




DESENVOLVIMENTO DE FUNÇÕES PARA AUTOMAÇÃO DOS PROCESSOS DE PREVISÕES METEOROLÓGICAS DE CURTO PRAZO UTILIZANDO DADOS DO GEFS

*Development of functions for automating short-term weather
forecasting processes using GEFS data*

*Desarrollo de funciones para la automatización de los
procesos de pronósticos meteorológicos a corto plazo
utilizando datos del GEFS*

Bruno Coelho Bulcão 


Universidade Federal de Pelotas
brunobulcao1994@gmail.com

Douglas da Silva Lindemann 

Universidade Federal de Pelotas
douglas.lindemann@ufpel.edu.br

Raquel Machado Machado 

Universidade Federal de Pelotas
machadomraquel@gmail.com

Luciana Barros Pinto 

Universidade Federal de Pelotas
luciana.pinto@ufpel.edu.br

Resumo: Este estudo explora o papel da automação na melhoria das previsões meteorológicas de curto prazo, com ênfase no uso do modelo *Global Ensemble Forecast System* (GEFS), reconhecendo a importância das previsões do tempo para diversos setores da sociedade. A automação é investigada como um meio para aumentar a precisão e eficiência na análise e processamento de dados meteorológicos. Isso inclui a geração de gráficos para variáveis essenciais (temperatura, umidade, vento e precipitação) e a capacidade de enviar essas informações por e-mail de forma automática. Como exemplo prático, foram selecionadas 6 cidades do Rio Grande do Sul, onde o Centro de Pesquisas e Previsões Meteorológicas (CPPMET) realiza previsões rotineiramente. A implementação dessas inovações demonstrou potencial para auxiliar o CPPMET na otimização de tempo nas tarefas diárias,

evidenciando a eficácia da automação em melhorar o processo de previsão meteorológica.

Palavras-chave: Processamento de dados. Análise de dados. Modelos. Previsão do tempo.

Abstract: This study explores the role of automation in improving short-term weather forecasts, with an emphasis on the use of the Global Ensemble Forecast System (GEFS), recognizing the importance of weather forecasts for various sectors of society. Automation is investigated as a means to increase accuracy and efficiency of meteorological data analysis and processing. This includes the generation of graphs for essential variables (temperature, humidity, wind, and precipitation) and the ability to automatically send this information via email. As a practical example, 6 cities from Rio Grande do Sul were selected, where the Center for Meteorological Research and Forecasts (CPPMET) routinely performs forecasts. The implementation of these innovations showed potential to assist CPPMET in optimizing time in daily tasks, highlighting the effectiveness of automation in improving the weather forecasting process.

Keywords: Data processing. Data analysis. Models. Weather forecasting.

Resumen: Este estudio explora el papel de la automatización en la mejora de las predicciones meteorológicas a corto plazo, con énfasis en el uso del modelo *Global Ensemble Forecast System* (GEFS), reconociendo la importancia de las predicciones del tiempo para diversos sectores de la sociedad. Se investiga la automatización como medio para aumentar la precisión y la eficiencia en el análisis y procesamiento de datos meteorológicos. Esto incluye la generación de gráficos para variables esenciales (temperatura, humedad, viento y precipitación) y la capacidad de enviar automáticamente esta información por correo electrónico. Como ejemplo práctico, se seleccionaron 6 ciudades de Rio Grande do Sul, en Brasil, donde el *Centro de Pesquisas e Previsões Meteorológicas* (CPPMET) realiza predicciones de manera rutinaria. La implementación de estas innovaciones demostró potencial para ayudar al CPPMET a optimizar el tiempo en las tareas diarias, evidenciando la eficacia de la automatización para mejorar el proceso de predicción meteorológica.

Palabras clave: Procesamiento de datos. Análisis de datos. Modelos. Predicción del tiempo.

Submetido em: 10/09/2024

Aceito para publicação em: 14/04/2025

Publicado em: 23/04/2025

1. INTRODUÇÃO

Modelos de previsão numérica do tempo são baseados em equações matemáticas representativas das leis físicas, que governam a circulação da atmosfera e suas interações entre os sistemas oceano-solo-planta-atmosfera e são ferramentas importantes para a previsão do tempo de curto prazo (1 a 7 dias) (SAUR, 2015; ZHANG; ROUTRAY, 2016). Esses modelos consistem em diferentes graus de acurácia e especificidades para diferentes regiões geográficas (DU; DENG, 2022; YANG et al., 2022), e suas capacidades foram aprimoradas por meio do tratamento mais realista das interações entre os componentes do sistema climático, além de melhor representação dos processos físicos e aumento das capacidades computacionais de supercomputadores mundiais (AGGARWAL; KUMAR, 2013).

A habilidade de prever eventos meteorológicos tem implicações profundas, não apenas por questões econômicas, mas também sociais. Tradicionalmente, a previsão do tempo é elaborada a partir da coleta de dados por diferentes fontes de dados meteorológicos, que posteriormente são processados por programas computacionais e servem de base para os modelos de previsão (LYNCH, 2008). Com o processamento desses dados, obtém-se importantes informações sobre diversas variáveis, como temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação, vento e etc (SIMMONS; HOLLINGSWORTH, 2002b; WALLER et al., 2021).

A previsão do tempo de curto prazo é uma ferramenta que desempenha papel crucial na segurança pública, gestão de emergências, agricultura, transporte, energia, planejamento de eventos e saúde pública (HUNT, 2013). Ao fornecer informações sobre as condições meteorológicas iminentes, indivíduos, empresas e autoridades são capazes de tomar diferentes decisões. Dessa forma, desde a prevenção de desastres naturais até o planejamento de operações cotidianas, a previsão do tempo de curto prazo é fundamental para garantir segurança, eficiência e adaptação diante das variabilidades climáticas, refletindo seu impacto em todas as esferas da sociedade moderna (VAUGHAN; DESSAI, 2014).

O Brasil é um país de vasta diversidade climática, abrigando ecossistemas e condições climáticas únicas, sendo assim, o uso de modelos de previsão do tempo de curto prazo se torna uma ferramenta essencial no território brasileiro, e um dos diversos modelos disponíveis é o *Global Ensemble Forecast System* (GEFS) (MEDINA et al., 2019).

O GEFS é um modelo que fornece uma abordagem de previsão do tempo em escala global. Desenvolvido e mantido pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), o GEFS utiliza um conjunto de modelos numéricos de previsão, alimentando-se de dados atmosféricos, oceânicos e terrestres para produzir as previsões. Seu complexo conjunto de dados e previsões apresenta desafios significativos, tanto na extração quanto na análise das informações. Esse cenário evidencia a necessidade de ferramentas que não apenas simplifiquem esse processo, mas o tornem mais acessível a profissionais e entusiastas de diversas áreas científicas que buscam maiores informações meteorológicas. O GEFS é particularmente enfatizado devido à sua capacidade de fornecer previsões por conjunto, que são essenciais para capturar a incerteza nas previsões meteorológicas (MEDINA et al., 2019; ZHOU et al., 2022; ZHU et al., 2022).

O processamento e análise dos dados climáticos desempenham um papel fundamental na pesquisa meteorológica. Antes mesmo da assimilação dos dados, é imprescindível aplicar filtros que identificam falhas e inconsistências, incluindo valores fisicamente improváveis, como precipitação com valores negativos. É importante abordar essas questões por meio da utilização de métodos que potencializam e enriquecem o gerenciamento dos dados (ZHU et al., 2022).

Essa é a primeira etapa na transformação de informações brutas em conhecimento técnico. A heterogeneidade desses dados, provenientes de diversas fontes, demanda técnicas avançadas para a limpeza, padronização e integração, assegurando a consistência e qualidade necessárias para análises subsequentes. A eficiência desse processo não apenas influencia diretamente a precisão das previsões, mas também impacta a confiabilidade de aplicações práticas, como agricultura, gestão de recursos hídricos e alertas de desastres naturais (VAUGHAN; DESSAI, 2014; HARRISON et al., 2022; ZHOU et al., 2022).

Os dados são inseridos em modelos matemáticos complexos conhecidos como PNT (Previsão Numérica de Tempo). Esses modelos simulam o comportamento da atmosfera ao longo do tempo, discretizando a atmosfera em grade tridimensional e aplicando equações físicas para descrever as interações entre diferentes variáveis com equações prognósticas e diagnósticas, com técnicas de assimilação de dados, que ajustam às condições iniciais do modelo para refletir com mais acurácia o estado real da atmosfera (ZHOU et al., 2017; ZHOU et al., 2022).

Técnicas de aprendizado de máquina e inteligência artificial estão sendo cada vez mais utilizadas na análise de dados meteorológicos. Essas abordagens podem ajudar a identificar padrões complexos, melhorar as previsões e fornecer percepções mais rápidas sobre mudanças nas condições meteorológicas. A qualidade das previsões do tempo depende da acurácia dos modelos, da qualidade dos dados de entrada e da capacidade de processamento em tempo real. O avanço contínuo na tecnologia e nas técnicas analíticas contribui para melhorias constantes nas previsões meteorológicas (HASAN et al., 2016; TAMAMADIN et al., 2020; HILL et al., 2023; NNENNA et al., 2023).

A automação desempenha um papel crucial na melhoria da eficiência em processos que envolvem análise e processamento de uma quantidade grande de dados (TAMAMADIN et al., 2020; NNENNA et al., 2023). Isso é especialmente evidente quando a automação é baseada em modelos avançados de previsão do tempo, como o GEFS. Processos como visualizações gráficas mais rápidas e simples das variáveis meteorológicas desempenham um papel importante na compreensão e comunicação eficaz das condições atmosféricas. A simplicidade e rapidez dessas representações visuais são essenciais para garantir que informações sejam acessíveis e compreensíveis para uma ampla gama de usuários, desde o público em geral até profissionais da área (CRISTANI et al., 2019).

Essa abordagem permite o carregamento, transformação, armazenamento, processamento e análise de dados por meio de tecnologias que dispensam intervenção manual. Automatizando tarefas repetitivas e demoradas, essa técnica maximiza o uso dos dados e proporciona decisões mais rápidas e eficazes (CRISTANI et al., 2019; TAMAMADIN et al., 2020).

Desta forma, o objetivo geral deste trabalho foi desenvolver funcionalidades destacando o papel crucial da automação em ambiente R para a previsão do tempo de curto prazo. Buscou-se, com o desenvolvimento de funções, transformar a maneira que pesquisadores ou prestadores de serviço que necessitam das previsões diárias possam analisar os dados de forma simples e rápida; apresentar as informações da previsão do tempo para sua localidade de forma gráfica e de arquivo de dados; automatizar parte das tarefas desde a obtenção dos dados do modelo GEFS, até a geração de gráficos para variáveis críticas como temperatura, umidade, velocidade e direção do vento e precipitação; além de efetuar a funcionalidade de envio desses arquivos via e-mail de forma automática.

2. METODOLOGIA

2.1. Dados de variáveis meteorológicas

Os dados das variáveis meteorológicas foram obtidos do modelo de previsão global GEFS, desenvolvido pela NOAA. Por exemplo, no diretório 'gefs.20240108' se encontram os dados do dia 08/01/2024, com ciclos das 00, 06, 12 e 18 UTC. Para este estudo, utilizou-se as simulações referentes às 12 UTC, por ser o horário com a maior quantidade de observações e obtenção de dados meteorológicos no Brasil. Os dados utilizados neste estudo provêm do campo 'atmos', referentes às informações da atmosfera do planeta. A grade inicial foi estabelecida com resolução de 0.5° de latitude e longitude.

No diretório que abriga os arquivos de previsão, há arquivos contendo dados que são atualizados a cada três horas. Estes dados representam uma série de projeções e fornecem informações críticas sobre 72 variáveis em uma escala global. A magnitude desses dados é evidente não só na frequência de atualização, mas no volume, com cada arquivo alcançando 13 MB. Esta dimensão apresenta um desafio significativo para os meteorologistas e cientistas de dados, visto que a manipulação e operacionalização rotineira dessas informações exigem recursos computacionais substanciais e um tempo considerável para processamento.

2.2. Estrutura de funções no R

As funções na linguagem de programação R não apenas facilitam a reutilização de código, mas também permitem a criação de rotinas mais claras e modulares, que podem vir a otimizar tarefas de maneira significativa. Ao automatizar processos com o uso de funções, aumenta-se a produtividade, minimiza-se erros e facilita-se a manutenção do código. Essa abordagem é de importância crítica em ambientes de análise de dados e estatísticas, onde a capacidade de criar e empregar funções personalizadas é fundamental no desenvolvimento de soluções robustas. No contexto dos centros operacionais de previsão do tempo, apesar da existência de rotinas dinâmicas, diariamente se faz necessária a intervenção humana para a realização de processos como o *download* e a geração de arquivos e figuras.

É nessa conjuntura que o processo de automação se torna indispensável. Ao implementar a automação, elimina-se a necessidade dessa interferência manual recorrente,

permitindo que o sistema funcione de maneira contínua e eficiente. De forma geral, o desenvolvimento das funções de automação criadas neste trabalho percorre uma série de etapas que fornecem uma estrutura que apoia a operacionalização constante e confiável dos procedimentos de previsão do tempo.

2.3. Bibliotecas

A biblioteca ‘curl’ (*Client for URLs*) é reconhecida por sua versatilidade na realização de transferências de dados. Suporta uma ampla gama de protocolos (R FOUNDATION, 2024), a tornando uma escolha ideal para a automação de extração dos dados de previsão do modelo GEFS. O pacote ‘sp’ fornece classes e métodos para lidar com dados espaciais no R. As estruturas de dados permitem implementações em dimensões superiores como pontos e grades (PEBESMA et al., 2024), o que é o objetivo deste estudo.

O suporte à leitura e gravação de diversos formatos de dados geoespaciais é fornecido pela biblioteca ‘rgdal’, que permite manipular conjuntos de dados geoespaciais, realizar transformações de projeção e extrair informações sobre coordenadas geográficas (BIVAND, 2023). A biblioteca ‘raster’ fornece uma série de funções e métodos para manipulação de dados raster, utilizados para representar fenômenos espaciais que variam continuamente sobre uma área geográfica, como imagens de satélite (HIJMANS et al., 2023).

A eficiência das operações de manipulação de dados é realizada pelo pacote ‘dplyr’. Ele foi projetado para funcionar de forma eficaz com dataframes (CURSO-R, 2024a). A ‘openxlsx’ é uma biblioteca que fornece funções simples e intuitivas para manuseio de planilhas (SCHAUBERGER et al., 2023).

A ‘ggplot2’ é uma biblioteca de visualização de dados que permite criar gráficos complexos com uma sintaxe simples. Baseia-se no conceito de gramática dos gráficos, com funções para criar e adicionar camadas a um gráfico (CURSO-R, 2024b). Por fim, a biblioteca ‘mailR’ fornece funcionalidades para enviar e-mails diretamente do R, sendo útil para automação de tarefas (PREMRAJ, 2022).

2.4. Aplicações das funções

Após a apresentação das bibliotecas e pacotes fundamentais para a manipulação e análise de dados no ambiente R, é crucial elucidar a aplicabilidade prática dessa infraestrutura. A combinação dessas ferramentas foi empregada para automatizar o processo de aquisição, processamento e análise de dados provenientes do GEFS, com o objetivo de extrair previsões precisas e relevantes para locais específicos.

Especificamente, foram selecionados pontos geoespaciais correspondentes às cidades monitoradas pelo Centro de Pesquisas e Previsões Meteorológicas (CPPMET), visando a geração de previsões detalhadas para um horizonte de 5 dias. As variáveis de interesse incluem precipitação, vento, umidade e temperatura do ar, fundamentais para compreender as condições meteorológicas previstas. Na Tabela 1, tem-se a lista das cidades deste estudo.

Tabela 1 - Cidades utilizadas neste estudo e suas respectivas coordenadas geográficas.

Cidade	Latitude (°) e Longitude (°)
Pelotas	-31.77, -52.35
Porto Alegre	-30.03, -51.23
Santa Vitória do Palmar	-33.51, -53.37
Rio Grande	-32.03, -52.10
Santa Maria	-29.68, -53.81
Bagé	-31.33, -54.11

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Através do uso de ‘curl’ para a aquisição de dados, ‘rgdal’ e ‘raster’ para o tratamento de informações geoespaciais e ‘dplyr’ e ‘openxlsx’ para a manipulação e organização dos dados em formatos tabulares, o processo é otimizado para a análise de dados. A visualização dos dados é aprimorada pelo ‘ggplot2’ e a biblioteca ‘mailR’ foi utilizada para automatizar o envio diário de relatórios contendo gráficos e planilhas com as informações processadas para os meteorologistas do CPPMET.

Este conjunto de operações otimiza a rotina dos profissionais envolvidos e eleva a qualidade e a relevância das previsões meteorológicas fornecidas pelo CPPMET. A integração

dessas ferramentas em um fluxo de trabalho coeso exemplifica como a computação pode aprimorar a análise de dados em meteorologia, resultando em previsões mais confiáveis e, por conseguinte, em um serviço de previsão do tempo mais eficiente e acessível.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Função Download.R

A função denominada 'Download.R' é responsável pela coleta automatizada dos dados meteorológicos do modelo GEFS. O propósito central é simplificar e agilizar o processo de *download* das informações específicas para uma data de simulação do modelo.

A primeira etapa foi a construção de uma URL base utilizando os parâmetros de data e hora (Figura 1, Item 1). Essa URL serve como ponto de acesso aos dados desejados no servidor da NOAA. Em seguida, a função gera uma lista de arquivos específicos a serem baixados. É utilizada a biblioteca 'curl' para efetuar o *download* de cada arquivo listado na URL construída previamente (Figura 1, Itens 2 e 3). Para garantir uma execução robusta e resiliente, a função incorpora um bloco *tryCatch* para lidar com eventuais erros durante o processo de *download*. Na existência de algum erro, a função exibe uma mensagem detalhada, permitindo a identificação rápida de potenciais problemas.

Figura 1 - Etapas de construção e funcionamento da função 'Download.R'



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

No estágio de armazenamento, a função apresenta uma gestão dos arquivos recentemente adquiridos no formato GRIB. Após a conclusão do processo de *download* ou tratamento de erros, os dados meteorológicos específicos do modelo GEFS são armazenados em um local designado no computador do usuário (Figura 1, Item 4). Este processo não apenas garante a preservação segura dos dados, mas possibilita um acesso simplificado para futuras análises e referências.

A funcionalidade geral desta implementação foi fornecer uma ferramenta eficiente e automatizada para pesquisadores e profissionais que necessitam de dados meteorológicos específicos do modelo GEFS de forma rotineira. A automação oferecida por esta função não apenas economiza tempo, mas também contribui para a confiabilidade dos dados obtidos.

3.2. Função Previsão.R

A função 'Previsão.R' foi construída com o objetivo de extrair as previsões feitas pelo GEFS para uma localização geográfica específica, definida por suas coordenadas de latitude e longitude (Figura 2, Item 1). Essa função é definida com esses dois parâmetros, que permitem especificar a localização para a qual se deseja a previsão de até 5 dias.

O próximo passo envolveu o carregamento de dados meteorológicos a partir de arquivos GRIB, obtidos através da função 'Download.R'. Utilizando as coordenadas fornecidas, a função gera 'SpatialPoints' para cada conjunto de dados carregados. Esse processo é crucial para mapear a localização geográfica de interesse nos dados rasterizados (Figura 2, Item 2). Ao empregar a função 'extract', realiza-se a extração de informações fundamentais como temperatura, umidade, precipitação e componentes do vento (u e v), além de outras possíveis variáveis de interesse (Figura 2, Item 3).

A implementação dessa função inclui a leitura de dados meteorológicos em formato de grade para cada período de 6 horas ao longo de cinco dias. Esses dados são organizados em estruturas denominadas 'tijolos' (brick), onde cada tijolo representa um intervalo de tempo específico (Figura 2, Item 4).

Um exemplo da praticidade desta função é a aplicação da equação para o cálculo da velocidade do vento. A implementação desta equação na função 'Previsão.R' é essencial para garantir uma avaliação precisa da intensidade do vento. Isso permite uma representação tanto visual quanto numérica confiável nos resultados gerados, fornecendo *insights* valiosos para a análise meteorológica. Além disso, a função é projetada para calcular a direção do vento a partir dos componentes u e v, realizando cálculos trigonométricos e traduzindo os resultados em direções cardinais, proporcionando uma compreensão mais intuitiva das condições do vento.

Todos os dados extraídos e calculados são organizados em um 'data.frame'. Esta tabela contém informações detalhadas de data, hora, temperatura do ar a 2 metros da superfície, umidade relativa do ar, precipitação acumulada em 6 horas, velocidade e direção do vento para cada intervalo de tempo (Figura 3). A função utiliza a biblioteca 'openxlsx' para criar uma tabela, contendo a previsão meteorológica. São aplicados estilos específicos para melhorar a visualização, e o arquivo resultante é salvo (Figura 2, Item 5).

A Figura 3 ilustra o cabeçalho do arquivo, evidenciando o resultado do processamento efetuado pela função 'Previsão.R'. Ao encapsular esta lógica dentro de uma função específica, o código ganha uma notável reutilização e flexibilidade. Isso permite que os usuários utilizem a função 'Previsão.R' com diferentes conjuntos de coordenadas, facilitando a obtenção de previsões meteorológicas para uma variedade de localidades. Esta abordagem não apenas

simplifica o processo de geração de previsões, mas também amplia significativamente o seu alcance e aplicabilidade.

Figura 2 - Etapas de construção e funcionamento da função ‘Previsão.R’.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Figura 3 - Cabeçalho do arquivo .xlsx após o processamento da função ‘Previsão.R’.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Data	Hora	Temperatura(°C)	Umidade(%)	Precipitação(mm)	Velocidade do Vento(km/h)	Direção do Vento	Sigla e sentido do Vento
2	14-01-2024	03:00	23,25	95,5	2,7	3,24	Norte	N ↓
3	14-01-2024	09:00	25,04	90,4	5,3	6,84	Norte	N ↓
4	14-01-2024	15:00	29,18	70,4	5,8	7,92	Norte	N ↓
5	14-01-2024	21:00	24,81	84,3	0,7	3,96	Norte	N ↓
6	15-01-2024	03:00	23,1	92,1	1,4	4,32	Norte	N ↓
7	15-01-2024	09:00	25,53	83,8	1,6	6,48	Nordeste	NE ↘
8	15-01-2024	15:00	33,2	50,7	0,7	9	Nordeste	NE ↘
9	15-01-2024	21:00	26,09	75,5	0,6	3,96	Norte	N ↓
10	16-01-2024	03:00	23,57	89,6	1,6	3,96	Nordeste	NE ↘
11	16-01-2024	09:00	26,19	79,8	0,4	7,2	Nordeste	NE ↘
12	16-01-2024	15:00	34,13	44,9	0,5	9,72	Nordeste	NE ↘
13	16-01-2024	21:00	26,91	66,9	0,1	4,32	Norte	N ↓

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A construção da função ‘Previsão.R’ é uma demonstração da aplicação prática e robusta da análise de dados espaciais e meteorológicos utilizando o R, proporcionando uma ferramenta útil para a realização de previsões meteorológicas personalizadas baseadas em dados de alta precisão. A habilidade em combinar manipulação de dados espaciais, análise de

‘raster’ e geração de relatórios em planilhas torna esta função um bom exemplo de como o R pode ser empregado para resolver problemas complexos de dados de maneira eficiente e acessível.

3.3. Função Gráfico.R

A função ‘Gráfico.R’ representa um avanço significativo na direção da visualização de dados meteorológicos. O propósito central desta função é oferecer uma representação gráfica clara e detalhada das variáveis meteorológicas contidas no arquivo em forma de planilha, gerado pela função ‘Previsão.R’. Este esforço de visualização não apenas complementa a análise numérica e textual, mas também proporciona um entendimento mais intuitivo e imediato das condições e padrões meteorológicos.

O início da função ‘Gráfico.R’ se dá com a leitura dos dados (Figura 4, Item 1), utilizando a função ‘read.xlsx’ do pacote ‘openxlsx’. Este passo é crucial, pois os dados contidos na planilha são a base sobre o qual os gráficos serão construídos. Uma vez lidos, os dados são transformados para incluir uma nova coluna chamada ‘DateTime’, que é uma combinação das datas e horas dos registros (Figura 4, Item 2). Esta coluna permite uma representação temporal mais precisa dos dados no momento da plotagem dos gráficos.

Para aprimorar a visualização nos gráficos, duas funções foram projetadas para formatar as etiquetas do eixo x de uma maneira que destaque as informações mais relevantes, como datas e horas específicas. Isso é particularmente importante em gráficos temporais, onde a clareza na representação de quando os eventos ocorrem é essencial para uma interpretação mais eficiente dos dados (Figura 4, Item 3).

Figura 4 - Etapas de construção e funcionamento da função ‘Gráfico.R’



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Além dos elementos visuais específicos de cada gráfico, a função detalha a formatação e o estilo (Figura 4, Item 4). A tipografia, a escolha das cores, o posicionamento dos elementos de texto e a escala dos eixos também são considerados buscando melhor interpretação e apreciação do usuário final.

A última etapa da função é o salvamento dos gráficos gerados (Figura 4, Item 5). Cada gráfico é salvo como um arquivo JPEG de alta resolução, garantindo que os detalhes sejam preservados e os gráficos permaneçam claros e legíveis em diferentes dispositivos e plataformas.

A função ‘Gráficos.R’ é uma demonstração de como a programação em R pode ser utilizada para transformar dados brutos em visualizações atrativas. A função aborda todas as etapas essenciais do processo de visualização de dados: desde a preparação e manipulação dos dados até a estilização e apresentação final dos gráficos.

3.4. Função Envio.R

Na sequência, foi realizada a implementação da função automatizada de envio de e-mails, utilizando a biblioteca 'mailR' para a disseminação de informações meteorológicas. A função, denominada 'Envio.R', foi criada para facilitar a comunicação de previsões do tempo. Inicialmente, é estabelecido as credenciais do remetente e do servidor *Simple Mail Transfer Protocol* (SMTP) (Figura 5, Item 1), incluindo o endereço do remetente, o servidor SMTP e a porta específica para SSL, garantindo uma conexão segura (Figura 5, Item 2). A autenticação é realizada através de um nome de usuário, que é o próprio endereço de e-mail do remetente, e uma senha gerada especificamente para esse fim (Figura 5, Item 3).

A função 'Envio.R' é parametrizada para receber um endereço de e-mail destinatário como argumento, o qual define o receptor da comunicação. O conteúdo do e-mail é composto pelo assunto, indicando o foco nas previsões, e um corpo de texto detalhado, que inclui informações sobre a previsão e anexos relevantes (Figura 5, Item 4). Estes anexos consistem em uma planilha de texto e imagens ilustrativas, abrangendo dados de temperatura, umidade relativa, precipitação e vento (Figura 5, Item 5).

A execução do comando 'send.mail', pertencente a biblioteca 'mailR', efetiva o processo de envio utilizando as configurações SMTP previamente definidas e incorporando os arquivos anexados (Figura 5, Item 6). A robustez desta abordagem reside na sua capacidade de automatizar a distribuição de informações atualizadas, ao mesmo tempo que mantém a flexibilidade para se adaptar a diferentes destinatários.

A função 'Envio.R' demonstra como a automação de processos por meio de linguagens de programação pode otimizar a disseminação de informações. A integração de recursos como envio automatizado de e-mails e anexos relevantes amplifica o impacto da comunicação e a eficiência operacional no campo da meteorologia.

Figura 5 - Etapas de construção e funcionamento da função 'Envio.R'



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A implementação desta função ressalta a importância da segurança cibernética e do gerenciamento de dados sensíveis, uma consideração crucial na era digital. A utilização de um servidor SMTP seguro e a implementação de práticas de autenticação robustas são elementos fundamentais que garantem a confidencialidade e a integridade das informações transmitidas.

3.5. Função Automação.R

Na etapa final foi abordado a construção e o funcionamento de um sistema de automação, destinado à aquisição, processamento e disseminação de previsões meteorológicas. O sistema é fundamentado em um conjunto de funções interconectadas, cada uma desempenhando um papel crítico no fluxo de trabalho geral (Figura 6, Item 1). Inicialmente, *scripts* externos especializados são carregados usando a função 'source', fornecendo as fundações necessárias para operações subsequentes, incluindo o *download* de dados, geração de previsões, elaboração de gráficos e envio de e-mails (Figura 6, Item 2).

A função 'Download.R' inicia o processo, baixando dados meteorológicos do GEFS com base na data atual (Figura 6, Item 3). Em seguida, a função 'Previsão.R' é empregada para extrair previsões específicas de latitude e longitude (Figura 6, Item 4). Posteriormente, a função 'Gráfico.R' faz a geração gráfica das informações (Figura 6, Item 5). A função 'Envio.R' se encarrega de enviar essas informações via e-mail para um destinatário especificado (Figura 6, Item 6).

A automação diária e a programação temporal são geridas pela função 'Automação.R'. Esta função opera continuamente, verificando o horário atual e assegurando que a operação de envio de previsões seja realizada apenas uma vez por dia no horário programado. O registro do 'timestamp' após cada execução e a redefinição das condições de execução diária exemplificam uma abordagem metódica e eficiente para a automação de tarefas.

Figura 6 - Etapa que apresenta a construção e funcionamento da função 'Automação.R'.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Através da integração de várias funções especializadas, este sistema não apenas automatiza um processo que tradicionalmente exigiria intervenção manual significativa, mas também assegura a entrega consistente e pontual de dados precisos.

Este trabalho sublinha a importância da programação em ciências atmosféricas e meteorológicas, demonstrando como ferramentas computacionais podem ser empregadas para melhorar a comunicação e o acesso a dados ambientais. Ao automatizar a coleta, análise e distribuição de previsões meteorológicas, o sistema contribui para a tomada de decisões e para a conscientização pública em questões relacionadas ao tempo.

3.4. Exemplos práticos de uso das funções

O presente conjunto de funções foi desenvolvido para automatizar a aquisição, processamento e visualização de dados meteorológicos, permitindo baixar dados do GEFS, gerar informações das previsões meteorológicas detalhadas e gráficos informativos, além de enviar essas informações por e-mail. Um exemplo prático foi aplicado para o CPPMET, onde foram definidas seis cidades do Rio Grande do Sul, conforme indicado na Tabela 1.

A função 'Download.R' é uma ferramenta essencial projetada para ser tanto eficiente quanto de fácil utilização, permitindo baixar dados meteorológicos atualizados do GEFS. Para utilizá-la, é necessário fornecer dois parâmetros: a data e hora específicas desejadas para a previsão. A data deve estar no formato 'AAAAMMDD' (ano (AAAA), mês (MM), dia (DD)), enquanto a hora deve ser fornecida no formato de 24 horas. Por exemplo, ao executar 'Download.R' ("20240115", "12"), a função acessa o repositório de dados do GEFS e baixará as informações de previsão correspondentes ao meio-dia do dia 15 de janeiro de 2024. Uma vez executado, a função baixa os dados de previsão do modelo e armazena na mesma pasta onde as funções estão armazenadas.

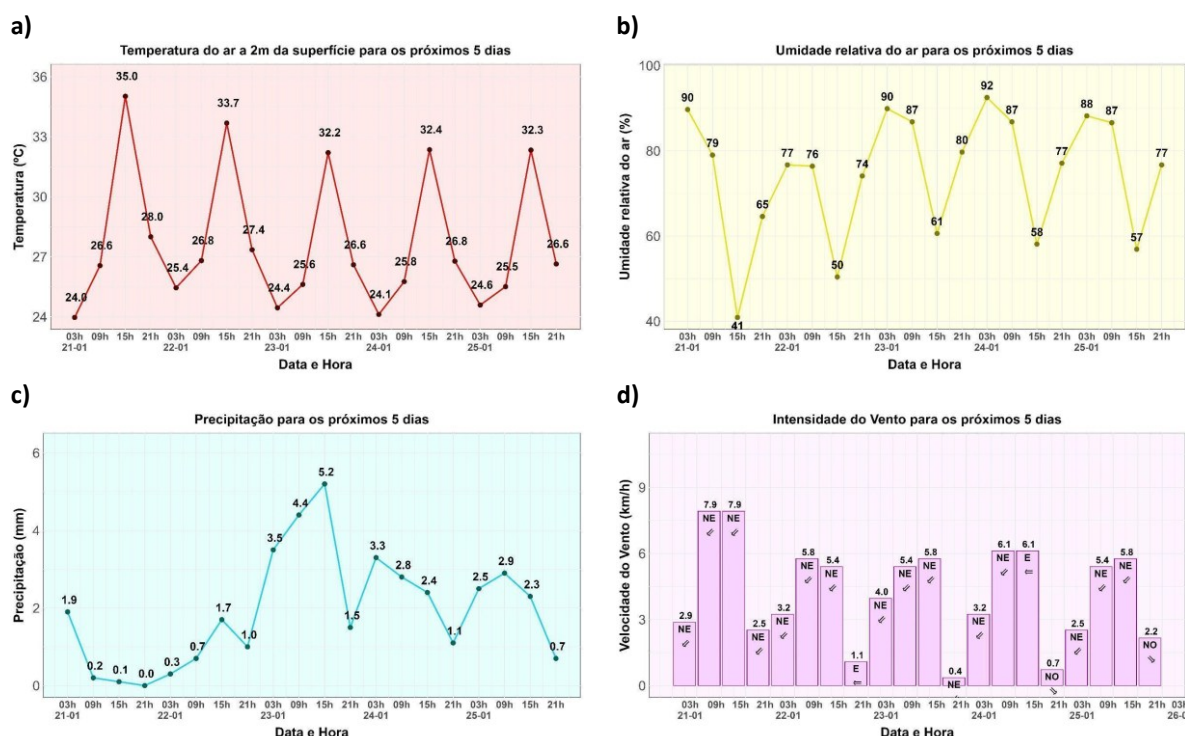
Posteriormente, utiliza-se a função 'Previsão.R'. Esta função exige duas entradas: latitude e longitude da localização para a qual a previsão é desejada. Por exemplo, ao executar Previsão (-31.77, -52.35), é obtida uma previsão detalhada para a cidade de Pelotas-RS. A função processa os dados baixados pelo 'Download.R', analisando as variáveis meteorológicas: temperatura, umidade e precipitação. Além disso, 'Previsão.R' é capaz de gerar previsões para vários dias à frente, oferecendo uma visão abrangente do tempo futuro.

Após a execução dessa função é gerado um arquivo em planilha de texto com a previsão para a localidade específica de até 5 dias. Exemplos para essa funcionalidade ocorrem para diferentes áreas e profissionais que necessitam de previsões meteorológicas precisas e localizadas, como agricultores, planejadores urbanos e cientistas ambientais.

Com os dados brutos organizados pela função 'Previsão.R', a função 'Gráfico.R' serve como uma ferramenta no pacote de automação meteorológica, projetada para apresentar visualmente as previsões processadas. Seguindo a execução da função 'Previsão.R', que extrai previsões detalhadas para um local específico, esta função é utilizada para transformar esses dados numéricos em gráficos. Ela cria uma série de gráficos, cada um representando uma variável diferente (temperatura, umidade, precipitação e velocidade do vento).

Após a execução da função, o primeiro gráfico produzido é uma representação visual dinâmica e informativa das variações de temperatura do ar a 2 metros da superfície (°C) ao longo do tempo para a cidade de Pelotas (Figura 7a). Este gráfico apresenta uma linha contínua que traça as temperaturas previstas, destacando tendências de ciclos diurnos ao longo dos dias.

Figura 7 - Gráficos gerados pela função 'Gráfico.R' para a cidade de Pelotas-RS, sendo a) temperatura do ar (°C), b) umidade relativa do ar (%), c) precipitação (mm) e d) velocidade (km/h) e direção do vento (°).



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O gráfico da umidade relativa do ar (%) é apresentado na Figura 7b, na qual o eixo vertical representa a porcentagem de umidade relativa do ar e o eixo horizontal mostra a progressão temporal, em intervalos de 3 horas. A linha traçada reflete as mudanças na

umidade ao longo do período, permitindo identificar épocas de maior ou menor umidade. Estes pontos são frequentemente acompanhados por etiquetas que exibem a porcentagem exata de umidade, proporcionando uma interpretação rápida e precisa dos dados.

O gráfico de precipitação é uma ferramenta analítica para visualizar as previsões de chuva (Figura 7c). Este gráfico é especialmente útil para uma ampla gama de aplicações, desde a agricultura e planejamento urbano até a organização de eventos e atividades. O eixo vertical representa a quantidade de precipitação, medida em milímetros, enquanto o eixo horizontal mostra a sequência temporal, que pode ser dividida em horas ou dias. A representação gráfica utiliza linhas para ilustrar a quantidade esperada de precipitação.

Por fim, o gráfico apresentado na Figura 7d fornece uma representação visual da velocidade do vento ao longo de um período de cinco dias. Nele, as barras variam em altura, correspondendo às velocidades do vento medidas em quilômetros por hora (km/h). Além disso, ícones de seta acompanhados pelas siglas NE (nordeste), E (leste) e NO (noroeste) indicam a direção do vento naquele momento específico. Pode-se perceber que as barras mais altas, com velocidades de 7.9 km/h, sugerem ventos mais fortes vindos de NE, enquanto uma barra mais baixa, com velocidade de 0.4 km/h, indica uma brisa leve de NE.

A legenda horizontal inferior fornece a data e a hora, organizada de forma a facilitar o acompanhamento das mudanças na intensidade do vento ao longo do tempo. A legenda vertical esquerda quantifica a velocidade do vento, permitindo uma comparação direta entre os diferentes períodos.

Dando sequência, a função 'Envio.R' desempenha um papel importante na cadeia final do processo de automação, agindo como a ponte entre a análise de dados e a distribuição eficaz de informações. Esta função é projetada para enviar automaticamente as previsões e gráficos gerados pelas funções anteriores diretamente para um ou mais destinatários via e-mail. Para tal, ela requer apenas o endereço de e-mail do destinatário como entrada.

Ao executar 'Envio(endereco_email)' a função coleta automaticamente os arquivos relevantes (que podem incluir um relatório detalhado de previsão em formato de planilha de texto e imagens de gráficos) e os anexa a um e-mail formatado. O conteúdo do e-mail é preparado de forma a garantir que os destinatários recebam uma mensagem concisa, mas abrangente, que contextualize os anexos.

A Figura 8 apresenta o e-mail recebido pelos destinatários após a execução dessa função. Esse e-mail inclui uma planilha com informações sobre temperatura, umidade relativa do ar, precipitação e vento, além de gráficos ilustrativos destas variáveis. O processo automatizado garante que os destinatários recebam regularmente as atualizações meteorológicas de forma conveniente e informativa.

Figura 8 - Recebimento do e-mail feito pela função 'Envio.R', após sua execução.

PREVISÃO DO TEMPO PARA OS PRÓXIMOS 5 DIAS Inbox x



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

As descrições anteriores detalharam o funcionamento das funções individualmente. No entanto, para alcançar uma operação autônoma, é crucial criar uma estrutura de funções que possa operar de maneira coordenada e integrada. A função de 'Automação.R' oferece essa integração, permitindo que as diversas etapas, desde o *download* de dados até o envio automático de previsões por e-mail, sejam executadas de forma sistemática e eficiente. Essa abordagem automatizada visa simplificar e agilizar o processo, proporcionando atualizações regulares da previsão do tempo sem a necessidade de intervenção manual constante.

Esta função foi projetada, a princípio, para extrair previsões meteorológicas para seis cidades do Rio Grande do Sul, conforme anteriormente apresentado na Tabela 1. O objetivo inicial foi validar o desempenho de todas as funções operando de forma integrada e autônoma. No entanto, existe a possibilidade de expandir essa capacidade para abranger um número maior de cidades. Neste trabalho, a função enviou notificações para dois endereços de e-mail distintos, garantindo que cada destinatário receba as mesmas informações de previsão para as seis cidades mencionadas.

A Figura 9 ilustra o processo de integração dos parâmetros de entrada na função designada para cada coordenada geográfica das seis cidades. Além disso, demonstra como os endereços de e-mail destinatários das informações processadas são inseridos no sistema. O último parâmetro configurado é o horário (hora e minuto) para a execução das funções. Este arranjo garante que, diariamente, no momento pré-determinado, a função seja ativada automaticamente, realizando todos os processos descritos anteriormente de maneira autônoma.

Figura 9 - Exemplo de uso da função 'Automação.R'.

```

1
2 # Automação Previsão do Tempo de Até 5 dias
3
4 source("Automacao.R")
5
6 Previsao_Automatica(
7
8   -31.770, -52.346, "destinatario1@email.com", # Pelotas
9   -30.030, -51.235, "destinatario1@email.com", # Porto Alegre
10  -33.867, -53.385, "destinatario1@email.com", # Santa Vitoria do Palmar
11  -32.033, -52.089, "destinatario1@email.com", # Rio Grande
12  -29.683, -53.811, "destinatario1@email.com", # Santa Maria
13  -31.330, -54.106, "destinatario1@email.com", # Bagé
14
15  -31.770, -52.346, "destinatario2@email.com", # Pelotas
16  -30.030, -51.235, "destinatario2@email.com", # Porto Alegre
17  -33.867, -53.385, "destinatario2@email.com", # Santa Vitoria do Palmar
18  -32.033, -52.089, "destinatario2@email.com", # Rio Grande
19  -29.683, -53.811, "destinatario2@email.com", # Santa Maria
20  -31.330, -54.106, "destinatario2@email.com", # Bagé
21
22  # Hora e Minutos
23  15, 00)
24
25
26

```

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As funções desenvolvidas para a automação da previsão do tempo constituem uma grande contribuição tanto para a pesquisa meteorológica, quanto para a utilização prática de dados climáticos. Dentre as funções implementadas, a função 'Download.R' é notável por sua habilidade em adquirir dados atualizados do modelo GEFS, assegurando assim a precisão das previsões meteorológicas fornecidas.

A função 'Previsão.R' integra o processo de *download* com a produção de uma planilha, facilitando a interpretação dos dados obtidos do modelo. 'Gráficos.R' se destaca pela criação de representações visuais compreensíveis das condições meteorológicas, enquanto a função 'Envio.R' simplifica a distribuição dos resultados através da automação do envio de e-mails para destinatários específicos.

Além disso, a função 'Automação.R' exemplifica a sinergia entre as funções, habilitando a execução programada e automática dos processos mencionados, em momentos específicos. Esta automatização oferece um método eficiente de manter os usuários frequentemente atualizados, eliminando a necessidade de intervenção direta.

Estas funções poderão representar um avanço notável para o CPPMET, especialmente no que tange à obtenção de informações provenientes de modelos meteorológicos de maneira refinada e simplificada. Este avanço é particularmente significativo no contexto da otimização de tempo. A capacidade de processar cada previsão em aproximadamente um minuto demonstra não apenas a eficiência operacional das funções, mas também uma economia de tempo substancial para os pesquisadores e analistas do CPPMET.

A implementação dessas funções facilita uma compreensão mais ágil e direta das previsões meteorológicas, permitindo que decisões baseadas em dados sejam tomadas com maior rapidez e precisão. Esse aprimoramento na velocidade e na qualidade da informação disponível pode levar a melhorias significativas na previsão de eventos meteorológicos adversos.

Em suma, este conjunto de funções apresenta uma solução integrada e eficaz para a aquisição, análise e disseminação automatizada de previsões meteorológicas. O código organizado, acompanhado de documentação explícita e mecanismos de automação sofisticados, confere um valor a estas ferramentas, tanto para a comunidade científica quanto para profissionais que dependem de informações climáticas precisas e atualizadas.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida através do processo nº 403694/2022-1. O quarto

autor agradece ao Ministério da Educação (MEC) pela bolsa do Programa de Educação Tutorial (PET).

REFERÊNCIAS

AGGARWAL, R.; KUMAR, R. A Comprehensive Review of Numerical Weather Prediction Models. **International Journal of Computer Applications**, v. 74, n. 18, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5120/12989-0246>.

BIVAND, R. **Rdocumentation: rgdal (version 1.6-7)**. (2023). Disponível em: <https://www.rdocumentation.org/packages/rgdal/versions/1.6-7>. Acesso em: 15 abr. 2024.

CRISTANI, M. *et al.* “It Could Be Worse, It Could Be Raining”: Reliable Automatic Meteorological Forecasting for Holiday Planning. In: WOTAWA, F. *et al.* (ed.). **Advances and Trends in Artificial Intelligence: From Theory to Practice**. Cham: Springer, 2019. (Lecture Notes in Artificial Intelligence, v. 11569). Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-22999-3_1. Acesso em: 15 abr. 2024.

CURSO-R. **O pacote dplyr: Ciências de Dados em R**. Disponível em: <https://livro.curso-r.com/7-2-dplyr.html>. Acesso em: 15 abr. 2024a.

CURSO-R. **O pacote ggplot2: Ciência de Dados em R**. Disponível em: <https://livro.curso-r.com/8-1-o-pacote-ggplot2.html>. Acesso em: 15 de abr. 2024b.

DU, J.; DENG, G. How Should a Numerical Weather Prediction Be Used: Full Field or Anomaly? A Conceptual Demonstration with a Lorenz Model. **Atmosphere**, v. 13, n. 9, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13091487>.

HARRISON, L. *et al.* Advancing early warning capabilities with CHIRPS-compatible NCEP GEFS precipitation forecasts. **Nature**, v. 9, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01468-2>

HASAN, N.; UDDIN, M. T.; CHOWDHURY, N. K. Automated weather event analysis with machine learning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIONS IN SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY - ICISSET, Dhaka. **Anais...** [S.l: s.n.], 2016. p. 1-5.

HIJMANS, R. J. *et al.* **Geographic Data Analysis and Modeling: Package ‘raster’**. 2023. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/raster/raster.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2024.

HILL, A. J.; SCHUMACHER, R. S.; JIRAK, I. L. A New Paradigm for Medium-Range Severe Weather Forecasts: Probabilistic Random Forest–Based Predictions. **Weather and Forecasting**, v. 38, n. 2, p. 251–272, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-22-0143.1>.

HUNT, J. C. R. Meteorology in society and practical developments. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 139, p. 561-572, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.1993>.

LYNCH, P. The origins of computer weather prediction and climate modeling. **Journal of Computational Physics**, v. 227, p. 3431-3444, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.02.034>.

MEDINA, H. *et al.* Comparing GEFS, ECMWF, and Postprocessing Methods for Ensemble Precipitation Forecasts over Brazil. **Journal of Hydrometeorology**, v. 20, p. 773–790, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0125.1>.

NNENNA, U. C.; JAMES, E.; EDITH, E. O. Modelling an automated rainfall forecasting system using an optimized intelligent agent. **Global Journal of Engineering and Technology Advances**, v. 15, p. 64-69, 2023. DOI: <https://doi.org/10.30574/gjeta.2023.15.1.0077>.

PEBESMA, E. *et al.* **Package ‘sp’: Classes and Methods for Spatial Data**. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/sp/sp.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2024.

PREMRAJ, R. **Package ‘mailR’: A Utility to Send Emails from R**. 2022. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/mailR/mailR.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2024.

R FOUNDATION. **The curl package: a modern R interface to libcurl**. 2024. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/curl/vignettes/intro.html>. Acesso em: 15 abr. 2024.

SAUR, D. Evaluation of the Accuracy of Numerical Weather Prediction Models. In: SILHAVY, R. *et al.* (ed). **Artificial Intelligence Perspectives and Applications**. Cham: Springer, 2015. (Advances in Intelligent Systems and Computing, v. 347).

SCHAUBERGER, P. *et al.* **Package ‘openxlsx’: Read, Write and Edit xlsx Files**. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/openxlsx/openxlsx.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2024.

SIMMONS, A. J.; HOLLINGSWORTH, A. Some aspects of the improvement in skill of numerical weather prediction. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 128, p. 647-677, 2002b. DOI: <https://doi.org/10.1256/003590002321042135>.

TAMAMADIN, M. *et al.* Automation Process to Support an Information System on Extreme Weather Warning. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Indonesia, v. 803, 2020.

VAUGHAN, C.; DESSAI, S. Climate services for society: origins, institutional arrangements, and design elements for an evaluation framework. **WIREs Climate Change**, v. 5, p. 587-603, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.290>.

WALLER, J. A.; DANCE, S. L.; LEAN, H. W. Evaluating errors due to unresolved scales in convection-permitting numerical weather prediction. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 147, p. 2657-2669, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.4043>.

YANG, H. *et al.* Statistical downscaling of numerical weather prediction based on convolutional neural networks. **Global Energy Interconnection**, v. 5, p. 217-225, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2022.04.018>.

ZHANG, F.; ROUTHAY, A. Data Assimilation: Comparison and Hybridization between Ensemble and Variational Methods. In: MOHANTY, U.C.; GOPALAKRISHNAN, S.G. (ed). **Advanced Numerical Modeling and Data Assimilation Techniques for Tropical Cyclone Prediction**. Springer, Dordrecht, 2016.

ZHOU, X. *et al.* The Development of the NCEP Global Ensemble Forecast System Version 12. **Weather and Forecasting**, v. 37, p. 1069-1084, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-21-0112.1>.

ZHOU, X. *et al.* Performance of the New NCEP Global Ensemble Forecast System in a Parallel Experiment. **Weather and Forecasting**, v. 32, p. 1989-2004, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-17-0023.1>.

ZHU, Y. *et al.* Quantify the Coupled GEFS Forecast Uncertainty for the Weather and Subseasonal Prediction. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 128, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022JD037757>.