

# Monitoreo sísmico en tiempo real para la alerta temprana, el caso de SeiscomP

Jhon Leandro Pérez

Posgrado, División de Ciencias de la Tierra, CICESE

jhonper@cicese.edu.mx

leandro.perez.volcan@gmail.com

## Resumen

Los avances tecnológicos en la instrumentación sísmica, las telecomunicaciones y el software, ha permitido el desarrollo de los sistemas de monitoreo sísmico en tiempo real para la alerta sísmica temprana que, desde el punto de vista de la mitigación del riesgo, se han convertido en una herramienta práctica para reducir los impactos sobre la población producidos por terremotos de gran magnitud.

El presente trabajo de divulgación tiene como propósito mostrar algunos ejemplos del uso del software libre *SeiScomP* en algunos países de América Central, así como promover su implementación en otros países de Latinoamérica que aún no cuentan con esta interesante alternativa de monitoreo sísmico en tiempo real y emisión de alertas.

**Palabras clave:** Monitoreo sísmico en tiempo real; alerta sísmica temprana; *SeisComP*, América Central.

## Introducción

La responsabilidad de la vigilancia sísmica exige una combinación tecnológica altamente eficiente de software, hardware e instrumentación (sísmica, geodésica y mareográfica), que debe cubrir las zonas donde la experiencia y los estudios científicos las hayan identificado como zonas de alto riesgo sísmico. Particularmente, en cuanto a software se refiere, los sistemas de monitoreo sísmico en tiempo real consisten en un conjunto de métodos y procedimientos automáticos para el cálculo rápido de los parámetros básicos de un terremoto (localización, magnitud y tiempo de origen), basándose en estimaciones hechas a pocos segundos de la llegada de la onda P al sitio de interés. De esta manera, se puede estimar en tiempo corto las características del movimiento del terreno (aceleración, velocidad o desplazamiento).

El tratamiento automatizado de los datos sísmicos en tiempo real está siendo cada vez más demandado por la comunidad científica, los algoritmos para las detecciones y procesamiento

de datos tratan de reflejar la experiencia sensorial humana en lo que respecta al reconocimiento de patrones de un sismograma, por ejemplo, lecturas de los arribos de la onda P, S y amplitudes (Kuperkoch et al., 2011; Zhang et al., 2016). Un ejemplo de esto, es el software *SeiScomP*, el cual incluye herramientas adecuadas para la adquisición de los datos (SeedLink), módulos para el procesamiento en tiempo real (detección, localización, estimación de magnitudes, etc.) y una interfaz gráfica para analizar, revisar y realizar postprocesamiento de los eventos sísmicos, tales como relocalizaciones, recalcular magnitudes, inspección del estado de las estaciones sísmicas involucradas en las detecciones, errores en distancia, de azimut, tiempo de viaje, etc. El uso de *SeisComP* poco a poco se ha incrementado a nivel mundial como una interesante alternativa de monitoreo sísmico en tiempo real y en Latinoamérica, América Central es pionera en la implementación de este sistema.

## Alerta Sísmica Temprana

A medida que avanza la urbanización en todo el mundo, los terremotos representan una amenaza creciente para la vida y la infraestructura, por esta razón, la alerta sísmica temprana es una herramienta práctica para reducir los efectos causados por terremotos destructivos (Kanamori et al., 1997; Teng et al., 1997; Wu y Teng, 2002; Allen y Kanamori, 2003; Kanamori, 2007; Iervolino et al., 2007; Zhang et al., 2016).

La primera idea de la alerta sísmica temprana fue propuesta en 1968 en San Francisco, California, por Cooper (Nakamura, 2007). Cien años más tarde, “The Japan Railways Company” en 1965 diseñó el primer Sistema de Alarma de Detección Urgente de Terremotos (UrEDAS, por sus siglas en inglés) que comenzó a funcionar en 1966 para el sistema de ferrocarriles japonés (Nakamura, 2007). En las dos últimas décadas, se han hecho importantes progresos en la aplicación de Sistemas de Alerta Sísmica Temprana (SAST) en otras regiones como como China (Taiwán), Ciudad de México, sur de California, Turquía, Italia y Rumanía (Espinosa et al., 1995; Odaka et al., 2003; Allen y Kanamori, 2003; Wu y Teng, 2002; Wu y Zhao, 2006; Zollo et al., 2006; Böse et al., 2007; Chen et al., 2015; Picozzi et al., 2015; Zhang et al., 2016).

La efectividad de los SAST para reducir el riesgo ante terremotos destructivos ha sido demostrada en países como Japón y México. En el primer caso, más de 1,000 estaciones están distribuidas en todo el país, proporcionando datos básicos en tiempo real para el SAST. Tanto los sismos en tierra como fuera de la costa son detectados y las alertas se emiten si el máximo de intensidad sísmica es del orden de VII en Mercalli modificada (IMM) (Osamu et al., 2009; Doi, 2011, Zhang et al., 2016). Dependiendo de su ubicación, las personas tendrán en cualquier lugar desde pocos a decenas de segundos para reaccionar. Por ejemplo, de acuerdo a un informe de la Agencia Meteorológica de Japón (JMA, por

sus siglas en inglés), para el terremoto de Tohoku 9.0Mw en 2011 (Hoshiba et al., 2011; Hoshiba y Ozaki, 2013), el SAST emitió una alerta de más de 15 segundos antes del comienzo del movimiento fuerte del suelo en el distrito de Tohoku, que estaba relativamente cerca del epicentro (Zhang et al., 2016). En el caso de México, la alerta sísmica temprana es transmitida 60 segundos antes de que las ondas destructivas lleguen a ciudad de México. Estas ondas de movimiento fuerte son detectadas por más de 20 estaciones sísmicas ubicadas a lo largo de la costa de Guerrero (Suárez et al., 2009).

Otro ejemplo en Latinoamérica, aunque por el momento en escala menor a los SAST mencionados, es el caso de América Central (con excepción de Belice) donde hace varios años las redes sísmicas de esta región vienen implementado el software *SeisComP* para la detección automática, localización y reporte rápido de eventos (todo en tiempo real), con muy buenos resultados para las instituciones de Defensa Civil y los observatorios sísmicos como se verá posteriormente.

## SeisComP

*SeisComP* (<https://www.seiscomp3.org>) es un software sismológico de adquisición de datos, procesamiento, distribución y análisis interactivo de uso libre (existe también una versión comercial) que está programado en C++ y Python. Fue desarrollado hace más de 10 años por la Red Sísmica Global de Alemania (GEOFON, por sus siglas en alemán) y por el Centro Alemán de investigaciones Geocientíficas (GFZ, por sus siglas en alemán). Después del desastroso tsunami del Océano Índico en 2004, el cual se asoció con un sismo de 9.3Mw, inició el proyecto alemán de Alerta Temprana de Tsunami para el Océano Índico (GITWS, por sus siglas en alemán), donde se implementó un novedoso diseño de *SeisComP* para cumplir los requisitos de los centros de SAST para el monitoreo 24/7. Como resultado de los cambios surgió un software altamente

profesional llamado SeiComp3. Desde el 2008 hasta la fecha, *SeisComp* sigue mejorándose por GEOFON, GFZ, la compañía alemana Gempa (<http://www.gempa.de>) y la comunidad de usuarios (Geofon-Gfz, 2016).

En los últimos cinco años diversos observatorios en todo el mundo han instalado *SeisComp* para realizar monitoreo en tiempo real debido a sus ventajas con respecto a otros sistemas. Por ejemplo, Earthworm, EarlyBird y Antilope (Pesaresi, 2011; Olivieri y Clinton, 2012). Algunas de sus características son: adquisición, distribución, control de calidad de los datos, generación de formas de onda, intercambio de datos en tiempo real, inspección del estado de la red sísmica, detección automática de eventos y localización (de manera rápida y precisa), emisión de alertas, fácil acceso a la correspondiente información sobre las estaciones sísmológicas locales y mundiales, además de reportes de eventos recientes (Ethz, 2016; Behr et al., 2016).

El procesamiento que realiza *SeisComp* a los datos sísmicos inicia a partir de la entrada continua de formas de onda (adquisición con seedlink), luego se calcula automáticamente la relación promedio de la duración corta respecto a la duración larga de la señal, que es un algoritmo de detección comúnmente conocido como STA/LTA (Allen, 1978 y 1982). Este algoritmo se “dispara” cuando dicha relación de las señales registradas supera un umbral establecido (por ejemplo, STA/LTA = 2.0) para poder detectar automáticamente los arribos de la onda P, luego el algoritmo AIC-Picker (Leonard y Kennett, 1999) realiza las lecturas de estos arribos mediante el módulo *scautopick*. Para la localización de eventos se involucran los tiempos de viaje de la onda P, que pueden ser de un modelo local, regional o mundial como el de laspei91 (Kennett y Engdahl, 1991). Estos tiempos de viaje encuentran en el programa LOCSAT de *SeisComp* y funciona por medio del módulo *scautoloc* siguiendo los criterios señalados por Bratt y Bache (1988) para localizaciones de eventos con redes regionales y dispersas. El

módulo *scamp* determina las amplitudes para que el módulo *scmag* realice el cálculo de los diferentes tipos de magnitudes: MI, Ms, Mb y Mw (derivadas del modelo mB, ver en Bormann y Saul, 2008). Finalmente la selección de la mejor solución de localización del evento depende de la mayor cantidad de lecturas de P usadas, un RMS coherente, los errores en distancia, tiempo de viaje, etc. Luego, el módulo *scevent* reporta esta información y la envía a la base de datos de *SeisComp* (por ejemplo, MySQL). La Figura 1 muestra un esquema general del procedimiento llevado por *SeisComp*.

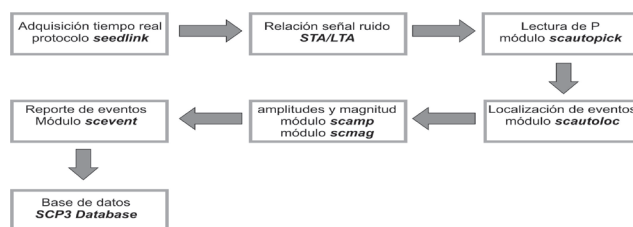


Figura 1. Esquema simplificado del tratamiento y procesamiento de datos en *SeisComp*.

De acuerdo con Gempa (2016), los propósitos para la alerta temprana hicieron necesario adoptar en el diseño y la arquitectura de *SeisComp* requisitos como:

- Implementación de las funciones críticas mediante módulos independientes para garantizar la independencia de otras funciones (por ejemplo, realizar lecturas de fases, calcular magnitudes, realizar un análisis interactivo en pre y post proceso, etc.).
- Facilidad de implementación de módulos personalizados.
- Independencia de hardware y software.
- Capacidad de intercambio de datos entre diferentes sistemas automáticos en tiempo real.
- Distribución de módulos en varios sistemas.
- Un sistema robusto de soluciones rápidas y fiables, especialmente durante las alertas sísmicas.

El algoritmo “Virtual Seismologist-VS” (Cua, 2005; Cua y Heaton; 2007; Cua et al., 2009) para la alerta sísmica temprana, el cual fue implementado en California desde 2008, ahora está integrado en SeisComp con nuevos módulos (Behr et al., 2016). Los esquemas simplificados de funcionamiento de *SeisComp* en ambas modalidades, es decir, monitoreo en tiempo real y en alerta temprana (VS-SC) se muestran en la Figura 2.

El funcionamiento de VS-SC es el mismo que *SeisComp*, salvo por los nuevos módulos con fines de alerta sísmica temprana. En este caso, *scvsmag* permite el cálculo y actualización continua de magnitudes en tiempo real donde las alertas son emitidas y actualizadas por *scvsmaglog*; el módulo específico de procesamiento de SV-SC3 es *scvelope*, el cual permite tener acceso a formas de onda de diferentes fuentes en una interface común. El análisis y revisión del procesamiento en ambas modalidades se puede hacer en *scolv*, que es una herramienta interactiva (GUIs) de *SesiComp3*. La explicación amplia del funcionamiento de VS-SC3, así como su capacidad demostrada se puede consultar en Behr et al. (2016).

### SeisComp en América Central

En América Central se ha instalado *SeisComp* en el Instituto de Geociencias de la Universidad Panamá (IGC-UPA), la Red Sismológica de la Universidad de Costa Rica (RSN-UCR), en el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), en la Comisión Permanente de Contingencias de Honduras (COPECO), en el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Salvador (MARN) y en el Instituto de Sismología y Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH; Figura 3).

En Nicaragua, *SeisComp* es una de las bases de trabajo de la Red Sísmica Nacional (RSN) administrada por el INETER, así como del Centro Nacional de Alerta Tsunami (CNAT) y del Centro Regional de Asesoramiento de Tsunamis en América Central (CATAC). En estas instituciones la adquisición y procesamiento automático de datos se realiza con *SeisComp*, permitiendo el envío de información oportuna a quienes toman decisiones, la generación de información a la población, el intercambio de datos sísmicos en tiempo real con observatorios homólogos de América Central y otros países (Strauch et al., 2016; Martínez et al., 2016).

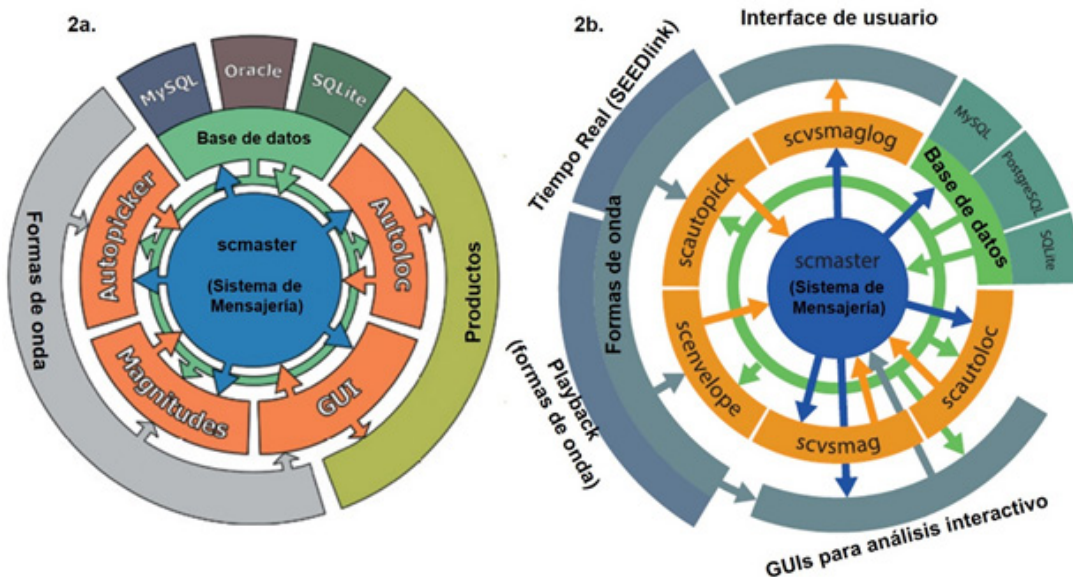


Figura 2. Funcionamiento de SeisComp3. 4a) modo normal y 4b) modo VS-SC3 (modificado de Seiscomp.org y Behr et al., 2016).



Figura 3. Distribución de instalaciones de SeisComP en Centroamérica. Los puntos en amarillo corresponden a los sitios donde ha sido implementado SeisComP. La instalación del sistema ha sido realizada por la compañía OSOP en casi todos los países de América Central y México (UNAM), con excepción de Nicaragua donde fue el INETER quien lo instaló (esta imagen es cortesía del Dr. Wilfried Strauch).

En Panamá, la compañía Observatorio Sísmico del Occidente de Panamá (OSOP), realizó una comparación entre localizaciones obtenidas manualmente en SEISAN con las obtenidas automáticamente de *SeisComP* para 161 eventos de diversas magnitudes (Pérez, 2014a). Los resultados mostraron la fiabilidad de las localizaciones del sistema automático respecto al manual, donde la mayoría de éstas presentan diferencias de localización de hasta +/- 5 km (en latitud y longitud). Comparando las lecturas de P automáticos con los manuales, la diferencia de éstos, en promedio, es de 0.06 segundos, valor que no supera la tolerancia de 0.2 segundos como lo sugiere Baer y Kradolfer (1987) para validar un buen “picker”. Las magnitudes locales (MI) calculadas de modo manual y automático de los eventos detectados, poseen una correlación del 87% y las diferencias entre las magnitudes de uno y otro modo de procesamiento se encuentran en el rango de 0 a 0.4 unidades (Pérez, 2014a). OSOP también realizó la integración de SeisComP con ShakeMap para el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) de Panamá (Pérez,

2014b), con el fin de que esta institución gubernamental pueda conocer en primera instancia, la localización acertada de los eventos y luego identificar las zonas de mayor afectación mediante mapas de intensidad instrumental, lo cual permite optimizar las tareas de búsqueda y rescate en caso de un sismo destructivo (Figura 4).

Por otro lado, uno de los aspectos técnicamente importantes para el buen funcionamiento de cualquier SMSTR, es la densidad de las redes sísmicas. En el caso de Panamá, a partir de 2012 su red fue robustecida con más de 50 equipos de periodo corto (llamados Darien) fabricados por OSOP que complementaron la red de banda ancha del IGC-UPA compuesta por 10 estaciones sísmicas distribuidas a lo largo del territorio (~700 km; Figura 5). Después de 2012, cuando se realizó la instalación de equipos que fueron integrados al *SeisComP*, los buenos resultados en los últimos años no se hicieron esperar, como demuestra el importante incremento en la detección de eventos (Figura 6 y 7).

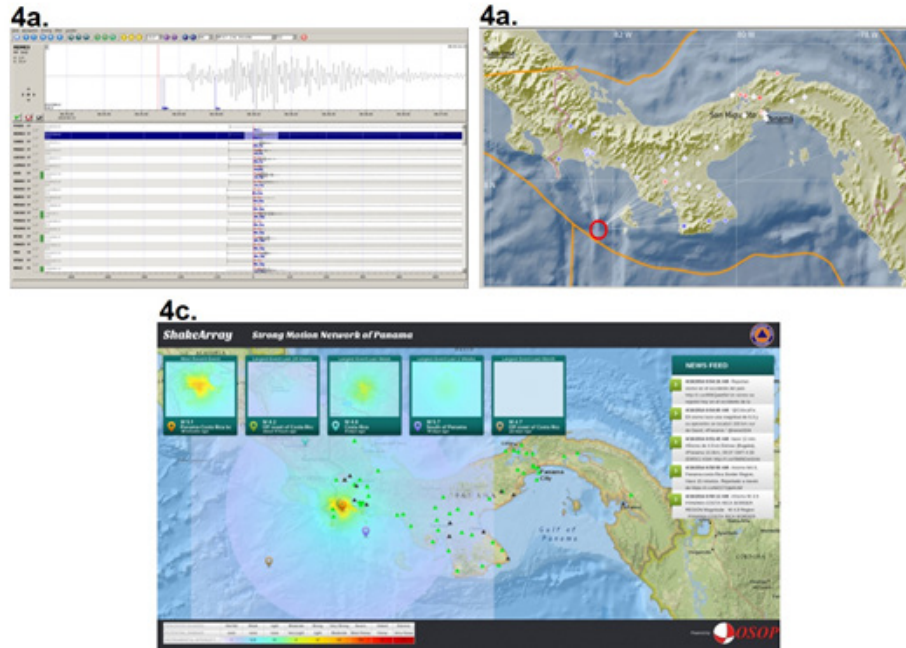


Figura 4. Registro, localización y reporte del sismo de mayo 13 de 2014 con magnitud 6.8Mw en la provincia de Chiriquí, Panamá. a) Registro del sismo, b) localización del evento (los puntos de colores corresponden a las estaciones sísmicas), y c) shakmap del evento reportado por SINAPROC a partir de los parámetros estimados por SeisComp del IGC-UPA (modificado de Pérez, 2014b).

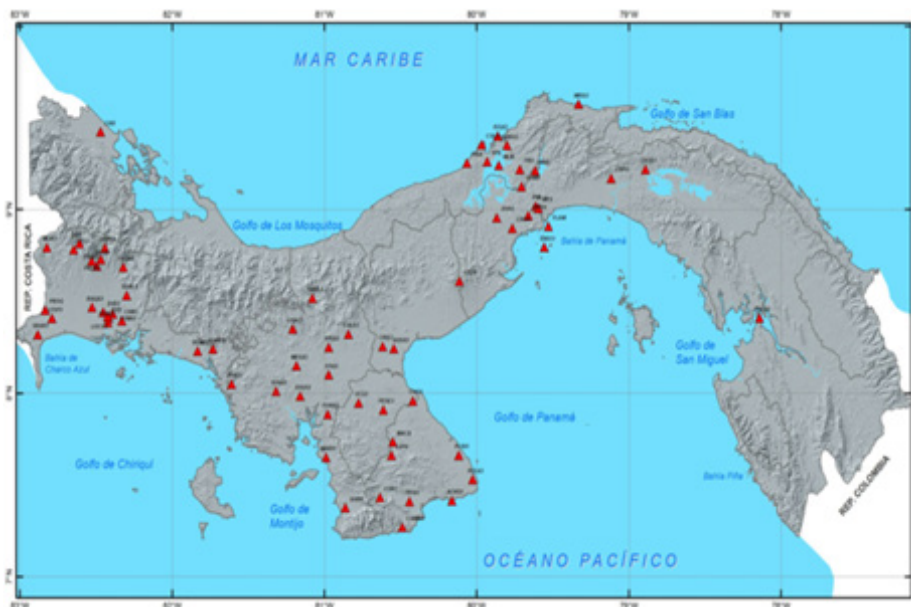


Figura 5. Distribución de estaciones sísmicas en Panamá hasta el año 2014.

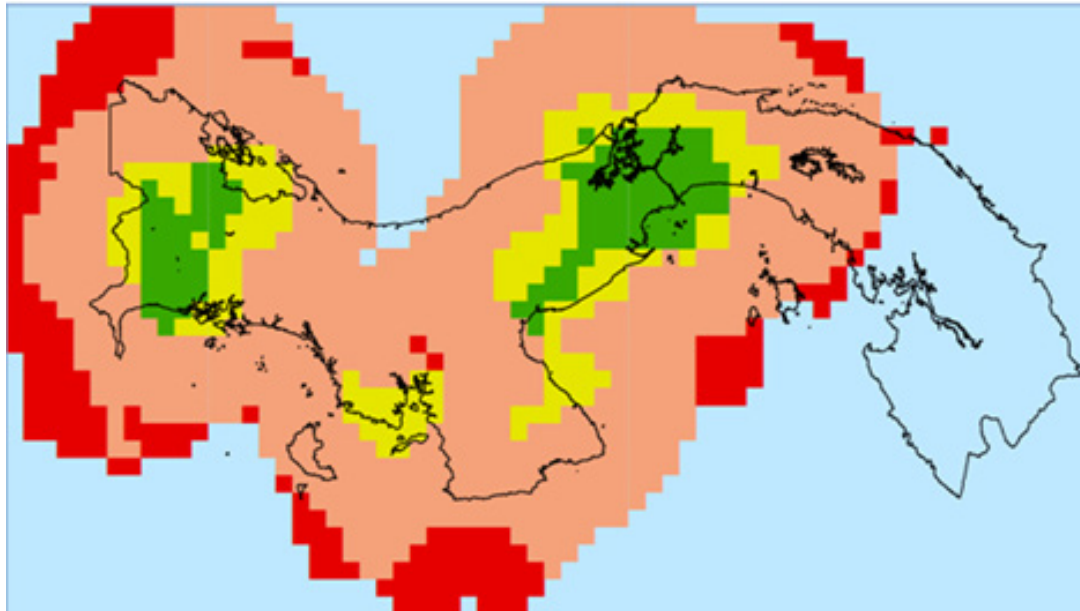


Figura 6. El color verde corresponde a la densidad de detección de eventos sísmicos en Panamá antes del año 2012 (imagen por cortesía del Dr. Wilfried Strauch).

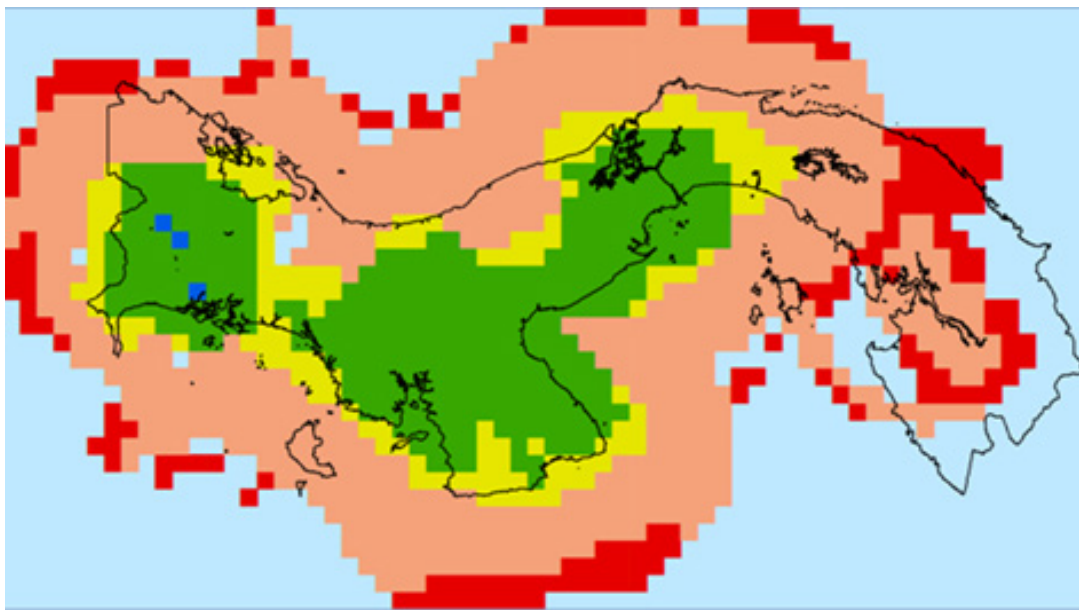


Figura 7. Incremento de las detecciones de eventos sísmicos después del año 2012 (imagen por cortesía del Dr. Wilfried Strauch).

Un caso que no es propio de América Central pero que vale la pena mencionar, es el de la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM), donde en el primer cuatrimestre de 2015 se realizó una instalación piloto que a la fecha sigue en periodo de prueba ya que se están realizando mejoras para configurar el sistema a las condiciones sismotectónicas locales. Una de ellas, por ejemplo, es integrar dos modelos de velocidad local para Baja California, uno para el macizo rocoso peninsular (Nava y Brune, 1982) y otro para el valle de Mexicali (McMechan y Mooney, 1980), con lo que se mejorarán las localizaciones de los eventos, sustituyendo el modelo global laspei91. Otro aspecto importante del funcionamiento de SeisComP en RESNOM, fue corroborar que para un conjunto de eventos con los que se realizaron pruebas fueron detectados en menor tiempo respecto al Jiggle (<http://pasadena.wr.usgs.gov/jiggle/>) que es el sistema de procesamiento en tiempo real, que por ahora es el principal en esta red (Wong et al., 2015).

### **Conclusiones**

La vigilancia sísmica exige sistemas de procesamiento sísmológico altamente eficientes y una red combinada de equipos sísmicos (de periodo corto y banda ancha), geodésicos y mareográficos (si es el caso), que cubran principalmente las zonas donde estudios científicos las hayan identificado como sismogénicas. Por lo tanto, desde el punto de vista instrumental, es importante para la alerta sísmica temprana contar con una red densa de equipos de monitoreo ubicados preferiblemente en las áreas que sean susceptibles de experimentar movimientos fuertes del terreno, aunque también deben tenerse en cuenta los eventos de tamaño moderado por desconocerse la historia sísmica en tiempos remotos.

SeisComP debería implementarse de manera amplia en los observatorios sísmológicos de Latinoamérica, por dos razones básicas: la primera porque al ser de libre acceso resulta favorable para estas instituciones, ya que no habría necesidad de invertir en desarrollar o comprar un software para monitoreo en tiempo real y/o para la alerta temprana; más bien, podría orientarse la inversión para la adquisición de nuevos equipos para densificar las redes en operación. La segunda razón es por su calidad tecnológica, descrita de manera general en este trabajo. Es importante tener en cuenta que SeisComP se orienta a la defensa civil y/o a la alerta sísmica temprana, por lo tanto, el uso de una u otra modalidad, depende de las necesidades, misión y visión de las instituciones geofísicas.

### **Agradecimientos**

Sinceros agradecimientos a la compañía Observatorio Sísmico del Occidente de Panamá (OSOP), por compartir sus conocimientos sobre SeisComP, al Dr. Wilfried Strauch del INETER, por compartir sus apreciaciones sobre la misión y visión de la Alerta Temprana Sísmica y de Tsunami en América Central. También sincero agradecimiento a un revisor anónimo por sus sugerencias técnicas y al Dr. Luis Delgado por su disponibilidad en el seguimiento de este escrito.

### **Referencias**

- Allen, R. (1978). Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol, 68, 1521-1532.
- Allen, R., Kanamori, H. (2003). The potential for earthquake early warning in Southern California. *Science*, Vol, 300, 786-789.
- Baer, M., Kradolfer, U. (1987). An automatic phase picker for local and teleseismic events, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol, 77, 1437-1445.



- Behr, Y., Clinton, J., Cauzzi, C., Hauksson, E., Jónsdóttir, K., Marius, C., Pinar, A., Salichon, J., Sokos, E. (2016). The virtual seismologist in the SeisComP3: A new implementation strategy for earthquake early warning algorithms. *Seism. Res. Lett.* Vol, 87(2A), 363-373.
- Bratt, S., Bache, T. (1988). Locating events with a sparse network of regional arrays, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol, 78, 780–798.
- Bormann, P., Saul, J. (2008). The new IASPEI standard broadband magnitude mB. *Seism. Res. Lett.* Vol, 79(5), 698–705.
- Böse, M., Ionescu, C., Wenzel, F. (2007). Earthquake early warning for Bucharest, Romania: Novel and revised scaling relations. *Geophys. Res. Lett.* 34, 6.
- Chen, D., Hsiao, N., Wu, Y. (2015). The earthworm based earthquake alarm reporting system in Taiwan, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 105, 568–579.
- Cua, G. B. (2005). Creating the Virtual Seismologist: Developments in Ground Motion Characterization and Seismic Early Warning, Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, 367.
- Cua, G., Heaton, T. (2007). The Virtual Seismologist (VS) method: A Bayesian approach to earthquake early warning, in *Earthquake Early Warning Systems*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 97-130.
- Cua, G., Fischer, M., Heaton, T., Wiemer, S. (2009). Real-time performance of the Virtual Seismologist earthquake early warning algorithm in southern California, *Seismol. Res. Lett.* Vol 80(5), 740-747.
- Di Stefano, R., Aldersons, F., Kissling, E., Baccheschi, P., Chiarabba, C., Giardini, D. (2006). Automatic seismic phase picking and consistent observation error assessment: application to the Italian seismicity. *Geophys*, 165, 121-134.
- Doi, K. (2011). The operation and performance of earthquake early warnings by the Japan Meteorological Agency, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 31, 119-126.
- Espinosa A., Jiménez, A., Ibarrola, G., Alcantar, F., Aguilar, A., Inostroza, M., Maldonado, S. (1995). Mexico City seismic alert system. *Seism. Res. Lett.* Vol, 66, 42-53.
- Ethz. (2016). <http://www.seismo.ethz.ch/research/groups/alrt/projects/seiscomp3/index>
- Geofon-Gfz. (2016). <http://geofon.gfz-potsdam.de/software/seiscomp/>
- Gempa. (2016). <http://www.gempa.de/products/seiscomp3/>
- Suárez, G., Novelo, D., Mansilla, E. (2009). Performance evaluation of the seismic alert system (SAS) in Mexico City: A seismological and a social perspective, *Seismol. Res. Lett.* 80, 707–716.
- Hoshiba, M., and T. Ozaki (2013). Earthquake early warning and tsunami warning of the Japan Meteorological Agency, and their performance in the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake (Mw 9.0), in *Early Warning for Geological disasters Scientific Methods and Current Practice*, J. Zschau and F.Wenzel (Editors), Springer, Berlin, Germany, 1-28.

- Hoshiba, M., Iwakiri, K., Hayashimoto, N., Shimoyama, T., Hirano, K., Yamada, Y., Ishigaki, Y., Kikuta, H. (2011). Outline of the 2011 Off the Pacific coast of Tohoku earthquake (Mw 9.0) earthquake early warning and observed seismic intensity, *Earth Planets Space* 63, 547-551.
- Iervolino I., Manfredi G., Cosenza E. (2007). Earthquake early warning and engineering application prospects. *Library of congress: Earthquake early warning systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 233-247.
- Kanamori, H., Hauksson, E., Heaton, T. (1997). Real-time seismology and earthquake hazard mitigation. *Nature*, 390, 461-464.
- Kanamori, H. (2007). Real-time earthquake damage mitigation measures. *Sesimological Laboratory, California Institute of Technology Pasadena, CA, USA*. *Library of congress: Earthquake early warning systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 249-281.
- Kennett, B., Engdahl, E. (1991). Travel for global earthquake location and phase identification. *Geophys*, 105, 429-465.
- Kuperkoch, L., Meier, T., Diehl, T. (2011). Automated Event and Phase Identification. Bormann, P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*, 52.
- Leonard, M., Kennett, B. (1999). Multi-component autoregressive techniques for the analysis of seismograms, *Phys. Earth Planet. Inter.* 113, 247–263.
- Martínez, E., Tenorio, V., Strauch, W., Ramírez, J. (2016). Primaras experiencias del Centro de Asesoramiento de Tsunami para América Central (CATAC) en el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). IASPEI, Asamblea Regional Comisión Latinoamericana y del Caribe de Sismología – LACSC, San José, Costa Rica. Resumen.
- McMechan, A., Mooney, D. (1980). Asymptotic ray theory and synthetic seismograms for laterally varying structures: theory and application to the Imperial Valley, California, *Bull. seism. Soc. Am.* Vol, 70, 2021-2035.
- Nava, A., Brune, J. (1982). An earthquake explosion reversed refraction line in the Peninsular Ranges of southern California and Baja California Norte. *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol, 63, 1689-1698.
- Nakamura, Y. (2007). UreDAS, the earthquake warning system: Today and tomorrow. *Library of congress: Earthquake early warning systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 249-281.
- Odaka, T., Ashiya, K., Tsukada, S., Sato, S., Ohtake, K., Nozaka, D. (2003). A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record. *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol, 93, 526-532.
- Osamu, K., Makoto, S., Keiji, D., Toshiyuki, M., Shin'ya, T., Kiyoshi, T., Toshihiro, S., Kouji, N., Masashi, K. Yukihiro, W., (2009). Earthquake early warning in Japan: Warning the general public and future prospects, *Seismol. Res. Lett.* 80, 717-726.
- Oliveri, M., Clinton J. (2012). An Almost Fair comparison between Earthworm and SeisComp3. *Electronic Seismologist*, Vol, 83. No. 4, 720-727.

- Pérez, J.L. (2014a). Comparación del sistema manual y automático para localizaciones de eventos sísmicos en la red sismológica de Panamá (OSOP), 25. URL: <http://www.osop.com.pa/wp-content/uploads/2014/03/Documento1.pdf>
- Pérez, J. L. (2014b). Implementación y afinación de ShakeMap para Latinoamérica, el caso de Panamá, (OSOP), 28. URL: <http://www.osop.com.pa/wp-content/uploads/2014/06/ShakeMap-Doc.pdf>
- Pesaresi, D. (2011). The EGU2010 SM1.3. Seismic centers data acquisition session: an introduction to Antelope, Earthworm and SeisComP, and their use around the World. *Annals of Geophysics*. Vol, 54(1), 7.
- Picozzi, M., Emolo, A., Martino, C., Zollo, A., Miranda, N., Verderame, G., Boxberger, T., the REAKEK Working Group (2015). Earthquake early warning system for schools: A feasibility study in southern Italy, *Seismol. Res. Lett.* 86, 397-411.
- Strauch, W., Acosta, A., García, F., Grillo, U., Mendoza, E., Morales, A., Ñamendi, D., Ramírez, J., Sang, W., Talavera, E., Tenorio, V. (2016). Status of the Nicaraguan Seismic Network. IASPEI, Asamblea Regional Comisión Latinoamericana y del Caribe de Sismología – LACSC, San José, Costa Rica. Resumen.
- Teng, T., Wu, Y., Shin, T., Tsai, Y., Lee, W., (1997). One minute after: strong-motion map, effective epicenter, and effective magnitude. *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol, 87, 1209-1219.
- Wong, V., López, A., Pérez, L. (2015). Implementación del sistema automático de monitoreo sísmico SeisComP. Reporte interno de RESNOM, 30.
- Wu, Y., Teng, T. (2002). A virtual sub-network approach to earthquake early warning. *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol, 92, 2008-2018.
- Wu, Y., Zhao, L. (2006). Magnitude estimation using the first three seconds P-wave amplitude in earthquake early warning. *Geophys. Res. Lett.* 33, L16312.
- Zollo, A., Lancieri, M., Nielsen, S. (2006). Earthquake magnitude estimation from peak amplitudes of very early seismic signals on strong motion records, *Geophys. Res. Lett.* 33, L23312.
- Zhang, H., Jin, X., Weu, Y., Li, J., Kang, L., Wang, S., Huang, L., Peiqing, Y. (2016). An Earthquake early warning system in Fujian, China. *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol, 106(2), 755-765.

Manuscrito recibido: 30 mayo de 2016

Recepción del manuscrito corregido: 22 de febrero de 2017

Manuscrito aceptado: 24 de febrero de 2017

