

# Localizar epicentros à mesa

Luis Matias

Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, Edifício C8, 1749-016 Lisboa

lmatias@fc.ul.pt

## Resumo

A Sismologia é um domínio das Ciências da Terra que se presta de forma natural à multidisciplinaridade. A localização de epicentros é um tema abordado na Geologia. Para esse efeito, são usadas ondas e é necessário conhecer a sua velocidade de propagação nos meios materiais, temas estudados em Física. Nos oceanos onde vivem mamíferos marinhos, muitos deles em perigo ou mesmo em vias de extinção, são usados métodos acústicos passivos para a sua monitorização, uma atividade da Biologia. Neste artigo, apresentamos um dispositivo experimental simples, que pode ser realizado em laboratório, para estudar a localização de fontes sonoras. Ele replica um procedimento que é usado em Biologia Marinha, sendo a localização da fonte obtida pela interseção de hipérbolas que podem ser desenhadas com recurso a uma régua e um cordel.

## Introdução

Um sismo ocorre quando há uma rotura brusca numa falha sujeita a tensão. O foco sísmico é o ponto onde a rotura se inicia e o epicentro é a projeção desse ponto à superfície. A localização do epicentro (e foco) dum sismo é feita usualmente recorrendo às ondas de volume que são geradas durante a rotura. Em meios sólidos, geram-se ondas P (longitudinais) e ondas S (transversais). Conhecendo-se a velocidade de propagação das ondas P e S no meio atravessado (as curvas tempo-distância), é possível converter a diferença dos tempos de chegada das duas ondas a um sensor (o sismómetro) numa distância epicentral. Conhecendo a distância, podemos traçar uma circunferência em torno do sensor que assinala as localizações possíveis para o epicentro. Se tivermos mais duas estações nas quais possamos fazer a mesma operação e que estejam distri-

buídas de forma a rodear o epicentro, então podemos traçar mais duas circunferências à superfície do globo, estando o epicentro no ponto de interseção (aproximado) das três circunferências (Figura 1). Este raciocínio é válido quando o foco é superficial. No caso de o foco ser profundo, teremos de escolher por tentativa e erro o conjunto de curvas tempo-distância que melhor se ajustam aos dados. Este procedimento é feito rotineiramente em todos os observatórios sismológicos do planeta, recorrendo a programas de cálculo automático. No entanto, o procedimento gráfico, pela sua simplicidade, é utilizado habitualmente para ilustrar o processo de cálculo do epicentro de um sismo.

Existem inúmeras referências na Internet que apresentam procedimentos para a localização de epicentros usando sismogramas reais e o método das circunferências [1]. No entanto, deve-se assinalar que a solução gráfica para a localização dum epicentro numa representação plana da Terra (mapa) apenas é válida para pequenas distâncias, tipicamente inferiores a 500 km.

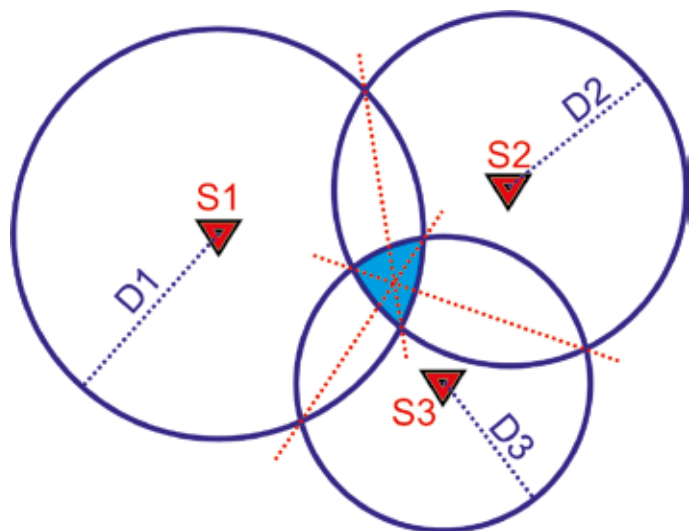


Fig. 1 – Localização do epicentro dum sismo pelo método convencional.

Gerar um sismo numa mesa é muito simples, basta dar uma pancada com um martelo. Uma mesa também oferece outra simplificação, pois não nos temos de preocupar com a profundidade do foco e reduzimos o problema a duas dimensões apenas. No entanto, uma pancada apenas gera ondas P diretamente e, por isso, não podemos usar no laboratório escolar o método convencional das circunferências descrito anteriormente. Existem alguns procedimentos propostos para a localização de pancadas numa mesa ou no chão que são ou demasiado simples e irrealistas [2] ou demasiado complexos e de difícil execução [3].

Neste artigo, começaremos por apresentar uma situação em que é importante a localização de fontes sonoras em meios fluidos onde não se propagam ondas S. De seguida, apresentamos o método que permite a localização de fontes nesse tipo de meios. Veremos que a solução envolve o traçado de hipérbolas. As hipérbolas podem ser traçadas manualmente, com recurso a uma régua e um fio. No final, apresentamos um exemplo prático do procedimento experimental indicado.

### Monitorização acústica passiva de cetáceos

Os cetáceos (baleias, golfinhos e toninhas) são mamíferos marinhos que, apesar de respirarem ar, se adaptaram a

viver de forma permanente nos mares e oceanos. Muitos deles são hoje considerados como espécies em perigo ou mesmo em vias de extinção. É por isso fundamental o seu estudo que, para além do estrito interesse científico, deve dar um contributo para as políticas de conservação e proteção.

Os cetáceos são habitualmente estudados por técnicas de observação visual. No entanto, o seu comportamento sob a superfície está inacessível, para além do que muitas das espécies de interesse vivem no oceano aberto, tornando as campanhas de observação custosas e de difícil execução. A observação visual apenas pode ocorrer de dia e em boas condições atmosféricas e oceânicas.

Para obviar estas múltiplas dificuldades, têm sido desenvolvidos métodos de investigação indiretos, a Monitorização Acústica Passiva (ou PAM na designação anglo-saxónica) que se baseia no estudo das vocalizações que os cetáceos realizam em ambiente marinho. Os sons emitidos podem ser capturados por sensores acústicos (os hidrofones) e os registos são então usados para obter a localização da sua fonte. Os métodos de localização de fontes sonoras no oceano estão adequados ao facto de apenas se poderem registar ondas de pressão (ondas longitudinais ou ondas P).

#### A equação algébrica duma hipérbole

Para simplificar as equações algébricas, vamos considerar que os focos da hipérbole se situam no plano sobre o eixo dos  $x$  a uma distância  $c$  da origem (Figura 3). Neste caso, a hipérbole tem os seus dois ramos simétricos em relação ao eixo dos  $y$ . A hipérbole interseca o eixo dos  $x$  em dois pontos,  $V_1$  e  $V_2$ , designados por vértices da hipérbole. Na figura, considerando por exemplo o vértice  $V_2$ , é fácil deduzir que a diferença das distâncias desse ponto a cada um dos focos vale  $2a$ . Essa é a diferença de distâncias característica que se deve manter para todos os pontos da hipérbole. A dedução da equação algébrica da hipérbole fica agora simplificada: é o conjunto de todos os pontos  $P(x, y)$  cuja diferença de distâncias para os focos vale  $2a$ , ou seja,  $D_1 - D_2 = 2a$ ,

$$\sqrt{(x+c)^2 + y^2} - \sqrt{(x-c)^2 + y^2} = 2a \quad (1)$$

Definindo  $b$  como o número positivo tal que  $b^2 = c^2 - a^2$  obtemos, após alguma álgebra, a expressão da hipérbole simétrica em relação ao eixo  $y$ .

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

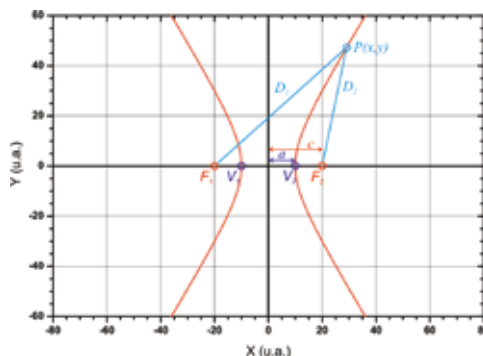


Fig. 3 – Representação duma hipérbole simétrica em torno do eixo Y.

## Localização de fontes sonoras no oceano

Por simplicidade, vamos admitir que a velocidade do som no oceano é constante, valendo  $s_w$ . Dispomos de dois sensores sincronizados (mesmo relógio ou base de tempo) que registam uma vocalização. Os sensores e a fonte sonora encontram-se à mesma profundidade e, por isso, trataremos da propagação do som apenas a duas dimensões, no plano. O tempo de chegada da onda acústica será (em geral) diferente para cada um dos sensores. Seja  $\Delta t$  a diferença de tempos entre os dois sensores, chegando o sinal primeiro ao sensor  $S_1$  e depois a  $S_2$ . Caso a situação se inverta, então consideraremos que  $\Delta t$  tem um valor negativo. Podemos então inferir que as possíveis localizações da fonte sonora (o epicentro) se encontram no lugar geométrico de todos os pontos do plano cuja diferença de distâncias a  $S_1$  e a  $S_2$  vale  $d = s_w \Delta t$ . Esta é precisamente a definição duma hipérbole em que  $S_1$  e  $S_2$  coincidem com os seus focos [4]. Se dispusermos de vários pares de sensores, então o epicentro, a fonte sonora, ir-se-á localizar no ponto de interseção das várias hipérbolas, como se mostra na Figura 2.

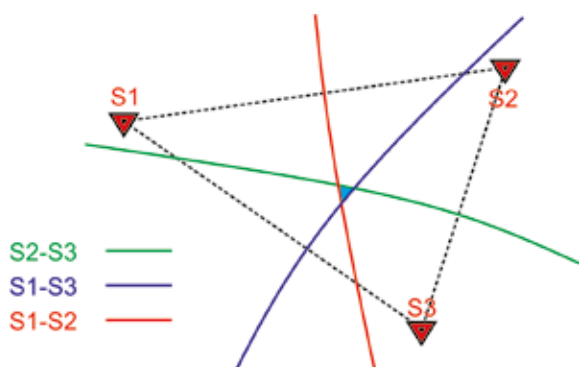


Fig. 2 – Localização do epicentro dum sismo pelo método das hipérbolas. Neste caso o sinal sonoro é registado por três sensores com os quais podemos estabelecer três pares, S1-S2, S1-S3 e S2-S3. Cada par de sensores permite definir um ramo de hipérbole no qual se deve encontrar o epicentro, identificado na figura pela sua cor. Três pares permitem traçar três ramos de hipérbole e o epicentro situa-se na região em que as hipérbolas se intersectam.

### Traçado manual duma hipérbole

Para traçar uma hipérbole, precisamos duma régua (ou barra comprida) e de um fio. Uma das extremidades do fio está fixa num dos extremos da régua (ponto A) e a outra extremidade fixa a um dos focos, neste caso o foco  $F_2$  como se mostra na Figura 3. A outra extremidade da régua deverá estar fixa no outro foco,  $F_1$  neste exemplo. A curva deve ser traçada com o fio esticado e com a caneta encostada à régua no ponto P. A distância ao foco  $F_1$  é dada pela régua e a distância ao foco  $F_2$  pelo fio esticado. É fácil de verificar que neste caso quando a caneta percorre a régua encostada a ela, a mesma quantidade é adicio-

nada ou subtraída a esses dois comprimentos pelo que se verifica a propriedade da hipérbole: a diferença entre as distâncias do ponto aos focos mantém-se constante.

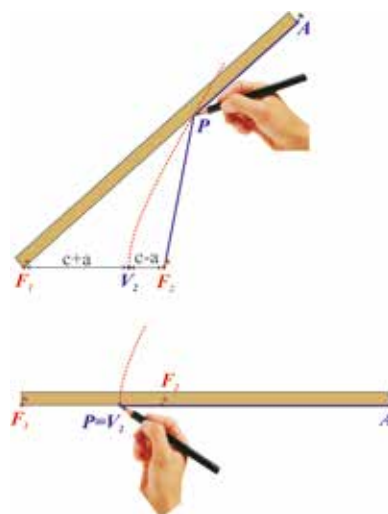


Fig. 4 – Indicações para o traçado manual duma hipérbole.

Para conhecer qual o comprimento do fio adequado, observamos agora a figura em que a régua coincide com a linha que une os dois focos (Figura 3). A caneta deverá então estar no vértice mais afastado de  $F_1$ , o vértice  $V_2$ . É fácil de ver que a distância entre a caneta e o foco mais distante vale então  $c + a$ , sendo a distância ao foco mais próximo  $c - a$ .

### Procedimento experimental

Convém ter à sua disposição uma mesa grande. Precisa também dum PC com entrada áudio (estéreo) e de um programa de análise de som. Neste trabalho, usámos o *Audacity* [5], um software de distribuição livre. A fonte sonora será a pancada dum martelo e, como sensores, podem-se usar captadores piezoelétricos.

Usando o procedimento indicado nas seções anteriores, um par de sensores apenas irá permitir traçar uma hipérbole. Para obtermos uma segunda hipérbole, usando apenas um conjunto PC + sensores, podemos efetuar uma segunda pancada com os sensores localizados numa posição diferente. Há que ter o cuidado de garantir que as hipérbolas que vierem a ser traçadas apenas se intersectem uma vez. Isso pode ser obtido com uma escolha criteriosa da localização dos sensores.

Para traçar as hipérbolas precisamos de conhecer dois parâmetros: (i)  $2c$  = distância entre os dois sensores, que define a posição dos focos da hipérbole; (ii)  $d = 2a$  a diferença de distâncias dos pontos da hipérbole para cada um dos focos. Fazendo a análise do som registado após uma pancada, podemos determinar a diferença entre os tempos de chegada das ondas acústicas aos sensores,  $\Delta t$ , e conhecer qual dos sensores está mais próximo do epicentro. Esta informação adicional é neces-

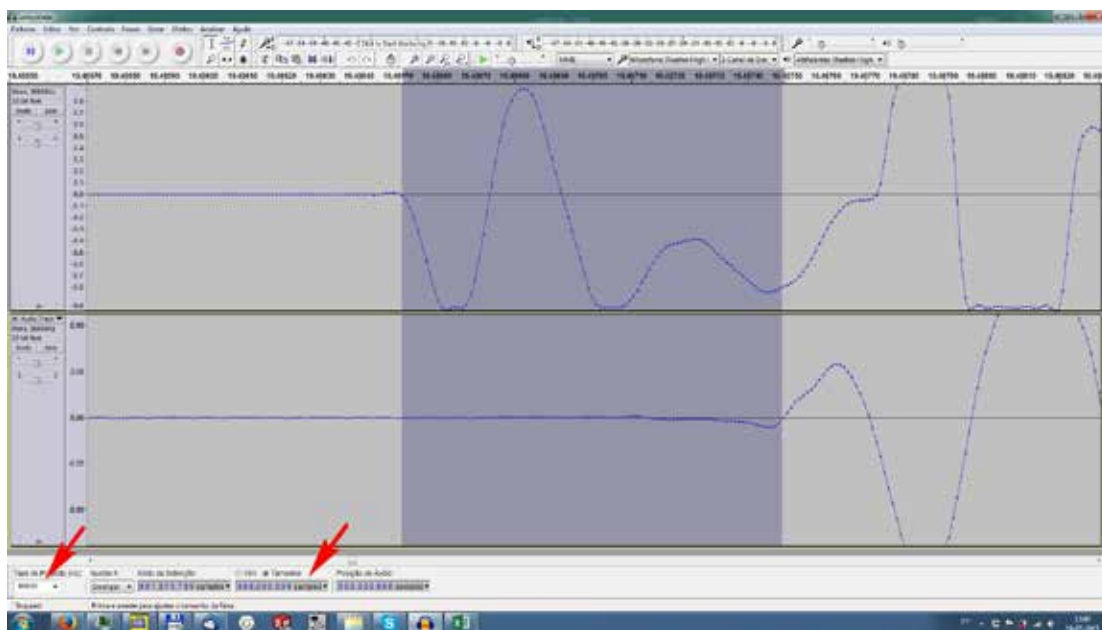


Fig. 5 – Exemplo da medição dum intervalo de tempo com Audacity. As setas indicam a taxa de amostragem e o intervalo em número de amostras.

sária para decidirmos qual dos ramos da hipérbole é que devemos desenhar. Apenas um dos ramos interessa. Para convertermos a largura do intervalo de tempo em distância, temos de conhecer a velocidade de propagação do som no meio,  $s$ , que deverá ser medida logo no início da atividade experimental. Sabendo  $\Delta t$ , o parâmetro  $a$  da hipérbole vale  $s \cdot \Delta t / 2$ .

### Exemplo

Na mesa de trabalho, considerámos o canto inferior esquerdo como a origem do nosso sistema de coordenadas. Os valores indicados a seguir estão em centímetros.

### Notas práticas

Para medir as pequenas diferenças de tempo que ocorrem nesta experiência, é conveniente fazer a digitalização do som a uma taxa bastante elevada. Usámos neste exemplo 96 kHz. A estas frequências de amostragem, o programa usado não mede convenientemente intervalos de tempo, mas mede corretamente esses intervalos em número de amostras. Conhecendo o intervalo de amostragem, é simples a conversão do número de amostras em largura de intervalo de tempo (ver exemplo na Figura 5).

Sendo  $na$  o número de amostras e  $f_a$  a frequência de amostragem, a largura do intervalo de tempo correspondente vale

$$\Delta t = \frac{na}{f_a} \quad (3)$$

Usando  $f_a$  em kHz, a largura do intervalo de tempo vem em ms.

### Medir a velocidade do som

A estratégia usada foi a seguinte. Colocámos os dois sensores à distância de 70 cm um do outro. Na linha que une estas duas posições, marcámos pontos a cada 5 cm. Damos uma pancada em cada um desses pontos e medimos a diferença nos tempos de chegada da onda acústica a cada um dos sensores. Considerámos que a diferença de tempos e respetiva diferença de trajetos eram positivos quando o sinal chegava primeiro ao sensor S1 (à esquerda) e negativos no caso contrário.

Fizemos a representação gráfica da diferença de percursos em função da diferença de tempos e obtivemos a velocidade de propagação por regressão linear, tendo obtido o valor de  $s = (63,6 \pm 1,5)$  cm/ms (Figura 6).

### Localizar o epicentro

Para efeitos de demonstração, colocámos o epicentro no ponto de coordenadas (40., 50.). Na 1.ª experiência os sensores tinham as coordenadas S1(20., 20.) e S2(80., 20.). Na 2.ª experiência as coordenadas foram S'1(20., 20.) e S'2(20., 80.). A estratégia foi desenhar um dispositivo em L com os sensores bastante afastados (Figura 7). Em ambos os casos, a distância entre sensores vale 60 cm, pelo que o parâmetro  $c$  das duas hipérbolas a traçar vale 30 cm. Para o primeiro conjunto de sensores, o intervalo de tempo medido, usando S1 como referência, foi de 18 amostras. No segundo caso, obtivemos a largura do intervalo de tempo de -2 amostras (o sinal chega primeiro a S2 e depois a S1). Convertidos em tempo e depois em distância, temos que, no primeiro caso, traçar o ramo

cm pos.	cm dist.	amostras $\Delta t$	ms $\Delta t$
5	60	94	0,979
10	50	74	0,771
15	40	63	0,656
20	30	43	0,448
25	20	31	0,323
30	10	15	0,156
35	0	-6	-0,063
40	10	-27	-0,281
45	20	-33	-0,344
50	30	-43	-0,448
55	40	-65	-0,677
60	50	-73	-0,760
65	60	-84	-0,875

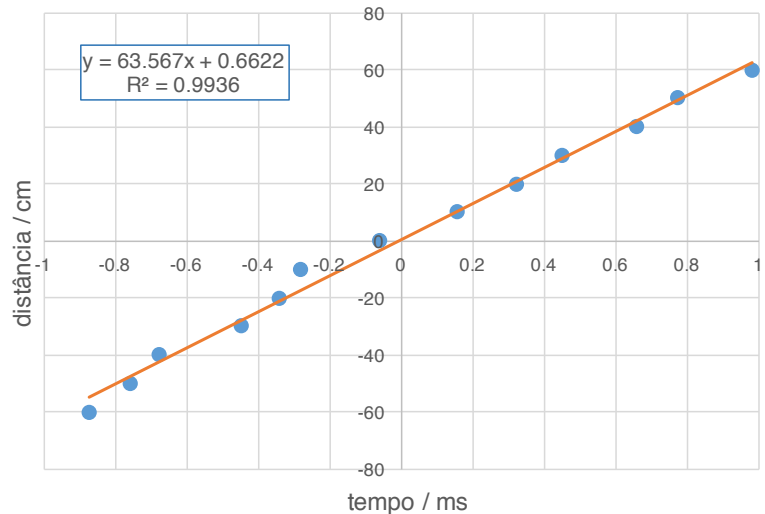


Fig. 6 – Valores usados na determinação da velocidade de propagação do som na mesa.

da hipérbole mais próxima de S1 com uma diferença entre distâncias de  $2a = 11,9$  cm. No segundo caso teremos de traçar o ramo de hipérbole mais próximo de S'2 com  $2a = 1,3$  cm.

O epicentro é calculado graficamente com auxílio duma régua em madeira e fio, usando o traçado manual descrito na Figura 3. Os focos são fixos com o auxílio de ventosas (Figura 7a). Trata-se duma construção aproximada, mas que permite obter um valor razoável e ilustrar de forma mais prática o método de cálculo tornando-o análogo ao “método das circunferências” para o cálculo de epicentros no globo.

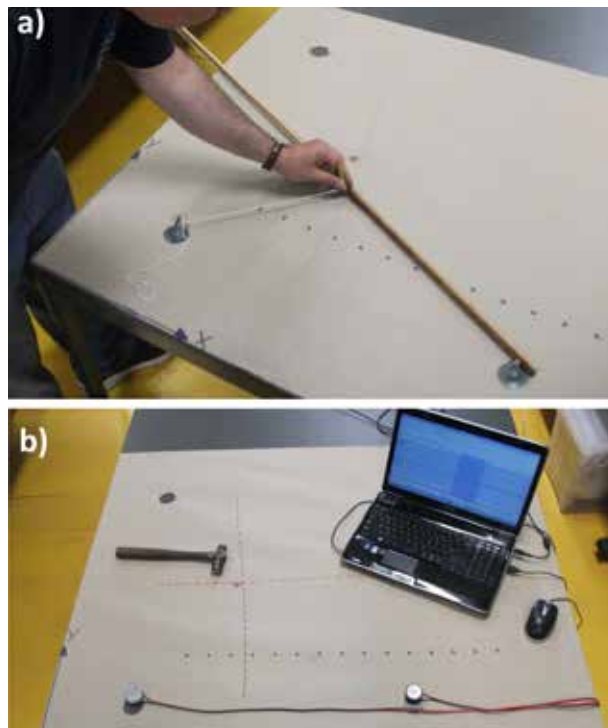


Fig. 7 – a) Traçado manual duma das hipérbolas do problema exemplificado; b) Apresentação da montagem experimental já com o resultado final após o traçado das duas hipérbolas. O símbolo \* indica a posição teórica do epicentro. Mostram-se também as marcas espaçadas de 5 cm que foram usadas na medição da velocidade do som na mesa.

#### Referências

1. [http://national.udppc.asso.fr/attachments/Arpenteur\\_du\\_Web\\_Ondes\\_sismiques.pdf](http://national.udppc.asso.fr/attachments/Arpenteur_du_Web_Ondes_sismiques.pdf)  
[https://www.iris.edu/hq/inclass/lesson/locating\\_an\\_earthquake\\_with\\_recent\\_seismic\\_data](https://www.iris.edu/hq/inclass/lesson/locating_an_earthquake_with_recent_seismic_data)  
<http://www.indiana.edu/~pepp/curriculum/2002/cauble02curr.htm>
2. [http://www.kgsorkney.com/uploads/1/4/9/3/14935550/researching-physics-earthquakes\\_tcm4-649463.pdf](http://www.kgsorkney.com/uploads/1/4/9/3/14935550/researching-physics-earthquakes_tcm4-649463.pdf)
3. <http://disciplines.ac-montpellier.fr/svt/modele-de-localisation-de-l-epicentre-d-un-seisme>
4. <http://www.raineclasse.com/textbook/tb48.pdf>
5. <http://www.audacityteam.org/>



**Luis Matias** é professor associado com agregação da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, e investigador do IDL, Instituto Dom Luiz. As suas áreas principais de investigação têm sido a Sismologia e a Geofísica Marinha. Tem coordenado e participado em vários projetos de divulgação científica nestes domínios, quer a nível nacional quer a nível internacional. A observação sismológica nos oceanos tem permitido a ligação da investigação a outras áreas científicas, como a Oceanografia, a Meteorologia e a Biologia Marinha.