REAL INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE LA ARMADA EN SAN FERNANDO
BOLETÍN ROA N.º 3/2015

TRABAJOS REALIZADOS EN COLABORACIÓN CIENTÍFICA ENTRE LA UNIVERSIDAD DE CÁDIZ Y EL REAL INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE LA ARMADA – AÑO 2015

MINISTERIO DE DEFENSA

Trabajos realizados en colaboración científica entre la Universidad de Cádiz y el Real Instituto y Observatorio de la Armada

Año 2015

Boletín ROA 03/2015

San Fernando, noviembre de 2015

CATÁLOGO GENERAL DE PUBLICACIONES OFICIALES

http://publicacionesoficiales.boe.es/

Edita:

MINISTERIO DE DEFENSA
SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA

http://publicaciones.defensa.gob.es/

© Autor y editor, 2015

NIPO: 083-15-310-1 (impresión bajo demanda)
NIPO: 083-15-311-7 (edición en línea)
ISSN: 1131-5040
Fecha edición: diciembre 2015

Las opiniones emitidas en esta publicación son de la exclusiva responsabilidad del autor de la misma.
Los derechos de explotación de esta obra están amparados por la Ley de la Propiedad Intelectual. Ninguna de las partes de la misma puede ser reproducida, almacenada ni transmitida en ninguna forma ni por medio alguno, electrónico, mecánico o de grabación, incluido fotocopias, o por cualquier otra forma, sin permiso previo, expreso y por escrito de los titulares del © *Copyright*.

Foto portada:

Fachada del Edificio Principal del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando (siglo XVIII).

INDICE

Indice 3

Software autónomo basado en el programa autopick de SeisComP para la alerta sísmica temprana mediante análisis de ondas P.
Ángel Vera-Herrera1, Daniel Jesús Rosa-Gallardo, José Alcántara-Muñoz, Jesús Relinque-Madroñal, Antonio Pazos-García, Carlos Rioja-Del-Río, Arturo Morgado-Estévez. 5

"Alertes-SC3": Un prototipo de EEWS implementado en SeisComp3. Aplicación en el Sur-Oeste de la Península Ibérica.
Mireya López Mesa, Antonio Pazos García, José Martín Dávila, Javier Gallego Carrasco, Carlos Rioja del Río, Arturo Morgado-Estévez. 15

Efectividad del SAST ALERTES-SC3.
José Manuel Barón Sánchez y Marta Sánchez Sánchez 23

Automatización del estudio del ruido sísmico registrado en una estación de banda ancha mediante la utilización del software Matlab.
Juan Manuel Muñoz Ocaña y Antonio Pazos García 33

Software autónomo basado en el programa autopick de SeisComP para la alerta sísmica temprana mediante análisis de ondas P

Ángel Vera-Herrera[1,*], Daniel Jesús Rosa-Gallardo[1], José Alcántara-Muñoz[1], Jesús Relinque-Madroñal[1], Antonio Pazos-García[2], Carlos Rioja-Del-Río[3], Arturo Morgado-Estévez[4]

Resumen—Con el propósito de alertar de forma temprana a una zona de la inminente llegada de las ondas destructivas de un seísmo, se ha desarrollado un sistema software autónomo capaz de detectar y analizar las ondas primarias (no destructivas y primeras en llegar) a partir de datos sísmicos provenientes de una única estación sismológica, y determinar un nivel de alerta. El software, ejecutándose en la propia estación sísimica, analiza de forma continua las formas de onda, en búsqueda de ondas primarias. Tras la detección de la onda, se data el momento de llegada de dicha onda (pick), se filtran los datos, y se analizan los primeros segundos para llevar a cabo el cálculo de los parámetros P_d, τ_c y la relación señal/ruido (SNR), así como para obtener una estimación de la magnitud del evento. Por último, con estos parámetros y una tabla de decisión, se lanza la alerta temprana si procede. Para la realización del proyecto, se parte del programa autopick, perteneciente al sistema de gestión de datos sísmicos SeisComP2.5.

Palabras Clave—autopick, earthquake early warning system (EEWS), SeisComP, sismología, sistema de alerta sísmica temprana

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha aumentado considerablemente el interés en el estudio de sistemas de información en tiempo real que analizan el movimiento del suelo a través de una rápida telemetría y procesado de datos [1]. El objetivo de este análisis en tiempo real es proporcionar, en el caso de que se produzca un *evento* (seísmo) potencialmente peligroso, una *alerta temprana* que facilite la puesta en marcha de *protocolos de emergencia* momentos antes de que las ondas destructivas del seísmo alcancen la zona alertada. Estos sistemas son llamados *Sistemas de Alerta Sísmica Temprana* o *Earthquake Early Warning System* (EEWS) en inglés.

Cuando se produce un evento, la energía liberada se propaga mediante *ondas elásticas* desde su *hipocentro*. Las *ondas longitudinales P* o *primarias*, no destructivas, son las primeras que registran los sismógrafos debido a su mayor velocidad de propagación. A continuación se registran las *ondas transversales S* o *secundarias* y las *ondas superficiales*, ambas pudiendo ser destructivas debido a su mayor amplitud. Estas son las causantes de los daños que produce un evento al contener la mayor parte de la energía radiada (producen un mayor desplazamiento del suelo). La diferencia de tiempo de llegada entre ellas (t_{S-P}) es dependiente del medio de propagación y la distancia hipocentral. Podemos observar este hecho analizando la forma de onda de la *Figura 1*.

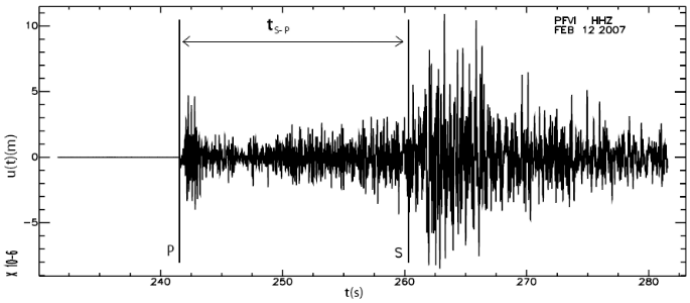

Figura 1. Forma de onda del seísmo del terremoto del Cabo San Vicente del 12/02/2007 recogida en la estación PFVI, con la marca de la llegada de las ondas P y S y su diferencia de tiempo t_{S-P}.

Los sistemas de alerta sísmica temprana se basan en la hipótesis de que la primera porción de la onda P contiene la información del tamaño del seísmo, lo que permitiría mediante el análisis de los primeros segundos de la onda P determinar los parámetros del terremoto y por tanto disponer de unos segundos ("lead time") para alertar de la inminente llegada de las ondas S destructivas. El hecho de que cualquier señal electromagnética de alerta transmitida se propague a mayor velocidad que las ondas destructivas [2] permite que los EEWS sean viables y eficaces.

Para el desarrollo de un EEWS se utilizan básicamente dos nuevos parámetros denominados periodo predominante τ_c y pico de desplazamiento máximo P_d, que se determi-

- ***1*** *Estudiantes de la Escuela Superior de Ingeniería en el Grado en Ingeniería Informática de la Universidad de Cádiz.*
  E-mails:
  angel.veraherrera@mail.uca.es, jose.alcantaramunoz@mail.uca.es
  dani.rosagallardo@mail.uca.es, jesus.relinquema@mail.uca.es
- ***2*** *Sección de Geofísica, Real Instituto y Observatorio de la Armada, San Fernando - 11100, España.*
  E-mail: pazos@roa.es
- ***3*** *Área de Lenguajes y Sistemas Informáticos, Universidad de Cádiz, Escuela Superior de Ingeniería, Av. de la Universidad s/n, Puerto Real - 11519, España; E-mail: carlos.rioja@uca.es*
- ***4*** *Área de Tecnología y Arquitectura de Computadores, Universidad de Cádiz, Escuela Superior de Ingeniería, Av. de la Universidad s/n, Puerto Real - 11519, España; E-Mail: arturo.morgado@uca.es*
- ** Autor a quién la correspondencia debe ser enviada;*
  E-mail: - angel.veraherrera@mail.uca.es; Tel.: +34-654-755-673

nan a partir de los primeros segundos de la onda P y que se definen más adelante.

En el Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) se ha desarrollado un prototipo de EEWS regional, basado en el software SeisComP, denominado ALERTES-SC3, en el marco de los proyectos ALERTES y ALERTES-RIM financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad [3][4]. La concepción regional se basa en la determinación de los mencionados parámetros en varias estaciones y estimando, mediante leyes de escalamiento, la magnitud, el hipocentro y el tiempo origen del terremoto, así como el «lead time» (tiempo que falta para la llegada de la onda S) y una estimación del PGV, la intensidad esperada, etc., a determinados blancos a proteger previamente definidos. Podemos ver un esquema de los módulos que componen SeisComP añadiendo el prototipo ALERTES-SC3 en la *Figura 2*.

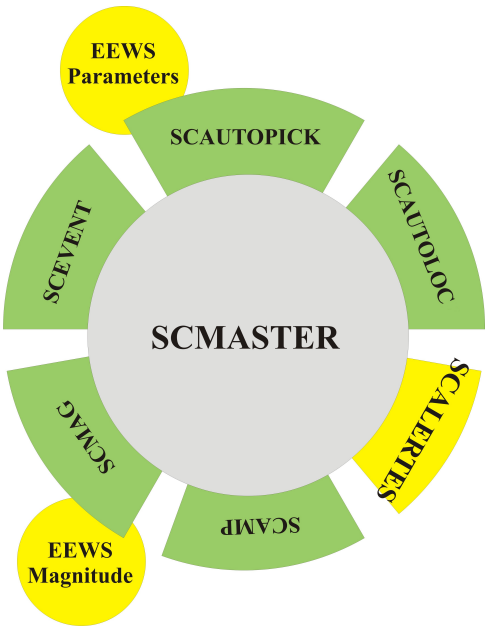

Figura 2. Diagrama de los módulos que componen de SeisComP (verde) [5], junto con el módulo del prototipo ALERTES-SC3 (amarillo) [4].

Como en los EEWS regionales hay que esperar a que la onda P alcance a un determinado número de estaciones, se produce una zona ciega alrededor del epicentro donde no es posible dar una alerta temprana. Pazos et al. presenta el estudio de la zona ciega para terremotos del cabo de San Vicente y el golfo de Cádiz [6].

Al objeto de poder emitir alertas tempranas en estas zonas ciegas, se utilizan los EEWS «in situ» utilizando los datos de una única estación. Se basan precisamente en la obtención del pico del desplazamiento del suelo P_d y el periodo predominante de los primeros segundos de la onda P τ_c, indicador del tamaño del seísmo, ahorrando tiempo al no ser necesario realizar cálculos de localización ni de la magnitud exacta del evento [7]. La comparación de ambos parámetros con unos umbrales previamente establecidos y haciendo uso de una tabla de decisión [7][8] nos permite conocer la amenaza real que supone el evento antes de la llegada de las ondas S [9].

En el pasado, complejos sistemas de gestión de datos sísmicos como *SeisComP2.5* y *Earthworm* no contemplaban la generación de alertas tempranas. SeisComP2.5 cuenta con el módulo *scautopick* [10], que depende de librerías del sistema de gestión de datos sísmicos. Este módulo se encarga de detectar las ondas P, datando el momento de llegada de cada onda (*pick*) y proporcionando su *amplitud*. A continuación los datos obtenidos son almacenados en ficheros y enviados al resto de módulos del SeisComP con los que interactúa [5].

El módulo scautopick posee un programa llamado *autopick* que toma como datos de entrada paquetes de formas de onda del movimiento del suelo en formato *miniSEED*, y que se encarga de la datación precisa de la llegada de las ondas P (generación de picks) [5]. Como fuente de estos datos se puede utilizar tanto un fichero en el mencionado formato, como el sistema de adquisición (protocolo) *SeedLink*, estándar para la transmisión de datos sísmicos [11].

Se vio factible e interesante el desarrollo de un sistema EEWS «in situ» a partir del programa autopick y la ampliación de sus funcionalidades, de forma que realizara el análisis de la onda P en el momento de su detección, y que fuese capaz de funcionar de forma independiente al sistema completo ALERTES-SC3. Se realizaría el análisis de las formas de onda para el cálculo del periodo τ_c y el pico de desplazamiento P_d, y a partir de estos parámetros, junto con umbrales establecidos y la aplicación de la tabla de decisión [7], se generaría una alerta temprana cuya finalidad sería dada por el usuario final de la aplicación. La fiabilidad de esta alerta sería dependiente de la calidad de la señal (nivel de ruido existente). Se propuso además que el sistema tuviera capacidad de comunicación con los sistemas SAST ya implementados mediante el uso del protocolo SeedLink y los paquetes miniSeed.

2. METODOLOGÍA

Los dos principales parámetros que utilizan los EEWS son el pico de desplazamiento del suelo (P_d) y el periodo predominante (τ_c) de los primeros segundos de la onda P. El primero es dependiente de la distancia del foco del evento al sismógrafo (cuanto más cerca se encuentre, más grande será P_d) y del tamaño del terremoto, mientras que el segundo solo depende del tamaño del evento(cuanto mayor sea el seísmo o el ruido, más grande será τ_c) [9], independientemente de la distancia hipocentral.

La estimación en el cálculo de estos datos depende de la claridad de la señal analizada, es decir, del nivel de ruido. Registros con alto nivel de ruido pueden dar resultados erróneos, por lo que se hace necesario añadir una funcionalidad para la obtención de la relación *señal/ruido* (SNR) que indique la fiabilidad del nivel de amenaza determinado.

2.1. Tabla de decisión

A partir de unos umbrales establecidos para ambos parámetros en diversos estudios, se genera un sistema de alerta sísmica temprana basado en una *tabla de decisión de cuatro entradas* (*Figura 3*) [7]. Los niveles de alerta establecidos son los siguientes:

- Nivel 0: No existe ninguna amenaza. Puede producirse por ruido en la señal o ser eventos de baja magnitud, entre otros motivos.

- Nivel 1: El periodo predominante τ_c es elevado, pero el pico de desplazamiento P_d no supera el umbral, lo que indica la posibilidad que se haya producido un evento de considerable tamaño (superior a magnitud 3,5), pero lejos de la zona a proteger, por lo que no supone una amenaza.
- Nivel 2: El periodo predominante τ_c no supera el umbral, pero el pico de desplazamiento P_d es elevado, lo que significa que se ha producido un evento de una magnitud no muy grande pero que, por su cercanía a la zona a proteger, supone una amenaza a considerar.
- Nivel 3: Ambos parámetros superan el umbral, lo que indica que se ha producido un evento de gran magnitud y que supone amenaza en una zona amplia.

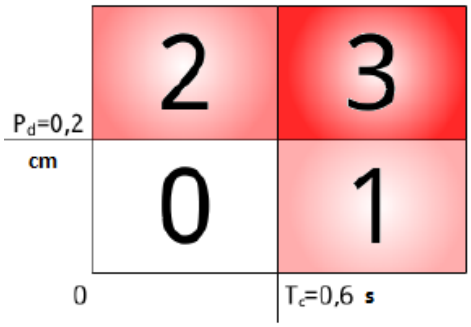

Figura 3. Tabla de decisión con los umbrales establecidos para el suroeste de Iberia [8]. Los niveles umbrales se han tomado del estudio de A. Zollo [7].

2.2. Parámetros τ_c y P_d

Como se ha mencionado, ambos parámetros se determinan a partir de los primeros segundos de la onda P. El periodo predominante promedio τ_c, en segundos, se determina a partir de los datos de velocidad ($\dot{u}(t)$) y desplazamiento del suelo ($u(t)$) en la componente vertical del registro sobre una ventana de tiempo (τ_0) (fijada normalmente en 3 segundos [8]), a partir de la llegada de la onda P [9] (*expresión 1*).

$$\tau_c = 2\pi \sqrt{\frac{\int_0^{t_0} u^2(t)dt}{\int_0^{t_0} \dot{u}^2(t)dt}} \tag{1}$$

El otro parámetro que necesitamos, denominado P_d, es el pico de desplazamiento máximo inicial del suelo en la onda P. Se define como el valor del mayor desplazamiento, en centímetros, que sufre el suelo en la ventana de tiempo seleccionada (τ_0) (*Figura 4*).

Dado que las estaciones sísmicas disponibles son de banda ancha que proporcionan velocidad, para su cálculo, es necesario efectuar su integral para obtener el desplazamiento. Como los datos se encuentran en unidades digitales (cuentas), hay que corregirlos por la respuesta instrumental, que en la banda de interés podemos considerar plana, obteniendo el vector de desplazamiento que se almacena en

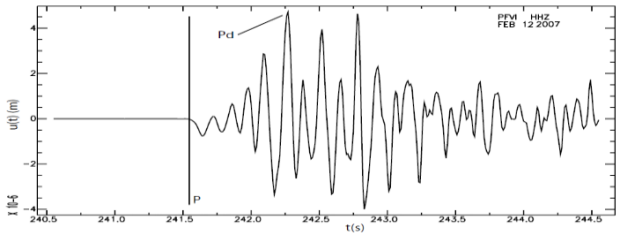

Figura 4. Componente vertical del desplazamiento para el terremoto del Cabo de San Vicente del 12/02/2007 registrado en PFVI ($200km$ del epicentro), en una ventana de tiempo de τ_0 = 3 *segundos*. Se señala la llegada de la onda P y el pico de desplazamiento máximo P_d [8].

un nuevo vector y (*expresión 2*), en cuentas-segundo. Dado que la corrección se asume constante, basta con dividir el máximo en valor absoluto de este vector por la sensibilidad o factor de escala del instrumento (S en cuentas/m/s) y multiplicar el resultado por 100 (*expresión 3*) para obtener el desplazamiento en cm.

$$y = \int_0^{t_0} \dot{u}(t)dt \tag{2}$$

$$P_d = \frac{max(y)}{S} * 100 \tag{3}$$

Al calcular este parámetro a partir de los primeros segundos observamos el efecto de la atenuación de las amplitudes (*Figura 4*) [9].

Para todos estos análisis, se obviarán $0,2$ segundos de la ventana de tiempo (equivalente a 20 muestras si trabajamos a 100 Hz) después del momento de detección del pick, para evitar de esta forma el intervalo de error del picado y procesar únicamente los datos plenamente característicos de la onda P.

2.3. Relación señal/ruido y fiabilidad de los resultados

Entendemos como ruido a toda señal no deseada que se mezcla con la señal útil, resultado de diversos tipos de perturbaciones que enmascaran la información. Aunque el ruido afecta tanto al pico de desplazamiento como al periodo predominante, τ_c, el cálculo de este último puede verse gravemente afectado pudiendo elevarse considerablemente, dando lugar a falsas alarmas.

La relación señal/ruido (SNR) se define como la proporción existente entre la potencia de la señal y la potencia del ruido que la corrompe, pudiendo ser expresada en escala logarítmica, en decibelios. Una SNR pequeña indica la existencia de un ruido sísmico considerable que puede elevar el periodo τ_c, dando lugar a falsas alarmas y resultados erróneos.

Para su cálculo se ha realizado un estudio de la estadística de la señal (en potencia) antes y después del pick en diversas formas de onda de eventos. Este estudio ha determinado que una ventana de tiempo correspondiente a los 3 segundos anteriores y posteriores a la detección de la onda P es suficiente para estimar la relación señal ruido, sin que alteraciones procedentes de perturbaciones u eventos anteriores y cercanos a la detección actual alteren este cálculo.

Al igual que en el anterior estudio, se obviarán $0,2$ segundos de muestras tras el momento de picado. Además, se obviará esa misma cantidad de muestras antes de la detección de la onda P, para procesar los datos anteriores a la llegada de la onda P plenamente característicos.

La potencia del ruido la estimaremos mediante un sumatorio del cuadrado de n de muestras desde $\tau_0 = -3$ segundos hasta el momento del picado de la onda donde $\tau = 0$ segundos (*expresión 4*). Igualmente realizamos el sumatorio s desde $\tau_0 = 0$ hasta $\tau = 3$ segundos (*expresión 5*). Dividimos el resultado de esta fórmula entre el resultado de la *expresión 4*, obteniendo así la SNR (*expresión 6*). Para realizar la comparativa con el límite, en decibelios, es necesario expresar la SNR utilizando dicha escala, para lo cual aplicaremos la definición logarítmica de esta unidad (*expresión 7*).

$$n = \sum_{\tau_0=-3}^{0} {x_i}^2 \tag{4}$$

$$s = \sum_{\tau_0=0}^{3} {x_i}^2 \tag{5}$$

$$SNR = \frac{s}{n} \tag{6}$$

$$SNR_{dB} = 10 * \log_{10} SNR \tag{7}$$

Estudios realizados en el sur de Italia [12] determinan que una SNR superior a $5\ dB$ proporciona cierta fiabilidad de las estimaciones. Tras simulaciones y estudios de formas de onda procedentes de diversas estaciones de Iberia, se ha determinado que el límite SNR a partir del cual considerar un resultado como fiable varía entre los 5 y 18 decibelios, dependiendo este valor de la estación local en la que el software actúe y el ruido existente en la ubicación.

La fiabilidad vendrá dada por la comparativa de la SNR y el límte SNR fijado tras previo estudio del ruido en la estación. Si la SNR supera el umbral, los análisis serán tomados como fiables.

2.4. Cálculo de la magnitud

M. Carranza, siguiendo los trabajos de A. Zollo para seísmos de Japón, Taiwán e Italia [7] [13], y como actualización a su anterior estudio [8], propone la ley de escalamiento dada por la *expresión 8*, regresión que determina la relación entre el periodo τ_c (en segundos) y la magnitud momento M para seísmos sucedidos en la zona sur de Iberia, estando en promedio la estación más cercana al epicentro del terremoto a 200 km [14].

$$\log_{10}(\tau_c) = 0{,}30 * M - 1,6 \Rightarrow M = \frac{\log_{10}(\tau_c) + 1,6}{0{,}30} \tag{8}$$

Nuestro software ha analizado bancos de datos procedentes de diversas estaciones, correspondientes a eventos destacados acontecidos en Iberia. Mediante la comparativa de la magnitud real de los seísmos con la magnitud aproximada haciendo uso de la *expresión 9*, se ha determinado que en un alto número de casos es posible obtener una estimación cercana a la realidad siempre que la calidad de la señal sea adecuada. Como se indicó anteriormente, elevados niveles de ruido en la señal pueden alterar de forma drástica el periodo τ_c y, por tanto, el resultado de este cálculo [12].

Es importante indicar que la magnitud aproximada, al estar estimada mediante un ajuste del estudio realizado en el sur de Iberia [8][14], se adecua a dicha zona de aplicación.

De forma similar, existen leyes de escalamiento que relacionan el pico de desplazamiento P_d con la magnitud momento M, pero es dependiente de la distancia instrumental, motivo por el cual se aplica ampliamente en sistemas regionales pero no en sistemas «in situ».

3. IMPLEMENTACIÓN

Todo el proyecto fue desarrollado bajo el sistema operativo *Ubuntu 14.04* y *openSuSE 13.2*, ambos de 32 bits y basados en GNU/Linux, haciendo uso del lenguaje de programación interpretado Python (versión 2.4.4). Además, fue usada la propia biblioteca *SeisComp* así como las bibliotecas *Numpy*, *Libfftw3.so.3* y *libxml2.2.9.0*. También fue necesario el uso del software de cálculo numérico *GNU Octave*.

Para la implementación del sistema, se procedió a la extensión de la funcionalidad del módulo autopick, mediante la herencia de las clases de la biblioteca `seiscomp`, y la adición de dos nuevas clases llamadas `Alert` (en «alert.py») y `AlertResponse` (en «alertResponse.py». La primera contiene el código necesario para el cálculo y almacenamiento del pico de desplazamiento máximo P_d, el periodo predominante τ_c, el nivel de alerta, la SNR, la magnitud estimada y la fiabilidad de los resultados. La segunda contiene tanto métodos para el almacenamiento de alertas, como de respuesta ante ellas.

El programa actúa como demonio, siendo este lanzado mediante un script desde la Shell de Unix. Es importante, además, indicar que el código implementado trabaja exclusivamente con datos de velocidad, quedando la posibilidad del uso de la aceleración como una extensión futura al proyecto.

3.1. Parámetros de configuración

Debido a la metodología empleada para el cálculo y análisis de las formas de onda, fue necesario añadir al fichero de configuración «trigger.ini» nuevos parámetros de configuración: `sensibilidad` (en m/s), necesario para la obtención del parámetro P_d; y `SNR_limit` (en dB) a partir de la cuál consideramos que los resultados del análisis son fiables.

3.2. Análisis del código

Para hacer uso de la funcionalidad de detección de ondas P de autopick, fue necesario un profundo análisis del código escrito en Python. Esto era necesario para entender el funcionamiento del programa y localizar la variable contenedora de los datos de velocidad recogidos desde el paquete miniSeed así como la forma de acceso a estos datos en la ventana de tiempo adecuada. A partir de estos datos, se ajustaría la ventana de tiempo acorde a las necesidades de cada cálculo y se añadirían las funciones para extender la funcionalidad del programa con el cálculo de la alerta.

3.3. Secuencia de operaciones

Para la obtención y procesado de dichos datos, el sistema sigue un proceso que podemos observar en la *Figura 5*, y que es descrito de forma básica a continuación:

1. Cuando se inicia el sistema, se mantiene a la escucha del servidor del sistema de adquisición. En caso de un funcionamiento no distribuido, es decir «in situ», el servidor será la propia máquina local. Las formas de onda son analizadas de forma continua por el programa autopick.
2. Al detectar la onda P, el método `feed` es llamado de una instancia de `MultiDetectorAlert` que hereda de `MultiDetector`, clase a la que se accedía originalmente. La forma de onda es pasada por una serie de filtros para eliminar factores que puedan alterar los resultados finales.
3. Desde `MultiDetectorAlert`, se obtiene inicialmente la SNR y la fiabilidad. A continuación, si la SNR supera el límite establecido, se calculan el valor del pico de desplazamiento P_d, el periodo τ_c, el nivel de alerta, y la magnitud aproximada, llamando al método `measure_Pd_Tc` del módulo `postdetector_alert.py`.
4. En el método `measure_Pd_Tc` se selecciona la ventana de tiempo necesaria para realizar los cálculos y se crea una instancia de `Alert` con la ventana de tiempo seleccionada. Se obtienen los parámetros y se asignan al objeto `TriggerAlert` asociado al pick. Este objeto se utilizará para registrar el pick en su log correspondiente, y la alerta (si hubiera) en el log de alertas.
5. Si existiese una alerta, sería enviada a un sistema de gestión de alertas. Este sistema llevaría acabo una activación de protocolos de emergencia. El sistema de gestión de alertas es ajeno al proyecto y su implementación es dependiente del uso y localización final del software.

3.4. Filtrado de la señal

Para el cálculo del pico de desplazamiento P_d y el periodo τ_c, es necesario la aplicación de diversos filtros. Previamente se elimina la componente continua y la tendencia lineal de la señal, y realizar un suavizado gradual en los extremos de la misma de anchura $0,05s$ para evitar efectos de borde al aplicar los filtros..

Además, al integrar los registros para la obtención del desplazamiento, se producían bajas frecuencias que era necesario eliminar haciendo uso de un filtro Butterworth paso alto con 2 polos y frecuencia de esquina de $0{,}0075\ Hz$, la más empleada en cálculos realizados en otros estudios [8].

Tras un análisis, se determinó hacer uso de los filtros implementados en «filters.py», que se encuentra en la biblioteca Seis, perteneciente a SeisComP. Estos fueron usados para eliminar la componente continua a partir de la corrección por la media (`demean`), la tendencia lineal (`detrend`) y las bajas frecuencias (`butterworthHighPass`); así como para realizar el suavizado gradual de los extremos (`taper`) (*Figura 5*).

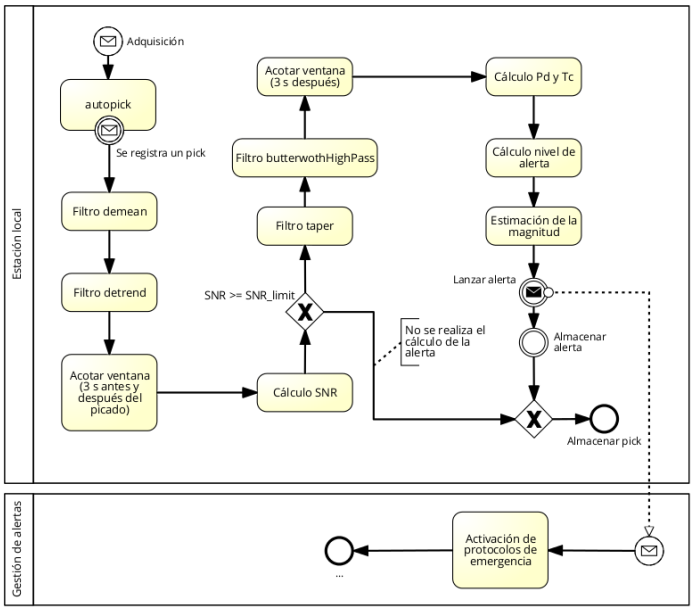

Figura 5. Esquema de la secuencia de operaciones del sistema implementado.

3.5. Cálculo de la SNR y la fiabilidad de los resultados

Para la obtención de la relación señal/ruido en potencia, se hace uso de la estadística de la señal utilizando los 3 segundos anteriores al pick y los 3 posteriores, aplicando las *expresiones 4, 5, 6 y 7*. Estas fueron implementadas en el método `getSNR`. El resultado es almacenado en la variable `Snr` de la clase `Alert`.

La comparativa de `Snr` con el parámetro `SNR_limit` proveniente del fichero de configuración «trigger.ini» determina si los análisis obtenidos son fiables (`yes/no`), almacenado el resultado en la variable `reliable` de la clase `Alert`. Si esta variable posee el valor `yes`, se realiza a continuación el cálculo del periodo T_c, el pico de desplazamiento máximo P_d, la magnitud del evento, y el nivel de alerta. En caso contrario estos parámetros quedarán sin valor, siendo su contenido `'none'`.

3.6. Cálculo de T_c y P_d

Para el cálculo del pico de desplazamiento máximo P_d es necesario integrar el vector de velocidades (*expresión 2*), implementada en el método `getPd`. Para el cálculo de la integral se aplica la regla del trapecio compuesto (*expresión 9*). El máximo en valor absoluto del resultado es dividido a continuación por la sensibilidad del instrumento en $cuentas/m/s$ y por último multiplicado por el factor de conversión a cm (*expresión 3*), obteniendo finalmente el parámetro. Esta regla sería implementada en el método `getDisplacement`, llamada desde el método `init`. El resultado es almacenado en la variable `Pd` de la clase `Alert`.

$$y_i = y_{i-1} + \frac{x_i + x_{i+1}}{2} * h \tag{9}$$

El periodo promedio τ_c es calculado aplicando la *expresión 1*, implementada en el método `getTc`. El resultado es almacenado en la variable `Tc` de la clase `Alert`.

3.7. Cálculo del nivel de alerta y respuesta

Para la obtención del nivel de alerta, se hace uso de los parámetros `Tc` (τ_c) y `Pd` (P_d), junto con la tabla de decisión de cuatro entradas representada en la *Figura 3*. Este proceso fue implementado en el método `getAlertLevel`. El resultado es almacenado en la variable `alertLevel` de la clase `Alert`.

A partir de este parámetro se crea inmediatamente una instancia de la clase `AlertResponse`, y a continuación es llamado el método `reactionToAlert` perteneciente a dicha clase. La función se encargaría del procesado de las respuestas ante las alertas de diversos niveles. Actualmente su comportamiento no esta definido, dejándolo abierto a las necesidades pertinentes de cada zona de aplicación.

3.8. Cálculo de la magnitud aproximada

Para el cálculo de la magnitud aproximada se hace uso del parámetro `Tc` (τ_c) y la relación de éste con la magnitud del evento (*expresión 7*). Esta última relación fue implementada en el método `getMagnitude`. El resultado es almacenado en la variable `Mag` de la clase `Alert`.

3.9. Salida y almacenamiento de datos

Cuando el software es lanzado como demonio desde la Shell, comprueba la conexión con el servicio de adquisición de datos SeedLink, mostrando un mensaje por consola de éxito u error en el intento. Si la conexión se produce de forma satisfactoria, el demonio mostrará mediante el método `write_pick` de la clase `multidetector_alert` un mensaje por la terminal cada vez que se produzca un pick, mostrando los datos obtenidos tras el análisis de la onda P. El mismo método almacenará el resultado en una entrada perteneciente a un fichero log de nombre «autopick-EW.picklog.añomesdia» (*Figura 7*).

```
more autopick-EW.alertlog.20150223
  WM  UCM  2015/02/23 09:34:51.830   26.83  0.000167633961418 0.509  0   4.3
  WM  UCM  2015/02/23 16:16:52.840  28.425  0.000271757808049 0.716  1   5.4
```

Figura 6. Contenido del fichero «autopick-EW.alertlog.20150223» de la estación UCM perteneciente al día 23 de febrero de 2015. Observamos dos alertas en ese día, donde la segunda corresponde al evento de magnitud real $5{,}2$ acontecido en Albacete. El orden de los parámetros corresponde con: red, estación, momento de llegada, SNR, P_d, T_c, nivel de alerta y magnitud estimada.

Si además el campo `Reliable` indica que el análisis es fiable (`yes`), se lanzará por terminal mediante el método `write_alert` de la clase `AlertResponse` un mensaje de alerta por evento detectado (*Figura 8*). El mismo método almacenará el resultado en una entrada perteneciente a un fichero log de nombre «autopick-EW.alertlog.añomesdia» (*Figura 6*).

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Tras ser efectuadas las pruebas unitarias y de integración del software, se realizaron pruebas funcionales cuyos resultados confirmaron la eficiencia del software.

El software analizó colecciones de datos, formas de onda correspondientes a eventos datados recogidas en multitud de estaciones repartidas por la Península. Las estaciones

```
BEGIN 20150223.161653.48-estacion_local
    net             = WM
    sta             = UCM
    loc             =
    on              = 2015/02/23 16:16:52.840
    timestamp       = 2015/10/20 09:08:23.735
    ampl_max        = 2365.30268089
    time_max        = 2015/02/23 16:17:01.420
    ampl_mb         = 92587.6934742
    time_mb         = 2015/02/23 16:16:58.820
    peri_mb         = 0.51
    ampl_ml         = 1507.23078827
    time_ml         = 2015/02/23 16:17:16.240
    SNR             = 28.425
    Reliable        = yes
    Pd              = 0.000271757808049
    Tc              = 0.716
    Alert_Level     = 1
    MagAprox_Tc     = 5.4
END
```

Figura 7. Contenido parcial del fichero «autopick-EW.picklog.20150223» de la estación UCM tras analizar las formas de onda del día 23 de febrero de 2015. Se observa el pick correspondiente al seísmo de magnitud real $5{,}2$ acontecido en Albacete.

```
---------------------------------------------
 ==> WARNING!! EVENT DETECTED!!!
---------------------------------------------
    Net             = WM
    Sta             = UCM
    On              = 2015/02/23 16:16:52.840
    SNR             = 28.425
    Reliable        = yes
    Pd              = 0.000271757808049
    Tc              = 0.716
    Alert_Level     = 1
    MagAprox_Tc     = 5.4
---------------------------------------------
```

Figura 8. Advertencia mostrada por terminal desde la estación UCM, tras la detección del evento de magnitud real $5{,}2$ acontecido el 23 de febrero de 2015 en Albacete.

de las que se han extraído los paquetes más relevantes se encuentran subrayadas en la *Figura 9*. A continuación se presentan algunos de los resultados más relevantes, correspondientes a alertas asociadas a los eventos más notables acontecidos en Iberia.

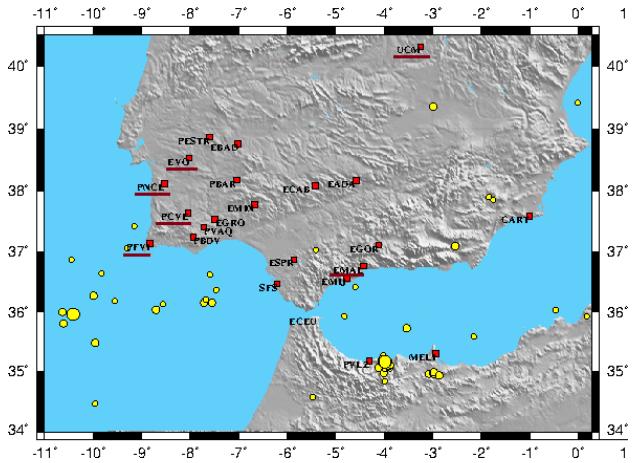

Figura 9. Estaciones pertenecientes a la red de ALERT-ES (cuadrados rojos) frente a epicentros de seísmos relevantes (círculos amarillos) [4].

4.1. Análisis del 12 de febrero de 2007

Se analizó la forma de onda correspondiente a la componente de datos de velocidad vertical (componente *HHZ*) del día 12 de febrero de 2007 recogida en la estación ESPR (Espera, Cádiz), perteneciente al *Instituto Geográfico Nacional* (*IGN*).

El sistema lanzó la siguiente alerta, asociada al evento de magnitud 6,1 acontecido esa fecha en el Cabo de San Vicente (extremo sudoeste de Portugal) [15].

Resultado 1

- Red: IGN
- Estación: ESPR
- Datación del pick (UTC): 2007/02/12 10:36:19.600
- SNR (dB): 49,354
- Fiable: Si
- P_d: 0,00664
- τ_c: 1,532
- Nivel de alerta: 1
- Magnitud aproximada: 6

4.2. Análisis del 11 de mayo de 2011

Se analizaron formas de onda correspondientes a la componente de datos HHZ del día 11 de mayo de 2011 recogidas en la estaciones UCM (Universidad Complutense de Madrid, Madrid), EMAL (Málaga) y CART (Cartagena), pertenecientes a la red *Western Mediterranean* (*WM*) del proyecto ALERT-ES [4].

El sistema lanzó las siguientes alertas, asociadas a los eventos de magnitud $4,5$ y $5,1$ acontecidos esa fecha en Lorca (Murcia), y la réplica más fuerte del mismo de magnitud $3,9$ [16].

Resultado 2

- Red: WM
- Estación: UCM
- Datación del pick (UTC): 2011/05/11 15:06:00.390
- SNR (dB): 10,878
- Fiable: No
- P_d: $0,00003$
- τ_c: 1,555
- Nivel de alerta: 1
- Magnitud aproximada: 6

Resultado 3

- Red: WM
- Estación: UCM
- Datación del pick (UTC): 2011/05/11 16:48:10.630
- SNR (dB): 23,861
- Fiable: Si
- P_d: $0,00017$
- τ_c: 3,142
- Nivel de alerta: 1
- Magnitud aproximada: 6,9

Resultado 4

- Red: WM
- Estación: EMAL
- Datación del pick (UTC): 2011/05/11 15:05:53.460
- SNR (dB): 19,265
- Fiable: Si
- P_d: $0,00002$
- τ_c: 1,178
- Nivel de alerta: 1
- Magnitud aproximada: 5,6

Resultado 5

- Red: WM
- Estación: EMAL
- Datación del pick (UTC): 2011/05/11 16:48:05.950
- SNR (dB): 20,798
- Fiable: Si
- P_d: $0,00086$
- τ_c: 2,002
- Nivel de alerta: 1
- Magnitud aproximada: 6,3

Resultado 6

- Red: WM
- Estación: CART
- Datación del pick (UTC): 2011/05/11 15:05:22.178
- SNR (dB): 48,191
- Fiable: Si
- P_d: 0,00149
- τ_c: 0,812
- Nivel de alerta: 1
- Magnitud aproximada: 5

Resultado 7

- Red: WM
- Estación: CART
- Datación del pick (UTC): 2011/05/11 16:47:35.088
- SNR (dB): 52,238
- Fiable: Si
- P_d: 0,00672
- τ_c: 1,149
- Nivel de alerta: 1
- Magnitud aproximada: 5,5

Resultado 8

- Red: WM
- Estación: CART
- Datación del pick (UTC): 2011/05/11 20:37:54.608
- SNR (dB): 43,901
- Fiable: Si
- P_d: 0,00027
- τ_c: 0,49
- Nivel de alerta: 0
- Magnitud aproximada: 4,3

4.3. Análisis del 23 de febrero de 2015

Se analizó la forma de onda correspondiente a la componente de datos HHZ del día 23 de febrero de 2015 recogida en la estación UCM. El sistema lanzó la siguiente alerta, asociada a los eventos de magnitud $4{,}5$ y $5{,}2$ acontecidos esa fecha en Albacete [17]. Podemos observar la salida del programa y el contenido de los ficheros log tras este análisis en las *Figuras 6, 7 y 8*. Asimismo se muestra en la *Figura 10* la forma de onda asociada a este evento.

Resultado 9

- Red: WM
- Estación: UCM
- Datación del pick (UTC): 2015/02/23 09:34:51.830
- SNR (dB): $26{,}83$
- Fiable: Si
- P_d: $0{,}00017$
- τ_c: $0{,}509$
- Nivel de alerta: 0
- Magnitud aproximada: $4{,}4$

Resultado 10

- Red: WM
- Estación: UCM
- Datación del pick (UTC): 2015/02/23 16:16:52.840
- SNR (dB): $28{,}425$
- Fiable: Si
- P_d: $0{,}00027$
- τ_c: $0{,}716$
- Nivel de alerta: 1
- Magnitud aproximada: $4{,}9$

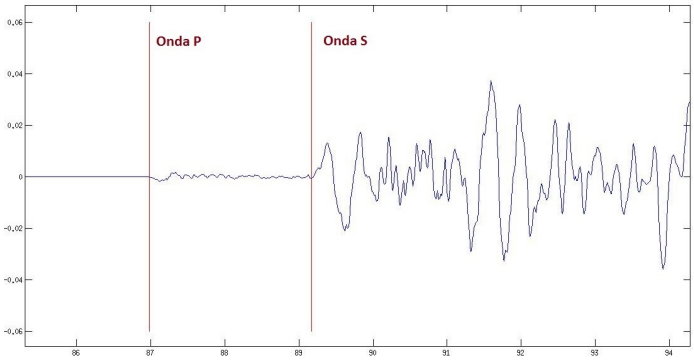

Figura 10. Forma de onda del seísmo del terremoto de Albacete del 23/02/2015 recogida en la estación UCM, con la marca de la llegada de las ondas P y S.

4.4. Periodo de pruebas a tiempo real

Además de realizar análisis de bancos de datos almacenados, el software fue instalado en periodo de pruebas del funcionamiento a tiempo real <in-situ>en las estaciones CHAS (islas Chafarinas, norte del cabo del Agua en la costa marroquí), ARNO (Centro de Experimentación de El Arenosillo, Huelva) y UCM (Valdilecha, Madrid), pertenecientes todas a la red WM; trabajando en el canal HHZ.

La estación ARNO, debido al terreno donde se encuentra ubicada, destaca por la muy poca cantidad de picks que recoge. Desde la instalación del software en esta estación, se han producido muy pocas alertas, a destacar la siguiente, asociada al evento de magnitud 5 acontecido esa fecha en el golfo de Cádiz [18].

Resultado 11

- Red: WM
- Estación: ARNO
- Datación del pick (UTC): 2015/09/17 15:12:24.858
- SNR (dB): $13{,}655$
- Fiable: Si
- P_d: $0{,}00035$
- τ_c: $0{,}644$
- Nivel de alerta: 1
- Magnitud aproximada: $4{,}8$

En las estaciones CHAS y UCM sin embargo, se producen picks a menudo debido al ruido de la zona en la que se encuentran instaladas. Desde la instalación del software en las mencionadas estaciones hasta el momento de redacción, apenas se han detectado picks que puedan ser asociados a eventos de magnitud considerable (mayor a 4). Destacar las siguientes alertas, la primera del día 16 de octubre de 2015, asociada a un evento de magnitud $5{,}6$ acontecido esa fecha en la península de Kamchatka (Siberia) [19]; y la segunda asociada a un evento de magnitud $7{,}1$ acontecido esa fecha en las islas de Vanuatu (Australia).

Resultado 12

- Red: WM
- Estación: UCM
- Datación del pick (UTC): 2015/10/16 06:50:20.990
- SNR (dB): $32{,}6821$
- Fiable: Si
- P_d: $0{,}00018$
- τ_c: $2{,}32$
- Nivel de alerta: 1
- Magnitud aproximada: $6{,}5$

Resultado 13

- Red: WM
- Estación: UCM
- Datación del pick (UTC): 2015/10/20 22:11:36.810
- SNR (dB): $23{,}022$
- Fiable: Si
- P_d: $0{,}00162$
- τ_c: $5{,}825$
- Nivel de alerta: 1
- Magnitud aproximada: $7,8$

Por último, en la *Figura 11*, se detalla un ejemplo de pick detectado por nuestro software, no asociado a ningún evento. Este pick es producido por el ruido en la estación UCM. En este caso, se descarta el análisis del resto de parámetros al ser estos no fiables. Este tipo de señales son detectadas de forma frecuente en muchas estaciones de la red WM.

```
BEGIN 20151017.052031.14-estacion_local
    net             = WM
    sta             = UCM
    loc             =
    on              = 2015/10/17 05:20:30.260
    off             = 2015/10/17 05:21:17.580
    timestamp       = 2015/10/17 05:22:14.226
    ampl_max        = 3.15650775224
    time_max        = 2015/10/17 05:20:32.050
    ampl_mb         = 60.0921318433
    time_mb         = 2015/10/17 05:20:39.710
    peri_mb         = 0.575
    ampl_ml         = 0.378836958233
    time_ml         = 2015/10/17 05:22:00.640
    SNR             = -0.481
    Reliable        = no
    Pd              = none
    Tc              = none
    Alert_Level     = none
    MagAprox_Tc     = none
END
```

Figura 11. Contenido parcial del fichero «autopick-EW.picklog.20151017» de la estación UCM. Se observa la detección de un pick debido al ruido (SNR = $-0,481$, estando el umbral límite SNR establecido en $5dB$).

5. DISCUSIÓN

En los últimos años se han realizado numerosos proyectos y estudios relacionados con los sistemas de alerta sísmica temprana, y se ha avanzado mucho en la precisión de las dataciones y en los cálculos de los parámetros y alertas.

Era de gran importancia que los resultados obtenidos por nuestro software fueran acordes a los obtenidos por los mencionados estudios y proyectos ya realizados, para asegurar que el programa era eficaz y preciso. De esta forma se garantizaba el futuro del proyecto. Por ello, en colaboración con el Real Instituto y Observatorio de la Armada de San Fernando, se realizó un estudio de todos los resultados obtenidos por nuestro software.

En la mayoría de los casos, cuando tras una detección el campo de fiabilidad indicaba que los resultados eran fiables, fue posible asociar el pick pertinente a un evento datado por otras entidades y sistemas como el IGN o ALERTES-SC3 [3][4]. En los resultados mostrados en el anterior apartado, están indicados los eventos a los que fueron asociados.

También se analizaron los picks que eran descartados por nuestro sistema debido a una SNR calculada que no superaba el límite SNR establecido, como sucede en el *Resultado 2*. Algunos de los picks descartados no eran producidos por ruido, y podían ser asociados a eventos de magnitud menor (magnitud menor a 4). Sin embargo, estos eventos no resultan una amenaza como para lanzar una alerta temprana «in situ», por lo que fue determinado que el descarte de estos picks no afectaba a la utilidad del software desarrollado.

Además, para cada resultado facilitado por nuestro software, se realizó un estudio de la señal para la obtención manual del periodo promedio τ_c, el pico de desplazamiento máximo P_d y la SNR. Se compararon los datos obtenidos de forma manual con los obtenidos por nuestro software, siendo las conclusiones de esta comparativa satisfactorias en todos los aspectos.

Se expone a continuación los datos obtenidos de forma manual de la forma de onda recogida en la estación ESPR, para el evento de magnitud $6,1$ sucedido el 12 de febrero de 2007 en el Cabo de San Vicente.

Datos obtenidos de forma manual previo estudio.

- Red: IGN
- Estación: ESPR
- Datación del pick (UTC): 2007/02/12 10:36:21.064
- SNR (dB): 54,3449
- P_d: 0,0055
- τ_c: 0,85363

Comparando estos resultados con los obtenidos de forma automatizada por nuestro software en el *Resultado 1*, podemos observar como ambos son muy similares, siendo además los datos ofrecidos por el análisis automatizado cercanos a los obtenidos en otros estudios del evento [8].

Además, como se puede observar en los resultados, aunque los valores de magnitud se encuentran sobrestimados, posiblemente debido a un valor del periodo predominante excesivo a pesar del alto valor de la SNR, el nivel de alerta es el adecuado en todo momento.

También se ha comprobado que el sistema recoge de forma satisfactoria eventos sucedidos fuera de la zona de aplicación, obteniendo niveles de alerta adecuados, como observamos en los análisis de los seísmos acontecidos en Lorca el 11 de mayo de 2011 [16] y en los *Resultados 12 y 13*, entre otros. Sin embargo, la fórmula para el cálculo de la magnitud es solo aplicable en la zona sur de Iberia [14], por lo que la estimación no siempre aporta resultados precisos para estos eventos.

Por último, es importante mencionar que, desde el comienzo del periodo de prueba del software hasta el momento de redacción de este artículo, no se ha producido ningún evento de magnitud elevada, cuyo epicentro se encontrase lo suficientemente cercano a una estación como para elevar el nivel de alerta a dos o más. Tampoco se ha obtenido ningún nivel de alerta superior a uno tras el análisis de todas las formas de onda del banco de datos.

6. CONCLUSIÓN

Al haber llevado a cabo el desarrollo y comprobación del funcionamiento de un sistema software autónomo para la alerta temprana de seísmos (EEWS), se concluye lo siguiente:

- El sistema software desarrollado funciona a partir de autopick de forma autónoma e independiente a SeisComP2.5 de forma satisfactoria y aportando análisis y resultados fiables en muchos casos.
  Es por ello que el prototipo continuará en fase de pruebas «in situ» en las estaciones de la red Western Mediterranean (WM). Los resultados a medio plazo ayudarán a la modificación, actualización y mejora del sistema.
- La estimación de la magnitud es próxima a la realidad en la mayoría de los casos para seísmos sucedidos en la zona de aplicación sur de Iberia, zona

donde se realizó el estudio [8]. Además, aunque los valores de magnitud se sobrestimen, el nivel de alerta es el adecuado en todo momento.

- El umbral SNR que se establezca afecta considerablemente a los resultados del sistema, y es necesario determinarlo para cada estación en la que el software trabaje de forma local previo estudio, para garantizar resultados y alertas fiables.
- El descarte por parte del sistema de picks cuyo análisis determina una SNR por debajo del umbral establecido para cada estación, no afecta a la utilidad de alerta temprana del software, al ser estas detecciones debidas a ruido o a seísmos de pequeña magnitud que no suponen una amenaza local.
- Gracias a su portabilidad y su posibilidad de comunicación, el sistema tiene una gran utilidad científica. Puede utilizarse para complementar al sistema ALERTES-SC3, a otros sistemas de alerta, para la investigación de eventos sísmicos, etc.
- Igualmente, al funcionar de forma autónoma, puede ser base para un prototipo hardware de bajo coste que permita cubrir los puntos ciegos de un EEWS nacional, para proteger infraestructuras críticas, etc.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece al equipo de la Sección de Geofísica del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando (Cádiz), por el gran apoyo recibido y por la motivación para llevar a cabo este trabajo.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos de investigación ALERTES (Sistema de Alerta Sísmica Temprana: aplicación al sur de España) (CGL2010-19803-C03-03) y ALERTES-RIM (Sistema de Alerta Sísmica Temprana: Sistema regional y onsite para la región Ibero-Mogrebí)(CGL2013-45724-C03-03-R).

BIBLIOGRAFÍA

[1] C. Satriano, L. Elia, C. Martino, M. Lancieri, A. Zollo, G. Iannaccone, *PRESTo, the earthquake early warning system for Southern Italy: Concepts, capabilities and future perspectives.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 10.1016/j.soildyn.2010.06.008, 2010.

[2] A. Zollo, G. Iannaccone, V. Convertito, L. Elia, I. Iervolino, M. Lancieri, A. Lomax, C. Martino, C. Satriano, E. Weber, P. Gasparini, *The earthquake early warning system in Southern Italy*. Encyclopedia of Complexity and System Science, 5, 2395-2421doi 10.1007/978-0-387-30440-3, 2009.

[3] M. Carranza, E. Buforn, A. Udías, J. Martín Dávila, A. Pazos, X. Goula, Y. Colom, A. Roca, A. Zollo, L. Lozano, C. Pro, F. Carrilho, W. Hanka, R. Madariaga, M. Bezzeghoud, M. Harnafi, *The ALERT-ES Project: an Earthquake Early Warning System for S. Iberia*, 15 WCEE LISBOA 2012, Septiembre de 2012.

[4] *ARMADA ESPAÑOLA. Proyecto ALERT-ES* [en línea]. <www.alertes.roa.es>. [Consulta: 26-01-2015]

[5] *Documentation for SeisComP3* [en línea]. <https://www.seiscomp3.org/wiki/doc>. [Consulta: 26-03-2015]

[6] A. Pazos, N. Romeu, L. Lozano, Y. Colom, M. López Mesa, X. Goula, J. A. Jara, J. V. Cantavella, A. Zollo, W. Hanka, F. Carrilho *A Regional Approach for Earthquake Early Warning in South West Iberia: A Feasibility Study.*, Bulletin of the Seismological Society of America, April 2015 105:560-567; doi:10.1785/0120140101

[7] A. Zollo, O. Amoroso, M. Lancieri, Y-M. Wu, H. Kanamori, *A threshold-based earthquake early warning using dense accelerometer networks*. Geophysics Journal International, 183 963-974, 2010.

[8] M. Carranza, *Obtención de parámetros P_d y τ_c para el SW de Iberia*, Septiembre de 2012.

[9] Y-M. Wu, H. Kanamori, *Experiment on an onsite early warning method for the Taiwan early warning system*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 95, No.1, 347-353, 2005.

[10] *Documentation for scautopick* [en línea]. <http://www.seiscomp3.org/wiki/doc/applications/scautopick>. [Consulta: 26-03-2015]

[11] *INCORPORATED RESEARCH INSTITUTIONS FOR SEISMOLOGY. SeedLink* [en línea]. <http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/services/seedlink/>. [Consulta: 27-03-2015]

[12] M. Vassallo, G. Festa, A. Bobbio, *Seismic Ambient Noise Analysis in Southern Italy*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 102, No. 2, pp. 574–586, April 2012, doi: 10.1785/0120110018

[13] S. Colombelli, O. Amoroso, A. Zollo, H. Kanamori, *Test of a Threshold-Based Earthquake Early Warning Method Using Japanese Data*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 102, No. 3, pp. –, Junio 2012, doi: 10.1785/0120110149.

[14] M. Carranza, E. Buforn, S. Colombelli, A. Zollo, *Earthquake Early Warning for Southern Iberia*, 2013.

[15] E. Buforn, A. Udías, *Sismicidad y mecanismo focal de los terremotos de la región Cabo de San Vicente-Argelia*. Revista de la Sociedad Geológica de España, 20(3-4) 301-309, 2007.

[16] *INFORME DEL SISMO DE LORCA DEL 11 DE MAYO DE 2011. IGN* [en línea]. <http://www.ign.es/ign/resources/sismologia/Lorca.pdf>. [Consulta: 26-01-2015]

[17] *Terremoto en Ossa de Montiel (Albacete) de magnitud 5,2. IGME* [en línea]. <http://info.igme.es/eventos/ >. [Consulta: 4-03-2015]

[18] *Catálogo de terremotos. IGN* [en línea]. <http://www.ign.es/ign/layoutIn/sismoDetalleTerremotos.do?evid=1345093>. [Consulta: 19-10-2015]

[19] *M5,4 - 42km SE of Esso, Russia. Earthquake Hazards Program. USGS* [en línea]. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us10003p25#general_summary>. [Consulta: 19-10-2015]

“Alertes-SC3”: Un prototipo de EEWS implementado en SeisComp3. Aplicación en el Sur-Oeste de la Península Ibérica

Autores: Mireya López Mesa [1], Antonio Pazos García[1], José Martín Dávila[1], Javier Gallego Carrasco[1], Carlos Rioja del Río[2], Arturo morgado-Estévez[2]

Abstract

ALERT-ES ha sido un proyecto coordinado desarrollado por el Real Instituto de la Armada Española en San Fernando (ROA), la Universidad Complutense de Madrid (IGN) y el Instituto Geológico de Cataluña (IGC) con el fin de estudiar la viabilidad de implantar un Sistema de Alerta Sísmica Temprana (en inglés comúnmente denominado EEWS – Earthquake Early Warning System) capaz de alertar terremotos potencialmente dañinos que pudieran ocurrir en el área del Cabo San Vicente en Portugal y Golfo de Cádiz, situados en el Sur-Oeste de la Península Ibérica. El proyeto ALERTES-RIM, Alerta Sísmica Temprana: Sistema regional e in-situ para la región Ibero-Mogrebí, tiene entre sus principales objetivos el desarrollo de un EEWS operativo para el sur de la península. Actualmente, el equipo del ROA ha desarrollado un prototipo, denominado Alertes-SC3, basado en SeisComp3 ejecutándose en tiempo real en pruebas.
El sistema Alertes-SC3 está compuesto de varios módulos y plug-ins totalmente integrados en SeisComP3 y ofrece una alerta sísmica en pocos segundos después de las seis primeras llegadas de la onda P.

Palabras clave: alerta sísmica temprana, EEWS, terremotos, ciudades objetivo, SeisComP3, S-O Península Ibérica

1. INTRODUCCIÓN

El área comprendida entre el Cabo San Vicente y el Estecho de Gibraltar es una de las zonas más activas sismológicamente en la región Ibero-Magrebí, con predominante sismicidad superficial, pero también se registran grandes terremotos como el bien conocido de Lisboa en 1755 (Buforn et al 1988, 2004). En los años más recientes ha habido sistemas de Alerta Sísmica Temprana desarrollados por distintas partes del mundo, como el PRESTo (Zollo et al, 2009), basado en la hipótesis de que las características de un sismo pueden derivarse del análisis de los primeros segundos de la escasa energía de la onda P a la llegada de las ondas S que contienen mucha más energía. (Kanamori, 2005).

De este modo, un sistema EEWS debe ser capaz de evaluar una alerta en pocos segundos después de la llegada de la onda P ofreciendo un tiempo (“lead time”) para realizar acciones automáticas o semi-automáticas en ciertos sistemas y enviar una alerta a las autoridades involucradas en emergencia antes de que lleguen las ondas S. La Figura 1 muestra el diagrama de flujo de un sistema EEWS, siendo “Tw” el tiempo transcurrido entre el origen del terremoto y el tiempo donde el sistema es capaz de ofrecer los principales parámetros del sismo (localización, tiempo de origen y magnitud) estimados de los picks y las características de la onda P, y el “Tt” que es “lead time” o tiempo que tarda en llegar la onda S a las ciudades objetivo.

[1] *Sección de Geofisica, Real Observatorio de la Armada, 11.100,San Fernando, España. E-mail: mireya@roa.es; pazos@roa.es;mdavila@roa.es; jgallego@roa.es*

[2] *Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos, Escuela Superior de Ingeniería, Universidad de Cádiz, 11.002, Cádiz, España. E-mail: carlos.rioja@uca.es; arturo.morgado@uca.es*

Autor correspondiente: Mireya López Mesa, mireya@roa.es

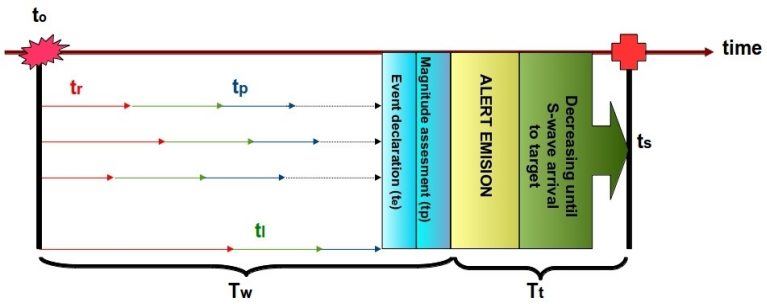

Figura 1: *Muestra el diagrama de flujo de un sistema EEWS: Tw es el tiempo total transcurrido y está compuesto por el tiempo de propagación de la onda P, (tr), la latencia de comunicación (tl), el tiempo transcurrido en el módulo del pick (tp), los tiempos consumidos por los módulos de evento y localización (te) y el tiempo de ejecución del módulo de magnitud (tm); y Tt es el tiempo lead time a la ciudad objetivo*

El principal objetivo del proyecto ALERT-ES ha sido estudiar la viabilidad [Pazos et al., 2015] de un sistema EEWS para la zona Sur-Oeste de la Península Ibérica, especialmente el área del Golfo de Cádiz y Cabo San Vicente, donde se han surfrido los terremotos más destructivos. Como parte de este proyecto, el equipo del Departamento de Geofísica del ROA desarrolló un prototipo basado en el Sistema de Gestión de Datos Sísmicos "SeisComP3" y está actualmente funcionando en pruebas ejecutándose en tiempo real utilizando las estaciones sísmicas de banda ancha expandidas por alrededor de toda la zona a partir de varias redes sísmicas. (Figura 2).

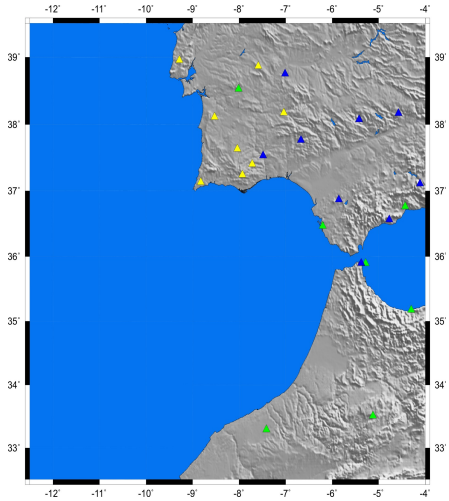

Figura 2: *Zona de prueba y estaciones sísmicas de banda ancha (triángulos) utilizados en el proyecto ALERT-ES. En verde: Estaciones de la red Western Mediterranean; En azul: estaciones del IGN; En amarillo: estaciones de IMP.*

Los principales objetivos del proyecto ALERTES-RIM es el refinamiento de las leyes de escalamiento, la operatividad del prototipo de sistema regional ALERTES-SC3 extendiéndolo a la región Ibero-Magrebí y el desarrollo de un sistema in situ para proporcionar alerta temprana en las zonas ciegas.

2. EL SISTEMA SEISCOMP3

El sistema SeisComP3 evolucionó en los últimos diez años transformándose de módulos de pura adquisición a un software de monitorización en tiempo real con todas las características. El protocolo SeedLink para la transmisión de datos sísmicos fue el núcleo de SeisComP desde el principio. Más tarde se incluyeron características de detección automática de eventos, magnitud y localización.

En el desarrollo de la tercera generación de SeisComP, también conocido como "SeisComP3", se incrementaron las competencias de procesamiento automático a través de interfaces gráficas (En inglés - Graphical User Interfaces (GUI)) para la visualización rápida de eventos y control de calidad. La comunicación entre los módulos se realiza con una propagación basada en infraestructura TCP/IP que permite la computación distribuida y control remoto. Para los megadatos sismológicos, se permite el intercambio de

importación/exportación desde/hacia QuakeML, que también ofrece una interfaz compatible para el softwate tanto para los módulos de adquisición como para el software monitorizado en tiempo real. Las competencias de procesamiento automático aumentan a través de las interfaces gráficas para la visualización rapida de eventos y control de calidad.

Básicamente el paquete SeisComP3 está compuesto de los siguientes módulos:

- *scautopick:* Recoge información de los picks producidos y también ofrece información sobre la amplitud de la onda.
- *scamp*: Calcula las amplitudes mb , mB y MLv, entre otras.
- *scautoloc:* Encargado de la asociación de picks y ofrece la localización y tiempo de origen del terremoto.
- *scevent*: Indica que un evento ha ocurrido y la información asociada a él.
- *scmag*: Calcula las magnitudes asociadas con las amplitudes mb, mB y MLv, y el cálculo de la magnitud final.
- scmaster: Encargado de la coordinación de todos los módulos, distribuye los mensajes y guarda toda la información en la base de datos.

Cabe destacar que el SeisComP3 está diseñado para monitorización automática de terremotos en tiempo real, y en ejecución normal es necesario esperar 30 segundos para la amplitud mb con el fin de lanzar el origen. Por lo tanto, el sistema debe ser modificado para que trabaje como un Sistema de Alerta Sísmica Temprana.

3. EL PROTOTIPO ALERTES-SC3

El prototipo Alertes-SC3 está basado en SeisComP3 pero con competencias adicionales de alerta temprana. La idea principal del prototipo era estimar los parámetros del terremoto muy rápidamente, como cualquier sistema EEWS, pero actualizando la solución continuamente y conectando con la ejecución monitorizada normal.

Siguiendo el esquema de la Figura 1, algunas características se modificarían o añadirían para adaptar el SeisComP3 a aplicación de alerta temprana:

- Obtener una localización muy rapidamente, tan sólo unos pocos segundos después de las llegadas de la onda P.
- Estimar la magnitud a partir de los primeros segundos de la onda P.
- Estimar el lead-time o tiempo de reacción de las ciudades objetivo seleccionadas y el PGV (Pick Ground Velocity).
- Emitir una alerta rápidamente.

Por supuesto, todas estas características deben estar actualizándose continuamente, y se deben tomar en consideración las siguientes líneas de trabajo:

- Inclusión de nuevos parámetros con información a partir de los primeros segundos de la onda P.
- Mejorar la rapidez del sistema para obtener una localización del terremoto, utilizando tantas estaciones como sea posible teniendo en cuenta la precisión de localización.
- Estudiar la longitud de la ventana de tiempo de la onda P para obtener parámetros precisos.
- La integración de estos parámetros en el sistema sin afectar al funcionamiento del SeisComP3.
- Asegurar la rapidez y estabilidad del sistema.
- Volcar la información en la base de datos de SeisComP3.
- Presentación de información en diferentes aplicaciones del SeisComP3 tales como el scmm, scmv, etc...
- Desarrollar un nuevo módulo para la alerta temprana integrado en SeisComP3 llamado “scalertes”.

3.1 Localización rapida

Como se mencionó anteriormente, el SeisComP3, ejecutándose con la configuración normal, necesita esperar la amplitud antes de proporcionar el origen del terremoto. Por defecto, tarda 30 segundos para la "amplitud mb", pero afortunadamente, puede ser configurado para trabajar con la llamada "amplitud snr" y reducir así el tiempo a pocos segundos.

Para el propósito de probar sus competencias para una alerta temprana con la nueva configuración, el SeisComP3 estuvo ejecutándose en modo simulación, utilizando terremotos localizados en un área de prueba que había sido registrada por las estaciones seleccionadas [Pazos et al., 2015] y los resultados se compararon con los sistemas PRESTo y Earthworm, así como con la referencia (catálogo IGN). Se ha demostrado que configurando el SeisComP3 con la "amplitud snr" y utilizando seis estaciones, en la mayoría de los casos, se puede obtener una solución en 2 ó 3 segundos con un error de localización menor de 20 km y un error en el tiempo del origen menor de 5 segundos.

Sin embargo, la configuración no proporciona la capacidad de una alerta temprana por sí misma porque la magnitud no se determina con tan sólo los primeros segundos de la onda P.

3.2 Nuevos parámetros

La magnitud de un evento se estima a partir de los diferentes parámetros derivados de la primera parte de la onda P (3 segundos) tales como el Periodo Característico (τ_c) [Kanamori, 2005; Wu et al.,2007] y otros parámetros y métodos también se utilizan como el pico de Desplazamiento (P_d), de Velocidad (P_v) o Aceleración (P_a) [Zollo et al., 2006; Satriano et al., 2010; Wurman et al., 2007; Katsumata, 2001].

El prototipo Alertes gestiona el cálculo de los parámetros τ_c y P_d a partir del módulo scautopick, aunque otros parámetros como P_a, P_v, τ_{pmax} se estiman también para aplicaciones futuras.

El Periodo Característico (τ_c) se define como una relación entre la energía del desplazamiento y la velocidad para una ventana de tiempo de t_o segundos de la onda P, como a continuación:

$$\tau_c = 2\pi \sqrt{\int_0^{t_o} u^2(t)\,dt \Big/ \int_0^{t_o} \dot{u}^2(t)\,dt}$$

donde, u(t) representa el desplazamiento del suelo y su derivada, la velocidad.

Por otro lado, P_d se define como el máximo en valor absoluto del desplazamiento, después de eliminar la media y la moda de los primeros segundos (t_o) de la onda P.

Debe hacerse destacar que las estaciones de banda ancha proporcionan velocidad. Por consiguiente, el desplazamiento debe calcularse por una integración numérica de la velocidad y filtrado por un filtro de paso alto. El procedimiento se describe en la publicación de Carranza et al (2013) tomándose una ventana de tiempo de 3 segundos después de la onda P.

Los nuevos parámetros han sido desarrollados por plug-ins en la estructura del SeisComP3, más concretamente, dentro del módulo scautopick para ganar rapidez después de los primeros segundos del pick. Estos plug-ins deben estar incluidos también en el programa de configuración, añadiéndolos en los campos correspondientes.

3.3 Magnitudes

Para el cálculo de la magnitud final se utilizarán todas las magnitudes, a partir de una media ponderada. El peso (weight) que se le atribuye a las magnitudes varía dependiendo del tipo de las mismas. Se calcula como se muestra a continuación:

$$Weight = a * magStationCount + b$$

donde "a" y "b" son coeficientes que se pueden

indicar específicamente. Si no se especifican, se tomará como valor por defecto "0" para el coeficiente "a" y "1" para el coeficiente "b".

Existen una Lista Negra (Black List) y Lista Blanca (White List) para clasificar la bondad de las magnitudes. El usuario puede decidir si una magnitud es válida o no para ser incluida para formar parte del cálculo de la magnitud final. Normalmente, la lista negra se completa de aquellas magnitudes que tienen escasa bondad.

Los nuevos parámetros, τ_c y P_d, tienen sus correspondientes magnitudes asociadas que son calculadas a través de las siguientes leyes de escalamiento obtenidas para el área que nos interesa por Carranza et al (2013):

$$\log(\tau_c) = 0.30\, M_w - 1.6$$

donde τ_c, se expresa en segundos, y M_w es la magnitud momento. La media de valores τ_c incrementa con la magnitud del evento.

Por otro lado, la expresión para la magnitud de P_d es:

$$\log(P_d) = 1.02\, M_w - 1.70 \log(R) - 4.6$$

donde P_d se expresa en centímetros, y R es la distancia hipocentral en kilómetros. Esta ecuación permite que todos los valores de Pd se normalicen a una referencia de distancia. Teniendo en cuenta la media de la distancia para el terremoto más grande del Golfo San Vicente, se eligió 200km como distancia de referencia.

$$\log(P_d^{200}) = 1.00\, M_w - 8.3$$

donde P_d^{200} se expresa en centímetros.

Como es el caso para τ_c, la media de los valores de Pd^{200} son correlativos a la magnitud.

3.4 Desarrollo e Implementación de un nuevo módulo: scalertes

Para el desarrollo del módulo scalertes, se tomó en cuenta el funcionamiento y filosofía del sistema SeisComP3, respetando los módulos existentes, tales como el scmaster, scautopick, scamp, scautoloc, scmag y scevent.

Debemos considerar que todos los módulos están conectados al scmaster, que es el núcleo del flujo de mensajes. Además, toda la información se guardará en la base de datos, para mantener un back-up en caso de fallo del sistema. La Figura 3 muestra un esquema de Alertes EEWS integrado en el SeisComP3.

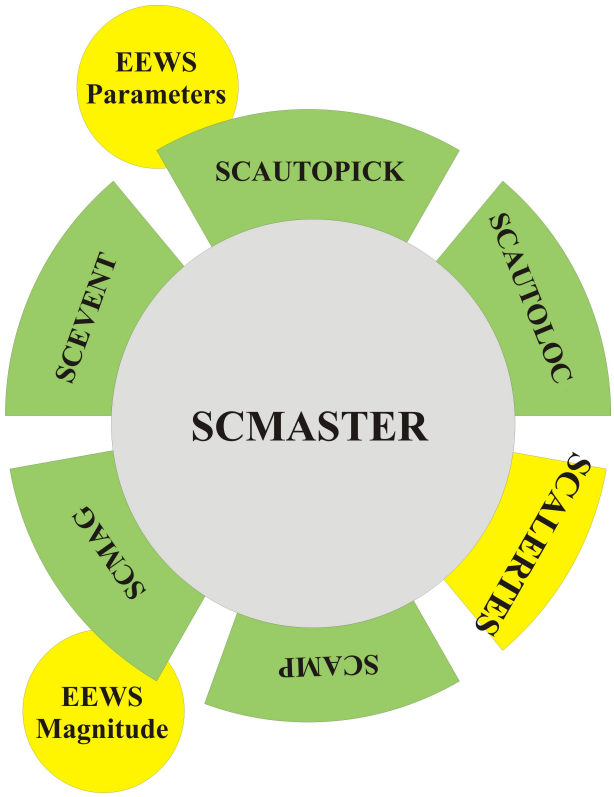

Figura 3: *Estructura de los módulos que componen SeisComP3. En verde los módulos del sistema original. En amarillo las modificaciones: Nuevo módulo SCALERTES y plug-ins de los parámetros y sus respectivas magnitudes.*

El objetivo para la integración de este nuevo módulo, scalertes, es el cálculo del PGV (Pick Ground Velocity) y Lead Time para diferentes ciudades objetivo que son indicadas por el usuario.

3.4.1. Tabla de decisión

Tomando como variables los parámetros P_d y τ_c calculados para cada estación, una alerta on-

site se calculará con el nivel de alarma para cada estación a partir de una tabla de decisión que se muestra en la figura 4 y tomada de la publicación Zollo et al. (2009), con umbrales de τ_c = 0.6 and P_d = 0.2.

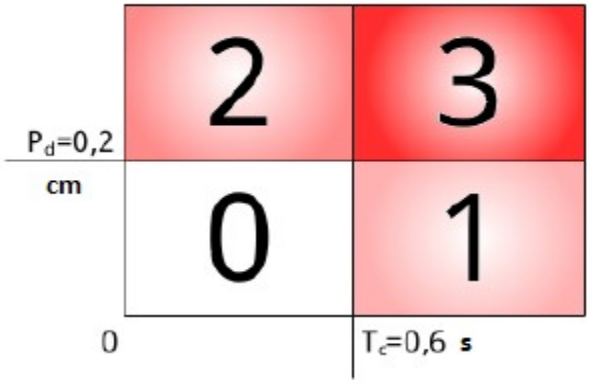

Figura 4: *Tabla de decisión indicando los umbrales de los parámetros τ_c y P_d respectivamente.*

El nivel de alerta de la estación se declara según se describe en la tabla 1, dependiendo de la severidad de los daños que se esperan en las estaciones de alrededor.

Nivel 0	Sin daños
Nivel 1	Daños en el origen pero no en las estaciones
Nivel 2	Daños en el origen y en las estaciones
Nivel 3	Daños en más lugares además de las estaciones

Tabla 1: Niveles de daño en las estaciones.

3.4.2. Alerta en ciudades objetivo

Este proyecto nos permite estimar el riesgo y alerta en diferentes áreas geográficas que no tienen necesariamente que estar incluidos en la base de datos que se muestra a través de las estaciones en el mapa. Por esta razón, si nos centramos en el Golfo de Cádiz, como es el objetivo de este proyecto desde su comienzo, podríamos indicar la alerta en diferentes áreas aunque no sean localizadas estaciones en todos los puntos del área.

Por tanto, tan sólo indicando la latitud y longitud de la ciudad correspondiente de la que deseemos conocer el riego y la alerta (ejemplo: *Cadiz (36,32 ; -6,18)*) , seremos capaces de tener la información sobre todos los puntos geográficos que sean necesarios, objetivo de análisis.

Podemos calcular el PGV (Pick Ground Velocity) y Lead Time en esas ciudades que marcaríamos como objetivo también, a través del parámetro P_d

$$\log(PGV) = 0.87 \ \log(P_d) + 1.24$$

donde, las unidades de PGV son centímetros por segundo y de P_d son centímetros.

4. LOS RESULTADOS

Tras desarrollar este prototipo, estudiamos los diferentes resultados obtenidos que se describen a continuación:

- El prototipo Alertes-SC3 mejora el tiempo, Tw, haciéndolo más corto, más de 20 segundos, excepto en los eventos XXL que son eventos con una señal ruido muy alta, en al menos 4 estaciones. La Figura 5 muestra estas diferencias de tiempo.

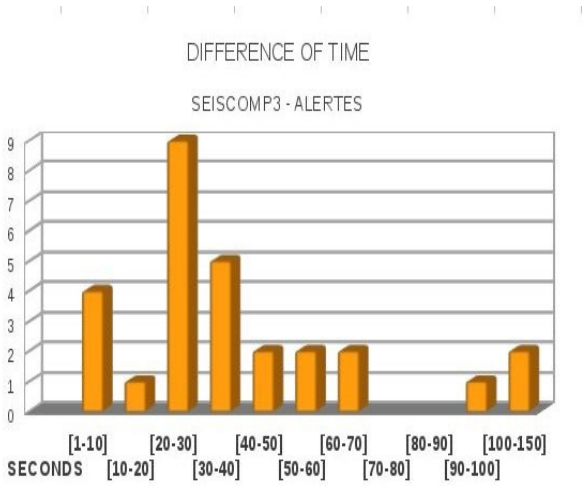

Figura 5*: Comparación de rapidez entre Alertes-SC3 y SeisComP3.*

- Alertes-SC3 es una herramienta integrada en el sistema SeisComP3 que permite lanzar el origen de un terremoto más rápidamente que el sistema original, a partir de los primeros segundos de los registros de la onda P.
- El ROA desarrolló un software externo con el fin de estudiar los resultados de los ficheros log y mejorar las características. Este software proporciona información sobre un seísmo con los nuevos parámetros y sus correspondientes magnitudes. También muestra la información del PGV y Lead Time de las ciudades objetivo marcadas por el usuario. Referencia en la figura 6.

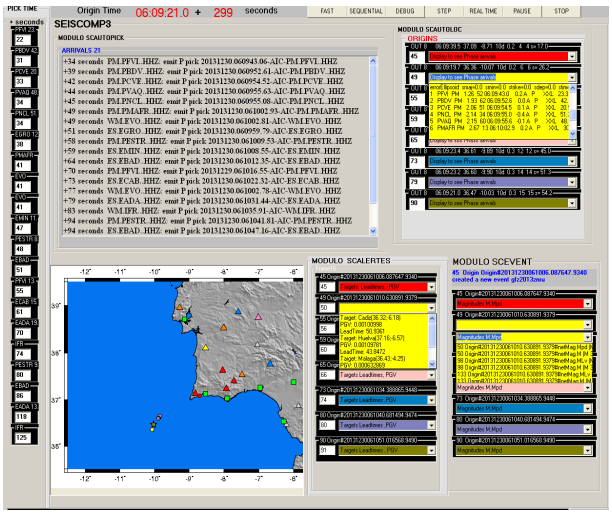

Figura 6: *Software desarrollado por ROA con la información de cada módulo de SeisComP3 incluyendo el nuevo módulo y la información de los nuevos parámetros.*

- Comparando la solución de terremotos recogidos por Alertes-SC3 con la solución registrada por las localizaciones del IGN (Instituto Geográfico Nacional), nuestro sistema ofrece buenas coincidencias en cuanto al número de sismos y localización (Ver figura 7). Cabe destacar que las soluciones del IGN se obtuvieron utilizando todas las estaciones disponibles después de que se produjera el terremoto, mientras que Alertes-SC3 necesita tan sólo 6 estaciones para obtener una solución. Nos referimos a la primera solución de todas, pero obviamente ésta se va actualizando a medida que van entrando en juego más estaciones y se va actualizando la información.
- Alertes-SC3 ofrece un nivel de alerta para cada estación que avisa de los daños producidos en los alrededores de la estación sin tener que esperar a la localización del terremoto.

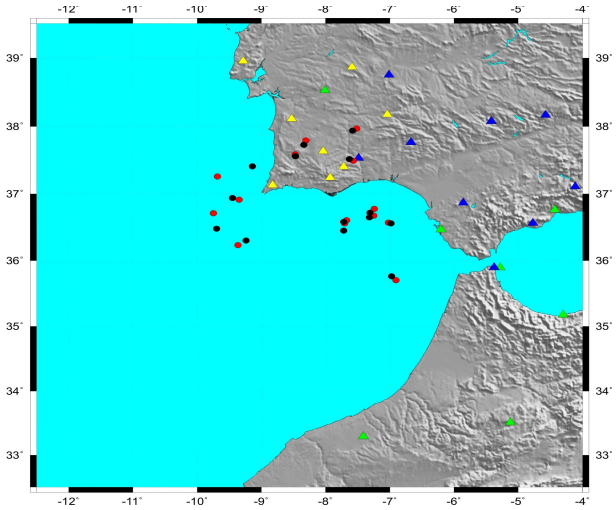

Figura 7: *Coincidencias de los terremotos registrados por Alertes-SC3 e IGN. Los triángulos muestran las estaciones. En rojo los terremotos del IGN y en negro los sismos de Alertes.*

5. CONCLUSIONES Y RESUMEN

Este prototitpo Alertes-SC3 ha sido desarrollado con el fin de indicar una alerta desde los primeros tres segundos de los registros de la onda P.

Está totalmente integrado en el sistema de gestión de datos sísmicos SeisComP3 siguiendo el flujo de mensajes y su filosofía uniendo un sistema on-site con un sistema distribuido.

Calcula algunos parámetros tales como τ_c y P_d que son utilizados para estimar magnitudes correspondientes dando más información sobre el terremoto en una reducida ventana de tiempo.

Si quisiéramos conocer el nivel de alerta para una ciudad concreta, no es necesario tener estaciones en la zona específica. Este prototipo nos permite indicar una alerta en la ciudad objetivo con

tan sólo especificar la longitud y latitud proporcionados por el usuario.

En conclusión, este prototipo ha mejorado el funcionamiento de uno de los sistemas de gestión de datos sísmicos más importantes, ofreciendo alerta temprana y conservando su ejecución trabajando de la misma manera que antes, pero añadiendo esta importantísima característica al sistema.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos de investigación ALERTES (Sistema de Alerta Sísmica Temprana: aplicación al sur de España) (CGL2010-19803-C03-03) y ALERTES-RIM (Sistema de Alerta Sísmica Temprana: Sistema regional y onsite para la región Ibero-Mogrebí) (CGL2013-45724-C03-03-R).

También agradecer a las redes sísmicas WM, IGN y IM por sus facilidades y amable colaboración.

BIBLIOGRAFÍA

Bufforn, E.;Udías, A.;and Mezcua,J.(1988). "Seismicity and focal mechanism in south Spain".B SSA, 78,2008-2024.

Bufforn, E.,Bezzeghoud, M.;Udías, A.; and Pro, C. (2004). "Seismic sources on the Iberia-African plate boundary and their tectonic implications". Pure Appl.Geophys. 161,623-646.

Carranza. M; E.Bufforn, S.Colombelli, and A.Zollo (2013). Earthquake early warning for southern Iberia.

Kanamori, H. (2005). Real-time seismology and earthquake damage mitigation. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2005. 33:195–214.

Katsumata, A. (2001). “Relationship between displacement and velocity amplitudes of seismic waves from local earthquakes”. Earth Planets Space, 53, 347–355, 2001

A. Pazos, N. Romeu, L. Lozano, Y. Colom, M. López Mesa, X. Goula, J. A. Jara, J. V. Cantavella, A. Zollo, W. Hanka, and F. Carrilho (2015). “A Regional Approach for Earthquake Early Warning in South West Iberia: A Feasibility Study”. BSSA, *April 2015 105:560-567; doi:10.1785/0120140101*

Satriano, C; Elia, L.; Martino, C.; Lancieri, M.; and Zollo, A. (2010). “ PRESTo, the earthquake early warning system for Southern Italy: Concepts, capabilities and future prespectives”. Soil Dyn Earthquake Eng, doi:10.1016/j.soildyn.2010.06.008.

Wu, Y.M.; Kanamori, H.; Allen, R.M.; and Hauksson, E. (2007). “Determination of earthquake early warning parameters, τc and Pd , for southern California”. Geophys. J. Int. (2007) 170, 711–717, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03430.x

Wurman, G.; Allen, R.M.; and Lombard, P. (2007). “Toward earthquake early warning in northern California”. Journal of Geophysical Research, VOL. 112, B08311, doi:10.1029/2006JB004830

Zollo, A*.,* M. Lancieri*, and* S. Nielsen *(*2006*),* Earthquake magnitude estimation from peak amplitudes of very early seismic signals on strong motion records*,* Geophys. Res. Lett.*,* 33*, L23312.*

Zollo, A., G. Iannaccone, M. Lancieri, L. Cantore, V. Convertito, A. Emolo, G. Festa, F. Gallovic, M. Vassallo, C. Martino, C. Satriano y P. Gasparini (2009). Earthquake early warning system in southern Italy: Methodologies and performance evaluation. *Geophysical Research Letters* 36, L00B07.

Efectividad del SAST ALERTES-SC3.
SAST ALERTES-SC3 efficacy.

José Manuel Barón Sánchez[(1)] y Marta Sánchez Sánchez[(2)]
[(1)]Facultad de Ciencias. Universidad de Cádiz, jose.baronsanchez@alum.uca.es
[(2)]Facultad de Ciencias. Universidad de Cádiz, marta.sanchezsanchez@alum.uca.es

SUMMARY

The main purpose of this paper is to analyse the efficacy and reliability of the ALERTES-SC3 EEWS (Earthquake Early Warning System), which has been developed by Real Instituto y Observatorio de la Armada in collaboration with other institutions and which is being applied to the SW of the San Vicente cape - Gulf of Cádiz seismic zone.
We will do a stadistic analysis with the data extracted from the IGN database and the Alertes and ALERTES-RIM project database, divided in two different studies. In the first one, we will only use Alertes and Alertes-RIM project data about earthquakes. In the second study, we will make a comparative between both data, giving special attention to some variables like magnitude, origin time,... We will do this study with some different geographic zones.

RESUMEN

El principal propósito de este trabajo es el análisis de la eficacia y fiabilidad del prototipo del sistema de alerta sísmica temprana ALERTES-SC3, desarrollado en el Real Instituto y Observatorio de la Armada, en colaboración con otras instituciones y que está siendo aplicado a las zonas sísmicas del SW del cabo de San Vicente y del golfo de Cádiz.
Haremos el análiis estadístico utilizando datos extraidos de la base de datos del IGN y del proyecto Alertes, dividiéndolo en dos estudios diferentes. En el primero, utilizaremos únicamente los datos de terremotos obtenidos en los proyectos Alertes y ALERTES-RIM. En el segundo estudio, haremos una comparativa entre ambos datos, haciendo especial incapié en algunas variables como la magnitud, el tiempo origen,... El estudio se efectuará para diferentes zonas geográficas.

1. INTRODUCCIÓN

ALERT-ES (Sistema de Alerta Sísmica Temprana: Aplicación al Sur de España) y ALERTES-RIM (Alerta Sísmica Temprana: Sistema regional e in-situ para la región Ibero-Mogrebí) han sido proyectos de investigación coordinado entre la Universidad Complutense de Madrid (UCM), el Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) y el Instituto Geológico de Cataluña (IGC), actuando como coordinadora la UCM.

Además de investigadores de las citadas instituciones, han participado en los diferentes subproyectos investigadores de otras instituciones tanto nacionales, como Instituto Geográfico Nacional (IGN), Universidad de Extremadura (UEX), Universidad de Cádiz (UCA), como de instituciones de otros países, como de la École Normal Superieur (ECS, Francia), Universidad de Nápoles (UNINA, Italia) y GeoforschungZentrum (GFZ, Alemania).

ALERT-ES fue un proyecto financiado por la Dirección General de Investigación y Gestión del Plan Nacional de I+D+i, Secretaría de Estado de Investigación, Ministerio de Economía y Competitividad, (con número de referencia CGL2010-19803-C03-01/02 y 03), con plazo de ejecución 01/01/2011 a 31/12/2013, en elque se propone estudiar la viabilidad de un Sistema de Alerta Sísmica Temprana (SAST) para los terremotos potencialmente destructores que ocurren en la zona del Cabo S.Vicente-Golfo de Cádiz. Las características de la sismicidad de esta zona la hacen un buen candidato para dicho sistema y hacen necesario un estudio previo antes de implantarlo. La hipótesis básica es que en los primeros segundos de las ondas P hay ya información sobre su tamaño y por lo tanto de su capacidad destructora, proporcionando un intervalo de tiempo para dar una alarma. Los SAST son técnicas que ya se están aplicando en algunas regiones sísmicas (California, Japón, Taiwan, México, Italia, etc).

Desde Enero de 2014, y dentro del marco del proyecto coordinador ALERTES_RIM (CGL2013-45724-C3-3-R) financiado por el ministerio de Economía y Competitividad, este prototipo de sistemas de alerta sísmica temprana ALERTES-SC3, basado en el Software SeisComP3 (Hanka, 2010), ha estado en continua evolución, introduciendo mejoras en las ecuaciones de los parámetros utilizados, incrementando su capacidad de detección, etc.

Este informe tiene dos objetivos principales. El primero de ellos será ilustrar los resultados y conclusiones obtenidas al analizar la efectividad y fiabilidad del sistema ALERTES-SC3. El segundo objetivo será el de mostrar una comparativa, sobre las distintas variables medidas, entre el sistema de detección de terremotos del IGN y ALERTES-SC3.

2. METODOLOGÍA UTILIZADA

Para realizar el estudio mencionado anteriormente, hemos recogido datos sobre los terremotos ocurridos en un período de

cinco meses, desde el 15/06/2014 hasta el 15/11/2014, tanto de la base de datos del IGN como del sistema ALERTES-SC3.

A través de estos datos hemos realizado un análisis estadístico básico. En primer lugar hemos realizado un recuento de los terremotos registrados para comprobar cuántos han sido detectados por cada sistema. A partir de ahí, hemos seleccionado las variables de estudio para cada uno de los distintos análisis y hemos aplicado varios procedimientos de estadística descriptiva de una variable a las muestras obtenidas, como por ejemplo el cálculo de la media.

Después de haber realizado los cálculos correspondientes hemos ilustrado los resultados obtenidos gráficamente para facilitar su comprensión. Por último, sacaremos conclusiones sobre lo que hemos trabajado, tratando de analizar el rendimiento del sistema ALERTES-SC3.

3. ESTUDIO DE LA EFECTIVIDAD DEL PROTOTIPO ALERTES-SC3.

3.1 TERREMOTOS DETECTADOS Y FIABILIDAD EN EL AVISO

Para estudiar la fiabilidad vamos a hacer un recuento sobre los terremotos listados, dividiéndolos en dos grupos que dependerán de la diferencia existente entre el *Creation Time* del origen y del "pick". Consideramos que el sistema habrá sido suficientemente preciso si esta diferencia es inferior a un minuto. Creamos entonces los siguientes conjuntos:

- **Terremotos válidos**: Incluiremos un evento en esta categoría si la diferencia mencionada anteriormente es inferior al minuto.
- **Terremotos no válidos**: En este grupo estarán los terremotos cuya diferencia sea superior al minuto.

El total de terremotos listados por el sistema ALERTES-SC3 es de 264. Como vamos a ver en la Figura 1, la gran mayoría de los terremotos, casi un 90%, se incluyen en el grupo de lo que hemos llamado terremotos válidos, por lo que podemos decir que el sistema es bastante efectivo en este aspecto.

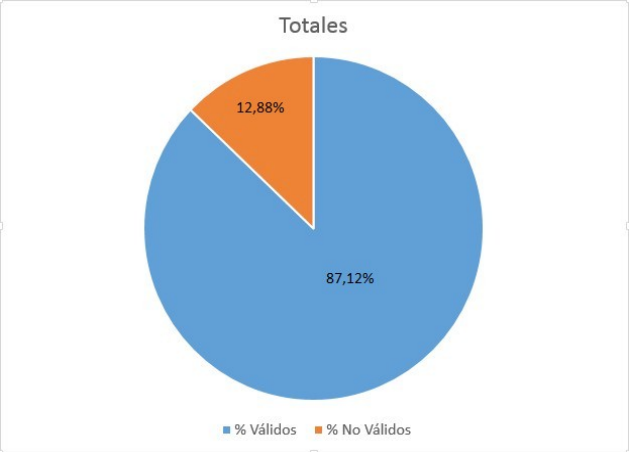

Figura 1 – Total de terremotos registrados por el prototipo ALERTES-SC3. (Earthquake data from ALERTES-SC3 prototype.)

El sistema ALERTES-SC3 está configurado para que se dispare con un mínimo de 6 "picks" (llegadas a las estaciones), aunque en algunos casos se puede disparar incluso en cuatro, cuando el nivel de la señal es muy superior al nivel de ruido. Por tanto, cada terremoto tiene un número distinto de orígenes, ya que el sistema actualiza la solución a medida que nuevos "picks" son asociados al evento. Por ello, vamos a distinguir una nueva división de los datos en función del número de orígenes. Para ello, definimos los siguientes conjuntos: terremotos con un origen y terremotos con más de un origen. Nos planteamos esta división ya que esto influye en la rapidez con la que se alerta de un evento.

En la siguiente tabla, que vemos en la Tabla 1, podemos observar el número de terremotos que hay en cada categoría.

Tabla 1 – Terremotos registrados por ALERTES-SC3 divididos en categorías (Earthquake data from the ALERTES-SC3 prototype divided by categories.)

	Totales	Un origen	Más de un Origen
Totales	264	96	168
Válidos	230	84	146
No válidos	34	12	22

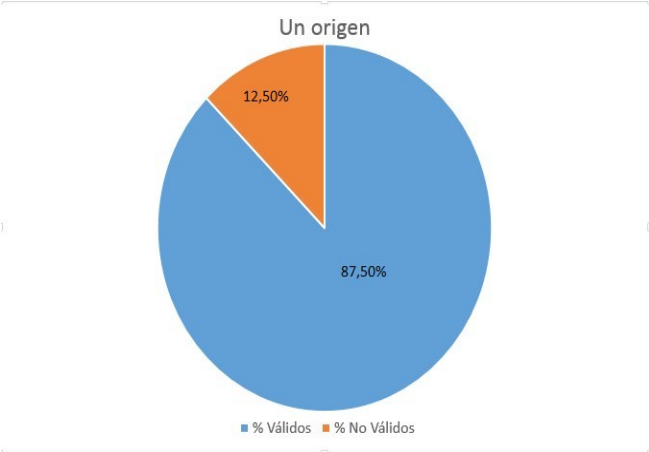

Figura 2 – Porcentajes de terremotos válidos en función del número de orígenes: un origen.(Percentage of valid earthquakes divided by number of origins: one origin.)

Figura 3 – Porcentajes de terremotos válidos en función del número de orígenes: más de un origen.(Percentage of valid earthquakes divided by number of origins: more than one origin.)

Tras hacer esta división vamos a comprobar que el número de orígenes no afecta al hecho de que un terremoto sea válido o no. Como vemos en las Figuras 2 y 3, el porcentaje de terremotos

válidos apenas varía en ambos gráficos, por lo que podemos intuir que el número de eventos válidos no dependerá del número de orígenes que tenga el terremoto, aunque no lo estamos demostrando formalmente.

3.2 ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD DE ALERTA

Nos vamos a centrar ahora en el estudio de la rapidez del sistema. Para ello vamos a seguir dividiendo los eventos en los conjuntos definidos anteriormente, de modo que podamos estudiarlos de forma más clara. Analizaremos solamente los datos de los terremotos válidos, ya que los terremotos no válidos no nos aportan información. Nos vamos a fijar en dos variables que son fundamentales a la hora de alertar sobre un evento:

- **Diferencia entre *CT* del origen y del "pick"**: Es la variable más importante, ya que nos informa del tiempo que pasa desde que se asocia el último "pick" hasta que el sistema alerta del origen.
- **Número de fases**: Esta variable nos da información sobre el número de estaciones que han sido asociadas a cada evento.

3.2.1 ESTUDIO DE LA RAPIDEZ PARA EVENTOS QUE TIENEN UN ORIGEN

Como vemos en la Tabla 2, en la muestra aparecen 96 terremotos que tienen un origen, de los cuales 84 son válidos. Estos son a los que vamos a aplicar el análisis. Pasamos a analizar el comportamiento de ambas variables.

Tabla 2 – Medidas estadísticas para eventos que tienen un origen. (Stadistic measures for one origin earthquake data.)

	CT ORIG-CT "PICK" (SEGS)	PHASES
Media	1.87	6.19
Desv. Típica	5.97	1.02
Mínimo	0	4
Máximo	44	10
Moda	0	6

Empezamos por analizar la diferencia de tiempo entre el *CT* del origen y del "pick". El dato más significativo que podemos apreciar es la media. Como podemos ver la diferencia media de tiempo es ligeramente inferior a 2 segundos, por lo que en general el sistema es bastante rápido alertando del origen desde que ocurre. Vemos que el valor mínimo de esta diferencia es el 0, que es también el valor que con mayor frecuencia ocurre, lo cual habla bien de la rapidez del sistema. Si nos fijamos en el valor de la desviación típica vemos que es bastante elevado debido a ciertos casos anómalos que disparan tanto este parámetro como el valor medio. En la Figura 4 podemos ver que no hay mucha dispersión entre la mayoría de los valores, la existencia de ciertos datos que toman valores elevados desvirtúa el valor de la desviación típica, por lo que en este caso no es muy fiable. Por último, tenemos que el valor máximo de esta diferencia es de 44 segundos, siendo un valor puntual que no se vuelve a repetir para ningún otro evento.

Analizamos ahora el número de fases. De nuevo nos fijamos en la media como medida principal y vemos que es ligeramente superior a 6. En este caso vemos que los valores mínimo y máximo son 4 y 10 respectivamente, por lo que no existen valores excesivamente alejados de la media como en el caso anterior. Esto lo podemos corroborar también al ver que la desviación típica de los datos es bastante pequeña. Gráficamente se puede apreciar en la imagen inferior de la Figura 4.

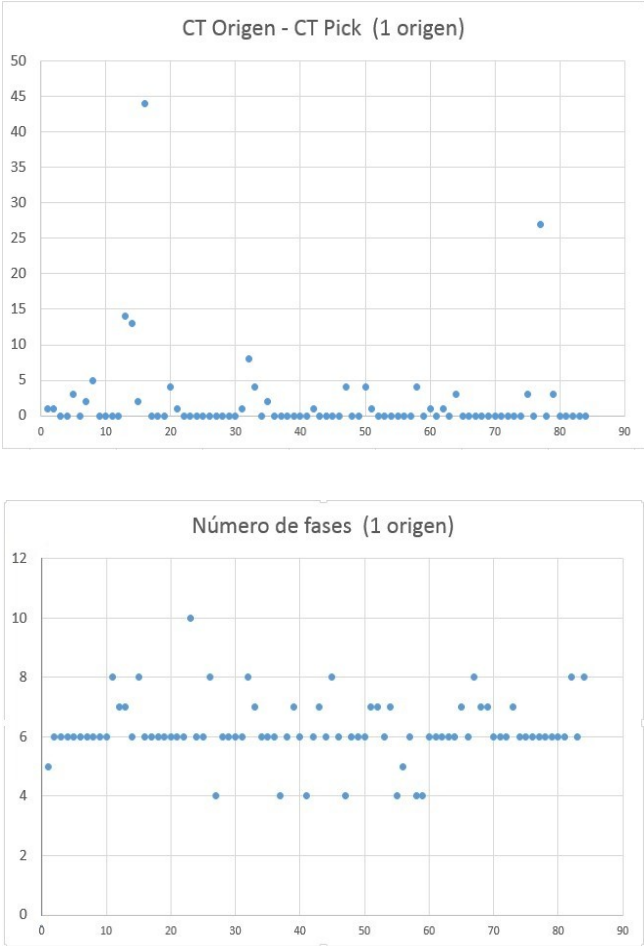

Figura 4 – Valores de las variables "diferencia de tiempo" y "número de fases" para terremotos que tienen un origen .(Values of "time differences" and "number of phases" in one-origin earthquakes.)

3.2.2 ESTUDIO DE LA RAPIDEZ PARA EVENTOS QUE TIENEN MÁS DE UN ORIGEN

En este caso vamos a estudiar los terremotos que tienen más de un origen. Como vemos en la Tabla 1, la muestra a estudiar consta de 168 observaciones, pero solo nos interesan 146 ya que las restantes son no válidas.

Tabla 3 – Medidas estadísticas para eventos que tienen más de un origen. (Stadistic measures for more tan one origin earthquake data.)

Primer Origen	CT ORIG-CT "PICK" (SEGS)	PHASES
Media	1.21	5.44
Desv. Tipica	3.43	1.64
Mínimo	0	4
Máximo	34	12
Moda	0	4

Último Origen	CT ORIG-CT "PICK" (SEGS)	PHASES
Media	4.64	10.56
Desv. Tipica	7.19	3.82
Mínimo	0	5
Máximo	58	22
Moda	0	7

De nuevo estudiamos las dos variables definidas anteriormente. Analizamos primero *CT Origen - CT pick*. En la Tabla 3, vemos que la media tanto para valores del primer origen como del último es bastante baja, tomando valores inferiores a 5 segundos en ambos casos. Como vemos en las dos primeras imágenes de la Figura 5, la gran mayoría de los datos se mantienen inferiores a 5 segundos, siendo el valor más repetido en ambos casos el 0. Vemos que los valores máximos de esta diferencia, que aparecen en la Tabla 3, están alejados del 0 pero son casos puntuales como se puede apreciar en la Figura 5. En general podemos observar que el sistema alerta bastante rápido también si el terremoto tiene más de un origen, ya que las diferencias de tiempo son muy pequeñas.

Pasamos ahora a analizar el número de fases en el primer y el último origen. Vemos que para lanzar el primer origen se necesita una media de algo más de 5 fases, mientras que para el último origen (el evento) se necesitan que se asocien en media unas 10 estaciones. La media del número de fases para el último origen se ve algo distorsionada por la existencia de varios valores muy altos, que son puntuales. Como podemos apreciar en las dos últimas imágenes de la Figura 5, los valores más repetidos para el número de fases son 4 y 7 respectivamente, aunque en el caso del último origen existe mayor dispersión de los datos.

4. COMPARACIÓN DE LOS DOS SISTEMAS: IGN-ALERTES-SC3

Una vez que hemos estudiado la efectividad del sistema ALERTES-SC3 en general, vamos a hacer una comparativa con el sistema de detección de terremotos del IGN. Como primera medida de comparación, analizaremos el número de eventos detectados por cada uno de los sistemas. Después, para los terremotos que hayan sido detectados por ambos sistemas estudiaremos las siguientes variables:

- **Cálculo de la distancia real**: Esta variable nos medirá la distancia en kilómetros que existe entre las localizaciones de los eventos dadas por IGN (tomadas como referencia) y por el prototipo ALERTES-SC3.
- **Diferencia en latitud**: Nos señala la distancia en kilómetros existente únicamente en latitud. Valores positivos (negativos) denotarán que la localización del evento por parte del IGN está más al norte (sur) que la localización del evento por parte de ALERTES-SC3.
- **Diferencia en longitud**: Indica la distancia en kilómetros existente en longitud. En este caso, dadas dos coordenadas para un mismo evento, $(\varphi,\lambda)_{IGN}$ y $(\varphi, \lambda)_{AI}$ nos encontramos con que existen dos posibles valores para la distancia en longitud, ya que para distintas latitudes existen distintos círculos menores. El criterio que vamos a seguir es el de dejar fija la latitud del IGN y tomar ese círculo menor, como vemos en la Figura 6. Valores positivos (negativos) denotarán que la localización del evento por parte del IGN está más al este (oeste) que la localización del evento por parte de ALERTES-SC3.

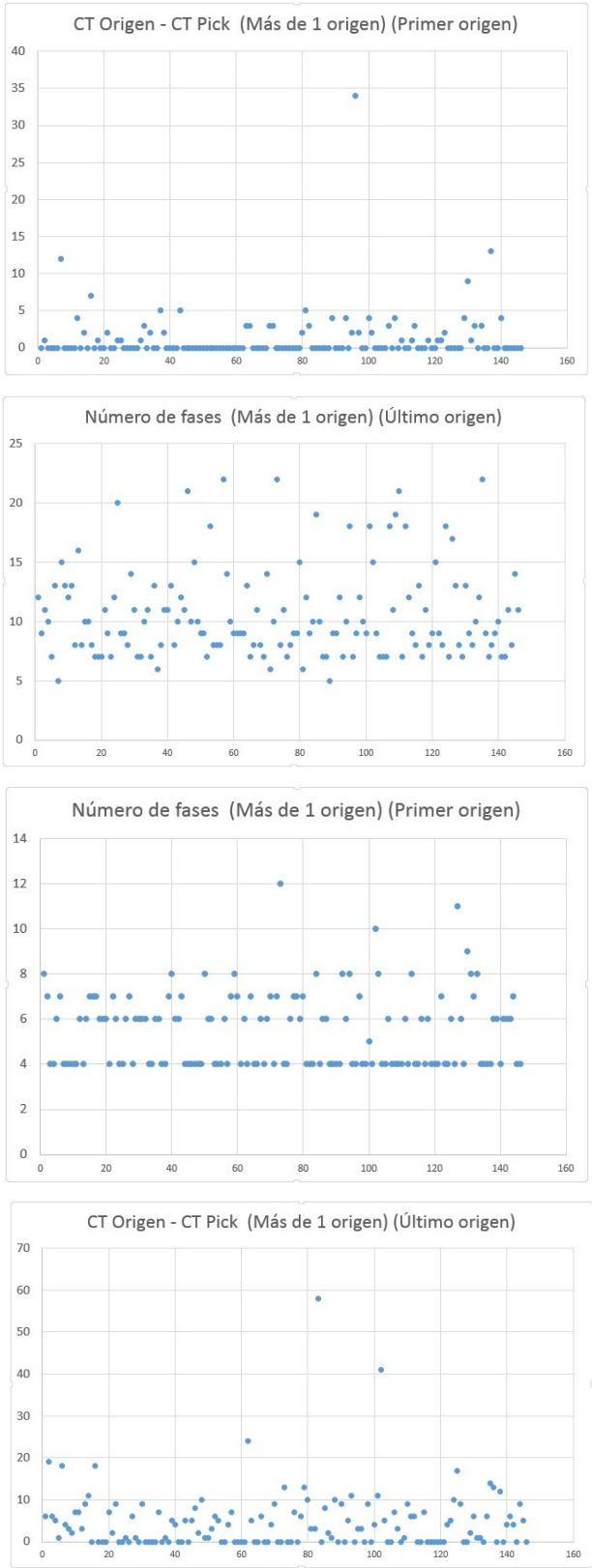

***Figura 5** – Valores de las variables "diferencia de tiempo" y "número de fases" para terremotos que tienen más de un origen . (Values of "time differences" and "number of phases" in more than one-origin earthquakes.)*

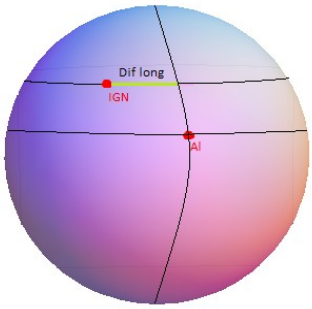

Figura 6 – Elección del círculo menor para el cálculo de la diferencia de longitud. (Choice of the minor circle to calculate the longitude difference.)

- **Diferencia de profundidad**: Nos da la diferencia entre los valores de la profundidad obtenidos por el sistema del IGN y ALERTES-SC3. Valores positivos (negativos) denotarán que la profundidad del evento según los datos del IGN es mayor (menor) que la profundidad del evento según los datos de ALERTES-SC3.

- **Diferencia de tiempo**: Mediante esta variable analizamos las diferencias existentes entre la hora de origen de los terremotos. Valores positivos (negativos) señalarán que la hora de origen del evento del IGN es posterior (anterior) a la hora de origen del evento de ALERTES-SC3.

- **Diferencia de magnitud**: Esta variable nos señala la diferencia en los valores de la magnitud proporcionados por ambos sistemas. Valores positivos (negativos) indican que la magnitud del evento según IGN es mayor (menor) que la magnitud del evento según el prototipo ALERTES-SC3.

Mediante estas variables conseguimos hacer una comparativa sobre los principales componentes de un terremoto, es decir, la posición en la que ocurre, el tiempo en el que sucede y el valor de la magnitud que tiene. Finalmente, repetiremos el estudio sobre una malla más específica del mapa y compararemos los resultados obtenidos en ambos análisis.

4.1 ESTUDIO REALIZADO SOBRE LA MALLA PRINCIPAL

En primer lugar nos centraremos en la malla sobre la que actúa el sistema ALERTES-SC3 (Figura 7), es decir, latitud en el intervalo (34,38) y longitud en el intervalo (-14,-3).

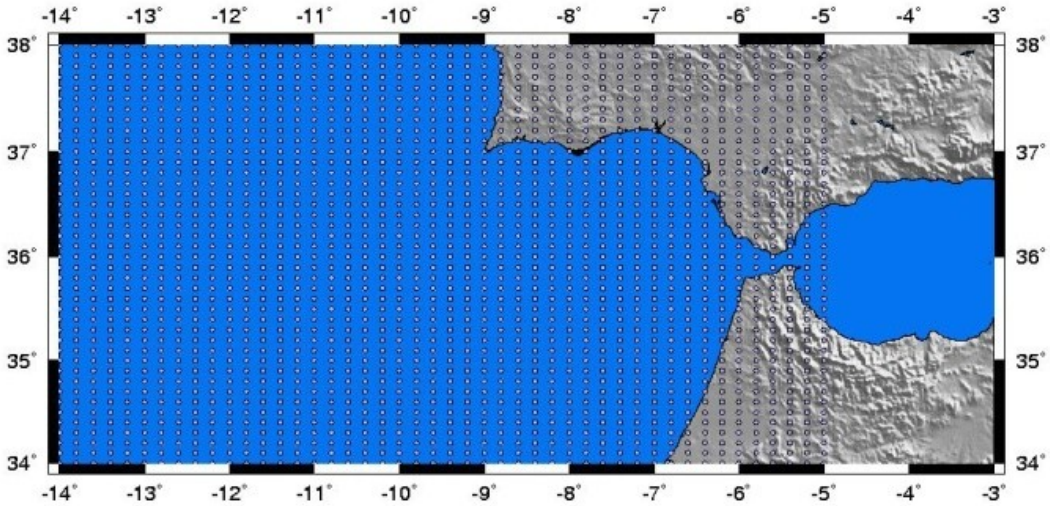

Figura 7 – Malla general: latitud (34,38), longitud (-14,-3). (General zone: latitude (34,38), longitude (-14,-3).)

Empezamos por hacer recuento de los terremotos listados en esta malla por ambos sistemas. En la Tabla 4, podemos ver el número de eventos de la muestra que aparecen en los conjuntos considerados y el porcentaje de terremotos detectados que supone del total. Vemos que el total de eventos detectados es de 596, de los cuales 279 han sido detectados por ALERTES-SC3, lo que supone un 46,81% del total. Esto se ve de forma más clara en la Figura 9 donde aparecen representados gráficamente todos los conjuntos definidos en la Tabla 4.

Tabla 4 – Recuento de terremotos en la malla principal. (Summary of earthquakes in the general zone .)

	Eventos	% detección
Totales	596	
IGN	463	77.68
Alertes	279	46.81
IGN y no Alertes	317	53.19
Alertes y no IGN	133	22.32
Comunes	146	24.50

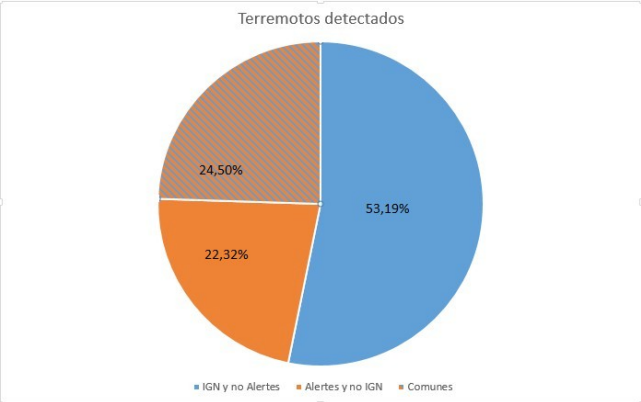

Figura 8 – Porcentajes de terremotos detectados en la malla principal. (Percentage of earthquakes detected in the general zone.)

Podemos ver que más de la mitad de los terremotos (53,19%) son únicamente detectados por el IGN, y al sumarle la zona de eventos comunes obtenemos que prácticamente el 80% de los terremotos son detectados por este sistema. Por otro lado, el sistema ALERTES-SC3 detecta en total algo menos de la mitad de los terremotos, un 46,81% de ellos. De aquí, podemos observar que para la malla general estudiada, el sistema del IGN obtiene mejores resultados en cuanto a la detección de eventos.

Pasamos ahora a analizar las variables definidas anteriormente para los terremotos detectados por ambos sistemas. Como vemos en la Tabla 4, la muestra que vamos a estudiar ahora está compuesta de 146 elementos. En la Tabla 5 podemos apreciar las medidas estadísticas realizadas a las variables.

Tabla 5 – Medidas estadísticas para eventos comunes en la malla principal. (Stadistic mesures for common earthquakes in the general zone.)

	Media	Desv. Tipica	Mínimo	Máximo
Dist. Real	27.84	52.27	0	427.53
Dif. Latitud	6.31	30.25	-91.17	171.21
Dif. Longitud	4.37	50.29	-244	421.77
Dif. Prof.	1.83	15.40	-96	61
Dif. Tiempo	0.45	16.56	-29	186
Dif. Magnitud	-0.26	0.39	-1.6	0.49

- **Distancia real**: La distancia media entre las localizaciones de los eventos es de 27,84 kilómetros. Como podemos ver en la Figura 9 la mayoría de los datos no distan más de 50 kilómetros, existiendo algunos valores que se alejan bastante de la mayoría, como el valor máximo que toma esta variable. Esto hace también que la desviación típica se vea distorsionada y tenga un valor bastante elevado para la dispersión real de los datos que existe.

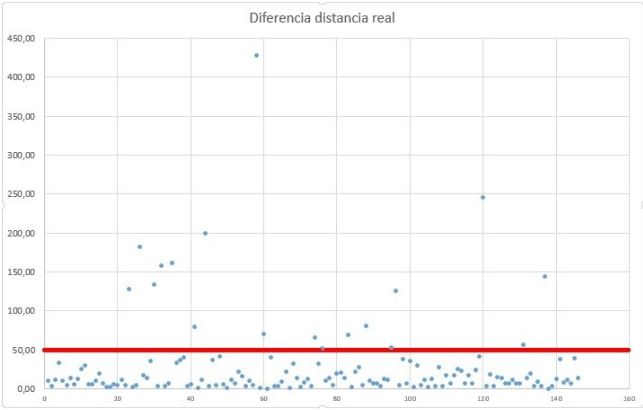

Figura 9 – Distancia real en kilómetros entre las localizaciones dadas por ambos sistemas. (Real distance (kms) between locations given by both systems.)

- **Diferencias en latitud y longitud:** Como podemos apreciar, tenemos que en media, por el criterio mencionado anteriormente, los eventos del IGN se localizan alrededor de 6 Km más al norte y algo más de 4 Km más al este. Pero esto no es algo muy relevante, ya que como vemos en la Figura 10, los datos no tienen una tendencia que indique que generalmente los valores de ambas diferencias sean positivos, sino que están concentrados alrededor del 0 tomando valores positivos y negativos de una forma más o menos equilibrada. Más bien, estos valores medios se deben a la existencia de datos puntuales con valores muy elevados que los desvirtúan, como señala el alto valor de la desviación típica en ambos casos.

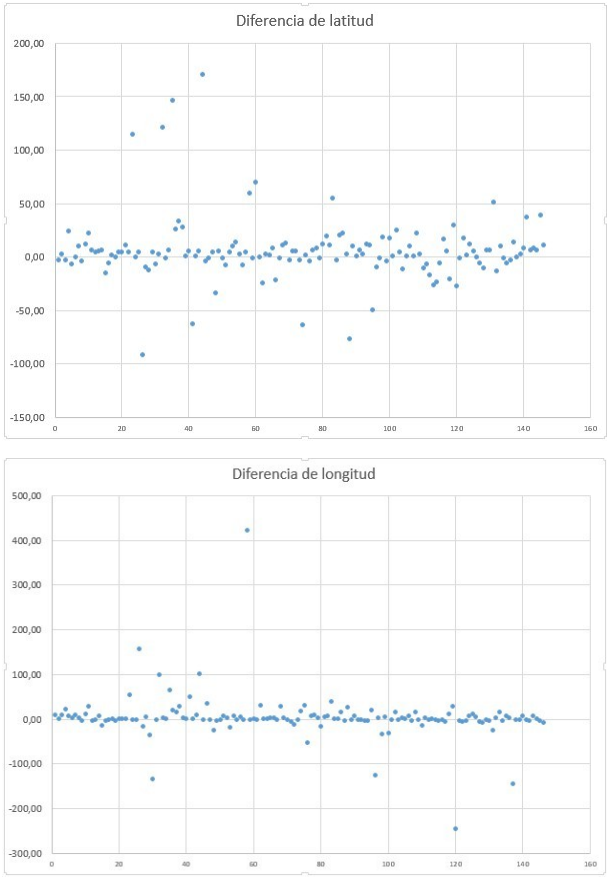

Figura 10 – Diferencia en kilómetros en latitud y longitud (Differences in latitude and longitude (kms).).

- **Diferencia de profundidad**: En la Figura 11 podemos observar que la mayoría de los datos se encuentran en el intervalo (-20,20). La media de estas diferencias es de 1,83 Km, lo que nos indica que en general la profundidad de los datos del IGN es mayor que los de ALERTES-SC3. Vemos que la dispersión de los datos no es muy grande, lo que se confirma además viendo el valor de la desviación típica.

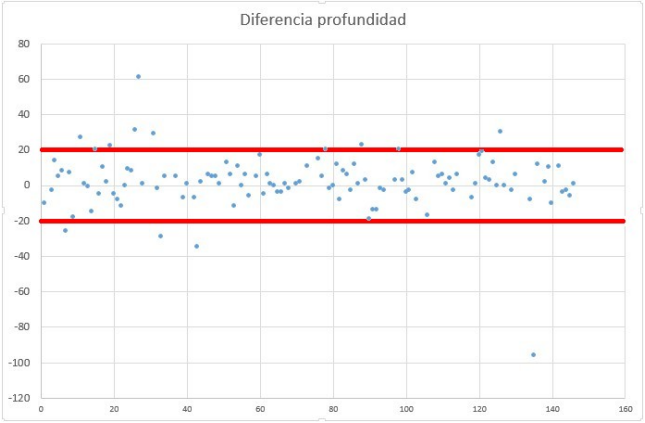

Figura 11 – Diferencia de profundidad en kilómetros entre ambos sistemas. (Differences in width (kms) between both systems.)

- **Diferencia de tiempo**: La media de tiempo es de 0.45 segundos, lo que significa que el sistema ALERTES-SC3 ha avisado antes de los eventos. Aunque esto es así, realmente estamos hablando de menos de un segundo de diferencia, por lo que no podemos decir que el sistema ALERTES-SC3 haya sido mucho más rápido en la alerta del terremoto. Como podemos ver en la Figura 12, la mayoría de los datos están en el intervalo (-2,2), por lo que en general ambos sistemas alertan prácticamente a la vez.

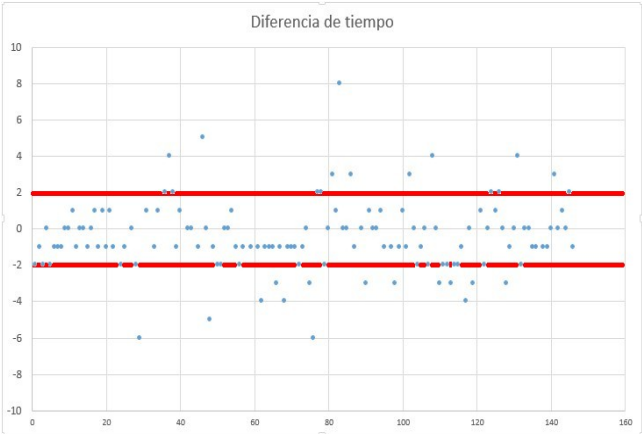

Figura 12 – Diferencias en la hora de origen entre ambos sistemas. (Differences in origin time between both systems.)

- **Diferencia de magnitud**: La diferencia media en magnitud es de −0.26, lo que nos indica que la magnitud de los datos de ALERTES-SC3 es ligeramente mayor que la de los datos del IGN. En la Figura 13, vemos que la mayoría de los datos se concentran en el intervalo (-0.5, 0.5), aunque en este caso si se puede apreciar que existen más datos negativos que positivos.

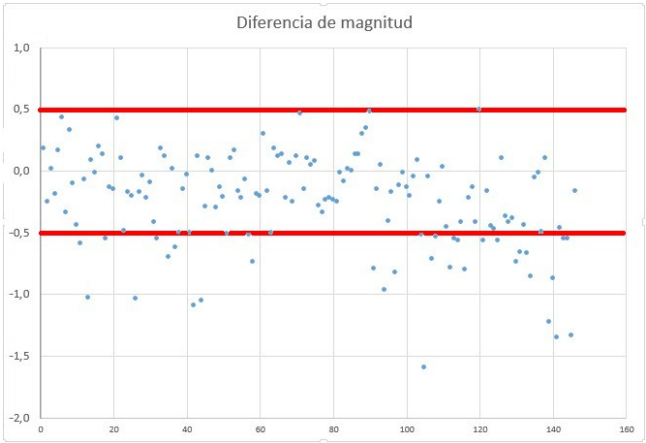

Figura 13 – Diferencias en magnitud. (Differences in magnitude.)

Una vez analizadas estas variables podemos destacar algunos aspectos importantes. Hemos observado que el sistema del IGN es más efectivo que ALERTES-SC3 en la detección de terremotos sobre esta malla estudiada, existiendo una diferencia importante entre ambos sistemas. Por otro lado, hemos podido ver que las localizaciones por ambos sistemas para un mismo terremoto distan bastante en media, casi unos 30 kilómetros, lo que hace que no exista mucha precisión sobre la localización del evento.

Otra cosa a tener en cuenta es que en cuanto a la alerta del terremoto en tiempo, ambos sistemas estaban bastante parejos, ya que apenas existían diferencias en media. No podemos decir lo mismo sobre la diferencia de magnitud, ya que aunque la media era cercana a 0, hemos visto que la mayoría de los datos eran negativos, cosa que se traducía en que la magnitud de los datos proporcionada por ALERTES-SC3 era mayor que la proporcionada por IGN.

4.2 ESTUDIO REALIZADO SOBRE UNA MALLA REDUCIDA

Vamos a repetir el estudio anterior aplicándolo esta vez sobre una malla del mapa más específica, dado que el prototipo original se focalizaba en estas dos zonas de prueba, y por tanto, la configuración del sistema se realizó para la detección de sismos de esta zona. Esta malla se concentra más en la zona del Cabo S.Vicente-Golfo de Cádiz como podemos ver en la Figura 14. Nos centramos en las coordenadas para latitud en el intervalo (36,38) y longitud en el intervalo (-10,-6).

Al igual que antes, lo primero es hacer un recuento de los terremotos listados, que podemos ver en la Tabla 6. El total de eventos ocurridos en esta malla es de 224. En este caso, el número de terremotos detectados por ALERTES-SC3 es de 177, que supone un 79,02% del total.

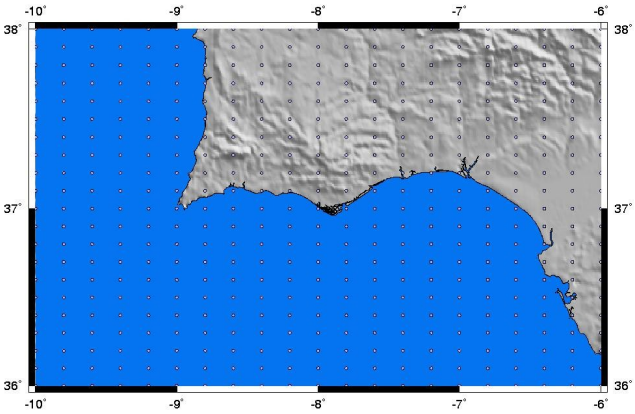

Figura 14 – Malla específica: latitud (36,38), longitud (-10,-6). (Specific zone: latitude (36,38), longitude (-10,-6).)

Tabla 6– Recuento de eventos en la malla específica. (Summary of earthquakes in the specific zone)

	Eventos	% detección
Totales	224	
IGN	116	51.79
Alertes	177	79.02
IGN y no Alertes	47	20.98
Alertes y no IGN	108	48.21
Comunes	69	30.80

Gráficamente se puede apreciar en la Figura 15 que la mayoría de terremotos son detectados por ALERTES-SC3, con casi un 80%, mientras que en cambio el IGN solo detecta el 51,79% de los eventos. Por tanto, vemos que en esta malla se produce un cambio de tendencia, siendo el sistema ALERTES-SC3 el que detecta la gran mayoría de los terremotos. Hay que reseñar que aunque el IGN y el sistema ALERTES-SC3 tienen algunas estaciones en común, las redes sísmicas utilizadas por los dos sistemas son diferentes, lo que podría explicar los diferentes niveles de detección en cada una de las zonas analizadas.

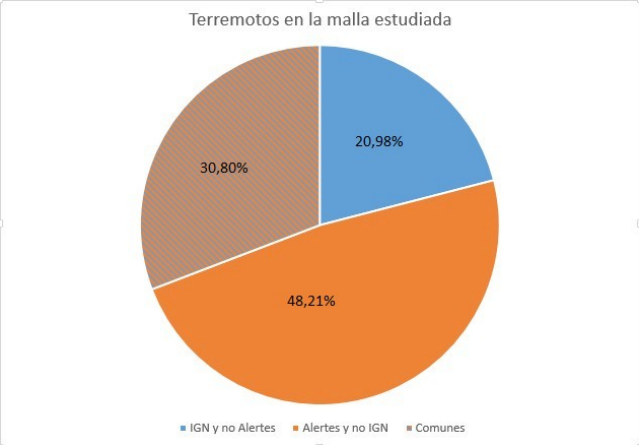

Figura 15 – Porcentajes de terremotos detectados en la malla específica. (Percentages of earthquakes detected in the specific zone.)

Analizamos ahora las variables definidas para estudiar terremotos comunes. En este caso, la muestra se compone de 69 eventos como podemos ver en la Figura 15. En la Tabla 7 mostramos las medidas estadísticas realizadas a esta muestra.

Tabla 7– Medidas estadísticas para eventos comunes en la malla específica. (Stadistic measures for common earthquakes in the specific zone.)

	Media	Desv. Típica	Mínimo	Máximo
Dist. Real	16.58	22.66	0	157.46
Dif. Latitud	4.33	22.80	-77.71	121.18
Dif. Longitud	4.44	15.19	-32.86	99.83
Dif. Prof.	3.64	12.40	-35	30
Dif. Tiempo	-0.29	4.37	-27	18
Dif. Magnitud	-0.17	0.32	-1.22	0.47

- **Distancia real**: La media de distancia entre las localizaciones de los eventos es de 16,58 kilómetros. Aunque sigue siendo alta, si lo comparamos con la media obtenida en el estudio anterior, vemos que es casi 10 Km menor, es decir, las distancias son menores y por tanto la precisión en la localización es mucho mayor. La dispersión de los datos es mucho menor también, como podemos ver por el valor de la desviación típica. En la Figura 16 observamos como la mayoría de las observaciones se encuentra por debajo de 30 Km (línea naranja). La línea roja marca los 50 Km, que era el límite que habíamos marcado en el estudio anterior.

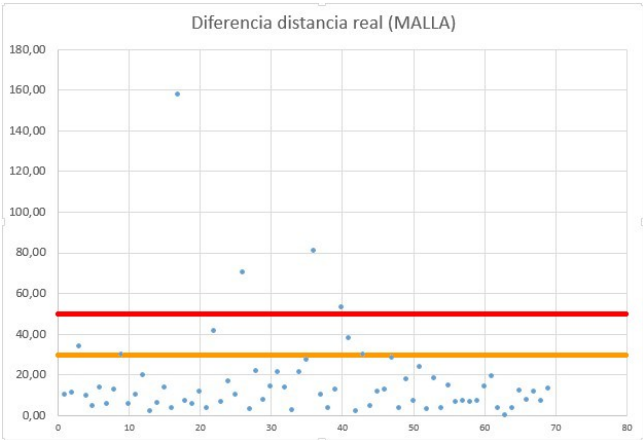

Figura 16 – Distancia real entre las localizaciones dadas en la malla específica. (Real distance (kms) between locations given by both systems in the specific zone.)

- **Diferencias en latitud y longitud**: Los valores medios que obtenemos en estas variables son 4.33 y 4.44 respectivamente. Utilizando el criterio por el que definimos estas variables tenemos que los eventos del IGN se localizan alrededor de 4 Km más al norte y algo más de 4 Km más al este que las localizaciones dadas por ALERTES-SC3. En este caso si se puede apreciar en la Figura 17 que existen muchos más valores positivos que negativos en ambas variables.

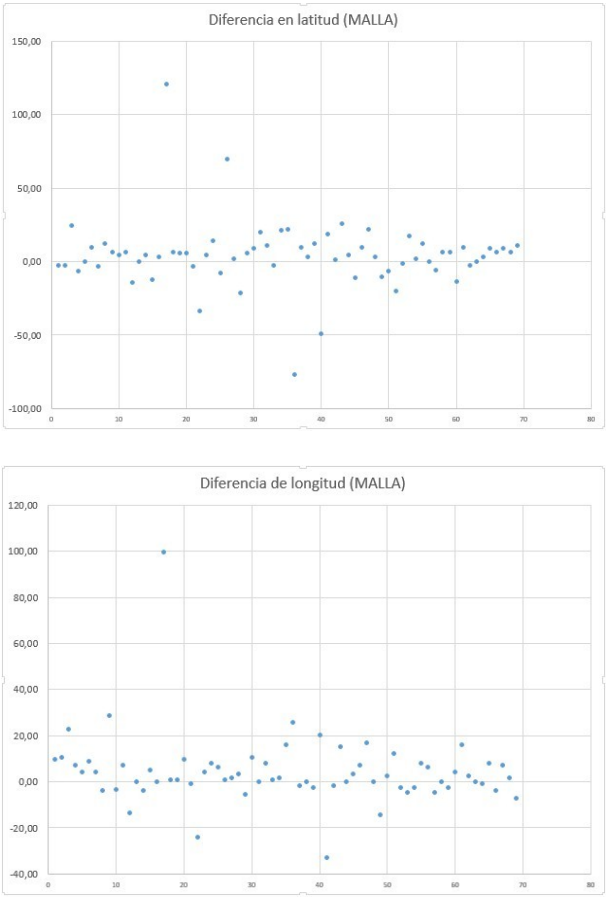

Figura 17 – Diferencia en kilómetros en latitud y longitud en la malla específica. (Differences in latitude and longitude (kms) in the specific zone).

- **Diferencia de profundidad**: La media de esta variable es 3.84, dos kilómetros superior a la media de esta misma variable en el estudio anterior. Al ocurrir esto se tiene que la profundidad de los datos del IGN es mayor que los de ALERTES-SC3. En este caso, esto se tiene con mayor claridad, ya que la desviación típica de los datos es pequeña, por tanto no existe ningún valor extraño que distorsione la media. En la Figura 18, podemos ver que la mayoría de los datos están en el intervalo (-15,15), por lo que vuelven a ser más cercanos entre ellos que en el anterior estudio (línea roja).

- **Diferencia de tiempo:** Vemos que la diferencia media de tiempo es de −0.29, lo que indicaría que el IGN ha alertado más rápido de los terremotos, pero de nuevo, estamos hablando de que en media esta diferencia es prácticamente 0, por lo que en realidad no podemos decir que el sistema del IGN sea más rápido que ALERTES-SC3. Si observamos la Figura 19, tenemos que la dispersión de los datos es bastante pequeña, al estar la mayoría de los datos concentrados en el intervalo (-2,2). Esto lo podemos corroborar también al observar que el valor de la desviación típica es bastante pequeño. En el análisis de esta variable obtenemos resultados muy parecidos en ambas mallas.

- **Diferencia de magnitud**: El valor medio de esta variable es de −0.17, por lo que la magnitud de los datos de ALERTES-SC3 es ligeramente mayor que la de los datos del IGN. La desviación típica toma un valor muy cercano a 0, por lo que la dispersión de los datos es muy pequeña, como podemos ver en la Figura 20. Esto es un buen indicador de la precisión de estos datos, ya que quiere decir que las magnitudes dadas por ambos sistemas son bastante parecidas.

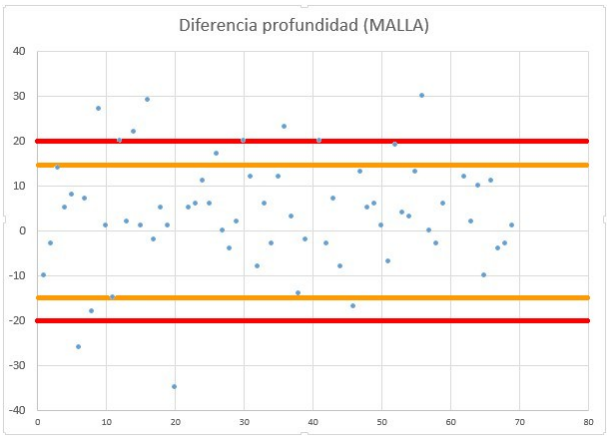

Figura 18 – Diferencia de profundidad en kilómetros entre ambos sistemas en la malla específica. (Differences in width (kms) between both systems in the specific zone.)

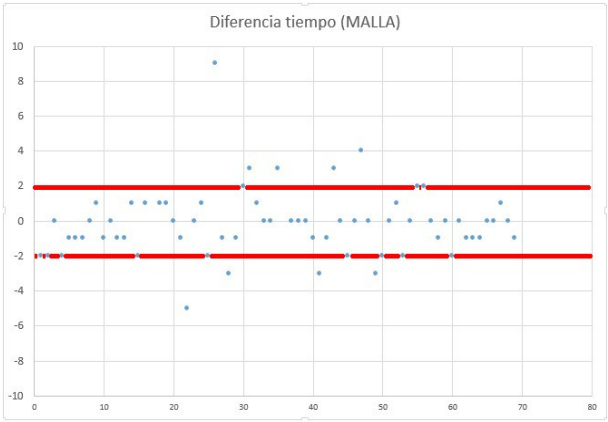

Figura 19 – Diferencias en la hora de origen entre ambos sistemas en la malla específica. (Differences in origin time between both systems in the specific zone.)

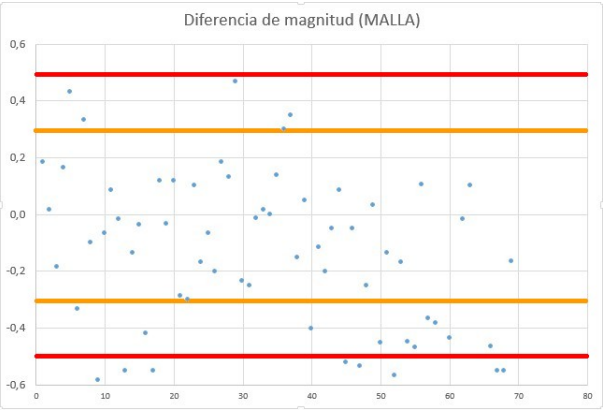

Figura 20 – Diferencias en magnitud en la malla específica. (Differences in magnitude in the specific zone.)

Como hemos podido apreciar, existen varias diferencias significativas entre los estudios realizados en las diferentes mallas. En primer lugar, tenemos que en esta malla específica los resultados en cuanto a detección de terremotos son totalmente diferentes a los que obtuvimos en el estudio de la malla general, siendo en este caso el sistema ALERTES-SC3 el que detecta la gran mayoría de los eventos y, por tanto, resultando mucho más efectivo en este aspecto.

En general vamos a ver que para la mayoría de las variables se mejoran los resultados en esta malla específica, ya que las diferencias existentes entre los datos son menores. Si nos fijamos por ejemplo en la distancia real entre las localizaciones de los eventos, tenemos que las distancias son en media 10 kilómetros menores, por lo que se gana bastante en precisión. Sin embargo, en el caso de la diferencia de tiempo y diferencia de magnitud, obtenemos resultados muy similares en ambas mallas.

5. CONCLUSIONES

Finalmente, tras haber realizado este estudio podemos extraer varias ideas interesantes. En el primer análisis, hemos estudiado la efectividad y fiabilidad del sistema ALERTES-SC3 a la hora de alertar sobre los eventos. Según el estudio realizado, prácticamente el 90% de los terremotos listados se consideraban lo que hemos denominado válidos, al dar la alerta del evento en un plazo de tiempo suficientemente rápido desde que se asociaba el último "pick". En este sentido, ALERTES-SC3 se considera bastante efectivo.

Después nos centramos en estudiar la rapidez del sistema a través de dos variables fundamentales: *Diferencia entre CT del origen y del "pick"* y *Número de fases*. Según lo visto en el análisis, podemos concluir que el sistema, en general, alerta bastante rápido de los eventos, con una diferencia media de tiempo inferior a los 5 segundos. Del mismo modo, para el número de fases hemos observado que en media es necesario que se asocien unas 10 estaciones para alertar del evento, lo cual nos vuelve a dar una idea de la velocidad de alerta del sistema. Concluimos de este primer análisis, por tanto, que el sistema ALERTES-SC3 se muestra bastante fiable en cuanto al número de eventos que han sido bien alertados y, por lo general, con una gran rapidez de aviso.

Una vez que habíamos estudiado el comportamiento del sistema ALERTES-SC3, pasamos a realizar una comparación con el sistema de detección del IGN sobre dos mallas geográficas distintas. El análisis realizado sobre la malla general nos muestra que en el aspecto de detección de terremotos, el sistema del IGN es mucho más efectivo, y al estudiar las diferencias en las distintas características de los eventos, podemos ver que en varias variables existen diferencias significativas. En cambio, en el análisis realizado sobre la malla reducida al SW del cabo de San Vicente y el Golfo de Cádiz (zonas de test), obtenemos resultados bastante diferentes. Por ejemplo, tenemos que en este caso ALERTES-SC3 detecta bastantes más terremotos que IGN, y en el estudio de las diferencias obtenemos que son mucho menores. Por tanto, podemos concluir que sobre la malla reducida, ALERTES-SC3 obtiene mejores resultados que sobre la malla general, al verse reducidas las diferencias entre las características principales de los terremotos. Además, en esta malla se observa como ALERTES-SC3 es mucho mejor que el IGN en la detección de terremotos, lo que nos muestra la efectividad del sistema sobre la zona del Cabo S.Vicente-Golfo de Cádiz.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece al equipo de la Sección de Geofísica del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando (Cádiz), por el gran apoyo recibido y por la motivación para llevar a cabo este trabajo.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos de investigación ALERTES (Sistema de Alerta Sísmica Temprana: aplicación al sur de España) (CGL2010-19803-C03-03) y ALERTES-RIM (Sistema de Alerta Sísmica Temprana: Sistema regional y onsite para la región Ibero-Mogrebí)(CGL2013-45724-C03-03-R).

Automatización del estudio del ruido sísmico registrado en una estación de banda ancha mediante la utilización del software Matlab.

Automation of the study of seismic noise recorded at a Broadband Station by using the Matlab software.

Juan Manuel Muñoz Ocaña[(1)] y Antonio Pazos García[(2)]
[(1)] Universidad de Cádiz, juanmanuel.munozocana@alum.uca.es
[(2)]Real Instituto y Observatorio de la Armada, San Fernando, pazos@roa.es

ABSTRACT

This work has been carried out at the Royal Naval Institute and Observatory (Real Instituto y Observatorio de la Armada, ROA) of the Spanish Navy in San Fernando, Spain. The objective has been carried out a program, using the Matlab software, which allows us to estimate the power spectral densities of the seismic noise recorded by a seismic station. This program facilitates this study, as we have automated the calculation procedure, so that implementing a code in Matlab, we got only use this software without have to use any other. We just need to know the season we study the seismic noise and the time frame. Throughout the work, we have taken as reference the station MELI in the year 2000.

RESUMEN

Este trabajo ha sido realizado en el Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) en San Fernando. El objetivo ha sido realizar un programa, utilizando el software Matlab, el cual nos permita estimar la densidad espectral de potencia del ruido registrado por una estación de sísmica dada. Este programa facilita este estudio, ya que hemos automatizado el procedimiento de cálculo, de tal forma que implementando un código en Matlab, conseguimos utilizar únicamente este software sin tener que utilizar ningún otro. Sólo tenemos que conocer de qué estación queremos estudiar el ruido sísmico y en qué intervalo de tiempo. Durante todo el trabajo, hemos tomado como referencia la estación MELI en el año 2000.

INTRODUCCIÓN.

Los estudios de ruido sísmicos para estaciones permanentes de banda ancha son muy utilizados en los últimos años. Un conocimiento exacto de las amplitudes del ruido y las frecuencias proporcionan información sobre las estructuras geológicas, la actividad humana y la influencia de los fenómenos climatológicos sobre la Tierra. Los factores que influyen en el ruido sísmico son numerosos, como por ejemplo, toda la actividad humana, la temperatura terrestre, las variaciones en la presión atmosférica, los seísmos, las mareas, el viento, entre muchos otros.

El ruido sísmico es estudiado de una forma muy eficiente mediante la densidad espectral de potencia, analizando el desplazamiento, la velocidad o la aceleración en los sismogramas.

Definimos la densidad espectral de potencia (PSD) como la transformada de Fourier de la función de autocorrelación P(τ) de la señal del ruido sísmico f(t).

$$P(\tau)=\langle f(t)\cdot f(t+\tau)\rangle$$

Donde el símbolo $\langle\cdot\rangle$ representa la media de un intervalo de tiempo. Por lo tanto, la densidad espectral de potencia, P(ω) viene dada por

$$P(\omega)=F(P(t))=\int P(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau$$

La densidad espectral de potencia proporciona la caracterización matemática más adecuada del ruido sísmico. La expresamos en $m^{-2}\cdot s^{-4}\cdot Hz^{-1}$. Para evaluar la densidad espectral de potencia que obtendremos, utilizamos como referencia unas curvas que han sido elaboradas por Peterson (1993). Estas curvas, llamadas New Low-Noise Model y New High-Noise Model, definen los límites superior e inferior del PSD a una frecuencia dada para estaciones, siendo el nivel inferior el correspondiente a una estación en sitio tranquilo con bajo nivel de ruido y el alto a una estación ruidosa.

Los principales pasos que seguiremos para obtener el ruido sísmico serán los siguientes:

1. Obtención de los datos necesarios, como son el catálogo de los terremotos significativos producidos en un intervalo de tiempo determinado, "gaps" en los datos grabados por la estación de banda ancha que elijamos y la respuesta del sistema para la corrección instrumental.

2. Creación de ventanas de tiempo en las que no se producen terremotos significativos, para asegurarnos que la densidad espectral corresponde a ruido sísmico y no a terremotos.

3. Estimación de la densidad espectral del ruido, utilizando la función "pwelch" incluida en Matlab, para las frecuencias seleccionadas.

4. Corrección instrumental utilizando la respuesta del sistema.

5. Representaciones gráficas.

OBTENCIÓN DE DATOS.

El primer paso que hemos realizado ha sido eliminar intervalos de tiempo en los cuales han ocurrido terremotos, quedándonos con las ventanas de tiempo en los que no han ocurrido terremotos significativos, para evitar grandes alteraciones en el ruido sísmico. En estos intervalos, por lo tanto, no habrá grandes variaciones debido a los seísmos. Clasificaremos los terremotos en tres grupos, dependiendo de su magnitud, (globales, regionales y locales). Los terremotos globales a considerar serán los que tienen una magnitud mayor que 6.0 y que ocurran en cualquier localización, para ellos quitamos una ventana de tiempo de 12 horas. Para encontrar estos terremotos utilizamos la siguiente dirección: http://www.emsc-csem.org/. Una vez realizada la búsqueda introduciendo el intervalo de tiempo y la magnitud mínima correcta, exportamos los datos encontrados en formato "csv" y los guardaremos en el directorio en el que el programa Matlab los leerá, es decir, en la carpeta "Datos", (C:\SeismicNoise\Datos). Además, tenemos que nombrar este fichero, que contiene los terremotos globales del año indicado, de la forma "global2000.dat", en nuestro caso el año 2000, ya que durante la programación de dicha función hemos tomado de referencia el año 2000.

Para encontrar los terremotos regionales y locales utilizaremos el catálogo del Instituto Geográfico Nacional en la dirección: http://www.ign.es/ign/main/index.do. Tanto para los seísmos regionales como para los locales procederemos de la misma forma para realizar la búsqueda en el intervalo de tiempo deseado. En primer lugar, en el caso de los terremotos regionales, realizamos la búsqueda de los seísmos que hayan ocurrido en un radio de unos 1000 km con centro la estación de banda ancha elegida. Para ello, debemos conocer la latitud y longitud de dicha estación y calcular mediante coordenadas esféricas los intervalos de longitud y latitud, para, una vez calculado estos intervalos, introducirlos como los parámetros de la búsqueda. Indicaremos que nos muestre todos los terremotos producido en la zona calculada con una magnitud mayor a 5. Para cada terremoto encontrado, eliminaremos una ventana de tiempo de 4 horas. Una vez realizada la búsqueda, guardamos los resultados en formato texto (*.txt) en el mismo directorio en el que guardamos los globales y le daremos al fichero el nombre "regionales2000.txt" siendo, al igual que en el caso de los seísmos globales, el año 2000 en el que hemos obtenido los terremotos regionales.

Con respecto a los terremotos locales, realizamos el mismo procedimiento de búsqueda que en el caso de los regionales, a diferencia de que, en este caso, tomamos un radio de búsqueda de 300 km y una magnitud mayor a 3. Además, para cada seísmo, eliminamos una ventana de longitud 1 hora. Guardamos el fichero obtenido, en formato texto, en el mismo directorio en el que se encuentran los globales y regionales con el nombre "locales2000".

ELIMINACIÓN DE LOS TERREMOTOS SIGNIFICATIVOS.

Una vez obtenidos todos los archivos con los terremotos producidos en el intervalo de tiempo deseado, realizamos la función en Matlab que nos calculará las ventanas de tiempo en los que no se producen terremotos significativos en la zona de la estación. Para ello, leemos los ficheros obtenidos anteriormente que correspondan al año o intervalo de tiempo deseado y de la estación correcta. Tras guardar en memoria estos datos, vamos creando las ventanas eliminando intervalos de tiempo de 12, 4 o 1 hora dependiendo de si los terremotos son globales, regionales o locales. Estas ventanas de tiempo las guardamos en un archivo Excel para poder leerlas con la siguiente función que realizaremos, la cual va a calcular el ruido sísmico en los intervalos de tiempo indicados en el archivo Excel guardado.

Veamos a continuación cómo funciona la función que hemos programado utilizando Matlab. A dicha función le hemos dado el nombre de "ventanas". Comenzamos leyendo el fichero de los terremotos globales mediante la función de Matlab "textscan" y obtenemos el día y la hora en el que ocurre cada uno de ellos en dos cadenas. Para el caso del día del año, dividimos la cadena en año, mes y día, y la cadena que contiene la hora, la dividimos en hora, minuto y segundos. Una vez que tenemos todos estos datos por separado, los convertimos de formato cadena a formato entero mediante la función incluida en Matlab "str2double", para así poder realizar operaciones con ellos.

Pasamos la hora que hemos obtenido a segundos:

```
hora(j)*3600+minuto(j)*60+segundo(j)
```

La fecha en el fichero se encuentra en formato gregoriano mientras que esta función trabajará con el formato juliano. Para ello, se convertirá la fecha de gregoriano a juliano utilizando "greg2jul" de la siguiente forma:

```
juliano(j)=
greg2jul(dia(j),mes(j),epoca(j))
```

Tras esta conversión a juliano, se eliminan las ventanas de longitud 12 horas en las que no ocurren terremotos globales. Para ello, a cada fecha que se tiene en juliano hay que sumarle 12 horas (43200 segundos) y le aplicaremos la función "corregirfecha" para evitar obtener una hora mayor a 23:59:59.

```
corregirfecha(juliano(j),Hora(j)
+43200)
```

Tras obtener las ventanas de 12 horas, se eliminan creando intervalos de tiempo sin estos seísmos y se guardan en la matriz "ventana". Además, se tiene en cuenta que no se solapen las

ventanas de 12 horas, en el caso de que ocurra, se unirán en una sola ventana de longitud correspondiente, es decir, se observa si el inicio de la ventana en la que ocurre un terremoto es menor que el final de la ventana en la que ocurre el terremoto anterior.

La matriz "ventana" tiene cuatro columnas, las dos primeras columnas contienen el día en juliano y la segunda columna es la hora en segundos, lo mismo ocurre para la tercera y cuarta columna. La tercera y cuarta columna indican el inicio de la ventana que se elimina y la primera y la segunda columna de la siguiente fila es el final de la ventana de 12 horas. Por tanto, los intervalos de tiempo en los que no se producen terremotos globales son cada una de las filas de la matriz con inicio la primera y segunda columna y final la tercera y cuarta columna.

Una vez que se tienen los intervalos sin los terremotos globales, se eliminarán ventanas de 4 horas en las que se producen terremotos regionales. Para ello, se comienza leyendo el fichero que contiene las fechas en las que se producen. Se abre el fichero con "fopen" en modo lectura y se recorre todo el fichero obteniendo con la función "fgetl" cada una de las líneas. Se dividen cada línea, al igual que en el caso de los globales, en año, mes, día, hora, minuto y segundo, y se convierte de formato cadena a entero. Por ejemplo, en el caso del mes, será:

```
mesreg(i)=str2double(linea(21:22))
```

Tras ello, la hora se convierte a segundos y la fecha se pasa de gregoriano a juliano, ya que se utilizará la hora en segundos y la fecha en juliano para crear las ventanas. Como son terremotos regionales, las ventanas que se eliminan tienen una longitud de 4 horas. A continuación, para eliminar estas ventanas se utiliza la matriz "ventana" en la que no se encuentran los terremotos globales. Se tiene en cuenta diversos casos:

1. Si la ventana de 4 horas ya no se encuentra en la matriz, es decir, ha sido eliminada completamente al ocurrir un terremoto global.

2. Si únicamente se encuentra una parte de la ventana, esto es, si se solapa con una ventana de un terremoto global de 12 horas o se solapa con la ventana de 4 horas del terremoto anterior.

3. Si la ventana no se solapa con ninguna otra, por lo que se eliminará de forma completa.

Se obtiene así una nueva matriz que contiene los intervalos de tiempo en los que no ocurren terremotos globales ni regionales.

Finalmente, se realiza el mismo procedimiento para los terremotos locales, obteniendo la matriz de intervalos de tiempo en la que se ha eliminado las ventanas donde han ocurrido terremotos globales, regionales y locales. Así pues, en estos intervalos de tiempos se calculará la densidad espectral de potencia (psd).

CÁLCULO DE LA DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA (PSD).

Para realizar la siguiente función, necesitamos los datos obtenidos por la estación de banda ancha que se encuentra en el lugar en el que vamos a calcular las densidades espectrales de potencia. Cada estación obtiene los datos para las orientaciones E, N y Z. Estos datos los guardamos en el mismo directorio en el que hemos guardado las ventanas de tiempo en los que no se producen terremotos significativos (C:\SeismicNoise\Datos). Para cada estación se tienen tres carpetas, una para cada una de las componentes (orientaciones), con los siguientes nombres:

1. BHE.D

2. BHN.D

3. BHZ.D

Dentro de cada carpeta se encuentran los datos obtenido por la estación de banda ancha seleccionada. Estos datos se encuentran divididos en días, es decir, para cada componente y para cada día del año hay un archivo con el nombre "WM.MELI..BHE.D.2000.001". Este nombre de archivo que se ha puesto como ejemplo corresponde a la estación MELI y la orientación E del primer día del año 2000.

Comenzamos esta función leyendo los datos obtenidos por la estación y guardándolos en memoria. Para ello, se almacenan todos los archivos que contiene la carpeta de la orientación que se va a calcular el psd.

```
archivos= dir(fullfile(pathe_entrada,
'WM.MELI..BHE.D.2000.*'))
```

Una vez que se tiene los archivos de datos, se ejecuta la función "frecuencias", con la que se obtiene un vector con las frecuencias seleccionada (buscando una distribución adecuada por décadas) para las que se va a estimar la densidad espectral de potencia.

```
vectorf1=[1:0.1:10]
vectorf2=[10^(-1):0.009:0.99]
vectorf3=[10^(-2):0.0009:0.099]
vectorf4=[10^(-3):0.00009:0.0099]
vectorf5=[1/3600:(0.001-
(1/3600))/100:0.00099]
```

Se concatenan todos los vectores para obtener las frecuencias en un solo vector:

```
vectorf=
horzcat(vectorf5,vectorf4,
vectorf3,vectorf2,vectorf1)
```

La longitud de las ventanas que se toman son de 3600 segundos (1 hora). Tras ello, se utiliza la función "ventanas", explicada en la sección anterior, para crear los intervalos de tiempo en los que no se producen terremotos significativos. En estos intervalos de tiempo, creados por la función "ventanas", se calculará la densidad espectral de potencia para las frecuencias obtenidas mediante la función "frecuencias".

A continuación, se calcula la densidad espectral (psd) mediante, la función contenida en Matlab, "pwelch", en los intervalos de tiempo en los que no se producen terremotos significativos en la zona de la estación donde vamos a calcular el ruido sísmico y en las frecuencias indicadas. Antes de introducir los datos que tenemos en la función "pwelch" debemos eliminar el valor medio o tendencia lineal de dichos datos, normalmente debido a efectos electrónicos. Además, estos datos son registrados por un determinado instrumento (sensor, digitizador y filtros), por lo tanto, también debemos realizar una corrección instrumental mediante la respuesta del sistema de la estación, esta respuesta del sistema variará dependiendo de la estación. Cada día se dividirá en cuatro intervalos de 6 horas cada uno ellos, ya que es necesario para el estudio del ruido sísmico en los distintos tramos horarios del día.

En primer lugar, se almacenan en memoria los datos de los ficheros de la estación de banda ancha, que son obtenidos dentro de los intervalos de tiempo en los que no se producen terremotos significativos.

Para cada día del año, se abre el fichero correspondiente y se obtienen los datos que estén dentro de los intervalos de tiempo, los cuales no se producen terremotos significativos, guardándolos en la matriz "matrizperiodo". Ya que se ha dividido cada día en cuatro tramos horarios, los datos, obtenidos por la estación de banda ancha en los intervalos de tiempo creados por la función "ventanas", serán guardados en el vector correspondiente al tramo horario, por ejemplo, en el intervalo de tiempo 0h-6h se guardarán en el vector "matrizperiodo1". En el caso de que un día o tramo horario completo haya sido eliminado por producirse un terremoto, el vector correspondiente a dicho tramo será rellenado con ceros. De esta forma, se tienen todos los intervalos de seis horas de cada día del año.

Una vez obtenido los datos de un tramo horario, se procederá al cálculo de la densidad espectral de potencia. Se comenzará eliminando la media yla tendencia del vector "matrizperiodo" utilizando la función contenida en Matlab "dtrend"

```
datos=dtrend(matrizperiodo,1)
```

Tras eliminar la tendencia lineal del vector de datos, se realizará el cálculo de la densidad espectral de potencia en las frecuencias deseadas. Se utilizará el método de Welch , cuya función en Matlab es "pwelch"

```
pwelch(datos,window,noverlap,vectorf)
```

El primer valor que se debe incluir dentro de la función "pwelch" es el vector de la señal, que contiene los datos obtenidos por la estación de banda ancha en los intervalos de tiempo en los que no se producen terremotos significativos y con la tendencia lineal ya eliminada. Tras ello se introduce la longitud de la ventana para que se divida la señal en secciones de longitud igual a la ventana indicada. En este trabajo se toma una longitud de 3600 segundos. Seguido de la longitud de las ventanas, se introduce el solapamiento de las ventanas. Este valor debe ser menor que la longitud de las ventanas, por defecto, se toma un solapamiento del 50% de la longitud de la ventana. En este caso se ha tomado este solapamiento del 50%.

A continuación, hay que realizar una corrección instrumental, eliminando los errores que introduce la estación en los datos de la señal a la que se le va a calcular la densidad espectral de potencia. Para ello, se debe conocer la respuesta del sistema de la estación seleccionada. Esta respuesta variará dependiendo de cuál sea la estación de la que se va a obtener la señal para calcular la densidad espectral de potencia. Para el caso de la estación MELI, la respuesta del sistema será:

Sensor: Volt/ m/s (salida voltios, entrada movimiento del suelo m/s)

Ceros:
`z1=z2=0` (doble cero en el origen)

Polos:
```
p1=-3.7004*10^(-2) -
j*3.7016*10^(-2)
p2=-3.7004*10^(-2) + j*3.7016*10^(-2)
p3=-2.5133*10^2 + j*0
p4=-1.3104*10^2 + j*4.6729*10^2
p5=-1.3104*10^2 - j*4.6729*10^2
```

Factor de normalización
`Ao= 6.0077*10^7`

Ganancia:
`G=1500`

Factor conversion:
`Gd=4.2363*10^5`

El procedimiento para obtener la respuesta total del sistema en aceleración es el siguiente:

```
F=Ao*G*Gd*(s.^3)./((s-p1).*(s-p2).*(s-
p3).*(s-p4).*(s-p5))
```

siendo "s":

```
s=2*pi*j*(vectorf)
```

donde "vectorf" es vector de las frecuencias a las que vamos a evaluarlas. Al tener la respuesta total del sistema "F", se dividen las densidades espectrales obtenidas mediante la función "pwelch" por el módulo de "F" al cuadrado, para que el resultado sea en ($m^2/s^4/hz$).

Una vez obtenido las densidades espectrales con la corrección instrumental, serán guardadas dichas densidades en un archivo Excel con el nombre "psd.xlsx".

```
xlswrite([pathe_salida 'psd.xlsx'],
[dia,tramo_horario,pxx],'Hoja1',   fila);
```

Este procedimiento se realiza para cada uno de los cuatro tramos horarios y para cada día del año. Se obtiene así una matriz, cuya primera columna contiene el día del año en juliano, la segunda columna es el tramo horario y el resto de las columnas contienen las densidades espectrales de potencia en las frecuencias indicadas. Para evitar problemas de memoria, una vez que se guardan los datos en el archivo Excel, se borran de la memoria.

REPRESENTACIÓN GRÁFICA.

Tras el cálculo de las densidades espectrales de potencia a las frecuencias indicadas y la corrección instrumental, se realizará representaciones gráficas de las variaciones del ruido sísmico. De esta forma se podrá realizar un estudio para los diferentes tramos horarios de seis horas y en las distintas estaciones del año para cada orientación E, Z y N.

Para la representación gráfica del ruido sísmico, se comienza leyendo el fichero Excel que contiene la matriz de las densidades espectrales ordenadas según el día del año y tramo horario. En cuanto a las estaciones anuales, se clarificarán de la siguiente forma:

1. Invierno: día 1 a día 90
2. Primavera: día 91 a día 180
3. Verano: día 181 a día 270
4. Otoño: día 271 a día 365

Una vez abierto el archivo que contiene las densidades espectrales, se indica el intervalo del año en el que se va a realizar la representación gráfica mediante las variables "inicio"

y “final”. Podrá ser el año completo, una estación completa o cualquier otro intervalo de tiempo. Al tener las densidades espectrales del intervalo deseado, se calculará un vector de las densidades mínimas a cada frecuencia, lo mismo para las densidades máximas con las funciones “min” y “max” respectivamente. A continuación, se representas estos datos en diagrama semilogarítmico. Tras ello, se estimará el valor medio de las densidades a cada frecuencia mediante la función “mean”, también se puede calcular la mediana con “median”. Una vez que se tiene el vector de las medias para cada frecuencia, se representará del mimo modo que se hace para los vectores de mínimos y máximos. Además, junto a las gráficas delas densidades máximas, mínimas y medias, se representa las curvas del modelo de Peterson.

A continuación, se muestran las representaciones gráficas del ruido sísmico para la componente E. En la Figura 1 se representa el ruido sísmico de la estación MELI durante todo el año 2000 para cada tramo horario de seis horas. Se puede observar que el mayor ruido sísmico se produce en el intervalo de tiempo de 6 horas a 12 horas y el menor ruido en el tramo horario de 0 horas a 6 horas. En el resto de las gráficas se representan las variaciones diurnas y estacionales.

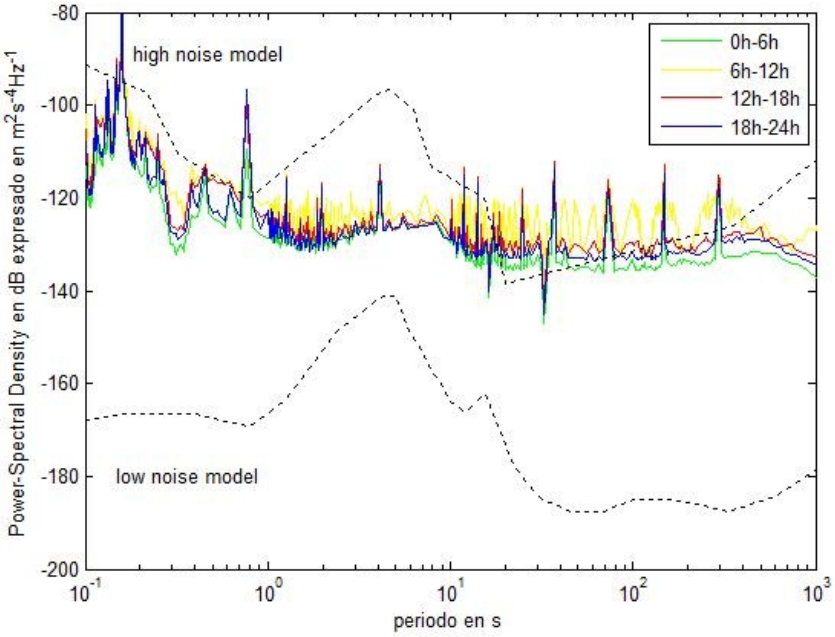

Figura 1. *Ruido sísmico. MELI 2000. Orientación E.*

La figuras 2, 3 y 4 muestran las variaciones diurnas en invierno primavera y verano. No se realiza la variación diurna para otoño debido a la ausencia de los datos de la estación MELI para dicho intervalo de tiempo.

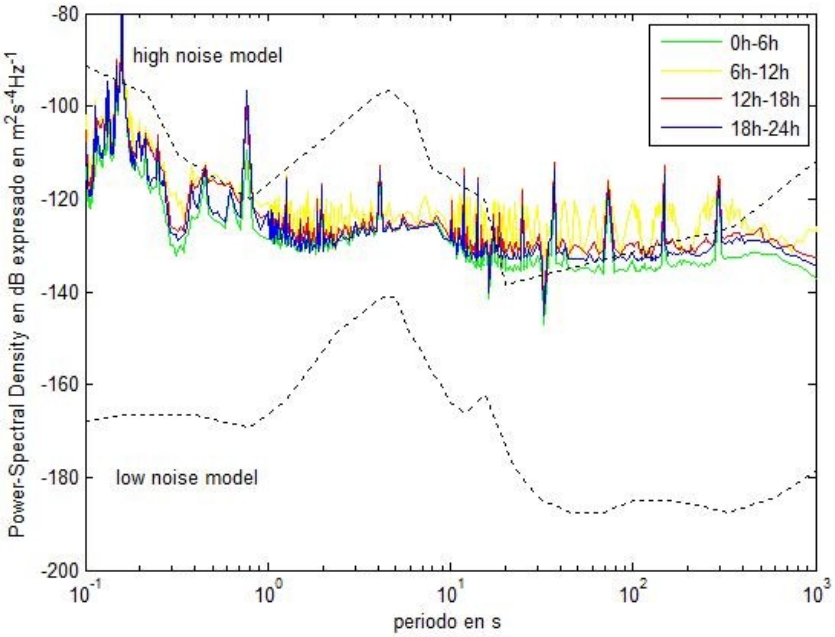

Figura 2. Variación diurna. Invierno. Orientación E

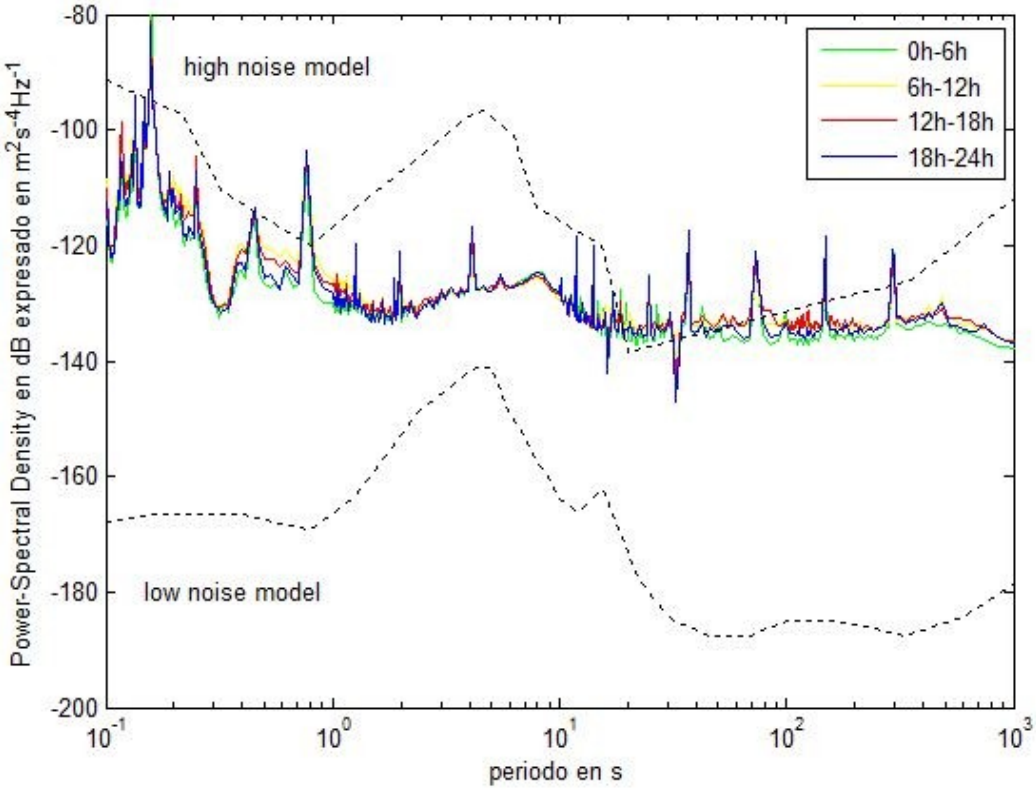

Figura 3. Variación diurna. Primavera

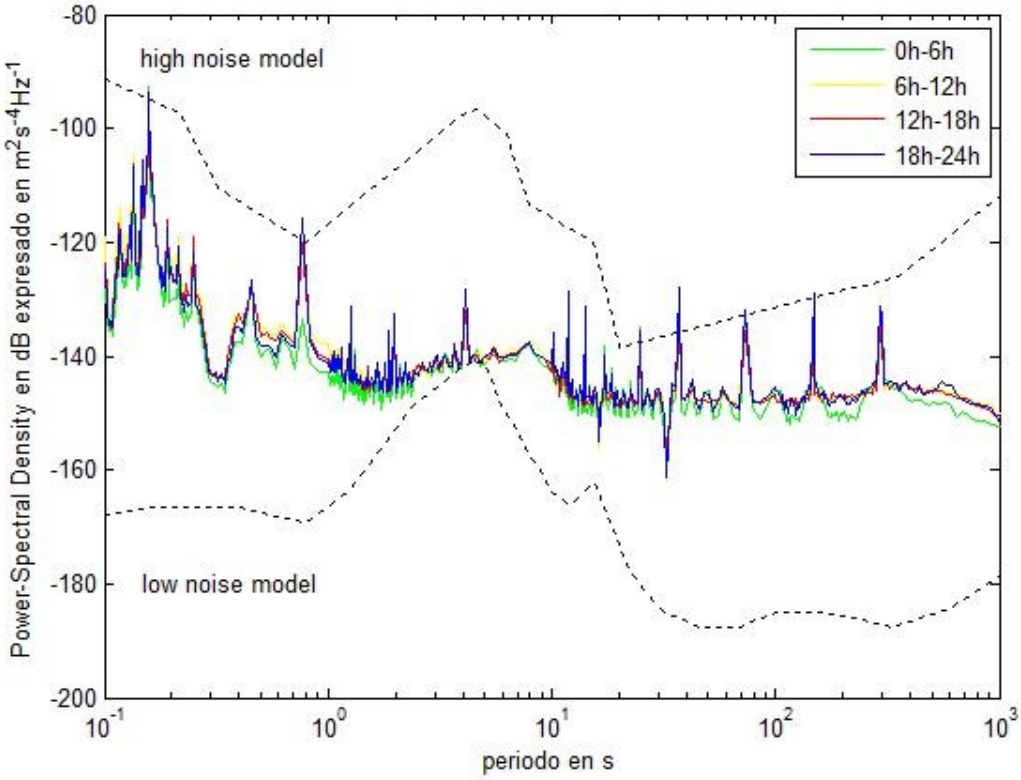

Figura 4. Variación diurna. Verano. Orientación E.

En las figuras 5, 6, 7 y 8 se observan las variaciones estacionales para invierno, primavera y verano en los distintos tramos horarios en los que se ha dividido cada día. Se observa que en invierno existe un mayor ruido sísmico que para el resto de las estaciones representadas.

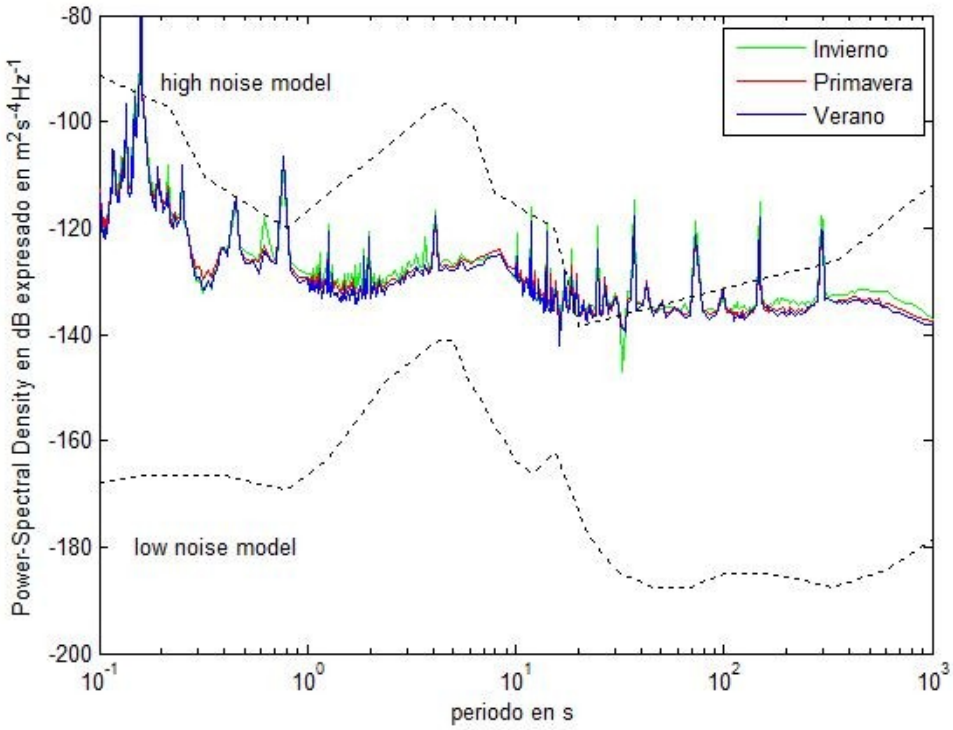

Figura 5. Variación estacional. 0h-6h. Orientación E.

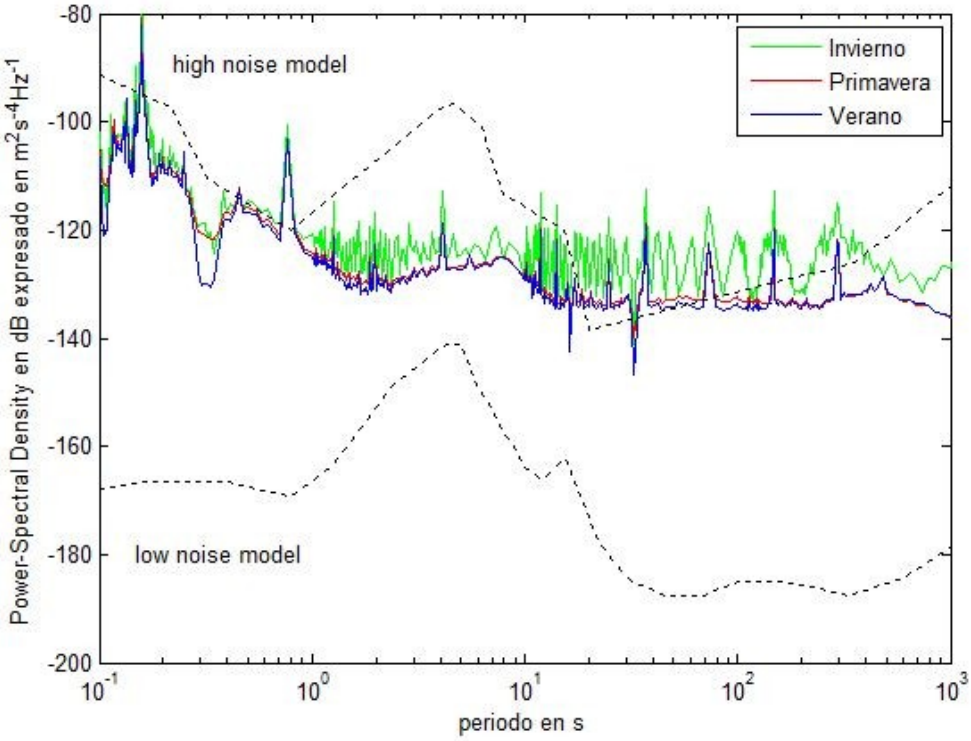

Figura 6. Variación estacional. 6h-12h. Orientación E.

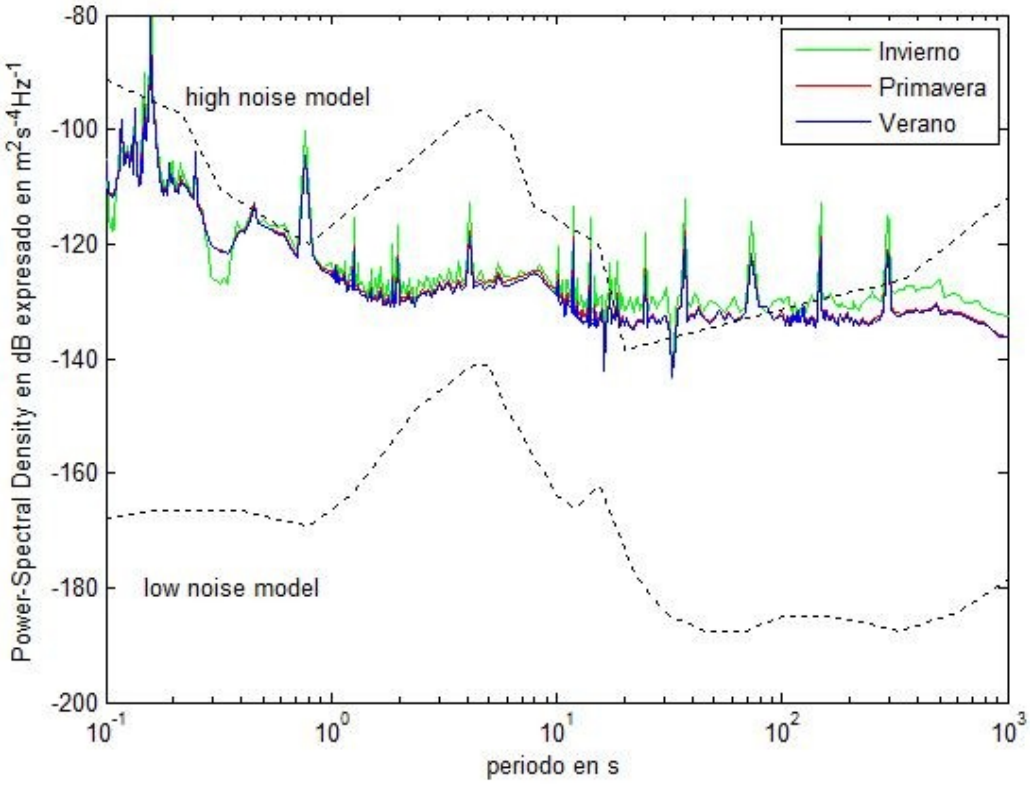

Figura 7. Variación estacional. 12h-18h. Orientación E.

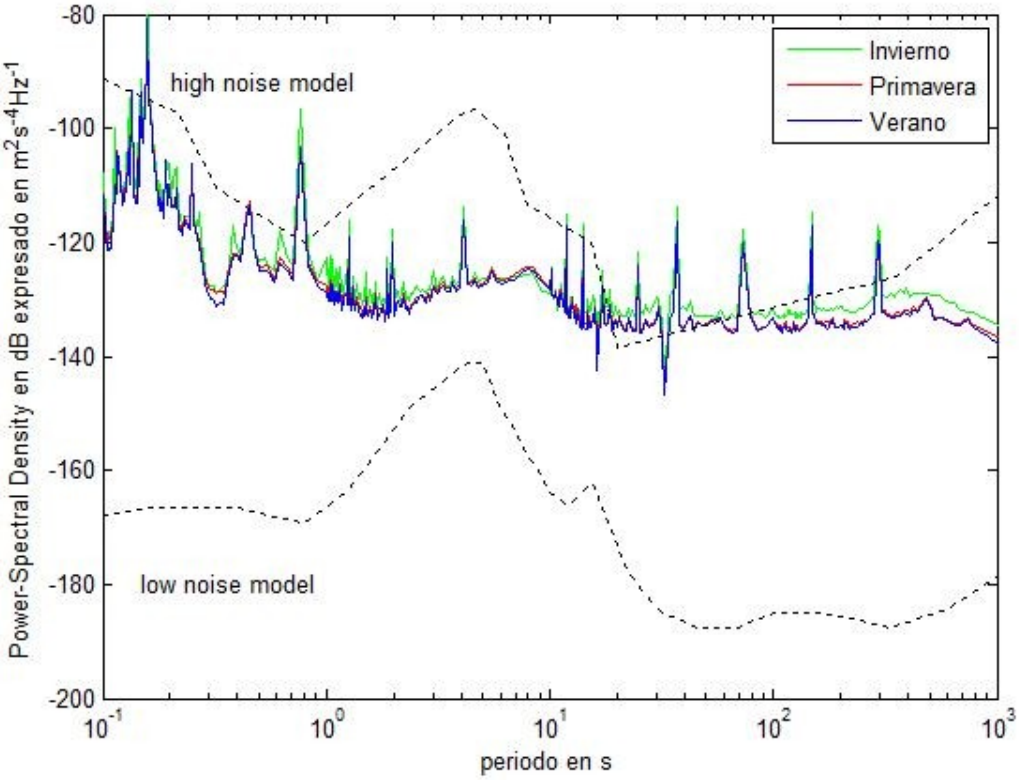

Figura 8. Variación estacional. 18h-24h. Orientación E.

AGRADECIMIENTOS.

Se agradece al equipo de la Sección de Geofísica del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando (Cádiz), por el gran apoyo recibido y por la motivación para llevar a cabo este trabajo.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos de investigación ALERTES (Sistema de Alerta Sísmica Temprana: aplicación al sur de España) (CGL2010-19803-C03-03) y ALERTES-RIM (Sistema de Alerta Sísmica Temprana: Sistema regional y onsite para la región Ibero-Mogrebí)(CGL2013-45724-C03-03-R).

REFERENCIAS.

Fichtner, A. Study of Seismic Noise. Recorded at the Broadband Station MELI in the Year 2000. Real Instituto y Observatorio de la Armada, San Fernando (Cádiz), 2005.

CESCA, S. Guía al análisis del ruido sísmico en estaciones de banda ancha. Department of Physics of the Earth, Astronomy and Astrophysics, Universidad Complutense de Madrid.

MATLAB. http://es.mathworks.com

Instituto Geográfico Nacional, http://www.ign.es/ign/main/index.do

CSEM, http://www.emsc-csem.org/

PUBLICACIONES DE DEFENSA

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE DEFENSA
SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA
SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PUBLICACIONES Y PATRIMONIO CULTURAL