

# **Avaliação do Risco de Vendavais no Sul e Sudeste do Brasil**

**IRB(P&D)**

IRB(P&D)

## Sumário Executivo

### Objetivo

Consolidar o desenvolvimento da Base de Vendaval IRB(P&D) para o Brasil, transformando registros e estimativas de rajadas em informações aplicáveis à avaliação da concentração, da exposição e do risco associado a eventos extremos de vento.

### Base de dados (2000 a 2025)

Base histórica formada por séries diárias de rajada máxima do vento (m/s), construída a partir da integração de observações meteorológicas e dados de reanálise. O processo de correção espacial amplia a representatividade da informação em áreas com menor cobertura de estações.

### Produto analítico

Base georreferenciada de extremos e indicadores de risco, adequada para análises climáticas, atuariais e de resseguro, com resultados comparáveis em escala regional, microrregional e municipal.

### Metodologia

Agrupamento espacial por aprendizado de máquina para delimitar regiões com comportamento climático semelhante e caracterizar diferentes áreas de exposição a vendavais.

Modelagem de valores extremos para estimar a intensidade das rajadas associadas a diferentes períodos de retorno.

Modelagem bayesiana do risco relativo, com componentes espacial, temporal e de interação espaço-temporal, permitindo estimativas mais estáveis e a representação explícita da incerteza.

### Principais evidências climáticas

Ocorrência recorrente de rajadas extremas, com diferenças relevantes de frequência e intensidade entre as regiões analisadas.

Maior suscetibilidade a vendavais em áreas do Sul e do Sudeste, especialmente na faixa centro-sul do domínio analisado.

Variação espacial expressiva dentro das próprias regiões de vento, indicando que médias regionais podem ocultar bolsões locais de risco elevado.

## Implicações para o mercado

A segmentação espacial do risco permite diferenciar áreas que pertencem à mesma região climática, mas apresentam níveis distintos de exposição.

Os indicadores apoiam decisões de subscrição, precificação, definição de limites e gestão de acúmulo das carteiras de seguros e resseguros.

A leitura conjunta do risco relativo e de sua incerteza favorece decisões mais conservadoras em áreas onde a informação observacional é menos robusta.

## Aplicações práticas

Zoneamento de risco e apoio à tarificação técnica por região, microrregião ou município.

Avaliação da concentração de exposição, definição de capacidade e planejamento da proteção por resseguro.

Monitoramento da evolução do risco, atualização de critérios de subscrição e priorização de ações preventivas em áreas mais suscetíveis.

## 1. Caracterização dos eventos de vendaval

Os eventos extremos associados a vendavais, ciclones e tempestades severas representam uma ameaça relevante no Brasil, especialmente nas regiões Sul e Sudeste, onde se concentram elevadas densidades populacionais, infraestrutura crítica e grande parcela dos ativos segurados. Nas últimas décadas, diversos episódios evidenciaram o potencial destrutivo desses fenômenos, entre eles o ciclone-bomba que atingiu a região Sul entre 29 e 30 de junho de 2020, os vendavais recorrentes registrados no Rio Grande do Sul em 2023 e 2024 e a tempestade de 22 de setembro de 2025, que provocou danos severos na fábrica de motores da Toyota em Porto Feliz (SP) e afetou temporariamente as operações de Sorocaba e Indaiatuba. Esses eventos ilustram a exposição da sociedade e da economia brasileira aos impactos dos ventos extremos.

Além da intensificação das ameaças atmosféricas, fatores como a expansão urbana, a ocupação de áreas vulneráveis, a concentração de ativos de elevado valor econômico e a crescente interdependência das infraestruturas críticas têm contribuído para o aumento dos prejuízos associados a tempestades severas. Como consequência, as perdas seguradas relacionadas a vendavais vêm apresentando crescimento expressivo desde a década de 2000 em todo o mundo, reforçando a necessidade de aprimorar o conhecimento sobre esse tipo de risco (UNEP FI, 2021).

### Ciclones

Sistema atmosférico de baixa pressão, com circulação de ventos ao redor de um centro. No hemisfério Sul, a rotação é horária.

Principais tipos:

**Extratropical:** médias e altas latitudes, associado a frentes.

**Subtropical:** formam-se sobre águas quentes do Atlântico Sul.

**Tropical:** desenvolvem-se sobre águas quentes, com alta intensidade. Dependendo de sua intensidade podem ser chamados de furacão ou tufão.

### Vendaval

São eventos atmosféricos caracterizados por ventos intensos e anômalos em relação às condições usuais da atmosfera, associados a fortes gradientes de pressão que promovem o rápido deslocamento de massas de ar de regiões de maior para menor pressão.

Podendo englobar velocidades acima 20 m/s (72 km/h), com elevado potencial de provocar danos estruturais e ambientais.

Nesse contexto, a indústria de seguros e resseguros desempenha papel estratégico na observação, na análise e na modelagem dos riscos associados aos ventos extremos. Ao longo das últimas décadas, o setor acumulou bases de dados sobre perdas decorrentes de destelhamentos, danos estruturais, interrupções de serviços essenciais, quedas de redes elétricas e prejuízos agrícolas. Essas informações subsidiam modelos quantitativos de catástrofes capazes de estimar a frequência, a severidade e a distribuição espacial dos eventos extremos, oferecendo suporte técnico à precificação atuarial, à gestão da concentração de riscos, à estruturação de seguros paramétricos e ao fortalecimento da resiliência do setor segurador (SHEEHAN et al., 2023).

Os ventos correspondem ao movimento de massas de ar gerado por diferenças de pressão atmosférica e podem apresentar características distintas quanto à intensidade, duração, extensão espacial e mecanismo de formação. Os vendavais, objeto deste estudo, geralmente estão associados à atuação de tempestades severas, sistemas convectivos de mesoescala, frentes frias, linhas de instabilidade e ciclones extratropicais ou subtropicais, sendo frequentemente acompanhados por granizo, descargas elétricas atmosféricas, precipitação intensa e, em alguns casos, tornados. Em razão da natureza altamente não linear dos processos atmosféricos envolvidos, esses fenômenos apresentam elevada variabilidade espacial e temporal, tornando sua previsão determinística de longo prazo limitada e reforçando a importância da modelagem estatística para sua caracterização climatológica (SCHUMACHER; RASMUSSEN, 2020).

Apesar dos avanços observacionais e computacionais, a caracterização dos extremos de vento no Brasil ainda enfrenta desafios importantes. A rede observacional apresenta distribuição espacial irregular e séries históricas descontínuas em diversas regiões, especialmente nas primeiras décadas de monitoramento. Embora os produtos de reanálise atmosférica (bases construídas pela integração entre observações e modelagem física) forneçam cobertura espacial contínua, eles tendem a suavizar os eventos extremos em razão da resolução dos modelos numéricos e da baixa densidade de observações, sobretudo no hemisfério Sul. Essas limitações dificultam a estimativa robusta da frequência, da intensidade e da distribuição espacial dos vendavais, principalmente para eventos raros, o que torna necessário o uso de técnicas estatísticas para reduzir as incertezas das análises climatológicas.

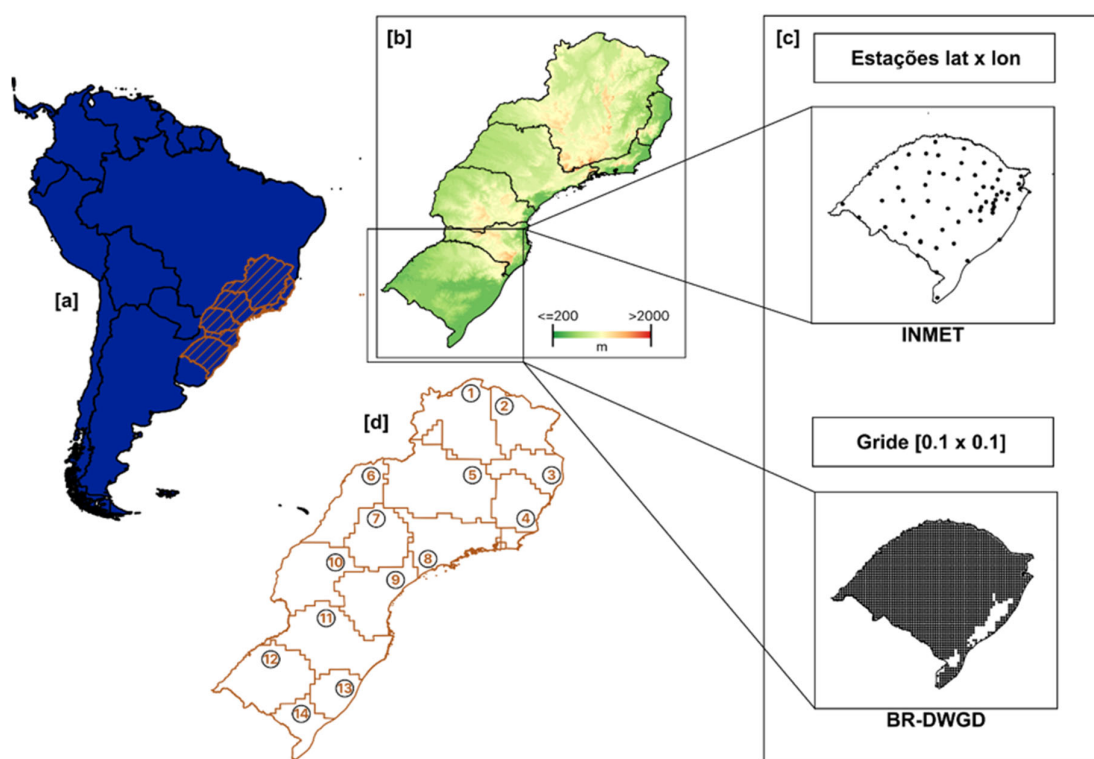
Com o objetivo de suprir essa lacuna, foi desenvolvida a **Base de Vendaval IRB(P&D)**, construída a partir da integração entre observações das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e dados de reanálise do ERA5, mediante técnicas de correção estatística e interpolação espacial. A base busca representar de forma mais consistente a intensidade e a distribuição espacial das rajadas máximas de vento em todo o território brasileiro, constituindo uma ferramenta para estudos climatológicos, avaliações de risco e aplicações no setor de seguros e resseguros.

Este relatório apresenta a metodologia empregada na construção da **Base de Vendaval IRB(P&D)**, incluindo os procedimentos de tratamento, correção e espacialização dos dados, bem como as análises de frequência, distribuição espacial e evolução temporal dos extremos de vento no Brasil. Os resultados fornecem subsídios para compreender os padrões climatológicos dos vendavais e aprimorar as avaliações de risco associadas a esse tipo de evento extremo.

## 2. Base climática de vendaval

A metodologia adotada para a construção da **Base de Vendaval IRB(P&D)** teve como objetivo representar eventos extremos de vento com menor efeito da suavização espacial inerente aos dados de reanálise atmosférica. Para isso, foi desenvolvida uma base histórica de dados meteorológicos interpolados e corrigidos, capaz de representar de forma mais realista a intensidade das rajadas máximas de vento sobre o território brasileiro.

A **figura 1** apresenta a área de estudo e a estrutura espacial dos dados utilizados. O painel (a) destaca os estados das regiões Sul e Sudeste, selecionados por apresentarem recorrência relevante de eventos de vento extremo. O painel (b) mostra a topografia do domínio. No painel (c), são apresentadas as estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e a grade espacial de alta resolução obtida após o processamento metodológico. Por fim, o painel (d) mostra as 14 regiões climáticas definidas pelo agrupamento espacial.



**Figura 1 - Delimitação da área de estudo (a), topografia do domínio (b), distribuição das estações meteorológicas da rede INMET e representação da grade espacial de análise em um estado de exemplo (c), além da divisão do domínio em 14 regiões climáticas após o agrupamento espacial (d). A regionalização foi realizada com a grade de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  da Base de Vendaval IRB(P&D).**

**Fonte:** Elaboração IRB(P&D). Dados: INMET; Base de Vendaval IRB(P&D).

**(i) Dados utilizados**

Foram empregados dois conjuntos de dados complementares. O primeiro corresponde às observações de 566 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), distribuídas de forma irregular pelo território brasileiro. O segundo é composto pelos dados de reanálise ERA5, produzidos pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF; HERSBACH *et al.*, 2020), em grade regular com resolução espacial aproximada de 30 km ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ). A reanálise é uma reconstrução consistente do tempo e do clima passados, obtida pela combinação de observações históricas (como dados de estações, satélites, navios e radares) com modelos meteorológicos. O produto funciona como uma estimativa histórica de variáveis como chuva, vento e temperatura, sendo especialmente útil em locais onde as medições diretas são incompletas.

Os dados observacionais do INMET foram utilizados como referência para representar as condições reais observadas em superfície, enquanto os dados do ERA5 forneceram a cobertura espacial contínua necessária para a geração dos campos corrigidos de vento em todo o território nacional.

**(ii) Variáveis analisadas**

Foram utilizadas as variáveis velocidade máxima da rajada de vento e direção da rajada máxima, disponíveis tanto nas estações meteorológicas do INMET quanto na reanálise ERA5. Originalmente, ambas as bases disponibilizam registros em frequência horária. Considerando que o objetivo deste estudo é caracterizar eventos extremos, os dados foram agregados para frequência diária. Para cada dia foi selecionada a maior rajada registrada e a respectiva direção observada no momento de sua ocorrência, permitindo construir séries históricas de máximos diários mais adequadas para análises de extremos climáticos.

**(iii) Correção e geração da base interpolada**

Inicialmente, realizou-se o pré-processamento das bases, incluindo a remoção de registros inconsistentes, a eliminação de duplicidades e a padronização das séries do INMET. Em seguida, cada estação meteorológica foi associada ao ponto de grade mais próximo do ERA5. Esse procedimento permitiu comparar diretamente os valores observados com os estimados pela reanálise, etapa necessária para calcular os resíduos utilizados na correção de viés.

Na etapa de correção, as observações do INMET foram adotadas como referência e os dados do ERA5 como fonte auxiliar. As estações representam as condições medidas em superfície, mas são espacialmente esparsas e podem apresentar falhas temporais decorrentes, por exemplo, de interrupções de equipamentos. O ERA5, por sua vez, apresenta cobertura espacial e temporal



homogênea, embora esteja sujeito a vieses e à suavização dos extremos. A combinação das duas fontes busca aproveitar as vantagens de cada conjunto de dados e reduzir suas limitações.

Para cada estação meteorológica, foram calculados os resíduos entre as rajadas máximas observadas e os respectivos valores estimados pelo ponto de grade mais próximo do ERA5. Posteriormente, os resíduos obtidos foram interpolados espacialmente por meio do método *Inverse Distance Weighting* (IDW; HONG et al., 2005), que consiste em uma média ponderada pela distância entre os pontos amostrais, atribuindo maior influência às observações localizadas nas proximidades do ponto estimado.

Por fim, os resíduos interpolados foram incorporados aos valores originais do ERA5, resultando em campos corrigidos de rajada máxima de vento para cada célula da grade. Esses campos foram posteriormente espacializados em uma grade de aproximadamente 10 km ( $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ ), compatível com a estrutura do produto *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BR-DWGD), ilustrado na [figura 1c](#) (XAVIER; KING; SCANLON, 2016). Dessa forma, a base final combina a cobertura contínua da reanálise com a maior fidelidade local das estações meteorológicas, reduzindo a suavização típica dos produtos de reanálise.

#### (iv) Agrupamento espacial

Após a geração da base corrigida, foi realizada uma etapa de regionalização climática para identificar áreas com comportamento semelhante quanto à ocorrência e à intensidade dos eventos extremos de vento. Aplicou-se o método de agrupamento espacial desenvolvido por ALMEIDA et al. (2026), que resultou em 14 regiões dentro do domínio de estudo. O procedimento utilizou Análise de Componentes Principais (PCA) para reduzir a dimensionalidade dos dados, seguida do algoritmo *k-means* para formar os grupos e avaliar o número adequado de regiões. Essa regionalização reduz a heterogeneidade dentro dos grupos, facilita a interpretação dos resultados e fornece uma base consistente para as análises subsequentes.

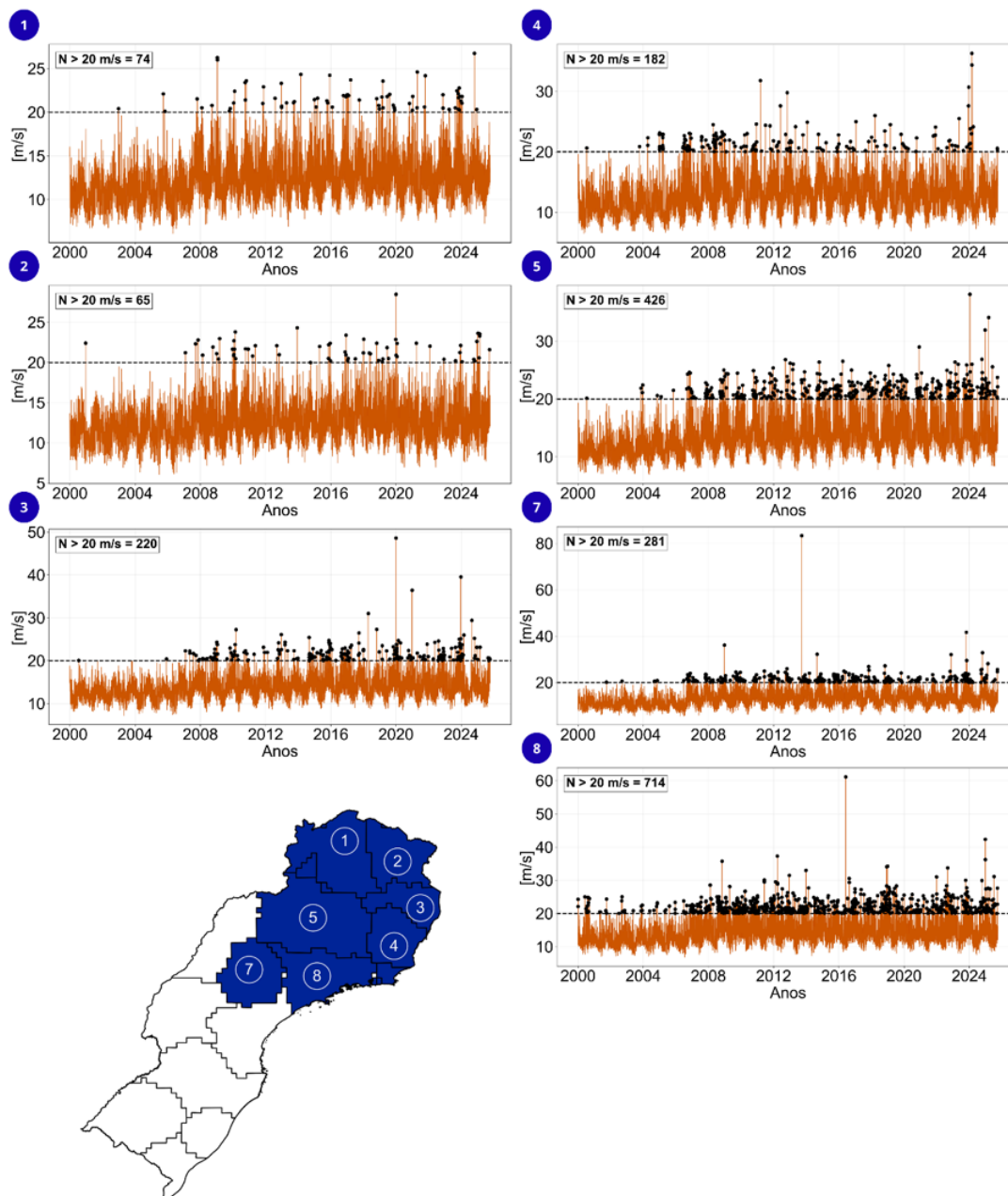
Para caracterizar o comportamento probabilístico das rajadas máximas de vento, foi empregada a distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV). Essa abordagem permite estimar a magnitude das rajadas associadas a diferentes períodos de retorno e identificar áreas mais suscetíveis a eventos severos. A metodologia de aplicação da GEV e o processo de agrupamento espacial foram apresentados no [Relatório nº 001/26](#), intitulado [“Eventos Climáticos Deflagrados no Brasil - Base de Extremos IRB\(P&D\)”](#).

É importante ressaltar que a [Base de Vendaval IRB\(P&D\)](#) foi desenvolvida para representar o campo de vento associado a sistemas atmosféricos de escala sinótica, como ciclones extratropicais e frentes

frias. Dessa forma, fenômenos de menor escala, como tornados, microexplosões e tempestades convectivas localizadas, não são explicitamente representados pela base e podem produzir rajadas pontuais superiores às velocidades estimadas. Assim, diferenças entre os valores observados em estações ou em registros locais e aqueles representados pela base refletem, em parte, as limitações inerentes à resolução espacial dos dados utilizados, sem comprometer sua capacidade de caracterizar os padrões regionais dos eventos extremos de vento.

### 3. Caracterização espaço-temporal

As figuras 2 e 3 apresentam, respectivamente, as regiões localizadas nas porções centro-norte e centro-sul do domínio, permitindo comparar o comportamento da rajada máxima diária em diferentes áreas do Sul e do Sudeste do Brasil. São mostradas as séries históricas de cada região climática entre **01/01/2000 e 08/10/2025**. O limiar de **20 m/s** (72 km/h) foi adotado como referência para identificar ocorrências de vendaval, considerando os impactos desse nível de vento sobre propriedades, construções e culturas agrícolas (MONTEIRO, 2009). As linhas tracejadas indicam o limiar, e os pontos destacados representam os dias em que a rajada máxima o superou. De modo geral, observa-se elevada variabilidade temporal entre as regiões, algumas das quais apresentam maior recorrência de excedências.



**Figura 2 - Séries de rajada máxima diária nas regiões climáticas da** porção centro-norte do domínio, entre 2000 e 2025. A linha tracejada indica o limiar de 20 m/s adotado como referência para eventos de vendaval. Apenas a porção centro-norte é apresentada para evitar sobreposição de informações.

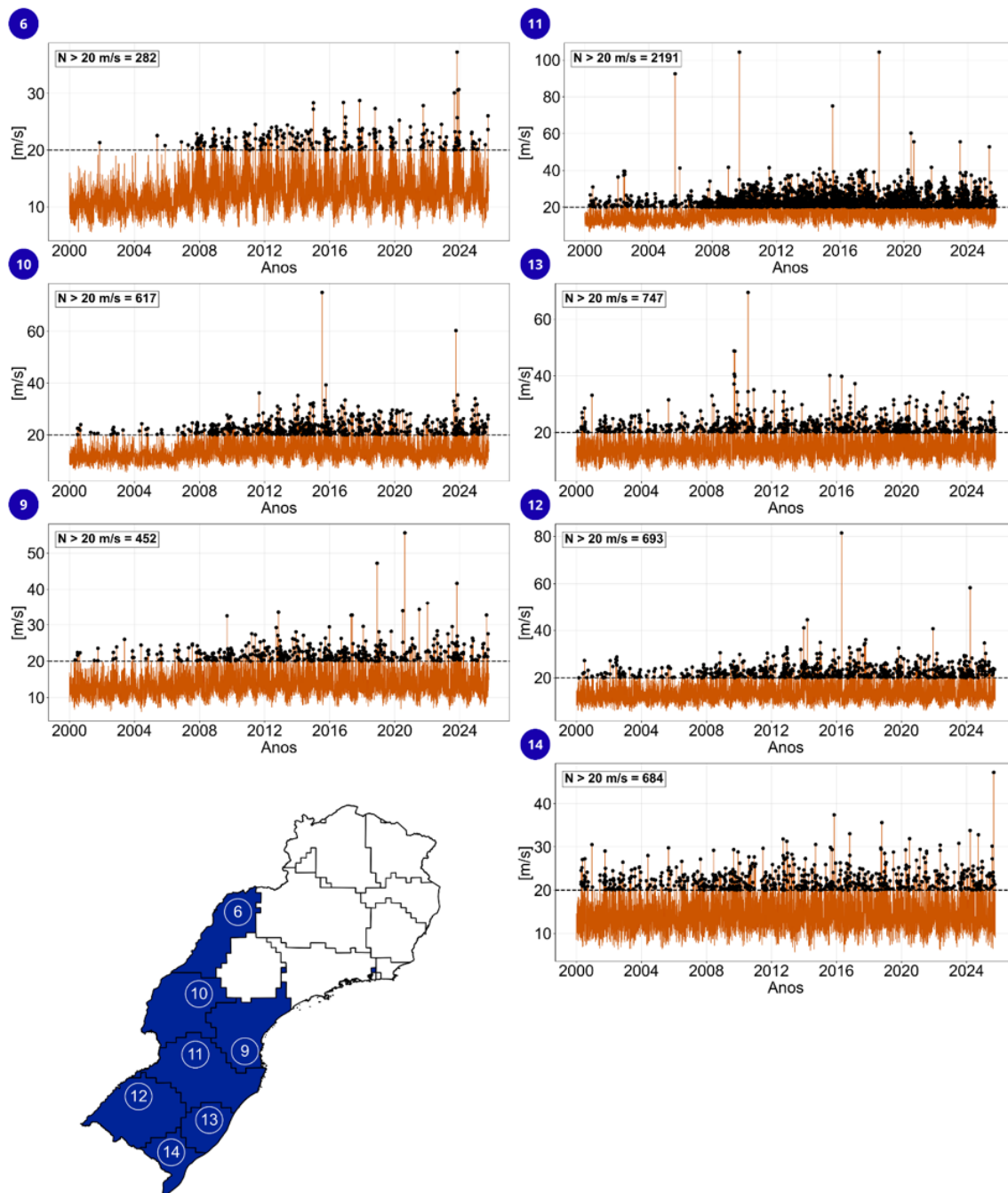
**Fonte:** Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de Vendaval IRB(P&D).

Na porção centro-norte do domínio, as regiões **5, 7 e 8** (Figura 2) apresentam maior concentração de registros de rajadas elevadas ao longo do período. Nessas regiões, os valores ultrapassam de forma

expressiva o limiar de **20 m/s**. As regiões **7** e **8**, em particular, registram episódios acima de 60 m/s, indicando maior suscetibilidade a vendavais de alta magnitude.

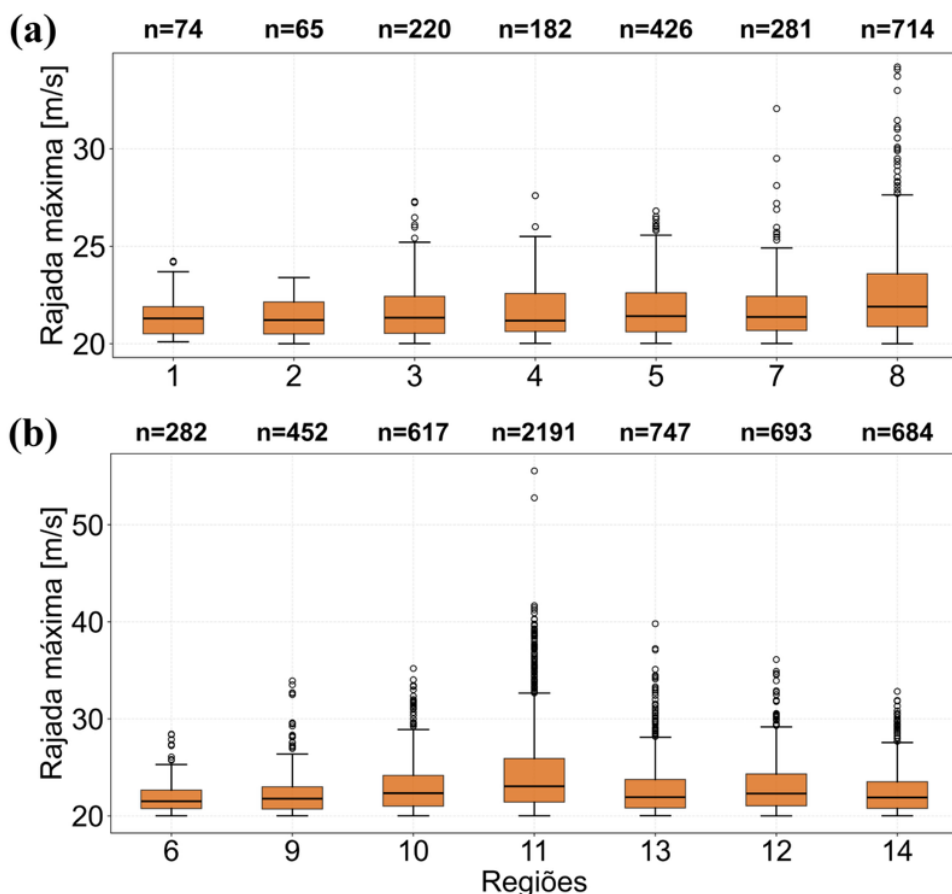
As regiões **3** e **4** **também** apresentam frequência relevante de excedências do limiar, mas, em geral, com rajadas menos intensas do que as observadas nas regiões mais extremas. O resultado evidencia uma distinção importante entre áreas marcadas principalmente pela magnitude dos eventos, como as regiões **5**, **7** e **8**, e áreas com recorrência relevante, porém menor severidade, como as regiões **3** e **4**. Esses comportamentos representam perfis distintos de exposição aos extremos de vento.

Na porção centro-sul do domínio (**Figura 3**), as regiões **10**, **11**, **12** e **13** concentram os eventos de maior magnitude ao longo do período analisado. A região **11** se destaca tanto pela quantidade de ocorrências quanto pela intensidade das rajadas. As regiões **10**, **11** e **13** combinam valores elevados com alta frequência de excedências do limiar de 20 m/s, conforme sintetizado na **figura 4**. Esse comportamento indica um perfil de risco mais elevado, caracterizado pela associação entre severidade e recorrência.



**Figura 3 - Séries de rajada máxima diária nas regiões climáticas da** porção centro-sul do domínio, entre 2000 e 2025. A linha tracejada indica o limiar de 20 m/s adotado como referência para eventos de vendaval. Apenas a porção centro-sul é apresentada para evitar sobreposição de informações.

**Fonte:** Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de Vendaval IRB(P&D).



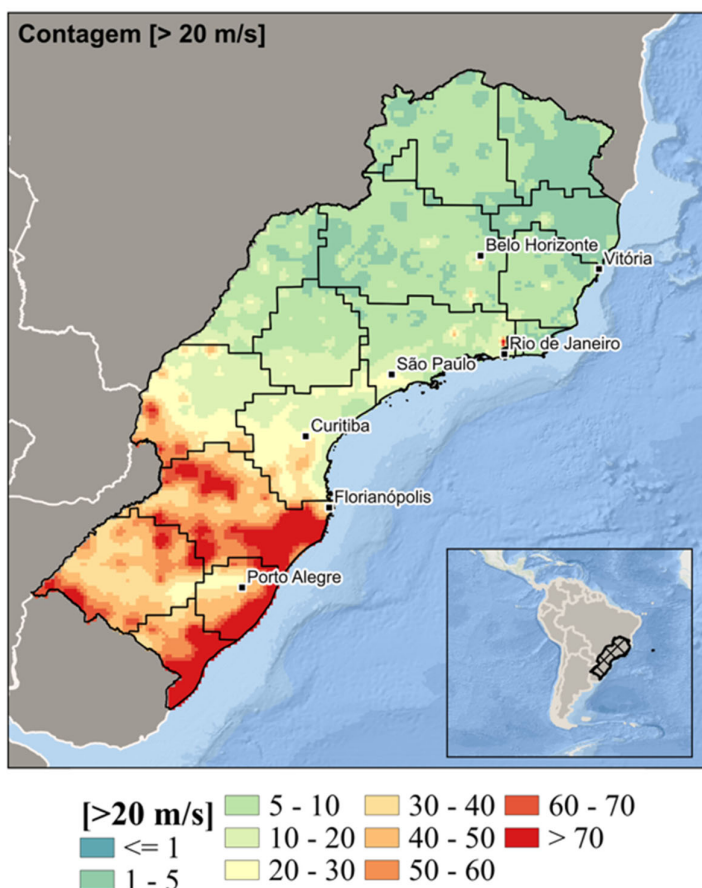
**Figura 4 - Distribuição da rajada máxima diária em cada região climática. O painel superior (a) apresenta as regiões da porção norte do domínio, e o painel inferior (b), as regiões da porção sul. Adotou-se o limiar de 20 m/s para representar ocorrências de vendaval. Os cinco maiores valores atípicos foram omitidos para favorecer a leitura, mas a contagem “n” de eventos acima do limiar foi mantida.**

**Fonte:** Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de Vendaval IRB(P&D).

A análise da rajada máxima diária mostra que as regiões situadas mais ao sul da porção centro-sul concentram simultaneamente as maiores magnitudes e a maior frequência de vendavais. Esse padrão é evidenciado pela quantidade de excedências do limiar de 20 m/s (Figuras 3 e 5) e pela presença de extremos mais intensos ao longo do período. A combinação de severidade e recorrência caracteriza essas regiões como áreas de maior suscetibilidade a extremos de vento, enquanto as demais apresentam, em geral, menor intensidade ou menor frequência relativa.

A concentração espacial dos extremos também pode ser observada na figura 6, que apresenta os maiores registros em cada ponto de grade em três períodos: 2000-2009, 2010-2019 e 2020-2025. Os painéis indicam rajadas intensas em diferentes setores da área de estudo, com maior densidade de

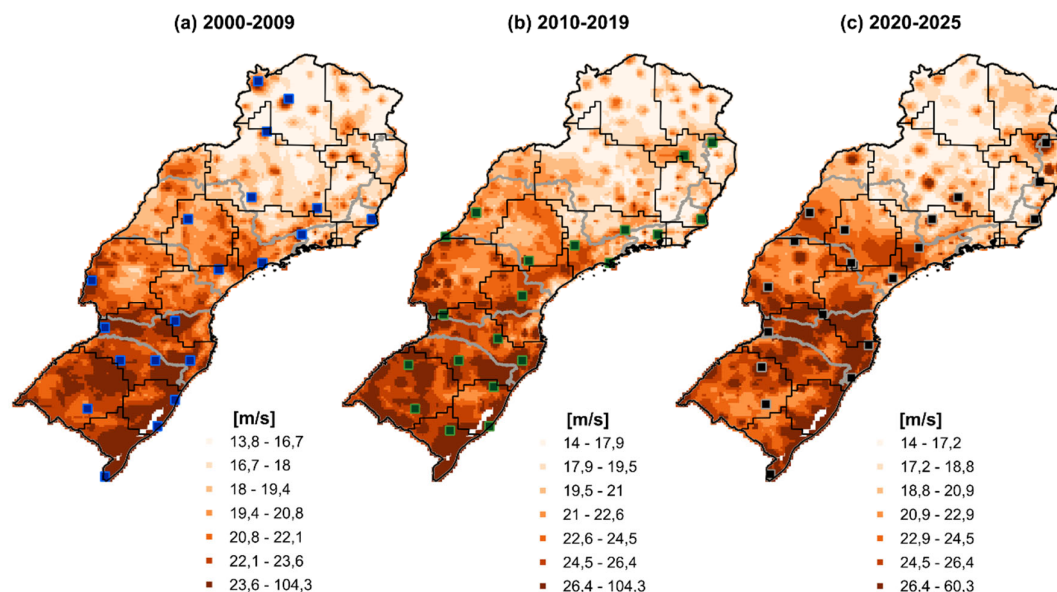
pontos de valores elevados na porção sul do domínio. Nos dois primeiros períodos, os máximos pontuais chegam a 104,3 m/s. Por se tratar de valores excepcionalmente altos, sua interpretação deve considerar a natureza pontual do registro e as limitações descritas para eventos de pequena escala.



**Figura 5 - Contagem, por ponto de grade, dos registros de rajada máxima acima de 20 m/s.**

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de Vendaval IRB(P&D).

Embora a comparação visual entre os períodos sugira redução dos valores máximos no intervalo mais recente, essa interpretação deve ser feita com cautela. A [figura 6](#) apresenta apenas os maiores registros por ponto, e não uma série temporal contínua de frequência, intensidade média ou tendência estatística. Portanto, os mapas não permitem concluir que houve diminuição dos extremos ao longo do tempo. No painel de 2020-2025, os maiores registros parecem se concentrar relativamente mais nas porções central e leste da região centro-sul, o que sugere uma possível reorganização espacial dos eventos mais intensos dentro do domínio analisado.



**Figura 6 - Distribuição dos maiores registros de rajada máxima por ponto de grade em três períodos: 2000-2009 (a), 2010-2019 (b) e 2020-2025 (c). Os marcadores indicam os locais dos 20 maiores registros em cada período, e a escala de cores representa a magnitude das rajadas.**

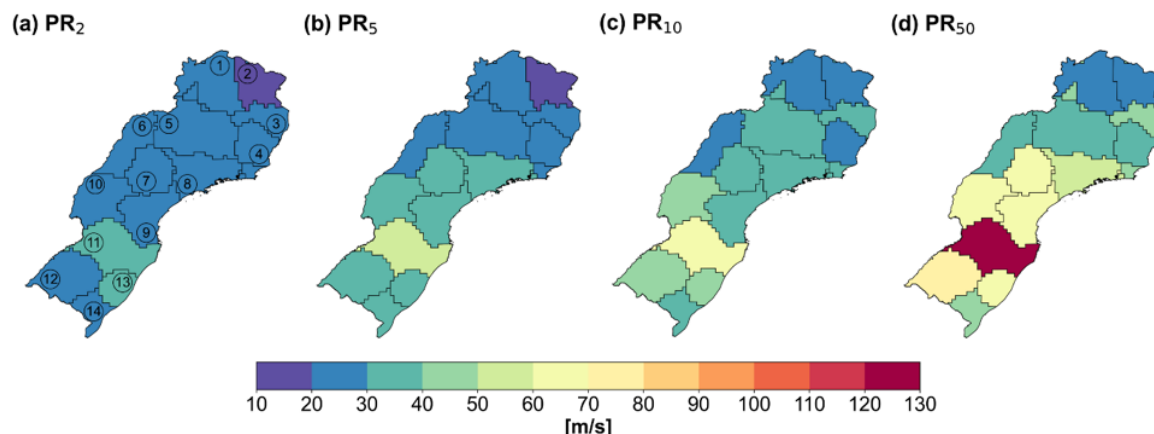
Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de Vendaval IRB(P&D).

#### 4. Modelagem dos extremos e períodos de retorno

A análise de extremos climáticos é uma ferramenta fundamental da climatologia aplicada, pois permite avaliar a frequência e a intensidade de eventos severos (KATZ et al., 2002). A **figura 7** apresenta os níveis de retorno da **rajada máxima de vento** estimados pela distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV), com base nos máximos anuais de cada região. São considerados períodos de retorno de 2, 5, 10 e 50 anos.

De forma geral, observa-se um aumento monotônico dos valores de ventos extremos à medida que o período de retorno cresce, conforme esperado. Esse padrão reflete a natureza probabilística dos extremos, uma vez que *“um evento extremo é definido como um evento raro dentro da sua distribuição estatística de referência em um determinado local”* (WMO, 2009, p. 6). Nesse sentido, a Teoria dos Valores Extremos fornece a base estatística para descrever tais eventos (COLES, 2001).





**Figura 7 - Níveis de retorno da rajada máxima diária de vento estimados para 2 anos (a), 5 anos (b), 10 anos (c) e 50 anos (d). A distribuição GEV foi ajustada separadamente para cada região climática.**

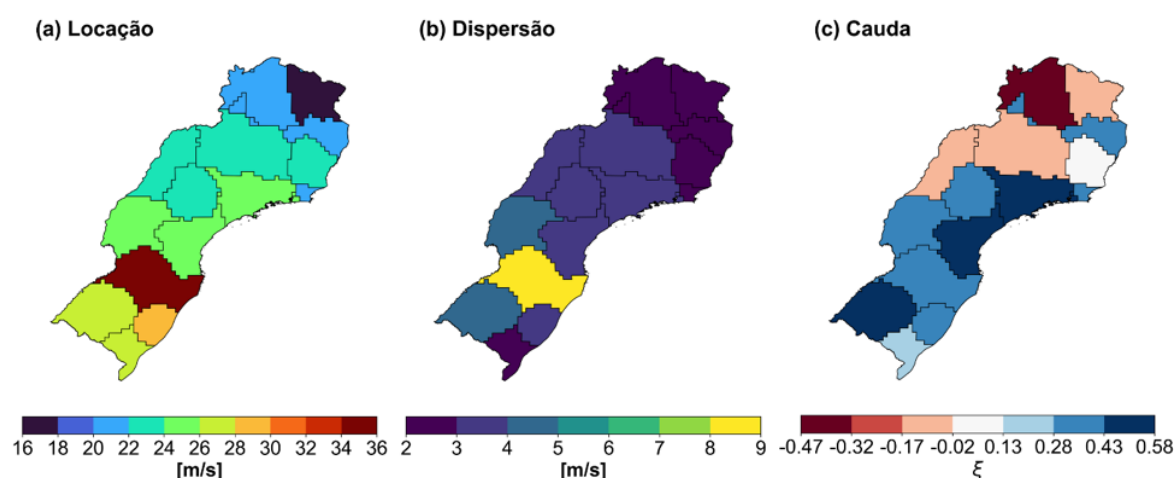
Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de Vendaval IRB(P&D).

Os maiores níveis de retorno concentram-se nas regiões da porção centro-sul do domínio, **especialmente nas regiões 7, 9, 10, 11, 12 e 13**. A região 11 apresenta as maiores intensidades, sobretudo no período de retorno de 50 anos (PR50). Nessa região, o nível de retorno estimado para 50 anos supera 120 m/s. Sob a hipótese de que o comportamento climático permaneça estável, esse nível corresponde a uma probabilidade anual de excedência de aproximadamente 2%. Isso não significa que o evento ocorrerá de forma regular a cada 50 anos; ele pode acontecer antes, depois ou mais de uma vez nesse intervalo.

A **figura 8** apresenta a estimação dos parâmetros da distribuição GEV para cada uma das regiões do domínio. São apresentados os parâmetros de locação ( $\mu$ ), dispersão ( $\sigma$ ) e forma ( $\xi$ ), que descrevem, respectivamente, a tendência central, a variabilidade e o comportamento da cauda da distribuição dos extremos de rajada máxima de vento. O parâmetro de locação (**Figura 8a**) representa a posição da distribuição dos valores extremos, estando diretamente relacionado à magnitude média das rajadas máximas. Observam-se os maiores valores nas regiões **11, 12, 13 e 14**, indicando maior concentração de extremos de vento nessas áreas em comparação às demais regiões.

O parâmetro de dispersão (**Figura 8b**) representa a variabilidade dos extremos em torno do parâmetro de locação. Seus maiores valores ocorrem nas regiões mais ao sul do domínio, especialmente nas regiões **10, 11 e 12**, indicando maior amplitude das rajadas máximas. Em contraste, as regiões mais ao norte (**1, 2 e 3**) apresentam menor dispersão e, portanto, menor variabilidade dos extremos de vento.

O parâmetro de forma (Figura 8c) descreve o comportamento da cauda da distribuição. Valores positivos indicam cauda mais pesada e maior possibilidade estatística de rajadas excepcionalmente intensas; valores negativos indicam uma distribuição com limite superior, reduzindo a probabilidade de valores muito elevados. As regiões 8, 9 e 12 apresentam as caudas mais pronunciadas, seguidas pelas regiões 7, 10, 11 e 13. Esse resultado é coerente com os níveis de retorno da figura 7, nos quais essas regiões mostram maior crescimento entre o PR5 e o PR50. A região 11, por sua vez, mantém as maiores velocidades absolutas e valores elevados dos parâmetros de locação e dispersão.



**Figura 8 - Parâmetros da distribuição GEV ajustada aos máximos anuais de rajada de vento em cada região climática do Sul e do Sudeste do Brasil: localização,  $\mu$  (a); dispersão,  $\sigma$  (b); e forma,  $\xi$  (c).**

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de Vendaval IRB(P&D).

As regiões situadas mais ao norte do domínio (1-4) apresentam, em geral, menores valores de vento extremo. Os parâmetros de locação e dispersão são mais baixos, indicando menores magnitudes típicas dos máximos anuais e menor variabilidade em torno delas. O crescimento dos níveis estimados também é menos acentuado à medida que aumenta o período de retorno (Figura 7). Esse comportamento é coerente com a menor ocorrência de rajadas superiores a 20 m/s observada nessas regiões (Figura 2).

O padrão espacial é compatível com a atuação de diferentes sistemas meteorológicos capazes de produzir rajadas intensas, como frentes frias, ciclones extratropicais e sistemas convectivos organizados (REBOITA et al., 2010, 2012). Entretanto, a variabilidade entre as regiões indica que os extremos resultam da combinação de processos atmosféricos em diferentes escalas e não podem ser atribuídos exclusivamente a um único sistema. Em algumas regiões, o crescimento mais acentuado dos níveis de retorno indica uma cauda mais pesada da distribuição e maior potencial para rajadas

muito intensas em eventos raros. Essa informação é particularmente relevante para a avaliação de risco, a precificação atuarial e a estruturação de instrumentos de transferência de risco.

## 5. Mapeamento do risco relativo

As 14 regiões definidas no domínio para a caracterização dos eventos de vento extremo oferecem uma representação dos padrões climatológicos predominantes na área de estudo, constituindo uma primeira escala de regionalização do risco. Essa regionalização é útil para comparar grandes porções do território e reconhecer padrões. No entanto, cada região abrange um espaço amplo e pode conter localidades com frequências e intensidades de vendaval bastante diferentes. Por isso, a classificação regional é uma boa referência de contexto, mas não substitui uma análise mais detalhada para decisões locais.

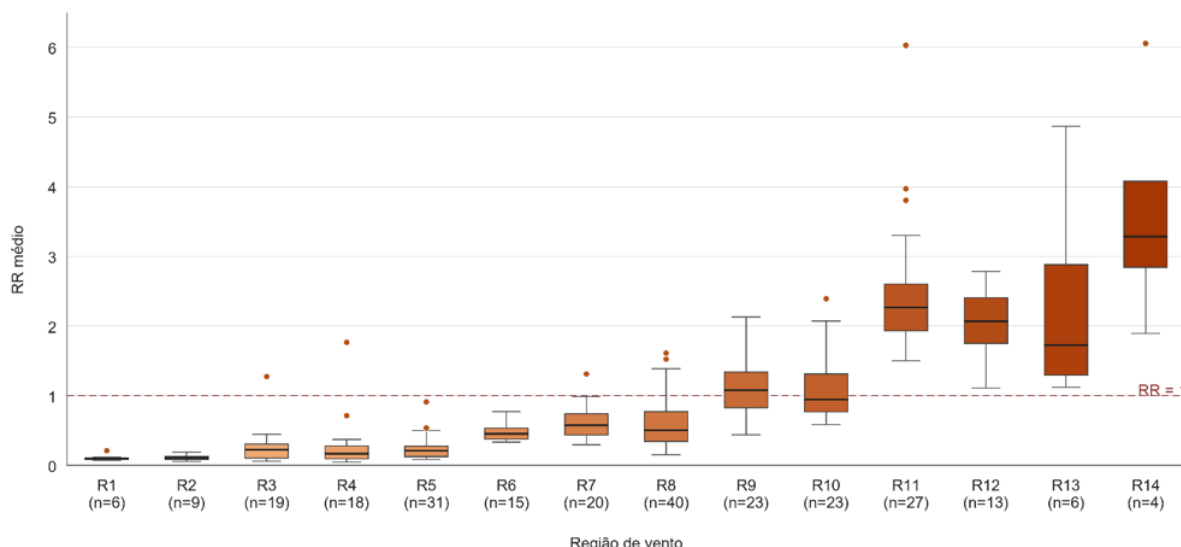
Para representar essa variabilidade com maior detalhe, a análise foi refinada para a escala das microrregiões geográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), utilizadas como unidades territoriais de análise. No domínio de estudo, foram consideradas 254 microrregiões. A **figura 9** organiza os resultados segundo a região de vento, de R1 a R14, em que cada microrregião está localizada. Assim, cada distribuição mostra quanto o risco relativo varia dentro de uma mesma região climática.

A estimativa foi obtida por um modelo bayesiano hierárquico espaço-temporal inspirado no mapeamento de doenças (*disease mapping*), abordagem criada para comparar riscos em pequenas áreas quando os eventos são raros ou os dados estão distribuídos de forma desigual (BESAG; YORK; MOLLIÉ, 1991; KNORR-HELD, 2000). Neste estudo, a estrutura foi adaptada para representar ocorrências de rajadas iguais ou superiores a 20 m/s (72 km/h). Para cada microrregião e mês, o número de dias com ocorrência é comparado ao número esperado com base na taxa sazonal média de todo o domínio e na quantidade de observações válidas disponíveis.

O modelo considera três fontes de variação. O componente espacial reconhece que microrregiões vizinhas tendem a compartilhar parte do padrão de risco, mesmo quando pertencem a regiões de vento diferentes. O componente temporal representa mudanças graduais entre meses consecutivos. Já a interação espaço-temporal identifica desvios específicos de cada microrregião em cada período, preservando alterações locais que não são explicadas apenas pelos padrões espacial e temporal. A estimação foi realizada pelo método INLA, que permite ajustar essa estrutura e calcular as incertezas de forma computacionalmente eficiente (RUE; MARTINO; CHOPIN, 2009).

O principal resultado é o risco relativo (RR), que compara a frequência estimada de vendavais em uma microrregião com a frequência esperada para o domínio analisado. RR menor que 1 indica frequência

abaixo da referência; RR igual a 1 indica valor compatível com a média; e RR maior que 1 indica frequência acima da referência. Por exemplo, RR igual a 2 representa uma frequência estimada aproximadamente duas vezes maior que a esperada, enquanto RR igual a 4 representa cerca de quatro vezes o valor esperado.



**Figura 9 - Variação do risco relativo (RR) médio posterior entre as microrregiões, agrupadas nas regiões de vento R1 a R14. A linha tracejada indica  $RR = 1$ , e os pontos representam apenas os valores atípicos de cada distribuição.**

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de Vendaval IRB(P&D).

A **figura 9** evidencia aumento do risco em direção à porção centro-sul do domínio. As microrregiões agrupadas em **R1-R8** apresentam, em geral, valores abaixo da média; **R9-R10** ficam mais próximas de  $RR = 1$ ; e **R11-R14** concentram as maiores medianas e a maior dispersão. A variabilidade dentro de cada grupo também mostra que microrregiões pertencentes a uma mesma região de vento podem apresentar níveis de risco distintos.

## RR < 1

### Risco abaixo da média

A área apresenta risco comparativamente menor.

## RR = 1

### Risco próximo da média

A estimativa está alinhada ao valor esperado.

## RR > 1

### Risco acima da média

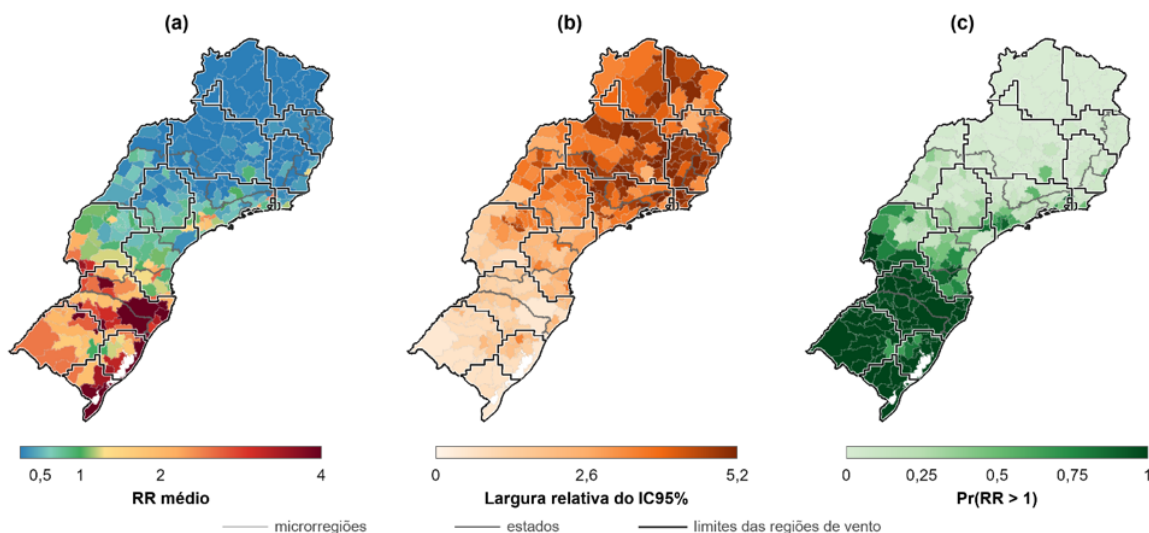
Ex.:  $RR = 2$  indica risco aproximadamente duas vezes maior.

Em comparação com as estimativas da distribuição GEV, observa-se um padrão espacial semelhante, com maior severidade dos extremos no sul do domínio, especialmente em **R11** e em áreas do leste e

do litoral sul de Santa Catarina. As análises, contudo, respondem a perguntas diferentes: a GEV estima a intensidade de eventos raros e seus níveis de retorno em regiões amplas, enquanto o RR mede a frequência de rajadas superiores a 20 m/s em escala espacial mais detalhada. Assim, uma área pode apresentar RR elevado por registrar rajadas acima do limiar com maior frequência, mesmo que não concentre os eventos de maior intensidade absoluta.

A **figura 10** detalha os resultados por microrregião em três leituras complementares: RR médio posterior, largura relativa do intervalo de credibilidade de 95% (IC95%) e probabilidade posterior de  $RR > 1$ . Em conjunto, essas medidas mostram a magnitude do risco, a precisão da estimativa e a força da evidência de que o risco está acima da média. A **figura 10a** apresenta o RR médio posterior, a estimativa central do modelo. Os maiores valores concentram-se principalmente na região Sul, com destaque para áreas de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul, além de ocorrências localizadas em São Paulo e no Rio de Janeiro. RR igual a 2, por exemplo, indica frequência estimada de rajadas acima do limiar aproximadamente duas vezes maior que a esperada para o domínio.

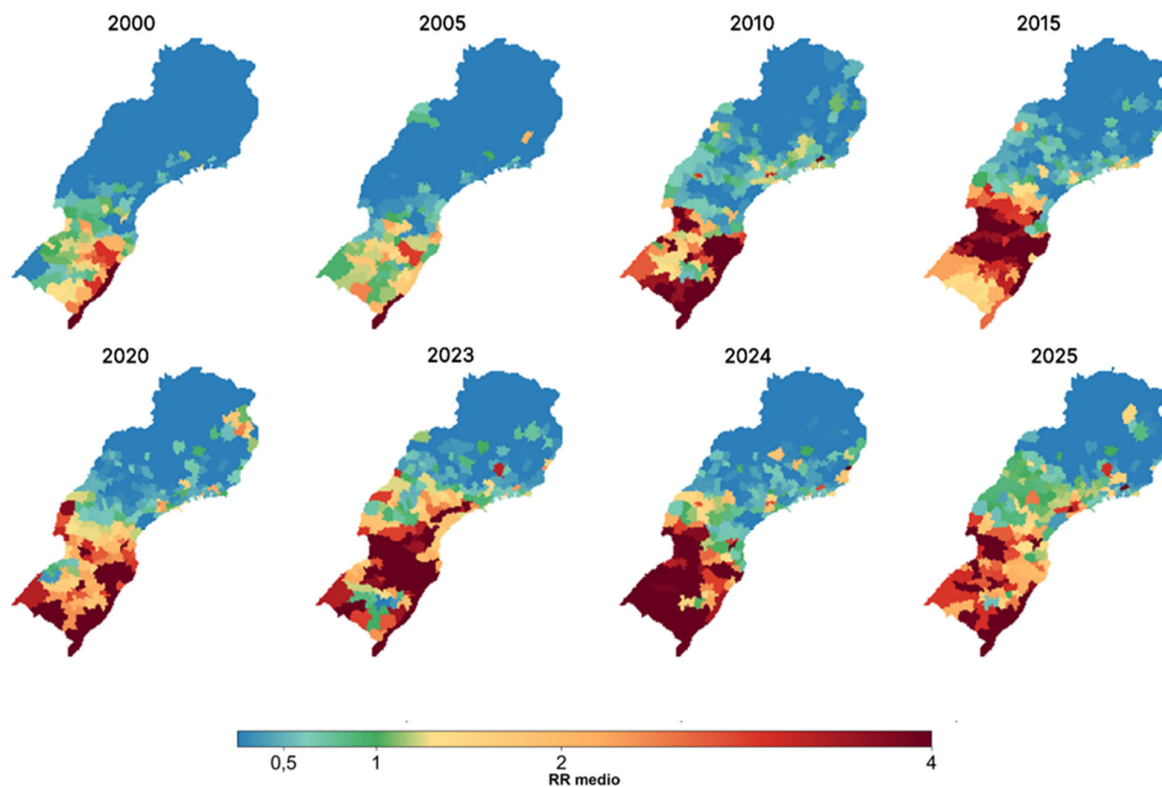
Como o modelo bayesiano fornece uma distribuição de resultados possíveis, cada estimativa de RR é acompanhada por um intervalo de credibilidade de 95% (IC95%). Considerando os dados e as premissas do modelo, há 95% de probabilidade posterior de que o RR esteja dentro desse intervalo. Intervalos mais estreitos indicam maior precisão, enquanto intervalos mais amplos revelam maior incerteza. Na **figura 10b**, a largura do IC95% é dividida pelo RR médio para permitir a comparação entre áreas com diferentes níveis de risco. A **figura 10c** mostra a probabilidade posterior de  $RR > 1$ , isto é, a probabilidade estimada de a microrregião apresentar frequência de vendavais superior à referência. Valores próximos de 1 indicam forte evidência de risco acima da média; valores próximos de 0,5 indicam resultado inconclusivo; e valores próximos de 0 indicam forte evidência de risco abaixo da média.



**Figura 10 - Risco relativo (RR) médio posterior para rajadas de vento  $\geq 20$  m/s:  $RR < 1$ , abaixo da média;  $RR = 1$ , compatível com a média; e  $RR > 1$ , acima da média (a). Largura relativa do intervalo de credibilidade de 95%, calculada por  $(q_{97,5} - q_{2,5}) / RR$  médio (b). Probabilidade posterior de  $RR > 1$  (c). Os contornos das microrregiões, dos estados e das regiões de vento são identificados na legenda.**

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de Vendaval IRB(P&D).

A **figura 11** apresenta a evolução anual do risco relativo e permite acompanhar as mudanças do padrão espacial ao longo do tempo. A região Sul mantém os maiores níveis de risco para rajadas  $\geq 20$  m/s em grande parte da série, enquanto 2023 e 2024 registram o maior número de microrregiões com RR elevado. Embora a concentração permaneça predominantemente ao sul, a distribuição espacial varia entre os anos. Como o RR é uma estimativa, a comparação temporal deve considerar também os respectivos intervalos de credibilidade, apresentados na **figura A1** do **Anexo**.



**Figura 11 - Evolução anual do risco relativo (RR) médio posterior para rajadas de vento  $\geq 20$  m/s. Tons mais escuros representam valores mais elevados de RR.**

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de Vendaval IRB(P&D).

## 6. Eventos históricos

### 6.1. Eventos no Estado de São Paulo

Esta seção analisa três episódios de vendaval ocorridos no Estado de São Paulo e sua representação na [Base de Vendaval IRB\(P&D\)](#). A tabela 1 apresenta o histórico das maiores rajadas registradas por estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) entre 2010 e 2025. Os valores mais elevados ocorreram em Interlagos, Barueri, Mirante de Santana e no Aeroporto Campo de Marte, com impactos relevantes sobre a infraestrutura, o sistema elétrico e as atividades econômicas.

O primeiro evento analisado ocorreu em **11/10/2024**, quando um sistema meteorológico provocou vendavais generalizados na região metropolitana de São Paulo (RMSP). A estação de Interlagos registrou rajada de 29,8 m/s (107,3 km/h), e o episódio ocasionou queda de árvores, destelhamentos, enxurradas e interrupções no fornecimento de energia elétrica em diversos municípios ([Figura 12a](#)).

A **Base de Vendaval IRB(P&D)** estimou velocidades máximas de até 28 m/s (100,8 km/h) (Figura 12d), valor próximo ao observado pelo INMET (Tabela 1).

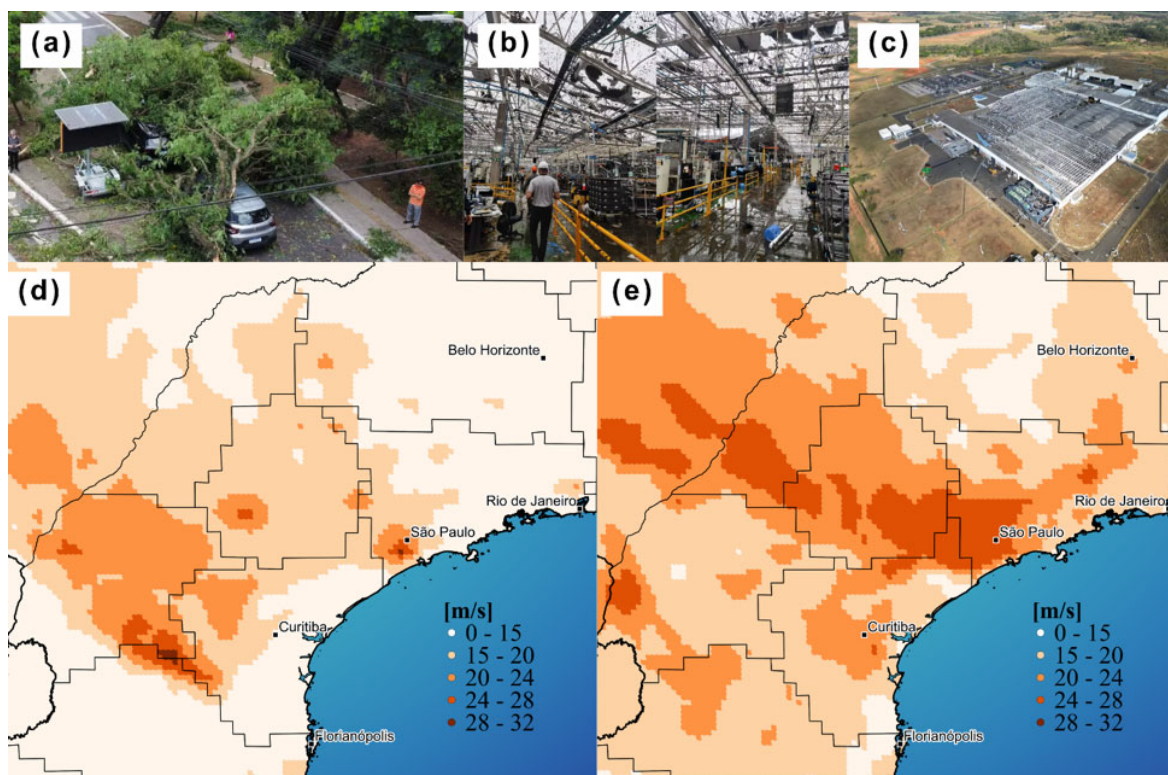
**Tabela 1 - Maiores rajadas de vento registradas na região metropolitana de São Paulo entre 2010 e 2025.**

| Posição | Velocidade (m/s) | Data       | Estação                  |
|---------|------------------|------------|--------------------------|
| 1       | 29,8             | 11/10/2024 | Interlagos               |
| 2       | 29,2             | 03/11/2023 | Barueri                  |
| 3       | 28,2             | 25/11/2010 | Mirante de Santana       |
| 4       | 28               | 30/01/2019 | Barueri                  |
| 5       | 27,3             | 22/09/2025 | Aeroporto Campo de Marte |
| 6       | 26,6             | 21/02/2011 | Mirante de Santana       |
| 7       | 25               | 27/09/2023 | Mirante de Santana       |
| 8       | 24,6             | 30/01/2019 | Mirante de Santana       |
| 9       | 24,3             | 05/06/2012 | Mirante de Santana       |
| 10      | 23,8             | 24/08/2023 | Barueri                  |
| 11      | 23               | 10/12/2025 | Mirante de Santana       |

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: INMET.

O segundo episódio ocorreu em **22/09/2025**, quando uma tempestade severa atingiu o interior do Estado de São Paulo e provocou impactos sociais, econômicos e industriais. Os ventos causaram danos estruturais graves na fábrica de motores da Toyota em Porto Feliz e interromperam temporariamente as operações de Sorocaba e Indaiatuba (Figura 12b-c). Durante o episódio, foram registradas rajadas próximas de 25 m/s (90 km/h). A **Base de Vendaval IRB(P&D)** representou a distribuição regional do evento e estimou velocidades de até 28 m/s (100,8 km/h) na área afetada (Figura 12e).

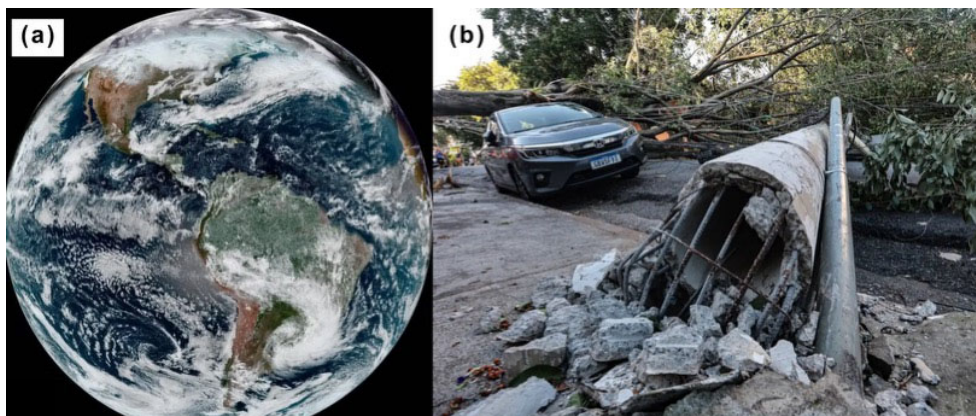




**Figura 12 - Impactos associados aos vendavais de 11/10/2024 na Zona Sul de São Paulo (a) e de 22/09/2025 em Porto Feliz (b-c), além da distribuição espacial das rajadas máximas estimadas para 11/10/2024 (d) e 22/09/2025 (e). Mapas elaborados com dados diários da Base de Vendaval IRB(P&D).**

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de Vendaval IRB(P&D).

O terceiro caso corresponde ao evento de 10/12/2025, associado a um ciclone extratropical que favoreceu ventos intensos entre o Sul e o Sudeste do Brasil. A [figura 13a](#), produzida a partir de dados do satélite GOES-16, mostra a banda de nebulosidade associada ao ciclone e à frente fria, com circulação horária no hemisfério Sul. Embora os maiores acumulados de chuva tenham ocorrido na região Sul, a região metropolitana de São Paulo registrou danos expressivos provocados pelo vento. O evento causou quedas de árvores, interrupções nas operações aéreas e afetou, no pico, cerca de 2,2 milhões de clientes da rede. Na estação Mirante de Santana, foram registradas rajadas de até 23 m/s (82,8 km/h) ([Tabela 1](#)), com um período prolongado de ventos intensos e pouca chuva na capital.



**Figura 13 - Ciclone extratropical observado pelo satélite GOES-16 em 10/12/2025, às 17h10 UTC (a), e impactos das fortes rajadas de vento no município de São Paulo (b).**

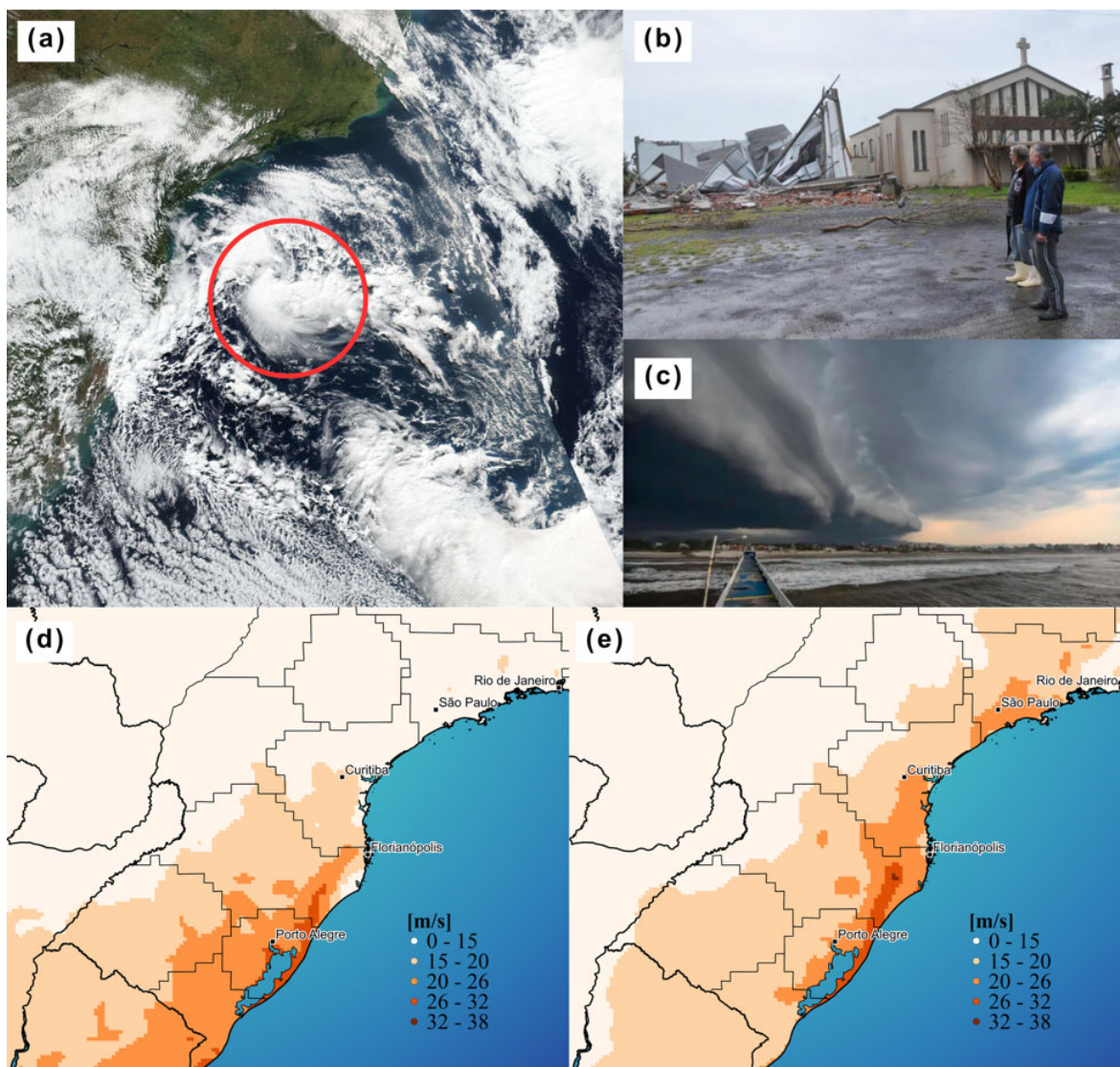
Fonte: NOAA.

A concordância entre os registros observacionais do INMET e os campos gerados pela base reforça sua capacidade de caracterizar episódios de vendaval em ambientes urbanos complexos, contribuindo para avaliações de risco e aplicações voltadas ao setor de seguros e resseguros.

## 6.2. Ciclone Yakecan

Em maio de 2022, a região Sul do Brasil foi afetada pela tempestade subtropical Yakecan, sistema formado sobre o Atlântico Sul, próximo à costa do Rio Grande do Sul, que atuou entre os dias 17 e 18 de maio. Segundo nota conjunta do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Marinha do Brasil (INMET, 2022), o sistema foi classificado como tempestade subtropical durante o dia 17, apresentando potencial de intensificação nas horas subsequentes. A [figura 14a](#) evidencia a estrutura do ciclone, com núcleo bem definido sobre o Atlântico Sul e bandas de nebulosidade organizadas, características compatíveis com intensa instabilidade atmosférica e ventos severos.

A atuação do Yakecan provocou vendavais em diversos municípios da região Sul, especialmente no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina ([Figura 14b-c](#)). Registros do INMET indicaram rajadas de até 30,5 m/s (110 km/h) entre o extremo sul e o litoral gaúcho e o sul catarinense. O evento também afetou Porto Alegre, Caxias do Sul, Três Cachoeiras, Bento Gonçalves e Florianópolis, com interrupções no fornecimento de energia, quedas de árvores e danos estruturais (INMET, 2022).



**Figura 14 - Imagem de satélite da tempestade subtropical Yakecan em 18/05/2022, com o núcleo do sistema destacado em vermelho (a); impactos em Três Cachoeiras no mesmo dia (b); registro visual da tempestade no litoral gaúcho em 18/05/2022 (c); e campos de rajada máxima estimados pela Base de Vendaval IRB(P&D) para 17/05/2022 (d) e 18/05/2022 (e).**

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de Vendaval IRB(P&D). NASA.

A **Base de Vendaval IRB(P&D)** reproduziu o padrão regional das rajadas intensas associadas ao evento (**Figuras 14d-e**), com velocidades estimadas de até 32 m/s (115,2 km/h). A concordância entre a ordem de grandeza dos registros observacionais e os campos da base demonstra sua utilidade para representar eventos de escala sinótica, como tempestades subtropicais e ciclones.

Do ponto de vista espacial, as maiores velocidades concentram-se em áreas de maior altitude, especialmente na Serra Gaúcha, onde o relevo pode intensificar as rajadas por efeitos orográficos,

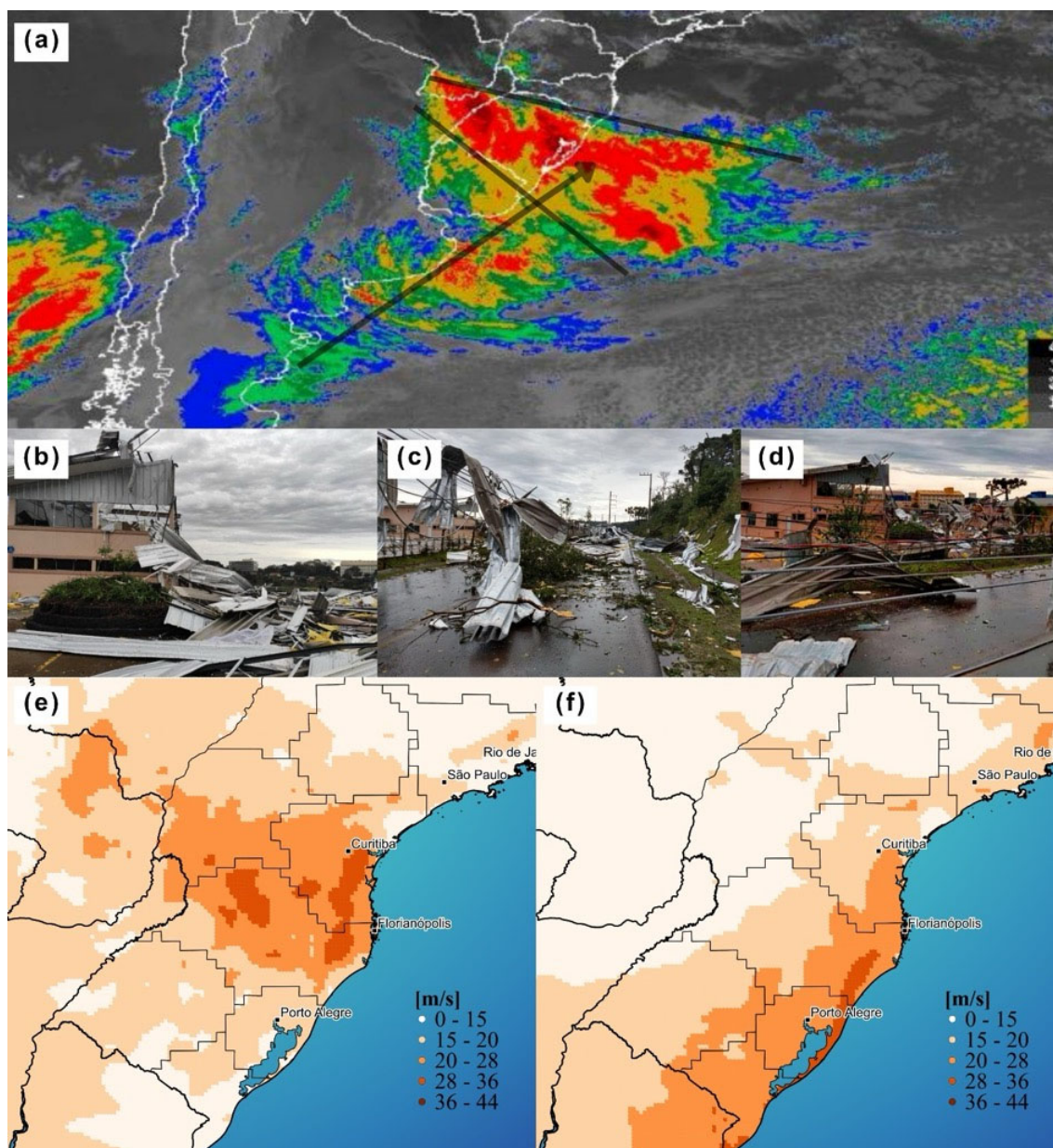


como a canalização e a aceleração do escoamento atmosférico. Esse comportamento é compatível com a interação entre a circulação atmosférica e a topografia em regiões de latitudes médias (HOLTON, 2004).

A convergência entre as observações, as estimativas da **Base de Vendaval IRB(P&D)** e os impactos registrados durante a passagem do Yakecan reforça a representatividade regional da base. Sob a perspectiva atuarial, eventos dessa natureza podem elevar a sinistralidade em linhas como seguros rural, patrimonial, de engenharia e automóvel, o que exige o aprimoramento contínuo dos modelos de precificação e gestão do risco climático (KUNREUTHER; MICHEL-KERJAN, 2009).

### 6.3. Ciclone-bomba de 2020

O ciclone-bomba de junho de 2020 desenvolveu-se sobre o Oceano Atlântico, próximo à costa sul do Brasil. O sistema passou por ciclogênese explosiva, processo caracterizado por rápida queda da pressão atmosférica e consequente intensificação da circulação ciclônica (SANDERS; GYAKUM, 1980; SONDERMANN et al., 2024). A **figura 15a** mostra o sistema atuando sobre a região Sul em 30/06/2020, acompanhado pela banda de nebulosidade da frente fria e por linhas de instabilidade.



**Figura 15** - Imagem do satélite GOES-16 no canal infravermelho, às 12h UTC de 30/06/2020, mostrando o sistema associado ao ciclone sobre a região Sul (a); impactos do ciclone extratropical explosivo em Santa Catarina em 30/06/2020 (b-c) e 01/07/2020 (d); e distribuição espacial das rajadas máximas estimadas para 30/06/2020 (e) e 01/07/2020 (f).

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: NOAA. Base de Vendaval IRB(P&D).

A atuação do sistema provocou impactos expressivos no Rio Grande do Sul, em Santa Catarina e no Paraná, deixando um amplo rastro de destruição (Figuras 15b-d). Os ventos mais intensos ocorreram entre a tarde e a noite de 30/06/2020 (Figura 15e), quando o aprofundamento do ciclone favoreceu a passagem da frente fria e o desenvolvimento de tempestades. Foram registradas rajadas superiores a 33,3 m/s (120 km/h) em diversos municípios, acompanhadas por quedas de árvores, danos estruturais e interrupções no fornecimento de energia elétrica (SONDERMANN et al., 2024).

A Base de Vendaval IRB(P&D) reproduziu o padrão espacial das rajadas intensas associadas ao ciclone (Figuras 15e-f). Em Palmares do Sul (RS), foi observada rajada pontual de 52,2 m/s (188 km/h) em um parque eólico, enquanto a base estimou 31,3 m/s (112,7 km/h). Em Pelotas (RS), a observação foi de 27,1 m/s (97,6 km/h), frente à estimativa de 28,9 m/s (104,0 km/h). A concordância espacial e a ordem de grandeza dos valores demonstram a utilidade da metodologia para caracterizar o evento em escala regional. Ao mesmo tempo, a diferença observada em Palmares do Sul evidencia que registros pontuais de fenômenos locais podem superar as estimativas de uma base em grade.

## 6.4. Vendavais na região Sul

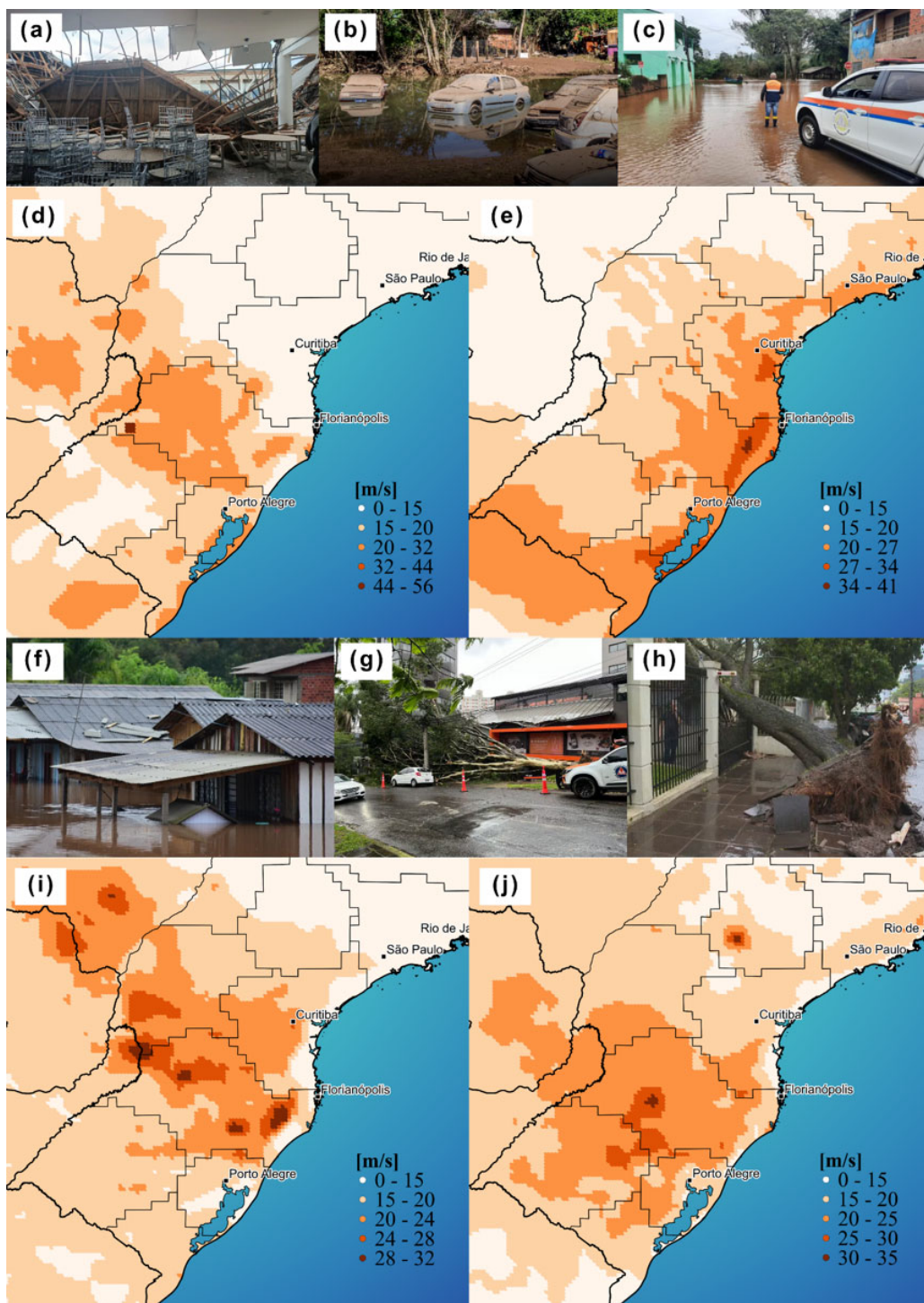
A região Sul destaca-se pela elevada recorrência de desastres atmosféricos associados a vendavais, frequentemente relacionados a ciclones extratropicais, tempestades severas e, em menor escala, tornados. Sua posição geográfica favorece a atuação recorrente de sistemas ciclônicos no Atlântico Sul, especialmente durante o inverno (DE SOUZA et al., 2024). Como consequência, a região concentra alguns dos episódios de vento extremo mais intensos registrados no Brasil, incluindo o furacão Catarina, em 2004 (MCTAGGART-COWAN et al., 2006).

Para avaliar a capacidade da Base de Vendaval IRB(P&D) de representar episódios de vento extremo na região Sul, foram selecionados quatro eventos recentes de grande impacto: os ciclones extratropicais de 12-13/07/2023, 04/09/2023, 24/10/2024 e 08-09/04/2026. Os casos representam diferentes configurações atmosféricas e produziram vendavais intensos, prejuízos à infraestrutura, interrupções no fornecimento de energia e danos em diversas áreas.

O primeiro caso corresponde ao ciclone extratropical de 12-13/07/2023. O sistema formou-se entre o Paraguai e a Argentina e se deslocou em direção ao Sul e ao Sudeste do Brasil. Linhas de instabilidade associadas ao ciclone favoreceram vendavais intensos, além de registros de microexplosões e tornados no noroeste do Rio Grande do Sul e no oeste de Santa Catarina. Foram observadas rajadas superiores a 27,8 m/s (100 km/h), com destaque para São Francisco de Paula (41,1 m/s), Cambará do Sul (40,6 m/s), Siderópolis (43,6 m/s) e Rio Grande (33,9 m/s).

Os impactos foram expressivos: mais de 250 mil consumidores ficaram sem energia, principalmente no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina. Também foram registradas oito mortes, enchentes, interrupções de voos, paralisação das operações no Porto de Santos, interdições de rodovias por quedas de árvores e danos estruturais causados por vento e granizo (Figura 16a-c). A Base de Vendaval IRB(P&D), apresentada nas figuras 16d-e, reproduz a evolução espacial do sistema entre 12 e 13 de julho de 2023.





**Figura 16 - Impactos registrados em Concórdia (SC) (a), Taquaral (RS) (b), Rio Grande do Sul (c, f), Porto Alegre (RS) (g, h). Eventos extremos de vendaval registrados em períodos de atuação de ciclones extratropicais: 12/07/2023 (d), 13/07/2023 (e), 04/09/2023 (i) e 24/10/2024 (j).**

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de Vendaval IRB(P&D).



As características desse episódio apresentam semelhanças com um evento histórico ocorrido em julho de 1923, descrito pela MetSul Meteorologia (AGUIAR, 2023), aproximadamente cem anos antes. Ambos foram marcados por frio intenso, granizo, vendavais e danos relevantes à infraestrutura, evidenciando a recorrência de sistemas atmosféricos extremos na região Sul.

Outro evento de grande impacto ocorreu em **04/09/2023**, quando um ciclone extratropical provocou tempestades severas no Rio Grande do Sul. O episódio hidrometeorológico resultou em mais de 47 mortes, além de danos à agricultura, granizo e chuva intensa (**Figura 16f**). As rajadas superaram 22,2 m/s (80 km/h) e chegaram a 31,4 m/s (113 km/h), segundo registros da Defesa Civil, antes de o sistema avançar em direção ao litoral da região Sudeste. A Base de Vendaval IRB(P&D) representa a intensidade e a abrangência do evento na **figura 16i**, com rajadas estimadas de até 32,6 m/s (117,4 km/h).

Em **24/10/2024**, um novo ciclone extratropical, originado entre a Argentina e o Uruguai, deslocou-se em direção à região Sul, provocando tempestades severas em mais de 50 municípios do Rio Grande do Sul. No município de Cachoeirinha (RS), os vendavais destelharam mais de 45 residências e duas escolas, enquanto em Erechim (RS) mais de 100 casas foram atingidas. No Paraná, mais de 500 mil unidades consumidoras ficaram sem energia elétrica, e em Santa Catarina esse número ultrapassou 230 mil. Em Laguna (SC) foram registradas rajadas superiores a 27,8 m/s (100 km/h), enquanto em Porto Alegre ocorreram ventos de 23 m/s (83 km/h) e a queda de 44 árvores (**Figura 16g-h**). A **Figura 16j** evidencia a representação desse sistema na **Base de Vendaval IRB(P&D)**, registrando rajadas que atingiram até 35 m/s (126 km/h).

O quarto episódio ocorreu entre 08 e **09/04/2026**, quando um ciclone extratropical formado entre o Uruguai e o Rio Grande do Sul intensificou as rajadas na região Sul. O sistema teve origem associada à Baixa do Chaco, centro de baixa pressão que se estabelece com frequência sobre o Paraguai (SAULO; SELUCHI; NICOLINI, 2004). As frentes frias associadas avançaram pelo interior do continente e provocaram tempestades desde a região Sul até o sul de Mato Grosso do Sul. No litoral gaúcho, o INMET emitiu aviso para rajadas superiores a 100 km/h (INMET, 2026).

Os quatro eventos evidenciam a elevada suscetibilidade da região Sul a vendavais associados a sistemas ciclônicos e tempestades severas. Em conjunto, os episódios mostram que a **Base de Vendaval IRB(P&D)** reproduz de forma consistente a distribuição regional e a ordem de grandeza dos principais eventos extremos recentes, reforçando sua aplicação em estudos climatológicos, avaliações de risco e modelos voltados ao setor de seguros e resseguros.

## 7. Considerações finais

A ocorrência de vendavais no Brasil representa um fator relevante de risco para a sociedade e para diversos setores da economia, em razão dos impactos sobre áreas urbanas, infraestrutura crítica, sistemas de energia, atividades agrícolas e transportes. Os eventos registrados em 2025, incluindo episódios severos no Sul e no Sudeste, reforçam a necessidade de uma base climatológica capaz de representar adequadamente a distribuição espacial e temporal das rajadas máximas de vento no país (CEMADEN et al., 2026).

Os ciclones extratropicais que atuam sobre a região Sul frequentemente influenciam também áreas do Sudeste brasileiro, favorecendo a ocorrência de ventos intensos associados à passagem de frentes frias e sistemas convectivos organizados. Em São Paulo, por exemplo, destacam-se eventos como o registrado em **25/11/2010** na estação Mirante de Santana, caracterizado por rajadas persistentes superiores a 20 m/s (72 km/h) entre 9h e 16h. Episódios dessa natureza evidenciam o potencial dos vendavais para provocar danos estruturais, interrupções no fornecimento de energia elétrica, queda de árvores e impactos sobre a mobilidade urbana.

Nesse contexto, o setor de seguros e resseguros tem investido em estudos para caracterizar os extremos de vento, fenômenos ainda marcados por limitações de monitoramento e lacunas de informação em grande parte do território brasileiro. Uma base abrangente, com cobertura espacial contínua e consistência metodológica, representa um avanço para compreender a climatologia dos vendavais e aprimorar as avaliações de risco.

A integração entre observações do INMET e dados de reanálise ERA5 possibilitou o desenvolvimento da **Base de Vendaval IRB(P&D)**, reduzindo limitações da representação espacial das rajadas máximas e fornecendo informações mais consistentes sobre frequência, intensidade e distribuição geográfica. Os resultados apoiam a gestão de riscos, o planejamento territorial, a proteção de infraestrutura crítica e o desenvolvimento de produtos para seguros e resseguros.

Sobre essa base, a Teoria dos Valores Extremos permite estimar níveis de retorno, enquanto a modelagem bayesiana espaço-temporal detalha o risco relativo e sua incerteza em escala microrregional. Essas leituras são complementares e podem apoiar a subscrição, a tarifação técnica, a definição de limites, a gestão da concentração de exposições e a estruturação de instrumentos de transferência de risco, como seguros paramétricos e títulos vinculados a catástrofes (*catastrophe bonds*).

A atualização contínua da **Base de Vendaval IRB(P&D)** permitirá acompanhar a evolução dos padrões de vento extremo e incorporar novas observações. Com isso, a base poderá apoiar estudos científicos, avaliações de risco e estratégias de prevenção e adaptação aos impactos dos vendavais.

## Referências

AGUIAR, Alexandre. **O grande e arrasador ciclone da última guerra civil dos gaúchos**. Porto Alegre: MetSul Meteorologia, 19 jul. 2023. Disponível em: <https://metsul.com/o-grande-e-arrasador-ciclone-da-ultima-guerra-civil-dos-gauchos/>. Acesso em: 10 jun. 2026.

ALMEIDA, E. B. de; LOPES, H. C. V.; MARQUES, R.; TAVARES, M.; SOUZA, D. Spatial coherence of climate extremes across Brazil's river basins: a clustering approach. *Papers in Applied Geography*, p. 1–24, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1080/23754931.2026.2693632>

BESAG, Julian; YORK, Jeremy; MOLLIE, Annie. Bayesian image restoration, with two applications in spatial statistics. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, Tokyo, v. 43, n. 1, p. 1–59, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00116466>

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN) et al. Estado do clima, extremos de clima e desastres no Brasil em 2025. São José dos Campos: Cemaden, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/ceaden/pt-br/assuntos/monitoramento/estado-do-clima-no-brasil/estado-do-clima-extremos-de-clima-e-desastres-no-brasil-02-2026/relatorioclimaextremosdesastresbrasil2025.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2026.

COLES, Stuart. An introduction to statistical modeling of extreme values. London: Springer, 2001.

DE SOUZA, D. C.; DA SILVA DIAS, P. L.; GRAMCIANINOV, C. B.; DA SILVA, M. B. L.; DE CAMARGO, R. New perspectives on South Atlantic storm track through an automatic method for detecting extratropical cyclones' lifecycle. *International Journal of Climatology*, v. 44, n. 10, p. 3568–3588, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.8539>

ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO. Tempestades de dezembro de 2025: acompanhe nossa operação. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/midia/news/operacao-tempestades.html>. Acesso em: 27 jul. 2026.

HERSBACH, Hans et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

HOLTON, James R. *An introduction to dynamic meteorology*. 4. ed. Burlington: Academic Press, 2004.

HONG, Yang; NIX, Henry A.; HUTCHINSON, Michael F.; BOOTH, Trevor H. Spatial interpolation of monthly mean climate data for China. *International Journal of Climatology*, v. 25, n. 10, p. 1369–1379, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.1187>

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **INMET e Marinha informam sobre Tempestade Subtropical "Yakecan" na costa do Rio Grande do Sul**. Brasília, DF, 16 maio 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 13 jun. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). INMET emite aviso vermelho para vendaval no litoral do Rio Grande do Sul. Brasília, DF, 7 abr. 2026. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/inmet-emite-aviso-vermelho-para-vendaval-no-litoral-do-rio-grande-do-sul-nesta-quarta-feira-08>. Acesso em: 27 jul. 2026.

KATZ, Richard W.; PARLANGE, Marc B.; NAVEAU, Philippe. Statistics of extremes in hydrology. *Advances in Water Resources*, v. 25, n. 8–12, p. 1287–1304, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00056-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00056-8)

KNORR-HELD, Leonhard. Bayesian modelling of inseparable space-time variation in disease risk. *Statistics in Medicine*, v. 19, n. 17–18, p. 2555–2567, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1002/1097-0258\(20000915/30\)19:17/18<2555::AID-SIM587>3.0.CO;2-%23](https://doi.org/10.1002/1097-0258(20000915/30)19:17/18<2555::AID-SIM587>3.0.CO;2-%23)

KUNREUTHER, Howard; MICHEL-KERJAN, Erwann. At war with the weather: managing large-scale risks in a new era of catastrophes. Cambridge: MIT Press, 2009.

MCTAGGART-COWAN, Ron *et al.* Analysis of Hurricane Catarina (2004). *Monthly Weather Review*, v. 134, n. 11, p. 3029–3053, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR3330.1>

MONTEIRO, José Eduardo B. A. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília, DF: INMET, 2009.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Worldview – Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS)**. Disponível em: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>. Acesso em: 06 mai. 2026.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **Severe Weather 101: Damaging Winds**. Norman, 2019. Disponível em: <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/wind/>. Acesso em: 05 mai. 2026.

REBOITA, Michelle Simões; GAN, Manoel Alonso; ROCHA, Rosmeri Porfírio da; AMBRIZZI, Tércio. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>

REBOITA, Michelle Simões *et al.* Iba: the first pure tropical cyclogenesis over the western South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 126, n. 2, e2020JD033431, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020JD033431>

REBOITA, Michelle Simões; KRUSCHE, Nilo; AMBRIZZI, Tércio; ROCHA, Rosmeri Porfírio da. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. *Terrae Didática*, v. 8, n. 1, p. 34–50, 2012. DOI: <https://doi.org/10.20396/td.v8i1.8637425>

RUE, Håvard; MARTINO, Sara; CHOPIN, Nicolas. Approximate Bayesian inference for latent Gaussian models by using integrated nested Laplace approximations. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, v. 71, n. 2, p. 319–392, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2008.00700.x>

SANDERS, Frederick; GYAKUM, John R. Synoptic-dynamic climatology of the "bomb". *Monthly Weather Review*, v. 108, n. 10, p. 1589–1606, 1980.

SAULO, Cintia A.; SELUCHI, Marcelo E.; NICOLINI, Matilde. A case study of a Chaco low-level jet event. *Monthly Weather Review*, v. 132, n. 11, p. 2669–2683, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR2815.1>

SCHUMACHER, R. S.; RASMUSSEN, K. L. The formation, character and changing nature of mesoscale convective systems. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 1, p. 300–314, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0057-7>

SHEEHAN, B.; MULLINS, M.; SHANNON, D. *et al.* On the benefits of insurance and disaster risk management integration for improved climate-related natural catastrophe resilience. *Environmental Systems and Decisions*, v. 43, p. 639–648, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10669-023-09929-8>

SONDERMANN, Michael; CHOU, Sin Chan; MARTINS, Ricardo G.; AMARO, Luiz C.; GOMES, Rafael D. O. Explosive cyclone impact on the power distribution grid in Rio Grande do Sul, Brazil. *Climate*, v. 12, n. 3, art. 29, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/cli12030029>

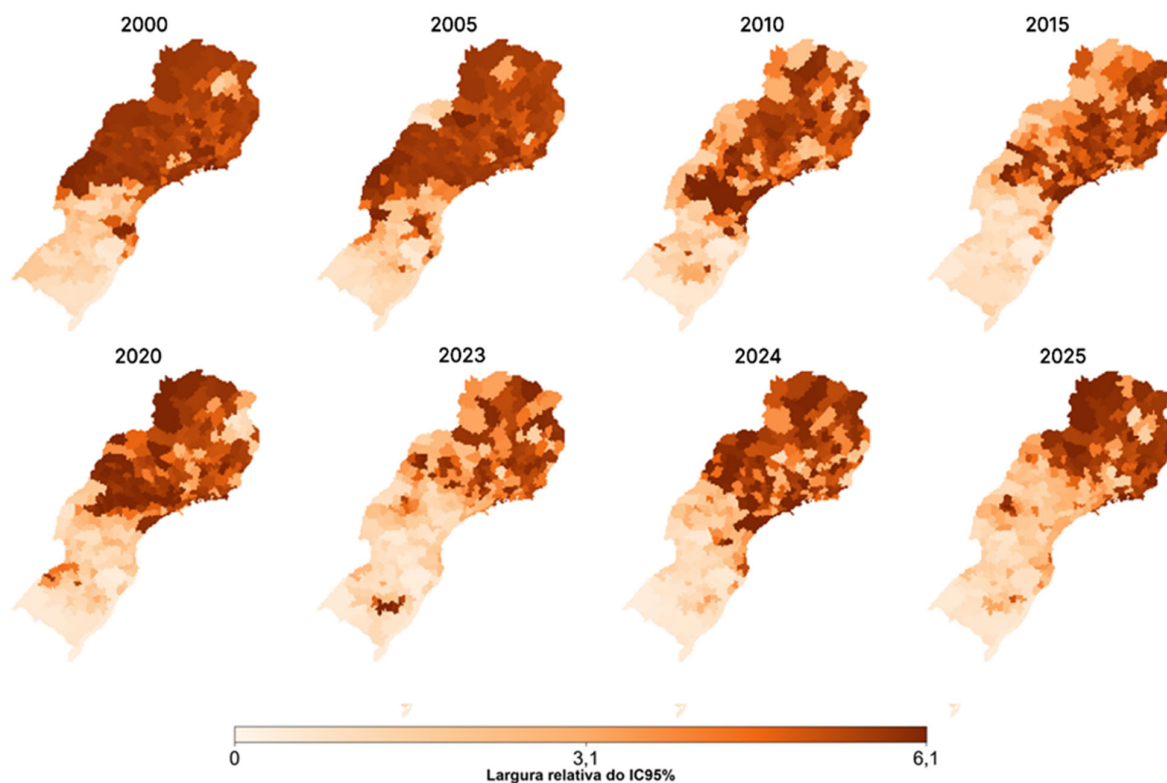
TOYOTA DO BRASIL. Danos na unidade de Porto Feliz. São Paulo, 23 set. 2025. Disponível em: <https://www.toyotacomunica.com.br/danos-na-unidade-de-porto-feliz/>. Acesso em: 27 jul. 2026.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME FINANCE INITIATIVE (UNEP FI). Insuring the climate transition: enhancing the insurance industry's assessment of climate change futures. Geneva: UNEP FI, 2021.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. Geneva: WMO, 2009.

XAVIER, Alexandre C.; KING, Carey W.; SCANLON, Bridget R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). *International Journal of Climatology*, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4518>

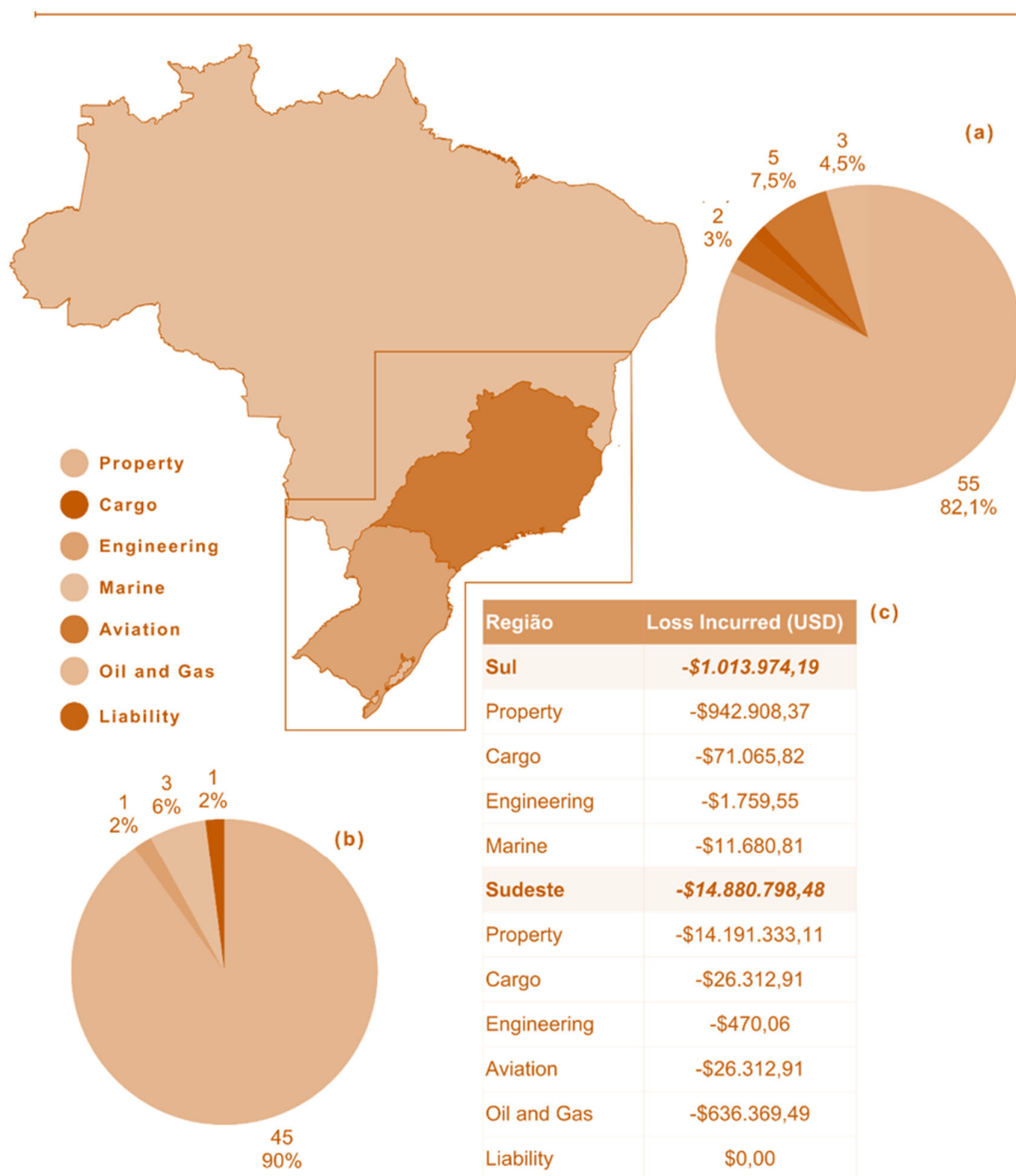
## Anexo



**Figura A1 - Evolução anual da incerteza relativa do risco relativo (RR) para rajadas de vento  $\geq 20$  m/s. Tons mais intensos representam maior largura relativa do IC95% e, portanto, maior incerteza da estimativa.**

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de Vendaval IRB(P&D).

Foram registrados 5 eventos de desastre relacionados a ventos na região Sul (50 apólices foram afetadas), e 12 eventos na região Sudeste (67 apólices foram afetadas) cobertos pelo IRB(Re) no Brasil.



**Figura A2 - Eventos de vendaval associados a apólices com pagamentos acionados, por região do Brasil. Apólices afetadas nas Regiões Sudeste (a) e Sul (b), por carteira de seguro, e perda financeira por região e tipo de carteira (c). Período: 2010-2025.**

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: IRB(Re).



**IRB(P&D)**