



**Estudio de la fuente sísmica con estaciones
en tierra y mar**



REAL INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE LA
ARMADA EN SAN FERNANDO

BOLETIN ROA Nº 5/2021



**ESTUDIO DE LA FUENTE SÍSMICA CON
ESTACIONES EN TIERRA Y MAR**

**STUDY OF THE SEISMIC SOURCE
USING ONSHORE AND OCEAN STATIONS**



MINISTERIO DE DEFENSA

Universidad Complutense de Madrid

Facultad de Ciencias Físicas

Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica



ESTUDIO DE LA FUENTE SÍSMICA CON ESTACIONES EN TIERRA Y MAR
STUDY OF THE SEISMIC SOURCE USING ONSHORE AND OCEAN STATIONS

Memoria para optar al grado de Doctor presentada por

Roberto Cabieces Díaz

Enero 2021

Dirigido por:

Prof^a. Elisa Buforn Peiró

Dr. Antonio A. Pazos García

Agradecimientos

Doy gracias a la Armada Española y en especial al Real Instituto y Observatorio de la Armada, por su constante apoyo el cual ha permitido la realización de esta tesis. Ha sido fundamental el apoyo prestado por la Armada Española en la campaña del Cabo S. Vicente 2015-2016, con la participación de los buques “Mar Caribe”, “Vigía” y “La Graña” para el fondeo y recuperación de los OBSs, al igual que la participación de mi codirector de tesis, el Dr. Antonio Pazos que dirigió esta campaña, sin la cual esta tesis no habría podido realizarse.

Mi más sincero agradecimiento a mi directora de tesis, la Prof^a. Elisa Buforn, por su esfuerzo y confianza, y por haber dedicado su tiempo a orientarme a lo largo de la elaboración de esta tesis.

Quiero expresar mi gratitud al Prof. Frank Krüger, que tuteló mi estancia de 3 meses de duración, en el Instituto de Geociencias de la Universidad de Potsdam (Alemania), y me ayudó a superar multitud de dificultades en este periodo, financiado por la Armada Española y por el centro Geociencias Barcelona-CSIC. También quiero agradecer la participación y apoyo en este trabajo al Dr. Simone Cesca (GFZ, Potsdam) y al Dr. Antonio Villaseñor (CSIC, Barcelona). A los miembros del Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica de la Universidad Complutense, por la ayuda prestada y en especial al grupo de sismología.

Parte de este trabajo ha sido financiado por el proyecto “ALERTES-RIM: Sistema de Alerta Sísmica Temprana: Sistema regional e in situ para la región Ibero-Magrebí” (CGL2013-45724-C03) del Ministerio de Economía y Competitividad.

Por último, y no por ello menos importante, quiero agradecer su inmenso apoyo a mi esposa Pina y a mis padres Roberto y Fernanda.

Muchas gracias a todos,

Roberto

Índice

| | |
|--|----|
| <i>Resumen / Summary</i> | 1 |
| <i>Capítulo 1. Introducción / Introduction</i> | 5 |
| <i>Capítulo 2. Metodología</i> | 11 |
| <i>2.1 Localización hipocentral</i> | 11 |
| 2.1.1 Localización hipocentral por métodos lineales..... | 11 |
| 2.1.2 Localización hipocentral por métodos no lineales | 18 |
| <i>2.2 Mecanismo focal</i> | 26 |
| 2.2.1 Determinación de la orientación del plano de fractura | 27 |
| <i>2.3. Técnica de Antena Sísmica para tratamiento de señales incoherentes basado en la Transformada Wavelet Continua</i> | 28 |
| 2.3.1 Técnicas de array | 29 |
| 2.3.2 Respuesta de la Antena Sísmica | 30 |
| 2.3.3 Desarrollo de nueva metodología para la estimación del vector lentitud por medio de la Continuos Wavelet Transform (CWT) | 34 |
| 2.3.4 Método de Amplitudes (AM) | 38 |
| 2.3.5 Broad-Band Frequency-Wavenumber Beamforming (BB-FK)..... | 40 |
| 2.3.6. Estimación de las coordenadas epicentrales por medio de las CFs..... | 42 |
| <i>Capítulo 3. Procesado y análisis de las observaciones</i> | 43 |
| <i>3.1. Observaciones</i> | 43 |
| <i>3.2 Ocean Bottom Seismometer (OBS)</i> | 45 |
| <i>3.3 Determinación de la respuesta instrumental</i> | 47 |
| <i>3.4 Detección y selección de eventos sísmicos</i> | 52 |
| <i>3.5 Corrección de la señal de tiempo de los OBSs</i> | 53 |
| <i>3.6 Corrección de la orientación de las componentes horizontales de los OBSs.</i> | 59 |
| <i>3.7 Estimación del ruido sísmico en OBSs.</i> | 63 |
| <i>3.8 Modelos de Tierra.</i> | 68 |
| <i>3.9 Software</i> | 69 |
| 3.9.1 CWT-Seismology..... | 69 |
| 3.9.2 Software para la localización de terremotos con método no lineal: NonLinLoc. | 70 |

| | |
|--|------------|
| 3.9.3 Software para la localización de terremotos con método lineal: SeisCompP3. | 70 |
| 3.9.4 Librerías de código adicionales..... | 70 |
| Capítulo 4. Resultados..... | 71 |
| 4.1 Localizaciones hipocentrales..... | 72 |
| 4.1.1 Selección de terremotos | 72 |
| 4.1.2 Resultados de la localización hipocentral NLL | 75 |
| 4.1.3 Comparación con localizaciones IGN | 85 |
| 4.1.4 Comparación de resultados en función del modelo de Tierra | 89 |
| 4.1.5 Casos especiales: terremotos localizados fuera de la red de OBSs | 91 |
| 4.1.6 Comparación de resultados con trabajos previos | 93 |
| 4.2 Mecanismo focal: orientación del plano de falla..... | 95 |
| 4.3 Resultados vector lentitud | 100 |
| 4.3.1 Estimación del vector lentitud mediante la técnica CWT. | 100 |
| 4.3.2 Eficacia y robustez del método CWT..... | 106 |
| 5. Conclusiones / Conclusions | 117 |
| 6. Referencias | 121 |
| Anexo I. Coordenadas de los OBSs del array..... | 133 |
| Anexo II. Curvas de sincronización de los relojes de los OBSs | 135 |
| Anexo III. Terremotos utilizados para la orientación de las componentes horizontales de los OBSs..... | 137 |
| Anexo IV. Probability Density Functions (PDFs) del array de OBSs..... | 139 |
| Anexo V. Modelos de Tierra 3D..... | 141 |
| Anexo VI. Parametrización del método CWT | 143 |
| A6.1 Algoritmo y pseudocódigo | 143 |
| A6.2 Parametrización del algoritmo CWT..... | 144 |
| Anexo VII. Resultados de las localizaciones hipocentrales..... | 147 |
| A7.1 Parametrización..... | 147 |
| A7.2 Tablas de relocalizaciones hipocentrales | 148 |
| Anexo VIII. Mecanismos Focales | 155 |