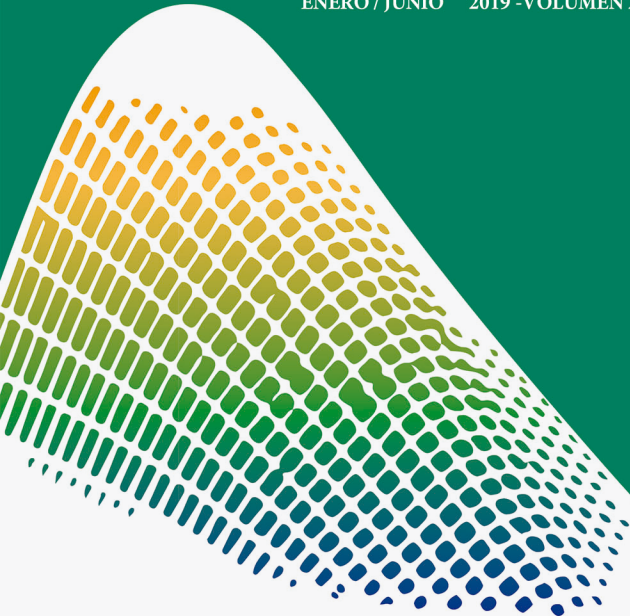


<http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria>
www.ucr.ac.cr / ISSN 1409-2441

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica

ENERO / JUNIO 2019 - VOLUMEN 29 (1)



Monitoreo Acelerográfico Secundario del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (MAS-LIS) y su potencial para usarlo como un sistema de alerta temprana para terremotos

Secondary Monitoring System of the Earthquake Engineering Laboratory (MAS-LIS) and its potencial for using it as an earthquake early warning system

Aarón Moya Fernández

Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Investigador del Laboratorio de Ingeniería Sísmica del Instituto de Investigaciones en Ingeniería, cesar.moya@ucr.ac.cr

Recibido: 23 mayo 2018

Aceptado: 23 julio 2018

Resumen

Se desarrolló un sistema de monitoreo acelerográfico que calcula la intensidad sísmica cada 5 segundos. El sistema se llama Monitoreo Acelerográfico Secundario del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (MAS-LIS). Los datos provienen de más de 120 acelerógrafos digitales conectados a la Internet. El MAS-LIS analiza las amplitudes de las ondas y calcula su intensidad en la escala de la Agencia Meteorológica de Japón (JMA). En caso de detectarse un evento sísmico, un sistema paralelo ejecuta los cálculos para determinar la ubicación del epicentro. Ante esto, los resultados obtenidos indican que el sistema puede brindar un tiempo de antelación de hasta 20 segundos a la capital para eventos fuertes localizados en el Pacífico Norte y la Zona Sur del país. En el caso de los eventos ocurridos en el Valle Central y Pacífico Central, la cercanía de las fuentes sísmicas a la capital, que serían las que la afectarían de manera directa, no permiten contar con este tiempo. Sin embargo, aún cuando tampoco se pudiera determinar el epicentro, el MAS-LIS brindaría información de los valores de intensidad máxima en cada sitio donde haya sido instalado un equipo.

El MAS-LIS posee elementos de un sistema de alerta temprana tales como la rapidez en la detección de un evento fuerte y el cálculo del epicentro. No obstante, su principal diferencia es que se utiliza la intensidad sísmica como el parámetro de disparo; además, no se determina la magnitud del sismo.

Palabras clave:

Alerta temprana, terremotos, acelerógrafo, intensidad JMA



Abstract

We have developed a strong motion monitoring system that can calculate seismic intensity every 5 seconds. The system is called Earthquake Engineering Laboratory's Secondary Accelerographic Monitoring (MAS-LIS). The data comes from more than 120 digital accelerographs which are connected to the Internet. The MAS-LIS analyzes the amplitudes of the waves and calculates their intensity based on the Japan Meteorological Agency (JMA) scale. In case a seismic event were detected, another parallel set of programs tried to determine the location of the epicenter. The results of several simulations indicate that MAS-LIS can provide a time of advance of up to 20 seconds to the capital city for strong events located in the northern part of the Pacific coast and the southern part of the country. In case of the events happening in the Central Valley and the Central Pacific, the proximity of the seismic sources to the capital, which would be the ones that could directly affect the city, does not provide this much time. However, even if the epicenter could not be determined, the MAS-LIS would provide information on the maximum intensity values at each site where a device has been installed.

The MAS-LIS shares some similarities with an earthquake early warning system such as the rapid detection of a strong event and the calculation of the epicenter. However, its main difference is that the seismic intensity is used as the trigger parameter and that the magnitude of the earthquake is not calculated.

Keywords:

Early warning, earthquakes, accelerograph, JMA intensity

1. INTRODUCCIÓN

Las ondas primarias o P de un terremoto se caracterizan por viajar poco menos de dos veces más rápido que las ondas secundarias o S. Las ondas P producen movimientos verticales que generalmente son de bajo impacto para las construcciones civiles. Por el contrario, las ondas S producen movimientos horizontales y además son de mayor amplitud, por lo que son responsables de la mayoría de los daños producidos durante un terremoto. Aprovechando esta diferencia de velocidades, los sistemas de alerta temprana (SAT) buscan detectar el arribo de las ondas P con suficiente antelación para emitir un aviso a algún centro de población antes de la llegada de las ondas S.

Los SAT se componen de muchas estaciones ubicadas principalmente cerca de una potencial fuente sísmica. A partir de los primeros segundos de registro de las ondas P a estaciones cercanas al epicentro, se trata de calcular el epicentro y predecir el tamaño de un sismo para emitir una alerta. Países tales como México, Japón, Taiwán, Turquía, Rumanía e Italia utilizan ya un sistema de alerta temprana (Allen, Gasparini, Kamigaichi y Bose, 2009). El sistema varía de un país a otro, de manera que en unos casos se hace uso de una sola estación para activar la alerta y en otros, se utiliza una red de estaciones sincronizadas entre sí.

En el caso de Japón, se usa el sistema de una sola estación. El sistema, llamado UrEDAS (Urgent Earthquake Detection and Alarm System), calcula la magnitud y localización de un sismo usando para ello la información de los primeros 3 a 4 segundos de arribo de la onda P (Nakamura y Tucker, 1988; Nakamura 1996a; 1996b). Este fue originalmente implementado para detener el tren de alta velocidad de Japón. A partir de 1990, también la Agencia Meteorológica de Japón (JMA) y el National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) iniciaron sus propios sistemas basados en redes de estaciones (Kamigaichi, 2004; Horiuchi, Negishi, Abe, Kamimura y Fujinawa, 2005).

En México, el Sistema de Alerta Sísmica (SAS) fue implementado luego del terremoto de 1985 en el que murieron entre 5 y 7 mil personas (Disaster Chronicles Number 3). Dicho desastre adquirió gran importancia para la población debido a que el epicentro se ubicó a lo largo de la zona de subducción frente a Michoacán, es decir, a más de 300 km de distancia de la capital. El SAS está creado para que emita una alerta a la Ciudad de México por sismos ocurridos en la zona de subducción. El sistema consta de varios equipos de movimiento fuerte ubicados a lo largo de la costa mexicana; cada uno de ellos detecta los parámetros de un terremoto en aproximadamente 10 segundos. Asimismo, el sistema envía una señal si el sismo es mayor a 6 y un centro de control decide si se emite la alarma general a la población (Aranda Jiménez, Ibarrola, Aguilar y Maldonado, 1995).

En Taiwán, el sistema implementado tiene como objetivo alertar a poblaciones a más de 75 km de distancia (Wu y Teng, 2002). Por su parte, el sistema de Bucarest, Rumanía, provee un tiempo de aproximadamente 25 segundos a esa ciudad para un evento ocurrido en la zona sísmica de Vrancea (Allen et al., 2009). El sistema empleado en Turquía tiene por objetivo alertar a Estandul de la ocurrencia de un sismo con epicentro en el Mar de Mármara. Hay 10 instrumentos a lo largo de la costa de ese mar que emiten una

alarma en cuanto 2 ó 3 de ellos exceden un valor específico de aceleración y velocidad acumulativa (Alcik, Ozel, Apaydin y Erdik 2009).

El PRobabilistic and Evolutionary Early Warning SysTem (PRESTo) es un software utilizado como sistema de alerta temprana para eventos regionales (Satriano, Elia, Martino, Lancieri, Zollo y Iannaccone 2011). El mismo se encuentra en funcionamiento en el sur de Italia. Este puede calcular con bastante precisión la localización de un sismo en 5 a 6 segundos cuando ocurre dentro de una región densamente instrumentada.

En Costa Rica, Protti (2001) ya había realizado un análisis de alerta temprana para San José ante la ocurrencia de un sismo en la región de Nicoya. El tipo de instrumentos utilizados estaría formado por una red de doce acelerómetros espaciados unos 40 km a lo largo de toda la península. En sus cálculos se presentan diferentes escenarios de tiempos de arribo de las ondas P y S al Valle Central dependiendo del lugar donde se inicie la ruptura en la región de Nicoya. El arribo de las ondas S oscilaría entre los 15 y 35 segundos, asumiendo que el tiempo de procesamiento por el programa de detección tardase unos 5 segundos.

En general, entre más lejana esté la fuente sísmica instrumentada a un centro de población importante, la alerta será mejor, porque se tendría más tiempo para ejecutar algún plan de emergencia. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que en ese caso, la amplitud de las ondas sísmicas sería menor debido a la atenuación por distancia (salvo en casos tan particulares como en el de Ciudad de México, en el que a pesar de la lejanía de la fuente sísmica, las ondas son amplificadas por efectos de los suelos blandos bajo la ciudad). Por su parte, eventos cercanos a una zona poblada no darían el tiempo suficiente para que un SAT fuera de alguna utilidad, salvo en los casos de automatización de salidas de emergencia o de apagado automático de la corriente eléctrica o de válvulas de gas para evitar potenciales incendios.

El Monitoreo Acelerográfico Secundario del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (MAS-LIS) es un programa dividido en 10 módulos que tienen como función brindar los parámetros de amplitud del movimiento del suelo cada 5 segundos. El sistema recibe la información acelerográfica de las más de 120 estaciones del LIS y cada 5 segundos calcula la intensidad en la Escala de la Agencia Meteorológica de Japón (JMA) (Japanese Meteorological Agency, 1996). Este sistema también puede calcular la ubicación probable del epicentro usando los primeros arribos de las ondas P a las estaciones que detecten el movimiento. Si bien no es la razón principal del mismo, se puede calcular también un tiempo estimado de arribo de las ondas sísmicas a la capital cuando la fuente sísmica se encuentra principalmente en el Pacífico Norte, el Caribe Sur o la Zona Sur del país.

2. MARCO TECTÓNICO

Costa Rica, al igual que muchos países ubicados a lo largo del Cinturón de Fuego del Pacífico, experimenta sismos de gran magnitud con relativa frecuencia. La mayoría de los eventos fuertes que sacuden el país se originan a lo largo de la zona de subducción de la Placa Cocos bajo la Placa Caribe en el pacífico costarricense (Figura 1). El

último evento fuerte de importancia, conocido como el terremoto de Nicoya, ocurrió el 05 de setiembre del 2012 con una M_w 7.6 (Protti et al., 2014).

Las aceleraciones producidas alcanzaron valores de 1300 cm/s^2 en Nosara, una estación ubicada directamente sobre la zona de mayor liberación de momento sísmico. La réplica de mayor tamaño se registró en octubre del mismo año y alcanzó una magnitud de M_w 6.3 según los cálculos del LIS con una aceleración de 391 cm/s^2 en la misma estación. Ambos eventos fueron fuertemente sentidos en el Valle Central de Costa Rica, ubicado a más de 150 km de distancia con aceleraciones que oscilaron entre los 40 y 200 cm/s^2 (intensidades V-VI en la escala de Mercalli).

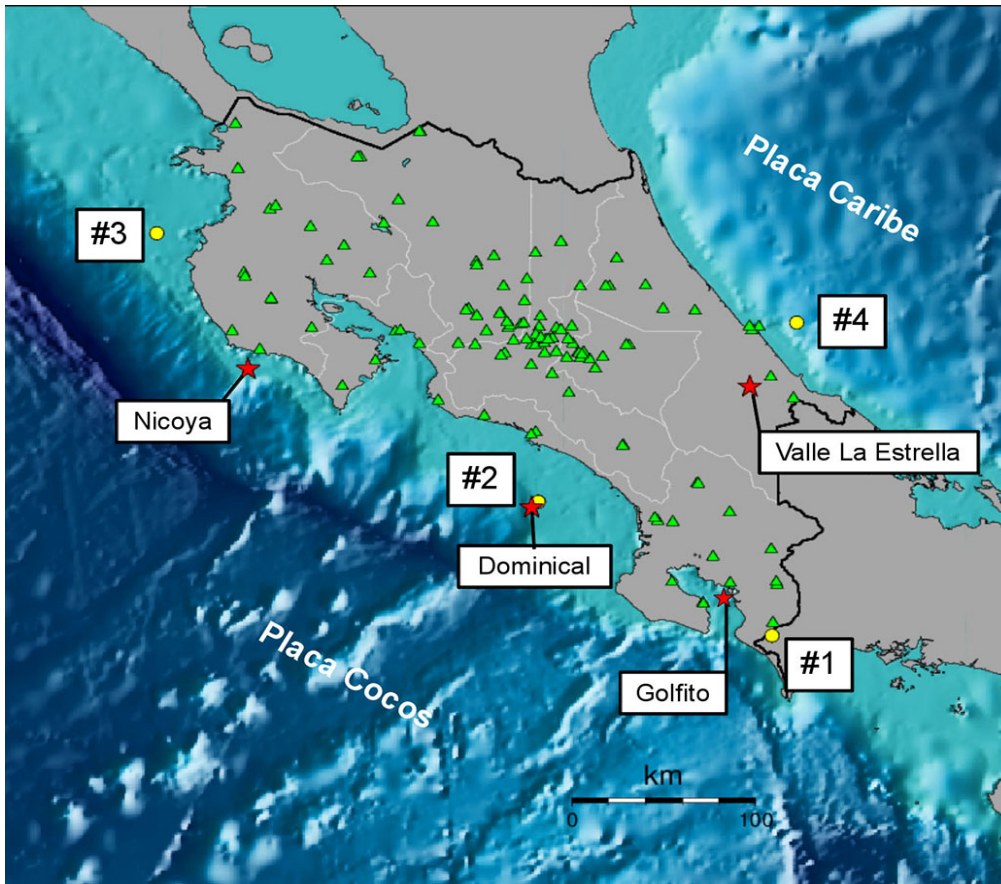


Figura 1. Se muestran las dos principales placas que afectan la sismicidad del país: Cocos y Caribe. Los triángulos corresponden a la localización de las estaciones acelerográficas. Los puntos amarillos son los eventos usados como escenarios en esta investigación y las estrellas rojas los epicentros de los sismos de Nicoya, Dominical y Valle La Estrella. Los cuadros con valores numéricos insertos corresponden a los 4 escenarios de terremotos que se analizarán en este estudio.

Uno de los más grandes terremotos que se han registrado instrumentalmente sucedió, sin embargo, al este del país, en un sistema de fallas relacionado con el Cinturón

Deformado del Norte de Panamá (CDNP). Se trata del terremoto del 22 de abril de 1991, un sismo de Mw 7.7 con epicentro en la región del Valle La Estrella (Goes, Velasco, Schartz y Lay 1993). El sismo levantó la costa Caribe y expuso unos 35 mil metros cuadrados de arrecifes coralinos (Cortés y Jiménez, 1994), generó cuantiosos daños a la infraestructura vial, principalmente los puentes (Sauter, 1994) y dejó decenas de muertos tanto en Costa Rica como en Panamá. Cabe destacar, como dato importante, que la distancia entre el epicentro y la capital es de unos 100 km.

Aparte de los sismos originados por subducción, el país es atravesado también por numerosas fallas activas (Denyer, Montero y Alvarado, 2003). Muchas de ellas han generado eventos de magnitudes del orden de 6 grados. De hecho, uno de los más importantes, desde el punto de vista histórico, fue el que destruyó la ciudad de Cartago en 1910, a escasos 15 km de la capital (Alonso-Henar et al., 2013). Otro evento de relevancia sucedió recientemente, el terremoto de Cinchona en enero del 2009. Este desastre tuvo una magnitud de Mw 6.1, a 30 km de San José, y dejó en ruinas todo un pueblo que tuvo que ser reubicado por completo (Jiménez y Madrigal, 2014).

En estos dos últimos sismos un SAT no habría sido funcional debido a la corta distancia entre la capital y el epicentro. Sin embargo, una estimación inmediata de los valores de intensidades sísmicas cuyo objetivo es el del MAS-LIS bastarían para tener un panorama claro de los sitios que fueron sacudidos con mayor fuerza. Esto permitiría priorizar la atención de la emergencia a esos lugares aún antes de conocer la ubicación del epicentro o la magnitud del evento ya que el MAS-LIS brindaría la información de la sacudida en poco menos de 10 segundos.

3. ESCENARIOS DE TERREMOTOS

La figura 1 muestra las estaciones de campo libre que opera el LIS. La mayoría de estas se ubican en el Valle Central donde se encuentran las ciudades más pobladas. Se trata de una red de acelerógrafos digitales de 3 canales, escala completa de 4g y resolución de 24 bits. Todos los equipos se encuentran anclados al suelo y poseen una batería interna que les suministra energía en casos de algún corte eléctrico durante un terremoto. La tasa de muestreo es de 200 muestras por segundo.

Dependiendo de la ubicación del epicentro de un terremoto y la cercanía de las estaciones acelerográficas, así sería el tiempo de cálculo de los parámetros de la fuente y emisión de una alerta temprana. Se utilizan los cuatro eventos numerados sobre la figura con el fin de calcular la diferencia de tiempo entre el arribo de la onda P y la onda S de cada uno a la capital. Estos cuatro escenarios fueron seleccionados basándose en la lejanía a San José y su importancia sismogénica.

El evento #1 se ubica en la zona sur, la cual es una región muy activa ya que en ella se encuentra el límite sureste de la Placa de Cocos. El evento más fuerte que se ha registrado en la historia reciente de la zona fue el de terremoto de Golfito en 1983 con Mw 7.4 (Tajima y Kikuchi, 1995). La zona es particularmente compleja ya que a lo largo del fondo marino se localiza la cordillera del Coco, una cadena montañosa que se extiende desde las Islas Galápagos hasta el sur de Costa Rica. En esta región, el espesor

de la corteza oceánica es de unos 11 a 12 km (Sallares et al., 2000), contrastando con la región central y norte del país.

El epicentro mostrado en la figura 2a corresponde al de un sismo de Mw 5.0 ocurrido el 03 de agosto del 2011 a 25 km de profundidad. Las ondas P llegan en 5 segundos a PLRL. A partir de ese momento, si esta estación tuviera que emitir una alerta que tardara 15 segundos en procesarse (tomando el valor promedio de las estimaciones usadas en México, Japón y Taiwán), habría un tiempo de aproximadamente 40 segundos para emitir una alerta antes que llegaran las ondas S a la capital.



Figura 2. Interfase gráfica del MAS-LIS en operación durante el sismo del 01 de setiembre del 2017, Mw 5.5 en Nosara. El tiempo origen del sismo fue a las 07:42:43. La imagen muestra el desempeño del sistema en el instante 07:42:50, unos 7 segundos después de haberse originado el evento.

El evento #2 (Fig 2b) posee su epicentro muy cerca del sismo de Dominical del 20 de agosto de 1999 de Mw 6.9 (Bilek, Schwartz y DeShon, 2003) que produjo aceleraciones de 60 cm/s² en San José. Este escenario es fundamental, ya que la ocurrencia de un sismo fuerte en el Pacífico Central produce, generalmente, valores altos de aceleración en San José. Por ejemplo, el sismo de Mw 6.4 del 20 de noviembre del 2004 cerca de Quepos (Pacheco et

al., 2006) produjo aceleraciones de 226 cm/s² en la estación acelerográfica PQUE, ubicada en la estación de bomberos a 10 km del epicentro, mientras que en San José se registraron valores de 180 cm/s². Cabe resaltar que la distancia de Quepos a San José es de unos 60 km.

El sismo usado para este escenario se origina a las 04:55:09 UTC del 13 de febrero del 2012. Las ondas P llegan a Quepos en 5 segundos (a las 04:55:16 UTC) ya que la estación está a unos 43 km del epicentro. Si el procesamiento se llevara a cabo en Quepos y se tardara 15 segundos en estar listo, se lograrían solo 7 segundos antes de la llegada de las S San José, por lo que el tiempo no sería suficiente para emitir una alerta.

El evento #3 (Fig 2c) sucedió a 223 km de San José en el Pacífico Norte. El sismo ocurrió a las 07:54:15 UTC del 23 de julio del 2011; no obstante, las ondas P llegaron a la estación más cercana, GSTC, 10 segundos más tarde. Si se toma nuevamente un tiempo de procesado de 15 segundos y aprovechando que la distancia es superior a los 75 km entre esa estación y San José, la alerta se emitiría a las 07:54:40. Este tiempo, es casi igual al que tardaría la onda P en llegar a la capital, pero se contaría con casi 30 segundos para emitir una alerta de arribo de la onda S al Área Metropolitana. Se podría ganar aún más tiempo si las estaciones estuvieran cerca de la costa.

El evento #4 (Fig 2d) se situó en el Caribe costarricense. Aunque la sismicidad del Caribe es mucho más baja que en el Pacífico, no deja de ser importante. Ha sido precisamente en el Caribe donde se ha experimentado uno de los terremotos más grandes de los últimos 20 años: el terremoto del Valle de la Estrella con Mw 7.7 (Goes et al., 1993). Por su parte, el evento #4 tardó 6 segundos en llegar a Limón, la estación más cercana. Aunque el procesamiento fuera 15 segundos, esto representaría un tiempo de 17 segundos de tiempo antes que las ondas S llegaran a San José.

La tabla 1 muestra el resumen de los tiempos origen y de arribo de las ondas P y S a San José para los cuatro escenarios mencionados anteriormente. También el tiempo estimado en segundos para el arribo de las ondas S a la capital, asumiendo que se requieren unos 15 segundos de procesamiento en la estación más cercana al epicentro. Según este análisis, los dos escenarios en los que se podría emitir algún tipo de alerta a San José serían los de la ocurrencia de un terremoto en el Pacífico Norte o Sur.

Tabla 1. Tiempos origen de un sismo y de arribo de ondas P y S a San José. Se muestra el estimado en tiempo aproximado del arribo de las ondas S a San José asumiendo un tiempo de procesamiento de 15 segundos.

| # | Fecha | T. origen | Dist. | Onda P | Onda S | Tiempo a S.J.(*) |
|---|------------|-----------|-------|----------|----------|------------------|
| 1 | 03/08/2011 | 23:12:34 | 209 | 23:13:07 | 23:13:34 | 40 |
| 2 | 13/02/2012 | 04:55:09 | 94 | 04:55:25 | 04:55:38 | 7 |
| 3 | 23/07/2011 | 07:54:15 | 223 | 07:54:48 | 07:55:18 | 30 |
| 4 | 28/02/2011 | 16:09:05 | 133 | 16:09:27 | 16:09:43 | 17 |

(*) Este es el tiempo aproximado que tarda la onda S en llegar a San José luego de haberse detectado el sismo en la estación más cercana al epicentro y de haberse restado los 15 segundos de procesamiento de la señal.

4. MAS-LIS

El LIS ha desarrollado un sistema de monitoreo acelerográfico llamado SMA-LIS (Moya, 2018) que tiene por objetivo el procesamiento automático de todas las formas de onda cuando ocurre un sismo fuerte. Este sistema calcula los parámetros de la fuente como el epicentro, magnitud, intensidad, espectros de respuesta, efectos de sitio, impacto sobre la población, entre otros. El sistema monitorea la actividad de todos los equipos cada 60 segundos. Si hay variaciones en la amplitud dentro de ese intervalo de tiempo y si el número de estaciones donde se observan estos cambios es superior a 30, se inicia el procesamiento de las señales. El SMA-LIS tarda un tiempo aproximado de 10 minutos en tener listo un informe completo sobre un sismo de gran intensidad.

Mediante el uso del programa EARTHWORM, que estandariza bajo un mismo formato los datos de las cuatro marcas acelerográficas que opera el LIS (Reftek, Nanometrics, Guralp y Kinematics), el tiempo de procesado de la información se ha podido disminuir. Además de esto, modificando varios programas del SMA-LIS para que funcionen en paralelo y usando graficadores de bajo peso computacional, se ha podido desarrollar un nuevo conjunto de programas para analizar la información acelerográfica cada 5 segundos. A este nuevo sistema se le ha denominado Monitoreo Acelerográfico Secundario del LIS (MAS-LIS) y puede ser accesado en el sitio web oficial¹.

El MAS-LIS calcula la intensidad en la escala JMA. Esta escala tiene la ventaja de que su determinación toma en cuenta no solamente la amplitud de la señal acelerográfica, sino también su duración (Shabestari y Yamazaki, 2001; Sokolov, Furumura y Wenzel, 2010). Cada valor de intensidad es asociado con las coordenadas geográficas de la estación correspondiente y guardado en forma de tablas de texto. Estas tablas de texto son posteriormente graficadas usando el software de visualización de documentos llamado D3.js (Bostock, Ogievetsky y Heer, 2011). El D3.js es una biblioteca JavaScript para manipular documentos basados en datos y que permite la realización de gráficas vectoriales de bajo peso en HTML. Al tratarse de una librería JavaScript, la misma usa los recursos de la computadora local para generar las gráficas a partir de los datos. Por esta razón, el LIS ha creado dos versiones del MAS-LIS llamada Avanzada y Resumida. La diferencia entre ambas es básicamente el número de módulos que se despliegan entre una y otra.

El análisis del arribo de las ondas P se lleva a cabo usando el programa SAC (Goldstein, Dodge, Firpo y Lee, 2003) y la metodología de detección del SMA-LIS (Moya, 2018). El arribo de las ondas P se calcula solo en estaciones que posean un valor de amplitud mayor a 0.5 cm/s². En caso de que haya cinco sitios como mínimo que cumplan con esa condición, se procederá a determinar el epicentro usando el programa llamado Probabilistic, Non-Linear, Global-Search Earthquake Location (NonLinLoc) (Lomax, Zollo, Capuano y Virieux, 2001; Lomax, Michelini y Curtis, 2009). El paquete NonLinLoc es un conjunto de programas para la construcción de modelos de velocidad, el cálculo del tiempo de viaje y la localización probabilística no lineal.

En la figura 3 se muestra el MAS-LIS en operación durante el sismo del 01 de setiembre del 2017, Mw 5.5, en la región de Nosara. En el ejemplo se muestra cómo

en la parte superior aparece el tiempo del sistema junto con la distancia epicentral y el tiempo aproximado de arribo de la fase fuerte (onda S) a San José. Al momento del cálculo del epicentro, se contaba con 26 segundos previos al arribo de la fase fuerte a la capital. El mapa en (A) muestra los valores de intensidad en la escala JMA. El sistema se activó ya que 5 sitios experimentaron un valor de intensidad mayor a 2.

En la misma figura, en (B) aparece el mapa de aceleración máxima. La nube de puntos rojos corresponden a la región de máxima probabilidad de ubicación del epicentro. Esta zona puede ser muy dispersa al principio y se hace más pequeña conforme transcurre el tiempo y se dispongan de más datos (Fig. 4). El círculo rojo es la región aproximada donde se encuentran las ondas S al momento del cálculo. Las ciudades que se muestran son puntos de referencia que contienen la distancia y tiempo aproximados del arribo de la onda S a cada lugar.

En (C) se muestra un gráfico de barras horizontales con las aceleraciones máximas en los primeros diez sitios. (D) contiene las formas de onda de las componentes verticales para los primeros dos sitios que aparecen en (C). La tercera traza muestra el estado del movimiento en San José. A la derecha de cada traza están los espectros de respuesta de las componentes horizontales en azul y rojo. La traza verde que está sobre estas es el espectro de diseño del lugar según el Código Sísmico de Costa Rica 2010.

El módulo (E) muestra el número de sitios que experimenta un valor de intensidad determinado. En este caso, al instante de la activación del sistema, más de cien sitios poseían intensidad 0, tres sitios tenían intensidad 2, uno intensidad 3 y uno intensidad 5-. (F) indica el valor de intensidad y el nombre del lugar en que se ha registrado para los primeros cinco sitios. A cada lugar se le asigna un valor de percepción según sea la intensidad: débil si la intensidad oscila entre 0, 1 ó 2; moderado si la intensidad es de intensidad de 3 ó 4; fuerte si la intensidad es de 5- ó 5+ y muy fuerte para intensidades arriba de 6-.

Los módulos (G) y (H) simplemente sirven para monitorear el desempeño del sistema y verificar que la información se esté actualizando. El módulo (G) muestra el valor de aceleración máxima para las primeras 3 estaciones del módulo (C) en función del tiempo. En el módulo (H) aparece un círculo de color cuya función es la de servir de indicador. Cuando no hay un sismo fuerte, el color del círculo es verde, en caso contrario es rojo. Este indicador emite también un sonido durante el tiempo que el círculo esté en rojo.

La figura 4 muestra otro instante del desempeño del MAS-LIS, a las 07:43:00, para el mismo evento. En ella se puede ver que la determinación del epicentro es ahora más precisa que en la figura 6. Se puede ver como los registros en Nosara y Sámara están completos al tiempo que la señal no ha llegado a San José. Para este instante, el MAS-LIS indica que la intensidad en Nosara es 5-, catalogada como un movimiento fuerte en la estación.

Se puede decir que el MAS-LIS es similar a un SAT, sin embargo existe una diferencia importante. En un SAT, se calcula el epicentro y la magnitud del sismo usando los primeros segundos de las ondas P. Si se determina que se trata de un sismo de gran magnitud, se emite una alarma para que se tomen acciones tendientes a disminuir el impacto del

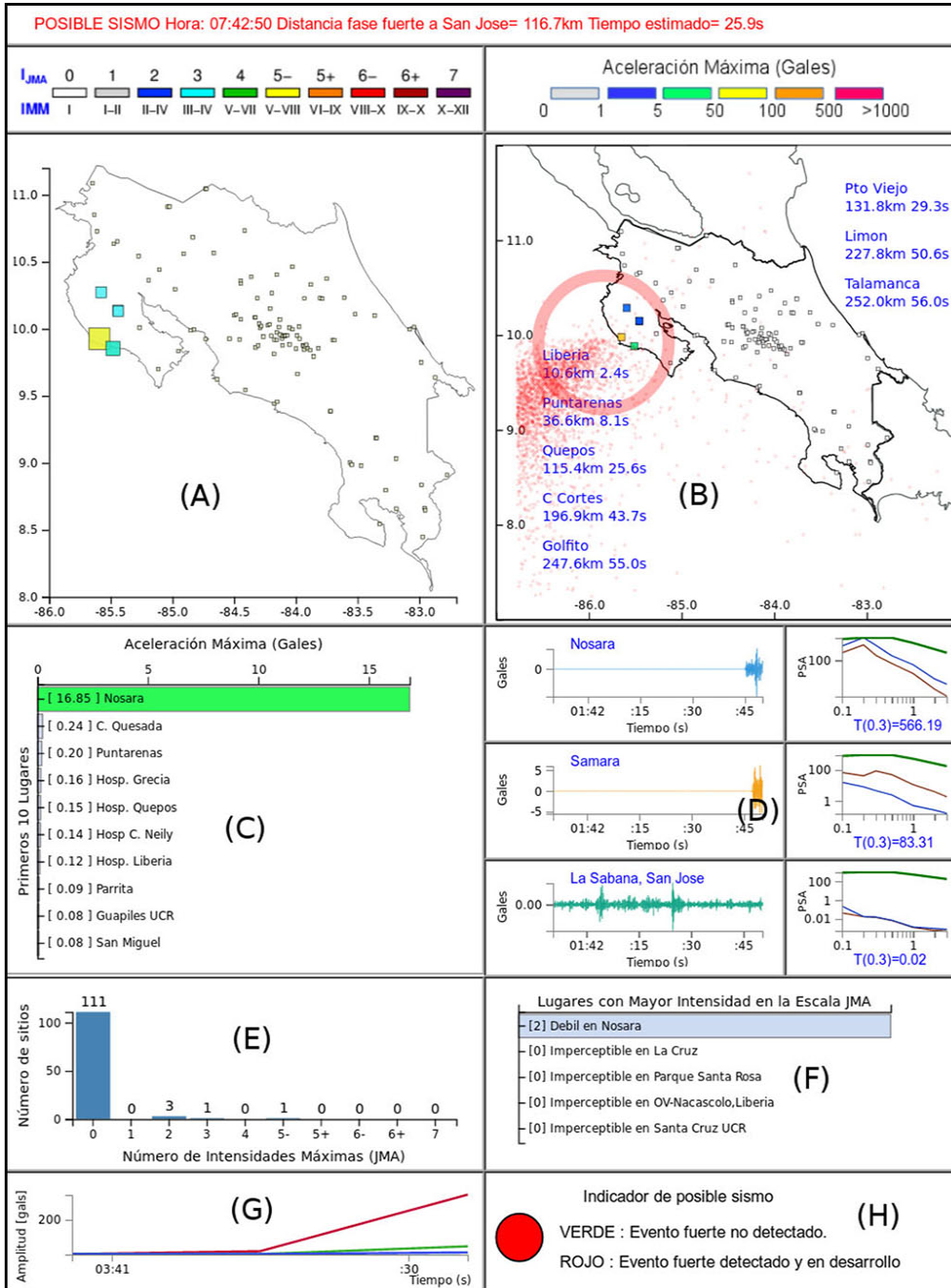


Figura 3. Interfase gráfica del MAS-LIS en operación durante el sismo del 01 de setiembre del 2017, Mw 5.5 en Nosara. El tiempo origen del sismo fue a las 07:42:43. La imagen muestra el desempeño del sistema en el instante 07:42:50, unos 7 segundos después de haberse originado el evento.

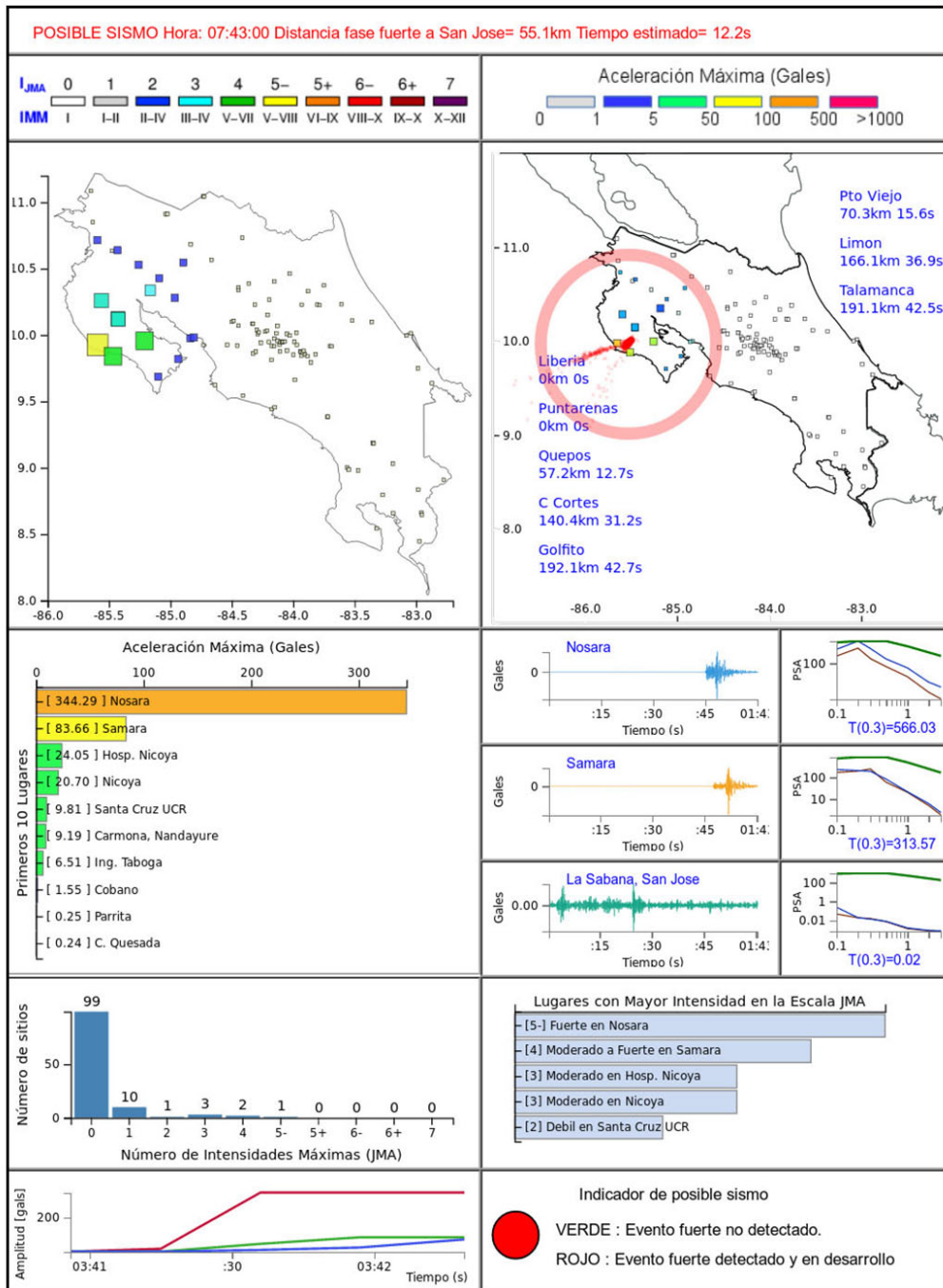


Figura 4. Interfase del sistema MAS-LIS mostrando el instante de tiempo 07:43:00 del evento del 01 de setiembre del 2017 de la figura 3.

terremoto. Por el contrario, en el MAS-LIS, se calcula primero el valor de la intensidad sísmica. Si el sistema detecta que el valor es mayor a $IJMA=2$ en dos o más estaciones cercanas, el sistema asume que se trata de un evento sísmico. El MAS-LIS activa el módulo de comunicación que indica que un sismo está en desarrollo, cambia de verde a rojo el estatus de un indicador y emite un sonido. Al mismo tiempo, otro módulo que corre en paralelo, se usa para calcular el epicentro del posible sismo. Si se logra calcular el epicentro, este se grafica, sino, de igual manera seguirá funcionando el sistema hasta que el movimiento del suelo vuelva a valores normales. En el diseño original del MAS-LIS también se ha dejado de lado la determinación de la magnitud.

5. Errores

Diversos factores pueden hacer que el MAS-LIS no funcione o genere una falsa alarma. El primero de ellos es que haya una desconexión de los acelerógrafos. Si por ejemplo un sismo sucediera en el Pacífico Sur y las estaciones más cercanas estuvieran fuera de línea, la detección de la intensidad en esos sitios cercanos a la fuente sísmica no se llevaría a cabo y el sistema no se activaría a tiempo.

El segundo factor en importancia sería una falla eléctrica en los acelerógrafos. Una posible falla eléctrica podría generar picos de voltaje que se traducirían en valores de amplitud artificiales. Aunque esto es posible que suceda, como por ejemplo luego de una tormenta eléctrica, los casos han sido puntuales y por lo general se han detectado a tiempo. La mayoría de los acelerógrafos cuenta con un protector de picos o se encuentran en redes protegidas que evitan que este problema se presente.

Puede también darse el caso de que sea el servidor central ubicado en el Centro de Informática de la UCR el que falle o que por razones de mantenimiento se encuentre fuera de línea. Con el fin de tener redundancia en el procesamiento, el LIS opera un sistema idéntico en otro servidor ubicado en la Facultad de Ingeniería. Si por alguna razón ocurriera un fallo en el equipo central, el secundario entraría en funcionamiento evitando que se perdiera información. Sin embargo, en este momento, las notificaciones son enviadas desde el servidor primario y no del de respaldo.

Durante el terremoto de Nicoya (05 de setiembre del 2012, Mw 7.6), hubo varios cortes eléctricos en la zona epicentral, así como en diferentes partes del país. Sin embargo, los mismos se dieron poco tiempo después de iniciada la sacudida fuerte. Esto permitió que antes de perderse la conexión con los equipos en Nicoya, se recibiera parte de la información con lo que se pudieron calcular valores de intensidad preliminares. La figura 6 muestra el MAS-LIS en operación al instante 14:42:20 cuando se activó. El tiempo origen del sismo se calculó a las 14:42:04. En ese momento había cuatro estaciones con valores de JMA mayores a 2.

El registro proveniente de Nosara, la estación más cercana al epicentro, se interrumpió a las 14:42:23 debido a cortes en el fluido eléctrico. Cuando se interrumpió la señal, las ondas S estaban a unos 30 s de llegar a San José y para ese entonces el valor estimado de JMA en Nosara era de 5 + (Fig 7). Los valores del espectro de respuesta en esa estación eran también bastante elevados.

6. Conclusión

Un SAT, en su definición más básica, es aquel que brinda información de la ubicación y magnitud de un sismo fuerte usando los primeros segundos del arribo de las ondas sísmicas. Luego de calcular esos parámetros, se envía esta información a una central con el fin de activar algún tipo de protocolo de emergencia.

El MAS-LIS no es propiamente dicho sistema, aunque comparte ciertas características como la del cálculo del tiempo de arribo de las ondas sísmicas a un lugar determinado. La idea central de este sistema es la de brindar información cada 5 segundos sobre la intensidad de la sacudida del suelo. En el momento en que el sistema se activa, se envía una notificación de que un evento sísmico está en desarrollo y se trata de localizar el epicentro del sismo. El criterio para activar el sistema es la intensidad sísmica. La localización del epicentro no es crucial para el funcionamiento del mismo.

Otra gran diferencia entre un SAT y el MAS-LIS es el procesamiento de la información. Por lo general, en un SAT las estaciones en el campo son las que procesan la información y la envían a una central para decidir si se emite o no una alerta. En el MAS-LIS, los equipos acelerográficos no procesan ningún tipo de información sino que todo lo hace un servidor central que la recibe y procesa. Esto quiere decir de notificación, es necesario que los datos se encuentren primero en el servidor central lo cual implica tiempo de transmisión.

Ahora bien, este tiempo de transmisión es variable. El mismo puede verse afectado por los diferentes anchos de banda y velocidades de la red en los sitios donde se hayan instalados los equipos. Lo ideal sería que el MAS-LIS (al igual que el SMA-LIS) formara parte de una red exclusiva de transmisión de datos y de electricidad de tal manera que los equipos pudieran operar ininterrumpidamente la mayor parte del tiempo.

El desempeño del MAS-LIS será bueno en el tanto haya muchos equipos cerca de la zona epicentral. Por ejemplo, en el 2012, en Guanacaste solo habían 10 equipos en toda la provincia. El día del terremoto de Nicoya, uno de ellos estaba fuera de línea y además solo había uno localizado cerca del epicentro en Nosara. En el 2018 el LIS cuenta con 16 unidades, dos frente a las costas del epicentro del terremoto de Nicoya del 2012, pero aún así el número es insuficiente para cubrir la zona.

El MAS-LIS, al igual que un SAT, está limitado por la cercanía de la fuente sísmica a un centro poblado. Un sismo con una profundidad somera y a menos de 20 o 30 km de una ciudad, no daría tiempo de emitir ningún tipo de alerta. Este sería el caso de terremotos como el de Cartago de 1910 o el de Cinchona del 2009. La profundidad somera de los focos y su cercanía con San José, hacen que la llegada de las ondas P y S a la capital sea casi instantánea. Los eventos que ocurren en el Pacífico Central son también los que afectan de manera directa los poblados del Valle Central y para los que lamentablemente el tiempo de respuesta es muy limitado. El sismo mostrado en la figura 5 corresponde al de Jacó, ocurrido el 13 de noviembre del 2017 con $M_w=6.5$.

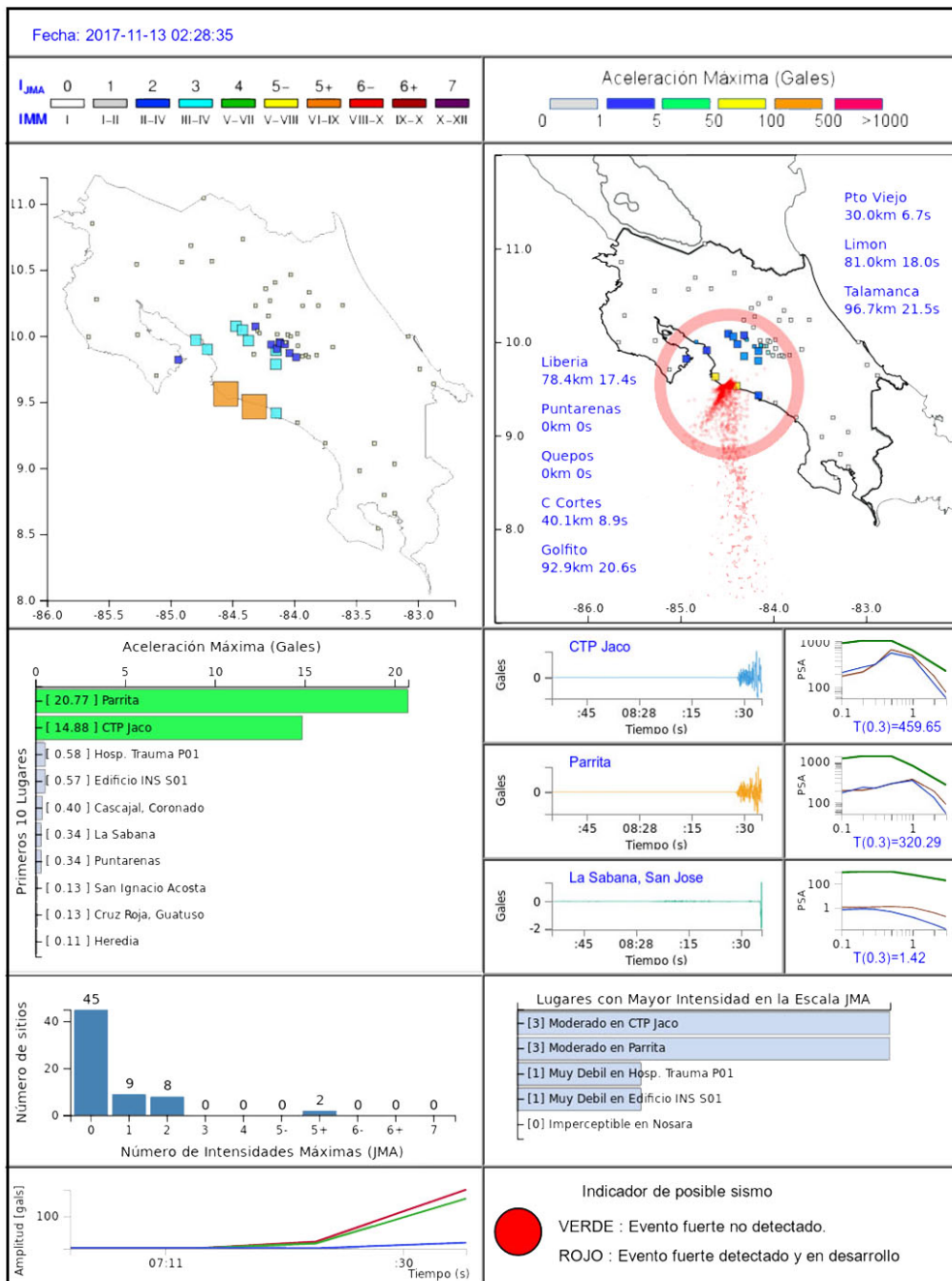


Figura 5. Funcionamiento del MAS-LIS durante el sismo del 13 de noviembre del 2017, Mw 6.5. El tiempo origen del sismo es a las 02:28:23 UTC y el tiempo que se muestra en la figura es para el instante 02:28:35, unos 12 segundos después de iniciado el sismo. Para ese instante, las ondas S ya habrían llegado a San José.

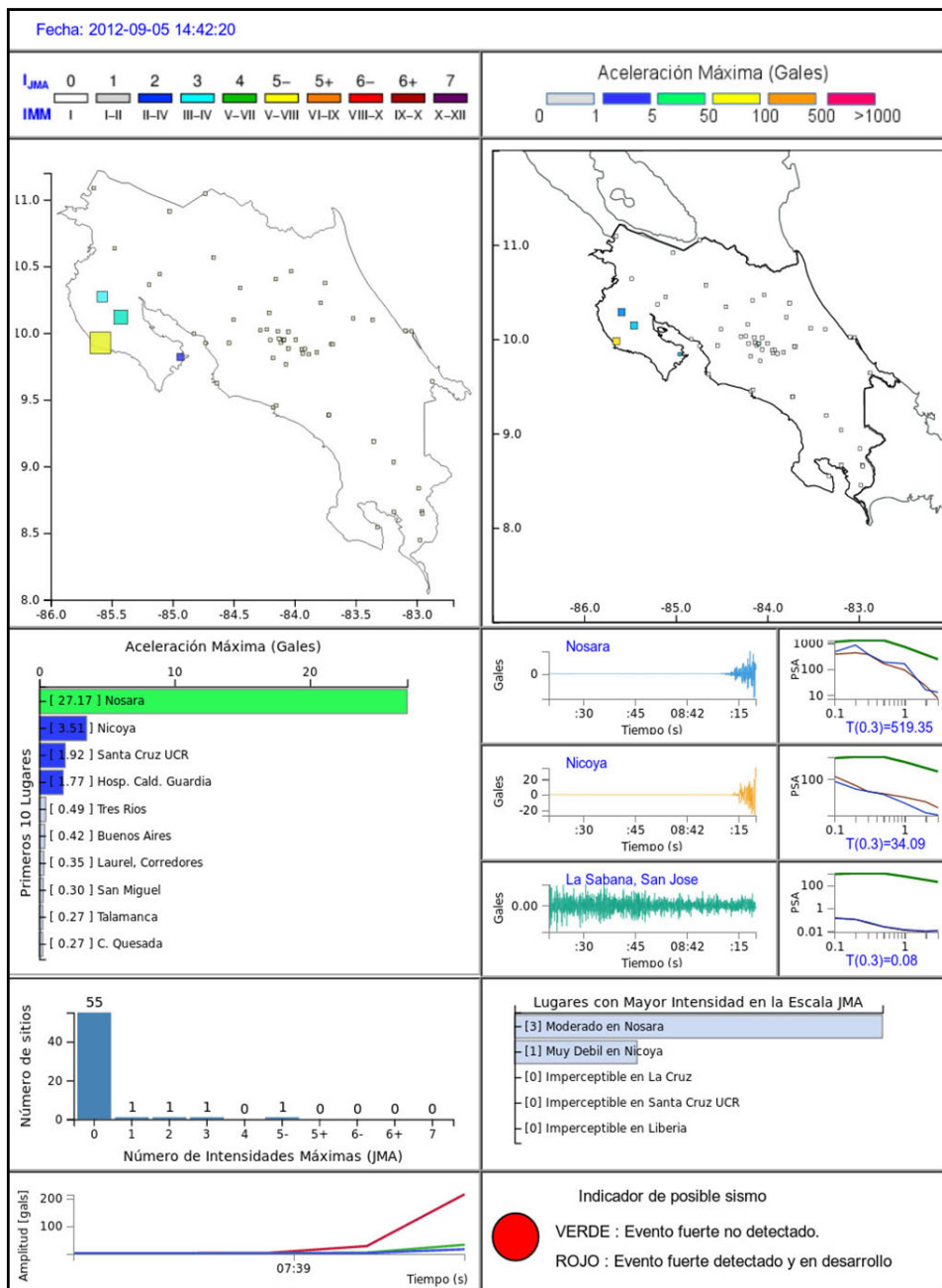


Figura 6. Funcionamiento del MAS-LIS durante el sismo del 05 de setiembre del 2012, Mw 7.6. En el año 2012 el LIS contaba con 59 estaciones activas al momento del terremoto de Nicoya. La estación más cercana al epi-centro fue la de Nosara.

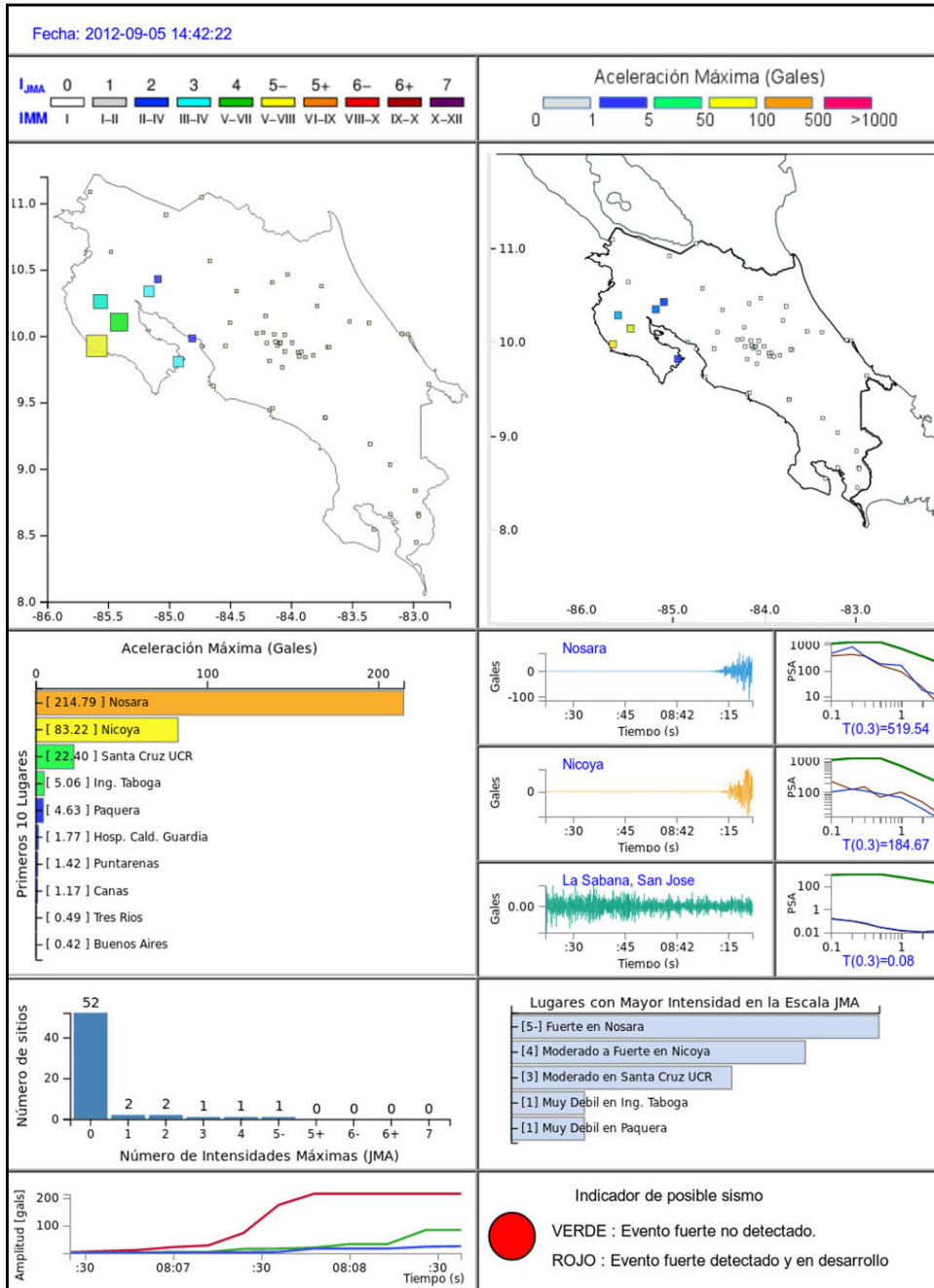


Figura 7. El MAS-LIS durante el terremoto de Nicoya antes del corte de electricidad e interrupción de la señal a las 14:42:23.

Por otro lado, cuando las distancias son superiores a los 100 km entre el epicentro y el centro de población, el sistema puede funcionar brindando un tiempo adecuado para ejecutar labores de primera necesidad. Por ejemplo, se pueden programar equipos para abrir puertas de emergencia en estaciones de bomberos. También puede detener procesos en algunas fábricas que manejen materiales inflamables para evitar posibles incendios por el sismo.

Aunque la información se despliega cada 5 segundos en el sitio web del MAS-LIS, esta desaparece del sistema una vez que el sismo ha terminado de propagarse. Por esa razón, el sistema también genera imágenes que muestran el desarrollo del cálculo para los 5 primeros instantes de operación. Estas imágenes son solamente mapas mostrando los valores de aceleración máxima del suelo en el instante de tiempo correspondiente y también la ubicación probable del epicentro. La figura 8 muestra un ejemplo. La información es enviada al sitio de twitter del MAS-LIS en la dirección <https://twitter.com/maslisucr>

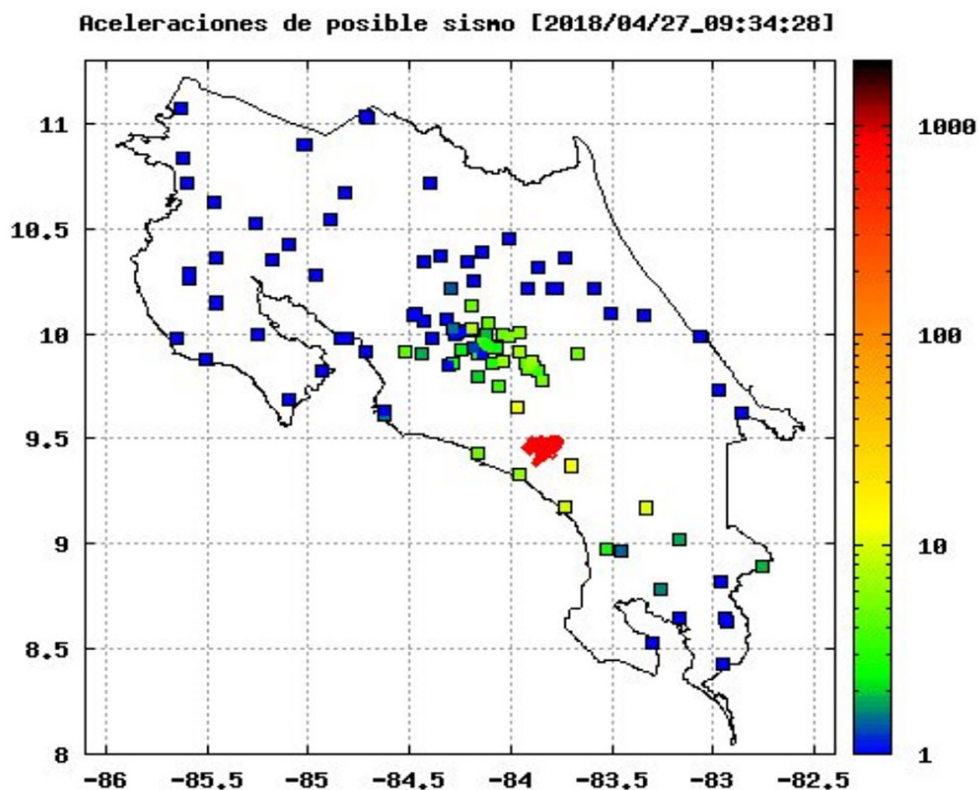


Figura 8. Ejemplo de un mapa de aceleraciones máximas del suelo generado con los datos del MAS LIS. La zona de puntos rojos corresponde a la ubicación probable del epicentro.

NOTAS

1 <http://mas.lis.ucr.ac.cr>

REFERENCIAS

- Alcik, H., Ozel, O., Apaydin, N., & Erdik, M. (2009). A study on warning algorithms for Istanbul Earthquake Early Warning System. *Geophysical Research Letters* 36, L00B05; doi:10.1029/2008GL036659.
- Alonso-Henar, J., Montero, W., Martínez-Díaz, J. J., Álvarez-Gomez, J. A., Insua-Arévalo, J. M. y Rojas, W. (2013). The Agua Caliente Fault, Source of the Cartago 1910 Destructive Earthquake (Costa Rica). *Terra Nova*, 25(5), 368-373.
- Allen R. M., Gasparini, P., Kamigaichi, O., & Bose, M. (2009). The status of earthquake early warning around the world: An introductory overview. *Seismological Research Letters*, 80(5), 682-693, doi: 10.1785/gssrl.80.5.682
- Bilek, S., Schwartz, S., & DeShon, H. (2003). Control of seafloor roughness on earthquake rupture behavior. *Geology*, 31(5), 455-458.
- Bostock, M., Ogievetsky, V., & Heer, J. (2011). D3: data-driven documents. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, (12), 2301–2309. PMID 22034350. doi:10.1109/TVCG.2011.185
- Cortés, J., Soto, R., y Jiménez, C. (1994). Efectos ecológicos del terremoto de Limón. *Revista Geológica de América Central*.
- Denyer, P., Montero, W., y Alvarado, G. (2003). Atlas Tectónico de Costa Rica. Editorial Universidad de Costa Rica.
- Disaster Chronicles Number 3: Earthquake in Mexico, September 19 and 20, 1985 (PAHO-OPS, 1985, 76 p.)
- Aranda, J. E., Jiménez, A., Ibarrola, G., Alcantar, F., Aguilar, A., Inostroza, M., & Maldonado, S. (1995). Mexico City Seismic Alert System. *Seismological Research Letters*, 66, 42-52.
- Goes, S. D., Velasco, A. A., Scharz S. Y., & Lay, T. (1993). The April 22, 1991, Valle de la Estrella, Costa Rica (Mw= 7.7) Earthquake and its tectonic implications: A broadband seismic study. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B5), 8127-8142.
- Goldstein, P., Dodge, D., Firpoand, M., & Lee Minner, S. (2003). SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers, Invited contribution to “The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology”, Edited by WHK Lee, H. Kanamori, P. C. Jennings, and C. Kisslinger, Academic Press, London.
- Horiuchi, S., Negishi, H., Abe, K., Kamimura, A. & Fujinawa, Y. (2005). An automatic processing system for broadcasting earthquake alarms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, 708-718.
- Japanese Meteorological Agency (1996), Explanation Table of JMA Seismic Intensity Scale, <https://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/inttable.html>
- Jiménez-Aguilar, E. y Madrigal-Viquez, L. (2014). Experiencias comunales post-terremoto de Cinchona en el distrito de Sarapiquí de Alajuela. *En Torno a la Prevención*, (13), 21-25.
- Kamigaichi, O. (2004). JMA Earthquake Early Warning. *J. Japan Assoc. Earthquake Engineering*, 4, 134-137.

- Lomax, A., Zollo, A., Capuano, P., & Virieux, J. (2001). Precise, absolute earthquake location under Somma-Vesuvius volcano using a new 3D velocity model. *Geophysical Journal International*, 146, 313-331.
- Lomax, A., Michelini, A., & Curtis, A. (2009). Earthquake location, direct, global-search methods. In *Encyclopedia of Complexity and Systems Science: Assembles for the first time the concepts and tools for analyzing complex systems in a wide range of fields* (1 ed., pp. 2449-2473). Springer-Verlag New York, Inc.
- Moya, A. (2018). Sistema de monitoreo acelerográfico del Laboratorio de Ingeniería Sísmica. *Revista Ingeniería*, 28(1), 96-114.
- Nakamura, Y. (1996a). Real-time information system for hazards mitigation. Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering. Paper No. 2134.
- Nakamura, Y. (1996b). Real-time information system for hazards mitigation: UrEDAS, HERAS and PIC. *Quarterly Reptort of Railway Tech. Res. Inst., Japan*, 37, 112-127.
- Nakamura, Y. & Tucker, B. E. (1988). Japan's earthquake warning system: should it be imported to California? *California Geology*, 41(2), 33-40.
- Pacheco, J. F., Quintero, R., Vega, F., Segura, J., Jiménez, W., & González, V., (2006). The Mw Damas, Costa Rica, earthquake of 20 November 2004: aftershocks and slip distribution. *Bull. Seismological Society of America*, 96, 1332-1343.
- Protti, M. (2001) Importancia de una alerta temprana en caso de terremoto para edificaciones esenciales vulnerables: un posible ejemplo para Costa Rica. *Revista EIRD Informa América Latina y el Caribe*, 3.
- Protti, M., González, V., Newman, A. V., Dixon, T. H., Schwartz, S. Y., Marshall, J. S., Feng, L., Walter, J., Malservisi, S., & Owen, S. E. (2014) Nicoya Earthquake Rupture Anticipated By Geodetic Measurements Of The Locked Plate Interface. *Nature Geoscience*, 7, 117-121.
- Sallares, V., Dañobeitia, J. J., & Flueh, E. R. (2000). Seismic tomography with local earthquakes in Costa Rica. *Tectonophysics*, 329, 61-78.
- Satriano, C., Elia, L., Martino, C., Lancieri, M., Zollo, A., & Iannaccone, G. (2011): PRESTo, The Earthquake Early Warning System For Southern Italy: Concepts, Capabilities And Future Perspectives. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 137-153.
- SAUTER, F. (1994): Evaluación de daños en puentes y otras estructuras civiles causados por el terremoto de Limón.- *Rev. Geol. Amér. Central*, Vol. *Espec. Terremoto de Limón*: 171-186.
- Shabestari K. T., & Yamazaki, F. (2001). A proposal of instrumental seismic intensity scale compatible with MMI evaluated from three-component acceleration records. *Earthquake Spectra*, 17(4), 711-723.
- Sokolov, V., Furumura T., & Wenzel, F. (2010). On the use of the JMA intensity in earthquake earlywarning systems. *Bulletin of Earthquake Engineering*. doi 10.1007/s10518-010-9178-6.
- Tajima, F., y Kikuchi, M. (1995). Tectonic implications of the seismic ruptures associated with the 1983 and 1991 Costa Rica earthquakes. *Geologic and tectonic development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America*, *Geological Society of America Special Paper*, 295, 327-340.
- Wu, Y. M. y Teng, T. L. (2002). A virtual Sub-network Approach To Earthquake Early Waning. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 2008-2018.