

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

PREVISÃO DE ONDAS E ALERTAS METEOROLÓGICOS: INOVAÇÃO EM SEGURANÇA PARA ATIVIDADES EMBARCADAS NA ITAIPU

Pablo Souza Dos Santos 1¹; Luiz H. Maldonado 2 & Fariña Jara, M. J. M.³

Abstract: The operation of the Itaipu Hydroelectric Power Plant reservoir requires regular boat-based activities, such as bathymetric surveys, in an environment exposed to meteorological risks like strong winds and high waves. To mitigate these operational risks and optimize logistics, two automatic alert systems were developed: the Wave Height Alert and the INMET Alert. The Wave Alert was developed using Python routines, the Saville (1954) method for *fetch* calculation, the parametric model by Luchetti (2023), and wind forecasts from GFS/NOAA to predict wave height. It generates daily PDF reports with risk classifications and sends emails when wave forecasts exceed 1 meter. The INMET Alert monitors official weather warnings via RSS, filtering events that affect the Itaipu area of interest. These systems, complemented by alerts from DINAC, enhance operational decision-making, significantly improving the safety and efficiency of field activity planning at the reservoir. A case study demonstrated the system's effectiveness in anticipating adverse conditions.

Resumo: A Operação do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu exige atividades embarcadas regulares, como batimetrias, ambiente exposto a riscos meteorológicos como ventos fortes e ondas elevadas. Para mitigar esses riscos operacionais e otimizar a logística, foram desenvolvidos dois sistemas automáticos de alerta: o Alerta de Altura de Ondas e o Alerta INMET. O Alerta de Ondas foi desenvolvido utilizando rotinas Python, o método de Saville (1954) para cálculo do *fetch*, o modelo paramétrico de Luchetti (2023) e previsões de vento do GFS/NOAA para prever a altura das ondas. Ele gera relatórios diários em PDF e classificações de risco, enviando e-mails para previsões de ondas superiores a 1 metro. O Alerta INMET monitora avisos meteorológicos oficiais via RSS, filtrando eventos que afetam a área de interesse da Itaipu. Esses sistemas, complementados por alertas da DINAC, aprimoraram a tomada de decisão operacional, ampliando significativamente a segurança e a eficiência do planejamento das atividades de campo no reservatório. Um estudo de caso demonstrou a eficácia do sistema na antecipação de condições adversas

Palavras-Chave – Alerta Meteorológico, Itaipu Binacional, Ondas.

INTRODUÇÃO

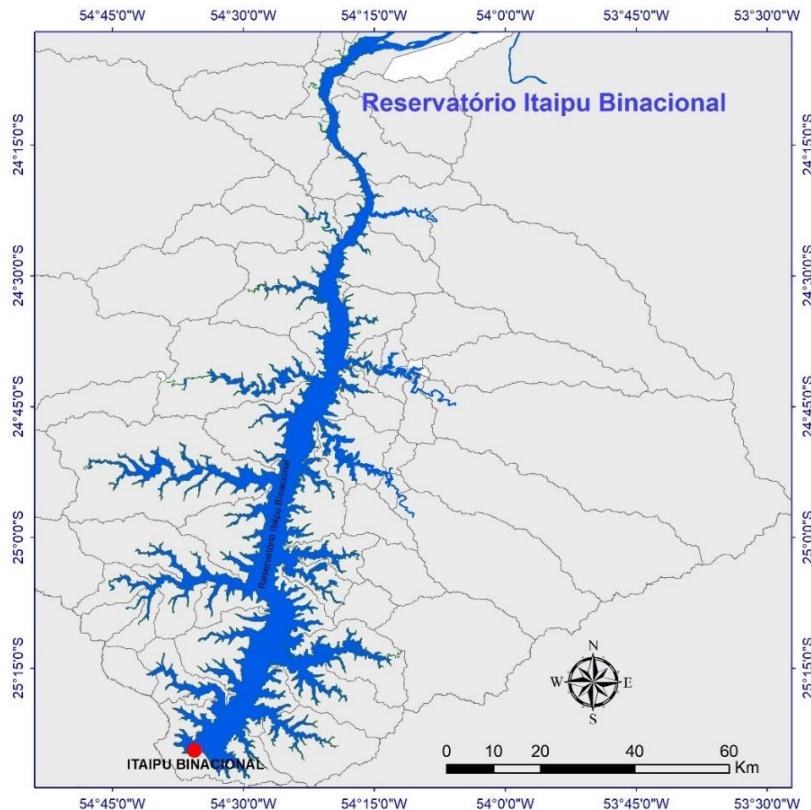
A Usina Hidrelétrica de Itaipu, empreendimento binacional localizado na fronteira entre Brasil e Paraguai sobre o rio Paraná, possui uma potência instalada de 14.000 MW. Seu reservatório, com 170 km de extensão e área alagada de 1.350 km², apresenta profundidade média de 22 metros, podendo atingir até 170 metros nas proximidades do barramento GUETTER *et al.* (2005). Figura 1.

1) ITAIPU BINACIONAL Av. Tancredo Neves 6.731 85856-970 Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. pabloib@itaipu.gov.br

2) ITAIPU BINACIONAL Av. Tancredo Neves 6.731 85856-970 Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. LHMALDO@itaipu.gov.br

3) ITAIPU BINACIONAL Av. Tancredo Neves 6.731 85856-970 Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. mariajar@itaipu.gov.br

Figura 1 – Reservatório de Itaipu



A orientação alongada do reservatório o torna particularmente suscetível à geração de ondas por ventos que atuam ao longo de seu eixo principal. Estudos como o de Luchetti (2023) identificaram *fetchs* (pistas de vento) máximos superiores a 12 km para as direções Norte-nordeste (NNE) e Sul-sudoeste (SSW), o que corrobora o alto potencial para a formação de ondas elevadas sob condições de vento persistente nessas direções. Essa característica geográfica, somada à frequência de eventos meteorológicos na região, impõe riscos às atividades embarcadas.

A relevância de tal monitoramento é amplificada pela climatologia da região, frequentemente impactada por sistemas frontais. A frequência de frentes frias sobre a América do Sul é maior durante o inverno e a primavera (PAMPUCH; AMBRIZZI, 2015), e observações operacionais dos meteorologistas que atuam na Divisão de Estudos Hidrológicos e Energéticos (OPSH.DT) da ITAIPU Binacional confirmam que, no inverno, o intervalo médio para a entrada de uma nova frente fria é de 7 a 10 dias na área de interesse da Itaipu, destacando a necessidade de um sistema de previsão contínuo e confiável.

Esse corpo hídrico é essencial para a operação da usina e, por isso, é constantemente monitorado pela OPSH.DT, que realiza, entre outras atividades, batimetrias regulares. Durante essas atividades de campo, o ambiente pode apresentar condições meteorológicas adversas, como ventos fortes, ondas elevadas, chuvas intensas e raios. Tais eventos representam riscos significativos para a segurança da equipe e para a integridade dos equipamentos. Diante desse cenário, as equipes utilizam as ferramentas disponíveis de previsão meteorológica, como os alertas meteorológicos divulgados pelo Dirección Nacional De Aeronáutica Civil (DINAC) do Governo do Paraguai e Instituto Nacional de Meteorología (INMET), previsões meteorológicas dos centros ECMWF e NOAA, além de protocolos para a realização das atividades.

Entretanto, nota-se que há a possibilidade de melhorar e automatizar alguns processos, assim como desenvolver processos adicionais para melhorar a logística e o trabalho seguro da Itaipu.

Como resposta a essa demanda, a equipe da OPSH.DT da Itaipu desenvolveu no último ano dois sistemas automáticos de alerta: o Alerta de Altura de Ondas e o Alerta INMET, processos que são executados diariamente por meio do agendador de tarefas do Windows em servidor interno da Itaipu. Além dos alertas, a OPSH.DT tem promovido o desenvolvimento de ferramentas complementares de análise como ferramentas de simulação do campo de onda, com uma aplicação no Google Earth Engine, Santos e Maldonado (2024).

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo apresentar os sistemas automáticos de alerta desenvolvidos e sua contribuição para a segurança operacional e o planejamento das atividades no reservatório da UHE Itaipu.

METODOLOGIA

SISTEMA DE ALERTA DE ONDAS

Foi desenvolvida uma rotina em *Python* para determinação automática do tamanho da pista do vento “*fetch*” pelo método de Saville (1954), aplicada a mais de 5.000 pontos com resolução de 500 m no Reservatório de Itaipu. Além disso, para calcular a altura da onda, foi utilizado o modelo bidimensional de Luchetti (2023) para cálculo da amplitude de ondas, baseado na equação 1:

$$\frac{gH}{U^2} = \alpha \left(\frac{gF}{U^2} \right)^\beta \quad (1)$$

Em que, sendo H a altura significativa da onda, F o *fetch*, U a velocidade do vento e α e β os coeficientes que são determinados pelo ajuste entre o *fetch* do modelo paramétrico bidimensional e a altura de onda do modelo SWAN.

Para o modelo paramétrico de Luchetti (2023) os coeficientes são dados por:

$$\alpha = 0.0076 - 0.0005U + 0.000014U^2 \quad (2)$$

$$\beta = 0.34 + 0.0144U - 0.0004U^2 \quad (3)$$

Foi empregado o modelo Global Forecast System (GFS) da NOAA para a previsão de rajada de vento, NOAA/NCEP (2025). O GFS executa quatro rodadas diárias (00:00, 06:00, 12:00 e 18:00 UTC) com previsões de até 16 dias. Utilizou-se a rodada das 00:00 UTC com resolução de 0,25° (~30 km), realizando *downscale* para adequar à resolução de 500 m do *fetch* calculado.

A rotina em *Python* foi complementada para enviar e-mails aos usuários interessados, considerando a previsão de ondas maiores de 1 m no horizonte de até 3 dias a frente. Esse alerta gera relatórios em PDF com análise horária dos cenários previstos, destacando o cenário mais crítico baseado na maior altura de onda estimada em função da previsão de rajada do vento.

Como existe incertezas nos valores dessa altura de onda, foi criada uma classificação de risco de navegação, considerando faixas de altura das ondas. A Tabela 1 apresenta esta classificação onde alturas de onda menores que 1,0 metro configuram condições normais para navegação com procedimentos padrão de segurança, valores entre 1,0 e 1,5 metros caracterizam risco moderado requerendo embarcações maiores e monitoramento climático contínuo, alturas entre 1,5 e 2,0 metros representam alto risco com suspensão recomendada de atividades não essenciais, e valores superiores a 2,0 metros configuram risco extremo com evitação total de atividades no reservatório.

Tabela 1 – Classificação de recomendações para navegação adotados pela OPSH.DT

Altura da Onda (m)	Nível de Risco	Risco para Navegação	Recomendações
< 1	Normal	Condições normais para navegação	Seguir procedimentos padrão de segurança
1 ≤ altura < 1.5	Risco Moderado	Moderado, navegadores devem estar atentos	Realiza-se trabalho de campo com embarcação maior, monitorar condições climáticas
1.5 ≤ altura < 2	Alto Risco	Alto, navegação não recomendada	Suspender atividades de campo que possam ser realizadas em outro momento
≥ 2	Risco Extremo	Muito alto, navegação não recomendada	Evitar qualquer atividade no reservatório

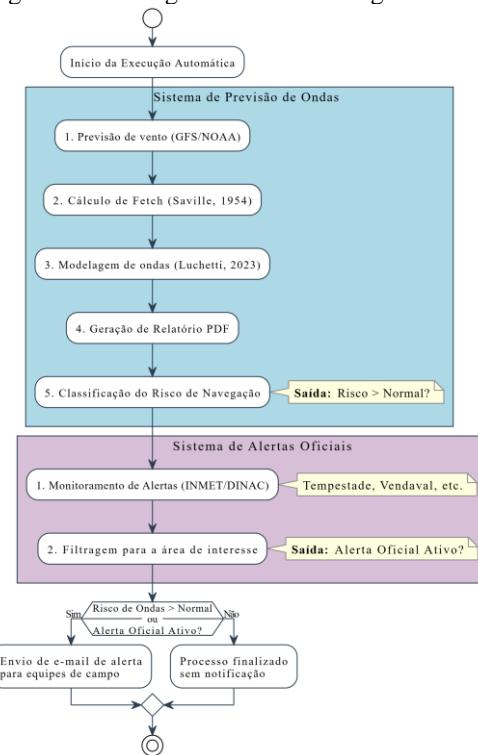
SISTEMA DE ALERTAS INMET E DINAC

Para garantir uma cobertura de monitoramento completa e binacional, o sistema de alertas integra duas fontes distintas e complementares: os alertas automatizados do INMET do Brasil e os comunicados diretos da DINAC do Paraguai.

O monitoramento dos alertas do lado brasileiro é realizado por uma rotina em *Python* que consome, via RSS (<https://apiprevmet3.inmet.gov.br/avisos/ativos>), os avisos meteorológicos públicos do INMET. Esta rotina verifica continuamente se a geometria dos novos alertas emitidos ('Chuvas Intensas', 'Tempestade', 'Vendaval') intercepta a área de interesse da Itaipu. Caso positivo, um e-mail é disparado automaticamente para as pessoas cadastradas.

Em contraste com essa abordagem automatizada, o monitoramento do lado paraguaio baseia-se na comunicação direta com a Direção de Meteorologia e Hidrologia (DMH), órgão oficial vinculado à DINAC. Além dos boletins especiais publicados em seu site oficial (<https://www.meteorologia.gov.py/boletin-especial/>), a equipe da OPSH.DT tem acesso a um canal de comunicação dedicado, recebendo alertas e atualizações diretamente via WhatsApp.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia adotada



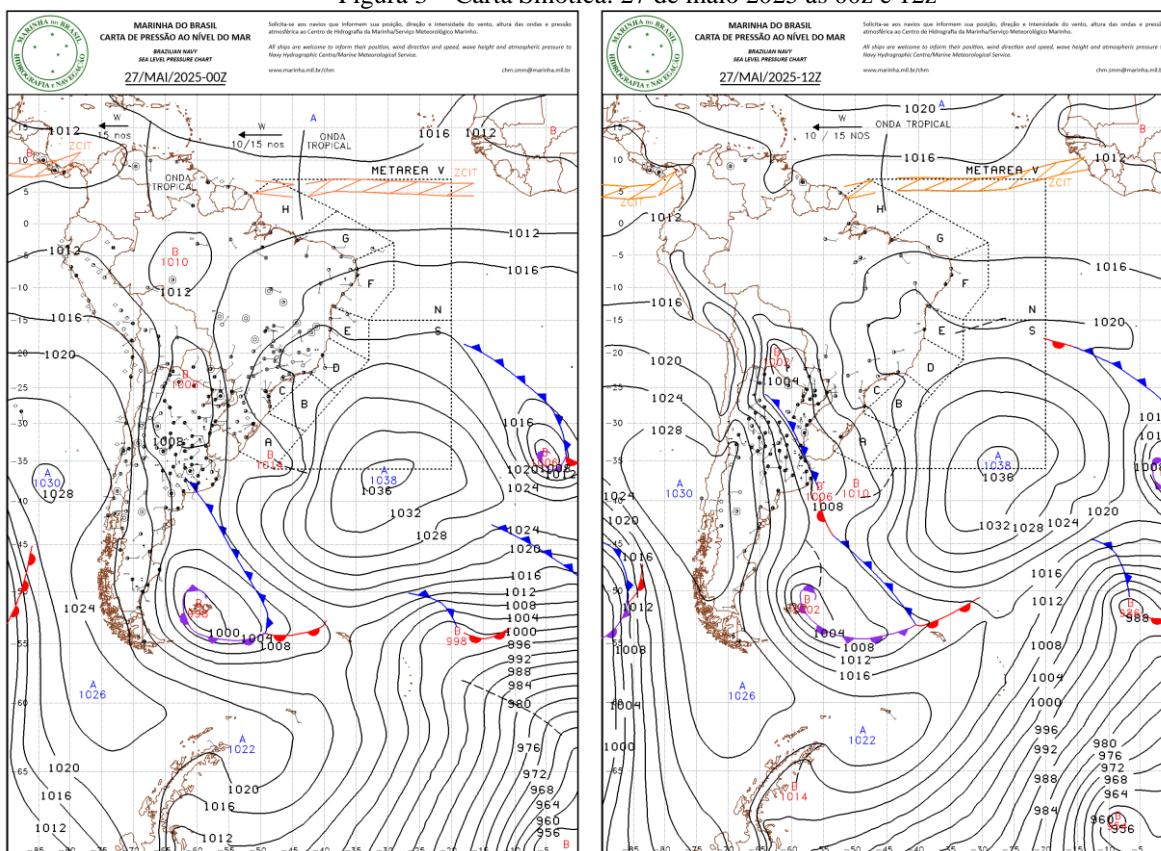
RESULTADOS

ALERTA DE ONDAS

O sistema de monitoramento desenvolvido foi implementado nos últimos meses, sendo possível verificar, na prática, seu funcionamento por meio da análise de um evento de passagem de frente fria ocorrido entre os dias 27 e 29 de maio de 2025. A resposta do campo de ondas e ventos no reservatório, prevista no dia 27/05 pelo sistema figura 4, é analisada em conjunto com a evolução sinótica do evento, apresentada nas cartas da Marinha do Brasil figuras 3, 5, conforme descrito a seguir.

No dia 27 de maio, a carta sinótica das 00Z, figura 3 revela uma configuração atmosférica para a geração de ventos intensos pré-frontais. Um centro de baixa pressão de 1006 hPa posicionado sobre o Chaco Paraguai, em conjunto com um sistema de alta pressão com núcleo de 1038 hPa no oceano Atlântico, estabeleceu um forte gradiente de pressão que favoreceu o escoamento de ventos de Norte/Noroeste sobre a bacia do Paraná. A evolução do sistema é evidente na carta das 12Z (09h, horário local), que mostra um deslocamento moderado da frente, indicando uma velocidade de avanço considerável.

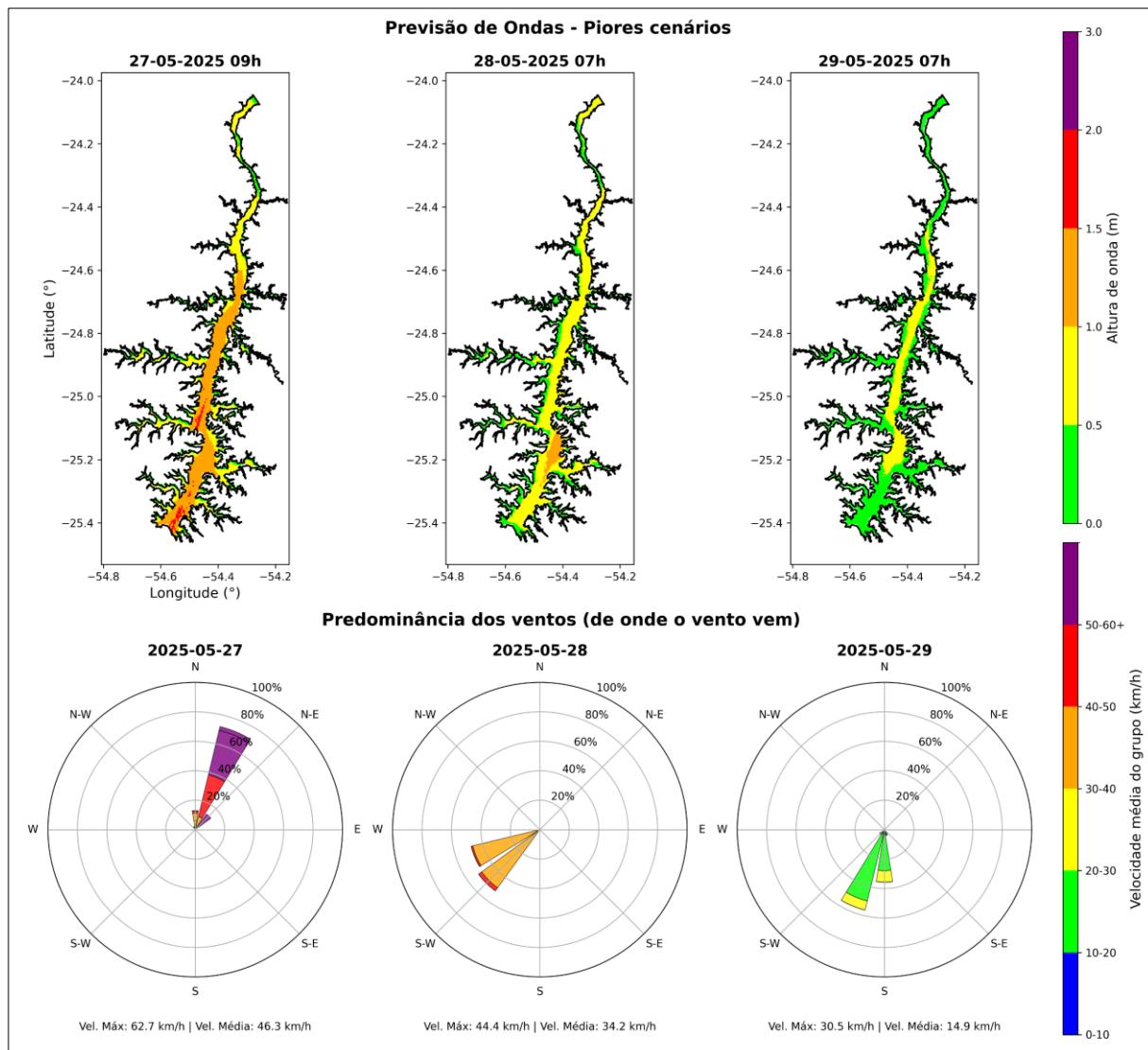
Figura 3 – Carta Sinótica: 27 de maio 2025 às 00z e 12z



A configuração sinótica observada coincide com o pico de altura de ondas previsto pelo modelo para as 09h figura 4, representando o pior cenário do dia, com ventos de até 62,7 km/h e ondas significativas variando entre 1,5 m e 2,0 m (indicações em laranja e vermelho). O máximo de intensidade dos ventos foi registrado aproximadamente 12 horas antes da passagem da frente fria pela área de estudo, ocorrida em 28/05/2025 às 00z (correspondente às 21h do dia 27/05 no horário local). Esse comportamento é típico de eventos pré-frontais na região, nos quais ventos de direção norte e noroeste tendem a se intensificar antes da chegada da frente fria. A correspondência entre a previsão

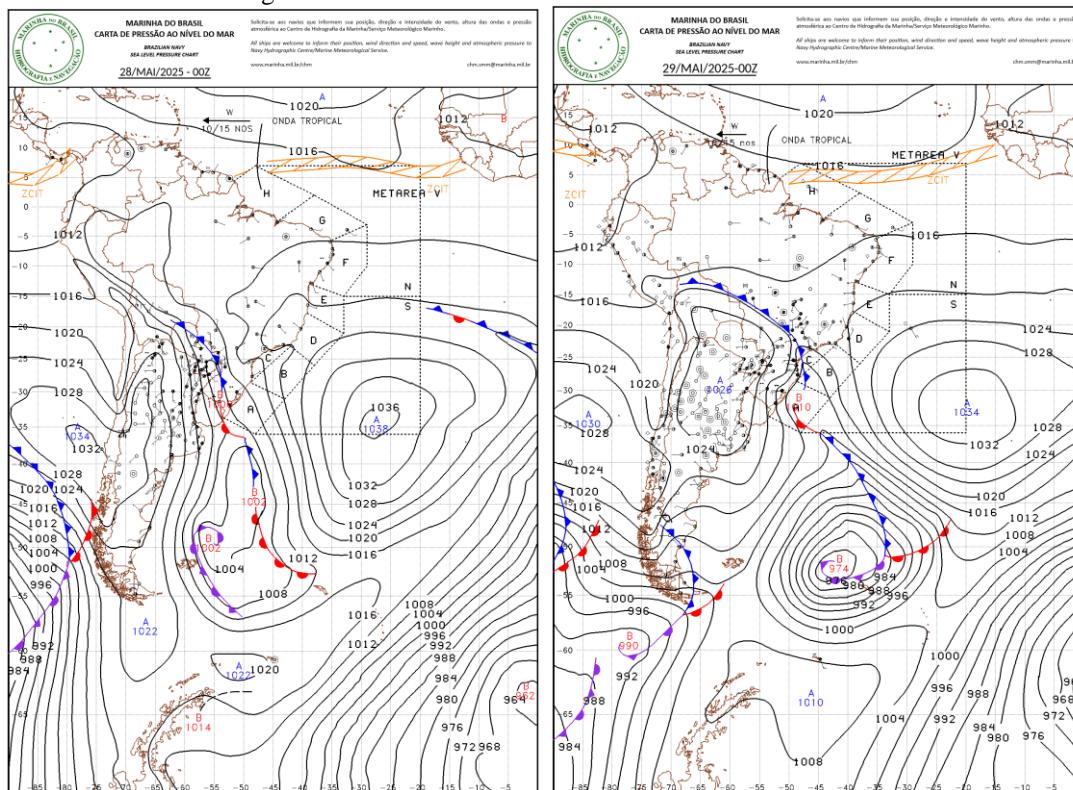
do modelo e a configuração sinótica observada evidencia a capacidade do sistema em antecipar o evento, validando o alerta emitido.

Figura 4 – Previsão de ondas: 27 a 29 de maio



A carta sinótica do dia 28 de maio às 00Z (correspondente às 21h do dia 27, figura 5) confirma a passagem do sistema frontal sobre a região de interesse durante a noite. Com a frente já sobre o Sudeste do Brasil, a influência do centro de alta pressão pós-frontal (A), com núcleo de 1032 hPa, torna-se dominante. Essa mudança no padrão atmosférico foi capturada pela previsão de ventos na figura 4, que indicou para o dia 28 uma rotação abrupta do vento para o quadrante Sudoeste (SW) e uma redução na velocidade máxima (44,4 km/h). Consequentemente, as alturas de onda previstas para as 07h diminuíram, com valores predominantes abaixo de 1,0 m (cor amarela).

Figura 5 – Carta Sinótica: 28 e 29 de maio 2025.

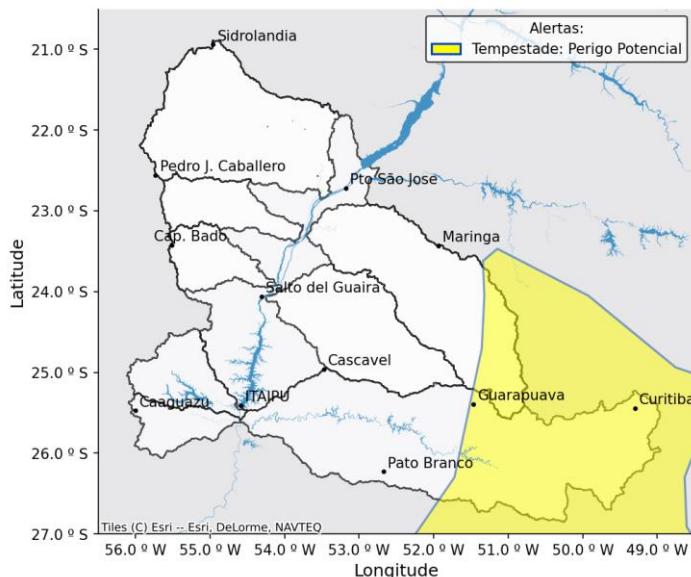


No dia 29 de maio, a carta sinótica, figura 5 revela o afastamento completo do sistema frontal para o oceano e a consolidação de uma massa de ar seco e estável associada ao centro de alta pressão (A), com 1034 hPa. Este cenário de estabilidade atmosférica resultou em um enfraquecimento acentuado dos ventos, como mostra a previsão, figura 4, no dia 29/05. As velocidades médias e máximas caíram significativamente (máx. de 30,5 km/h), com os ventos soprando do quadrante Sudeste (SE). Tal condição levou à normalização das condições do reservatório, com alturas de onda retornando a valores inferiores a 1,0 m (cores verde e amarela), indicando o fim do evento de risco para a navegação.

ALERTA INMET E DINAC.

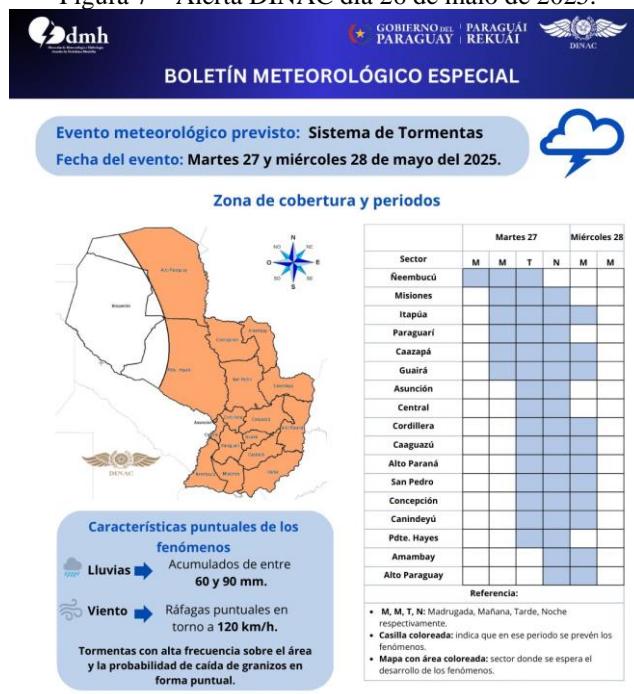
O evento meteorológico não foi identificado apenas pelo sistema de previsão de ondas. Em resposta direta às mesmas condições climáticas adversas, o INMET emitiu um alerta de tempestade com severidade de "Perigo Potencial", válido das 09h40 do dia 27/05/2025 até às 12h00 do dia 28/05/2025, conforme ilustrado na figura 6. A área de alerta, representada em amarelo, abrange predominantemente a bacia do rio Iguaçu, dentro da região de atuação da Itaipu, indicando a presença de condições atmosféricas adversas para a realização de atividades de campo. A sobreposição temporal e espacial entre o alerta oficial do INMET e o período de maior intensidade das ondas previsto pelo sistema demonstra a sinergia e a utilidade da integração entre diferentes fontes de informação para uma tomada de decisão mais segura.

Figura 6 – Alerta INMET dia 27 de maio de 2025.



Adicionalmente, a DINAC do Paraguai emitiu um "Boletín Meteorológico Especial" no dia 26/05 às 16:10 figura 7, antecipando em mais de 12 horas o início do evento. O alerta previa um "Sistema de Tormentas" para os dias 27 e 28 de maio, com acumulados de chuva de até 90 mm e, crucialmente, rajadas de vento de até 120 km/h, abrangendo a região de Alto Paraná, onde se localiza o reservatório. A sobreposição temporal deste alerta com a previsão de ondas do sistema desenvolvido e o alerta do INMET reforça a robustez da análise de risco.

Figura 7 – Alerta DINAC dia 26 de maio de 2025.



Fecha y hora de actualización: 26/05/2025 Hora: 16:00 H.O.P.
Dirección de Meteorología e Hidrología - Dpto. de Análisis y Predicción del Tiempo
Cnel. Francisco López 1080 c/ De La Conquista Tel. +595 21 4381000
e-mail: pronosticos@meteorologia.gov.py

Verificou-se também a presença de estações com monitoramento de vento sob responsabilidade do Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (Simepar). Dentre elas, destaca-se a estação de Santa Helena, localizada aproximadamente 70 km a montante da usina,

aproximadamente na metade da distância longitudinal do reservatório, onde foram registradas rajadas de vento de até 50 km/h na direção norte-nordeste às 09h do dia 27/05/2025. Além disso, na estação localizada dentro do complexo da Itaipu Binacional, foram registrados ventos ainda mais intensos, com rajadas de até 70 km/h na direção norte às 14h do mesmo dia.

Considerando a classificação do risco de navegação (tabela 1) e conforme o procedimento adotado pela OPSH.DT, as equipes não teriam realizado atividades de campo na data em questão, em função das recomendações emitidas. Ressalta-se, ainda, que desde o dia 26/05/2025 os alertas estavam sendo emitidos diariamente para o período analisado, evidenciando a consistência do sistema de alertas.

CONCLUSÃO

A implementação e integração dos sistemas de previsão de ondas e alertas meteorológicos provou ser uma ferramenta fundamental para a segurança operacional no reservatório da UHE Itaipu. A combinação do modelo de ondas (Luchetti, 2023) com dados do GFS/NOAA, alertas do INMET e comunicados da DINAC, oferece um panorama de riscos abrangente, permitindo uma gestão de recursos mais eficiente e o planejamento antecipado das atividades de campo.

A análise do evento de frente fria demonstrou a capacidade do sistema em antecipar com precisão as condições adversas. O sistema não apenas previu o pico de ondas gerado pelos ventos pré-frontais, mas também a subsequente mudança nas condições com a rotação do vento para o quadrante sul, validando sua eficácia para a tomada de decisão.

Uma contribuição relevante foi a identificação da particularidade hidrodinâmica local: Embora os ventos pré-frontais provenientes de noroeste apresentaram maior velocidade, os ventos pós-frontais oriundos do sul/sudoeste, mesmo com menor intensidade, frequentemente resultam em condições mais adversas à navegação. Isso se deve à oposição entre o vento sul e o fluxo natural do rio Paraná, que ocorre no sentido norte-sul. Esse antagonismo favorece a formação de ondas com menor período, maior declividade e maior propensão à quebra. Em contraste, os ventos de norte, por atuarem no mesmo sentido do escoamento, geram ondas de maior período, mais regulares e, consequentemente, menos agressivas à navegação. Ressalta-se, entretanto, que ambos os casos representam risco à segurança, devido à intensidade dos ventos e tamanho do *fetch*, embora apresentem comportamentos hidrodinâmicos distintos. Essa distinção é considerada um fator essencial na avaliação de risco realizada pela equipe de campo.

Corroborando a precisão do sistema, o pior cenário de ventos pré-frontais previsto pelo modelo para as 09h foi validado por dados observacionais. A estação meteorológica de Santa Helena, localizada a aproximadamente 70 km a montante, registrou rajadas de vento de 50 km/h às 09:15, com a mesma direção norte/noroeste indicada na previsão. Além disso, a estação localizada dentro do complexo da Itaipu Binacional registrou, às 14h do mesmo dia, rajadas ainda mais intensas, atingindo 70 km/h na direção norte, evidenciando a persistência e progressão do sistema frontal ao longo do reservatório. Essa notável correspondência temporal e direcional entre as previsões e as medições em campo fornece uma evidência empírica robusta da capacidade do sistema em capturar a intensidade, a direção e o momento de eventos críticos, reforçando sua confiabilidade para a tomada de decisão operacional.

Por fim, o envio automatizado de relatórios garantiu a disseminação rápida e padronizada da informação, permitindo o adiamento preventivo de atividades embarcadas, como os levantamentos batimétricos, em conformidade com os protocolos da OPSH.DT. Futuramente, o sistema será aprimorado com a instalação de medidores de onda *in loco*, a avaliação de modelos de previsão de rajada de vento de maior resolução (ECMWF) e o desenvolvimento de alertas específicos para frentes

frias. Tais melhorias consolidarão esta ferramenta como um pilar essencial para a segurança e a logística das operações no reservatório de Itaipu.

REFERÊNCIAS

- GUETTER, A. K.; ANDRADE, F. O., GONÇALVES, R. C. (2005). "Efeito do Vento sobre o Reservatório de Itaipu: cenários de vento e impacto no balanço hídrico" In XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa/PB, Nov. 2005.
- LUCHETTI, M.R. (2023). *Simulação de fenômenos gerados por ventos extremos no reservatório da UHE de Itaipu*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Engenharia e Exatas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental, Curitiba – PR.
- NOAA/NCEP. (2024). *GFS 0.25 Degree Hourly Model Output*. Disponível em: https://nomads.ncep.noaa.gov/dods/gfs_0p25_1hr/. Acesso em: 09/06/2025.
- PAMPUCH, L. A.; AMBRIZZI, T. (2015). "Sistemas Frontais Sobre a América Do Sul Parte II: Climatologia e intervalo de passagem em dados de Reanálise I Do Ncep/Ncar". In: IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, Santa Maria/RS.
- SANTOS, P.S.; MALDONADO, L.H. (2024). "GIS e GEE para Análise de Ondas no Reservatório de Itaipu" in Memorias del XXXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Medellín, octubre 1-4, 2024, pp. [1807-1815].
- SAVILLE, T. et al. (1954). "The effect of fetch width on wave generation". J. Tech. Mem., Washington, D.C, n. 70.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à ITAIPU Binacional, em especial à Equipe de Hidrologia de Campo da OPSH.DT, pelo apoio na análise e discussão dos dados, bem como pelos constantes esforços de aprimoramento nos processos de Hidrometria. Reconhecemos também o empenho da equipe na implementação de medidas voltadas à segurança das atividades de campo, cuja preocupação contínua tem sido fundamental para o desenvolvimento e a aplicação de soluções tecnológicas preventivas, como os sistemas automáticos de alerta apresentados neste estudo.