

The background features a stylized, layered mountain range in shades of light orange and peach. The mountains are composed of various geometric shapes, creating a sense of depth and texture. The overall aesthetic is clean and modern.

# Terremotos e a convivência com as incertezas da natureza

MARCELO ASSUMPÇÃO



**MARCELO  
ASSUMPÇÃO**  
é professor  
do Instituto de  
Astronomia,  
Geofísica e Ciências  
Atmosféricas (IAG)  
da USP.

## RESUMO

Apesar dos enormes esforços de geofísicos e sismólogos e de muitas décadas de pesquisa, ainda não é possível evitar tragédias como a do Haiti em 2010 e a do Japão em 2011. Mesmo assim, já há conhecimento científico e técnico para mitigar os efeitos dos terremotos. Muitos desastres, como o do Haiti, devem-se mais a dificuldades econômicas, que impedem um país de se preparar para a ocorrência de terremotos pouco frequentes mas muito fortes. Por outro lado, mesmo em países bem preparados, como o Japão, não é possível escapar totalmente ileso de desastres naturais extremamente raros. Apesar do grande avanço da sismologia, a natureza ainda guarda alguns segredos, e incertezas fazem parte da ciência tanto quanto da nossa vida cotidiana. No Brasil, terremotos fortes são extremamente raros, e a probabilidade de desastres é tão pequena que normalmente não a levamos em conta. Mas eventos extremamente raros podem ocorrer a qualquer hora. O desafio é escolher quando vale a pena investir para diminuir o risco de tais eventos.

**Palavras-chave:** terremotos, risco sísmico, previsão sísmica, intraplaca.

## ABSTRACT

*Despite the great geophysical and seismologic efforts and many decades of research, it is not yet possible to avoid tragedies such as the one in Haiti in 2010; and in Japan in 2011. Although it is not possible to predict earthquakes, there is technical and scientific knowledge capable of mitigating its effects. Many disasters, such as the one in Haiti, were caused more because of economic difficulties which prevented the country from preparing itself for low-frequent – but powerful – earthquakes. On the other hand, even in well-prepared countries it is not possible to escape totally unscathed from extremely rare natural disasters. Despite the great advances of Seismology, nature still has some secrets in store; and uncertainties are part of science and of our daily life as well. In Brazil powerful earthquakes are rare; and the probability of disasters is so low that we normally disregard it. However, rare events can happen anytime. The challenge lies in choosing when it is worth investing to lower the risk of rare events.*

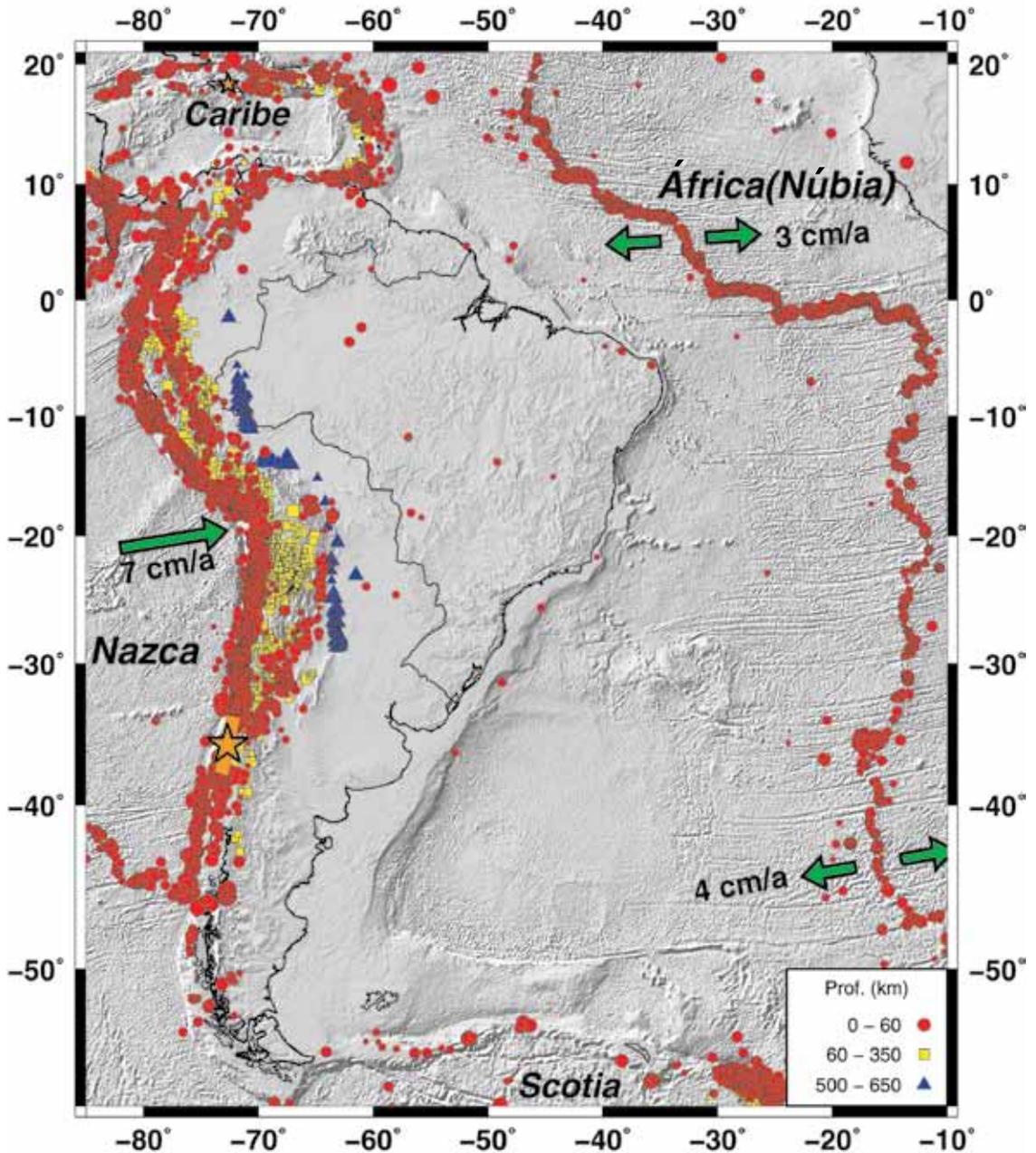
**Keywords:** earthquake, seismic risk, seismic prediction, interplate.

**P**or que os terremotos ainda causam tantas mortes e desastres? Por que a ciência, com progressos e descobertas incríveis em tantas áreas, ainda não consegue livrar o homem das tragédias sísmicas? Estamos aprendendo com essas tragédias recentes?

E no Brasil, qual o risco de um grande terremoto?

Terremotos destrutivos ocorrem poucas vezes por ano, mas centenas de “pequenos terremotos”, ou sismos, ocorrem diariamente em todo o mundo. A grande maioria dos tremores passa despercebida por ter magnitude muito pequena, porque o epicentro está no mar ou por ocorrer longe de regiões habitadas. A maior parte dos terremotos ocorre nas bordas das placas tectônicas, como na região de contato entre a placa de Nazca (parte do fundo do Oceano Pacífico) e a placa da América do Sul (veja a Figura 1). Em países como Chile, Peru, Equador e Colômbia, terremotos são frequentes, e os mais destrutivos ocorrem por deslizamento repentino do contato entre a placa de Nazca e a da América do Sul, como ocorreu no sul do Chile (terremoto de Maule, 27/2/2010). Após lento acúmulo de pressão por centenas de anos, uma área de 450 km ao longo da costa, estendendo-se por 170 km abaixo do continente, deslizou durante 2,5 minutos. O tamanho da área de contato que rompe o atrito e se movimenta dá a magnitude do terremoto, que foi 8,8 no caso do Chile (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/us2010tfan>).

**FIGURA 1**  
**Sismos de 1962 a 2010 (magnitude  $\geq 4,7$ )**



Epicentros com erros  $< 25$  km (catálogo EHB/ISC)

Fonte: catálogo EHB (ISC, 2011)

Sismos na região da placa tectônica da América do Sul com magnitude  $\geq 4,7$  ocorridos de 1962 a 2010. Círculos vermelhos são epicentros de sismos rasos com foco a menos de 60 km de profundidade; quadrados amarelos, com profundidade entre 60 e 350 km; triângulos azuis, entre 500 e 650 km (não há sismos entre 350 e 500 km). As setas verdes indicam a velocidade de aproximação da placa de Nazca (7 cm/ano) e o afastamento entre as placas da América do Sul e da África com 3 a 4 cm/ano. As estrelas amarelas são os epicentros do terremoto do Haiti, de 12/1/2010 (borda norte da placa do Caribe), e do sul do Chile, de 27/2/2010. A barra amarela junto ao terremoto do Chile mostra o tamanho do contato entre as placas de Nazca e da América do Sul, que deslizou durante o terremoto (ruptura de 450 km de comprimento).

Em 11 de março de 2011 foi a vez do Japão. Uma área de 500 km de extensão por 180 km de largura, ao longo do contato entre as placas do Pacífico e da Eurásia, na costa norte do Japão (na verdade essa parte do Japão está numa ponta da placa da América do Norte), deslizou durante três minutos (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usc0001xgp>). O deslocamento foi de 10 m, em média, chegando a 20 m em alguns pontos. A magnitude 9 (o quinto maior terremoto dos últimos cem anos em todo o mundo) foi surpresa até para os sismólogos japoneses! Pior do que o terremoto, a que as edificações resistiram mais ou menos de acordo com o previsto, foi a força e altura do *tsunami* gerado pela súbita movimentação do fundo marinho, maior do que se pensava ser possível.

## PREVISÃO DE TERREMOTOS

Já faz parte dos nossos hábitos olhar a previsão do tempo para o próximo final de semana. Na verdade, não nos surpreende mais quando a ciência faz uma previsão correta, mas o contrário. Ficamos surpresos (e às vezes indignados) quando a previsão de tempo bom não se confirmou! Vemos pela televisão a trajetória de um furacão sendo mapeada por satélites, e sua evolução sendo calculada por computadores, dando tempo à população para se preparar. Estamos tão acostumados com os progressos da ciência que é sempre difícil explicar por que ainda não se pode prever terremotos.

Na década de 70, muitas pesquisas mostravam que se podiam detectar vários sinais de alerta antes de terremotos. Quando a crosta terrestre está sujeita a grandes pressões e está prestes a se romper, suas propriedades mecânicas podem se alterar ligeiramente. Vários casos de alteração (chamados de “anomalias”) foram observados: aumento do número de pequenos abalos (os chamados sismos “precursores”), variação da velocidade de propagação das ondas sísmicas, detecção de um aumento de radônio observado na superfície e liberado

das rochas subterrâneas através de pequenas fraturas, variações da resistividade elétrica das rochas, entre outros. Em 1975 os chineses acertaram a previsão de um terremoto de magnitude 7,3 em Haicheng (Wang & Chen, 2006; Geotimes, American Geological Institute, June 2006). Apesar dos 2.000 mortos, milhares de pessoas foram salvas por terem sido evacuadas a tempo. Nessa época, os sismólogos mais otimistas acreditavam que, “em poucas décadas”, a previsão de terremotos seria tão rotineira quanto a das chuvas.

A natureza, no entanto, é sempre mais complexa do que se pode imaginar. Em 1976 um outro terremoto de magnitude 7,5 em Tangshan, também no nordeste da China, ceifou a vida de mais de 240 mil pessoas. Apesar dos esforços e contínuo monitoramento dos chineses, não houve sinais precursores claros e conclusivos para se emitir um novo alerta. As técnicas usadas para o terremoto de 1975 não serviram para o de 1976 que, por exemplo, ocorreu repentinamente sem os pequenos sismos precursores. Tremores pequenos e médios ocorrem frequentemente, e é difícil distinguir padrões de sismicidade que são efeitos de terremotos anteriores de padrões novos que podem ser avisos de terremotos futuros. As décadas seguintes testemunharam um crescente descrédito na possibilidade de previsão de terremotos. Os poucos “sucessos” da década de 70 pareciam agora mais exceções do que boas promessas. Cada região tem propriedades geológicas distintas e mecanismos sismogênicos diferentes. Os possíveis “sinais precursores”, às vezes detectados em uma área, podem não servir para outro local. A maioria dos terremotos ocorre *sem* os pequenos sismos precursores. Os outros sinais precursores (as “anomalias” nas propriedades das rochas) são muito difíceis de serem detectados ou inexistem.

Há duas grandes dificuldades para se prever terremotos:

- 1) Os terremotos são rupturas que ocorrem a profundidades de dezenas de quilômetros, inacessíveis a medidas diretas tais como o nível de tensão nas falhas. Não é possível

medir as propriedades mecânicas das rochas (como resistência à ruptura, coeficiente de atrito, porosidade, etc.) com a precisão necessária nas profundidades onde os terremotos se iniciam.

2) O limiar de tensão para uma falha escorregar (isto é, iniciar uma ruptura) é mais ou menos o mesmo para qualquer terremoto, pequeno ou grande. Todo terremoto grande começa como um pequeno tremor. O que faz um grande terremoto é que a ruptura, que começa pequena, encontra outras áreas instáveis da falha e o processo se desencadeia como uma avalanche. Em física se diz que é um processo “catastrófico”. Isso ocorre porque as tensões nas falhas da crosta estão quase sempre em “estado crítico”, isto é, prestes a se romper. Variações muito sutis no nível das tensões crustais e do coeficiente de atrito, ao longo da falha, fazem com que uma pequena ruptura possa terminar logo (e se constituir num dos milhares de tremores pequenos e inofensivos) ou continuar por centenas de quilômetros, atingindo deslocamentos de algumas dezenas de metros e terminar como um trágico megaterremoto.

Por isso, principalmente pelo motivo 2, muitos sismólogos acreditam hoje que os terremotos são intrinsecamente imprevisíveis e nunca haverá um “serviço de previsão de terremotos” nos moldes da previsão de tempo. Enormes recursos foram investidos por vários países nas décadas de 70 e 80, principalmente nos Estados Unidos e no Japão, em pesquisa específica de predição de terremoto, sem sucesso. Apesar disso, alguns sismólogos mais otimistas continuam pesquisando o problema de previsão sísmica em locais bem específicos e bem instrumentados. Existe uma Comissão Internacional para Previsão de Terremotos (International Commission on Earthquake Forecasting – Icef), que avalia estatisticamente qualquer predição feita por algum cientista para verificar se foi bem-sucedida ou se a “predição” estava dentro do esperado estatisticamente. Essa comissão acredita que ainda não existe nenhum método seguro para a previsão de terremotos de curto prazo que seja de utili-

dade para a sociedade (do tipo “semana que vem haverá um terremoto – vamos evacuar a cidade”). A única “previsão” possível é de longo prazo (Jordan et al., 2011). Por exemplo, o histórico dos terremotos numa certa cidade pode indicar que, estatisticamente, há uma probabilidade de 10% de ocorrer um tremor forte num período de trinta anos (ou seja, um terremoto forte a cada trezentos anos, aproximadamente). Estudos mais recentes poderiam indicar que nessa cidade a probabilidade atual é um pouco maior, por exemplo, 30%, de ocorrer um terremoto forte nos próximos vinte anos. Isso é o que se chama de “previsão” de longo prazo (*long-term forecast*). Pode não ser útil para cada cidadão daquela cidade, mas é útil para os governantes saberem onde investir para melhorar a resistência de prédios importantes como hospitais, escolas, usinas nucleares, etc.

## PREPARANDO-SE PARA AGUENTAR O TRANCO

Uma vez que não é possível prever terremotos, a única solução é preparar-se para aguentar o abalo. Para isso, técnicas de construção antissísmica têm sido desenvolvidas tornando os edifícios mais resistentes e ao mesmo tempo permitindo que oscilem com o abalo, sem rupturas que possam provocar desabamento. Leis que regulamentam a construção antissísmica são estabelecidas (e cumpridas, nos países mais desenvolvidos!). Naturalmente, construções mais resistentes são muito mais caras, e países com menos recursos financeiros nem sempre podem se preparar adequadamente para os terremotos. Diante do alto custo de construções antissísmicas, uma maneira de otimizar os investimentos em segurança é fazer levantamentos detalhados do solo de cidades inteiras. Um mesmo terremoto pode fazer o chão vibrar mais ou menos dependendo da constituição e espessura do solo. Prédios iguais podem sofrer muito ou pouco dano dependendo

do tipo de solo em que foi erguido (solos mais moles e com rocha muito profunda amplificam as ondas sísmicas; solos mais rígidos ou terrenos rochosos vibram menos). Todas as grandes cidades em regiões de alta sismicidade já fizeram ou estão fazendo esses levantamentos de precisão, chamados de “microzonificação”. Códigos de construção antissísmica são então elaborados levando em conta esses mapeamentos de detalhe.

Infelizmente, melhorar a segurança tem um custo elevado e requer planejamento para dezenas de anos. Mesmo sabendo-se que, para cada dólar investido em segurança, o retorno é dez vezes maior a longo prazo, frequentemente as políticas públicas não conseguem implementar adequadamente as medidas necessárias. (Veja-se o caso dos deslizamentos de encostas na época de chuvas no Brasil.) Países com mais recursos e acostumados a planejamento de longo prazo estão bem mais preparados para os terremotos do que os outros. Terremotos de magnitude alta na Califórnia matam poucas dezenas de pessoas ao passo que terremotos apenas moderados em países pobres podem causar verdadeiras tragédias. O exemplo mais recente foi o terremoto do Haiti de 12 de janeiro de 2010, que teve magnitude não muito elevada, apenas 7 na escala Richter (no mundo todo ocorre uma dezena de terremotos dessa magnitude a cada ano!), mas causou uma tragédia matando entre 100 mil e 300 mil pessoas (dependendo da fonte...). A parte da falha que se rompeu nesse terremoto foi de 40 km (ver localização do epicentro na Figura 1), mas ocorreu muito perto da capital do país, cidade com grande população e pouco preparada para risco sísmico (mesmo tendo sido parcialmente destruída por outros terremotos no século XIX). Estudos de sismologia e de geodésia de alguns anos antes (Manaker et al., 2008) haviam mostrado que a crosta terrestre naquela parte do Haiti (falha de Enriquillo) já estava pronta para um terremoto de magnitude 7,2 com grande chance de ocorrer nas décadas seguintes.

Em contraste com o Haiti, dois meses depois o terremoto do Chile, de 27 de fevereiro de 2010, teve magnitude 8,8,

com uma ruptura de 450 km de extensão (barra alaranjada na Figura 1). Em termos de energia, esse terremoto foi quinhentas vezes mais potente, mas causou “apenas” quinhentas mortes devido à melhor qualidade das construções chilenas. De maneira semelhante, estudos prévios também haviam indicado que aquela parte do sul do Chile já tinha atingido uma deformação suficiente para um terremoto de magnitude 8 a 8,5 (Ruegg et al., 2008). Os chilenos sabiam que essa região do sul do Chile tinha alta probabilidade de sofrer um grande terremoto nas décadas seguintes, mas a qualidade das construções já vinha sendo melhorada em todo o país havia muitos anos, mesmo antes do estudo de Ruegg et al. (2008).

## ALARME IMEDIATO

Na impossibilidade de se prever terremotos, grande esforço tem sido empregado nos últimos anos para desenvolver sistemas de detecção e alarme logo após o início de um abalo. A ideia básica é usar uma densa rede de estações sismográficas para identificar que um terremoto que está sendo registrado é grande o suficiente para se emitir um alarme. Os sismos emitem dois tipos de ondas: uma primeira, com vibração longitudinal (onda P, que nada mais é que o som propagando-se pelas rochas), e uma outra, com vibrações transversais (onda S, que se propaga com velocidade um pouco menor que a P). As ondas S geralmente têm maiores amplitudes, chacoalham o chão lateralmente e são mais destruidoras que as ondas P. Nesse sistema de “alarme imediato” (*early warning*), se as ondas P indicarem que se trata de um terremoto perigoso, um alarme será emitido para as pessoas a algumas dezenas ou centenas de quilômetros de distância, dando a elas alguns segundos (minutos?) para se protegerem dos efeitos das ondas S. Próximo ao epicentro, o alarme não teria tempo de ser útil, mas a uma certa distância o aviso pode ser suficiente para desligar equipamentos perigosos, parar trens, fechar semáforos,

impedindo carros de subir viadutos, desligar uma usina nuclear, etc.

Sistemas desse tipo já estão funcionando em alguns países como Japão e México, e deverão entrar em operação brevemente na Califórnia. Mas ainda há muito que se aperfeiçoar nesse sistema. Uma das maiores preocupações é evitar alarmes falsos, pois a população pode deixar de acreditar no sistema (além dos prejuízos causados pela interrupção desnecessária de serviços) (Allen, 2011). Outro problema – oposto – é fazer previsão abaixo do perigo real. Foi o que aconteceu com o aviso de *tsunami* no Japão em março de 2011. Para emitir um alarme o mais rápido possível (e dar tempo para as pessoas se protegerem), a força do terremoto e a altura do *tsunami* são avaliadas com o primeiro minuto de registro da onda P. O problema é que a ruptura nos megaterremotos, com magnitudes bem acima de 8, pode durar vários minutos. A estimativa da altura do *tsunami*, baseada na análise do primeiro minuto da ruptura, foi menor do que o correto, e muitas pessoas não se abrigaram longe o suficiente. Esperar mais tempo para acompanhar o processo de ruptura dará uma estimativa mais confiável dos seus efeitos, mas pode ser tarde demais para as pessoas se abrigarem. O Japão agora está discutindo a melhor maneira de aperfeiçoar seu sistema de alarme (*Nature News*, 11/8/2011). A grande dificuldade de enfrentar situações extremamente raras, mas de alto risco, é que geralmente só os casos reais é que provam a eficiência ou a falha do sistema. O custo de aprender com os erros, nesses casos, é sempre muito alto.

## SISMOS NO BRASIL

E o Brasil poderia sofrer algum desastre sísmico?

### Lidando com fenômenos raros

Sabe-se que o Brasil, por estar no meio de uma placa tectônica, longe das suas bordas,

é uma região muito mais estável do que países como Chile, Peru, Equador, Colômbia e Venezuela (Figura 1). Esses países estão na borda da Placa Sul-Americana, onde o contato com outras placas em movimento deforma a crosta e armazena altas tensões numa velocidade muito maior do que no interior das placas, tensões essas liberadas repentinamente na forma de terremotos. Considerando o Brasil inteiro, temos um sismo de magnitude  $\geq 5$  a cada cinco anos, em média. Ao longo do litoral do Rio Grande do Sul ao Espírito Santo, temos um evento  $\geq 5$  a cada 20 ou 25 anos. Na região andina, sismos de magnitude  $\geq 5$  ocorrem em média duas vezes por semana. Isso dá uma ideia de quanto o Brasil é mais estável comparado às regiões mais ativas.

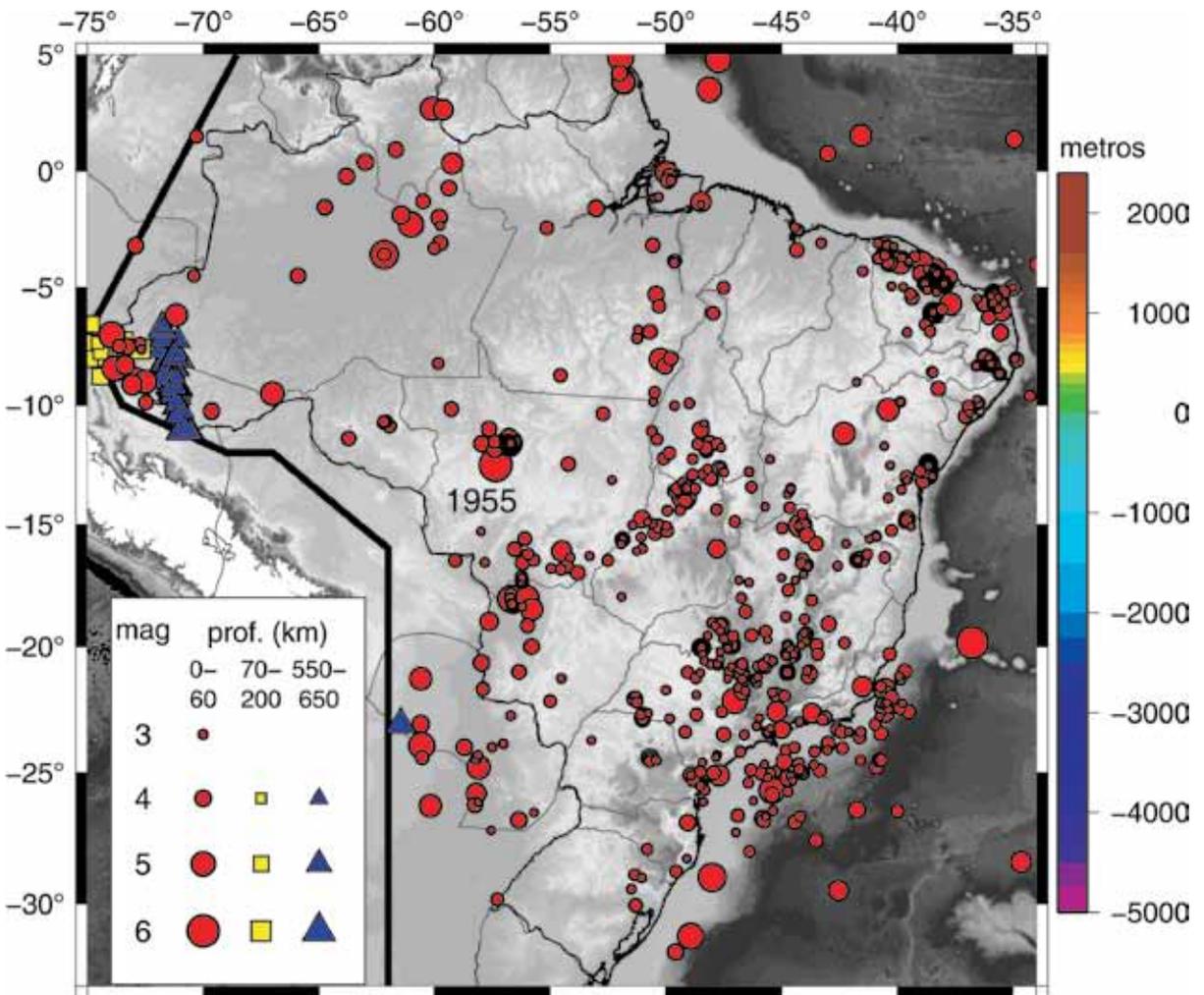
Por outro lado, a Figura 1 também mostra que sismos pequenos a moderados não são tão raros no Brasil. Sismos de magnitude 5 têm potencial para causar danos sérios em casas fracas, se o seu foco tiver uma profundidade rasa e ocorrer próximo a regiões habitadas. Foi o que aconteceu em 9/12/2007 no município de Itacarambi, norte de Minas Gerais, quando um tremor de magnitude 4,7 derrubou várias casas de construção precária e matou uma criança. O mapa da Figura 2 mostra todos os tremores ocorridos no Brasil e já catalogados. Inclui tanto sismos antigos estudados apenas através de relatos históricos assim como recentes detectados por sismógrafos. Naturalmente já aconteceram muitos outros tremores no Brasil que não foram sentidos por terem ocorrido em regiões desabitadas ou não foram detectados por estações sísmográficas por serem pequenos.

O maior sismo do Brasil ocorreu no norte do Mato Grosso em 31/1/1955, a 1 hora da madrugada, com magnitude 6,2 (ver Figura 2). Em Cuiabá, distante mais de 350 km do epicentro, várias pessoas acordaram com as vibrações sísmicas e saíram às ruas assustadas. A região epicentral (entre Porto dos Gaúchos e Sinop, MT) era desabitada na época. Uma repetição desse terremoto hoje certamente causaria sérios danos na área epicentral. O sismo de L'Aquila, Itália, em abril de 2009, teve magnitude 6,3 e causou

muita destruição, matando quase trezentas pessoas. Em todo o Brasil, acredita-se que ocorram dois sismos por século de magnitude 6 ou maior. (Nos Andes, magnitudes 6 ocorrem uma vez por mês.) Ou seja, embora o Brasil tenha uma atividade sísmica muito baixa comparada à de outros países de borda de placa, não somos totalmente imunes a tremores. O risco sísmico no Brasil é muito baixo, mas não é nulo!

Uma das grandes dificuldades de lidar com eventos muito raros é que o pouco que se conhece do passado não é garantia de padrão para o futuro. Isso ocorreu com o megaterremoto e *tsunami* da Sumatra de dezembro de 2004 (que atingiu vários países matando 300 mil pessoas). Não se tinha conhecimento de nenhum outro *tsunami* antigo parecido no Oceano Índico. Um fenômeno que se repete a cada trezentos

**FIGURA 2**  
**Boletim Sísmico Brasileiro (1767 a 2010, magnitude  $\geq 2,8$ )**



Fonte: Boletim Sísmico Brasileiro (USP, UnB, UFRN e IPT)

Epicentros de todos os sismos conhecidos do Brasil com magnitude  $\geq 2,8$ . O primeiro catalogado data de 1767. Note grande concentração de sismos na Região Sudeste, em parte por ser a região mais habitada e com mais dados históricos. A linha preta grossa indica o limite da região com dados compilados para esse catálogo. O maior sismo conhecido ocorreu em 1955 no norte do Mato Grosso.

ou quinhentos anos, em média, pode não ter registros históricos que sejam úteis. Mesmo no Japão, que conta com registros históricos muito antigos e um conhecimento geofísico bastante detalhado de todo o país, os sismólogos não achavam possível ocorrer uma ruptura tão extensa para que um terremoto atingisse magnitude 9. O histórico de terremotos passados e os estudos da sismicidade atual não evitam surpresas.

À frequente pergunta “O Brasil pode ter um grande terremoto destruidor de magnitude 7 ou 8?” costuma-se responder, simplificadamente, que “Não, o Brasil está numa região intraplaca relativamente estável; tremores pequenos a moderados podem ocorrer, mas terremotos de magnitude 7 são extremamente raros, talvez um a cada quinhentos anos, e magnitude 8 é ‘praticamente’ impossível”. Mas essa não é a pergunta mais apropriada. A pergunta correta seria “Qual a probabilidade de termos um fenômeno tão raro (mas de sérias consequências), e vale a pena prevenir-se para isso?”.

Sabe-se hoje que sismos de magnitude 5 a 6 podem ocorrer em qualquer região do planeta, mesmo no meio de uma placa tectônica e longe das suas bordas mais ativas. O tremor de magnitude 5,8, em 23/8/2011, na Virgínia, costa leste dos Estados Unidos, é o exemplo mais recente. Não havia naquele estado nenhum registro histórico de tremores com magnitude acima de 5 (o último que provocou algum dano ocorreu em 1875 com magnitude 4,8).

Os sismólogos tentam avaliar as probabilidades desses terremotos muito raros, e a sociedade ou o cidadão é que decidem se investem recursos para melhorar a segurança ou não. Um bom exemplo é o caso da Usina Nuclear de Angra dos Reis I, que, com base nos registros sísmicos da região e nas normas internacionais de projeto de usinas nucleares, foi projetada para suportar vibrações sísmicas com acelerações de até 0,1 g na direção horizontal que ocorressem em local de rocha sã. Levando em conta o histórico de tremores de terra no Sudeste do Brasil, um evento dessa intensidade no local das usinas tem chance de ocorrer uma vez a

cada 10 mil anos. Essa baixa probabilidade significa que um evento pode ser “extremamente raro” ou “praticamente impossível”. Além da probabilidade de ocorrência desse evento, o projeto de engenharia estabelece margens de segurança em relação à resistência das estruturas e componentes das usinas, de maneira que a probabilidade de falha seja inferior a 10% caso ocorra um evento dessa natureza. Mesmo assim, não existe segurança absoluta. Tampouco significa que não se deva melhorar a segurança ainda mais. Por causa do acidente de Fukushima, a Eletronuclear iniciou um programa de reavaliação de todos os aspectos de segurança das usinas nucleares de Angra dos Reis. No aspecto sismológico, é quase certo que, na reavaliação, as probabilidades de ocorrência de sismos futuros continuem “extremamente baixas”. Por outro lado, caberá à sociedade, através de instituições governamentais reguladoras, decidir se é desejável melhorar a segurança da usina para aguentar um fenômeno mais raro ainda, a cada 50 mil anos por exemplo. Melhorar a segurança é sempre possível, mas alguém precisa arcar com o custo (ou pagar mais caro o kWh).

Quando eu tomo um avião, sei que não estou 100% seguro. A probabilidade do meu avião cair é de 1 em 1 milhão (ou 1 em 10 milhões, dependendo da companhia...). Diante dos benefícios do transporte aéreo, eu e milhões de outros passageiros decidimos que vale a pena correr o risco. Isso não significa que não seja preciso investir em melhorar a segurança ainda mais. Por outro lado, se um avião tiver um nível de segurança cem vezes melhor do que os atuais, talvez eu não possa arcar com o custo da passagem, que será certamente muito mais alto. A ciência e a tecnologia tentam avaliar os graus de risco e os custos de melhorar a segurança. Mas o ponto de equilíbrio entre risco e custo é sempre uma decisão política da sociedade. O Japão, que tinha elegido a energia nuclear como uma das alternativas viáveis (25% da energia elétrica gerada), provavelmente continuará a operar usinas nucleares, melhorando a segurança, mesmo a um custo bem mais elevado.

## Sismicidade intraplaca e geologia

Sismos fortes, embora raros, podem ocorrer no interior de placas tectônicas causando muitos danos. A necessidade de se prevenir contra sismos intraplaca (por exemplo, com código de construção antisísmica) depende do nível de probabilidade desses fenômenos raros. O histórico de sismos brasileiros indica que a chance de ocorrerem acelerações do chão superiores a 5% de g (capazes de provocar trincas em paredes), numa localidade específica (Brasília, por exemplo), é de uma vez a cada mil anos. O Brasil tem uma norma sísmica (ABNT NBR 15.421, de 2006) na qual a maior parte do país foi classificada como Zona 0, isto é, sem perigo sísmico relevante para construções comuns. Zonas onde o risco sísmico deve ser considerado seriam os estados do Rio Grande do Norte, Ceará, e a parte mais próxima dos Andes, como o Acre. É um começo. Esse mapeamento foi baseado na estatística de sismos passados. A região de Porto dos Gaúchos, MT, está na Zona 0. É possível que alguma melhoria possa ser feita na próxima revisão.

No entanto, como o histórico de sismos antigos fornece uma ideia apenas aproximada para se prever a sismicidade futura, é preciso tentar outras técnicas. A Figura 3 é uma tentativa de mostrar quais são as áreas de maior e de menor atividade sísmica no Brasil e sua possível relação com estruturas geológicas.

Se pesquisas geofísicas e geológicas pudessem demonstrar por que certas áreas (como os estados do Rio Grande do Norte e Ceará, por exemplo) têm tido muitos sismos e outras regiões (como Piauí e Maranhão) têm sido praticamente assísmicas, poderíamos dizer que um terremoto de magnitude 7, mesmo sendo muito raro, teria uma probabilidade maior de ocorrer no Ceará do que no Piauí, por exemplo. Infelizmente, as relações entre sismos e estruturas geológicas em regiões intraplaca são extremamente complexas e há pouco consenso sobre as causas da distribuição dos sismos. A Figura 3, por exemplo, mostra

que não há uma relação muito óbvia entre áreas mais ativas e as principais províncias geológicas no Brasil.

A maioria dos sismólogos acredita que áreas de maior atividade sísmica nas últimas décadas e séculos devem ser locais mais prováveis para a rara ocorrência de um terremoto grande no futuro. Mas até nisso há quem discorde. Por exemplo, a área de Porto dos Gaúchos, no norte do Mato Grosso, que já teve sismos de magnitude 6 e onde continuam ocorrendo pequenos tremores ainda hoje (Figuras 2 e 3), em vez de ser uma zona de maior risco, poderia ser um local onde as tensões já foram liberadas pelo terremoto de 1955. Por isso, talvez o próximo “grande” terremoto brasileiro pudesse ocorrer numa outra área sem muita atividade sísmica atualmente, mas com muita tensão geológica acumulada e ainda não liberada. Essa situação de incerteza sísmológica não é exclusividade do Brasil, onde as pesquisas geofísicas são muito recentes e os levantamentos geológicos incompletos, mas ocorre em outros países com levantamentos geológico-geofísicos bem mais detalhados.

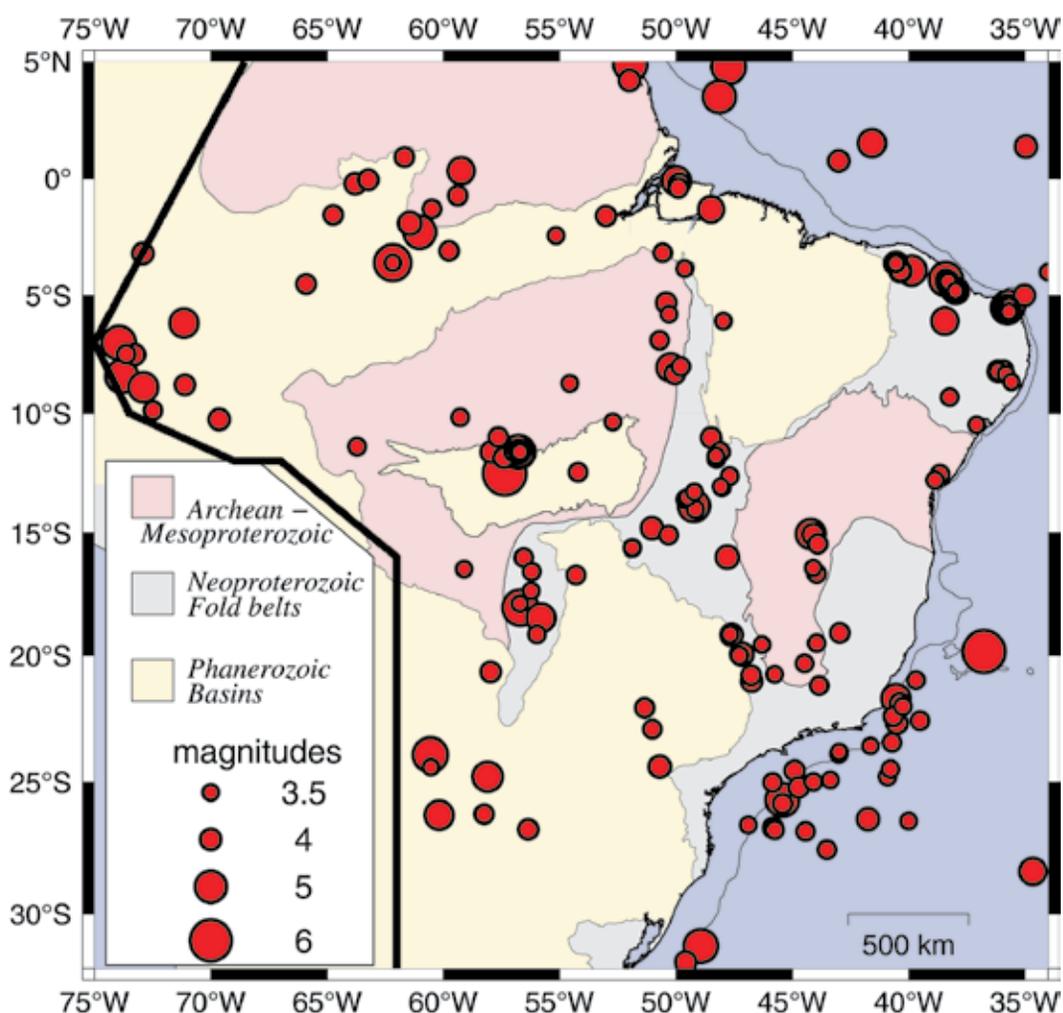
Há um enorme e acalorado debate atualmente nos Estados Unidos sobre a natureza da sismicidade intraplaca. Há duzentos anos, em dezembro de 1811 e fevereiro de 1812, três grandes terremotos de magnitudes entre 7,5 e 7,7 sacudiram a região central dos Estados Unidos. Os epicentros foram próximos do Rio Mississippi, entre Memphis (Tennessee) e New Madrid (uma pequena cidade no sul de Missouri). Inúmeras hipóteses têm sido propostas para explicar as causas desses terremotos, ou seja, as estruturas geológicas responsáveis pela ocorrência dos “terremotos de New Madrid”. Não há consenso. Mapas de perigo sísmico feitos pelo *U.S. Geological Survey* indicam que a região de New Madrid tem mais risco de novos terremotos grandes do que o resto da região central e leste do país. No entanto, vários sismólogos vêm questionando as premissas desses mapas (prever o futuro baseado no passado recente) e acreditam que na região de New Madrid atualmente não há mais tensão acumulada. O próximo

terremoto intraplaca de magnitude 7 pode ocorrer em alguma outra área de baixa sismicidade atual. Isso não é um debate apenas acadêmico. Em Memphis, o governo gasta enormes recursos para adaptar hospitais e outras instalações críticas para resistirem a um possível novo terremoto. Essas incertezas sobre como lidar com fenômenos muito raros refletem as limitações da ciência para entender completamente a natureza, que é sempre mais complexa do que imaginamos.

## CONCLUSÕES

A atividade sísmica no Brasil é bastante baixa. Sismos médios e moderados (magnitudes até 5 ou 6) podem ocorrer em qualquer região mas com probabilidades até agora consideradas suficientemente remotas, podendo ser desprezadas na maioria dos projetos de edificações. Apenas instalações críticas, como usinas e reatores

**FIGURA 3**  
Catálogo uniforme (1955 a 2010, magnitude  $\geq 3,5$ )



Distribuição de epicentros do catálogo "uniforme", isto é, com limiar de magnitude variando no tempo, mas com cobertura geográfica mais uniforme mostrando as áreas mais e menos ativas no Brasil. As cores indicam as principais províncias geológicas do país: rosa – regiões cratônicas mais antigas (formadas entre 3 e 1 bilhão de anos atrás); cinza – regiões de dobramentos do ciclo brasileiro (formadas entre 900 e 500 Ma); amarelo – as grandes bacias intraplaca formadas após 500 Ma, aproximadamente. Algumas áreas são claramente mais ativas que outras, mas nenhuma região do Brasil está completamente livre de tremores de terra.

nucleares e barragens hidrelétricas, têm feito uso sistemático de análises sismológicas, quase sempre indicando que as exigências de segurança sísmica são insuficientes para demandar alteração do projeto. Por outro lado, se a sociedade achar que é preciso aumentar ainda mais o nível de segurança sísmica, estaremos lidando com eventos ainda mais raros e teremos que aprender a conviver com mais incertezas.

O Japão tem feito avanços notáveis na mitigação de terremotos. A união de ciência e engenharia fez daquele país um dos mais preparados para resistir aos abalos sísmicos. As técnicas altamente sofisticadas de construção antissísmicas e os sistemas de aviso imediato têm salvado milhares de vidas em dezenas de terremotos nas últimas décadas. Mas desastres como o último megaterremoto de março de 2011 mostram que ainda há muito que melhorar. Quando o homem se empolga demais com suas descobertas e técnicas e pensa que pode “entender” completamente os fenômenos naturais, um evento extremamente raro ocorre, mostrando que a natureza é bem mais complexa e incertezas fazem parte da ciência, assim como da vida em geral.

No final de 2010, a Sociedade Americana de Sismologia (SSA) decidiu conceder

sua medalha anual “Bruce Bolt” a Kojiro Irikura, do Instituto de Prevenção de Desastres da Universidade de Kyoto, por suas enormes contribuições na implantação de redes para registro de terremotos fortes (*strong-motion networks*), distribuição livre dos dados na Internet, e técnicas para simular movimento do chão durante grandes terremotos. Todas essas contribuições ajudaram a tornar o Japão muito mais preparado para resistir aos impactos dos terremotos. A medalha seria entregue na reunião da SSA de Memphis em abril de 2011. Após a tragédia de março de 2011, Kojiro Irikura humildemente declinou da medalha sentindo-se “culpado” pelo desastre e não merecedor de reconhecimento científico. A diretoria da SSA então teve de convencê-lo a aceitar a honraria pois suas contribuições científicas na segurança sísmica do Japão não podiam ser diminuídas, mesmo diante de um fenômeno extremamente raro. Sem o desenvolvimento da sismologia japonesa, a tragédia teria sido várias vezes pior. Na reunião de Memphis, Irikura recebeu a medalha, não como tributo a si, mas em nome de toda a comunidade japonesa, num discurso dos mais emocionados que a SSA já presenciou.

---

## BIBLIOGRAFIA

- ALLEN, R. “Os Poucos Segundos que Precedem um Grande Terremoto”, in *Scientific American Brasil*, 108, 2011, pp. 38-43.
- ISC. International Seismological Centre, EHB Bulletin, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2011.
- JORDAN, T. H. et al. “Operational Earthquake Forecasting, State of Knowledge and Guidelines for Utilization. ICEF Final Report”, in *Annals of Geophysics*, 54(4), 2011.
- MANAKER, E. Calais; FREED, A. M. et al. “Interseismic Plate Coupling and Strain Partitioning in the Northeastern Caribbean”, in *Geophysical J. International*, 174, 2008, pp. 889-903.
- RUEGG, J. C.; RUDLOFF, A.; VIGNY, C.; MADARIAGA, R.; DE CHABALIER, J. B.; CAMPOS, J.; KAUSEL, E.; BARRIENTOS, S.; DIMITROV, D. “Interseismic Strain Accumulation Measured by GPS in the Seismic Gap Between Constitución and Concepción in Chile”, in *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 175, 2009, pp. 78-85.
- WANG, K.; CHEN, Q-F; SHIHONG, S.; WANG, A. “Predicting the 1975 Haicheng Earthquake”, in *Bulletin of the Seismological Society of America*, Jun 2006; 96, 2006, pp. 757-95.