALBRECHT, R. I. et al. Where Are the Lightning Hotspots on Earth? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 97, n. 11, p. 2051–2068, 1 nov. 2016.

ALBRECHT, R. I.; CECIL, D. J.; GOODMAN, S. J. Lightning. Em: NJOKU, E. G. (Ed.). **Encyclopedia of Remote Sensing**. Encyclopedia of Earth Sciences Series. New York, NY: Springer New York, 2014. p. 339–344.

BATEMAN, M.; MACH, D. Preliminary detection efficiency and false alarm rate assessment of the Geostationary Lightning Mapper on the GOES-16 satellite. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 14, n. 03, p. 1, 17 abr. 2020.

BETZ, H. D. et al. LINET—An international lightning detection network in Europe. **Atmospheric Research**, v. 91, n. 2–4, p. 564–573, fev. 2009.

CALHEIROS, A. J. P.; MACHADO, L. A. T. Cloud and rain liquid water statistics in the CHUVA campaign. **Atmospheric Research**, v. 144, p. 126–140, jul. 2014.

CARDOSO, I. et al. Lightning casualty demographics in Brazil and their implications for safety rules. **Atmospheric Research**, v. 135–136, p. 374–379, jan. 2014.

CAVALCANTI, I. F. A. et al. (EDS.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo, SP, Brasil: Oficina de Textos, 2009.

DAVIS, R. S. Flash Flood Forecast and Detection Methods. Em: DOSWELL, C. A. (Ed.). **Severe Convective Storms**. Boston, MA: American Meteorological Society, 2001. p. 481–525.

DIGANGI, E. et al. Analyzing lightning characteristics in central and southern South America. **Electric Power Systems Research**, v. 213, p. 108704, dez. 2022.

DIXON, MI.; WIENER, G. TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting—A Radar-based Methodology. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 10, p. 785–797, 1993.

DOWDEN, R. L.; BRUNDELL, J. B.; RODGER, C. J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, n. 7, p. 817–830, maio 2002.

ELECTRONIC COMMUNICATIONS COMMITTEE. **The Current Status of DFS (Dynamic Frequency Selection) In the 5 GHz frequency range**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://docdb.cept.org/download/729>.

ESCOBAR, C. B3 fecha acordo com Inmet para acesso ao banco de dados. **Monitor do Mercado**, 18 dez. 2023.

FUKAO, S.; HAMAZU, K. Radar Observations of the Clear Atmosphere. Em: FUKAO, S.; HAMAZU, K. (Eds.). **Radar for Meteorological and Atmospheric Observations**. Tokyo:

Springer Japan, 2014. p. 223–267.

GATLIN, P. N.; GOODMAN, S. J. A Total Lightning Trending Algorithm to Identify Severe Thunderstorms. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 27, n. 1, p. 3–22, 1 jan. 2010.

GOODMAN, S. J. et al. Lightning and precipitation history of a microburst-producing storm. **Geophysical Research Letters**, v. 15, n. 11, p. 1185–1188, out. 1988.

GOODMAN, S. J. et al. The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM). **Atmospheric Research**, v. 125–126, p. 34–49, maio 2013.

HEISTERMANN, M.; JACOBI, S.; PFAFF, T. Technical Note: An open source library for processing weather radar data (wradlib). **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 2, p. 863–871, 28 fev. 2013.

HELMUS, J. J.; COLLIS, S. M. The Python ARM Radar Toolkit (Py-ART), a Library for Working with Weather Radar Data in the Python Programming Language. **Journal of Open Research Software**, v. 4, n. 1, p. 25, 18 jul. 2016.

HUTCHINS, M. L. et al. Relative detection efficiency of the World Wide Lightning Location Network. **Radio Science**, v. 47, n. 6, p. 2012RS005049, dez. 2012.

KREHBIEL, P. R. **An analysis of the electrical field change produced by lightning**. PhD Thesis—Manchester, UK: The University of Manchester, 1981.

LAY, E. H. et al. WWLL global lightning detection system: Regional validation study in Brazil. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 3, p. 2003GL018882, fev. 2004.

LIBERATO, J. A. **Proteção e defesa civil: gestão municipal de risco de desastres**. [s.l.] Confederação Nacional de Municípios, 2019.

LOPES, M. M.; NASCIMENTO, E. D. L. Uso de sensoriamento remoto via satélite na identificação de rastros de destruição por tornados em um evento de tempo severo no Rio Grande do Sul. **Ciência e Natura**, v. 42, p. e8, 25 set. 2020.

MACHADO, L. A. T. et al. The Chuva Project: How Does Convection Vary across Brazil? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 95, n. 9, p. 1365–1380, 1 set. 2014.

MACHADO, L. A. T. et al. Overview: Precipitation characteristics and sensitivities to environmental conditions during GoAmazon2014/5 and ACRIDICON-CHUVA. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 18, n. 9, p. 6461–6482, 7 maio 2018.

MARCELINO, E. V. **Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos - Caderno Didático nº 1**. Santa Maria, RS: Instituto Nacionald e Pesquisas Espaciais, 2008. v. 1

MARCHAND, M.; HILBURN, K.; MILLER, S. D. Geostationary Lightning Mapper and Earth Networks Lightning Detection Over the Contiguous United States and Dependence on Flash Characteristics. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 21, p. 11552–11567, 16 nov. 2019.

MORALES, C. et al. **Sferics Timing And Ranging NETwork – STARNET: 8 years of measurements in South America**. . Em: XV INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY. Norman, OK, USA: 2014.

MORALES, C. A. Thunderstorm Efficiency Regimes in South America as Observed by STARNET and TRMM. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 21, p. 11428–11451, 2019.

MUELLER, E. A.; KENNEDY, P. C.; BRUNKOW, DAVID A. **CHILL Radar: Data Analysis Guide**. Champaign, Illinois: Illinois State Water Survey, 1989. Disponível em: <http://hdl.handle.net/2142/48970>.

NACCARATO, K. P. et al. **VALIDATION OF THE NEW GLD360 DATASET IN BRAZIL: FIRST RESULTS**. Extended Abstracts. **Anais**... Em: 21ST INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE & 3RD INTERNATIONAL LIGHTNING METEOROLOGY CONFERENCE. Orlando, FL: Vaisala, 2010. Disponível em: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/7.Naccarato,%20Pinto,%20Garcia.pdf>

NACCARATO, K. P.; PINTO, O. Improvements in the detection efficiency model for the Brazilian lightning detection network (BrasilDAT). **Atmospheric Research**, v. 91, n. 2–4, p. 546–563, fev. 2009.

NASCIMENTO, E. D. L. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil? **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, 2005.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. **NASA Radar Software Library**. , 2017. Disponível em: <https://trmm-fc.gsfc.nasa.gov/trmm_gv/software/rsl/index.php>

OMM (ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL). **Guidelines for Nowcasting Techniques**. Geneva: World Meteorological Organization, 2017.

OMM (ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL). **Manual on the Global Data-processing and Forecasting System**. Geneva: World Meteorological Organization, 2019.

PINTO, O. et al. Cloud-to-Ground Lightning Observations in Brazil. Em: BETZ, H. D.; SCHUMANN, U.; LAROCHE, P. (Eds.). **Lightning: Principles, Instruments and Applications**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. p. 209–229.

PINTO, O.; PINTO, I. R. C. A.; NACCARATO, K. P. Maximum cloud-to-ground lightning flash densities observed by lightning location systems in the tropical region: A review. **Atmospheric Research**, v. 84, n. 3, p. 189–200, maio 2007.

ROSENFELD, D.; ULBRICH, C. W. Cloud Microphysical Properties, Processes, and Rainfall Estimation Opportunities. **Meteorological Monographs**, v. 30, n. 52, p. 237–258, 2003.

RUDLOSKY, S. Evaluating ENTLN performance relative to TRMM/LIS. **Journal of Operational Meteorology**, v. 3, n. 2, p. 11–20, 13 jan. 2015.

RUDLOSKY, S. D.; GOODMAN, S. J.; VIRTS, K. S. Lightning Detection: GOES-R Series Geostationary Lightning Mapper. Em: **The GOES-R Series**. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 193–202.

RUDLOSKY, S. D.; VIRTS, K. S. Dual geostationary lightning mapper observations. **Monthly Weather Review**, v. 149, n. 4, p. 979–998, 2021.

RYZHKOV, A. V.; GIANGRANDE, S. E.; SCHUUR, T. J. Rainfall Estimation with a

Polarimetric Prototype of WSR-88D. **Journal of Applied Meteorology**, v. 44, n. 4, p. 502–515, 1 abr. 2005.

SAID, R.; GOŁKOWSKI, M.; HARID, V. Empirical Parameterization of Broadband VLF Attenuation in the Earth-Ionosphere Waveguide. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 128, n. 4, p. e2022JA030742, abr. 2023.

SAID, R. K.; INAN, U. S.; CUMMINS, K. L. Long-range lightning geolocation using a VLF radio atmospheric waveform bank. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115, n. D23, p. 2010JD013863, 16 dez. 2010.

SAID, R.; MURPHY, M. **GLD360 upgrade: Performance analysis and applications**. Extended Abstracts. **Anais**... Em: 24TH INT. LIGHTNING DETECTION CONF. AND SIXTH INT. LIGHTNING METEOROLOGY CONF.,. San Diego, CA: Vaisala, 2016. Disponível em: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Ryan%20Said%20and%20Martin%20Murphy.%20GLD360%20Upgrade%20Performance%20Analysis%20and%20Applications.pdf>

SALTIKOFF, E. et al. The Threat to Weather Radars by Wireless Technology. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 97, n. 7, p. 1159–1167, 1 jul. 2016.

SCHMIT, T. J. et al. Legacy Atmospheric Profiles and Derived Products From GOES-16: Validation and Applications. **Earth and Space Science**, v. 6, n. 9, p. 1730–1748, set. 2019.

SCHULTZ, C. J. et al. Kinematic and Microphysical Significance of Lightning Jumps versus Nonjump Increases in Total Flash Rate. **Weather and Forecasting**, v. 32, n. 1, p. 275–288, 1 fev. 2017.

SCHULTZ, C. J.; PETERSEN, W. A.; CAREY, L. D. Lightning and Severe Weather: A Comparison between Total and Cloud-to-Ground Lightning Trends. **Weather and Forecasting**, v. 26, n. 5, p. 744–755, 1 out. 2011.

SPERLING, V. B. **Processos físicos e elétricos das tempestades de granizo na região sul do Brasil**. PhD Thesis—São Paulo, SP - Brasil: Universidade de São Paulo, 2018.

TOMINAGA, L. K. et al. (EDS.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. 1a. ed ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

UBA, D. M. et al. **TATHU - Software para rastreio e análise do ciclo de vida de sistemas convectivos**. São José dos Campos - SP, BrasilINPE, , 2022. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/47AF772>

VIRTS, K. S. et al. Bayesian Analysis of the Detection Performance of the Lightning Imaging Sensors. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 41, n. 5, p. 441–455, maio 2024.

WANG, D. et al. The Green Ocean: precipitation insights from the GoAmazon2014/5 experiment. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 18, n. 12, p. 9121–9145, 29 jun. 2018.

WILLIAMS, E. R. The Electrification of Severe Storms. Em: DOSWELL, C. A. (Ed.). **Severe Convective Storms**. Boston, MA: American Meteorological Society, 2001. p. 527–561.

WOLFF, D. B.; KELLEY, B. L. **NASA's Radar Software Library (RSL) and RSL in IDL**. . Em: 34TH CONFERENCE ON RADAR METEOROLOGY. Williamsburg, VA: American

Meteorological Society, 2009. Disponível em: <https://ams.confex.com/ams/34Radar/techprogram/paper_155299.htm>

ZHU, Y. et al. Upgrades of the Earth Networks Total Lightning Network in 2021. **Remote Sensing**, v. 14, n. 9, p. 2209, 5 maio 2022.

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Relatório sobre os radares meteorológicos pertencentes ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo

Autor: Vitor Goede

Supervisores: Izabelly Costa e Thiago Biscaro

Data: 10 de novembro de 2022

1. Contextualização

O Comitê de Nowcasting tem como objetivo o desenvolvimento e padronização de metodologias para realização da previsão de curtíssimo prazo (*nowcasting*) no Brasil. Em particular, radares meteorológicos são ferramentas importantíssimas para realização desta tarefa ao gerarem varreduras com alta resolução espacial e temporal. Contudo, visando o desenvolvimento e aplicação de produtos derivados a partir dos momentos base dos radares brasileiros, faz-se necessária a realização de ajustes das configurações e estratégias de varredura dos radares, assim como o controle de qualidade desses equipamentos. Em particular, ao analisar os dados volumétricos dos radares Doppler de polarização única pertencentes ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), foram identificados problema quanto a qualidade da variável velocidade radial (v_r).

2. Problemas e sugestões

Conforme Doviak e Zrnic (1993, p. 132), se uma sequência de pulsos $M + 1$ é transmitida por um radar meteorológico, a velocidade radial de um alvo no espaço iluminado sucessivamente por um trem de pulsos de radiação eletromagnética igualmente espaçados entre si, é estimada através da mudança de fase associada ao deslocamento do alvo entre pulsos:

$$\hat{v}_r = -\frac{\lambda}{4\pi T} Arg\, \hat{R}(T) = -\frac{\lambda}{4\pi T}\hat{\theta} \qquad (1)$$

em que, λ o comprimento de onda de operação do radar em unidades de m, T o Período de Repetição de Pulsos (PRP) em s. Contudo, em engenharia é mais comum a utilização da Frequência de Repetição de Pulso (FRP), onde $FRP = T^{-1}$ e sua unidade é Hz. Ao longo do documento, alguns desenvolvimentos matemáticos serão feitos tanto a partir das PRPs, como também as FRPs.

O argumento da função de autocorrelação $\hat{R}(T)$ é equivalente a mudança de fase $\hat{\theta}$ em radianos observada entre pulsos sucessivos a partir de um alvo no espaço que é iluminado pelo feixe do radar. Por outro lado, caso o deslocamento do alvo entre pulsos resulte em uma mudança de fase fora do intervalo $-\pi < \hat{\theta} \leq \pi$, $\hat{v}_r$ pode se tornar ambíguo e *folding* da velocidade será observado. Portanto a velocidade máxima não-ambígua v_a capaz de ser estimada pelo radar será:

$$v_a = \pm\frac{\lambda}{4\pi T}\pi = \pm\frac{\lambda}{4T} = \pm\frac{\lambda FRP}{4} \tag{2}$$

Já o alcance máximo não-ambíguo r_a de forma a evitar a sobreposição de ecos, também depende da PRP do radar tal como:

$$r_a = \frac{cT}{2} \tag{3}$$

em que, $c \approx 3 \times 10^8$ m s^{-1} é a velocidade da luz no vácuo.

Ao combinarmos ambas as equações 2 e 3, chegamos ao dilema Doppler que é fundamental para os radares Doppler meteorológicos:

$$r_a v_a = \frac{c\lambda}{8} \tag{4}$$

Lembrando que os dois termos do lado direito da equação 4 são constantes, conclui-se que o aumento de uma das variáveis do lado esquerdo da igualdade acarreta na redução da outra, e vice-versa. Contudo, Zrnic e Mahapatra (1985) introduziram duas metodologias de modo a contornar este problema, sendo uma delas comumente empregada nos radares brasileiros, incluindo os radares Doppler de polarização horizontal operados pelo DECEA. A metodologia utilizada é a de *staggered PRTs*, onde M trens pulso de radiação eletromagnética são emitidos alternando entre dois períodos de repetição de pulso T_1 e T_2 distintos, onde $T_1 < T_2$ ou $PRF_1 > PRF_2$. $K = T_1/T_2 = FRP_2/FRP_1$ é a razão entre as PRPs curta e longa que pode ser expressa através de números inteiros primos relativos tal que $K = T_1/T_2 = m/n$. Alternativamente, no caso de FRPs, $K = FRP_2/FRP_1 = m/n$. A velocidade radial pode então ser estimada através da auto-covariância entre os períodos T_1 e T_2:

$$\hat{v}_r = \frac{\lambda}{4\pi(T_2-T_1)} Arg\left[\frac{\hat{R}(T_1)}{\hat{R}(T_2)}\right] = \frac{\lambda}{4\pi}\frac{(\hat{\theta}_1-\hat{\theta}_2)}{(T_2-T_1)} = \frac{\lambda}{4\pi}\frac{FRP_1FRP_2(\hat{\theta}_1-\hat{\theta}_2)}{(FRP_1-FRP_2)} \quad (5)$$

Novamente, caso a diferença entre as fases das PRPs curta e longa esteja fora do intervalo $-\pi < (\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2) \leq \pi$, *folding* será novamente observado. Portanto a nova velocidade máxima não-ambígua estendida passa a ser:

$$v_m = \pm\frac{\lambda}{4\pi(T_2-T_1)}\pi = \pm\frac{\lambda}{4(T_2-T_1)} = \pm\frac{\lambda}{4}\frac{FRP_1FRP_2}{(FRP_1-FRP_2)} \quad (6)$$

Enquanto que o alcance máximo não-ambíguo proposto passa a ser:

$$r_m = \frac{c(T_2+T_1)}{2} = \frac{c}{2}\frac{(FRP_1+FRP_2)}{FRP_1FRP_2} \quad (7)$$

Analisando a equação 6, é simples concluir que v_m é inversamente proporcional a diferença entre as PRPs longa e curta, e quanto menor essa diferença, maior a velocidade máxima não-ambígua. Contudo, Zrnic e Mahapatra (1985) também mostram em seu apêndice A, que a variância na estimativa da velocidade radial média da série total de pulsos, reconstruída a partir das velocidades radiais estimadas para T_2 e T_1, é inversamente proporcional à diferença entre ambas as PRPs. Portanto, se a razão $K \rightarrow 1$ entre PRPs curta e longa, haverá uma elevada flutuação estatística que afetará a qualidade da variável.

Torres, Dubel, Zrnic (2004) propõem que, ao invés de estimar a velocidade radial a partir da equação 5, sejam utilizadas as velocidades obtidas a partir da PRP curta para realizar o *unfolding* das velocidades obtidas da PRP longa, com base em regras de *unfolding* pré-estabelecidas considerando a razão K entre as PRPs. Como o *folding* em T_1 e T_2 ocorre em intervalos de velocidade diferentes, é possível realizar o *unfolding* de uma pela outra. Além disso, Sachidananda e Zrnic (2000, 2002), e Torres, Dubel, Zrnic (2004) também sugerem que o alcance máximo não-ambíguo aplicado nos radares seja equivalente ao alcance máximo não-ambíguo da PRP curta $r_a = cT_1/2$.

No entanto, Torres, Dubel, Zrnic (2004) ainda alertam para problemas que podem surgir durante a reconstrução da velocidade real, caso algumas considerações não sejam levadas em conta. Conforme Zrnic e Mahapatra (1985), caso $K \rightarrow 1$, a alta variância pode acabar na degradação da qualidade das velocidades obtidas para as diferentes PRPs. Além disso, a variância também pode ser exacerbada em áreas de elevada largura espectral (σ_v) que caracterizam elevado cisalhamento azimutal e/ou turbulência (TORRES; ZITTEL; SAXION, 2009), conforme a Figura 1. Eventualmente, o algoritmo de *unfolding* acaba utilizando uma regra inadequada, o que acarreta em um “erro catastrófico” (TORRES; DUBEL; ZRNIĆ,

2004; TORRES; ZITTEL; SAXION, 2009) que resulta em estimativas de velocidade completamente incorretos. Esses erros são facilmente identificados na forma de valores irreais e ruído em um PPI de v_r conforme a Figura 2. Por outro lado, pode-se corrigir estes erros utilizando-se algoritmos com base na continuidade do campo de v_r [p.ex., Altube et al. (2017); Hengstebeck et al. (2018)]. Ainda assim, o número de erros catastróficos deve ser o mínimo possível de modo a garantir a eficiência destes algoritmos na correção de v_r.

Figura 1 – Porcentagem de erros catastróficos em função de σ_v para diferentes elevações para um radar Doppler WRS-88D da rede norte-americana de radares meteorológicos. Elevações mais baixas necessitam de PRPs mais longas, e, por conseguinte, há um aumento nas variâncias de v_r e na porcentagem de erros catastróficos. É evidente que o número de erros catastróficos aumenta drasticamente a partir de $\sigma_v = 4$ m/s para elevações baixas, e 5 m/s para elevações altas. Fonte: adaptado de Torres, Dubel, Zrnic (2004).

Figura 2 – Campo de v_r para um episódio de convecção profunda em 31 de março de 2008 para um radar WSR-88D. Note os diversos pixels que não se coincidem com o escoamento observado (i.e., ruído na forma de pixels verdes). Cores quentes indicam escoamento que se afasta do radar, enquanto que cores frias indicam escoamento em direção ao radar. Fonte: adaptado de Torres, Dubel, Zrnic (2004).

Os radares brasileiros operacionais atualmente, utilizam razões de PRPs de 2/3 3/4 e 4/5. Para FRPs, as razões são de 3/2, 4/3 e 5/4, respectivamente. Os Radares pertencentes ao DECEA por exemplo, utilizam uma razão $K = 3/4$ (4/3 para FRPs) onde $T_1 = 1,67\times10^{-3}$ s e $T_2 = 2,22\times10^{-3}$ s ($FRP_1 = 600$ Hz e $FRP_2 = 450$ Hz), em todas as elevações de varredura. Considerando o comprimento de onda

$\lambda = 0,11$ m e fazendo-se uso da equação 6, a velocidade máxima não-ambígua estendida é $v_m = \pm 49,53$ m s^{-1}. Apesar de este intervalo limitar a ocorrência de *folding* a situações extremas, inevitavelmente, áreas de elevada turbulência ou cisalhamento azimutal são dominadas por uma grande quantidade de erros catastróficos. Um exemplo é exibido na Figura 3 durante um episódio de tempo severo ocorrido no estado de São Paulo no dia 30 de maio de 2019. Núcleos de convecção profunda e severa com ecos superiores a 60 dBZ são observados na Figura 3a, incluindo três tempestades supercelulares destacadas por mesociclones identificados na Figura 3b como áreas de elevado cisalhamento azimutal (alta variação da magnitude e direção de v_r entre azimutes). No entanto, essas mesmas áreas são marcadas por um elevado número de erros catastróficos, que eventualmente impedem a aplicação de metodologias objetivas para a identificação de mesociclones. Mesmo com a aplicação da correção com base em uma estatística circular móvel a partir de pixels de v_r corretos desenvolvido por Hengstebeck et al. (2018), o algoritmo é incapaz de corrigir adequadamente todos os erros (Fig. 3c). Por último, um filtro móvel 3x3 com base na mediana de cada pixel (Fig. 3d) foi aplicado de modo a tentar remover os ruídos que não foram corrigidos adequadamente pelo algoritmo. Apesar de suprimir os ruídos remanescentes, este último passo acarreta na suavização de extremos, e, ainda assim, não é capaz de resolver todos os erros.

Figura 3 – PPI de 0,5° do radar de São Roque as 2100 UTC do dia 30 de maio de 2019. Em (a) é exposto o fator de refletividade horizontal, (b) a velocidade radial, (c) a velocidade radial corrigida após aplicar o algoritmo de Hengstebeck et al. (2018), e (d) após a aplicação de um filtro móvel 3x3 com base na mediana de cada pixel. Círculos e elipses tracejadas indicam as áreas de erros catastróficos antes (b), após a correção utilizando estatísticas circulares (c), e a passagem do filtro com base na mediana móvel (d).

Por outro lado, o radar de Manaus que pertence ao CENSIPAM faz uso de uma razão $K = 2/3$ (3/2 para FRPs) onde $T_1 = 1,61\times10^{-3}$ e $T_2 = 2,42\times10^{-3}$ s ($FRP_1 = 621$ Hz e $FRP_2 = 414$ Hz). Tendo em mente que o comprimento de onda $\lambda = 0,10$ m, e repetindo o cálculo realizado no parágrafo anterior, a velocidade máxima não-ambígua deste radar é $v_m = \pm31,07$ m s^{-1}. Apesar do seu valor ser comparativamente inferior, este ainda é suficientemente alto para evitar a ocorrência de *folding* apenas à casos extremos. A Figura 4 apresenta núcleos convectivos ao noroeste do radar de Manaus na noite do dia 13 de dezembro de 2013. Ecos de refletividade horizontal se aproximam de 50 dBZ nas regiões de convecção mais intensa (Fig. 4a). Em contrapartida é possível notar que os erros catastróficos se limitam às células mais intensas ao oeste (Fig. 4b). Contudo, ao

abrangerem áreas menores, o algoritmo de correção é capaz de resolver a maioria dos erros catastróficos conforme exposto na Figura 4c. Apesar de algumas áreas de leve ruído permanecerem, a qualidade do campo de velocidade é significativamente superior em comparação ao exemplo anterior, quase não se fazendo necessária a aplicação do filtro móvel (Fig. 4d).

Com base na literatura existente sobre o tema (SACHIDANANDA; ZRNIĆ, 2000, 2002; TORRES; DUBEL; ZRNIĆ, 2004; TORRES; WARDE, 2017; TORRES; ZITTEL; SAXION, 2009; WARDE; TORRES, 2017; ZRNIĆ; MAHAPATRA, 1985), além dos resultados observacionais apresentados anteriormente, recomenda-se a alteração da razão entre PRPs do método de PRPs alternadas implementado nos radares do DECEA de modo a ainda estender a velocidade máxima não-ambígua, mas também obter a melhor qualidade possível.

Figura 4 – PPI de 0,9° do radar de Manaus as 2224 UTC do dia 13 de novembro de 2019. Em (a) é exposto o fator de refletividade horizontal, (b) a velocidade radial, (c) a velocidade radial corrigida após aplicar o algoritmo de Hengstebeck et al. (2018), e (d) após a aplicação de um filtro móvel 3x3 com base na mediana de cada pixel. Círculos e elipses tracejadas indicam as áreas de erros catastróficos antes (b), após a correção utilizando estatísticas circulares (c), e a passagem do filtro com base na mediana móvel (d).

Considerando a configuração dos radares do CENSIPAM tal que $T_1 = 1,61\times10^{-3}$ s e $T_2 = 2,42\times10^{-3}$ s ($FRP_1 = 621$ Hz e $FRP_2 = 414$ Hz), o alcance máxima não-ambíguo seria $r_a = cT_1/2 = 240000$ m. Já a velocidade máxima não-ambígua estendida com base na equação 6, tendo que $\lambda = 0,11$ m, será $v_m = \pm34,18$ m s^{-1}. No entanto, deve-se levar em conta o número de pulsos para a estimativa das variáveis de modo a manter sua qualidade. Atualmente, o número de amostras M dos radares do DECEA varia de 10 a 49, com taxas de rotação da antena de α de 17,666 a 18,545 ° s^{-1}. De modo a padronizar a configuração dos radares, pode-se partir da inequalidade proposta por Doviak e Zrnic (1993) tal que a resolução azimutal θ seja de 1°, sem ser distorcida significativamente pela rotação da antena:

$$M \leq \frac{\theta}{\alpha_{max} T_2} \tag{8}$$

Com base na nova estratégia de varredura volumétrica proposta (encaminhada pelo pesquisador Thiago Biscaro em junho deste ano) que é composta por 9 elevações e leva cerca de 5 minutos para ser completada, a taxa de rotação máxima da antena pode ser reduzida para $\alpha_{max} = 12$ ° s^{-1}. Considerando as PRP propostas e utilizando a equação 8, o número de amostras para as respectivas PRPs é $M_1 = 51$ e $M_2 = 34$, totalizando 85 amostras para cada raio. A configuração proposta, portanto, é suficiente para manter uma baixa variância de v_r e reduzir o número de erros catastróficos, além de completar as varreduras volumétricas dentro do período desejado.

3. Referências

ALTUBE, P. et al. Correction of dual-PRF Doppler Velocity Outliers in the Presence of Aliasing. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 7, p. 1529–1543, 2017.

DOVIAK, R. J.; ZRNIĆ, D. S. **Doppler Radar and Weather Observations**. 2. ed. San Diego, California: Academic Press, 1993.

HENGSTEBECK, T. et al. Radar network-based detection of mesocyclones at the German Weather Service. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 35, n. 2, p. 299–321, 1 fev. 2018.

SACHIDANANDA, M.; ZRNIĆ, D. S. Clutter Filtering and Spectral Moment Estimation for Doppler Weather Radars Using Staggered Pulse Repetition Time (PRT). **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 17, n. 3, p. 323–331, 2000.

SACHIDANANDA, M.; ZRNIĆ, D. S. An Improved Clutter Filtering and Spectral Moment Estimation Algorithm for Staggered PRT Sequences. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, n. 12, p. 2009–2019, 2002.

TORRES, S. M.; DUBEL, Y. F.; ZRNIĆ, D. S. Design, Implementation, and Demonstration of a Staggered PRT Algorithm for the WSR-88D. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 21, n. 9, p. 1389–1399, 2004.

TORRES, S. M.; WARDE, D. A. Staggered-PRT sequences for doppler weather radars. Part I: Spectral analysis using the autocorrelation spectral density. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 1, p. 51–63, 2017.

TORRES, S.; ZITTEL, D.; SAXION, D. **UPDATE ON DEPLOYMENT OF STAGGERED PRT FOR THE NEXRAD NETWORK**. 25th Conference on International Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology. **Anais**...Phoenix, AZ: American Meteorological Society, 2009.

WARDE, D. A.; TORRES, S. M. Staggered-PRT Sequences for Doppler Weather Radars. Part II: Ground Clutter Mitigation on the NEXRAD Network Using the CLEAN-AP Filter. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 3, p. 703–716, 12 jan. 2017.

ZRNIĆ, D. S.; MAHAPATRA, P. Two Methods of Ambiguity Resolution in Pulse Doppler Weather Radars. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 21, n. 4, p. 470–483, 1985.

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Relatório sobre os radares meteorológicos pertencentes à Secretaria de Defesa Civil de Santa Catarina

Autor: Vitor Goede

Supervisores: Izabelly Costa e Thiago Biscaro

Data: 23 de novembro de 2022 e revisão em 11 de julho de 2023

1. Contextualização

O Comitê Científico de Nowcasting tem como objetivo o desenvolvimento e padronização de metodologias para realização da previsão de curtíssimo prazo (*nowcasting*) no Brasil. Em particular, radares meteorológicos são ferramentas importantíssimas para realização desta tarefa ao gerarem varreduras com alta resolução espacial e temporal. Contudo, visando o desenvolvimento e aplicação de produtos derivados a partir dos momentos base dos radares brasileiros, faz-se necessária a realização de ajustes das configurações e estratégias de varredura dos radares, assim como o controle de qualidade desses equipamentos. Em particular, ao analisar os dados volumétricos dos radares Doppler de dupla-polarização pertencentes ao Secretaria de Defesa Civil do estado de Santa Catarina (SDCSC), foram identificados problemas quanto às estratégias de escaneamento dos radares, qualidade da variável velocidade radial (v_r), além da qualidade das variáveis polarimétricas.

2. Problemas e sugestões

2.1 Estratégias de escaneamento

Ao analisar os diversos radares banda S que compõem a rede de radares meteorológicos da SDC, foi identificada a não padronização da estratégia de escaneamento dos radares, com estes apresentando varreduras volumétricas compostas por 11 e 10 elevações para Chapecó (Fig. 1a) e Lontras (Fig. 1b), respectivamente. Além disso, as elevações também variam, com Chapecó apresentando maior resolução em níveis baixos (Fig. 1a) e Lontras em níveis médios (Fig. 1b).

Figura 1 – Estratégias de escaneamento dos radares banda S pertencentes à SDCSC. Cores indicam as elevações utilizadas com o centro do feixe de 3 dB indicado pela linha escura, enquanto regiões coloridas indicam toda a área amostrada pelo feixe. (a) Chapecó e (b) Lontras.

Informações sobre a receita do radar de Chapecó são apresentadas na Tabela 1. Essencialmente, o radar emprega PRPs alternadas (a ser discutido na subseção seguinte) nas seis primeiras elevações de modo a estender a velocidade máxima não-ambígua e manter um alcance máximo teórico de 250000 m. Contudo, o radar amostra efetivamente até 240000 m nas quatro primeiras elevações, 220000 m em 4,5° e 175000 m em 6,1°, o que reduz o tempo necessário para completar uma revolução completa nessas elevações. Já em elevações mais altas, como a partir de 8°, uma PRP fixa é aplicada já que os topos das tempestades raramente ultrapassam a marca de 20 km, e, portanto, a longas distâncias o feixe acaba não amostrando qualquer eco meteorológico. Apesar de teoricamente os alcances máximos serem de 125000 m nas quatro últimas elevações, o radar amostra novamente até distâncias inferiores ao alcance máximo não-ambíguo teórico sendo 120000 m em 10,2°, 80000 m em 12,9°, 70000 m em 16,1°, e 55000 m em 20°. O período de geração de um volume completo nesta configuração é de aproximadamente quatro minutos. Um detalhe que chama a atenção é a resolução angular mais alta nas elevações de PRPs alternadas, sendo esta de 0,9° para um radar de largura de 3 dB de aproximadamente 1,0° o que caracteriza uma super-resolução.

Tabela 1 – Configuração da estratégia de varredura do radar de Chapecó. As elevações são separadas de acordo com o esquema de PRPs empregado. α indica a velocidade de revolução da antena, T_1 e T_2 são os Períodos de Repetição de Pulso (PRP) curto e longo sendo T_1 a PRP fixa em elevações mais altas, e FRP é a frequência de repetição de pulsos. M é o número total de amostras por raio, R_a, é o alcance máximo não-ambíguo em m. O tempo necessário para completar um escaneamento de 360 ° em segundos é indicado na última coluna.

Elevações (°)	α **(°s^{-1})**	θ **(°)**	T_1 (× 10^{-3} **s) /** FRP_1 **(Hz)**	T_2 (× 10^{-3} **s) /** FRP_2 **(Hz)**	**M**	R_a **(m)**	**Tempo por elevação (s)**

0.6,1.3, 2.2, 3.2, 4.5, 6.1	14	0.9	1.67/600	2.5/480	32	250000	28
8	22	1	0.91/1100	-	50	135000	19
10.2, 12.9, 16.1, 20	28	1	0.83/1200	-	43	125000	15

A Tabela 2, por sua vez, apresenta as especificações da estratégia do radar de Lontras. Este também faz uso de PRPs alternadas nas seis primeiras elevações, seguido de PRPs constantes nas quatro últimas elevações onde os valores escolhidos novamente variam conforme o aumento da elevação. O período de geração de um volume completo nesta configuração é de um pouco mais que quatro minutos e meio. Novamente, nas elevações com PRPs alternadas, apesar do alcance máximo teórico ser de 250000 m, o equipamento amostra somente até 240000 m. Uma particularidade observada neste equipamento é a utilização de uma resolução radial de 125 m que é muito alta para radares banda S, que, em sua grande maioria, empregam resoluções de 250 m [p.ex., Doviak et al. (2000)] como no caso do próprio radar de Chapecó. Além disso, a resolução angular não é constante ao longo das elevações, sendo inferior a largura do feixe 3 dB que é de 1° nas seis primeiras, e desnecessariamente alta nas elevações posteriores. Por último, é importante verificar que há um "buraco" entre 1,0° e 2,3° (Fig. 1b) onde o feixe do radar acaba não amostrando parte da baixa troposfera.

Tabela 2 – Idem à Tabela 1, mas para o radar de Lontras.

Elevações (°)	α **(°s^{-1})**	θ **(°)**	T_1 **(**$\times 10^{-3}$ **s) /** FRP_1 **(Hz)**	T_2 **(**$\times 10^{-3}$ **s) /** FRP_2 **(Hz)**	**M**	R_a **(m)**	**Tempo por elevação (s)**
0.5, 1.0, 2.3, 3.3, 4.2, 5.2,	12	1.03	1.67/600	2.5/480	46	250000	30
6.2, 8	15	0.91	1.33/750	-	46	200000	24
10, 12	17	0.78	1.0/1000	-	43	120000	21

2.1 O dilema Doppler e os esquemas PRP

Conforme Doviak e Zrnic (1993, p. 132), se uma sequência de pulsos $M + 1$ é transmitida por um radar meteorológico, a velocidade radial de um alvo no espaço iluminado sucessivamente por um trem de pulsos de radiação eletromagnética igualmente espaçados entre si, é estimada através da mudança de fase associada ao deslocamento do alvo entre pulsos:

$$\hat{v}_r = -\frac{\lambda}{4\pi T} Arg\, \hat{R}(T) = -\frac{\lambda}{4\pi T}\hat{\theta} \qquad (1)$$

em que, λ o comprimento de onda de operação do radar em unidades de m, T o Período de Repetição de Pulsos (PRP) em s. Contudo, em engenharia é mais comum a utilização da Frequência de Repetição de Pulso (FRP), onde $FRP = T^{-1}$ e sua unidade é Hz.

O argumento da função de autocorrelação $\hat{R}(T)$ é equivalente a mudança de fase $\hat{\theta}$ em radianos observada entre pulsos sucessivos a partir de um alvo no espaço que é iluminado pelo feixe do radar. Por outro lado, caso o deslocamento do alvo entre pulsos resulte em uma mudança de fase fora do intervalo $-\pi < \hat{\theta} \leq \pi$, $\hat{v}_r$ pode se tornar ambíguo e *folding* da velocidade será observado. Portanto a velocidade máxima não-ambígua v_a capaz de ser estimada pelo radar será:

$$v_m = \pm\frac{\lambda}{4\pi T}\pi = \pm\frac{\lambda}{4T} \qquad (2)$$

Já o alcance máximo não-ambíguo r_a de forma a evitar a sobreposição de ecos, também depende da PRP do radar tal como:

$$r_m = \frac{cT}{2} \qquad (3)$$

em que, $c \approx 3 \times 10^8$ m s^{-1} é a velocidade da luz no vácuo.

Ao combinarmos ambas as equações 2 e 3, chegamos ao dilema Doppler que é fundamental para os radares Doppler meteorológicos:

$$r_m v_m = \frac{c\lambda}{8} \tag{4}$$

Lembrando que os dois termos do lado direito da equação 4 são constantes, conclui-se que o aumento de uma das variáveis do lado esquerdo da igualdade acarreta na redução da outra, e vice-versa. Contudo, Zrnic e Mahapatra (1985) introduziram duas metodologias de modo a contornar este problema, sendo uma delas comumente empregada nos radares brasileiros, incluindo os radares Doppler de dupla-polarização operados pela SDCSC. A metodologia utilizada é a de *staggered PRTs*, onde M trens pulso de radiação eletromagnética são emitidos alternando entre dois períodos de repetição de pulso T_1 e T_2 distintos, onde $T_1 < T_2$ $(FRP_1 > FRP_2)$. $K = T_1/T_2 = FRP_2/FRP_1$ é a razão entre as PRPs curta e longa que pode ser expressa através de números inteiros primos relativos tal que $K = T_1/T_2 = m/n$. A velocidade radial pode então ser estimada através da auto-covariância entre os períodos T_1 e T_2:

$$\hat{v}_r = \frac{\lambda}{4\pi(T_2 - T_1)} Arg\left[\frac{\hat{R}(T_1)}{\hat{R}(T_2)}\right] = \frac{\lambda}{4\pi}\frac{(\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2)}{(T_2 - T_1)} \tag{5}$$

Novamente, caso a diferença entre as fases das PRPs curta e longa esteja fora do intervalo $-\pi < (\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2) \leq \pi$, *folding* será novamente observado. Portanto a nova velocidade máxima não-ambígua estendida passa a ser:

$$v_m = \pm\frac{\lambda}{4\pi(T_2 - T_1)}\pi = \pm\frac{\lambda}{4(T_2 - T_1)} \tag{6}$$

Enquanto que o alcance máximo não-ambíguo proposto passa a ser:

$$r_m = \frac{c(T_2 + T_1)}{2} \tag{7}$$

Analisando a equação 6, é simples concluir que v_m é inversamente proporcional a diferença entre as PRPs longa e curta, e quanto menor essa diferença, maior a velocidade máxima não-ambígua. Contudo, Zrnic e Mahapatra (1985) também mostram em seu apêndice A que a variância na estimativa da velocidade radial

média da série total de pulsos, reconstruída a partir das velocidades radiais estimadas para T_2 e T_1, é inversamente proporcional à diferença entre ambas as PRPs. Portanto, se a razão $K \rightarrow 1$ entre PRPs curta e longa, haverá uma elevada flutuação estatística que afetará a qualidade da variável.

Torres, Dubel, Zrnic (2004) propõem que, ao invés de estimar a velocidade radial a partir da equação 5, sejam utilizadas as velocidades obtidas a partir da PRP curta para realizar o *unfolding* das velocidades obtidas da PRP longa, com base em regras de *unfolding* pré-estabelecidas considerando a razão K entre as PRPs. Como o *folding* em T_1 e T_2 ocorre em intervalos de velocidade diferentes, é possível realizar o *unfolding* de uma pela outra. Além disso, Sachidananda e Zrnic (2000, 2002), e Torres, Dubel, Zrnic (2004) também recomendam que o alcance máximo não-ambíguo aplicado nos radares seja equivalente ao alcance máximo não-ambíguo da PRP curta $r_a = cT_1/2$.

No entanto, Torres, Dubel, Zrnic (2004) ainda alertam para problemas que podem surgir durante a reconstrução da velocidade real, caso algumas considerações não sejam levadas em conta. Conforme Zrnic e Mahapatra (1985), caso $K \rightarrow 1$, a alta variância pode acabar na degradação da qualidade das velocidades obtidas para as diferentes PRPs. Além disso, a variância também pode ser exacerbada em áreas de elevada largura espectral (σ_v) que caracterizam elevado cisalhamento azimutal e/ou turbulência (TORRES; ZITTEL; SAXION, 2009), conforme a Figura 3. Eventualmente, o algoritmo de *unfolding* acaba utilizando uma regra inadequada, o que acarreta em um "erro catastrófico" (TORRES; DUBEL; ZRNIĆ, 2004; TORRES; ZITTEL; SAXION, 2009) que resulta em estimativas de velocidade completamente incorretos. Esses erros são facilmente identificados na forma de valores irreais e ruído em um PPI de v_r conforme a Figura 4. Por outro lado, pode-se corrigir estes erros utilizando-se algoritmos com base na continuidade do campo de v_r [p.ex., Altube et al. (2017); Hengstebeck et al. (2018)]. Ainda assim, o número de erros catastróficos deve ser o menor possível de modo a garantir a eficiência destes algoritmos na correção de v_r.

Figura 2 – Porcentagem de erros catastróficos em função de σ_v para diferentes elevações para um radar Doppler WRS-88D da rede norte-americana de radares meteorológicos. Elevações mais baixas necessitam de PRPs mais longas, e, por conseguinte, há um aumento nas variâncias de v_r e na porcentagem de erros catastróficos. É evidente que o número de erros catastróficos aumenta drasticamente a partir de $\sigma_v = 4$ m s^{-1} para elevações baixas, e 5 m s^{-1} para elevações altas. Fonte: adaptado de Torres, Dubel, Zrnic (2004).

Figura 3 – Campo de v_r para um episódio de convecção profunda em 31 de março de 2008 para um radar WSR-88D. Note os diversos pixels que não se coincidem com o escoamento observado (i.e., ruído na forma de pixels verdes). Cores quentes indicam escoamento que se afasta do radar, enquanto que cores frias indicam escoamento em direção ao radar. Fonte: adaptado de Torres, Dubel, Zrnic (2004).

Os radares brasileiros operacionais atualmente utilizam razões de PRPs de 2/3, 3/4 e 4/5. Os Radares pertencentes a SDCSC, por exemplo, utilizam uma razão $K = 4/5$ onde $T_1 = 1,67\times10^{-3}$ s e $T_2 = 2,08\times10^{-3}$ s ($FRP_1 = 600$ Hz e

$FRP_2 = 480$ Hz), em todas as elevações de varredura. Considerando o comprimento de onda $\lambda = 0,1042$ m para o radar de Chapecó e $\lambda = 0,1071$ m para Lontras, e fazendo-se uso da equação 6, as velocidades máximas não-ambíguas estendidas são $v_m = \pm 62,502$ m s^{-1} e $v_m = \pm 64,320$ m s^{-1}, respectivamente. Apesar deste intervalo limitar a ocorrência de *folding* a situações extremas, inevitavelmente, áreas de elevada turbulência ou cisalhamento azimutal são dominadas por uma grande quantidade de erros catastróficos. Um exemplo é exibido na Figura 5 durante um episódio de tempo severo observado pelo radar de Chapecó, conforme uma intensa linha de instabilidade avançava pelo Sul do Paraná no dia 30 de outubro de 2022. A linha de tempestades apresenta ecos superiores a 50 dBZ (Fig. 5a), com fortes rajadas de vento sendo observadas em sua retaguarda. No entanto, essas mesmas áreas são marcadas por um elevado número de erros catastróficos (Fig. 5b), tanto que, em regiões de baixa coerência, o processador acaba removendo uma grande quantidade de pixels. Mesmo com a aplicação da correção com base em uma estatística circular móvel a partir de pixels de v_r corretos desenvolvido por Hengstebeck et al. (2018), o algoritmo é incapaz de corrigir adequadamente todos os erros (Fig. 5c). Por último, um filtro móvel 3x3 com base na mediana de cada pixel (Fig. 5d) foi aplicado de modo a tentar remover os ruídos que não foram corrigidos adequadamente pelo algoritmo. Apesar de suprimir os ruídos remanescentes, este último passo acarreta na suavização de extremos, e, ainda assim, não é possível recuperar os pixels removidos pelo processador onde são esperadas as maiores velocidades.

Figura 4 – PPI de 0,5° do radar de Chapecó às 1734 UTC do dia 30 de outubro de 2022. Em (a) é exposto o fator de refletividade horizontal, (b) a velocidade radial, (c) a velocidade radial corrigida após aplicar o algoritmo de Hengstebeck et al. (2018), e (d) após a aplicação de um filtro móvel 3x3 com base na mediana de cada pixel. O polígono tracejado indica a extensa área com erros catastróficos antes (b), após a correção utilizando estatísticas circulares (c), e a passagem do filtro com base na mediana móvel (d).

Como exemplo, o radar de Manaus que pertence ao CENSIPAM faz uso de uma razão $K = 2/3$ onde $T_1 = 1,61\times10^{-3}$ e $T_2 = 2,42\times10^{-3}$ s ($FRP_1 = 621$ Hz e $FRP_2 = 414$ Hz). Tendo em mente que o comprimento de onda $\lambda = 0,10$ m, e repetindo o cálculo realizado no parágrafo anterior, a velocidade máxima não-ambígua deste radar é $v_m = \pm31,07$ m s^{-1}. Apesar do seu valor ser comparativamente inferior, este ainda é suficientemente alto para evitar a

ocorrência de *folding* apenas em casos extremos. A Figura 5 apresenta núcleos convectivos ao noroeste do radar de Manaus na noite do dia 13 de novembro de 2019. Ecos de refletividade horizontal se aproximam de 50 dBZ nas regiões de convecção mais intensa (Fig. 6a). Em contrapartida é possível notar que os erros catastróficos se limitam às células mais intensas ao oeste (Fig. 6b). Contudo, ao abrangerem áreas menores, o algoritmo de correção é capaz de resolver a maioria dos erros catastróficos conforme exposto na Figura 6c. Apesar de algumas áreas de leve ruído permanecerem, a qualidade do campo de velocidade é significativamente superior em comparação ao exemplo anterior, quase não se fazendo necessária a aplicação do filtro móvel (Fig. 6d).

Com base na literatura existente sobre o tema (SACHIDANANDA; ZRNIĆ, 2000, 2002; TORRES; DUBEL; ZRNIĆ, 2004; TORRES; WARDE, 2017; TORRES; ZITTEL; SAXION, 2009; WARDE; TORRES, 2017; ZRNIĆ; MAHAPATRA, 1985), além dos resultados observacionais apresentados anteriormente, recomenda-se a alteração da razão entre PRPs do método de PRPs alternadas implementado nos radares do SDCSC de modo a estender a velocidade máxima não-ambígua, mas mantendo a melhor qualidade possível dos dados observados.

Figura 5 – PPI de 0,9° do radar de Manaus às 2224 UTC do dia 13 de novembro de 2019. Em (a) é exposto o fator de refletividade horizontal, (b) a velocidade radial, (c) a velocidade radial corrigida após aplicar o algoritmo de Hengstebeck et al. (2018), e (d) após a aplicação de um filtro móvel 3x3 com base na mediana de cada pixel. Círculos e elipses tracejadas indicam as áreas de erros catastróficos antes (b), após a correção utilizando estatísticas circulares (c), e a passagem do filtro com base na mediana móvel (d).

Visando manter o alcance máximo dos radares de 250000 m nas primeiras elevações, e fazendo-se uso da equação 3, obtém-se que $T_1 = 1,67\times10^{-3}$ s ($FRP_1 =$ 600 Hz). Tendo em mente que a razão entre PRPs deve ser $K = 2/3$, a PRP longa deve então ser $T_2 = 2,5\times10^{-3}$ s ($FRP_2 =$ 400 Hz). Já a velocidade máxima não-ambígua estendida com base na equação 6 tendo que $\lambda = 0,1042$ m

para Chapecó e $\lambda = 0,1071$ m, será $v_m = \pm 31,26$ m s^{-1} e $v_m = \pm 32,13$ m s^{-1}. No entanto, deve-se levar em conta o número de pulsos para a estimativa das variáveis de modo a manter sua qualidade. Atualmente, o número de amostras M dos radares de Banda S da SDCSC são de 32 e 46 nas elevações que empregam PRPs alternadas (Tabela 1), com taxas de rotação da antena de 14 e 12 ° s^{-1} (Tabela 1). De modo a padronizar a configuração dos radares nas elevações que fazem uso de PRPs alternadas, pode-se partir da inequalidade proposta por Doviak e Zrnic (1993) tal que a resolução azimutal θ de 1° não seja distorcida significativamente pela rotação da antena:

$$M \leq \frac{\theta}{\alpha_{max} T} \tag{8}$$

Tendo em mãos a nova estratégia de varredura volumétrica proposta onde PRPs alternadas são utilizadas nas sete primeiras elevações, pode-se escolher uma taxa de rotação máxima da antena $\alpha_{max} = 17$ ° s^{-1} de modo a aumentar a velocidade de varredura sem gerar muito desgaste do pedestal. Considerando as PRPs propostas, utiliza-se a equação 8 e divide-se θ por 2 já que o feixe é equipartido para ambas as PRPs. Portanto, o número de amostras para as respectivas PRPs é $M_1 = 18$ e $M_2 = 12$, totalizando $M = M_1 + M_2 = 30$ amostras para cada raio o que deve garantir um desvio padrão de 1 dB na estimativa da refletividade horizontal em situações de convecção moderada a intensa (Fig. 6). A configuração proposta, portanto, é suficiente para manter uma baixa variância de v_r e reduzir o número de erros catastróficos, além de ser capaz de completar as varreduras volumétricas dentro do período desejado.

Figura 6 – Desvio padrão de Z_H (dB) em função do número de amostras. Linhas pretas indicam situações para diferentes larguras espectrais normalizadas.

Em elevações mais altas, pode-se fazer uso de PRPs fixas e aumentar a taxa de rotação da antena de modo a diminuir o período de geração de um volume. Considerando um alcance máximo $r_m \leq$ 187500 m, e fazendo-se uso novamente da equação 3, a PRP fixa será $T = 1,25\times10^{-3}$ s ($FRP = 800$ Hz). Consequentemente, com a equação 2 tem-se $v_m = \pm20,84$ m s^{-1} para o radar de Lontras e $v_m = \pm21,42$ m s^{-1}. Considerando uma taxa de rotação α_{max} = 23 ° s^{-1}, isso garante $M = M_1 + M_2 = 18 = 35$ amostras. A partir da elevação de 8,0 ° pode-se utilizar um alcance máximo ainda menor levando em conta que todos os ecos ficam abaixo da altura de 20 km, tal que $r_m \leq 130000$ m (Fig. 2). Aplicando os mesmos passos, a PRP fixa passaria a ser $T = 8,7\times10^{-4}$ s ($FRP = 1150$ Hz) resultando em $v_m = \pm29,96$ m s^{-1} para Chapecó e $v_m = \pm30,79$ m s^{-1} para Lontras. Por último, aumentando-se α_{max} = 28 ° s^{-1} haverá $M = 41$ amostras.

3. Configuração proposta

Visando a padronização das estratégias de varredura de modo a buscar observação de fenômenos severos que ocorrem em curto espaço de tempo (p.ex., microexplosões, tornados e granizo), é proposta a implementação de uma única estratégia de varredura similar ao *Volume Coverage Pattern* (VCP) 212/12 da rede de radares WSR-88D norte americana que conta com 14 elevações, dando mais densidade às observações em níveis baixos. Este esquema é apresentado na Figura 7. Nesta estratégia, as sete primeiras elevações utilizarão um esquema de PRPs alternadas de modo a manter o alcance máximo de 250000 m e um intervalo de Nyquist superior a 30 m s^{-1} . Elevações posteriores podem utilizar um esquema de PRP fixo com alcance reduzido de modo a manter um intervalo de Nyquist ainda alto, mas levando em conta que convecção profunda raramente excede alturas superiores a 20 km, considerando que o caminho percorrido pelo feixe segue o modelo de 4/3 do raio da terra em condições atmosféricas normais (DOVIAK; ZRNIĆ, 1993; RAUBER; NESBITT, 2018).

Figura 7 – Sugestão de estratégia de escaneamento para os radares pertencentes à SDCSC. Cores indicam as elevações utilizadas com o centro do feixe de 3 dB indicado pela linha escura, enquanto regiões coloridas indicam toda a área amostrada pelo feixe.

A tabela 3 apresenta a estratégia de varredura e a configuração proposta para realização de varreduras volumétricas. Nesta configuração, as primeiras 7 elevações empregam PRPs alternadas, enquanto que PRPs fixas são implementadas nas elevações posteriores, buscando um balanço entre alcance máximo e velocidade máxima não-ambígua. O tempo aproximado para geração de um volume é de um pouco mais que 4 minutos. Destaca-se que esta configuração é aplicável apenas aos radares banda S. Levando em conta também o tempo necessário para elevação da antena ao fim de cada varredura, além do tempo de segurança do software, o período total para geração de uma varredura volumétrica e de vigilância seria ligeiramente inferior a 5 minutos.

Tabela 3 – Configuração da estratégia de varredura sugerida. As elevações são separadas de acordo com o esquema de PRPs empregado. α indica a taxa de revolução do radar, T_1 e T_2 são os Períodos de Repetição de Pulso (PRP) curto e longo sendo T_1 a PRP fixa em elevações mais altas, e FRP é a frequência de repetição de pulsos. M é o número total de amostras por raio, R_m é o alcance máximo não-ambíguo em m, e v_m o intervalo de Nyquist para os radares de Chapecó (CHP) e Lontras (LT). O tempo necessário para completar um escaneamento de 360 ° em segundos é indicado na última coluna.

Elevações (°)	α **(°s^{-1})**	T_1 **(ms) /** FRP_1 **(s^{-1})**	T_2 **(ms) /** FRP_2 **(s^{-1})**	**M**	R_m **(m)**	v_m **(m s^{-1})**	**Tempo por elevação (s)**
0.5, 0.9, 1.3, 1.8, 2.4, 3.1, 4.0	17	1,67/600	2,5/400	30	250000	$\pm 31,26$ (CHP) $\pm 32,13$ (LT)	21,18
5.1, 6.4	23	1,25/800	-	35	187500	$\pm\ 20,84$ (CHP) $\pm\ 21,42$ (LT)	15,65
8, 10, 12.5, 15.6, 19.5	28	0,87/1150	-	41	130000	$\pm\ 29,96$ (CHP) $\pm\ 30,79$ (LT)	12,85

4. Problemas adicionais

Nas subseções a seguir, são apresentados problemas adicionais identificados nos radares da SDCSC, incluindo o radar banda X de Araranguá.

Lontras:

- O sinal da fase diferencial está invertido (Fig. 8), sendo esperado o oposto conforme a radiação encontra hidrometeoros de fase líquida. Verificar o porquê isso ocorre;

Figura 8 – PPI do radar de Lontras para a elevação de 1° no dia 23 de junho de 2022 às 0517 UTC. (a) Z_H e (b) Φ_{DP}. Note que o Φ_{DP} diminui com a distância próximo de X = 25 km.

- O sinal da velocidade radial também está invertido (Fig. 8). Verificar o porquê isso ocorre;

Figura 9 – Mesmo que a Figura 9 mas (a) Z_H e (b) v_R. Note que a velocidade ao oeste do radar é positiva, indicando hidromeoteoros que se afastam do radar, enquanto que à leste a velocidade é negativa sugerindo hidrometeoros que se afastam do radar. No entanto, o deslocamento das tempestades observado nesse dia era de Oeste para Leste.

Araranguá:

- Os valores de algumas variáveis não fazem sentido (Fig. 10). O Φ_{DP} não é calculado (Fig. 9b) e essa variável é extremamente útil para a correção da atenuação que acomete radares que operam em comprimentos de onda mais curtos (bandas C e X). Z_{DR} estoura a escala (Fig. 9c) enquanto que o ρ_{HV} é baixo demais para garantir a qualidade dos outros momentos do radar (Fig. 9d). Tais características sugerem que pode haver um problema no canal vertical de recepção do equipamento.

Figura 10 – PPI do radar de Araranguá para a elevação de 1.4° no dia 10 de outubro de 2022 às 2213 UTC. (a) Z_H, (b) Φ_{DP}, (c) Z_{DR} e (d) ρ_{HV}.

5. Referências

ALTUBE, P. et al. Correction of dual-PRF Doppler Velocity Outliers in the Presence of Aliasing. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 7, p. 1529–1543, 2017.

DOVIAK, R. J.; ZRNIĆ, D. S. **Doppler Radar and Weather Observations**. 2. ed. San Diego, California: Academic Press, 1993.

HENGSTEBECK, T. et al. Radar network-based detection of mesocyclones at the German Weather Service. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 35, n. 2, p. 299–321, 1 fev. 2018.

SACHIDANANDA, M.; ZRNIĆ, D. S. Clutter Filtering and Spectral Moment Estimation for Doppler Weather Radars Using Staggered Pulse Repetition Time (PRT). **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 17, n. 3, p. 323–331, 2000.

SACHIDANANDA, M.; ZRNIĆ, D. S. An Improved Clutter Filtering and Spectral Moment Estimation Algorithm for Staggered PRT Sequences. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, n. 12, p. 2009–2019, 2002.

TORRES, S. M.; DUBEL, Y. F.; ZRNIĆ, D. S. Design, Implementation, and Demonstration of a Staggered PRT Algorithm for the WSR-88D. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 21, n. 9, p. 1389–1399, 2004.

TORRES, S. M.; WARDE, D. A. Staggered-PRT sequences for doppler weather radars. Part I: Spectral analysis using the autocorrelation spectral density. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 1, p. 51–63, 2017.

TORRES, S.; ZITTEL, D.; SAXION, D. **UPDATE ON DEPLOYMENT OF STAGGERED PRT FOR THE NEXRAD NETWORK**. 25th Conference on International Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology. **Anais**...Phoenix, AZ: American Meteorological Society, 2009.

WARDE, D. A.; TORRES, S. M. Staggered-PRT Sequences for Doppler Weather Radars. Part II: Ground Clutter Mitigation on the NEXRAD Network Using the CLEAN-AP Filter. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 3, p. 703–716, 12 jan. 2017.

ZRNIĆ, D. S.; MAHAPATRA, P. Two Methods of Ambiguity Resolution in Pulse Doppler Weather Radars. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 21, n. 4, p. 470–483, 1985.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS
CENTRO GESTO E OPERACIONAL DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DA AMAZÔNIA

PROJETO NOWCASTING

PRODUTOS DE RADAR DESENVOLVIDOS PARA APLICAÇÃO NO NOWCASTING DE CONVECÇÂO

Vitor Goede

Sob a supervisão da Dra. Izabelly Costa

INPE
São José dos Campos
20 de dezembro de 2022

1 INTRODUÇÃO

A previsão de curtíssimo prazo ou *nowcasting* contempla um tempo de previsão de até 6 horas. Para esse tipo de previsão normalmente são utilizados dados de radares e satélites meteorológicos, aplicando a eles softwares de extrapolação que a partir do estado atual da atmosfera, identifico as células convectivas, rastreando-as e prevendo a sua provável propagação considerando um sistema conservativo. Porém para o uso adequado das ferramentas de previsão é imprescindível que os dados produzidos pelos radares estejam calibrados e disponíveis em tempo hábil para o monitoramento, e principalmente, que a receita das varreduras volumétricas dos radares estejam adequadas para capturar de forma eficiente as assinaturas dos eventos severos. Além disso, é importante desenvolver e gerar produtos que auxiliem os previsores na identificação dos eventos severos, ou seja, capazes de auxiliar na identificação de assinaturas de eventos severos.

Neste relatório, serão apresentados os resultados dos seis meses de trabalho desenvolvidos para padronização de estratégias de varreduras, controle de qualidade das variáveis, e o desenvolvimento de produtos derivados dos momentos base dos radares de polarização horizontal que compõem a rede de radares sob operação do Centro Gesto e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM). Este é o passo inicial em um esforço que envolve a comunidade científica e operacional sob supervisão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em busca do aprimoramento e padronização de técnicas de *nowcasting* no território brasileiro. Consequentemente, este projeto tem como objetivo auxiliar na melhora de metodologias para emissão de alertas de tempo severo associado a convecção profunda (p.ex., granizo, ventos destrutivos em superfície, tornados).

2 ESTRATÉGIAS DE VARREDURA

Atualmente, os radares do CENSIPAM contam com uma estratégia escaneamento volumétrico com alcance máximo de 250 km. Em geral, durante a realização das varreduras volumétricas, que contam com 17 elevações (Fig. 1), é empregada uma taxa de rotação de 15 ° s^{-1} (SACHIDANANDA; ZRNIĆ, 2000, 2002; TORRES; DUBEL; ZRNIĆ, 2004; TORRES; WARDE, 2017; TORRES; ZITTEL; SAXION, 2009; WARDE; TORRES, 2017; ZRNIĆ; MAHAPATRA, 1985) fazendo-se uso de um esquema de Períodos de Repetição de Pulsos (PRPs) alternados [*staggered PRTs*; Zrnić e Mahapatra (1985)] para estender o intervalo de Nyquist para 31,07 m s^{-1}, com a PRP curta $T_1 = 1,61 \times 10^{-3}$ s e a longa $T_1 = 2,42 \times 10^{-3}$ s. Isto resulta em uma razão $K = T_1/T_2 = 2/3$, sendo esta razão amplamente recomendada pela literatura de modo a obter a melhor qualidade possível entre a estimativa da velocidade radial e do algoritmo de supressão de *clutter*. Consequentemente, o número de amostras para estimativa dos momentos dos radares é $M = 32$. Além disso, a resolução radial dos equipamentos é de 500 m enquanto que a angular é de 1 °, apesar da largura do feixe de 3 dB ser de 2 °, sendo constatada a realização de super-resolução. Consequentemente, o período a conclusão de um volume de varreduras varia de 7 a 8 minutos, conforme exposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Tempo necessário para completar um volume de escaneamento em minutos para cada radar do CENSIPAM.

Radar	**T (min)**
SBBE	8,15
SBBV	8,23
SBCZ	7,91
SBMN	7,26
SBMQ	8,03
SBPV	8,19
SBSN	7.96
SBTF	8,09

SBTT	7,69
SBUAR	8.24

Foi identificado que as elevações empregadas podem variar ligeiramente de radar para radar, com três estratégias diferentes sendo identificadas com exemplos apresentados nas Figuras 1. A Figura 1a apresenta a estratégia de varredura do radar de SBMN sendo essa observada em quase todos outros radares. No entanto, a Figura 1b apresenta a estratégia do radar de SBBV, onde é utilizada uma elevação de 19,5 ° ao invés de 19,0 ° como no radar de SBMN. Outra variação é apresentada na Figura 1c onde o radar de SBMQ também utiliza 19,5 ° na última elevação, mas também de 14,5 ° na décima-quarta elevação ao invés de 15,0°. De modo a padronizar as estratégias e de encurtar o tempo de geração dos volumes, uma nova estratégia proposta pelo técnico Thiago Biscaro [submetida ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) em junho deste ano] é apresentada na Figura 2. Com base nessa nova estratégia, 9 elevações são empregadas ao invés de 17, fazendo-se uso de uma taxa de revolução de 12 ° s^{-1}, levando cerca de cinco minutos para completar um volume. Neste caso, o número de amostras para cada raio pode ser computado utilizando a inequação proposta por Doviak e Zrnić (1993), tal que a resolução azimutal θ de 1° não seja distorcida significativamente pela rotação da antena:

$$M \leq \frac{\theta}{\alpha_{max} T} \qquad (1)$$

Considerando as PRPs utilizadas, utiliza-se a equação 1 e divide-se θ por 2 já que o feixe é equipartido para ambas as PRPs. Portanto, o número de amostras para as respectivas PRPs é $M_1 = 26$ e $M_2 = 16$, totalizando $M = M_1 + M_2 = 42$ amostras para cada raio. A configuração proposta, portanto, deve aumentar a qualidade na estimativa dos momentos do radar, além de reduzir o período para realização das varreduras volumétricas dentro do período desejado.

Figura 1 - Três estratégias de varredura empregadas nos radares do CENSIPAM. Cores indicam as elevações utilizadas com o centro do feixe de 3 dB indicado pela linha escura, enquanto regiões coloridas indicam toda a área amostrada pelo feixe. (a) SBMN, (b) SBBV e (c) SBMQ.

3 CONTROLE DE QUALIDADE

3.1 Organização da estrutura dos dados

Para o cálculo dos produtos desenvolvidos durante este projeto, é fundamental que um padrão organizacional dos dados seja satisfeito. Contudo, algumas particularidades dos radares do CENSIPAM tornaram essa tarefa mais difícil. A primeira delas é que o número de azimutes não é constante em todas as varreduras de um volume. Tendo que a resolução angular dos equipamentos é de aproximadamente 1°, espera-se que em todas as varreduras hajam 360 raios. Contudo, isso não é satisfeito ocasionalmente devido ao equipamento realizar cada varredura na forma de uma "espiral", isto é, a elevação não é constante e aumenta ao longo da revolução, sendo por vezes necessário ocasionalmente incluir um raio adicional para que sejam completos 360°. A recomendação neste caso é de, se possível, manter a elevação constante conforme o equipamento realiza o escaneamento. Contudo, foi criada uma etapa dentro da função *main* inclusa no arquivo *sort_radar.py* (https://github.com/Soudaaa/single_pol_products), a qual elimina o raio adicional de modo a manter a estrutura homogênea do volume. Além disso, também se faz necessário organizar os raios de cada varredura de maneira crescente, com os momentos do radar respeitando a mesma ordem, já que os azimutes em que se inicia e termina cada escaneamento são diferentes de 0° e 360°. Todas estas etapas também são inclusas na função *main* no arquivo *sort_radar.py* encontrando no diretório Github supracitado. Por último, está função também contém uma rotina que realiza a interpolação linear entre raio caso a resolução azimutal seja muito diferente entre as elevações, de modo a manter um número de raio homogêneo no volume. Para executa-la, basta abrir o volume de interesse com o Py-ART [Helmus et al. (2016); https://github.com/ARM-DOE/pyart] e executar a função como exposto a seguir:

```
import sort_radar

import pyart


radar = pyart.aux_io.read_gamic(<nome_do_radar>.hdf5)

sort_radar.main(radar)
```

3.2 Correção da velocidade radial

Apesar de o método de PRPs alternadas estender a velocidade máxima não-ambígua sem a necessidade de redução do alcance máximo não-ambíguo, regiões com elevado cisalhamento azimutal e turbulência características de convecção profunda, costumam apresentar maior flutuação estatísticas entre pulsos, acarretando em maiores larguras espectrais, e, por conseguinte, menor qualidade na estimativa da velocidade real.

Conforme Torres, Dubel, Zrnić (2004), a metodologia de PRPs alternadas utiliza as velocidades estimadas por uma PRP para realização do *unfolding* das velocidades estimadas pela outra, com base em regras pré-determinadas a partir da razão entre PRPs. Em volumes de resolução em que a variância de uma ou ambas as velocidades são elevadas, a velocidade estimada por uma das PRPs foge significativamente do valor real observado, e uma regra de *unfolding* errônea é utilizada, resultando em um valor de velocidade completamente errado. Esses erros são denominados "erros catastróficos" pelos mesmos autores. Felizmente, os radares operados pelo CENSIPAM já fazem uso de uma razão entre PRPs $K = 2/3$, o que limita as flutuações estatísticas durante a estimativa das velocidades. Ainda assim, áreas de elevada largura espectral ainda podem apresentar uma grande concentração desses erros. Um exemplo é exibido na Figura 3 para o radar de SBMN durante um episódio de convecção profunda. Na Figura 3a é apresentado o campo de refletividade horizontal (Z_H) enquanto que na

Figura 3b a velocidade radial média (V_r). Erros catastróficos são observados como pixels ruidosos com valores que fogem do padrão observado no seu entorno, sendo destacados pelas elipses pretas para maior clareza.

Figura 3 – PPI de 0,9° do radar de Manaus às 2224 UTC do dia 13 de novembro de 2019. Em (a) é exposto o fator de refletividade horizontal em unidades de dBZ, (b) a velocidade radial em unidades de m s^{-1}, (c) a velocidade radial corrigida após aplicar o algoritmo de Hengstebeck et al. (2018), e (d) após a aplicação de um filtro móvel 3x3 com base na mediana de cada pixel. Círculos e elipses tracejadas indicam as áreas de erros catastróficos antes (b), após a correção utilizando estatísticas circulares (c), e a passagem do filtro com base na mediana móvel (d).

Um outro método para extensão da velocidade máxima não-ambígua é Frequência de Repetição de Pulsos (FRPs) dupla [*dual-PRF*; Jorgenssen, Sheperd, Goldstein (2000)], que, apesar de fazer uso de um método completamente diferente com base em duas PRPs diferentes para extensão da velocidade máxima não-ambígua, também é acometido por problemas similares. Nessa via, recentemente foram desenvolvidos dois algoritmos para correção destes erros com base em estatísticas circulares a partir de continuidade de campo. O primeiro foi desenvolvido por Altube et al. (2017) enquanto que o segundo por Hengstebeck et al. (2018). Enquanto que o primeiro tende a ter um desempenho ligeiramente melhor que o segundo, o algoritmo de Altube et al. (2017) tende a ser a ser mais custoso computacionalmente em comparação ao de Hengstebeck et al. (2018). O código em Python que contém ambos os algoritmos, se encontra disponível livremente no Github (https://github.com/meteocat/vcor_dual_prf). Dependências necessárias para que seja possível a execução da função incluem além do e o Py-ART, os pacotes SciPy (https://github.com/scipy/scipy) e NumPy (https://github.com/numpy/numpy)

A seguir, é descrita a função em Python que trata da correção da velocidade radial:

```
correct_dualprf(radar, method_det, vel_field='velocity',
kernel_det=np.ones((7, 7)), min_valid_det=1, max_dev=1.0,
two_step=True, method_cor=None, kernel_cor=None, min_valid_cor=1,
new_field='velocity_cor', replace=False, new_field_name='velocity_cor',
new_field_lname='Dual-PRF outlier corrected velocity')
```

Correção de valores discrepantes de velocidade radial do radar obtidos através do método de dual-PRF. Inclui o campo corrigido no objeto do radar de entrada.

Opções de estatística incluem:

‘mean’: média local da velocidade radial (JOE; MAY, 2003)

‘median’: mediana local da velocidade radial (HOLLEMAN; BEEKHUIS, 2003)

‘cmean_sc’: média circular local da velocidade (normalizada pela PRF) (ALTUBE et al., 2017)

‘cmean’: média circular local da velocidade (HENGSTEBECK et al., 2018)

Parâmetros

---

radar: radar

Objeto de radar lido pelo Py-ART

method_det: str

Método de detecção

vel_field: str

nome do campo de velocidade radial a ser corrigido

kernel_det: array

kernel da vizinhança, valores de 1/0 (detecção). Se None uma matriz 7x7 de uns é utilizada, excluindo o valor central

min_val_det: int

valor mínimo de vizinhos validos (correção)

max_dev: float

limiar máximo do desvio (detecção)

two_step: bool

separar ou não os estágios de detecção e correção

method_cor: str ou None

método de correção. Se None, method_det é usado (exceto no caso de 'cmean_sc', no qual 'cmean' é usado como padrão devido a propagação de erros durante a normalização pela PRF)

new_field: str

nome do campo de velocidade corrigido.

replace: Bool

substituir ou não o campo de entrada

new_field_name: str

nome padrão do campo de velocidade corrigido

new_field_lname: str

nome longo do campo de velocidade corrigido

É possível utilizar a função descrita acima para a correção de erros catastróficos em radares que empregam PRPs alternadas como os do CENSIPAM, assim como demais radares brasileiros (p.ex., CEMADEN, SDCSC, INEA-RJ, DECEA). Para isso, são necessários alguns passos de modo a "imitar" a estrutura dos dados como em FRPs duplas. Esses passos serão descritos a seguir, com um tutorial em Jupyter notebook chamado *correcting_catastrophic_errors.ipynb* também disponível em https://github.com/Soudaaa/correct_catastrophic_errors.

Infelizmente, o intervalo de Nyquist que consta nos metadados dos volumes é o da PRP curta, sendo este valor de aproximadamente 15,5 m s^{-1}. Sugere-se que este

valor seja corrigido para o valor real de 31,07 m s^{-1}. Esta correção já é feita através da função *staggered_to_dual* inclusa no arquivo Python *vel_correction.py* presente no link do Github citado acima, bastando importa-la e executa-la inserido o objeto *radar*:

```
from vel_corretion import staggered_to_dual
staggered_to_dual(radar)
```

O próximo passo é substituir as elevações que fazem uso de PRPs alternadas (*staggered*) como sendo duplas FRP (*dual*). Todas essas etapas também são realizadas utilizando a função *staggered_to_dual*. Com esses ajustes feitos, pode-se realizar a correção da velocidade radial. Dentre os quatro métodos possíveis de identificação e correção de erros, recomenda-se o uso do algoritmo de Hengstebeck (2018) por ser o menos custoso computacionalmente. Este é executado utilizando a função *correct_dualprf* inclusa no arquivo vcor_*dual_prf.py* também incluso no mesmo diretório do Github. A sua execução deve ser da seguinte forma:

```
from vcor_dualprf import correct_dualprf
correct_dualprf(radar=radar, two_step=True,
                    method_det='cmean', kernel_det=np.ones((11, 11)),
              method_cor='cmean', kernel_cor=np.ones((5, 5)),
               vel_field='corrected_velocity', new_field='vcor_cmean',
replace=True)
```

Ao terminar sua execução, uma nova variável ‘vcor_cmean’ já será adicionada ao objeto do radar. Resultados da correção são apresentados na Figura 3c, onde grande parte dos erros catastróficos são corrigidos. Contudo, áreas com grande quantidade de

pixels errôneos podem não ser adequadamente corrigidas pelo algoritmo devido a necessidade de haver ao menos um pixel correto na vizinhança de um pixel errôneo. Por último, é possível corrigir esses pixels através de um filtro móvel 3x3 com base na mediana sobre cada volume de resolução (Fig. 3d), aplicando a função. Vale destacar que esta última etapa tem a desvantagem de suavizar levemente os extremos observados. Esse filtro 3x3 é aplicada com base na função *vel_smooth* também inclusa no arquivo *vel_correction.py*, sendo que esta pode ser importada junto com a outra função e executada inserindo o objeto de *radar*:

```
from vel_corretion import vel_smooth

vel_smooth(radar)
```

4 Produtos

4.1 Cisalhamento azimutal

Os primeiros métodos objetivos para a detecção de rotação em tempestades fizeram uso da diferença azimutal máxima entre volumes de resolução adjacentes (*gate-to-gate shear*) como $\Delta V_{max} = (V_{max} - V_{min})$, a velocidade rotacional $V_{rot} = (V_{max} - V_{min})/2$, e o cisalhamento azimutal $S = V_{rot}/D$ (STUMPF et al., 1998). Contudo, Smith e Elmore (2004) e Miller et al. (2013) apresentam um método mais efetivo e menos afetado por ruído no campo de V_r, com base em derivadas de retas obtidas a partir de regressões lineares utilizando o método de mínimos quadrados para cada raio. Essa equação é apresentada a seguir, também relaciona o cisalhamento azimutal à vorticidade vertical:

$$\frac{\partial V_r}{\partial s} = \frac{\sum s_{ij} V_{ij} \omega_{ij}}{\sum (\Delta s_{ij})^2 \omega_{ij}} \quad (2)$$

Onde s é a coordenada na direção azimutal, s_{ij} é o comprimento de arco do centroide do ponto a ser calculado até o ponto (*i, j*), V_{ij} é a velocidade radial no ponto (*i, j*), e Δs_{ij} é a largura do feixe a uma dada distância. *I* é a direção radial enquanto que *j* a direção azimutal. Além disso, ω_{ij} é uma função peso positiva tida como 1. As unidades do cisalhamento azimutal são de s^{-1}. O somatório é realizado para todos os volumes de resolução vizinhos ao ponto de interesse inicial. Além disso, Smith e Elmore (2004) também apresentam que o cisalhamento azimutal é equivalente a ½ da voracidade vertical (assumindo um campo de vento simétrico).

Esta função também é encontrada livremente na linguagem Python no Github (https://github.com/jordanbrook/PyMeso). Além do Py-ART, NumPy e SciPy, também é necessário que o pacote Numba (https://github.com/numba/numba) também esteja instalado no ambiente no qual esta biblioteca será instalada assim como o pip. Para a instalação, basta executar os seguintes comandos para clonar o diretório do Github no diretório local de interesse e instalar o pacote:

```
git clone https://github.com/jordanbrook/PyMeso.git
pip install PyMeso/
```

Dentro deste diretório, também se encontra disponível um Jupyter notebook com um exemplo de como executar a função que pode ser importada no início de um script em Python como:

```
from pymeso import llsd
```

A seguir, é descrita essa função em Python que trata do cálculo do cisalhamento azimutal:

```
llsd.main(radar, ref_name, vel_name, window_size=(500, 4000))
```

Função de processamento principal para o cálculo das derivadas lineares de mínimos quadrados. Aplica uma máscara e realiza a suavização do campo de velocidade antes de calcular as derivadas

Parâmetros

---

radar: objeto

objeto do radar

ref_name: str

nome do campo de refletividade horizontal

vel_name: str

nome do campo de velocidade

window_size: tuple

tamanho da janela móvel dos mínimos quadrados em distância e azimute em metros. (500, 4000) é o valor padrão

Retorna

---

hdr: dict

dicionário contendo o campo de cisalhamento azimutal

Ao executar esta função, uma média móvel 3x3 igual a mencionada na seção anterior, é aplicada de modo a remover ruídos que possam afetar as derivadas. O dicionário que é retornado pode ser então adicionado ao objeto radar utilizando a função:

```
radar.add_field('azi_shear', hdr, replace_existing=True)
```

Um Jupyter notebook chamado *azimutal_shear.ipynb* também incluso no diretório https://github.com/Soudaaa/correct_catastrophic_errors, contém um exemplo passo-a-passo de como calcular este produto. O caso utilizado é apresentado na Figura 4. No dia 12 de dezembro de 2022 uma tempestade supercélular foi observada pelo radar de Santiago pertencente ao DECEA o qual apresenta as mesmas configurações técnicas que os radares do CENSIPAM, salvo o fato deste utilizar uma razão entre PRPs $K = 3/4$. Um "eco de gancho" é facilmente identificado no campo de refletividade horizontal (Fig. 4a), enquanto que a velocidade radial corrigida (Fig. 4b) apresenta uma circulação ciclônica na região de interface entre a ascendente e a região de descendentes no flanco traseiro (entre a região de eco fraco no influxo e o eco de gancho). Através do cisalhamento azimutal (Fig. 4c), é mais clara a presença de vorticidade ciclônica nesta mesma área com valores que se aproximam de $-5 \times 10^{-3}\ s^{-1}$.

Figura 4 – PPI de 2° do radar de Santiago as 1641 UTC do dia 12 de dezembro de 2022. Em (a) é exposto o fator de refletividade horizontal em unidades de dBZ, (b) a velocidade radial corrigida conforme os passos da subseção de correção em unidades de m s^{-1}, e (c) cisalhamento azimutal em unidades $\times 10^{-3}$ s^{-1}. O círculo tracejado em (b) e (c) indica a região aproximada do mesociclone

Vale destacar que, a largura do feixe de 3 dB impacta nas dimensões do parâmetro *window_size*. Para radares que apresentam uma largura de feixe de 2° como do DECEA e CENSIPAM, é recomendado que o *window_size* seja de 750 m no raio e 6000 m em azimute (750, 6000). Já radares com 1° de largura do feixe, 500 m na distância e 4000 m em azimute é suficiente (500, 4000).

4.2 Produtos de polarização horizontal

Também foram desenvolvidas funções para a geração de produtos *legacy* a partir da refletividade horizontal. Essas funções e exemplos são encontrados em um outro diretório do Github (https://github.com/Soudaaa/single_pol_products). Novamente, destaca-se que a função *main* inclusa no arquivo *sort_radar.py*, deve ser executada antes para que os produtos possam ser calculados. O primeiro e talvez mais conhecido dos produtos aqui a serem apresentado é o *Vertically Integrated Liquid* [VIL; Amburn e Wold (1997)], que é obtido através da integração vertical da refletividade horizontal de todos os volumes de resolução para cada ponto a partir da elevação mais baixa em um volume de varreduras. A equação utilizada nesta função é a mesma apresentada por Murillo e Homeyer (2019):

$$VIL = 3.44\times10^{-6}\int_{H_{base}}^{H_{topo}} Z_H^{4/7}\,dH \qquad (3)$$

Onde H_{base} e H_{topo} são as alturas acima do nível do radar a partir centro do volume de resolução inferior e adjacente superior em m, Z_H é a refletividade horizontal em dBZ para esses mesmos volumes de resolução, e dH é espessura da camada entre os dois volumes adjacentes. As unidades do VIL são de kg m^{-2}. A função em Python que realiza este cálculo está contida no arquivo *products.py* presente no diretório Github citado acima, onde basta importá-lo:

```
import products
products.calc_VIL(radar=None, zh_name='corrrected_reflectivity', VIL_name='VIL' )
```

Parametros

_____

radar: radar

objeto do radar

zh_name: str

nome do campo de refletividade horizontal. O padrão é ‘corrected_reflectivity’

VIL_name:

nome do capo de VIL a ser adicionado. O padrão é ‘VIL’

Retorna

_____

Objeto do radar com o campo de VIL incluso

Outro produto comumente empregado na estimativa da intensidade de convecção profunda é o *Echo Tops (ET)*. Este produto consiste em uma estimativa da altura máxima dos ecos de Z_H em relação ao nível do radar a partir de um limiar pré-estabelecido. Limiares de 30 e 20 dBZ tem sido utilizado pela plataforma de nowcasting do INPE. Contudo, o produto aqui desenvolvido utiliza como limiar o valor de 18.5 dBZ em conformidade com os estudos de Amburn e Wolf (1997), e Murillo e Homeyer (2019), onde a altura possui unidades de m. Esta função também está inclusa no arquivo *products.py*, necessitando dos seguintes parâmetros:

products.calc_ET(radar=None, zh_name=‘corrrected_reflectivity’, threshold=18.5, ET_name= ‘ET’)

Parâmetros

_____

radar: radar

objeto do radar

zh_name: str

nome do campo de refletividade horizontal. O padrão é ‘corrected_reflectivity’

threshold: int or float

valor mínimo do eco de Z_H para o qual será estimada a altura do centro do volume de resolução em relação ao nível do radar

ET_name:

nome do capo de ET a ser adicionado. O padrão é ‘ET’

Retorna

_____

Objeto do radar com o campo de ET incluso

Apesar de ambas a variáveis supracitadas serem úteis para estimativa do potencial severo da convecção profunda, os estudos de Amburn e Wolf (1997) e Murillo e Homeyer (2019) indicam que os melhores resultados são obtidos ao combinarmos ambas. Apesar do VIL ser altamente sensível ao Z_H, limiares severos são difíceis de serem estabelecidos já que propriedades dinâmicas e microfísicas da convecção, as quais são reguladas pela estação do ano e região em que ela ocorre, podem afetar o conteúdo de água liquida e gelo presente na nuvem. Além disso, convecção severa também pode apresentar ETs relativamente baixos especialmente em ambientes invernais. Nessa via, Amburn e Wolf (1997) introduziram o *VIL Density*

(VILD), com este estudo e o de Murillo e Homeyer (2019) indicando que está variável apresenta maior eficiência na identificação de tempestades capazes de produzir granizo. O VILD que é obtido como:

$$VILD = \frac{1000*VIL}{ET_{18.5dBZ}} \quad (4)$$

Onde o fator 1000 que multiplica o numerador converte de kg para g, com o VILD tendo unidades de g m^{-3}. Novamente, o VILD também está incluso no script *products.py*, necessitando apenas dos produtos VIL e ET para seu cálculo:

products.calc_VILD(radar=None, VIL_name='VIL', ET_name='ET')

Parâmetros

_____

radar: radar

objeto do radar

VIL_name: str

nome do campo de VIL. O padrão é 'VIL'

ET_name:

nome do capo de ET a ser adicionado. O padrão é 'ET'

Retorna

_____

Objeto do radar com o campo de VILD incluso

A última variável *legacy* desenvolvida neste projeto é o parâmetro de Waldvogel (WALDVOGEL; FEDERER; GRIMM, 1979) o qual também possui aplicações no nowcasting de granizo. Matematicamente, esta é obtida como a espessura da camada entre a isoterma de 0 °C e dos ecos de 45 dBZ:

$$WV = H_{45dBZ} - H_{0°C} \quad (5)$$

Onde H_{45dBZ} é altura do centro volume de eco igual ou superior a 45 dBZ e $H_{0°C}$ é a altura da isoterma de 0°C, com ambas alturas sendo em relação ao nível do mar. Enquanto que H_{45dBZ} depende apenas de parâmetros do radar, $H_{0°C}$ deve ser inserido pelo usuário. A altura da isoterma de 0°C pode ser obtida tanto a partir de observações por radiosondagens, como também modelos numéricos a partir o ponto de grade mais próximo do radar. Mais uma vez, esta função faz parte do arquivo *porducts.py*, onde:

products.calc_WV(radar=None, zh_name='VIL', H0c=None, wv_name='Waldvogel')

Parâmetros

_____

radar: radar

objeto do radar

zh_name: str

nome do campo de refletividade horizontal. O padrão é 'corrected_reflectivity'

H0c: float

Altura da isoterma de 0°C acima do nível médio do mar em m.

wv_name:

nome do capo de Waldvogel a ser adicionado. O padrão é ‘Waldvogel’

Retorna

_____

Objeto do radar com o campo de Waldvogel incluso

Para ilustrar estas a aplicação dessas funções, um Jupyter notebook chamado *singlepol_examples.ipynb* se encontra disponível no mesmo diretório do Github. Neste caso, o mesmo volume do radar de Santiago apresentado na subseção anterior é utilizado e apresentado na Figura 5. Vale destacar que, como estes produtos são apenas bidimensionais, os valores obtidos se concentram na primeira elevação do volume enquanto que as demais são preenchidas com matrizes de valor 0.

Figura 4 – PPI de 0.5° do radar de Santiago as 1640 UTC do dia 12 de dezembro de 2022. Em (a) é exposto o fator de refletividade horizontal em unidades de dBZ, (b) a velocidade radial em unidades de m s^{-1}, (c) VIL em kg m^{-2}, (d) ET de 18.5 dBZ em m, (e) VILD em g m^{-3}, (f) parâmetro de Waldvogel em m. A altura da isoterma de 0 °C foi estimada a partir da saída do modelo regional WRF para o ponto de grade mais próximo do radar na hora mais próxima do volume, sendo essa de 4900 m.

Além desses produtos *legacy* desenvolvidos, o pacote PyHail (https://github.com/joshua-wx/PyHail) também disponibiliza uma série de produtos para o *nowcasting* de granizo. Além de produtos derivados de momentos de polarização horizontal como o Z_H, produtos derivados de variáveis de dupla-polarização também se encontram disponíveis. Contudo, atenção será dada aos produtos de polarização horizontal já não há radares de dupla-polarização na rede do CENSIPAM. Para a instalação do pacote, segue-se os mesmos passos do PyMeso:

```
git clone https://github.com/joshua-wx/pyhail.git

pip install PyHail/
```

Destaca-se novamente que, para que seja possível o cálculo destes produtos, faz-se necessária a execução da função *sort_radar*.

Dentre as variáveis introduzidas por Witt et al. (1998), e inclusa no pacote PyHail, a primeira é a Energia Cinética do Granizo (*Hail Kinetic Energy*; em inglês). Matematicamente, essa variável é expressa como o fluxo de energia cinética:

$$\dot{E} = 5\times10^{-6} \times 10^{0.084Z} W(Z) \qquad (6)$$

Onde,

$$W(Z) = \{0 \quad para\ Z \leq Z_L \quad \frac{Z-Z_L}{Z_U-Z_L} para\ Z_L < Z < Z_U \quad 1\ para\ Z \geq Z_U$$

onde Z é em dBZ, $\dot{E}$ em J m^{-2} s^{-1}, e a função peso $W(Z)$ pode ser usada para definir a zona de transição entre refletividades horizontal de chuva e granizo. Os valores padrão para esse produto são de $Z_L = 40$ dBZ e $Z_U = 50$ dBZ. $\dot{E}$ também está bem relacionado com o potencial do granizo causar danos no solo.

Como granizo cresce somente a temperaturas inferiores a 0 °C, e grande parte do crescimento ocorre a temperaturas próximas a -20 °C ou menos, a seguinte função peso com base na temperatura é utilizada:

$$W_T(H) = \{0 \quad para\, H \leq H_0 \quad \frac{H-H_0}{H_{20}-H_0} para\, H_0 < H < H_{20U}\, 1\, pa \quad (7)$$

Onde H é a altura acima do nível do radar, H_0 é a altura acima do nível do radar da isoterma ambiental de 0 °C, e H_{20} é a altura acima do nível do radar da isoterma ambiental de -20 °C.

Combinando $\dot{E}$ e a função peso acima, obtém-se o Índice de Granizo Severo (*Severe Hail Index* ou *SHI*; em inglês), definida como:

$$SHI = 0,1 \int_{H_0}^{H_T} W_T(H)\dot{E}dH \quad (8)$$

Onde H_T é a altura do topo da célula de tempestade. Unidade de SHI são J m^{-1} s^{-1}.

Com base nos resultados estatísticos da aplicação do SHI para a tomada de decisões para realização de alertas, Witt et al. (1998) notaram uma forte dependência com a altura da isoterma de 0 °C do dia, e desenvolveram um modelo simples para emissão de alertas definido como:

$$WT = 57,5H_0 - 121 \quad (9)$$

Onde WT (J m^{-1} s^{-1}) é o limiar de alerta e H_0 (km) é medido acima no nível do radar.

Dado o sucesso do SHI e WT, foi introduzida uma função probabilística apropriada. Foi obtida uma função para a determinação da Probabilidade de Ocorrência de Granizo Severo (*Probability of Severe Hail* ou *POSH*; em inglês):

$$POSH = 29 \ln ln \left(\frac{SHI}{WT}\right) + 50 \quad (10)$$

Onde $POSH$ é em %. Caso haja valores de $POSH <$ 0% estes são colocados como 0%, assim como se $POSH >$ 100% são colocados para 100%.

O SHI também é utilizado para prover estimativas do Tamanho Máximo Esperado do Granizo (*Máximum Hail Size* Expected ou *MESH*; em inglês), com base na comparação entre SHI e o tamanho máximo observado em superfície das pedras de gelo. Assim como no desenvolvimento do $POSH$, o modelo inicial de previsão do tamanho máximo de granizo também deveria ser simples de modo a representar o 75º percentil, resultando na seguinte relação:

$$MESH = 2,54(SHI)^{0,5} \quad (11)$$

Com o $MESH$ em mm. Recentemente, Murillo e Homeyer (2019) revisitaram vários produtos para identificação de granizo e sua severidade utilizando um banco observacional expandido, notando que o $MESH$ proposto por Witt et al. (1998) apresentava vieses. Mais precisamente, o $MESH$ original subestimava o tamanho de granizo pequeno e sobrestimava para o caso de granizo grande. Nesta condição, duas reformulações foram propostas por Murillo e Homeyer (2019) de modo a representar o 75º e 95º percentis, tal como:

$$MESH_{75} = 16,566(SHI)^{0,181} \quad (12)$$

$$MESH_{95} = 17,270(SHI)^{0,181} \quad (12)$$

O pacote PyHail combina todos estes produtos através da função *main* presente na classe *mesh_ppi*:

```
from pyhail import mesh_ppi
```

Onde:

mesh_ppi.main(radar, dbz_name, levels, min_range=10, max_range=150, mesh_method='mh2019_95', mesh_fname=None, posh_fname=None, ke_fname=None, shi_fname=None)

Parâmtros

_____

radar: obj

objeto do radar

dbz_name: str

nome do campo de refletividade horizontal

levels: list of two floats

altura (m) acima do nível médio do mar das isotermas de 0 °C e -20 °C

min_range: int

distância mínima em relação à superfície para o cálculo do MESH

max_range: int

distância máxima em relação à superfície para o cálculo do MESH

mesh_method: str

método para estimativa do MESH. Opções são 'witt1998', 'mh2019_75' ou 'mh2019_95', onde 'witt1998' é com base na formulação de Witt et

al. (1998), e ‘mh2019_75’/‘mh2019_95’ com base nas formulações de Murillo e Homeyer (2019) para o 75º e 95º percentis.

mesh_fname, posh_fname, ke_fname, shi_fname: str

nome para os novos campos de granizo que serão adicionados ao objeto do radar. O padrão é ‘mesh’, ‘posh’, ‘hail_ke’, ‘shi’.

Retorna

_____

output_fields: dictionary

dicionário contendo os produtos de saída (SHI, KE, POSH, MESH)

Na Figura 5, é apresentado um exemplo contendo todos os produtos discutidos que também se encontra disponível no Jupyter notebook *singlepol_examples.ipynb*. O caso apresentado é de um par de tempestades supercelulares que provocaram rastros de destruição por granizo de dimensão superior a 10 cm no Vale do Ribeira no estado de São Paulo, na manhã do dia 30 de maio de 2019, parte de uma longa e violenta onda de tempo severo que afetou o Sul e Sudeste do Brasil neste dia. O radar utilizado é o de São Roque e que pertence ao DECEA, apresentando as mesmas especificações que o radar de Santiago. A rotina executada foi a seguinte:

```
radar = mesh_ppi.main(radar, dbz_fname='corrected_reflectivity', levels = [4460.0, 7547.0], min_range = radar.range['data'][0], max_range=radar.range['data'][-1])
```

Figura 5 – PPI de 0.5° do radar de São Roque as 1000 UTC do dia 30 de maio de 2019. Em (a) é exposto o fator de refletividade horizontal em unidades de dBZ, (b) a velocidade radial em unidades de m s^{-1}, (c) Energia Cinética do Granizo em J m^{-2} s^{-1}, (d) Índice de Granizo Severo em J m^{-1} s^{-1}, (e) POSH em %, (f) MESH em mm. As alturas das isotermas de 0 °C e -20 °C foram estimadas a partir de dados de reanálise do ERA5 (HERSBACH et al., 2018) para o ponto de grade mais próximo do radar na hora mais

próxima do volume utilizado, sendo elas de 4460.0 m e 7547.0 m acima do nível do médio do mar.

5 Considerações finais

Nos últimos seis meses de vigência desta bolsa de aprimoramento das técnicas de nowcasting que se encontra sobre o encargo do CENSIPAM e supervisão do INPE, foi desenvolvido uma nova estratégia de varredura volumétrica dos radares de polarização horizontal, realizado o controle de qualidade de suas variáveis, assim como o desenvolvimento de novos produtos de aplicação imediata. Todos os scripts foram desenvolvidos na linguagem de programação Python 3.9 fazendo uso de pacotes *open source* como o Py-ART, e, portanto, devem ser executados fazendo o uso do mesmo.

Além do tratamento do campo de velocidade radial e organização dos raios de cada volume, foram inclusos produtos para identificação de rotação em tempestades como o cisalhamento azimutal, assim como produtos *legacy* como o VIL, ET, VILD e Waldvogel. Também foram inclusos produtos específicos para a o nowcasting de granizo como o Hail Kinetic Energy, SHI, POSH e MESH. Vale salientar que a efetividade da aplicação destes produtos depende explicitamente da qualidade do radar. A partir dos produtos apresentados, espera-se que trabalhos futuros façam uso dessas variáveis para analisar a sua eficiência na identificação de tempo severo, além da construção de climatologias sobre território brasileiro.

6 Referências

ALTUBE, P. et al. Correction of dual-PRF Doppler Velocity Outliers in the Presence of Aliasing. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 7, p. 1529–1543, 2017.

AMBURN, S. A.; WOLF, P. L. VIL Density as a Hail Indicator. **Weather and Forecasting**, v. 12, n. 3, p. 473–478, 1997.

DOVIAK, R. J.; ZRNIĆ, D. S. **Doppler Radar and Weather Observations**. 2. ed. San Diego, California: Academic Press, 1993.

HELMUS, J. J.; COLLIS, S. M. The Python ARM Radar Toolkit (Py-ART), a Library for Working with Weather Radar Data in the Python Programming Language. **Journal of Open Research Software**, v. 4, n. 1, p. e25, 2016.

HENGSTEBECK, T. et al. Radar network-based detection of mesocyclones at the German Weather Service. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 35, n. 2, p. 299–321, 1 fev. 2018.

HERSBACH, H. et al. **Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWPERA Report Series**. Reading, England: [s.n.]. Disponível em: <https://www.ecmwf.int/node/18765>.

HOLLEMAN, I.; BEEKHUIS, H. Analysis and Correction of Dual PRF Velocity Data. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 20, n. 4, p. 443–453, 2003.

JOE, P.; MAY, P. T. Correction of Dual PRF Velocity Errors for Operational Doppler Weather Radars. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 20, n. 4, p. 429–442, 2003.

JORGENSEN, D. P.; SHEPHERD, T. R.; GOLDSTEIN, A. S. A Dual-Pulse Repetition Frequency Scheme for Mitigating Velocity Ambiguities of the NOAA P-3 Airborne Doppler Radar. **Cover Journal of Atmospheric and Oceanic Technology Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 17, n. 5, p. 585–594, 2000.

MILLER, M. L.; LAKSHMANAN, V.; SMITH, T. M. An automated method for depicting mesocyclone paths and intensities. **Weather and Forecasting**, v. 28, n. 3, p. 570–585, 2013.

MURILLO, E. M.; HOMEYER, C. R. Severe hail fall and hailstorm detection using remote sensing observations. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 58, n. 5, p. 947–970, 1 maio 2019.

SACHIDANANDA, M.; ZRNIĆ, D. S. Clutter Filtering and Spectral Moment Estimation for Doppler Weather Radars Using Staggered Pulse Repetition Time (PRT). **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 17, n. 3, p. 323–331, 2000.

SACHIDANANDA, M.; ZRNIĆ, D. S. An Improved Clutter Filtering and Spectral Moment Estimation Algorithm for Staggered PRT Sequences. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, n. 12, p. 2009–2019, 2002.

SMITH, T. M.; ELMORE, K. L. **THE USE OF RADIAL VELOCITY DERIVATIVE TO DIAGNOSE ROTATION AND DIVERGENCE**. 11th Conference on Aviation, Range, and Aerospace. **Anais**...Hyannis, MA: American Meteorological Society, 2004.

STUMPF, G. J. et al. The National Severe Storms Laboratory Mesocyclone Detection Algorithm for the WSR-88D*. **Weather and Forecasting**, v. 13, n. 2, p. 304–326, 1998.

TORRES, S. M.; DUBEL, Y. F.; ZRNIĆ, D. S. Design, Implementation, and Demonstration of a Staggered PRT Algorithm for the WSR-88D. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 21, n. 9, p. 1389–1399, 2004.

TORRES, S. M.; WARDE, D. A. Staggered-PRT sequences for doppler weather radars. Part I: Spectral analysis using the autocorrelation spectral density. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 1, p. 51–63, 2017.

TORRES, S.; ZITTEL, D.; SAXION, D. **UPDATE ON DEPLOYMENT OF STAGGERED PRT FOR THE NEXRAD NETWORK**. 25th Conference on International Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for

Meteorology, Oceanography, and Hydrology. **Anais**...Phoenix, AZ: American Meteorological Society, 2009.

WALDVOGEL, A.; FEDERER, B.; GRIMM, P. Criteria for the Detection of Hail Cells. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 18, n. 12, p. 1521–1525, 1979.

WARDE, D. A.; TORRES, S. M. Staggered-PRT Sequences for Doppler Weather Radars. Part II: Ground Clutter Mitigation on the NEXRAD Network Using the CLEAN-AP Filter. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 3, p. 703–716, 12 jan. 2017.

WITT, A. et al. An Enhanced Hail Detection Algorithm for the WSR-88D. **Weather and Forecasting**, v. 13, n. 2, p. 286–303, 1998.

ZRNIĆ, D. S.; MAHAPATRA, P. Two Methods of Ambiguity Resolution in Pulse Doppler Weather Radars. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 21, n. 4, p. 470–483, 1985.

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Relatório sobre os radares meteorológicos pertencentes ao Instituto Estadual do Ambiente

Autor: Vitor Goede

Supervisores: Izabelly Costa e Thiago Biscaro

Data: 23 de dezembro de 2022

1. Contextualização

O Comitê Científico de Nowcasting tem como objetivo o desenvolvimento e padronização de metodologias para realização da previsão de curtíssimo prazo (*nowcasting*) no Brasil. Em particular, radares meteorológicos são ferramentas importantíssimas para realização desta tarefa ao gerarem varreduras com alta resolução espacial e temporal. Contudo, visando o desenvolvimento e aplicação de produtos derivados a partir dos momentos base dos radares brasileiros, faz-se necessária a realização de ajustes das configurações e estratégias de varredura dos radares, assim como o controle de qualidade desses equipamentos. Em particular, ao analisar os dados volumétricos dos radares Doppler de dupla-polarização pertencentes ao Instituto Estadual do Ambiente do Rio de Janeiro (INEA-RJ), foram identificados problemas quanto as estratégias de escaneamento dos radares, qualidade da variável velocidade radial (v_r), além da qualidade das variáveis polarimétricas.

1. 2. Problemas e sugestões

2.1 Estratégias de escaneamento

Ao analisar os radares banda S que compõem a rede de radares meteorológicos de Guaratiba e Macaé do INEA-RJ, foi identificado que a estratégia de escaneamento dos radares abrange apenas 6 elevações concentradas em níveis baixos, conforme exposto na Figura 1.

Figura 1 – Estratégia de escaneamento dos radares banda S pertencentes ao INEA-RJ. Cores indicam as elevações utilizadas com o centro do feixe de 3 dB indicado pela linha escura, enquanto regiões coloridas indicam toda a área amostrada pelo feixe.

Informações sobre a receita dos radares são apresentadas na Tabela 1. Essencialmente, o radar emprega PRPs alternadas (a ser discutido na subseção seguinte) nas seis primeiras elevações de modo a estender a velocidade máxima não-ambígua e manter um alcance máximo. O período de geração de um volume completo nesta configuração é de aproximadamente cinco minutos.

Tabela 1 – Configuração da estratégia de varredura do radar de Guaratiba. As elevações são separadas de acordo com o esquema de PRPs empregado. α indica a velocidade de revolução do radar, T_1 e T_2 são os Períodos de Repetição de Pulso (PRP) curto e longo sendo T_1 a PRP fixa em elevações mais altas. M é o número total de amostras por raio, R_a é o alcance máximo não-ambíguo em m. O tempo necessário para completar um escaneamento de 360 ° em segundos é indicado na última coluna.

Elevações (°)	α **(°s^{-1})**	θ **(°)**	T_1 **(**$\times 10^{-3}$ **s) /** FRP_1 **(Hz)**	T_2 **(**$\times 10^{-3}$ **s) /** FRP_2 **(Hz)**	**M**	R_a **(m)**	**Tempo por elevação (s)**
0.5, 1.5, 2.4, 3.3, 4.3, 5.2, 6.2	10	1	1.67/600	2.22/450	60	250000	36

Visando a padronização das estratégias de varredura de modo a buscar observação de fenômenos severos que ocorrem em curto espaço de tempo (p.ex., microexplosões, tornados e granizo), é proposta a implementação de uma única estratégia de varredura similar ao *Volume Coverage Pattern* (VCP) 212/12 da rede de radares WSR-88D norte americana que conta com 13 elevações, dando mais densidade as observações em níveis baixos. Este esquema é apresentado na Figura 2. Nesta estratégia, as sete primeiras elevações utilizarão um esquema de PRPs alternadas de modo a manter o alcance máximo de 250000 m e um intervalo de Nyquist superior a 30 m s^{-1} (a recomendação das PRPs curta e longa será apresentado na próxima subseção). Elevações posteriores podem utilizar um esquema de PRP fixo com alcance reduzido de modo a manter um intervalo de Nyquist ainda alto, mas levando em conta que convecção profunda raramente excede alturas superiores a 20 km, considerando que o caminho percorrido pelo feixe segue o modelo de 4/3 do raio da terra em condições atmosféricas normais (DOVIAK; ZRNIĆ, 1993; RAUBER; NESBITT, 2018).

Figura 2 – Sugestão de estratégia de escaneamento para os radares pertencentes ao INEA. Cores indicam as elevações utilizadas com o centro do feixe de 3 dB indicado pela linha escura, enquanto regiões coloridas indicam toda a área amostrada pelo feixe.

2.1 O dilema Doppler e os esquemas PRP

Conforme Doviak e Zrnic (1993, p. 132), se uma sequência de pulsos $M + 1$ é transmitida por um radar meteorológico, a velocidade radial de um alvo no espaço iluminado sucessivamente por um trem de pulsos de radiação eletromagnética igualmente espaçados entre si, é estimada através da mudança de fase associada ao deslocamento do alvo entre pulsos:

$$\hat{v}_r = -\frac{\lambda}{4\pi T} Arg\, \hat{R}(T) = -\frac{\lambda}{4\pi T}\hat{\theta} \qquad (1)$$

em que, λ o comprimento de onda de operação do radar em unidades de m, T o Período de Repetição de Pulsos (PRP) em s. Contudo, em engenharia é mais comum a utilização da Frequência de Repetição de Pulso (FRP), onde $FRP = T^{-1}$ e sua unidade é Hz.

O argumento da função de autocorrelação $\hat{R}(T)$ é equivalente a mudança de fase $\hat{\theta}$ em radianos observada entre pulsos sucessivos a partir de um alvo no espaço que é iluminado pelo feixe do radar. Por outro lado, caso o deslocamento do alvo

entre pulsos resulte em uma mudança de fase fora do intervalo $-\pi < \hat{\theta} \leq \pi$, $\hat{v}_r$ pode se tornar ambíguo e *folding* da velocidade será observado. Portanto a velocidade máxima não-ambígua v_a capaz de ser estimada pelo radar será:

$$v_a = \pm\frac{\lambda}{4\pi T}\pi = \pm\frac{\lambda}{4T} \tag{2}$$

Já o alcance máximo não-ambíguo r_a de forma a evitar a sobreposição de ecos, também depende da PRP do radar tal como:

$$r_a = \frac{cT}{2} \tag{3}$$

em que, $c \approx 3 \times 10^8$ m s^{-1} é a velocidade da luz no vácuo.

Ao combinarmos ambas as equações 2 e 3, chegamos ao dilema Doppler que é fundamental para os radares Doppler meteorológicos:

$$r_a v_a = \frac{c\lambda}{8} \tag{4}$$

Lembrando que os dois termos do lado direito da equação 4 são constantes, conclui-se que o aumento de uma das variáveis do lado esquerdo da igualdade acarreta na redução da outra, e vice-versa. Contudo, Zrnic e Mahapatra (1985) introduziram duas metodologias de modo a contornar este problema, sendo uma delas comumente empregada nos radares brasileiros, incluindo os radares Doppler de dupla-polarização operados pelo INEA-RJ. A metodologia utilizada é a de *staggered PRTs*, onde M trens pulso de radiação eletromagnética são emitidos alternando entre dois períodos de repetição de pulso T_1 e T_2 distintos, onde $T_1 < T_2$ $(FRP_1 > FRP_2)$. $K = T_1/T_2 = FRP_2/FRP_1$ é a razão entre as PRPs curta e longa que pode ser expressa através de números inteiros primos relativos tal que $K = T_1/T_2 = m/n$. A velocidade radial pode então ser estimada através da auto-covariância entre os períodos T_1 e T_2:

$$\hat{v}_r = \frac{\lambda}{4\pi(T_2 - T_1)} Arg\left[\frac{\hat{R}(T_1)}{\hat{R}(T_2)}\right] = \frac{\lambda}{4\pi}\frac{(\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2)}{(T_2 - T_1)} \quad (5)$$

Novamente, caso a diferença entre as fases das PRPs curta e longa esteja fora do intervalo $-\pi < (\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2) \leq \pi$, *folding* será novamente observado. Portanto a nova velocidade máxima não-ambígua estendida passa a ser:

$$v_m = \pm\frac{\lambda}{4\pi(T_2 - T_1)}\pi = \pm\frac{\lambda}{4(T_2 - T_1)} \quad (6)$$

Enquanto que o alcance máximo não-ambíguo proposto passa a ser:

$$r_m = \frac{c(T_2 + T_1)}{2} \quad (7)$$

Analisando a equação 6, é simples concluir que v_m é inversamente proporcional a diferença entre as PRPs longa e curta, e quanto menor essa diferença, maior a velocidade máxima não-ambígua. Contudo, Zrnic e Mahapatra (1985) também mostram em seu apêndice A que a variância na estimativa da velocidade radial média da série total de pulsos, reconstruída a partir das velocidades radiais estimadas para T_2 e T_1, é inversamente proporcional à diferença entre ambas as PRPs. Portanto, se a razão $K \rightarrow 1$ entre PRPs curta e longa, haverá uma elevada flutuação estatística que afetará a qualidade da variável.

Torres, Dubel, Zrnic (2004) propõem que, ao invés de estimar a velocidade radial a partir da equação 5, sejam utilizadas as velocidades obtidas a partir da PRP curta para realizar o *unfolding* das velocidades obtidas da PRP longa, com base em regras de *unfolding* pré-estabelecidas considerando a razão K entre as PRPs. Como o *folding* em T_1 e T_2 ocorre em intervalos de velocidade diferentes, é possível realizar o *unfolding* de uma pela outra. Além disso, Sachidananda e Zrnic (2000, 2002), e Torres, Dubel, Zrnic (2004) também recomendam que o alcance máximo não-ambíguo aplicado nos radares seja equivalente ao alcance máximo não-ambíguo da PRP curta $r_a = cT_1/2$.

No entanto, Torres, Dubel, Zrnic (2004) ainda alertam para problemas que podem surgir durante a reconstrução da velocidade real, caso algumas

considerações não sejam levadas em conta. Novamente, caso $K \rightarrow 1$, a alta variância pode acabar na degradação da qualidade das velocidades obtidas para as diferentes PRPs. Além disso, a variância também pode ser exacerbada em áreas de elevada largura espectral (σ_v) que caracterizam alto cisalhamento azimutal e/ou turbulência (TORRES; ZITTEL; SAXION, 2009), conforme a Figura 3. Eventualmente, o algoritmo de *unfolding* acaba utilizando uma regra inadequada, o que acarreta em um "erro catastrófico" (TORRES; DUBEL; ZRNIĆ, 2004; TORRES; ZITTEL; SAXION, 2009) que resulta em estimativas de velocidade completamente incorretos. Esses erros são facilmente identificados na forma de valores irreais e ruído em um PPI de v_r conforme a Figura 4. Por outro lado, pode-se corrigir estes erros utilizando-se algoritmos com base na continuidade do campo de v_r [p.ex., Altube et al. (2017); Hengstebeck et al. (2018)]. Ainda assim, o número de erros catastróficos deve ser o mínimo possível de modo a garantir a eficiência destes algoritmos na correção de v_r

.

Figura 3 – Porcentagem de erros catastróficos em função de σ_v para diferentes elevações para um radar Doppler WRS-88D da rede norte-americana de radares

meteorológicos. Elevações mais baixas necessitam de PRPs mais longas, e, por conseguinte, há um aumento nas variâncias de v_r e na porcentagem de erros catastróficos. É evidente que o número de erros catastróficos aumenta drasticamente a partir de $\sigma_v = 4$ m s^{-1} para elevações baixas, e 5 m s^{-1} para elevações altas. Fonte: adaptado de Torres, Dubel, Zrnic (2004).

Figura 4 – Campo de v_r para um episódio de convecção profunda em 31 de março de 2008 para um radar WSR-88D. Note os diversos pixels que não se coincidem com o escoamento observado (i.e., ruído na forma de pixels verdes). Cores quentes indicam escoamento que se

afasta do radar, enquanto que cores frias indicam escoamento em direção ao radar. Fonte: adaptado de Torres, Dubel, Zrnic (2004).

Os radares brasileiros operacionais atualmente utilizam razões de PRPs de 2/3, 3/4 e 4/5. Os Radares pertencentes ao INEA-RJ, por exemplo, utilizam uma razão $K = 3/4$ onde $T_1 = 1,67\times10^{-3}$ s e $T_2 = 2,22\times10^{-3}$ s ($FRP_1 = 600$ Hz e $FRP_2 = 450$ Hz), em todas as elevações de varredura. Considerando o comprimento de onda $\lambda = 0,1070$ m para ambos os radares, e fazendo-se uso da equação 6, as velocidades máximas não-ambíguas estendidas são $v_m = \pm48,1947$ m s^{-1}, respectivamente. Apesar de este intervalo limitar a ocorrência de *folding* a situações extremas, inevitavelmente, áreas de elevada turbulência ou cisalhamento azimutal são dominadas por uma grande quantidade de erros catastróficos. Um exemplo é exibido na Figura 5 durante um episódio de tempo severo sobre o Vale do Paraíba observado a partir do radar de Guaratiba, conforme uma tempestade supercelular avançava pela região no dia 4 de outubro de 2022. A tempestade apresenta ecos superiores a 50 dBZ (Fig. 5a). No entanto, essas mesmas áreas são marcadas por um elevado número de erros catastróficos (Fig. 5b) especialmente onde se espera a observação de cisalhamento azimutal associado ao mesociclone, tanto que, em regiões de baixa coerência, o processador acaba removendo uma grande quantidade de pixels. Mesmo com a aplicação da correção com base em uma estatística circular móvel a partir de pixels de v_r corretos desenvolvido por Hengstebeck et al. (2018), o algoritmo é incapaz de corrigir adequadamente todos os erros (Fig. 5c). Por último, um filtro móvel 3x3 com base na mediana de cada pixel (Fig. 5d) foi aplicado de modo a tentar remover os ruídos que não foram corrigidos adequadamente pelo algoritmo. Apesar de suprimir os ruídos remanescentes, este último passo acarreta na suavização de extremos, e, ainda assim, não é possível recuperar os pixels removidos pelo processador onde são esperadas as maiores velocidades.

Figura 5 – PPI de 2,4° do radar de Guaratiba as 1812 UTC do dia 04 de outubro de 2022. Em (a) é exposto o fator de refletividade horizontal, (b) a velocidade radial, (c) a velocidade radial corrigida após aplicar o algoritmo de Hengstebeck et al. (2018), e (d) após a aplicação de um filtro móvel 3x3 com base na mediana de cada pixel. O polígono tracejado indica a extensa área com erros catastróficos antes (b), após a correção utilizando estatísticas circulares (c), e a passagem do filtro com base na mediana móvel (d).

Por outro lado, o radar de Manaus que pertence ao CENSIPAM faz uso de uma razão $K = 2/3$ onde $T_1 = 1,61\times10^{-3}$ e $T_2 = 2,42\times10^{-3}$ s ($FRP_1 = 621$ Hz e $FRP_2 = 414$ Hz). Tendo em mente que o comprimento de onda $\lambda = 0,10$ m, e repetindo o cálculo realizado no parágrafo anterior, a velocidade máxima

não-ambígua deste radar é $v_m = \pm 31,07$ m s^{-1}. Apesar do seu valor ser comparativamente inferior, este ainda é suficientemente alto para evitar a ocorrência de *folding* apenas à casos extremos. A Figura 5 apresenta núcleos convectivos ao noroeste do radar de Manaus na noite do dia 13 de novembro de 2019. Ecos de refletividade horizontal se aproximam de 50 dBZ nas regiões de convecção mais intensa (Fig. 6a). Em contrapartida é possível notar que os erros catastróficos se limitam às células mais intensas ao oeste (Fig. 6b). Contudo, ao abrangerem áreas menores, o algoritmo de correção é capaz de resolver a maioria dos erros catastróficos conforme exposto na Figura 6c. Apesar de algumas áreas de leve ruído permanecerem, a qualidade do campo de velocidade é significativamente superior em comparação ao exemplo anterior, quase não se fazendo necessária a aplicação do filtro móvel (Fig. 6d).

Com base na literatura existente sobre o tema (SACHIDANANDA; ZRNIĆ, 2000, 2002; TORRES; DUBEL; ZRNIĆ, 2004; TORRES; WARDE, 2017; TORRES; ZITTEL; SAXION, 2009; WARDE; TORRES, 2017; ZRNIĆ; MAHAPATRA, 1985), além dos resultados observacionais apresentados anteriormente, recomenda-se a alteração da razão entre PRPs do método de PRPs alternadas implementado nos radares do INEA-RJ de modo a ainda estender a velocidade máxima não-ambígua, mas também obter a melhor qualidade possível.

Figura 6 – PPI de 0,9° do radar de Manaus as 2224 UTC do dia 13 de novembro de 2019. Em (a) é exposto o fator de refletividade horizontal, (b) a velocidade radial, (c) a velocidade radial corrigida após aplicar o algoritmo de Hengstebeck et al. (2018), e (d) após a aplicação de um filtro móvel 3x3 com base na mediana de cada pixel. Círculos e elipses tracejadas indicam as áreas de erros catastróficos antes (b), após a correção utilizando estatísticas circulares (c), e a passagem do filtro com base na mediana móvel (d).

Visando manter o alcance máximo dos radares de 250000 m nas primeiras elevações, e fazendo-se uso da equação 3, obtém-se que $T_1 = 1,67\times10^{-3}$ s ($FRP_1 =$ 600 Hz). Tendo em mente que a razão entre PRPs deve ser $K = 2/3$, a PRP longa deve então ser $T_2 = 2,5\times10^{-3}$ s ($FRP_2 =$ 400 Hz). Já a velocidade máxima não-ambígua estendida com base na equação 6 tendo que $\lambda = 0,1070$ m

para ambos os radares será $v_m = \pm 32,13$ m s^{-1}. No entanto, deve-se levar em conta o número de pulsos para a estimativa das variáveis de modo a manter sua qualidade. Atualmente, o número de amostras M dos radares de Banda S da INEA-RJ é de 60, com uma taxa de rotação da antena de 10 ° s^{-1} (Tabela 1). De modo a padronizar a configuração dos radares nas elevações que fazem uso de PRPs alternadas, pode-se partir da inequalidade proposta por Doviak e Zrnic (1993) tal que a resolução azimutal θ de 1° não seja distorcida significativamente pela rotação da antena:

$$M \leq \frac{\theta}{\alpha_{max} T} \tag{8}$$

Tendo em mãos a nova estratégia de varredura volumétrica proposta onde PRPs alternadas são utilizadas nas seis primeiras elevações, pode-se escolher uma taxa de rotação máxima da antena $\alpha_{max} = 10$ ° s^{-1} .Considerando as PRPs propostas, utiliza-se a equação 8 e divide-se θ por 2 já que o feixe é equipartido para ambas as PRPs. Portanto, o número de amostras para as respectivas PRPs é M_1 = 30 e, M_2 = 20, totalizando 50 amostras para cada raio. A configuração proposta, portanto, é suficiente para manter uma baixa variância de v_r e reduzir o número de erros catastróficos, além de completar as varreduras volumétricas dentro do período desejado.

Em elevações mais altas, pode-se fazer uso de PRPs fixas e aumentar a taxa de rotação da antena de modo a diminuir o período de geração de um volume. Considerando um alcance máximo $r_a \leq$ 187500 m, e fazendo-se uso novamente da equação 3, a PRP fixa será $T = 1,25 \times 10^{-3}$ s ($FRP = 800$ Hz). Consequentemente, com a equação 2 tem-se $v_a = \pm 21,44$ m s^{-1}. Considerando uma taxa de rotação $\alpha_{max} = 16$ ° s^{-1}, isso garante 50 amostras. A partir da elevação de 8,0 ° pode-se utilizar um alcance máximo ainda menor levando em conta que todos os ecos ficam abaixo da altura de 20 km, tal que $r_a \leq 130000$ m (Fig. 2). Aplicando os mesmos passos, a PRP fixa passaria a ser $T = 8,7 \times 10^{-4}$ s ($FRP = 1150$ Hz), e aumentando $\alpha_{max} = 22°$ s^{-1} haverão 52 amostras.

2. 3. Configuração proposta

A tabela 3 apresenta a estratégia de varredura e a configuração proposta para realização de varreduras volumétricas. Nesta configuração, as primeiras 7 elevações empregam PRPs alternadas, enquanto que PRPs fixas são implementadas nas elevações posteriores, buscando um balanço entre alcance máximo e velocidade máxima não-ambígua. O tempo aproximado para geração de um volume é de um pouco menos que 6 minutos.

Tabela 3 – Configuração da estratégia de varredura sugerida. As elevações são separadas de acordo com o esquema de PRPs empregado. α indica a taxa de revolução do radar, T_1 e T_2 são os Períodos de Repetição de Pulso (PRP) curto e longo sendo T_1 a PRP fixa em elevações mais altas. M é o número total de amostras por raio, R_a é o alcance máximo não-ambíguo em m. O tempo necessário para completar um escaneamento de 360 ° em segundos é indicado na última coluna.

Elevações (°)	α **(°s^{-1})**	T_1 **(× 10^{-3} s) / PRF_1 (Hz)**	T_2 **(× 10^{-3} s) / PRF_2 (Hz)**	**M**	R_a **(m)**	**Tempo por elevação (s)**
0.5, 1.2, 1.9, 2.6, 3.3, 4	10	1,67/600	2,5/400	50	250000	36
5.1, 6.4	16	1,25/800	-	50	187500	22,5
8, 10, 12.5, 15.6, 19.5	22	0,87/1150	-	52	130000	16,36

3. 4. Problemas adicionais

Além da questão da estratégia de escaneamento e velocidade máximo não-ambígua, foi verificado que a fase diferencial especifica (K_{DP}) derivada a partir da fase diferencial (Φ_{DP}) não consta nos volumes. Tal variável polarimétrica além de

ser útil para a identificação da fase e forma dos hidrometeoros, também é extremamente importante para estimativa quantitativa de precipitação (BALAKRISHNAN; ZRNIĆ, 1990; BRANDES; RYZHKOV; ZRNIĆ, 2001; GIANGRANDE; RYZHKOV, 2008; RYZHKOV; ZRNIĆ, 1995, 1996; RYZHKOV; GIANGRANDE; SCHUUR, 2005; ZRNIĆ; RYZHKOV, 1996). Portanto, recomenda-se a inclusão desta variável.

5. Referências

ALTUBE, P. et al. Correction of dual-PRF Doppler Velocity Outliers in the Presence of Aliasing. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 7, p. 1529–1543, 2017.

DOVIAK, R. J.; ZRNIĆ, D. S. **Doppler Radar and Weather Observations**. 2. ed. San Diego, California: Academic Press, 1993.

HENGSTEBECK, T. et al. Radar network-based detection of mesocyclones at the German Weather Service. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 35, n. 2, p. 299–321, 1 fev. 2018.

SACHIDANANDA, M.; ZRNIĆ, D. S. Clutter Filtering and Spectral Moment Estimation for Doppler Weather Radars Using Staggered Pulse Repetition Time (PRT). **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 17, n. 3, p. 323–331, 2000.

SACHIDANANDA, M.; ZRNIĆ, D. S. An Improved Clutter Filtering and Spectral Moment Estimation Algorithm for Staggered PRT Sequences. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, n. 12, p. 2009–2019, 2002.

TORRES, S. M.; DUBEL, Y. F.; ZRNIĆ, D. S. Design, Implementation, and Demonstration of a Staggered PRT Algorithm for the WSR-88D. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 21, n. 9, p. 1389–1399, 2004.

TORRES, S. M.; WARDE, D. A. Staggered-PRT sequences for doppler weather radars. Part I: Spectral analysis using the autocorrelation spectral density. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 1, p. 51–63, 2017.

TORRES, S.; ZITTEL, D.; SAXION, D. **UPDATE ON DEPLOYMENT OF STAGGERED PRT FOR THE NEXRAD NETWORK**. 25th Conference on International Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology. **Anais**...Phoenix, AZ: American Meteorological Society, 2009.

WARDE, D. A.; TORRES, S. M. Staggered-PRT Sequences for Doppler Weather Radars. Part II: Ground Clutter Mitigation on the NEXRAD Network Using the CLEAN-AP

Filter. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 3, p. 703–716, 12 jan. 2017.

ZRNIĆ, D. S.; MAHAPATRA, P. Two Methods of Ambiguity Resolution in Pulse Doppler Weather Radars. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 21, n. 4, p. 470–483, 1985.

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Relatório sobre os radares meteorológicos pertencentes a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG)

Autor: Vitor Goede

Supervisores: Izabelly Costa e Thiago Biscaro

Data: 14 de abril de 2023

1. Contextualização

O Comitê de Nowcasting tem como objetivo o desenvolvimento e padronização de metodologias para realização da previsão de curtíssimo prazo (*nowcasting*) no Brasil. Em particular, radares meteorológicos são ferramentas importantíssimas para realização desta tarefa ao gerarem varreduras com alta resolução espacial e temporal. Contudo, visando o desenvolvimento e aplicação de produtos derivados a partir dos momentos base dos radares brasileiros, faz-se necessária a realização de ajustes das configurações e estratégias de varredura dos radares, assim como o controle de qualidade desses equipamentos. Em particular, ao analisar os dados volumétricos do radar Doppler de dupla-polarização de Mateus Leme, pertencente a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), foram identificados problemas quanto às estratégias de escaneamento do radar, assim como a qualidade de suas variáveis.

2. Problemas e sugestões

2.1 Estratégias de escaneamento

Ao analisar os dados do radar de Mateus Leme, foi identificada a não padronização da estratégia de escaneamento em relação aos demais radares que compõem a rede brasileira de radares meteorológicos. Atualmente, o radar de Mateus Leme conta com 10 elevações para realização de varreduras volumétricas compostas. A Figura 1 apresenta as elevações empregadas em sua estratégia de escaneamento. Informações sobre alguns dos parâmetros importantes empregados no escaneamento deste radar são apresentadas na Tabela 1.

Visando a padronização das estratégias de varredura de modo a buscar observação de fenômenos severos que ocorrem em curto espaço de tempo (p.ex., microexplosões, tornados e granizo), é proposta a implementação de uma única estratégia de varredura com 14 elevações similar ao *Volume Coverage Pattern* (VCP) 12/212 da rede de radares meteorológicos WSR-88D norte americana, dando mais densidade às observações em níveis baixos. Este esquema é apresentado na Figura 2. Nesta estratégia, as oito primeiras elevações utilizarão um esquema de PRPs duplas de modo a manter um intervalo de Nyquist superior a 30 m s^{-1} (a recomendação das PRPs curta e longa será apresentado na próxima subseção), ao custo de reduzir o alcance máximo do radar para 180 km, passo necessário que também será apresentado na próxima subseção. Elevações posteriores podem usar um esquema de PRP fixo com alcance reduzido de modo a manter um intervalo de Nyquist alto, mas, levando em conta que convecção profunda raramente excede alturas superiores a 18 km se considerarmos que o caminho percorrido pelo feixe segue o modelo de 4/3 do raio da terra em condições atmosféricas normais (DOVIAK; ZRNIĆ, 1993; RAUBER; NESBITT, 2018).

Vale salientar que atualmente os volumes gerados pelo radar de Mateus Leme são divididos em dois arquivos, um para elevações mais baixas, e outro para as mais altas, o que desnecessariamente dificulta a análise dos dados. **Recomenda-se também que todos os volumes sejam salvos em um só arquivo**.

Figura 1 – Estratégia de escaneamento empregada atualmente no radar de Mateus Leme. Cores indicam as elevações utilizadas com o centro do feixe de 3 dB indicado pela linha escura, enquanto regiões coloridas indicam toda a área amostrada pelo feixe.

Tabela 1 – Parâmetros empregados no radar de Mateus Leme. λ refere-se ao comprimento de onda em que opera o radar, α indica a sua taxa de revolução, T_1 e T_2 são os Períodos de Repetição de Pulso (PRP) curto e longo, M_1 e M_2 são o número total de amostras para os raios com T_1 e T_2, respectivamente, R a resolução radial em m, N_{ele} o número de elevações, e T o tempo necessário para completar um volume de escaneamento em minutos.

λ (cm)	α (°s^{-1})	T_1 (s)	T_2 (s)	M_1	M_2	R (m)	N_{ele}	T (min)
5,33	18	$1{,}67\times 10^{-3}$	$2{,}08\times 10^{-3}$	27	33	250	10	7

Figura 2 – Sugestão de estratégia de escaneamento para o radar de Mateus Leme. Cores indicam as elevações utilizadas com o centro do feixe de 3 dB indicado pela linha escura, enquanto regiões coloridas indicam toda a área amostrada pelo feixe.

2.1 O dilema Doppler e os esquemas FRP

Conforme Doviak e Zrnic (1993, p. 132), se uma sequência de pulsos $M + 1$ é transmitida por um radar meteorológico, a velocidade radial de um alvo no espaço iluminado sucessivamente por um trem de pulsos de radiação eletromagnética igualmente espaçados entre si, é estimada através da mudança de fase associada ao deslocamento do alvo entre pulsos:

$$\hat{v}_r = -\frac{\lambda}{4\pi T} Arg\, \hat{R}(T) = -\frac{\lambda}{4\pi T}\hat{\theta} \qquad (1)$$

em que, λ o comprimento de onda de operação do radar em unidades de m, e T o Período de Repetição de Pulsos (PRP) em s. Contudo, em engenharia é mais comum a utilização da Frequência de Repetição de Pulso (FRP), onde $FRP = T^{-1}$ e sua unidade é s^{-1}.

O argumento da função de autocorrelação $\hat{R}(T)$ é equivalente a mudança de fase $\hat{\theta}$ em radianos observada entre pulsos sucessivos a partir de um alvo no espaço que é iluminado pelo feixe do radar. Por outro lado, caso o deslocamento do alvo

entre pulsos resulte em uma mudança de fase fora do intervalo $-\pi < \hat{\theta} \leq \pi$, $\hat{v}_r$ pode se tornar ambíguo e *folding* da velocidade será observado. Portanto a velocidade máxima não-ambígua v_a capaz de ser estimada pelo radar será:

$$v_a = \pm\frac{\lambda}{4\pi T}\pi = \pm\frac{\lambda}{4T} \tag{2}$$

Já o alcance máximo não-ambíguo r_a de forma a evitar a sobreposição de ecos, também depende da PRP do radar tal como:

$$r_a = \frac{cT}{2} \tag{3}$$

em que, $c \approx 3 \times 10^8$ m s^{-1} é a velocidade da luz no vácuo.

Ao combinarmos ambas as equações 2 e 3, chegamos ao dilema Doppler que é fundamental para os radares Doppler meteorológicos:

$$r_a v_a = \frac{c\lambda}{8} \tag{4}$$

Lembrando que os dois termos do lado direito da equação 4 são constantes, conclui-se que o aumento de uma das variáveis do lado esquerdo da igualdade acarreta a redução da outra, e vice-versa. Contudo, Jorgensen, Sheperd, Goldstein (2000), introduziram uma metodologia de modo a contornar este problema, sendo essa empregada no radar de Mateus Leme. A metodologia utilizada é a de *Dual-FRPs*, onde *M* trens de pulso de radiação eletromagnética são emitidos com FRPs distintas para azimutes adjacentes, em que $FRP_1 > FRP_2$ ($T_1 < T_2$). $K = T_1/T_2 = FRP_2/FRP_1$ é a razão entre as PRPs curta e longa que pode ser expressa através de números inteiros primos relativos tal que, $K = T_1/T_2 = FRP_2/FRP_1 = m/n$. A velocidade radial pode então ser estimada através da auto-covariância entre os períodos T_1 e T_2 (JOE; MAY, 2003):

$$\hat{v}_r = \frac{\lambda}{4\pi(T_2 - T_1)} Arg\left[\frac{\hat{R}(T_1)}{\hat{R}(T_2)}\right] = \frac{\lambda}{4\pi}\frac{(\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2)}{(T_2 - T_1)} \quad (5)$$

Novamente, caso a diferença entre as fases das PRPs curta e longa esteja fora do intervalo $-\pi < (\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2) \leq \pi$, *folding* será novamente observado. Portanto, a nova velocidade máxima não-ambígua estendida passa a ser:

$$v_m = \pm\frac{\lambda}{4\pi(T_2 - T_1)}\pi = \pm\frac{\lambda}{4(T_2 - T_1)} \quad (6)$$

Analisando a equação 6, é simples concluir que v_m é inversamente proporcional a diferença entre as PRPs longa e curta, e quanto menor essa diferença, maior a velocidade máxima não-ambígua. Na metodologia de Jorgensen, Sheperd, Goldstein (2000), é extraída a diferença da velocidade radial média entre volumes de resolução adjacentes que compõem cada raio, tal que, o *unfolding* de velocidades obtidas com a FRP_2 é feito a partir das velocidades obtidas com a FRP_1. Isto é feito a partir de regras pré-estabelecidas com base na magnitude da diferença entre velocidades ao longo do intervalo estendido obtido pela equação 6, onde assume-se que as velocidades entre raios adjacentes são praticamente iguais. Além disso, o alcance máximo não-ambíguo aplicado nos radares é equivalente ao alcance máximo não-ambíguo da FRP alta, isto é, $r_a = cT_1/2 = c/(2FRP_1)$. Contudo, segundo Joe e May (2003), quanto mais próxima da unidade for a razão entre as FRPs, e, portanto, menor for a diferença entre as velocidades máximas não-ambíguas para cada FRP, maiores serão os erros de *unfolding* devido a maiores flutuações estatísticas na estimativa das velocidades. Portanto, se a razão $K \rightarrow 1$ entre PRPs curta e longa, haverá uma elevada flutuação estatística que afetará a qualidade da velocidade radial média reconstruída pelo algoritmo. Além disso, tanto Holleman e Beekhuis (2003) e Joe e May (2003), apontam para o problema atrelado a alta variância na estimativa das velocidades em áreas de elevada largura espectral (σ_v) que caracterizam regiões de turbulência associadas a fenômenos convectivos, também resultando em erros de *unfolding* (Figura 3).

Figura 3 – Simulação da porcentagem de erros de *unfolding* em função do desvio padrão para um radar banda C que faz uso de FRPs duplas. Linhas contínuas grossas indicam os erros teóricos para FRPs de 1000/750 s^{-1} (4/3), tracejadas 1200/900 s^{-1} (4/3), pontilhadas 1000/667 s^{-1} (3/2), e pontilhadas-tracejadas 1200/800 s^{-1} (3/2). Os quadrados e triângulos indicam a porcentagem de erros observados em dois radares que fazem uso de FRPs de 1000/750 s^{-1} e 1200/800 s^{-1}, respectivamente. Conforme há um aumento nas variâncias de v_r, é evidente que o número de erros de *unfolding* aumenta drasticamente a partir de $\sigma_v = 1$ m s^{-1} para $K = 4/3$ e $\sigma_v = 1,5$ m s^{-1} para $K = 3/2$. Fonte: adaptado de Joe e May (2003).

Áreas de elevado cisalhamento azimutal também violam a condição de velocidades similares entre azimutes também resultando em erros de *unfolding*.

Matematicamente, a diferença de velocidade de um raio *i* e seu raio adjacente *i-1*, deve obedecer a seguinte inequação apresentada por Joe e May (2003):

$$\left|\frac{T_{i-1}(v_i - v_{i-1})}{T_i - T_{i-1}}\right| > v_{mi} \rightarrow \left|v_i - v_{i-1}\right| > \left|\frac{FRP_{i-1} - FRP_i}{FRP_i}\right| v_{mi} \qquad (7)$$

Apesar de razões entre FRPs da ordem de 5/4 ou até 7/5 em radares banda C estenderem significativamente o v_m e o alcance máximo (equação 6), a equação 7 indica que a chance de o algoritmo de *unfolding* utilizar uma regra inadequada também aumenta, e, por conseguinte, maior será o número de os erros no campo de v_r. Esses erros são facilmente identificados na forma de valores irreais e ruído em um PPI de v_r conforme a Figura 4. Por outro lado, pode-se corrigir estes erros utilizando-se algoritmos com base na continuidade do campo de v_r [p.ex., Altube et al. (2017); Hengstebeck et al. (2018), Alford et al. (2022)]. Ainda assim, o número de erros de *unfolding* deve ser o mínimo possível, tal que o maior número possível de volumes de resolução com velocidades corretamente estimadas se encontrem na vizinhança de um volume errôneo de modo a garantir a eficiência destes algoritmos na correção de v_r.

Figura 4 – Exemplo de v_r no PPI de 0.6° para um episódio de convecção profunda em 02 de novembro de 2008 para o radar Banda C de La Miranda no Nordeste da Espanha. O radar emprega uma razão entre FRPs de 4/3 e tem uma $v_m = \pm 45.9$ m/s. Note os diversos pixels que não coincidem com o escoamento observado (i.e., ruído). O primeiro retângulo indica erros de *unfolding* aleatórios, enquanto o segundo uma maior concentração de erros de *unfolding* resultantes de intenso cisalhamento azimutal associado a um mesociclone. Cores quentes indicam escoamento que se afasta do radar, enquanto cores frias indicam escoamento em direção ao radar. Fonte: adaptado de Altube et al. (2017).

O radar de Mateus Leme em particular, utiliza uma razão $K = 5/4$ onde $T_1 = 1,67\times10^{-3}$ s ($FRP_1 = 600$ s^{-1}) e $T_2 = 2,08\times10^{-3}$ s ($FRP_2 = 480$ s^{-1}), em todas as elevações de varredura. Considerando o comprimento de onda $\lambda = 0,0533$ m e fazendo-se uso da equação 6, a velocidade máxima não-ambígua estendida é $v_m = \pm 31,97$ m s^{-1}. Apesar de este intervalo teoricamente limitar a ocorrência de *folding* a situações extremas, inevitavelmente, áreas de elevada turbulência ou cisalhamento azimutal são dominadas por uma grande quantidade de erros de *unfolding*. Um exemplo é exibido na Figura 5 durante um episódio de tempo severo ocorrido no estado de Minas Gerais no dia 10 de novembro de 2022.

Tempestades supercelulares ao Sudeste e Noroeste do Radar causaram granizo neste dia, com ecos superiores a 50 dBZ sendo observados na Figura 5a. Devido a natureza turbulenta e o cisalhamento azimutal associado ao mesociclone dessas tempestades, a elevada variância exacerba a largura espectral (Fig. 5b), onde essas mesmas áreas são marcadas por um elevado número de erros de *unfolding* (Fig. 5c), tanto que, interpretar o campo de velocidade radial pode se tornar praticamente impossível como no caso das células ao Noroeste. Mesmo com a aplicação da correção com base no algoritmo mais eficiente proposto por Alford et al. (2022), o algoritmo é incapaz de corrigir adequadamente todos os erros (Fig. 5c), já que, para ele ser eficiente, ainda é necessário um número suficiente de volumes de resolução bons na vizinhança dos volumes errôneos.

Figura 5 – PPI de 0,5° do radar de Mateus Leme as 2053 UTC do dia 10 de novembro de 2022. Em (a) é exposto o fator de refletividade horizontal, (b) a largura espectral, (c)

velocidade radial, e (d) a velocidade radial após a aplicação do método de correção proposto por Alford et al. (2022).

Com base na literatura existente sobre o tema (ALFORD et al., 2022; ALTUBE et al., 2017; HENGSTEBECK et al., 2018; HOLLEMAN; BEEKHUIS, 2003; JOE; MAY, 2003; JORGENSEN; SHEPHERD; GOLDSTEIN, 2000), além dos resultados observacionais apresentados anteriormente, recomenda-se a alteração da razão entre FRPs do método de FRPs duplas implementado no radar de Mateus Leme de modo a ainda estender a velocidade máxima não-ambígua, mas também obter a melhor qualidade possível nos dados. Para isso, será primeiramente necessário reduzir o alcance máximo que atualmente é de 250000 m para 180000 m, passo chave para manter $v_m > \pm 30$ m s^{-1} em uma razão entre FRPs de 4/3, o que limitaria a ocorrência de apenas um *folding* e reduziria o número de volumes de resolução que contém velocidades erroneamente estimadas.

Com base na estratégia de FRPs duplas utilizada pelo serviço meteorológico alemão [p.ex., Hengstebeck et al. (2018)], a PRP curta será $T_1 = 1,25\times10^{-3}$ s ($FRP_1 =$ 800 Hz) enquanto a longa deve ser $T_2 = 1,67\times10^{-3}$ s ($FRP_2 =$ 600 Hz). Já a velocidade máxima não-ambígua estendida com base na equação 6 tendo que $\lambda = 0,0533$ m, será $v_m = \pm 31,99$ m s^{-1}. No entanto, deve-se levar em conta o número de pulsos para cada raio durante a estimativa das variáveis de modo a manter a melhor qualidade possível. De modo a padronizar a configuração nas elevações que fazem uso de FRPs duplas, pode-se partir da equação proposta por Jorgensen, Sheperd, Goldstein (2000), tal que a resolução azimutal seja mais próxima o possível da largura do feixe de 3 dB mesmo levando em conta o efeito de distorção pela rotação da antena:

$$M = \frac{\Delta\theta FRP}{\alpha} \tag{8}$$

Tendo em mãos a nova estratégia de varredura volumétrica proposta onde FRPs duplas são utilizadas nas sete primeiras elevações, pode-se utilizar uma taxa de rotação da antena de $\alpha = 18$ ° s^{-1} sem gerar muito desgaste da plataforma.

Considerando as FRPs propostas, utiliza-se a equação 8, tomando $\Delta\theta$ como 0.95°/2 como a estimativa do máximo deslocamento desejável entre os raios durante a rotação da antena. Portanto, o número de amostras para as FRPs de 600 s^{-1} e 800 s^{-1}, será $M_1 = 21$ e $M_2 = 16$, onde $M = M_1 + M_2 = 37$. A configuração proposta, portanto, é suficiente para manter uma baixa variância de v_r e reduzir o número de erros de *unfolding*, além de completar as varreduras volumétricas dentro do período desejado. Em elevações médias, pode-se fazer uso de FRPs mais altas e aumentar a taxa de rotação da antena de modo a diminuir o período de geração de um volume. Considerando um alcance máximo $r_a \leq$ 150000 m, fazendo-se uso novamente da equação 3, a PRP curta será $T_1 = 1,0\times10^{-3}$ s ($FRP_1 = 1000$ s^{-1}), e, mantendo a razão de 4/3 entre FRPs, $T_2 = 1,33\times10^{-3}$ s ($FRP_2 = 750$ s^{-1}). Consequentemente, com a equação 2 tem-se $v_m = \pm39,98$ m s^{-1}. Considerando uma taxa de rotação $\alpha = 20$ ° s^{-1}, isso garante $M_1 = 24$ e $M_2 = 18$, onde $M = M_1 + M_2 = 44$ amostras. A partir da elevação de 10,0° pode-se utilizar um alcance máximo ainda menor levando em conta que todos os ecos ficam abaixo da altura de 18 km, tal que $r_a \leq 80000$ m (Fig. 2). Aplicando os mesmos passos, a PRP fixa passaria a ser $T = 5,33\times10^{-4}$ s ($FRP = 1875$ s^{-1}), e, com base na equação 3, $v_a = \pm24,98$ m s^{-1}. Também é possível aumentar a taxa de velocidade de rotação da antena para $\alpha = 28$ ° s^{-1} havendo $M = 32$ amostras por raio. Além disso, após contato direto com meteorologistas e engenheiros da CEMIG, foi decidido manter uma varredura no modo de vigilância para elevação de 0,5 ° entre cada varredura volumétrica de modo a manter um alcance máximo de 250 km, fazendo-se uso de uma PRP constante $T = 1,67 \times 10^{-4}$ s ($FRP = 600$ s^{-1}), que resulta em $M = 10$ amostras.

3. Configuração proposta

A tabela 2 apresenta a estratégia de varredura e a configuração proposta para realização de varreduras volumétricas, enquanto a Tabela 3 para a varredura de

vigilância que será realizada após um volume ser completado. Nessas configurações, a varredura volumétrica emprega FRPs duplas nas primeiras 10 elevações, enquanto FRPs fixas são implementadas nas elevações posteriores, buscando um balanço entre alcance máximo e velocidade máxima não-ambígua. Já varredura de vigilância fará uso de apenas uma elevação com alta taxa de revolução e FRP fixa. O tempo aproximado para geração de um volume será de 4 minutos e 20 segundos, enquanto para um PPI de vigilância 12 segundos, com o tempo total sem levar em conta o tempo necessário para que a antena mude de elevação sendo de 4 minutos e 32 segundos. Considerando que este é um dos poucos radares banda C operantes em nosso território, e que a metodologia para estimativa da velocidade radial é diferente do método de *Staggered PRT* (TORRES; DUBEL; ZRNIĆ, 2004; ZRNIĆ; MAHAPATRA, 1985) nesses radares, destaca-se a necessidade de realização de testes preliminares da estratégia proposta, visando inicialmente observar a qualidade dos dados gerados.

Tabela 2 – Configuração da estratégia de varredura sugerida. As elevações são separadas de acordo com o esquema de PRPs empregado. α indica a taxa de revolução do radar, T_1 e T_2 são os Períodos de Repetição de Pulso (PRP) curto e longo, sendo T_1 a PRP fixa em elevações mais altas. M_1 e M_2 é o número de amostras para os raios que emprega as FRPs alta e baixa, respectivamente. R_a é o alcance máximo não-ambíguo em m. O tempo em segundos necessário para completar um escaneamento de 360 ° é indicado na última coluna.

Elevações (°)	α **(°s^{-1})**	T_1 (× 10^{-3} **s) /** PRF_1 **(s^{-1})**	T_2 **(**× 10^{-3} **s) /** PRF_2 **(s^{-1})**	M_1	M_2	R_a **(m)**	**Tempo por elevação (s)**
0.5, 0.9, 1.3, 1.8, 2.4, 3.1, 4.0, 5.1	18	1,25/800	1,67/600	21	16	180000	20
6.4, 8	20	1/1000	1,33/750	24	18	150000	18
10, 12.5, 15.6, 19.5	28	0,533/1875	-	32	-	80000	12,85

Tabela 3 – Conforme a Tabela 2 mas para a configuração da estratégia de varredura de vigilância sugerida.

Elevações (°)	**α (°s^{-1})**	T_1 **(× 10^{-3} s) /** PRF_1 **(s^{-1})**	T_2 **(× 10^{-3} s) /** PRF_2 **(s^{-1})**	M_1	M_2	R_a **(m)**	**Tempo por elevação (s)**
0.5	30	1,67/600	-	10	-	150000	12

4. Qualidade das Variáveis

Durante a inspeção das demais variáveis do radar, foi verificada uma inconsistência na estimativa da fase diferencial de propagação (PhiDP). A Figura 6 apresenta um exemplo do problema observado. Além de precipitação estratiforme, também são observados dois núcleos de convecção profunda (Fig. 6a). O comportamento esperado para fase diferencial é de aumento monotônico, conforme a diferença de fase entre as componentes ortogonais aumenta durante a propagação do pulso de radiação na medida que a radiação encontra precipitação. No entanto, é notado na Figura 6b que ocorre o *folding* da fase diferencial, saltando de 0° para 180° e decrescendo conforme o pulso se afasta do radar. Consequentemente, a fase diferencial específica, que é a variação da fase diferencial em relação à distância (RAUBER; NESBITT, 2018), acaba se tornado negativa (Fig. 6c) até mesmo se recalculada (Fig. 6d), o oposto do que se é esperado. É possível realizar o *unfolding* da fase diferencial ao tomar-se o módulo da diferença entre o valor observado e o ângulo de 180°, conforme apresentado na Figura 7b,d. Ainda assim, recomenda-se identificar e corrigir a fonte deste problema no equipamento, já que, além da fase diferencial específica ser importantíssima para estimativa quantitativa de precipitação (GIANGRANDE; RYZHKOV, 2008; RYZHKOV; GIANGRANDE; SCHUUR, 2005; RYZHKOV; ZRNIĆ, 1996; ZRNIĆ; RYZHKOV, 1996) essa também é fundamental para a correção da atenuação que acomete os fatores de

refletividade horizontal, e a refletividade diferencial em radares banda C (BOROWSKA et al., 2011).

Figura 6 – PPI de 0,5° do radar de Mateus Leme as 1845 UTC do dia 28 de março de 2023. Em (a) é exposto o fator de refletividade horizontal, (b) a fase diferencial, (c) a fase diferencial estimada pelo processador do radar, e (d) a fase diferencial calculada utilizando o método proposto por Lang et al. (2007).

Figura 7 – Mesmo que a Figura 6 mas após a correção a fase diferencial ter sido aplicada (b), e a fase diferencial ter sido recalculada usando o método de Lang et al. (2007).

Por último, através da Figura 8b também é notado um viés negativo na refletividade diferencial (ZDR) estimada pelo radar (Fig. 8b), que, após inspeção mais minuciosa, pode ser atribuída a uma inversão dos canais de recepção. Isto ocorre, possivelmente, por uma troca dos cabos de recepção horizontal e vertical durante uma manutenção do equipamento, ou dos próprios guias de onda. É necessária uma verificação no equipamento para constatar se este é realmente o caso, sendo também esse problema possivelmente a causa do *folding* observado na fase diferencial.

Figura 8 – PPI de 0,5° do radar de Mateus Leme as 1845 UTC do dia 28 de março de 2023. Em (a) é exposto o fator de refletividade horizontal, (b) refletividade diferencial, (c) refletividade diferencial multiplicada por -1.

5. Referências

ALFORD, A. A. et al. A Method for Correcting Staggered Pulse Repetition Time (PRT) and Dual Pulse Repetition Frequency (PRF) Processor Errors in Research Radar Datasets. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 39, n. 11, p. 1763–1780, 1 nov. 2022.

ALTUBE, P. et al. Correction of dual-PRF Doppler Velocity Outliers in the Presence of Aliasing. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 7, p. 1529–1543, 2017.

BOROWSKA, L. et al. Attenuation and Differential Attenuation of 5-cm-wavelength Radiation in Melting Hail. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 50, n. 1, p. 59–76, 2011.

DOVIAK, R. J.; ZRNIĆ, D. S. **Doppler Radar and Weather Observations**. 2. ed. San Diego, California: Academic Press, 1993.

GIANGRANDE, S. E.; RYZHKOV, A. V. Estimation of Rainfall Based on the Results of Polarimetric Echo Classification. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 47, n. 9, p. 2445–2462, 2008.

HENGSTEBECK, T. et al. Radar network-based detection of mesocyclones at the German Weather Service. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 35, n. 2, p. 299–321, 1 fev. 2018.

HOLLEMAN, I.; BEEKHUIS, H. Analysis and Correction of Dual PRF Velocity Data. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 20, n. 4, p. 443–453, 2003.

JOE, P.; MAY, P. T. Correction of Dual PRF Velocity Errors for Operational Doppler Weather Radars. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 20, n. 4, p. 429–442, 2003.

JORGENSEN, D. P.; SHEPHERD, T. R.; GOLDSTEIN, A. S. A Dual-Pulse Repetition Frequency Scheme for Mitigating Velocity Ambiguities of the NOAA P-3 Airborne Doppler Radar. **Cover Journal of Atmospheric and Oceanic Technology Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 17, n. 5, p. 585–594, 2000.

RAUBER, R. M.; NESBITT, S. W. **Radar meteorology: A first course**. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2018.

RYZHKOV, A. V.; GIANGRANDE, S. E.; SCHUUR, T. J. Rainfall Estimation with a Polarimetric Prototype of WSR-88D. **Journal of Applied Meteorology**, v. 44, n. 4, p. 502–515, 2005.

RYZHKOV, A. V.; ZRNIĆ, D. S. Rain in Shallow and Deep Convection Measured with a Polarimetric Radar. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 53, n. 20, p. 2989–2995, 1996.

ZRNIĆ, D. S.; RYZHKOV, A. V. Advantages of Rain Measurements Using Specific Differential Phase. **Journal of Atmospheric & Oceanic Technology**, n. 13, p. 454–464, 1996.

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Relatório sobre os radares meteorológicos pertencentes ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

Autor: Vitor Goede

Supervisores: Izabelly Costa e Thiago Biscaro

Data: 05 de maio de 2023

1. Contextualização

O Comitê Científico de Nowcasting tem como objetivo o desenvolvimento e padronização de metodologias para realização da previsão de curtíssimo prazo (*nowcasting*) no Brasil. Em particular, radares meteorológicos são ferramentas importantíssimas para realização desta tarefa ao gerarem varreduras com alta resolução espacial e temporal. Contudo, visando o desenvolvimento e aplicação de produtos derivados a partir dos momentos base dos radares brasileiros, faz-se necessária a realização de ajustes das configurações e estratégias de varredura dos radares, assim como o controle de qualidade desses equipamentos. Em particular, ao analisar os dados volumétricos dos radares Doppler de dupla-polarização pertencentes ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), foram identificados problemas quanto as estratégias de escaneamento dos radares e qualidade da variável velocidade radial (v_r).

2. Problemas e sugestões

2.1 Estratégias de escaneamento

Ao analisar os diversos radares que compõem a rede de radares meteorológicos do CEMADEN, foi identificada a não padronização da estratégia de escaneamento dos radares, com estes apresentando varreduras volumétricas compostas por 12 até 17 elevações dependendo do equipamento. Exemplos são apresentados na Figura 1, para os radares de Jaraguari com 12 elevações (Fig. 1a), Três Marias com 13 elevações (Fig. 1b), Maceió com 16 elevações (Fig. 1c), e Salvador com 17 elevações (Fig. 1d).

Informações sobre alguns dos parâmetros importantes empregados no escaneamento destes radares são apresentadas na Tabela 1. É visível que as diferentes estratégias utilizadas resultam em diferentes períodos de geração de volumes, com o mínimo sendo observado para o radar de Petrolina, e o máximo para os radares de Maceió e Salvador. Vale destacar que, Jaraguari também difere dos demais radares ao implementar uma resolução radial de 500 m e recomenda-se que esta seja aumentada para 250 m [p.ex., Doviak et al. (2000)]. Outra incoerência é o fato dos radares de Salvador e Maceió não manterem o mesmo período de repetição de pulsos ao longo das elevações, mas atenção adicional a esta questão será dada na subseção posterior.

Visando a padronização das estratégias de varredura de modo a buscar observação de fenômenos severos que ocorrem em curto espaço de tempo (p.ex., microexplosões, tornados e granizo), é proposta a implementação de uma única estratégia de varredura com 14 elevações similar ao *Volume Coverage Pattern* (VCP) 12/212 da rede de radares meteorológicos WSR-88D norte americana, dando mais densidade às observações em níveis baixos. Este esquema é apresentado na Figura 2a. Nesta estratégia, as sete primeiras elevações utilizarão um esquema de Período de Repetição de Pulso (PRPs) alternadas de modo a manter o alcance máximo de 250000 m e um intervalo de Nyquist superior a 30 m s^{-1} (a recomendação das PRPs curta e longa será apresentado na próxima subseção). Elevações posteriores podem usar um esquema de PRP fixo com alcance reduzido de modo a manter um intervalo de Nyquist alto, mas, levando em conta que convecção profunda não excede alturas superiores a 20 km se considerarmos que o caminho percorrido pelo feixe segue o

modelo de 4/3 do raio da terra em condições atmosféricas normais (DOVIAK; ZRNIĆ, 1993; RAUBER; NESBITT, 2018). Além disso, de modo a manter um escaneamento com alcance estendido de 400 km em modo de vigilância (Fig. 2b), será realizada uma varredura para a elevação de 0,5° intercalando com a varredura volumétrica. Vale destacar que, tendo em vista o efeito de curvatura da Terra, para distâncias maiores que 250 km, o feixe do radar irá amostrar apenas regiões de precipitação mista ou sólida, tendo em mente que a altura média da isoterma ambiental de 0°C varia de 4,0 a 5,0 km, não tendo utilidade para a realização da estimativa quantitativa de precipitação.

Figura 1 – Estratégias de escaneamento para alguns radares pertencentes ao CEMADEN. Cores indicam as elevações utilizadas com o centro do feixe de 3 dB indicado pela linha escura, enquanto regiões coloridas indicam toda a área amostrada pelo feixe. (a) Jaraguari, (b) Três Marias, (c) Maceió, e (d) Salvador.

Tabela 1 – Parâmetros empregados em diferentes radares do CEMADEN. O nome de cada radar é indicado na primeira coluna, α indica a taxa de revolução do radar, T_1 e T_2 são os Períodos de Repetição de Pulso (PRP) curto e longo, M é o número total de amostras por raio, R a resolução radial em m, N_{ele} o número de elevações e T o tempo necessário para completar um volume de escaneamento em minutos.

Radar	α (°s^{-1})	T_1 (s)	T_2 (s)	**M**	**R (m)**	N_{ele}	**T (min)**
Jaraguari	11	$1{,}67\times 10^{-3}$	$2{,}08\times 10^{-3}$	48	500	12	7
Três Marias	11	$1{,}67\times 10^{-3}$	$2{,}08\times 10^{-3}$	48	250	13	7
São Francisco	11	$1{,}67\times 10^{-3}$	$2{,}08\times 10^{-3}$	48	250	13	7
Santa Teresa	11	$1{,}67\times 10^{-3}$	$2{,}08\times 10^{-3}$	48	250	13	7
Almenara	11	$1{,}67\times 10^{-3}$	$2{,}08\times 10^{-3}$	48	250	13	7
Salvador	11 / 20	$1{,}67\times 10^{-3}$	$2{,}08\times 10^{-3}$	48/59	250	17	7.9
Maceió	8/9/10/ 20/25	$1{,}67\times 10^{-3}$	$2{,}08\times 10^{-3}$	59/53/2 9/23	250	16	7.9
Petrolina	11	$1{,}67\times 10^{-3}$	$2{,}08\times 10^{-3}$	44	250	13	6.5
Natal	12	$1{,}67\times 10^{-3}$	$2{,}08\times 10^{-3}$	48	250	13	7

Figura 2 – Sugestão de estratégias de escaneamento volumétrico (a) e de vigilância (b) para os radares pertencentes ao CEMADEN. Cores indicam as elevações utilizadas com o centro do feixe de 3 dB indicado pela linha escura, enquanto regiões coloridas indicam toda a área amostrada pelo feixe.

2.1 O dilema Doppler e os esquemas PRP

Conforme Doviak e Zrnic (1993, p. 132), se uma sequência de pulsos $M + 1$ é transmitida por um radar meteorológico, a velocidade radial de um alvo no espaço iluminado sucessivamente por um trem de pulsos de radiação eletromagnética igualmente espaçados entre si, é estimada através da mudança de fase associada ao deslocamento do alvo entre pulsos:

$$\hat{v}_r = -\frac{\lambda}{4\pi T} Arg\, \hat{R}(T) = -\frac{\lambda}{4\pi T}\hat{\theta} \quad (1)$$

em que, λ o comprimento de onda de operação do radar em unidades de m, T o Período de Repetição de Pulsos (PRP) em s. Contudo, em engenharia é mais comum a utilização da Frequência de Repetição de Pulso (FRP), onde $FRP = T^{-1}$ e sua unidade é s^{-1}.

O argumento da função de autocorrelação $\hat{R}(T)$ é equivalente a mudança de fase $\hat{\theta}$ em radianos observada entre pulsos sucessivos a partir de um alvo no espaço que é iluminado pelo feixe do radar. Por outro lado, caso o deslocamento do alvo entre pulsos resulte em uma mudança de fase fora do intervalo $-\pi < \hat{\theta} \leq \pi$, $\hat{v}_r$ pode se tornar ambíguo e *folding* da velocidade será observado. Portanto a velocidade máxima não-ambígua v_a capaz de ser estimada pelo radar será:

$$v_m = \pm\frac{\lambda}{4\pi T}\pi = \pm\frac{\lambda}{4T} \quad (2)$$

Já o alcance máximo não-ambíguo r_a de forma a evitar a sobreposição de ecos, também depende da PRP do radar tal como:

$$r_m = \frac{cT}{2} \quad (3)$$

em que, $c \approx 3 \times 10^8$ m s^{-1} é a velocidade da luz no vácuo.

Ao combinarmos ambas as equações 2 e 3, chegamos ao dilema Doppler que é fundamental para os radares Doppler meteorológicos:

$$r_m v_m = \frac{c\lambda}{8} \quad (4)$$

Lembrando que os dois termos do lado direito da equação 4 são constantes, conclui-se que o aumento de uma das variáveis do lado esquerdo da igualdade acarreta na redução da outra, e vice-versa. Contudo, Zrnic e Mahapatra (1985) introduziram duas metodologias de modo a contornar este problema, sendo uma

delas comumente empregada nos radares brasileiros, incluindo os radares Doppler de dupla-polarização operados pelo CEMADEN. A metodologia utilizada é a de *staggered PRTs*, onde M trens de pulso de radiação eletromagnética são emitidos alternando entre dois períodos de repetição de pulso T_1 e T_2 distintos, em que $T_1 < T_2$, ($FRP_1 > FRP_2$). $K = T_1/T_2 = FRP_2/FRP_1$ é a razão entre as PRPs curta e longa que pode ser expressa através de números inteiros primos relativos tal que, $K = T_1/T_2 = m/n$. A velocidade radial pode então ser estimada através da auto-covariância entre os períodos T_1 e T_2:

$$\hat{v}_r = \frac{\lambda}{4\pi(T_2 - T_1)} Arg\left[\frac{\hat{R}(T_1)}{\hat{R}(T_2)}\right] = \frac{\lambda}{4\pi}\frac{(\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2)}{(T_2 - T_1)} \tag{5}$$

Novamente, caso a diferença entre as fases das PRPs curta e longa esteja fora do intervalo $-\pi < (\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2) \leq \pi$, *folding* será novamente observado. Portanto, a nova velocidade máxima não-ambígua estendida passa a ser:

$$v_m = \pm\frac{\lambda}{4\pi(T_2 - T_1)}\pi = \pm\frac{\lambda}{4(T_2 - T_1)} \tag{6}$$

Enquanto que o alcance máximo não-ambíguo proposto passa a ser:

$$r_m = \frac{c(T_2 + T_1)}{2} \tag{7}$$

Analisando a equação 6, é simples concluir que v_m é inversamente proporcional a diferença entre as PRPs longa e curta, e quanto menor essa diferença, maior a velocidade máxima não-ambígua. Contudo, Zrnic e Mahapatra (1985) também mostram em seu apêndice A, que a variância na estimativa da velocidade radial média da série total de pulsos, reconstruída a partir das velocidades radiais estimadas para T_2 e T_1, é inversamente proporcional à diferença

entre ambas as PRPs. Portanto, se a razão $K \rightarrow 1$ entre PRPs curta e longa, haverá uma elevada flutuação estatística que afetará a qualidade da variável.

Torres, Dubel, Zrnic (2004) propõem que, ao invés de estimar a velocidade radial a partir da equação 5, sejam utilizadas as velocidades obtidas a partir da PRP curta para realizar o *unfolding* das velocidades obtidas da PRP longa, com base em regras de *unfolding* pré-estabelecidas considerando a razão K entre as PRPs. Como o *folding* em T_1 e T_2 ocorre em intervalos de velocidade diferentes, é possível realizar o *unfolding* de uma pela outra. Além disso, Sachidananda e Zrnic (2000, 2002), e Torres, Dubel, Zrnic (2004) também sugerem que o alcance máximo não-ambíguo aplicado nos radares seja equivalente ao alcance máximo não-ambíguo da PRP curta $r_a = cT_1/2$.

No entanto, Torres, Dubel, Zrnic (2004) ainda alertam para problemas que podem surgir durante a reconstrução da velocidade real, caso algumas considerações não sejam levadas em conta. Novamente, conforme Zrnic e Mahapatra (1985), caso $K \rightarrow 1$, a alta variância pode acabar na degradação da qualidade das velocidades obtidas para as diferentes PRPs. Além disso, a variância também pode ser exacerbada em áreas de elevada largura espectral (σ_v) que caracterizam alto cisalhamento azimutal e/ou turbulência (TORRES; ZITTEL; SAXION, 2009), conforme a Figura 3. Eventualmente, o algoritmo de *unfolding* acaba utilizando uma regra inadequada, o que acarreta em um “erro catastrófico” (TORRES; DUBEL; ZRNIĆ, 2004; TORRES; ZITTEL; SAXION, 2009) que resulta em estimativas de velocidade completamente incorretos. Esses erros são facilmente identificados na forma de valores irreais e ruído em um PPI de v_r conforme a Figura 4. Por outro lado, pode-se corrigir estes erros utilizando-se algoritmos com base na continuidade do campo de v_r [p.ex., Altube et al. (2017); Hengstebeck et al. (2018), Alford et al. (2022)]. Ainda assim, o número de erros catastróficos deve ser o mínimo possível de modo a garantir a eficiência destes algoritmos na correção de v_r

.

Figura 3 – Porcentagem de erros catastróficos em função de σ_v para diferentes elevações para um radar Doppler WRS-88D da rede norte-americana de radares meteorológicos. Elevações mais baixas necessitam de PRPs mais longas, e, por conseguinte, há um aumento nas variâncias de v_r e na porcentagem de erros catastróficos. É evidente que o número de erros catastróficos aumenta drasticamente a partir de $\sigma_v = 4$ m/s para elevações baixas, e 5 m/s para elevações altas. Fonte: adaptado de Torres, Dubel, Zrnic (2004).

Figura 4 – Campo de v_r para um episódio de convecção profunda em 31 de março de 2008 para um radar WSR-88D. Note os diversos pixels que não coincidem com o escoamento observado (i.e., ruído na forma de pixels verdes). Cores quentes indicam escoamento que se afasta do radar, enquanto que cores frias indicam escoamento em direção ao radar. Fonte: adaptado de Torres, Dubel, Zrnic (2004).

Os radares brasileiros operacionais atualmente, utilizam razões de PRPs de 2/3, 3/4 e 4/5. Os radares pertencentes ao CEMADEN por exemplo, utilizam uma razão $K = 4/5$ onde $T_1 = 1,67\times10^{-3}$ s e $T_2 = 2,08\times10^{-3}$ s ($FRP_1 = 600$ Hz e

$FRP_2 = 480$ Hz), em todas as elevações de varredura. Considerando o comprimento de onda $\lambda = 0,11$ m e fazendo-se uso da equação 6, a velocidade máxima não-ambígua estendida é $v_m = \pm 64,3$ m s^{-1}. Apesar de este intervalo limitar a ocorrência de *folding* a situações extremas, inevitavelmente, áreas de elevada turbulência ou cisalhamento azimutal são dominadas por uma grande quantidade de erros catastróficos. Um exemplo é exibido na Figura 5 durante um episódio de tempo severo ocorrido no estado de Mato Grosso do Sul no dia 13 de novembro de 2022. Uma linha de instabilidade com ecos superiores a 50 dBZ é observada na Figura 5a, com fortes rajadas de vento sendo identificadas em sua retaguarda. No entanto, essas mesmas áreas são marcadas por um elevado número de erros catastróficos (Fig. 5b), tanto que, em regiões de baixa coerência, o processador acaba removendo uma grande quantidade de pixels. Mesmo com a aplicação da correção com base em uma estatística circular móvel a partir de pixels de v_r corretos desenvolvida por Hengstebeck et al. (2018), o algoritmo é incapaz de corrigir adequadamente todos os erros (Fig. 5c). Por último, um filtro móvel 3x3 com base na mediana de cada pixel (Fig. 5d) foi aplicado de modo a tentar remover os ruídos que não foram corrigidos adequadamente pelo algoritmo. Apesar de suprimir os ruídos remanescentes, este último passo acarreta na suavização de extremos, e, ainda assim, não é capaz de resolver adequadamente todos os erros.

Figura 5 – PPI de 0,5° do radar de Jaraguari as 0100 UTC do dia 14 de novembro de 2022. Em (a) é exposto o fator de refletividade horizontal, (b) a velocidade radial, (c) a velocidade radial corrigida após aplicar o algoritmo de Hengstebeck et al. (2018), e (d) após a aplicação de um filtro móvel 3x3 com base na mediana de cada pixel. O polígono tracejado indica a extensa área com erros catastróficos antes (b), após a correção utilizando estatísticas circulares (c), e a passagem do filtro com base na mediana móvel (d).

Por outro lado, o radar de Manaus que pertence ao CENSIPAM faz uso de uma razão $K = 2/3$ onde $T_1 = 1,61\times10^{-3}$ e $T_2 = 2,42\times10^{-3}$ s ($FRP_1 = 621$ Hz e $FRP_2 = 414$ Hz). Tendo em mente que o comprimento de onda $\lambda = 0,10$ m, e repetindo o cálculo realizado no parágrafo anterior, a velocidade máxima não-ambígua deste radar é $v_m = \pm31,07$ m s^{-1}. Apesar de esse valor ser comparativamente inferior, este ainda é suficientemente alto para evitar a

ocorrência de *folding* apenas à casos extremos. A Figura 6 apresenta núcleos convectivos ao noroeste do radar de Manaus na noite do dia 13 de novembro de 2019. Ecos de refletividade horizontal se aproximam de 50 dBZ nas regiões de convecção mais intensa (Fig. 6a). Em contrapartida é possível notar que os erros catastróficos se limitam às células mais intensas ao oeste (Fig. 6b). Contudo, ao abrangerem áreas menores, o algoritmo de correção é capaz de resolver a maioria dos erros catastróficos conforme exposto na Figura 6c. Apesar de algumas áreas de leve ruído permanecerem, a qualidade do campo de velocidade é significativamente superior em comparação ao exemplo anterior, quase não se fazendo necessária a aplicação do filtro móvel (Fig. 6d).

Figura 6 – PPI de 0,9° do radar de Manaus as 2224 UTC do dia 13 de novembro de 2019. Em (a) é exposto o fator de refletividade horizontal, (b) a velocidade radial, (c) a velocidade radial corrigida após aplicar o algoritmo de Hengstebeck et al. (2018), e (d) após a aplicação de um filtro móvel 3x3 com base na mediana de cada pixel. Círculos e elipses tracejadas

indicam as áreas de erros catastróficos antes (b), após a correção utilizando estatísticas circulares (c), e a passagem do filtro com base na mediana móvel (d).

Com base na literatura existente sobre o tema (SACHIDANANDA; ZRNIĆ, 2000, 2002; TORRES; DUBEL; ZRNIĆ, 2004; TORRES; WARDE, 2017; TORRES; ZITTEL; SAXION, 2009; WARDE; TORRES, 2017; ZRNIĆ; MAHAPATRA, 1985), além dos resultados observacionais apresentados anteriormente, recomenda-se a alteração da razão entre PRPs do método de PRPs alternadas implementado nos radares do CEMADEN de modo a ainda estender a velocidade máxima não-ambígua, mas também obter a melhor qualidade possível.

Visando manter o alcance máximo dos radares de 250000 m, fazendo-se uso da equação 3, obtém-se que $T_1 = 1,67\times10^{-3}$ s ($FRP_1 =$ 600 Hz). Tendo em mente que a razão entre PRPs deve ser $K = 2/3$, a PRP longa deve então ser $T_2 = 2,5\times10^{-3}$ s ($FRP_2 =$ 400 Hz). Já a velocidade máxima não-ambígua estendida com base na equação 6, tendo que $\lambda = 0,1072$ m, será $v_m = \pm32,16$ m s^{-1}. No entanto, deve-se levar em conta o número de pulsos para à estimativa das variáveis de modo a manter sua qualidade. Atualmente, o número de amostras M dos radares do CEMADEN varia de 44 a 59 nas elevações que empregam PRPs alternadas (Tabela 1), com taxas de rotação da antena α de 8 a 12 ° s^{-1} (Tabela 1). De modo a padronizar a configuração dos radares nas elevações que fazem uso de PRPs alternadas, pode-se partir da inequalidade proposta por Doviak e Zrnic (1993) tal que a resolução azimutal θ seja de 1° não seja distorcida significativamente pela rotação da antena:

$$M \leq \frac{\theta}{\alpha_{max} T} \tag{8}$$

Tendo em mãos a nova estratégia de varredura volumétrica proposta onde PRPs alternadas são utilizadas nas sete primeiras elevações, pode-se escolher a taxa de rotação máxima da antena de $\alpha_{max} = 17$ ° s^{-1} de modo a acelerar ligeiramente a velocidade de varredura sem gerar muito desgaste da plataforma. Considerando as

PRPs propostas, utiliza-se a equação 8 dividindo θ por 2 já que o feixe é equipartido igualmente entre ambas as PRPs. Assim, o número de amostras para as respectivas PRPs é $M_1 = 18$ e $M_2 = 12$, totalizando $M = M_1 + M_2 = 30$ amostras para cada raio. A configuração proposta, deve ser suficiente para manter uma baixa variância de v_r e reduzir o número de erros catastróficos, além de completar as varreduras volumétricas dentro do período desejado.

Em elevações mais altas, pode-se fazer uso de PRPs fixas e aumentar a taxa de rotação da antena de modo a diminuir o período de geração de um volume. Considerando um alcance máximo $r_a \leq$ 187500 m, fazendo-se uso novamente da equação 3, a PRP fixa será $T = 1,25\times10^{-3}$ s ($FRP = 800$ Hz). Consequentemente, com a equação 2 tem-se $v_m = \pm21,44$ m s^{-1}. Considerando uma taxa de rotação $\alpha_{max} = 23$ ° s^{-1}, isso garante $M = 35$ amostras. A partir da elevação de 8,0° pode-se utilizar um alcance máximo ainda menor levando em conta que todos os ecos ficam abaixo da altura de 20 km, tal que $r_a \leq 130000$ m (Fig. 2). Aplicando os mesmos passos, a PRP fixa passaria a ser $T = 8,7\times10^{-4}$ s ($FRP = 1150$ Hz), e aumentando $\alpha_{max} = 28$ ° s^{-1} haverá $M = 41$ amostras.

3. Configuração proposta

A tabela 2 apresenta a estratégia de varredura e a configuração proposta para realização de varreduras volumétricas. Nesta configuração, as primeiras 7 elevações empregam PRPs alternadas, enquanto PRPs fixas são implementadas nas elevações posteriores, buscando um balanço entre alcance máximo e velocidade máxima não-ambígua. O tempo aproximado para geração de um volume é de um pouco menos que 4 minutos e 4 segundos. Além disso, visando manter um PPI no modo vigilância com alcance máximo de 400 km, pode-se adicionar uma varredura na elevação de 0,5° realizada após da geração de um volume de varreduras, com está fazendo uso de uma PRP constante $2,67\times10^{-3}$ s e taxa de revolução de 28 ° s^{-1}, totalizado $M = 13$ amostras (Tabela 3). Levando em conta também o tempo

necessário para elevação da antena ao fim de cada varredura, além do tempo de segurança do software, o período total para geração de uma varredura volumétrica e de vigilância seria ligeiramente inferior a 5 minutos.

Tabela 2 – Configuração da estratégia de varredura volumétrica sugerida. As elevações são separadas de acordo com o esquema de PRPs empregado. α indica a taxa de revolução do radar, T_1 e T_2 são os Períodos de Repetição de Pulso (PRP) curto e longo sendo T_1 a PRP fixa em elevações mais altas. M é o número total de amostras por raio, R_a é o alcance máximo não-ambíguo em m. O tempo necessário para completar um escaneamento de 360 ° em segundos é indicado na última coluna.

Ele. (°)	α **(°s^{-1})**	T_1 **(ms) /** FRP_1 **(s^{-1})**	T_2 **(ms) /** RFP_2 **(s^{-1})**	**M**	R_a **(m)**	**Tempo por elevação (s)**	τ (μs)
0.5, 0.9, 1.3, 1.8, 2.4, 3.1, 4.0	17	1,67/600	2,5/400	30	250000	21	2
5.1, 6.4	23	1,25/800	-	35	187500	16	0,5
8.0, 10.0, 12.5, 15.6, 19.5	28	0,87/1150	-	40	130000	13	0,5

Tabela 3 – Como a Tabela 2 mas para a configuração da estratégia de varredura de vigilância.

Ele. (°)	α **(°s^{-1})**	T **(ms) / FRP (Hz)**	**M**	R_a **(m)**	**Tempo por elevação (s)**	τ (μs)
0.5	28	2,67/375	13	400000	12	0.5

4. Resultados preliminares

A Figura 7 apresenta um exemplo operacional da estratégia sugerida que foi recentemente implementada no radar de Chapecó, que pertence à Secretaria de Defesa Civil de Santa Catarina. Na noite do dia 16 de abril, convecção profunda e severa era observada sobre o Sul do Paraná, enquanto convecção pouco organizada provocava precipitação moderada a intensa sobre área mais ao oeste do mesmo estado assim como SC (Fig. 7a). Com a redução dos erros de *unfolding*, o algoritmo de Alford et al. (2022) é capaz de corrigir satisfatoriamente a velocidade radial (Fig. 7b), tanto que, o mesociclone associado a uma tempestade supercelular no Sul do Paraná pode ser facilmente identificado. Além disso, regiões dentro do raio de 125 km do radar, que se encontram abaixo da camada de derretimento, apresentam precipitação em fase líquida com Z_{DR} entre 1 e 2 dB (Fig. 7c) e ρ_{HV} muito próximo da unidade (Fig. 7d), sendo este o valor esperado para precipitação líquida [p.ex., Balakrishnan e Zrnić (1990), Straka et al (2000)], garantindo que não houve perda da qualidade na estimativa das demais variáveis (BRINGI; CHANDRASEKAR, 2001, p. 304).

Figura 7 – PPI de 0,9° do radar de Chapecó as 2154 UTC do dia 16 de abril de 2023. Em (a) é exposto o fator de refletividade horizontal, (b) a velocidade radial, (c) a refletividade diferencial (Z_{DR}), e (d) o coeficiente de correlação co-polar (ρ_{HV}). Círculos concêntricos tracejados indicam os raios de 125 e 250 km em relação ao radar. Linhas em cinza indicam as divisões municipais enquanto as linhas pretas contínuas as fronteiras entre Brasil, Argentina e Paraguai.

Quanto à estimativa quantitativa de precipitação, a Figura 8 apresenta os acumulados de precipitação para o evento ocorrido no litoral norte entre os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023, quando acumulados de precipitação em 24 horas observados superaram os 600 mm, sendo um dos eventos mais extremos de chuva já observados no país. . Para fins comparativos do impacto do aumento da resolução temporal na estimativa de precipitação, a Figura 9 apresenta o acúmulo de

precipitação considerando o tempo de geração de um volume de 10 minutos, utilizando os dados do radar do CTH. Vale lembrar que o radar de Chapecó e o radar do CTH são do mesmo modelo dos radares do CEMADEN, com a diferença de utilizarem magnetron., de modo a emular o período atual dos radares do CEMADEN. Destaca-se que, os acumulados de precipitação foram extraídos tomando-se a média das taxas de precipitação estimadas a partir de múltiplas regras de estimativa quantitativa de precipitação com base na classificação de hidrometeoros utilizando-se de variáveis polarimétricas (Ryzhkov et al., 2005), utilizando-se o produto DPSRI disponível no Rainbow. Comparando ambas as figuras, não há mudança expressiva na distribuição espacial da precipitação, porém o campo gerado com a resolução temporal de 5 minutos apresenta melhor detalhamento e maior refinamento espacial. A figura 10 apresenta a diferença entre os acumulados gerados com a resolução de 5 e a resolução de 10 minutos. Nota-se que há máximos de 35 mm no período acumulado. Como o ciclo de vida de tempestades convectivas é curto, o uso de uma resolução temporal mais apurada aumenta a probabilidade de detecção de picos de precipitação, além de aumentar a acurácia das taxas de precipitação observadas.

Figura 8 – CAPPIs de 3 km contendo o acúmulo de precipitação estimado pelo radar do CTH de 18 a 19 de fevereiro de 2023, com resolução temporal de 5 minutos. Os círculos representam as distâncias de 50 e 100 km do centro do radar.

Figura 9: Idem à figura 7, mas para um intervalo de observação de 10 minutos.

Figura 10: Diferença entre os acumulados com resolução temporal de 5 minutos e 10 minutos.

5. Referências

ALFORD, A. A. et al. A Method for Correcting Staggered Pulse Repetition Time (PRT) and Dual Pulse Repetition Frequency (PRF) Processor Errors in Research Radar Datasets. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 39, n. 11, p. 1763–1780, 1 nov. 2022.

ALTUBE, P. et al. Correction of dual-PRF Doppler Velocity Outliers in the Presence of Aliasing. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 7, p. 1529–1543, 2017.

BALAKRISHNAN, N.; ZRNIĆ, D. S. Use of Polarization to Characterize Precipitation and Discriminate Large Hail. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 47, n. 13, p. 1525–1540, 1990.

BRINGI, V. N.; CHANDRASEKAR, V. **Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications**. 1. ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.

DOVIAK, R. J.; ZRNIĆ, D. S. **Doppler Radar and Weather Observations**. 2. ed. San Diego, California: Academic Press, 1993.

DOVIAK, R. J. et al. Considerations for Polarimetric Upgrades to Operational WSR-88D Radars. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 17, n. 3, p. 257–278, 2000.

HENGSTEBECK, T. et al. Radar network-based detection of mesocyclones at the German Weather Service. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 35, n. 2, p. 299–321, 1 fev. 2018.

RAUBER, R. M.; NESBITT, S. W. **Radar meteorology: A first course**. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2018.

RYZHKOV, A. et al., 2005b: Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D, **Journal of Applied Meteorology**, vol. 44, 502–515

SACHIDANANDA, M.; ZRNIĆ, D. S. Clutter Filtering and Spectral Moment Estimation for Doppler Weather Radars Using Staggered Pulse Repetition Time (PRT). **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 17, n. 3, p. 323–331, 2000.

SACHIDANANDA, M.; ZRNIĆ, D. S. An Improved Clutter Filtering and Spectral Moment Estimation Algorithm for Staggered PRT Sequences. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, n. 12, p. 2009–2019, 2002.

STRAKA, J. M.; ZRNIĆ, D. S.; RYZHKOV, A. V. Bulk Hydrometeor Classification and Quantification Using Polarimetric Radar Data: Synthesis of Relations. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, n. 8, p. 1341–1372, 2000.

TORRES, S. M.; DUBEL, Y. F.; ZRNIĆ, D. S. Design, Implementation, and Demonstration of a Staggered PRT Algorithm for the WSR-88D. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 21, n. 9, p. 1389–1399, 2004.

TORRES, S. M.; WARDE, D. A. Staggered-PRT sequences for doppler weather radars. Part I: Spectral analysis using the autocorrelation spectral density. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 1, p. 51–63, 2017.

TORRES, S.; ZITTEL, D.; SAXION, D. **UPDATE ON DEPLOYMENT OF STAGGERED PRT FOR THE NEXRAD NETWORK**. 25th Conference on International Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology. **Anais**...Phoenix, AZ: American Meteorological Society, 2009.

WARDE, D. A.; TORRES, S. M. Staggered-PRT Sequences for Doppler Weather Radars. Part II: Ground Clutter Mitigation on the NEXRAD Network Using the CLEAN-AP Filter. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 3, p. 703–716, 12 jan. 2017.

ZRNIĆ, D. S.; MAHAPATRA, P. Two Methods of Ambiguity Resolution in Pulse Doppler Weather Radars. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 21, n. 4, p. 470–483, 1985.

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Relatório sobre os radares meteorológicos pertencentes a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME)

Autor: Vitor Goede

Supervisores: Izabelly Costa e Thiago Biscaro

Data: 24 de maio de 2023

1. Contextualização

O Comitê de Nowcasting tem como objetivo o desenvolvimento e padronização de metodologias para realização da previsão de curtíssimo prazo (*nowcasting*) no Brasil. Em particular, radares meteorológicos são ferramentas importantíssimas para realização desta tarefa ao gerarem varreduras com alta resolução espacial e temporal. Contudo, visando o desenvolvimento e aplicação de produtos derivados a partir dos momentos base dos radares brasileiros, faz-se necessária a realização de ajustes das configurações e estratégias de varredura dos radares, assim como o controle de qualidade desses equipamentos. Em particular, ao analisar os dados volumétricos do radar Doppler de polarização horizontal de Quixeramobim e Fortaleza, pertencentes à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), foram identificados problemas quanto às estratégias de escaneamento do radar, assim como a qualidade de algumas variáveis.

2. Problemas e sugestões

2.1 Estratégias de escaneamento

Ao analisar os dados dos radares de Quixeramobim e Fortaleza, foi identificada a não padronização da estratégia de escaneamento em relação aos demais radares que compõem a rede brasileira de radares meteorológicos. Atualmente, o radar banda S de Quixeramobim conta com 11 elevações para realização de varreduras volumétricas compostas. A Figura 1a apresenta as elevações empregadas em sua estratégia de escaneamento. Já o radar banda X de Fortaleza conta com 13 elevações (Fig. 1b). Informações sobre alguns dos parâmetros importantes empregados no escaneamento destes radares são apresentadas na Tabela 1. Para padronização das estratégias de varreduras, a próxima subseção trará algumas considerações técnicas a serem levadas na definição dos parâmetros a serem definidos para os escaneamentos.

Figura 1 – Estratégia de escaneamento empregada atualmente nos radares de (a) Quixeramobim e (b) Fortaleza. Cores indicam as elevações utilizadas com o centro do feixe de 3 dB indicado pela linha escura, enquanto regiões coloridas indicam toda a área amostrada pelo feixe.

Tabela 1 – Parâmetros empregados nos radares de Quixeramobim. λ refere-se ao comprimento de onda em que opera o radar, α indica a sua taxa de revolução, T_1 e T_2 são os Períodos de Repetição de Pulso (PRP) curto e longo, M_1 e M_2 são o número total de amostras para os raios com T_1 e T_2, respectivamente, R a resolução radial em m, N_{ele} o número de elevações, e T o tempo necessário para completar um volume de escaneamento em minutos.

Radar	λ (cm)	α **(°s^{-1})**	θ_3 (°)	T_1 **(ms)**	T_2 **(ms)**	M_1	M_2	R (m)	N_{ele}	T (min)
Quixaro mobim	10,71	7,5	2,0	2,67	-	21	-	1500	10	8,82
Fortaleza	3,20	10	0,95	1,00	1,50	33	50	375	13	8,22

2.1 O dilema Doppler e os esquemas FRP

Conforme Doviak e Zrnic (1993, p. 132), se uma sequência de pulsos $M + 1$ é transmitida por um radar meteorológico, a velocidade radial de um alvo no espaço iluminado sucessivamente por um trem de pulsos de radiação eletromagnética igualmente espaçados entre si, é estimada através da mudança de fase associada ao deslocamento do alvo entre pulsos:

$$\hat{v}_r = -\frac{\lambda}{4\pi T} Arg\, \hat{R}(T) = -\frac{\lambda}{4\pi T}\hat{\theta} \qquad (1)$$

em que, λ o comprimento de onda de operação do radar em unidades de m, e T o Período de Repetição de Pulsos (PRP) em s. Contudo, em engenharia é mais comum a utilização da Frequência de Repetição de Pulso (FRP), onde $FRP = T^{-1}$ e sua unidade é s^{-1}.

O argumento da função de autocorrelação $\hat{R}(T)$ é equivalente a mudança de fase $\hat{\theta}$ em radianos observada entre pulsos sucessivos a partir de um alvo no espaço que é iluminado pelo feixe do radar. Por outro lado, caso o deslocamento do alvo

entre pulsos resulte em uma mudança de fase fora do intervalo $-\pi < \hat{\theta} \leq \pi$, $\hat{v}_r$ pode se tornar ambíguo e *folding* da velocidade será observado. Portanto a velocidade máxima não-ambígua v_a capaz de ser estimada pelo radar será:

$$v_a = \pm\frac{\lambda}{4\pi T}\pi = \pm\frac{\lambda}{4T} \tag{2}$$

Já o alcance máximo não-ambíguo r_a de forma a evitar a sobreposição de ecos, também depende da PRP do radar tal como:

$$r_a = \frac{cT}{2} \tag{3}$$

em que, $c \approx 3 \times 10^8$ m s^{-1} é a velocidade da luz no vácuo.

Ao combinarmos ambas as equações 2 e 3, chegamos ao dilema Doppler que é fundamental para os radares Doppler meteorológicos:

$$r_a v_a = \frac{c\lambda}{8} \tag{4}$$

Lembrando que os dois termos do lado direito da equação 4 são constantes, conclui-se que o aumento de uma das variáveis do lado esquerdo da igualdade acarreta a redução da outra, e vice-versa. Contudo, Jorgensen, Sheperd, Goldstein (2000), introduziram uma metodologia de modo a contornar este problema, sendo essa empregada no radar de Fortaleza. A metodologia utilizada é a de *Dual-FRPs* (FRPs duplas), onde *M* trens de pulso de radiação eletromagnética são emitidos com FRPs distintas para azimutes adjacentes, em que $FRP_1 > FRP_2$ ($T_1 < T_2$). $K = T_1/T_2 = FRP_2/FRP_1$ é a razão entre as PRPs curta e longa que pode ser expressa através de números inteiros primos relativos tal que, $K = FRP_2/FRP_1 = m/n$. A velocidade radial pode então ser estimada através da auto-covariância entre os períodos T_1 e T_2 (JOE; MAY, 2003):

$$\hat{v}_r = \frac{\lambda}{4\pi(T_2 - T_1)} Arg\left[\frac{\hat{R}(T_1)}{\hat{R}(T_2)}\right] = \frac{\lambda}{4\pi}\frac{(\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2)}{(T_2 - T_1)} \quad (5)$$

Novamente, caso a diferença entre as fases das PRPs curta e longa esteja fora do intervalo $-\pi < (\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2) \leq \pi$, *folding* será novamente observado. Portanto, a nova velocidade máxima não-ambígua estendida passa a ser:

$$v_m = \pm\frac{\lambda}{4\pi(T_2 - T_1)}\pi = \pm\frac{\lambda}{4(T_2 - T_1)} \quad (6)$$

Analisando a equação 6, é simples concluir que v_m é inversamente proporcional a diferença entre as PRPs longa e curta, e quanto menor essa diferença, maior a velocidade máxima não-ambígua. Na metodologia de Jorgensen, Sheperd, Goldstein (2000), é extraída a diferença da velocidade radial média entre volumes de resolução adjacentes que compõem cada raio, tal que, o *unfolding* de velocidades obtidas com a FRP_2 é feito a partir das velocidades obtidas com a FRP_1. Isto é feito a partir de regras pré-estabelecidas com base na magnitude da diferença entre velocidades ao longo do intervalo estendido obtido pela equação 6, onde assume-se que as velocidades entre raios adjacentes são praticamente iguais. Além disso, o alcance máximo não-ambíguo aplicado nos radares é equivalente ao alcance máximo não-ambíguo da FRP alta, isto é, $r_a = cT_1/2 = c/(2FRP_1)$. Contudo, segundo Joe e May (2003), quanto mais próxima da unidade for a razão entre as FRPs, e, portanto, menor for a diferença entre as velocidades máximas não-ambíguas para cada FRP, maiores serão os erros de *unfolding* devido a maiores flutuações estatísticas na estimativa das velocidades. Portanto, se a razão $K \rightarrow 1$ entre PRPs curta e longa, haverá uma elevada flutuação estatística que afetará a qualidade da velocidade radial média reconstruída pelo algoritmo. Além disso, tanto Holleman e Beekhuis (2003) e Joe e May (2003), apontam para o problema atrelado a alta variância na estimativa das velocidades em áreas de elevada largura espectral (σ_v) que caracterizam regiões de turbulência associadas a fenômenos convectivos, também resultando em erros de *unfolding* (Figura 2).

Figura 2 – Simulação da porcentagem de erros de *unfolding* em função do desvio padrão para um radar banda C que faz uso de FRPs duplas. Linhas contínuas grossas indicam os erros teóricos para FRPs de 1000/750 s^{-1} (4/3), tracejadas 1200/900 s^{-1} (4/3), pontilhadas 1000/667 s^{-1} (3/2), e pontilhadas-tracejadas 1200/800 s^{-1} (3/2). Os quadrados e triângulos indicam a porcentagem de erros observados em dois radares que fazem uso de FRPs de 1000/750 s^{-1} e 1200/800 s^{-1}, respectivamente. Conforme há um aumento nas variâncias de v_r, é evidente que o número de erros de *unfolding* aumenta drasticamente a partir de $\sigma_v = 1$ m s^{-1} para $K = 4/3$ e $\sigma_v = 1,5$ m s^{-1} para $K = 3/2$. Fonte: adaptado de Joe e May (2003).

Áreas de elevado cisalhamento azimutal também violam a condição de velocidades similares entre azimutes também resultando em erros de *unfolding*. Matematicamente, a diferença de velocidade de um raio *i* e seu raio adjacente *i-1*, deve obedecer a seguinte inequação apresentada por Joe e May (2003):

$$\left|\frac{T_{i-1}(v_i - v_{i-1})}{T_i - T_{i-1}}\right| > v_{mi} \rightarrow \left|v_i - v_{i-1}\right| > \left|\frac{FRP_{i-1} - FRP_i}{FRP_i}\right| v_{mi} \qquad (7)$$

Apesar de razões entre FRPs da ordem de 5/4 ou até 7/5 estenderem significativamente o v_m e o alcance máximo (equação 6), a equação 7 indica que a chance de o algoritmo de *unfolding* utilizar uma regra inadequada também aumenta, e, por conseguinte, maior será o número de os erros no campo de v_r. Esses erros são facilmente identificados na forma de valores irreais e ruído em um PPI de v_r conforme a Figura 3. Por outro lado, pode-se corrigir estes erros utilizando-se algoritmos com base na continuidade do campo de v_r [p.ex., Altube et al. (2017); Hengstebeck et al. (2018), Alford et al. (2022)]. Ainda assim, o número de erros de *unfolding* deve ser o mínimo possível, tal que o maior número possível de volumes de resolução com velocidades corretamente estimadas se encontrem na vizinhança de um volume errôneo de modo a garantir a eficiência destes algoritmos na correção de v_r.

Figura 3 – Exemplo de v_r no PPI de 0.6° para um episódio de convecção profunda em 02 de novembro de 2008 para o radar Banda C de La Miranda no Nordeste da Espanha. O radar

emprega uma razão entre FRPs de 4/3 e tem uma $v_m = \pm 45.9$ m/s. Note os diversos pixels que não coincidem com o escoamento observado (i.e., ruído). O primeiro retângulo indica erros de *unfolding* aleatórios, enquanto o segundo uma maior concentração de erros de *unfolding* resultantes de intenso cisalhamento azimutal associado a um mesociclone. Cores quentes indicam escoamento que se afasta do radar, enquanto cores frias indicam escoamento em direção ao radar. Fonte: adaptado de Altube et al. (2017).

O radar de Fortaleza, em particular, já utiliza uma razão $K = 3/2$ (Tabela 1), e, considerando o comprimento de onda $\lambda = 0,032$ m, tomando da equação 6, a velocidade máxima não-ambígua estendida é $v_m = \pm 16,00$ m s^{-1}. Já o radar de Quixeramobim opera em $\lambda = 0,1071$ m e atualmente faz uso de uma FRP fixa durante suas varreduras mantendo um extensivo alcance máximo a custo de um baixo intervalo de Nyquist $v_m = \pm 10,04$ m s^{-1}, o que pode resultar na ocorrência frequente de áreas de *folding* (Fig. 4a,b).

Figura 4 – PPI de -0,8° do radar de Quixeramobim as 2053 UTC do dia 02 de março de 2023. Em (a) é exposto o fator de refletividade horizontal e (b) a velocidade radial. Regiões de *folding* da velocidade radial são destacadas pelas linhas pretas tracejadas.

Com base na literatura existente sobre o tema (ALFORD et al., 2022; ALTUBE et al., 2017; HENGSTEBECK et al., 2018; HOLLEMAN; BEEKHUIS, 2003; JOE; MAY, 2003; JORGENSEN; SHEPHERD; GOLDSTEIN, 2000), além dos resultados observacionais apresentados anteriormente, recomenda-se a alteração do método de estimativa da velocidade radial média para o de FRPs duplas no radar de Quixeramobim de modo a ainda estender a velocidade máxima não-ambígua, mas também obter a melhor qualidade possível nos dados. Para isso, será primeiramente necessário reduzir o alcance máximo que atualmente é de 360000 m para 250000 m nas elevações mais baixas das varreduras volumétricas, passo chave para manter $v_m > \pm 30$ m s^{-1} em uma razão entre FRPs de 3/2, o que limitaria a ocorrência de apenas um *folding* a casos extremos e reduziria o número de volumes de resolução que contém velocidades erroneamente estimadas em um radar banda S.

Com base nessas informações a PRP curta será $T_1 = 1,67\times10^{-3}$ s ($FRP_1 =$ 600 Hz) enquanto a longa deve ser $T_2 = 2,50\times10^{-3}$ s ($FRP_2 =$ 400 Hz). Já a velocidade máxima não-ambígua estendida com base na equação 6 tendo que $\lambda = 0,1071$ m, será $v_m = \pm 32,13$ m s^{-1}. No entanto, deve-se levar em conta o número de pulsos para cada raio durante a estimativa das variáveis de modo a manter a melhor qualidade possível. De modo a padronizar a configuração nas elevações que fazem uso de FRPs duplas, pode-se partir da equação proposta por Jorgensen, Sheperd, Goldstein (2000), tal que a resolução azimutal seja mais próxima o possível da largura do feixe de 3 dB mesmo levando em conta o efeito de distorção pela rotação da antena:

$$M = \frac{\Delta\theta FRP}{\alpha} \tag{8}$$

Tendo em mãos a nova estratégia de varredura volumétrica proposta onde FRPs duplas são utilizadas nas sete primeiras elevações, pode-se utilizar uma taxa de rotação da antena de $\alpha = 10$ ° s^{-1} sem gerar muito desgaste da plataforma. Considerando as FRPs propostas, utiliza-se a equação 8, tomando $\Delta\theta$ como 1°/2 como a estimativa do máximo deslocamento desejável entre os raios durante a rotação da antena. Portanto, o número de amostras para as FRPs de 600 s^{-1} e 400 s^{-1},

será $M_1 = 30$ e $M_2 = 20$. A partir da elevação de 5,0° pode-se utilizar um alcance máximo ainda menor levando em conta que todos os ecos ficam abaixo da altura de 18 km, tal que $r_a \leq 175000$ m (Fig. 2). Aplicando os mesmos passos, a PRP fixa passaria a ser $T = 1,17\times10^{-4}$ s ($FRP = 857$ Hz), e, com base na equação 3, $v_m = \pm 22,95$ m s^{-1}. Também é possível aumentar a taxa de velocidade de rotação da antena para $\alpha = 20$ ° s^{-1} havendo $M = 43$ amostras por raio. Por último, tendo em mente que a varredura no modo de vigilância deve manter um alcance máximo de 400000 m, esta varredura deve ser realizada com uma FRP constante $T = 2,67\times10^{-3}$ s ($FRP = 375$ Hz), com uma taxa de revolução $\alpha = 24$ ° s^{-1} que acarreta $M = 16$ amostras, garantindo qualidade suficiente do fator de refletividade para observação de convecção à longas distâncias ao custo de $v_m = \pm 10,00$ m s^{-1}.

Já para o radar de Fortaleza, que possui melhor resolução do feixe, recomenda-se o aumento da razão entre as FRPs tendo em vista que o intervalo de Nyquist deve ser aumentado enquanto o alcance máximo de 120000 é mantido nas primeiras 10 elevações. Sendo assim, pela Tabela 1 tem-se que $T_1 = 1,00\times10^{-3}$ s ($FRP_1 =$ 1000 Hz), e, portanto $T_2 = 1,33\times10^{-3}$ s ($FRP_2 =$ 750 Hz), o que resulta em $v_m = \pm 24,00$ m s^{-1} conforme a equação 6. Partindo da equação 8, e fazendo-se uso de $\alpha = 19$ ° s^{-1}, teremos $M_1 = 25$ e $M_2 = 19$ amostras por raio. Em elevações posteriores, pode-se fazer novamente o uso de FRPs constantes ao limitar o alcance máximo a 100000 m (Fig. 3) tal que $T = 1,33\times10^{-3}$ s ($FRP = 750$ Hz), garantindo $M = 30$ amostras com $\alpha = 24$ ° s^{-1}.

3. Configuração proposta

Visando a padronização das estratégias de varredura de modo a buscar a melhor observação de fenômenos severos que ocorrem em curto espaço de tempo (p.ex., microexplosões, tornados e granizo), é proposta a alteração da estratégia de

varredura volumétrica do radar de Quixeramobim para a estratégia enviada ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA; Fig. 5a) pelo meteorologista Thiago Biscaro, já que este radar também conta com uma largura do feixe de 3 dB de 2° (Tabela 1). Nesta estratégia, as duas primeiras elevações utilizarão um esquema de Frequência de Repetição de Pulsos (FRPs) duplas (Jorgensen et al., 2000) de modo a manter um intervalo de Nyquist superior a 30 m s^{-1} , ao custo de reduzir o alcance máximo do radar para 250 km. Elevações posteriores podem usar FRPs fixas com alcance reduzido, mas, levando em conta que convecção profunda não excede alturas superiores a 18 km se considerarmos que o caminho percorrido pelo feixe segue o modelo de 4/3 do raio da terra em condições atmosféricas normais (DOVIAK; ZRNIĆ, 1993; RAUBER; NESBITT, 2018). Outra mudança recomendada é a alteração da resolução radial de 1500 m para 500 m. Além disso, de modo a manter a realização de um escaneamento de alcance máximo de 400 km, sugere-se uma varredura de vigilância utilizando a elevação mais baixa (Fig. 5b). Já o radar de Fortaleza possui uma largura do feixe de 3 dB de 0,95°, e, portanto, apresenta maior resolução espacial, enquanto sua estratégia já faz uso de FRPs duplas em todas as elevações para extensão da velocidade de Nyquist (Tabela 1). Neste caso, recomenda-se a adaptação de um esquema de varreduras baseado no VCP 212 do WSR-88Ds, estratégia que já vem sendo implementada em outros radares brasileiros conforme a Figura 5 podendo-se manter o alcance máximo de 120 km. Neste caso, é aceitável manter as FRPs duplas apenas nas dez primeiras elevações e fazer-se uso de fixas nas posteriores ao custo de reduzir o alcance máximo, tendo-se em mente novamente que convecção profunda raramente excedem tais alturas mesmo em regiões tropicais. Por último, também é recomendado que a resolução radial deste radar passe a ser de 250 m levando em conta a maior resolução do feixe.

Figura 5 – Sugestão de estratégia de escaneamento volumétrico (a) e de vigilância (b) do radar de Quixeramobim. Cores indicam as elevações utilizadas com o centro do feixe de 3 dB indicado pela linha escura, enquanto regiões coloridas indicam toda a área amostrada pelo feixe.

Figura 6 – Sugestão de estratégia de escaneamento volumétrico do radar de Fortaleza. Cores indicam as elevações utilizadas com o centro do feixe de 3 dB indicado pela linha escura, enquanto regiões coloridas indicam toda a área amostrada pelo feixe.

As tabelas 2 e 4 sumarizam a estratégia de varredura e a configuração proposta para realização de varreduras volumétricas nos radares de Quixeramobim e Fortaleza, respectivamente. Nesta configuração, as duas primeiras elevações de Quixeramobim empregam FRPs duplas, enquanto PRPs fixas são implementadas nas elevações posteriores, buscando um balanço entre alcance máximo e velocidade máxima não-ambígua. Já a Tabela 3 apresenta a configuração proposta para a varredura de vigilância a ser realizada de forma intercalada com a varredura volumétrica, apenas para o radar de Quixeramobim. O tempo aproximado para a geração de um volume e uma varredura de escaneamento, levando em conta fatores mecânicos e de processamento, será de 4 minutos e 30 segundos, garantindo o aumento da resolução temporal do equipamento sem comprometimento da qualidade das variáveis. Já a Tabela 4 sumariza a configuração proposta para o radar de Fortaleza ressaltando que, por este se encontrar no raio de alcance de Quixeramobim, não há a necessidade de realização de uma varredura de vigilância, e, neste caso, o período total seria de 4 minutos e 40 segundos.

Tabela 2 – Configuração da estratégia de varredura sugerida. As elevações são separadas de acordo com o esquema de PRPs empregado. α indica a taxa de revolução do radar, T_1 e T_2 são os Períodos de Repetição de Pulso (PRP) curto e longo, sendo T_1 a PRP fixa em elevações mais altas. M_1 e M_2 é o número de amostras para os raios que emprega as FRPs alta e baixa, respectivamente. R_a é o alcance máximo não-ambíguo em m enquanto l a resolução radial . O tempo em segundos necessário para completar um escaneamento de 360 ° é indicado na última coluna.

Elevações (°)	α **(°s^{-1})**	T_1 **(μs) /** FRP_1 **(s^{-1})**	T_2 **(μs) /** FRP_2 **(s^{-1})**	M_1	M_2	R_a **(m)**	l (m)	**Tempo por elevação (s)**
1, 3	10	1,67/600	2,5/600	30	20	250000	500	36
5, 7, 9, 11, 14, 17, 20	20	1/1000	1,33/750	43	-	175000	500	18

Tabela 3 – Como a Tabela 2 mas para a varredura no modo de vigilância.

Elevações (°)	α **(°s^{-1})**	T_1 **(μs) /** FRP_1 **(s^{-1})**	T_2 **(μs) /** FRP_2 **(s^{-1})**	M_1	M_2	R_a **(m)**	l (m)	**Tempo por elevação (s)**
1	24	1,33/375	-	16	-	400000	500	15

Tabela 4 – Como a Tabela 2 mas para a varredura volumétrica do radar de Fortaleza.

Elevações (°)	α **(°s^{-1})**	T_1 **(μs) /** FRP_1 **(s^{-1})**	T_2 **(μs) /** FRP_2 **(s^{-1})**	M_1	M_2	R_a **(m)**	l (m)	**Tempo por elevação (s)**
0.5, 0.9, 1.3, 1.8, 2.4, 3.1, 4.0, 5.1, 6.4, 8.0	19	1,00/1000	1,33/750	25	19	120000	500	19
10, 12.5, 15.6, 19.5	24	1,33/750	-	30	-	100000	500	15

4. Referências

ALFORD, A. A. et al. A Method for Correcting Staggered Pulse Repetition Time (PRT) and Dual Pulse Repetition Frequency (PRF) Processor Errors in Research Radar Datasets. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 39, n. 11, p. 1763–1780, 1 nov. 2022.

ALTUBE, P. et al. Correction of dual-PRF Doppler Velocity Outliers in the Presence of Aliasing. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, n. 7, p. 1529–1543, 2017.

DOVIAK, R. J.; ZRNIĆ, D. S. **Doppler Radar and Weather Observations**. 2. ed. San Diego, California: Academic Press, 1993.

HENGSTEBECK, T. et al. Radar network-based detection of mesocyclones at the German Weather Service. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 35, n. 2, p. 299–321, 1 fev. 2018.

HOLLEMAN, I.; BEEKHUIS, H. Analysis and Correction of Dual PRF Velocity Data. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 20, n. 4, p. 443–453, 2003.

JOE, P.; MAY, P. T. Correction of Dual PRF Velocity Errors for Operational Doppler Weather Radars. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 20, n. 4, p. 429–442, 2003.

JORGENSEN, D. P.; SHEPHERD, T. R.; GOLDSTEIN, A. S. A Dual-Pulse Repetition Frequency Scheme for Mitigating Velocity Ambiguities of the NOAA P-3 Airborne Doppler Radar. **Cover Journal of Atmospheric and Oceanic Technology Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 17, n. 5, p. 585–594, 2000.

RAUBER, R. M.; NESBITT, S. W. **Radar meteorology: A first course**. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2018.