

MARIA ASSUNÇÃO FAUS DA SILVA DIAS

# Furacões e tornados: um espetáculo de rotação na atmosfera terrestre

**MARIA ASSUNÇÃO  
FAUS DA SILVA  
DIAS** é professora do  
Departamento de Ciências  
Atmosféricas do Instituto  
de Astronomia, Geofísica  
e Ciências Atmosféricas  
da USP e pesquisadora  
do Centro de Previsão do  
Tempo e Estudos Climáticos  
do Inpe.

# a

atmosfera terrestre contém ar em rotação com movimentos que podem ser observados de diferentes pontos de vista. Os pequenos rodamosinhos de poeira e tornados são visíveis a olho nu, ciclones e furacões têm rotação visível desde o espaço, a bordo de satélites por exemplo. Os dois fenômenos, tornado e furacão, têm algumas importantes diferenças em termos de tamanho e tempo de vida, mas ambos representam uma situação de equilíbrio de forças físicas que mantêm os movimentos circulares do ar em situação quase estável. Tornados e furacões são eventos extremos que provocam desastres de toda sorte, principalmente devido às ventanias extremamente intensas que os caracterizam, têm distribuição geográfica heterogênea e época do ano em que são mais frequentes. Uma das questões recorrentes nos dias de hoje é se a frequência de ocorrência tanto de tornados como de furacões está aumentando em função do aquecimento global; se as mudanças climáticas estão provocando tornados e furacões em lugares nunca antes atingidos e com violência cada vez maior.

## O TORNADO

Tornados são constituídos por ar em rotação ao redor de um eixo central. O diâmetro típico do tornado está entre 100 metros e 1 quilômetro. Visualmente parece um funil que vai se deslocando como um pião aparecendo abaixo de uma nuvem de tempestade. A velocidade de deslocamento do tornado é, em geral, entre 20 e 50 km/h, e seu tempo de vida desde poucos minutos até meia hora. O ar num tornado gira ao redor do eixo central com velocidades que classificam sua intensidade desde F0 até F5 conforme os danos provocados. Essa classificação se deve ao meteorologista americano Ted Fujita, que a desenvolveu para o meio-oeste americano, onde existe um máximo mundial de ocorrência de tornados. A classificação é a seguinte:

F0 – velocidades de 65 a 120 km/h – danos leves: alguns danos a chaminés, galhos e árvores quebrados, árvores de raízes rasas são arrancadas, danos em cartazes.

F1 – velocidades de 120 a 180 km/h – danos moderados: o limite inferior é a velocidade de furacão; ocorrem destelhamentos, veículos grandes, como caminhões, são derrubados; automóveis em movimento são desviados para fora das estradas.

F2 – velocidades de 180 a 250 km/h – danos consideráveis: telhados inteiros são levantados, grandes árvores são arrancadas ou partidas, objetos leves se transformam em mísseis sendo arremessados a uma certa distância.

F3 – velocidades de 250 a 330 km/h – danos severos: telhados e paredes derrubados; trens descarrilados e tombados, maioria das árvores arrancadas, carros pesados levantados do chão e atirados.

F4 – velocidades de 330 a 420 km/h – danos devastadores: casas totalmente demolidas, estruturas com fundações frágeis atiradas a alguma distância, carros atirados, grandes objetos transformados em mísseis.

F5 – velocidades acima de 420 km/h – danos inacreditáveis: casas arrancadas de suas fundações e atiradas a distâncias consideráveis, carros transformados em mísseis e atirados a distâncias superiores a 100 m, árvores arrasadas, ocorrência de fenômenos incríveis.

O tornado é um fenômeno que se forma a partir de uma nuvem de tempestade, o chamado Cumulonimbus ou, de forma abreviada, como é mais conhecido, o Cb. O tornado aparece primeiramente a partir da base da nuvem expandindo-se até o chão. O movimento em rotação se origina do encontro de fortes correntes de ar em direções opostas que ocorrem dentro do Cb. Quanto mais intensas as correntes de ar ascendentes e descendentes dentro de um Cb, maior a probabilidade de formar-se um rodaminho que evolui para o tornado e que aparece como uma protuberância na base do Cb. Nos casos mais intensos, o tornado tem condições de se desgarrar do Cb e seguir uma trajetória própria que

pode se estender por algumas dezenas de quilômetros. Nesse percurso, a ventania vai levantando objetos, arrancando árvores e telhados, destruindo a vegetação.

As forças que atuam no tornado são a força centrífuga e a força devida a diferenças de pressão do ar. O centro do tornado tem pressão baixa, o que atrai o ar, enquanto a rotação define a força centrífuga que afasta o ar para fora da rotação. Com o equilíbrio dessas duas forças o movimento de rotação continuaria indefinidamente. O atrito com o chão e com os inúmeros obstáculos no caminho promove uma desaceleração do tornado até sua dissipação. Quando ocorrem sobre o mar ou sobre grandes corpos d'água, os tornados podem ser vistos como uma coluna de água que se estende desde a base da nuvem até a superfície da água e, por isso, recebem o nome de tromba d'água, em geral classificados como F0 ou, no máximo, F1.

Um Cb também pode produzir rajadas de vento com velocidades tão altas quanto aquelas associadas a tornados, mas sem a característica típica de rotação da nuvem em funil. Rajadas muito fortes e concentradas são chamadas microexplosões devido ao barulho ensurdecedor que provocam. Em geral ocorrem numa largura de poucas centenas de metros e se espalham por poucas dezenas de quilômetros, porém os ventos sopram numa única direção. A observação dos danos provocados permite identificar o tornado ou a microexplosão: no tornado os danos apresentam sinais típicos de torção, enquanto na microexplosão há uma derrubada dos obstáculos numa única direção. A determinação da ocorrência de tornados e microexplosões é feita na maior parte das vezes por observação visual direta. Devido às suas pequenas dimensões e por estarem embaixo de um grande Cb, esses fenômenos não são vistos por satélite. Radares meteorológicos detectam fenômenos de escala maior que um quilômetro e identificam apenas assinaturas que podem indicar a presença de um tornado. Testemunhos pessoais são fontes importante de informações, principalmente quando acompanhados de fotografias ou filmes. Lugares com baixa

concentração populacional têm baixos valores de ocorrência de tornados, muitas vezes por falta de testemunhos. Por outro lado, regiões com grande concentração populacional e onde há recursos abundantes para registro e cobertura pela mídia, aparentam ter um maior número de ocorrências. Isso também justifica em parte a percepção popular de que tornados são mais frequentes hoje do que antigamente: quando ocorre um tornado em determinado local, a mídia se encarrega de divulgar a notícia. Por outro lado, há vários indícios de que a frequência de ocorrência de tempestades severas está aumentando, e com isso presume-se com bastante segurança que deve haver também um aumento de ocorrência dos fenômenos associados a essas tempestades, em particular os tornados e as microexplosões.

No Brasil, os tornados ocorrem principalmente na Região Sul, mas há registros também nas Regiões Sudeste e Centro-Oeste. O norte da Argentina e o Paraguai são regiões preferenciais de ocorrência na América do Sul. Mesmo nas regiões tropicais e equatoriais podem ser observados tornados. O estado do Pará, por exemplo, registra várias ocorrências documentadas. Na Floresta Amazônica são mais frequentes as microexplosões do que os tornados. As rajadas de ventos fortes deixam marcas de desmatamento da floresta facilmente identificáveis nas imagens de satélite na forma de faixas com 100-300 m de largura por 5-20 km de comprimento. Pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, em viagens de exploração científica pela floresta, identificaram a característica típica de danos associados a microexplosões em vários casos. Em regiões com agricultura extensiva, em áreas relativamente planas, como a região de plantação de soja no Brasil Central ou os grandes canaviais do Sudeste, os tornados deixam frequentemente marcas circulares, com diâmetros da ordem de 100 metros, em intervalos desigualmente espaçados. Isso ocorre quando a ponta inferior do tornado encosta na superfície, enquanto segue sua trajetória de destruição. Nisso a analogia com o comportamento de um pião saltitante dá uma boa idéia do com-

portamento do tornado. Explicações sobre a causa das marcas circulares têm muitas vezes focado eventuais pousos de naves extraterrestres, mas na maioria dos casos a ocorrência de tempestades severas com tornados descarta essa possibilidade.

## O FURACÃO

Assim como no tornado, o ar gira ao redor de um eixo central no caso de um furacão. A grande diferença está no tamanho. O diâmetro do furacão é da ordem de 500 a 1.000 quilômetros, sendo que os ventos mais fortes estão localizados a aproximadamente 50 quilômetros do eixo de rotação. Enquanto o tornado se desprende de uma nuvem Cb, o furacão é constituído por muitas nuvens Cb e pode ser visto nas imagens de satélite como um grande vórtice de nuvens em rotação, com uma região central sem nuvens, o chamado *olho do furacão*. O olho do furacão é uma região de ventos calmos. Ao redor do centro do olho, a uma distância de aproximadamente 50 quilômetros, ergue-se uma muralha de nuvens constituída de Cb cuja altura atinge por volta de 15 quilômetros. É nessa distância do centro que os ventos atingem a velocidade máxima, decaindo em seguida à medida que a distância do centro aumenta. Devido à rotação do ar formam-se bandas de nuvens alinhadas em espirais. Enquanto o furacão persiste por vários dias, às vezes até uma semana, as nuvens Cb que o constituem têm um ciclo de vida de 1 a 2 horas, estando em contínuo processo de formação e decaimento enquanto o furacão continua no seu trajeto.

O equilíbrio de forças, no caso do furacão, inclui, além da força devida ao gradiente de pressão que aponta para a região de baixa pressão no centro do furacão e a força centrífuga que aponta para fora, mais uma força aparente devida à velocidade de rotação da Terra, a chamada força de Coriolis, que aponta no sentido contrário da força devida ao gradiente de pressão. O equilíbrio de forças é sustentado apesar do atrito e das forças dissipativas devido ao

processo de intensificação do furacão, que está ligado ao ciclo de vida das nuvens que o constituem. Para entender esse processo é interessante acompanhar o processo de formação do furacão.

Tempestades que se formam sobre as águas quentes dos oceanos nas proximidades do Equador são os potenciais embriões que podem ou não evoluir para furacão. Os aglomerados de tempestades que persistem por mais de um dia induzem a formação de uma região de pressão relativamente mais baixa que o entorno das tempestades, que inicia o processo de rotação. A analogia é com uma bacia com um ralo no centro: quando tiramos a tampa do fundo a água se dirige para o ralo e vai adquirindo uma rotação ao redor do centro. No estágio em que já existe alguma rotação a tempestade passa a ser chamada de *ciclone tropical*. A baixa pressão no centro do ciclone ocorre devido à liberação de calor latente de mudança de fase, na formação de gotas de água e pedras de gelo a partir da água na fase gasosa. Cada vez que 1 grama de vapor d'água se condensa para formar uma gotinha de água, são liberados 2.500 joules. Essa energia passa por algumas transformações dentro e fora das nuvens mas o resultado final é que a pressão do ar no centro do furacão diminui e quanto mais baixa a pressão maior é a velocidade de equilíbrio dos ventos que giram ao seu redor. E quanto maior a velocidade dos ventos maior a evaporação de água dos oceanos, que é especialmente favorecida se as águas forem quentes. Havendo evaporação de água há "combustível" para manter a formação de Cb e o processo continua.

No entanto, nem todo ciclone tropical evolui para tornar-se furacão. Na verdade a grande maioria se dissipa antes disso. Então qual o fator adicional que leva um ciclone tropical a transformar-se em furacão? Quando os ventos são relativamente constantes desde a superfície terrestre até vários quilômetros de altura há condições ideais para a manutenção do furacão. Ventos que aumentam muito de velocidade em níveis mais altos quando comparados com os níveis mais baixos acabam por atrapa-

lhar a formação do vórtice quase estável do furacão. As condições ideais para furacão não ocorrem sempre, e em particular no Oceano Atlântico a temporada de furacões é de agosto a novembro quando as condições ideais existem com maior frequência.

Após a formação sobre as águas quentes dos oceanos, os furacões se deslocam a velocidades variáveis entre 20 e 50 km/h, e seu tempo de vida pode ser de vários dias. Ao atingir os continentes provocam grande destruição nas regiões costeiras mas vão aos poucos perdendo a intensidade pois deixam de ser alimentados pela evaporação da água dos oceanos.

A classificação do furacão é feita através da escala de Saffir-Simpson, com níveis de 1 a 5. Essa escala é usada para dar uma idéia dos danos potenciais associados a um furacão em evolução, principalmente no momento em que este atinge uma região costeira. Velocidade do vento é um dos fatores considerados, mas inundações provocadas pela elevação do nível do mar são também levadas em conta. A classificação é a seguinte:

*Furacão categoria 1:* ventos de 120 a 150 km/h. Ressaca com elevação do nível do mar de 1 a 1,5 metro acima do nível normal. Em geral não correm danos em casas e prédios. Os danos ocorrem na vegetação e em cartazes e em construções frágeis.

*Furacão categoria 2:* ventos de 150 a 180 km/h. Ressaca com elevação do nível do mar de 1,5 a 2,5 metros acima do nível normal. Algum dano a telhados, portas e janelas. Danos consideráveis à vegetação com algumas árvores arrancadas. Danos consideráveis em construções frágeis, cartazes e pequenos atracadouros no porto. As regiões costeiras se inundam 2 a 4 horas antes da chegada do centro do furacão. Pequenas embarcações em regiões desprotegidas se desprendem de suas amarrações.

*Furacão categoria 3:* ventos de 180 a 210 km/h. Ressaca com elevação do nível do mar de 3 a 4 metros acima do nível normal. Alguns danos estruturais a pequenos edifícios; construções frágeis e cartazes totalmente destruídos. Regiões costeiras

com até 10-15 km de distância da linha da costa e com elevações menores que 1 metro são inundadas pela elevação do nível de água de 3 a 5 horas antes da chegada do furacão.

*Furacão categoria 4:* ventos de 210 a 250 km/h. Ressacas com elevação do nível do mar de 4 a 6 metros acima do nível normal. Danos severos a paredes e estruturas de telhados. Arbustos, árvores e cartazes completamente destruídos. Danos severos a portas e janelas. Áreas mais baixas que 3 metros acima do nível do mar e até 10 quilômetros da linha da costa podem ser inundadas de 3 a 5 horas antes da chegada do furacão.

*Furacão categoria 5:* ventos com velocidades superiores a 250 km/h. Ressacas com elevação do nível do mar acima de 6 metros acima do nível normal. Destruição completa dos telhados de casas e edifícios. Alguns edifícios destruídos. Toda vegetação, arbustos e árvores destruídos. Áreas mais baixas que 5 metros acima do nível do mar e até 16 quilômetros da linha da costa podem ser inundadas de 3 a 5 horas antes da chegada do furacão.

Tufões são exatamente o mesmo fenômeno que os furacões, apenas recebem esse nome por se formarem no Oceano Pacífico oeste. Os furacões e os tufões recebem nomes para identificá-los e distingui-los uns dos outros durante seu ciclo de vida. A prática de usar nomes para seguir furacões se iniciou na época das navegações pelo Caribe, em que em geral eram identificados pelo nome do santo do dia. Com o advento do telégrafo esse costume foi intensificado pela simples razão de que o uso de nomes é mais prático e menos sujeito a erros de comunicação do que o uso de coordenadas geográficas. O uso de nomes de mulheres para batizar furacões tem origem na Austrália no fim do século XIX, e intensificou-se durante a Segunda Guerra Mundial. As listas de nomes começaram a alternar entre nomes de homens e mulheres no fim da década de 1970, cada ano começando novamente uma lista em ordem alfabética. Essas listas são mantidas e atualizadas pela Organização

Meteorológica Mundial, com sede na Suíça, que toma o cuidado de tirar das listas os nomes de furacões mais violentos e destrutivos para evitar associações do nome com a possível intensidade dos furacões.

O Brasil era até recentemente caracterizado e conhecido, tanto popularmente como no meio científico, pela total ausência de furacões. A razão para a ausência de furacões ao sul do Equador no Oceano Atlântico é devida principalmente à circulação dos ventos com bastante variabilidade devido aos impactos da formação de muitas nuvens sobre a Amazônia e o Brasil Central, o que não favorece a formação de um vórtice estável por tempo suficiente para ocorrer a intensificação. No entanto, em março de 2004 ocorreu uma evolução de um ciclone subtropical que atingiu a categoria 1 de furacão, o chamado furacão Catarina. Evoluções desse tipo ocorrem com relativa frequência na Austrália e no Mar Mediterrâneo, mas não se tem notícia de outro caso ocorrido na América do Sul. Análises do caso Catarina enfocando a evolução de ciclone subtropical para furacão mostraram uma coincidência de fatores sem igual nos últimos 50 anos em que se tem dados para essa pesquisa, levantando a polêmica sobre a possibilidade de o Catarina não ter sido um fenômeno isolado mas sim o primeiro de uma série favorecida pelo aquecimento global

Tem havido várias discussões nos meios científicos a respeito de possíveis efeitos do aquecimento global nos furacões. O ano de 2005 foi caracterizado por uma grande quantidade de furacões e pela ocorrência de um furacão dos mais intensos já observados, o Katrina, que atingiu a região sudeste dos Estados Unidos provocando mortes e destruição extremas. Os registros de furacões da última centena de anos não mostram, até o momento, um aumento no número de furacões que ocorrem a cada ano, mas sim um ligeiro aumento, após a década de 1970, no número de furacões que atingiram a categoria igual ou superior a 3. Há bastante controvérsia com relação a esses resultados devido à maior capacidade de observação que foi instalada no mundo todo após a década de 70, com o advento dos satélites

meteorológicos assim como de equipamentos de medida mais sofisticados.

A variabilidade no número de furacões que ocorrem a cada ano é bastante grande, sendo influenciada por fatores climáticos como a ocorrência do fenômeno El Niño, e pela evolução das correntes marítimas que afloram nos trópicos mas que dependem de evoluções em oceano profundo. O El Niño tem sua manifestação no Oceano Pacífico tropical como um aquecimento anormal das águas superficiais, tendo como impacto na atmosfera a alteração da circulação dos ventos que ultimamente afetam as chuvas e as temperaturas do ar nas diversas partes do mundo. No caso da região tropical os ventos mais intensos em anos de El Niño inibem a formação de furacões, que têm seu número reduzido. No caso das correntes marítimas no Oceano Atlântico, a complexa e não muito bem conhecida ou documentada evolução no oceano profundo, variando lentamente ao longo de décadas, pode causar variações na temperatura da superfície do mar que têm impactos diretos na formação de furacões sempre associados com altas temperaturas. O ano de 2005, por exemplo, caracterizou-se por uma significativa área com temperaturas de 4 ou 5 graus Celsius acima da média histórica no Oceano Atlântico tropical, cuja presença parece justificar a ocorrência do número extraordinário de furacões intensos naquele ano.

## FURACÕES E TORNADOS SÃO PREVISÍVEIS HOJE PELOS SERVIÇOS METEOROLÓGICOS?

Os eventos extremos, desastres e perdas de vida associados a tornados e furacões apontam para uma necessidade de preparação da sociedade na eventualidade de sua ocorrência. Essa preparação tem dois aspectos, o imediato na forma de alertas e o de planejamento estratégico para o caso de aumento na frequência de ocorrência.

A previsão de fenômenos atmosféricos está baseada na utilização dos conceitos de dinâmica dos fluidos geofísicos que são traduzidos em equações matemáticas e codificados em *software* de previsão numérica rodados em supercomputadores para um processamento de alto desempenho. Para fazer a previsão de tempo é necessário conhecer com muito detalhe o estado inicial da atmosfera e da superfície terrestre e dos oceanos.

O *software* de previsão numérica gera o estado futuro da atmosfera, que é então interpretado pelos meteorologistas para produzir as informações sobre a ocorrência dos diversos fenômenos do tempo. O *software* divide a superfície terrestre através de um reticulado, em que os pontos estão afastados entre si de uma certa distância denominada resolução da previsão. Devido ao grande número de cálculos necessários e à necessidade de rapidez na disponibilização dos resultados para emissão da previsão de tempo e dos alertas, a resolução dos modelos usados para essa previsão é, na maioria dos casos, maior que 10 quilômetros. Apenas em algumas regiões específicas são usados *softwares* com resoluções de 1 ou 2 quilômetros. Assim, os tornados que têm dimensões menores do que 1 quilômetro não são diretamente previstos: a previsão enfoca a eventual formação de tempestades severas e gera um alerta de monitoramento intenso do desenvolvimento das tempestades para identificar a possível formação de ventos extremos. Mesmo na região centro-oeste da América do Norte, onde há técnicas das mais avançadas para alertas de tempestades severas, o alerta de tornado só é emitido após alguma identificação visual, quando então existe toda uma sequência de ações das autoridades para avisar a população que é hora de buscar abrigo. O alerta ocorre em geral com antecedência de poucos minutos até meia hora sendo usadas sirenes e mensagens via rádio em canal especial. Mas o aviso de possibilidade de ocorrência de tempestades severas é emitido com até 72 horas de antecedência, sendo revisto à medida que o horário previsto se aproxima.

No caso do furacão, a possibilidade de previsão é bem maior. Já há considerável habilidade em prever a transição de ciclones para furacão assim como da trajetória seguida por esses sistemas. As incertezas na trajetória, no entanto, ainda são da ordem de 50 a 100 quilômetros para previsões com antecedência de 48 horas, o que ainda é considerado grande: significa que os ventos extremos podem atingir uma ou outra região com impactos muito localizados. A ocorrência de furacões pode ser inicialmente identificada com antecedência de vários dias, até uma semana.

O limite teórico de previsibilidade foi inicialmente identificado no fim dos anos 1960 pelo meteorologista Richard Lindzen, que discutiu problemas de caos e mostrou que pequenas perturbações nas condições iniciais levam a previsões totalmente distintas após 10 dias. Esse efeito, conhecido como “efeito borboleta”, consiste na idéia

de que uma borboleta batendo as asas em São Paulo, por exemplo, pode afetar o tempo na Europa depois de alguns dias. Apesar de não ser discutido esse limite da previsão, hoje buscam-se alternativas para estender esse prazo usando conjuntos de previsões numéricas com condições iniciais ligeiramente diferentes entre si. Nesse caso, buscam-se aspectos em comum nas diversas previsões, e ao mesmo tempo são geradas probabilidades de ocorrência de eventos extremos. Dessa forma espera-se aumentar o prazo de previsões para além de duas semanas.

No caso dos furacões, esse aumento da antecedência do prazo de previsão é particularmente importante no sentido de programar melhor as medidas de prevenção. No entanto, o que tem sido observado em regiões que são muito atingidas pelos furacões, como o sudeste e o leste americanos, é que ocorre um cansaço da população

*O tornado de Indaiatuba. O cone que se estende da nuvem até o chão é a região com rotação intensa que caracteriza o tornado*



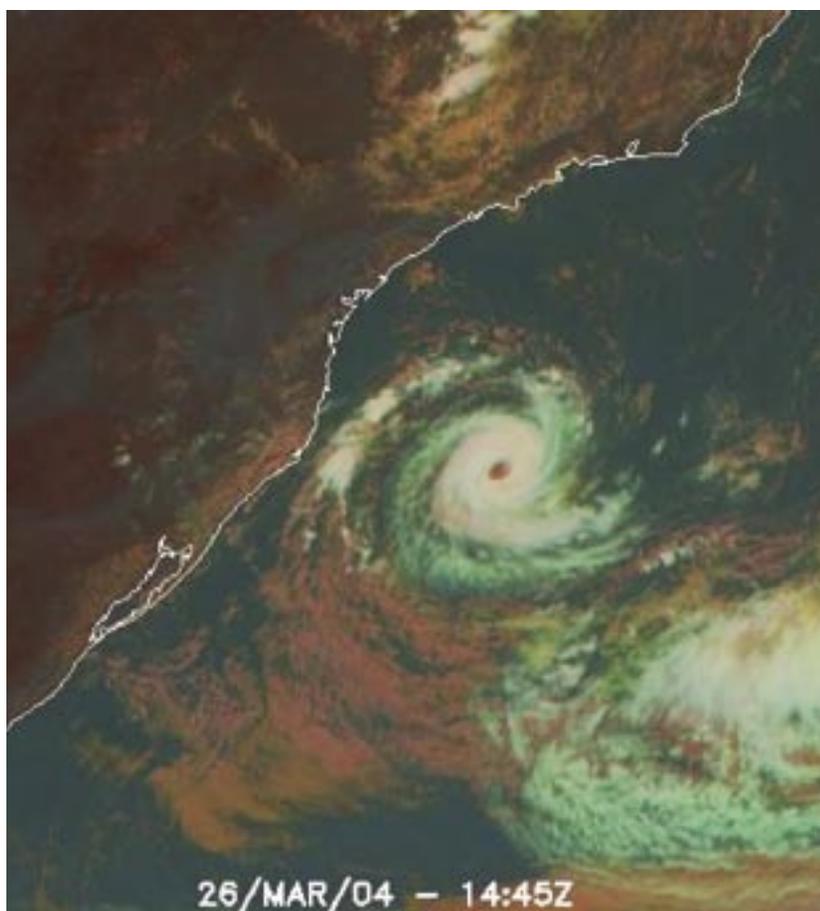
Foto cedida por Fábio Alexandre, da Tribuna de Indaiá.

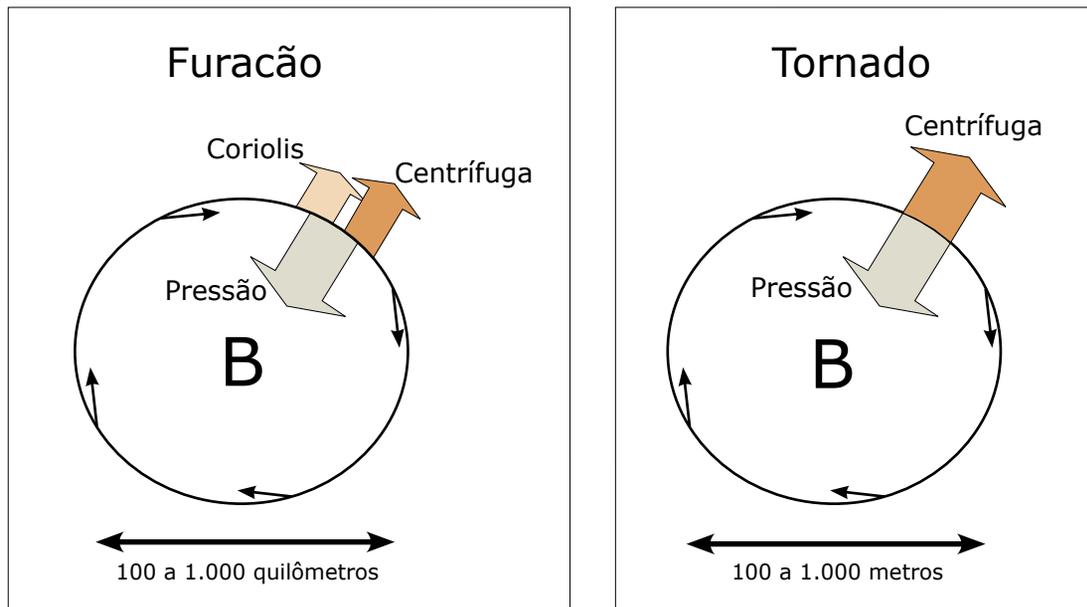
por excessivos alarmes falsos em que o estrago maior não atinge o indivíduo que então evacuou sua casa sem necessidade. Após um ou dois alarmes falsos há uma relutância grande da população em adotar a medida preventiva. Assim, para a ciência da previsão meteorológica coloca-se o de-

safio de melhorar a previsão da ocorrência de eventos extremos de uma forma mais precisa e, ao mesmo tempo, recorrer cada vez mais à determinação da probabilidade de ocorrência do fenômeno que coloca de forma bastante clara para o usuário a incerteza inerente a uma determinada previsão.

*Imagem do satélite Goes-12 processada pelo Laboratório Master da USP (<http://www.master.iag.usp.br>).*

**O furacão  
Catarina nas  
proximidades  
da costa do  
estado de Santa  
Catarina**





*Esquema representando o equilíbrio de forças dos vórtices associados ao tornado e ao furacão. No caso do tornado, os ventos podem girar tanto no sentido dos ponteiros do relógio como no sentido contrário, independentemente. No caso do furacão, os ventos giram no sentido dos ponteiros do relógio nos furacões que se formam no Hemisfério Sul e no sentido contrário no Hemisfério Norte. Em ambos os casos o ar tende a se deslocar para o centro da baixa pressão em movimentos em espiral. Isso é devido ao efeito de uma força adicional, o atrito que age no sentido contrário do movimento e que não aparece na figura. Pressão quer dizer força devida ao gradiente de pressão que faz com que o ar se dirija para a pressão mais baixa indicada por B na figura. A força centrífuga aponta para fora e a força de Coriolis aponta para a esquerda do movimento do ar no Hemisfério Sul e para a direita no Hemisfério Norte, resultando, em ambos os casos, na direção quase oposta à força devida ao gradiente de pressão.*