

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LA RED SISMOLÓGICA DEL CICESE PARA SU APLICACIÓN EN UN SISTEMA DE ALERTA SÍSMICA TEMPRANA PARA EL NORTE DE BAJA CALIFORNIA

Sergio Arregui Ojeda ⁽¹⁾, Alejandra Núñez Leal ⁽¹⁾, José Antonio Vidal Villegas ^(1,2), Luis Mendoza Garcilazo ⁽¹⁾, Guillermo Díaz de Cossío Batani ⁽¹⁾, Francisco Farfán Sánchez ⁽¹⁾, Oscar Gálvez Valdez ⁽¹⁾, Ignacio Méndez Figueroa ^(1,3), Luis Orozco León ^(1,4) y Julia Sánchez Rodríguez ^(1,3)

RESUMEN

El norte de Baja California (NBC) está caracterizado por dos subregiones las Sierras Peninsulares de Baja California (SPBC) y el Valle de Mexicali (VM). En el NBC existen ciudades en las que su población pudiera beneficiarse del funcionamiento de un Sistema de Alerta Sísmica Temprana (SAST). Con el propósito de implementar un SAST, que permita emitir notificaciones previas al arribo de las ondas sísmicas generadas por la ocurrencia de algún sismo relevante en el NBC, evaluamos la capacidad de respuesta de la Red Sismológica del CICESE (RSC). Las señales sísmicas de las estaciones de esta red se envían al centro de procesamiento ubicado en el CICESE usando distintos medios de transmisión. De éstos, destacan las transmisiones por módem de Internet por módem telefónico y celular con tiempos de latencia bajos (< 2 s). La evaluación de la RSC la hicimos vía el sistema de adquisición y detección *SeisComp3* y el método *Virtual Seismologist (VS)*. Esta evaluación inició en abril de 2017 y dio como resultado un catálogo de más de 5,000 sismos ($1.0 \leq M \leq 5.7$) registrados y procesados con *SeisComp3/VS*. Con la cobertura geográfica actual de la red y dependiendo de la zona de ocurrencia del sismo, puede notificarse a la población con una anticipación de hasta 20 segundos ($M \approx 4$). Para sismos ocurridos en el VM, existe una buena cobertura y pueden enviarse notificaciones a ciudades como Ensenada y Tijuana; no así para la ciudad de Mexicali. Para sismos de las SPBC, el envío de notificación dependerá de la ubicación del evento ya que la cobertura en las SPBC no es la requerida y además los enlaces de transmisión, presentan una alta latencia. No obstante, consideramos factible la implementación de un SAST para el NBC, si se mejora la cobertura geográfica de las estaciones de la RSC y se usan esquemas de transmisión con tiempos de latencia bajos.

Palabras Clave: Norte de Baja California; Alerta Sísmica Temprana; Seiscomp3/VS; Red Sismológica del CICESE

Artículo recibido el 31 de julio de 2021 y aprobado para su publicación el 31 de agosto de 2022. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

⁽¹⁾ Departamento de Sismología, División de Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, Carretera Ensenada-Tijuana 3918, Zona Playitas, Ensenada, Baja California, México, C.P. 22860. sarregui@cicese.mx; anunez@cicese.mx; vidalv@cicese.mx; lmendoza@cicese.mx; gbatani@cicese.mx; fjsanchez@cicese.mx; ogalvez@cicese.mx

⁽²⁾ Autor de correspondencia.

⁽³⁾ Jubilado(a).

⁽⁴⁾ Finado.

EVALUATING THE POTENTIAL OF CICESE SEISMOLOGICAL NETWORK FOR ITS APPLICATION IN AN EARTHQUAKE EARLY WARNING SYSTEM FOR THE NORTHERN BAJA CALIFORNIA REGION

ABSTRACT

Northern Baja California (NBC) is characterized by two subregions: Peninsular Ranges of Baja California (PRBC) and Mexicali Valley (MV). In NBC, there are cities whose population could benefit from the operation of an Early Earthquake Warning System (EEWS). To implement an EEWS in NBC, which allows issuing notifications to warn people about the arrival of seismic waves generated by relevant earthquakes in NBC, we evaluated the capacity of response of the CICESE Seismological Network (CSN). The seismic signals from stations of this network are sent to the processing center, located at CICESE, using different transmission media. Commercial and cellular Internet modem transmissions with low latency times (< 2 s) stand out. We evaluated the performance of the CSN using the SeisComp3 acquisition and detection system in combination with the Virtual Seismologist (VS) method. This evaluation began in April 2017 and resulted in more than 5,000 earthquakes ($2.0 \leq M \leq 5.0$) recorded and processed with SeisComp3/VS. Based on the current geographical coverage of the network and the area of occurrence of a relevant earthquake, the EEWS could notify the population up to 20 seconds in advance. There is good coverage for earthquakes occurring in the VM, and notifications can be sent to cities such as Ensenada and Tijuana but not to Mexicali. For PRBC earthquakes, it is impossible to issue a prior notice to any of the towns mentioned due to insufficient station coverage. However, we consider the implementation of an EEWS for NBC feasible if the geographical coverage of the CSN stations is improved and transmission schemes with low latency times are used.

Keywords: Northern Baja California; Earthquake Early Warning System; SeisComp3/VS; CICESE Seismological network

INTRODUCCIÓN

El propósito de un Sistema de Alerta Sísmica Temprana (SAST) es detectar los sismos lo más pronto posible para que una alerta pueda llegar a algunas zonas de interés antes de que arriben las ondas sísmicas. De esta forma se podrán tomar medidas de protección. En un SAST, la ubicación y la magnitud del temblor se estiman rápidamente a partir del primer movimiento del terreno con sensores próximos a la fuente. Posteriormente, se estima la intensidad esperada del sismo en las regiones de interés y se envían alertas a las personas o sistemas en esas regiones, en algunos casos antes de que arribe el movimiento más fuerte. A medida que se propagan las ondas sísmicas, se dispone de datos de sensores adicionales, el SAST revisa estas estimaciones de movimiento del suelo (aceleración, velocidad y desplazamiento) y actualiza sus alertas. Es posible que el área más cercana al epicentro no reciba la alerta antes de que el sismo sea percibido en ella. El tamaño de esta área se puede minimizar al tener redes densas con sensores cercanos al epicentro, algoritmos de detección rápida, medios de transmisión adecuados, software de alerta para ser recibida por el usuario y tecnologías de entrega rápida de la alerta. Los lugares más distantes al hipocentro tendrán más tiempo para actuar (Given et al., 2018).

El norte de Baja California es una región de gran actividad sísmica en la que han ocurrido desde microsismos ($M_L \sim 1.0$) hasta el sismo de M_w 7.2 El Mayor-Cucapah, en abril de 2010 (Hauksson et al., 2011). Esta actividad se concentra principalmente en fallas geológicas de la región; Frez Cárdenas y González García (1989) y Munguía y Vidal (1991), por ejemplo, han descrito las diferentes áreas de ocurrencia. En el norte de Baja California ciudades importantes como Mexicali, Tijuana, Rosarito, Tecate, Ensenada, además de otras poblaciones menores, han sido afectadas por la ocurrencia de sismos importantes como en el caso del sismo El Mayor-Cucapah. Para monitorear la actividad sísmica, de la región, desde octubre de 1976 a la fecha, ha funcionado instrumentación sísmica a cargo del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE). Al presente, la instrumentación está organizada en diferentes sub-redes que conforman la Red Sismológica del CICESE (RSC).

La Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM) es una de las subredes de la RSC (Vidal-Villegas et al., 2018) que opera en el norte de Baja California. El funcionamiento constante de la RSC, así como mejoras en su instrumentación, permiten que sea candidata para la implementación de un Sistema de Alerta Sísmica Temprana (SAST). En este trabajo evaluamos la capacidad de respuesta de las estaciones sísmicas que conforman RESNOM. El proyecto de implementación del SAST inició en los primeros meses de 2017 y hasta la fecha se tienen más de 5000 eventos procesados por este sistema. El objetivo es poder avisar a la población del norte de Baja California sobre la llegada de ondas sísmicas que pudieran ocasionar daños tanto en infraestructura como a la población. La figura 1 muestra un mapa con la región de interés para la implementación de un SAST, en el mapa están incluidas las fallas geológicas y las zonas urbanas mostrando la densidad de población para cada ciudad del norte de Baja California. El objetivo de esta representación es estimar las áreas donde pudiera ser aplicable la implementación de un SAST. En la figura 1 se aprecia que la mayor densidad de población se concentra en las ciudades más importantes como Mexicali, Tijuana y Ensenada; sin embargo, también existen poblados ubicados en zonas ejidales del Valle de Mexicali (VM). Adicionalmente, por el lado de las Sierras Peninsulares de Baja California (SPBC), a lo largo del corredor Tijuana-Ensenada, frente a las costas del Pacífico, ha aumentado la densidad poblacional.

SISMICIDAD HISTÓRICA DE LAS REGIONES NORTE DE BAJA CALIFORNIA Y SUR DE CALIFORNIA

Las regiones norte de Baja California, México y sur de California, Estados Unidos están comprendidas en la frontera entre las placas de Norteamérica y del Pacífico, siendo la frontera entre estas placas, el extremo sur de la Falla San Andrés, San Jacinto y las Fallas Imperial y Cerro Prieto (Lomnitz et al., 1970). No obstante, al este de estas fallas, existen otras fallas secundarias en donde se distribuye parte del movimiento entre las placas mencionadas. Como resultado de este movimiento, ocurre sismicidad constante en la región norte de Baja California (NBC) y sur de California (SCa). La figura 2 muestra un mapa de la sismicidad histórica de la región durante los últimos 100 años para eventos de $\text{Mag} \geq 4.5$. Para la elaboración del mapa consultamos la base de datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). Procedimos de esta manera, por ser esta base más completa, ya que la generada con el funcionamiento de la RESNOM inició hasta octubre de 1976. En el NBC se han identificado varias zonas de ocurrencia como son: la zona de fallas San Miguel-Vallecitos, la zona de Sierra Juárez, el Valle de Mexicali e Imperial y la zona del Alto Golfo de California (Munguía y Vidal, 1991). Como se puede apreciar en la figura 2, la sismicidad histórica reportada se concentra en las zonas mencionadas; de éstas, destacan el Valle de Mexicali e Imperial en donde hay una gran concentración humana (figura 1) y que se vería posiblemente beneficiada con la implantación de un SAST. En los valles Mexicali e Imperial sobresalen tres sismos de $\text{Mag} \geq 6$, ocurridos en: mayo de 1940 (Mag. 6.9, Rockwell y Klinger, 2013), octubre de 1979 (Mag. 6.4, Chavez et al., 1982) y septiembre de 1980 (Mag. 6.3, Wong et al., 1997).

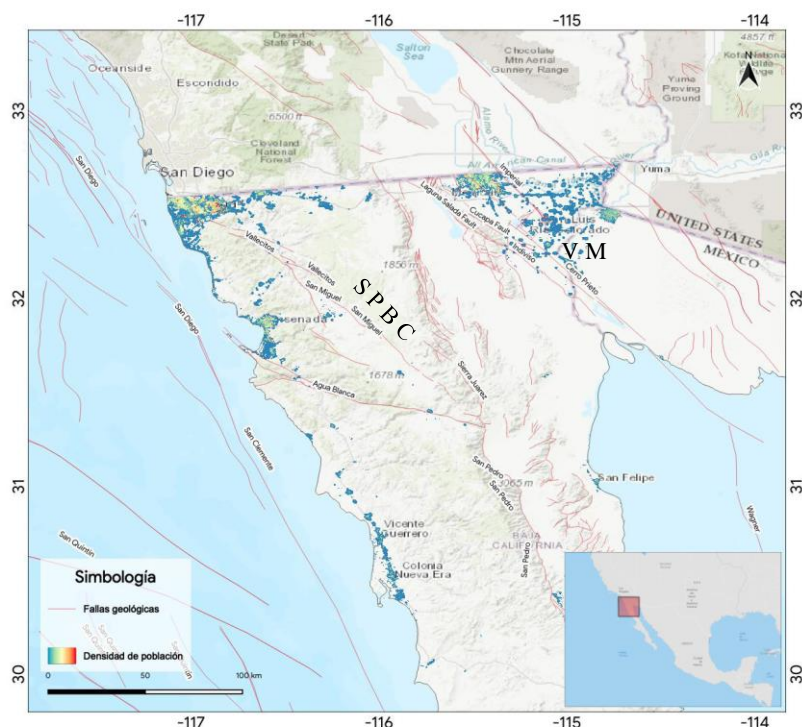


Figura 1. Región de estudio para el SAST. Con líneas en color rojo se indican las fallas regionales. Se indican las manchas de los centros de población de la región con tonos azules verdes, amarillos y rojos, donde el tono azul indica las zonas menos pobladas de la zona urbanizada y los tonos rojos indican la mayor concentración de población. Estos datos son estimados basados en censos nacionales y registros de población actualizado hasta 2020 (Doxsey-Whitfield et al., 2015). En el recuadro inferior derecho se observa la ubicación de la región de estudio en un mapa global. Abreviaturas: SPBC, Sierras Peninsulares de Baja California; VM Valle de Mexicali

En octubre de 1976 inició el registro y la catalogación de sismos en el norte de Baja California, inicialmente de la región del VM, y posteriormente se extendió a las SPBC con la ampliación de la cobertura geográfica de la RESNOM (Vidal y Munguía, 1993). Esta red funcionó, desde sus inicios hasta ~ junio de 2011, como un sistema de telemetría que enviaba las señales al centro de procesamiento en formato digital (Vidal-Villegas et al. 2018). El 4 de abril de 2010 ocurrió el sismo El Mayor Cucapáh, Mag. 7.2, en el complejo de fallas: Cucapáh, Laguna Salada, Pescaderos, Borrego, Paso Superior e Indiviso. Este sismo es el más grande registrado instrumentalmente en nuestra región. Sin embargo, tuvimos limitantes en el registro tales como registros de velocidad saturados en sus tres componentes (periodo corto y banda ancha). No obstante, había una red de acelerógrafos con sistema de registro en el sitio (Munguía et al. 1995), que permitió obtener acelerogramas completos, los que han sido útiles en trabajos de investigación (p. e. Rodríguez-Pérez et al., 2012). Adicionalmente, en las Sierras Peninsulares de Baja California, hay otras zonas de fallas como la correspondiente a las fallas San Miguel – Vallecitos, en la que ha habido actividad histórica (sismos de 1954 y 1956 de Mag. ≥ 6.0 [Shor y Roberts, 1958]) y en el Océano Pacífico, frente a las costas de Baja California. Al presente, hay actividad micro-sísmica continua en ambas zonas. Ciudades importantes, ubicadas cerca de las zonas de fallas mencionadas, son Tijuana y Ensenada, las que se verían también beneficiadas con la implantación de un SAST.

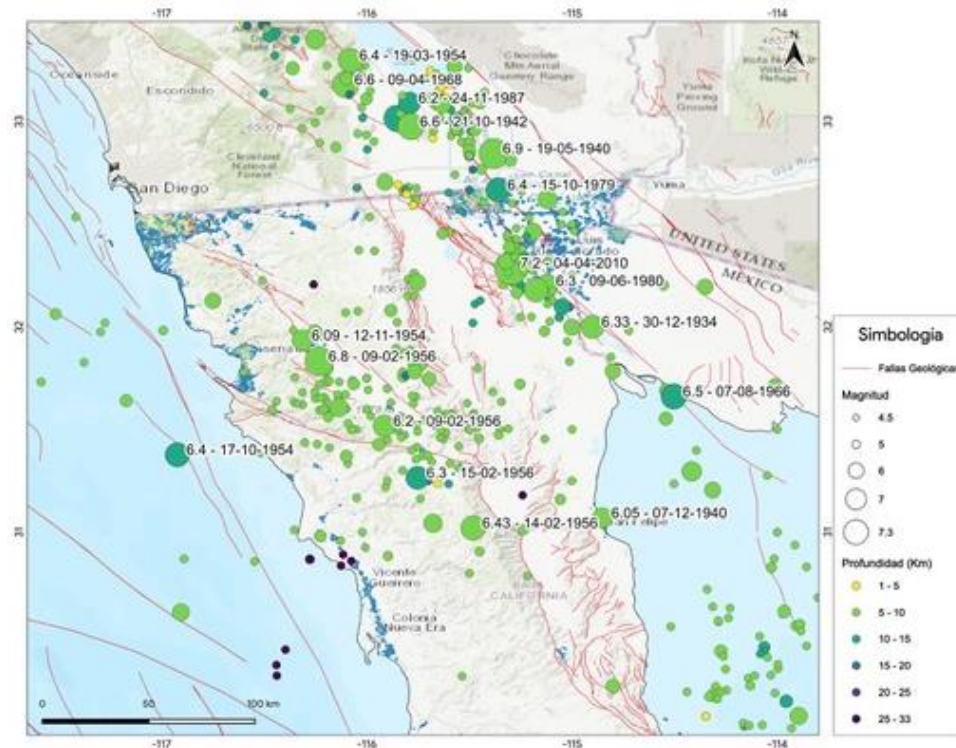


Figura 2. Mapa que muestra la sismicidad histórica ($M \geq 4.5$) de las regiones norte de Baja California y sur de California durante los últimos 100 años. Este mapa se preparó con base en el catálogo del USGS. Se agregan anotaciones de los sismos más significativos como magnitud, día, mes y año de ocurrencia

PRINCIPALES COMPONENTES DE UN SISTEMA DE ALERTA SISMICA TEMPRANA

Un SAST consta de un conjunto de sub-sistemas que se encargan de proveer la información necesaria para tener la capacidad de evaluar de manera continua las señales sísmicas, y en su momento ser capaz de alertar a la población acerca de un posible riesgo. Estos sub-sistemas se describen brevemente a continuación:

Estaciones sísmicas y esquemas de transmisión. Para la generación de la Alerta Sísmica Temprana, la RSC recibe y procesa automáticamente las señales de 61 estaciones de banda ancha de 4 redes sísmicas: 28 estaciones RESNOM (CICESE, 1980), 15 de la Red de Banda Ancha del Golfo de California (RESBAN) (Castro et al., 2018), 5 de la Red del Servicio Sismológico Nacional de México (SSN) (UNAM, 1998) y 13 de la Red Sísmica del Sur de California (SCSN, por sus siglas en inglés) (Caltech, 2013). La figura 3 muestra un mapa de las regiones NBC y SCa además de la ubicación de las estaciones de RESNOM, algunas de SCSN, una de RESBAN y dos del SSN. Adicionalmente, la tabla 1 muestra las características de la instrumentación instalada en las estaciones de RESNOM, SCSN, SSN y RESBAN que funcionan en el NBC. Las señales de 43 estaciones (28 de RESNOM y 15 de RESBAN) se transmiten en tiempo real hacia el centro de procesamiento ubicado en el Departamento de Sismología del CICESE en Ensenada Baja California. Estas 43 estaciones, en conjunto con 13 estaciones de la Red del Sur de California y 5 estaciones del Servicio Sismológico Nacional se procesan de manera automática para la detección y localización de eventos sísmicos ocurridos en el noroeste de México y en la región fronteriza del NBC y SCa. Aunque se reciben las señales de 61, estaciones de la RSC, para la evaluación de la posible implementación de un SAST solo consideramos las estaciones mostradas en el mapa de la figura 3 e indicadas en la tabla 1, por

ser las que cubren la región fronteriza del NBC y SCa. Además, es en esta región donde hay una concentración humana importante (figura 1).

Para el envío de las señales desde el sitio de ubicación de las estaciones sísmicas hacia el CICESE se utilizan diferentes sistemas de transmisión. El tipo de sistema a usar en cada estación depende de las características de las instalaciones y de la infraestructura para transmisión disponible en los sitios en que se encuentra cada equipo. Al presente, los sistemas de transmisión usados son Internet convencional, Internet por módem telefónico, Internet por módem celular, Internet por módem satelital y enlaces de radio. Un parámetro importante a considerar en un SAST es el tiempo de latencia, el que se puede definir como el tiempo de propagación de los paquetes de información sísmica desde la estación de origen hasta el centro de procesamiento de datos. En la tabla 1 se indica también el tiempo de latencia para cada estación de las estaciones que funcionan en el NBC y SCa. Una mayor discusión de este parámetro se presenta en la sección Implementación de un SAST para el norte de Baja California.

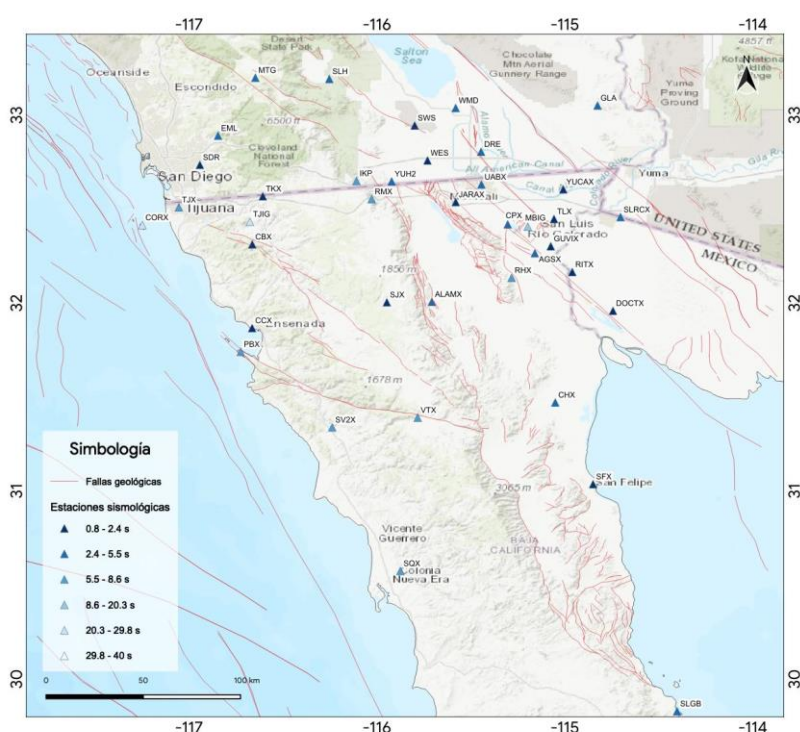


Figura 3. Distribución de las estaciones de la RESNOM, SCSN, SSN y RESBAN (ver la tabla 1 para mayor información). Las estaciones están representadas por triángulos cuya tonalidad indica los tiempos de latencia para cada una

Tabla 1. Instrumentación instalada en las estaciones de las redes RESNOM, SCSN, SSN y RESBAN. Se indica además los tiempos de latencia de cada estación

Código	Estación	Grabadora	Sismómetro	Acelerómetro	Transmisión	Latencia (s)
RED RESNOM						
SFX	San Felipe	Reftek DAS 130-1	Guralp CMG3ESPC	Kinematics FBA ES-T	MC	1.09
CCX	CICESE	Reftek DAS 130-1	Guralp CMG3ESPC	Kinematics FBA ES-T	MT	1.16
DOCTX	El Doctor	Reftek DAS 130-1	Nanometrics Trillium Compact-120S	Kinematics FBA ES-T	MC	1.17
JARAX	Heriberto Jara	Reftek DAS 130-1	Nanometrics Trillium Compact-120S	Kinematics FBA ES-T	MC	1.17
YUC2X	Ejido Yucatán	Reftek DAS 130-1	Nanometrics Trillium Compact-120S	Kinematics FBA ES-T	MT	1.19
RITX	Riíto	Reftek DAS 130-1	Nanometrics Trillium Compact-120S	Kinematics FBA ES-T	MT	1.23
TKX	Tecate	Reftek DAS 130S-1	Nanometrics Trillium Compact-120S	Kinematics FBA ES-T	IC4	1.24
CBX	Cerro Bola	Reftek DAS 130-1	Guralp CMG-40T	Kinematics FBA ES-T	R	1.36
GUVIX	Guadalupe Victoria	Reftek DAS 130S-1	Nanometrics Trillium Compact-120S	Kinematics FBA ES-T	MT	1.37
CHX	El Chinero	Reftek DAS 130-1	Guralp CMG3ESPC	Kinematics FBA ES-T	RM	2.33
TL2X	Tlaxcala	Reftek DAS 130-1	Guralp CMG40T-1		MT	2.95
AGSX	Ejido Aguascalientes	Reftek DAS 130-1	Guralp CMG3ESPC	Kinematics FBA ES-T	MC	3.14
CPX	Cerro Prieto	Reftek DAS 130-1	Guralp CMG3ESPC	Kinematics FBA ES-T	IC4	3.18
PIX	Pinacate	Reftek DAS 130-1	Guralp CMG3ESPC	Kinematics FBA ES-T	MS	4.15
PBX	Punta Banda	Reftek DAS 130-1	Guralp CMG3ESPC	Kinematics FBA ES-T	MC	4.29

Código	Estación	Grabadora	Sismómetro	Acelerómetro	Transmisión	Latencia (s)
ALAMX	Rancho Alamar	Reftek DAS 130-1	Guralp CMG3ESPC	Kinometrics FBA ES-T	MS	4.54
SLRCX	San Luis Río Colorado	Reftek DAS 130S-1	Nanometrics Trillium Compact-120S	Kinometrics FBA ES-T	MC	4.56
RHX	Río Hardy	Reftek DAS 130S-1	Nanometrics Trillium Compact-120S	Kinometrics FBA ES-T	MS	4.65
RMX	Rumorosa	Reftek DAS 130S-1	Nanometrics Trillium Compact-120S	Kinometrics FBA ES-T	IC4	4.69
SJX	Sierra Juárez	Reftek DAS 130-1	Guralp CMG3ESPC	Kinometrics FBA ES-T	MS	5.46
VTX	Valle de la Trinidad	Reftek DAS 130-1	Guralp CMG3ESPC	Kinometrics FBA ES-T	MS	5.47
SV2X	San Vicente	Reftek DAS 130-1	Guralp CMG3ESPC	Kinometrics FBA ES-T	MC	5.51
UABX	UABC Mexicali	Reftek DAS 130S-1	Nanometrics Trillium Compact-120S	Kinometrics FBA ES-T	MT	5.75
SQX	San Quintín	Reftek DAS 130-1	Guralp CMG3ESPC	Kinometrics FBA ES-T	MC	5.86
TJX	Tijuana	Reftek DAS 130S-1	Nanometrics Trillium Compact-120S	Kinometrics FBA ES-T	MT	7.33
PESCX	Pescaderos	Reftek DAS 130-1	Nanometrics Trillium Compact-120S	Kinometrics FBA ES-T	MC	7.79
CORX	Isla Coronado	Nanometrics Centaur-6	Nanometrics Trillium Compact-120S	Nanometrics Titan	R/MT	11.23
RED SCSN						
WES	Westside	Quanterra Q 330S	Streckeisen STS2	Kinometrics Episensor ES-T	MT	2
SAL	Salton City	Kinometrics Basalt 4X		Kinometrics Episensor ES-T	MT	2.17
SLH	Sleepy Hollow	Quanterra Q 330S	Kinometrics EQMET	Episensor ES-T	MT	3.33

Evaluación del potencial de la red sismológica del CICESE para su aplicación en un sistema de alerta sísmica temprana para el norte de Baja California

Código	Estación	Grabadora	Sismómetro	Acelerómetro	Transmisión	Latencia (s)
GLA	Glamis	Quanterra Q 330S	Streckeisen STS2.5	Episensor ES-T	MT	3.45
OLP	Otay Lakes Parck	Quanterra Q 330S	Streckeisen STS2.5	Episensor ES-T	MT	3.57
DRE	Desert Research Extended Center	Quanterra Q 330S	Guralp CMG-3T	Episensor ES-T	MT	3.77
SDR	San Diego Road Dept	Quanterra Q 330S	Streckeisen STS2	Episensor ES-T	MT	3.85
MTG	Mataguay Scout Camp	Quanterra Q 330S	Streckeisen STS2.5	Episensor ES-T	MT	4.02
BAR	Barret	Quanterra Q 330S	Streckeisen STS2	Episensor ES-T	MC	4.3
WMD	Westmorland	Quanterra Q 330S	Guralp CMG-3T	Episensor ES-T	MT	4.41
IKP	In-Ko-Pah	Quanterra Q 330S	Streckeisen STS2	Episensor ES-T	MC	5.26
YUH2	Yuha Desert	Quanterra Q 330S	Streckeisen STS2.5	Episensor ES-T	MT	5.52
EML	El Monte County Park	Quanterra Q 330S	Streckeisen STS2.5	Episensor ES-T	MT	5.89
SWS	Sam W. Stewart	Quanterra Q 330S	Guralp CMG-3T	Episensor ES-T	MT	34.52
RED SSN						
MBIG	Mexicali	Quanterra Q 330S	Nanometrics Trillium 240	Episensor ES-T	MT	17.01
SPIG	San Pedro	Quanterra Q 330HR	Nanometrics Trillium 240	Episensor ES-T	MT	20
TJIG	Tijuana	Quanterra Q 330S	Nanometrics Trillium 240	Episensor ES-T	MT	37.65
RED RESBAN						
SLGB	San Luis Gonzaga	Nanometrics Centaur	Nanometrics Trillium 120QA	Nanometrics Titan	MS	3.88

Abreviaturas: MC=Modem Celular, MS=Modem Satelital, MT=Modem Telefónico, RM=Radio Modem, R=Radio, IC4=Internet C4

Recepción y procesamiento. Las señales de las diferentes estaciones sísmicas se reciben en las instalaciones de CICESE usando el software provisto por cada fabricante. Una vez recibidas las señales, se usa el sistema *Earthworm* (Johnson et al., 1995) como un *proxy* para estandarizar las señales de las estaciones. El software para el SAST funciona en forma paralela e independiente al software utilizado para

el procesamiento estándar de las señales sísmicas recibidas. Para el SAST, una vez estandarizadas las señales, se envían hacia *SeisComP* (ETH, 2020) por medio de un servidor *Seedlink* (ETH, 2020). La figura 4 muestra un esquema del procesamiento con el uso de *SeisComP3*. Los módulos *scautopick* (realiza selecciones, basadas en variaciones de amplitud, en las formas de onda), *scevent* (asocia un origen a un evento por ajuste de tiempos de lectura) y *scautoloc* (localización de sismos en tiempo casi real) son los encargados de proveer una primera estimación de una localización; para el caso de VS, los desarrolladores de *SeisComP3* escribieron dos módulos específicos, *scenvelope* y *scvsmag* para el cálculo continuo de las amplitudes envolventes y para el cálculo y actualización de las magnitudes, respectivamente; una vez que está disponible la localización de un sismo en *SeisComP3*. Un tercer módulo llamado *scvsmaglog* es el que se encarga de generar mensajes de alerta en tiempo real, y enviarlos hacia una interfaz para el envío de notificaciones. Estas notificaciones pueden ser recibidas e interpretadas por algún software, como lo es EEW; los resultados del uso de este software se muestran en la figura 5.

Como ya se mencionó, *Virtual Seismologist* calcula la magnitud (denominada *MVS*) de manera casi instantánea una vez que se tiene una primera localización de *seiscomp3*. La *MVS* se estima en forma rápida con el uso del contenido de frecuencias en los primeros cuatro segundos del arribo de la onda *P* a una estación. De esta forma, el cálculo de la magnitud es más rápido que el cálculo de magnitud local M_L , en el que se requiere esperar el arribo del pico máximo de la onda *S*. Según Cua (2005) y Cua y Heaton (2007), las relaciones para la estimación de la *MVS* consisten en: 1) Una relación entre la razón del movimiento observado del suelo (cociente entre la aceleración y el desplazamiento verticales) y la magnitud, 2) las relaciones de atenuación de la envolvente describen como varios canales de amplitudes de ésta varían en función de la magnitud y la distancia. Estas relaciones se derivan del conjunto de datos del Sur de California con eventos en el intervalo de magnitudes $2.5 \leq M \leq 7.6$ y el conjunto de datos de movimientos fuertes de *Next Generation Attenuation* (NGA).

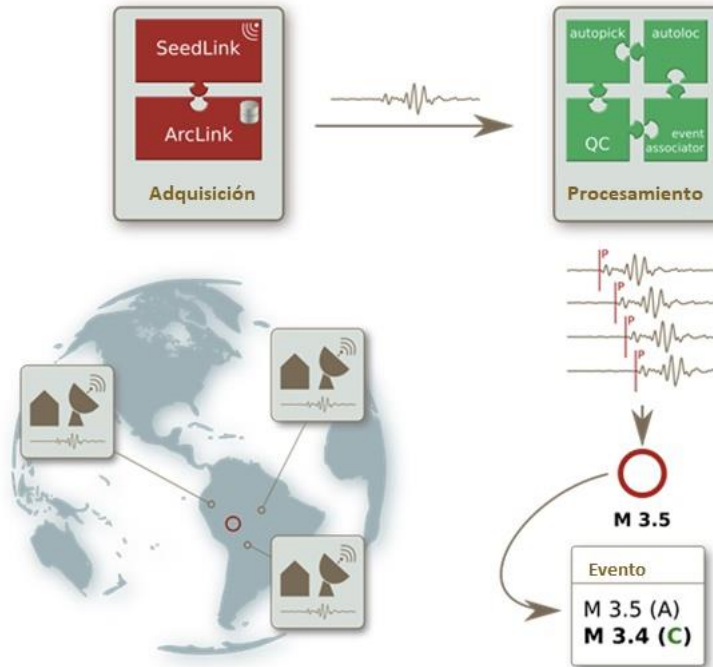


Figura 4. Proceso de adquisición, almacenamiento y procesamiento automático en tiempo real de las señales sísmicas usando *SeisComP*. Figura modificada de (GmbH, Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences, 2008)

SISTEMA DE ALERTA SÍSMICA TEMPRANA Y SEISCOMP

Tiempos de notificación. El SAST está comprendido en el sistema *SeisComp3* y funciona en combinación con *Virtual Seismologist (VS)* (Cua y Heaton, 2007). El método *VS* está basado en una aproximación Bayesiana para un SAST que estima la localización, la magnitud y la distribución del movimiento máximo del terreno generado por un sismo. *VS* en *SeisComp3* provee una estimación rápida de la magnitud de un evento, tan pronto tenga disponible una localización inicial. El tiempo que el sistema tarda en enviar una notificación para un evento depende de la calidad y densidad de la red sísmica, así como de la configuración general del sistema *SeisComp*. Se analizaron los tiempos en que *VS* emite la primera localización después del tiempo origen del evento para hacer la evaluación del SAST. La figura 5 muestra mapas de sismicidad para las SPBC y el VM, de éstos se aprecia que hay un mayor número de sismos ocurridos en el VM (figura 5 b) en los que el tiempo de envío de la notificación está comprendido entre 25 y 30 s posteriores a la ocurrencia del sismo (círculos rojos). En contraste para sismos de las SPBC los tiempos de envío de la notificación son mayores a 30 s, siendo más crítica esta situación para sismos ocurridos al sur de la ciudad de Ensenada, en que estos tiempos pueden ser desde 50 a 60 s (demasiado tiempo para el envío de una alerta).

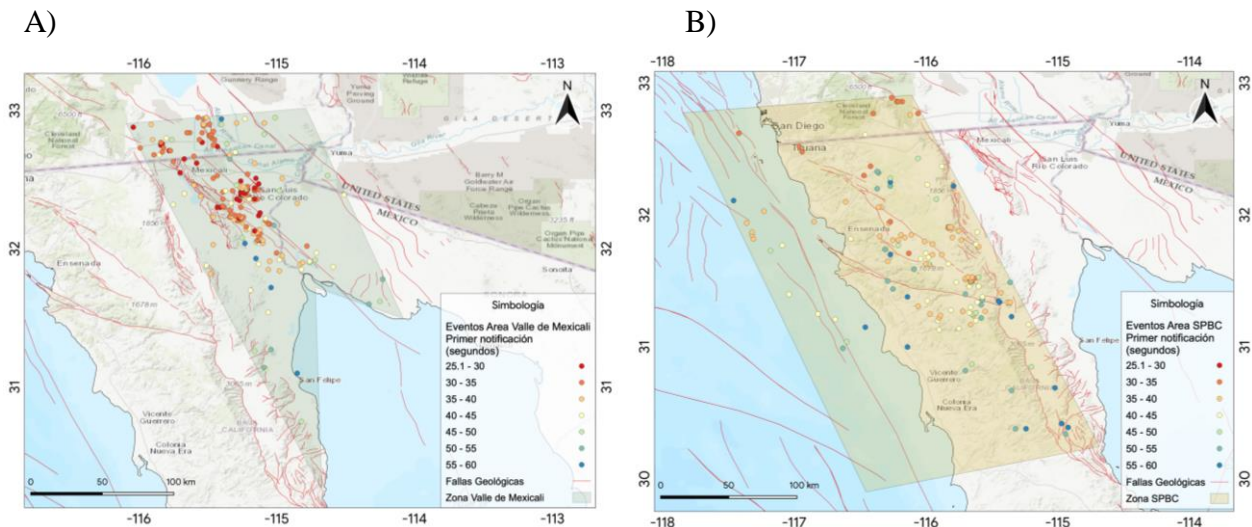


Figura 5. Mapas de sismicidad registrada por el SAST, dividida en dos polígonos, A) correspondiente a las SPBC y B) al VM

Tiempo de notificación. La distribución de las notificaciones hacia los usuarios finales es otra de las características que debe tener un SAST; esto es, tener la capacidad de notificar de manera rápida a la mayor cantidad de usuarios como sea posible. En este caso se hace uso de la plataforma *ActiveMQ* (activemq.apache.org, 2021), la cual actúa como un gestor entre el sistema de detección y localización *VS* y los usuarios finales. *ActiveMQ* funciona creando un tópico en un canal de mensajes para así tener una comunicación de uno a muchos usuarios, de esta manera los clientes o usuarios se pueden suscribir para recibir las notificaciones. El módulo *scvsmaglog* es la fuente de datos para este canal y una vez que éste envía un mensaje, cualquier software que se encuentre suscrito a este canal/tópico de *ActiveMQ* recibirá las notificaciones. El resultado del software *Earthquake Early Warning Display (EEWD)* (Cauzzi et al., 2016), mostrado en la figura 6, es un ejemplo de un cliente que puede recibir las alertas emitidas por *VS* y a su vez es usado como una herramienta para la transmisión de alertas en tiempo real o tiempo casi real hacia los usuarios finales que tengan acceso a la herramienta y al canal de notificaciones.

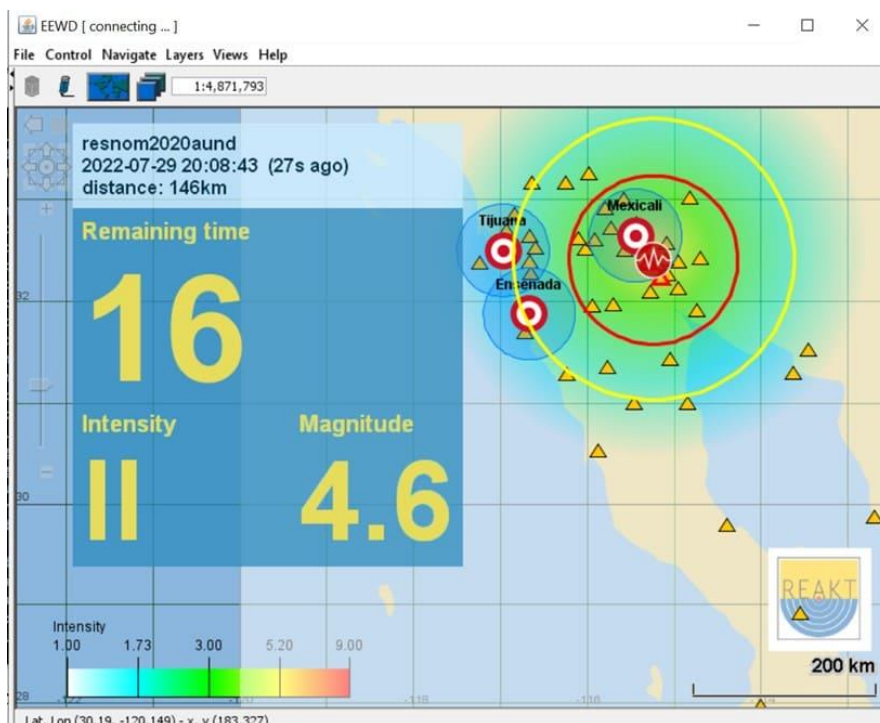


Figura 6. Software EEWD (Cauzzi et al., 2016) en el momento de recibir una alerta de sismo. En este caso se trata de un sismo ocurrido en la región del Valle de Mexicali (magnitud preliminar de 4.6). Los círculos amarillo y rojo indican, respectivamente, el arribo de las ondas *P* y *S* a las ciudades de Ensenada y Tijuana. La información del recuadro superior izquierdo en el mapa, nos indica que en 16 segundos arribará la onda *S* a la Ciudad de Ensenada, y que la intensidad esperada es de *II* (en Ensenada). Los círculos en color azul, alrededor de Tijuana, Ensenada y Mexicali representan la “zona ciega” donde el sistema no podría detectar y emitir una alerta para estas ciudades

IMPLEMENTACIÓN DE UN SAST PARA EL NORTE DE BAJA CALIFORNIA

Tiempos de latencia. Una de las partes clave para el buen funcionamiento de un SAST es el tener una latencia mínima en las señales sísmicas que recibe y procesa. Esto es, mientras menor sea este parámetro el algoritmo será más eficiente. En la tabla 1, previamente mencionada, se muestra un listado de los tiempos de latencia de los datos para cada estación recibida. La mayoría de las estaciones tienen una latencia alta en la transmisión de sus datos, que para un SAST tiene que ser menor a 2 segundos. Otro factor de importancia es la distribución de las estaciones de la red, la proximidad entre éstas es importante tanto para una mejor cobertura de los eventos como para la rapidez en la localización. Los digitalizadores usados en RESNOM son Reftek 130-1, Reftek 130S-1 y Nanometrics Centaur (tabla 1). Los tiempos de latencia de estos equipos no se encontraban dentro del rango aceptable para un SAST, teniendo un rango de latencias de 3 y hasta 8 segundos, en condiciones normales de operación para los equipos Reftek. Como resultado de una colaboración con el Servicio Geológico Americano (USGS, por sus siglas en inglés), surgió la recomendación de hacer un cambio al *firmware* de los digitalizadores Reftek 130-1 y 130 S-1 (de la versión 3.8.3 hacia la versión 3.7.8F), el cual fue desarrollado para tener la capacidad de enviar paquetes de datos cada 0.25 segundos, reduciendo así significativamente los tiempos de latencia de las señales. Después pruebas de operación de las estaciones con el nuevo firmware y su comportamiento con los diferentes esquemas de transmisión, y al observar un correcto funcionamiento de los equipos, se decidió implementar la actualización en ocho estaciones de RESNOM, y se tiene planeado agregar al menos diez estaciones más.

Se hace notar también que el esquema de transmisiones con módem satelital no alcanza los requisitos de velocidad para soportar el uso con esta actualización.

La figura 3, previamente mencionada, muestra la ubicación de las estaciones de la RESNOM; se asignaron colores según los tiempos de latencia de cada estación. Los triángulos en tonos azules claros corresponden a tiempos de latencia altos, de hasta 40 segundos, mientras que los triángulos en tonos de azules más oscuros indican las estaciones con tiempos de latencia menores. Las estaciones con tiempos entre 0.8 y 2.4 segundos, que son los que están dentro de los límites ideales para un SAST se indican en color azul oscuro. A estas estaciones fueron a las que se aplicó la actualización al firmware 3.7.8F, con lo que comprobamos que se redujo significativamente los retrasos en el envío de las señales. Esto es, se compararon los tiempos de latencia después de hacer el cambio del firmware contra los que se tenían antes de hacerlo.

Cobertura geográfica. La figura 7 muestra los polígonos de cobertura actual para un SAST; estos polígonos se formaron por la intersección de los círculos con un radio de 20 km centrados en la posición de la estación sísmica (Given et al., 2018). Incluimos en el mapa de la figura 7 los epicentros del catálogo que se ha obtenido de los sismos localizados por VS, así como la densidad de población en las zonas urbanas. Podemos notar que la región del Valle de Mexicali es donde se tiene una mejor cobertura, con estaciones con la menor latencia ubicadas dentro de un polígono que cubre la zona donde se ubican las fallas geológicas (líneas en color rojo) de la región. Si vemos el detalle del polígono que cubre la región del Valle de Mexicali, los eventos localizados dentro de éste tienen un mejor tiempo de respuesta (círculos en color rojo) para el SAST que aquellos ubicados fuera del área. Para el caso de los eventos con tonos naranjas ubicados dentro del polígono de la región del Valle de Mexicali, los cuales indican un tiempo de respuesta mayor, se hizo una revisión de las fechas asociadas a estos eventos, encontrando que éstos ocurrieron antes de realizar el cambio del firmware a las estaciones de la región, lo cual es un indicador que este cambio fue de utilidad para el SAST (ver Discusión de Resultados).

Comparación de Magnitudes. El SAST, se configuró para detectar sismos de cualquier magnitud, esto con el fin de probar el sistema con el mayor número de sismos posible, este valor de magnitud de umbral es configurable. Para este trabajo consideramos que $M \geq 2.9$ es una magnitud que pudiera ser percibida a distancias cortas (≈ 10 km), por lo que lo usamos como valor de umbral, para el análisis. En la figura 8a se muestra el número de sismos por magnitud (MVS) del catálogo analizado (1120 sismos). Estos valores de magnitud, calculados por SeisComp3/VS, fueron comparados con los valores de magnitud reportados en el catálogo de la RSC (M_L , calculados con AQMS [Hartog et al., 2020] y SEISAN [Haskov et al., 2020]). La figura 8b ilustra esta comparación en la que se observa una mayor dispersión entre ambas magnitudes en el intervalo de 3 a 4; sin embargo, esta dispersión es alrededor de la línea que representa la igualdad entre ambas magnitudes. A magnitudes mayores a 4 las magnitudes MVS tienden a ser mayores que las magnitudes del catálogo de la RSC.

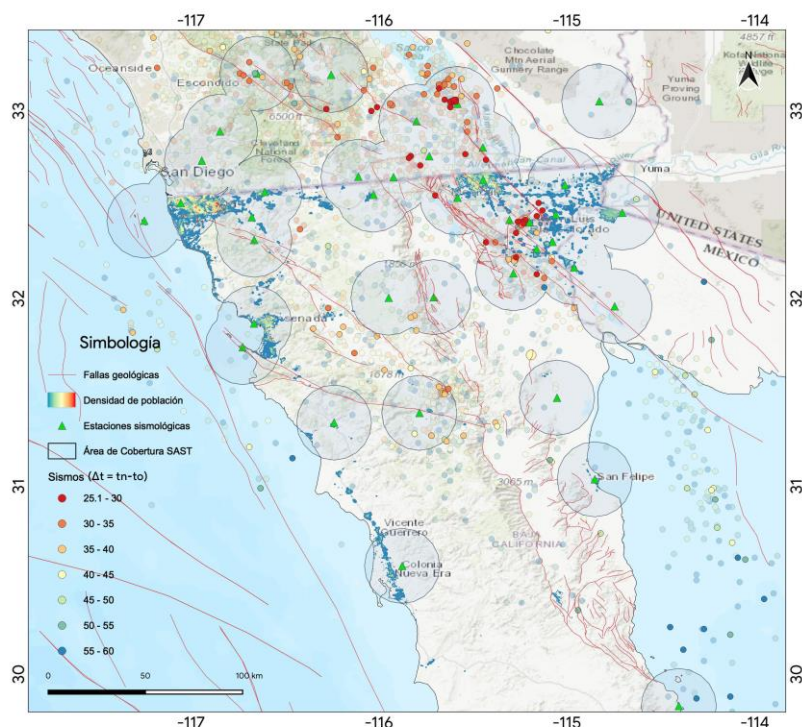


Figura 7. Cobertura actual de la RSC para el SAST. La región del valle de Mexicali presenta una buena cobertura, la cual disminuye hacia el Oeste. Los sismos están clasificados por la diferencia entre el tiempo de emisión de la primera notificación del SAST y el tiempo de origen del sismo ($\Delta t = t_n - t_o$). En color rojo se muestran los sismos en donde se obtuvo una notificación en un menor tiempo y en color azul se indica un tiempo mayor para la generación de la notificación tras la ocurrencia del sismo. Los sismos en colores desvanecidos son eventos de $\text{Mag.} < 3$

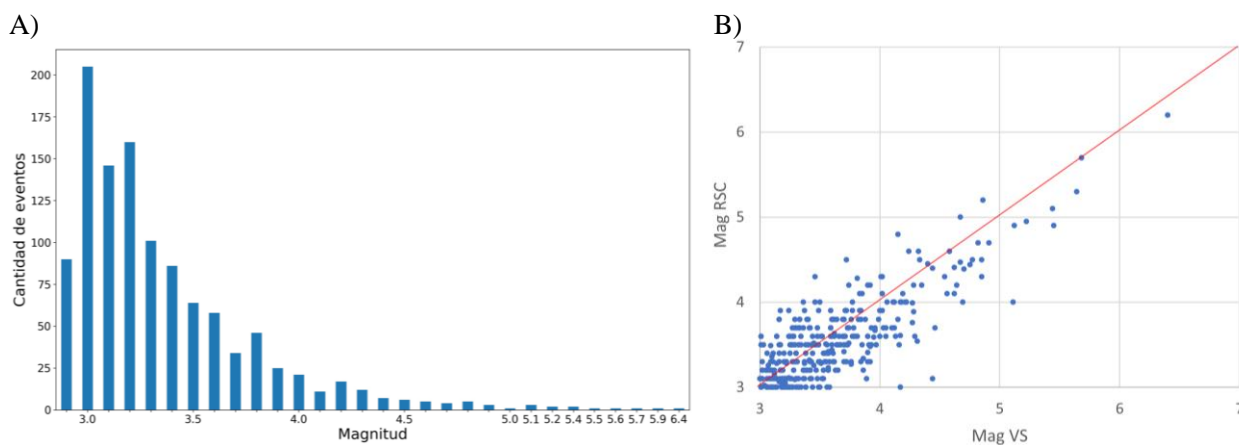


Figura 8. A) Distribución por magnitud de los 1120 sismos registrados por el SAST, $M \geq 2.9$ durante el tiempo evaluado. B) Comparación de las magnitudes calculadas por el sistema SeisComP/VS (Mag. VS) y las reportadas por la Red Sismológica del CICESE (Mag. RSC). La línea roja representa la igualdad entre ambas magnitudes

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se tiene un catálogo de más de 5000 eventos ($1.0 \leq M \leq 5.7$) localizados desde abril de 2017 a la fecha con el sistema *SeisComP3/VS*. Al hacer un análisis de éste podemos darnos cuenta de que a medida que se fue actualizando el *firmware* de las estaciones se presentó una mejoría en la velocidad con la que se emiten las alertas. Esto se puede apreciar en los tiempos (Δt) de los eventos (colores amarillos y naranjas) ubicados en la región del Valle de Mexicali (figura 7), por lo que se recomienda hacer la actualización del *firmware* a todos los equipos de la RSC en los que éste sea posible.

El espaciamiento o densidad de la red es otra de las características que se tienen que evaluar. Como es posible apreciar en la figura 7, la mayor densidad de estaciones se concentra en la región del Valle de Mexicali y en el extremo sur de la frontera México Estados Unidos (Valle Imperial). Otras zonas de interés, por su densidad de población, son las ciudades de Ensenada y Tijuana, que como se verá a continuación deberá incrementarse y mejorarse la cobertura de estaciones sísmicas.

Tiempos de respuesta. Seleccionamos sismos de dos zonas de interés para comparar los tiempos de respuesta del SAST para el norte de Baja California. Según la ubicación del sismo se presenta la distancia del epicentro hacia cada una de las ciudades de mayor densidad de población y el tiempo de en qué se recibe una primera alerta, previo al arribo de la onda *S*. En la tabla 2 se presenta el caso de sismos de las Sierras Peninsulares de Baja California. La diferencia de tiempos de arribo de la onda *S* menos el tiempo de notificación mostrados en esta tabla nos indican que se debe mejorar la cobertura de la red en las Sierras Peninsulares. En este caso la diferencia en tiempos no es buena para ninguna de las tres ciudades debido al espaciamiento grande entre las estaciones utilizadas para registrar y localizar sismos en esta zona (figura 7).

Tabla 2. Eventos en la región de las Sierras Peninsulares y tiempos de arribo a las ciudades con mayor población en el norte de Baja California

Fecha	Lat	Lon	Prof	Mag	Tiempo de arribo de <i>S</i> – tiempo de notificación / distancia a		
					Ensenada	Tijuana	Mexicali
2019-04-20 14:41:51	31.294	-115.721	11.7	4.7	0 s 103 km	12 s 184 km	6 s 151 km
2019-10-29 16:21:32	33.242	-116.763	5	3.8	7 s 154 km	0 s 85 km	3 s 140 km
2019-12-11 02:48:20	31.714	-116.133	5.2	4.3	0 s 45 km	2 s 125 km	3 s 119 km
2020-04-10 05:49:11	32.354	-116.4	20	3.5	0 s 58 km	0 s 66 km	0 s 95 km
2020-08-17 15:09:07	31.501	-115.647	6	4.7	0 s 98 km	11 s 175 km	0 s 128 km
2020-08-17 15:30:33	31.498	-115.643	5.5	5.1	0 s 98 km	11 s 175 km	0 s 128 km

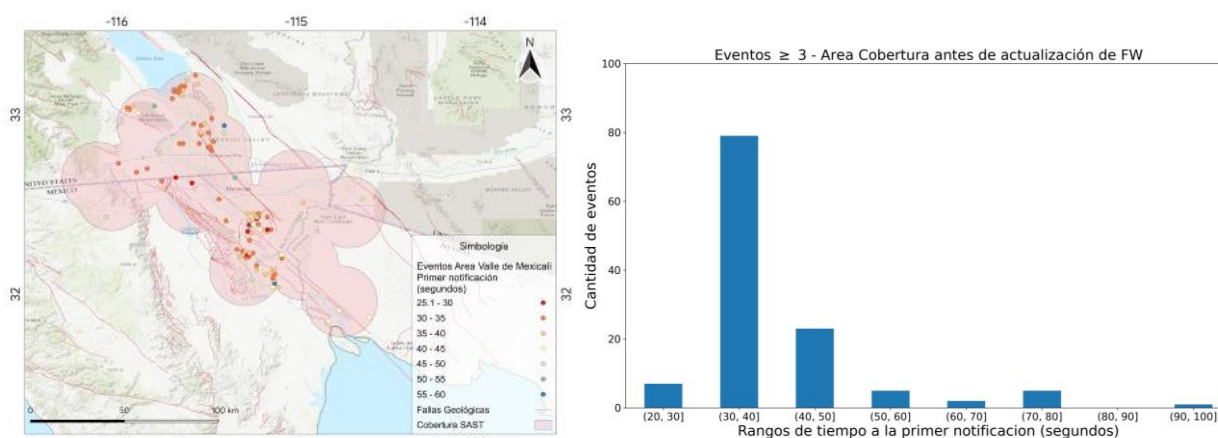
En la tabla 3, la diferencia de tiempos de arribo de la onda *S* menos el tiempo de notificación indican una buena cobertura de las estaciones para la zona del Valle de Mexicali; a pesar de que para la ciudad de Mexicali no es posible enviar una notificación previa, para las ciudades de Tijuana y Ensenada si es posible hacerlo con hasta 23 s de tiempo previo al arribo de la onda *S*. Para obtener mejores resultados, es recomendable realizar el cambio de *firmware* en las estaciones que aún no tengan la versión 3.7.8F.

Tabla 3. Eventos de la región del Valle de Mexicali y tiempos de arribo a las ciudades con mayor población en el norte de Baja California

Fecha	Lat	Lon	Prof	Mag	Tiempo de arribo de S – tiempo de notificación / distancia a		
					Ensenada	Tijuana	Mexicali
2019-11-12 02:13:52	32.776	-115.555	17.1	4.1	16 s 140 km	14 s 146km	0 s 19km
2020-01-12 05:21:02	32.383	-115.248	10	4.2	18 s 139 km	23 s 171 km	0 s 33 km
2020-03-07 03:52:02	31.671	-114.639	12.5	5.7	8 s 185 km	21 s 247 km	0 s 130 km
2020-05-10 22:07:40	33.019	-116.02	10	4.5	12 s 139 km	2 s 112 km	0 s 69 km
2021-03-31 08:56:24	32.347	-115.29	7.9	4.8	2 s 132 km	6 s 167 km	0 s 34 km
2021-06-05 17:55:58	33.14	-115.635	6	5.3	9 s 167 km	1 s 150 km	0 s 59 km

Consideramos que los principales factores que influyen para la correcta implementación de la alerta sísmica temprana es el enlace de transmisión por el que se envían los datos desde las estaciones hasta el sitio de procesamiento, y la velocidad con la que las grabadoras envían los paquetes de datos. Identificamos que las estaciones con menores tiempo de latencia son los que tienen enlaces por Internet Comercial e Internet Celular y en las que se realizó la actualización al *firmware*, como se describe en la sección *Tiempos de latencia*. En cambio, las estaciones con enlaces por Internet Satelital tienen los tiempos más altos (tabla 1).

Actualización del firmware. En las figuras 9 y 10 realizamos una comparación entre los tiempos de notificación para eventos que ocurrieron en el VM, pero con la diferencia de que un conjunto de sismos ocurrió antes de actualizar el *firmware* (2017/04 - 2019/06) a las grabadoras Reftek y otros después de la actualización (2019/07- 2021/03). De la figura 9 se aprecia que, de un total de 122 sismos, 7 tuvieron notificaciones comprendidas entre 20 y 30 s y para 79 sismos las notificaciones estuvieron comprendidas entre 30 y 40 s. Una vez actualizado el *firmware* en las grabadoras Reftek, el número de notificaciones se incrementó (figura 10), tanto para el intervalo de 20 a 30 s (36) como para el intervalo de 30 a 40 s (98) de un total de 163 sismos. Con esta comparación comprobamos la utilidad de haber cambiado el *firmware* en las grabadoras Reftek (reducir los tiempos de latencia y en consecuencia aumentar el número de sismos con el menor tiempo de envío de notificación de una alerta).

Figura 9. Mapa de sismos detectados en el área del VM previo a la actualización del *firmware*

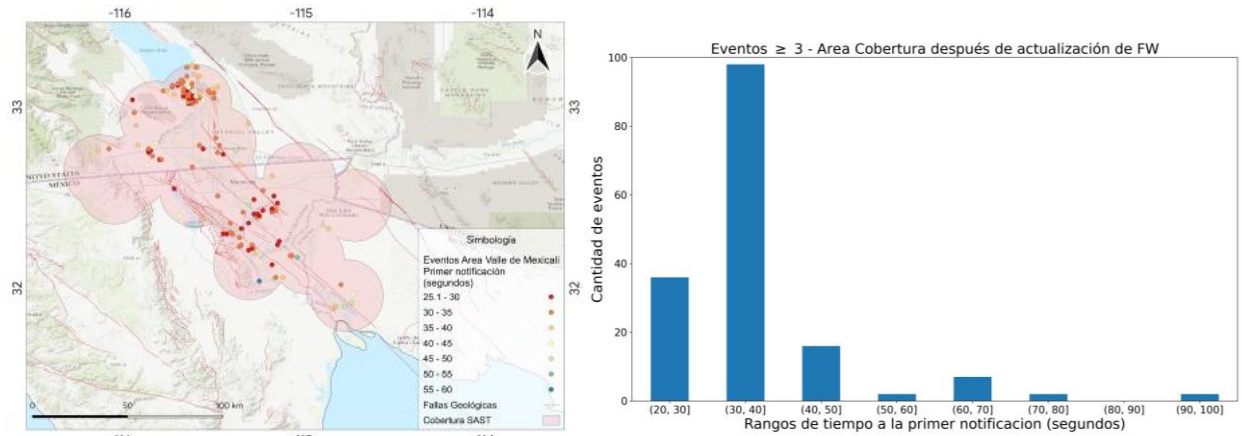


Figura 10. Mapa de sismos detectados en el área del VM posterior a la actualización del *firmware*

Trabajo en curso. Además de *SeisComp/VS*, usado en este trabajo, se ha explorado el uso del método *Finder* (Böse et al., 2018) para una implementación futura en el SAST. El desarrollo de este método y su incorporación en *SeisComp* es aún un trabajo en curso que está realizando el ETH. Se estableció comunicación con los autores del método, quienes nos dieron acceso a los códigos y en estas fechas está en proceso de configuración y ajustes para su uso en la RSC.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos consideramos plausible la implementación de un SAST para el norte de Baja California. Sin embargo, es necesario mejorar la densidad de estaciones para algunas zonas de la región y actualizar algunos equipos para mejorar los tiempos de latencia de las señales para su uso en un SAST. No obstante, ya se han obtenido resultados favorables principalmente en la región del Valle de Mexicali, lo cual permite que sea capaz de emitir alertas hacia otros centros de población como Tijuana o Ensenada, con tiempos de alrededor de 20 segundos. Consideramos que, con estos resultados, la RSC necesitaría, en una segunda etapa, mejorar su capacidad. Para lograr este propósito es necesario ampliar la cobertura de la RSC en las Sierras Peninsulares de Baja California y mejorar la latencia de las señales cambiando el *firmware* de todas las estaciones donde los esquemas de transmisión lo permitan. Así como, actualizar los esquemas de transmisión en zonas donde sea posible migrar a enlaces de Internet telefónico o celular. Es importante también explorar los avances en los nuevos algoritmos para los Sistemas de Alerta Sísmica Temprana.

AGRADECIMIENTOS

La Red Sísmológica del CICESE es mantenida en operación por el Departamento de Sismología del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, bajo el proyecto Número 643118, los recursos para su operación son otorgados por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Agradecemos las aportaciones de los investigadores del Departamento de Sismología del CICESE, quienes han contribuido a la mejora continua de la RSC. Un reconocimiento al Servicio Sísmológico Nacional de México y al Servicio Geológico Americano por su disposición para el intercambio de señales en tiempo real. Agradecemos especialmente a los desarrolladores de *Virtual Seismologist* y de *SeisComp*, por hacer su *software* robusto, eficiente, libre y de código abierto, lo

cual nos permitió implementarlo en la RSC. Agradecemos a los revisores sus comentarios que permitieron mejorar sustancialmente el presente trabajo.

REFERENCIAS

- Activemq.apache.org, (2021), "MQTT ActiveMQ Artemis Documentation". <https://activemq.apache.org/components/artemis/documentation/latest/> (accessed 7.29.21).
- Böse, M, D E Smith, C Felizardo, M A Meier, T H Heaton y J F Clinton (2018), "FinDer v.2: Improved real-time ground-motion predictions forM2-M9 with seismic finite-source characterization". *Geophysical Journal International*, 212, No. 1, pp. 725–742. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx430>
- Caltech, (2013), *Southern California Earthquake Center*. <https://doi.org/10.7909/C3WD3xH1>.
- Castro, R R, A Mendoza-Camberos y A Pérez-Vertti (2018), "The Broad Band Seismological Network (RESBAN) of the Gulf of California, México". *Seismological Research Letters*, Vol. 89, No. 2A, pp. 338-344. <https://doi.org/https://doi.org/10.1785/0220170117>
- Chavez, D, J Gonzalez, A Reyes, M Medina, C Duarte, J N Brune, F L Vernon III, R Simons, L K Hutton, P T German y C E Johnson (1982). "Main'shock location and magnitude determination using combined U. S. and Mexican data", en *The Impeial Valley, California, earthquake of October 15, 1979*, U. S. Geological Survey, Professional Paper 1254, pp. 51-54.
- Cauzzi, C, Y Behr, J Clinton, P Kästli, L Elia y A Zollo (2016), "An open-source earthquake early warning display". *Seismological Research Letters*, Vol. 87, No. 3, pp. 737–742. <https://doi.org/10.1785/0220150284>
- CICESE, (1980), *Red Sísmica del Noroeste de México*. <http://www.fdsn.org/networks/detail/BC/> (accessed 5.17.21).
- Cua, G B (2005), "Creating the Virtual Seismologist: Developments in Ground Motion Characterization and Seismic Early Warning", *Ph.D. Thesis*, California Institute of Technology, Pasadena California.
- Cua, G y T Heaton (2007), "The Virtual Seismologist (VS) method: A Bayesian approach to earthquake early warning", in: *Earthquake Early Warning Systems*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 97–132. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72241-0_7
- Doxsey-Whitfield, E, K MacManus, S B Adamo, L Pistolesi, J Squires, O Borkovska y S R Baptista (2015), "Taking Advantage of the Improved Availability of Census Data: A First Look at the Gridded Population of the World", Version 4. *Papers in Applied Geography*, Vol. 1, No. 3, pp. 226–234. <https://doi.org/10.1080/23754931.2015.1014272>
- ETH, (2020), "SED | Earthquake Early Warning". *Swiss Seismol. Serv.* URL http://www.seismo.ethz.ch/en/research-and-teaching/fields_of_research/earthquake-early-warning/ (accessed 5.17.21).
- Frez Cárdenas, J D y J J González García (1989), "Sismicidad y mecanismos focales en el Valle Mexicali-Imperial (1973-1985)". *Geofísica Internacional*, Vol. 28, No. 4, pp. 643–691.
- Given, D D, R M Allen, A S Baltay, P Bodin, E S Cochran, K Creager, R M de Groot, L S Gee, E Hauksson, T H Heaton, M Hellweg, J R Murray, V I Thomas, D Toomey y T S Yelin (2018), "Revised Technical Implementation Plan for the ShakeAlert System-An Earthquake Early Warning System for the West Coast of the United States". <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/ofr20181155>
- GmbH, Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences, gempa G., (2008),

"SeisComP seismological software package". *Helmholtz Cent. Potsdam GFZ Ger. Res. Cent. Geosci.* <https://doi.org/10.5880/GFZ.2.4.2020.003>

Hartog, J R, P A Friber, V C Kres, P Bodin y R Bhadha (2020). "Open-Source ANSS Quake Monitoring System Software". *Seismological Research Letters*, Vol. 91, No. 2A, pp. 677–686. <https://doi.org/10.1785/0220190219>

Havskov, J, P H Voss y L Ottemöler (2020). "Seismological Observatory Software: 30 Yr of SEISAN". *Seismological Research Letters*, Vol. 91 No.3, pp. 1846-1852.

Hauksson, E, J Stock, K Hutton, W Yang, J A Vidal-Villegas y H Kanamori (2011), "The 2010 Mw 7.2 El mayor-cucapah earthquake sequence, Baja California, Mexico and Southernmost California, USA: Active seismotectonics along the Mexican pacific margin". *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 168, pp. 1255–1277. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0209-7>

Johnson, C E, A Bittenbinder, B Bogaert, L Dietz y W Kohler (1995), "Earthworm: A flexible approach to seismic network processing". *Iris Newsl.* 14, pp. 1–4.

Lomnitz, C, F Mooser, C R Allen, J N Brune y W Thatcher (1970). Seismicity and tectonics of the northern Gulf of California region, México: Preliminary results. *Geofísica Internacional*, Vol. 10, No. 1, pp 37-48.

Munguía, L y A Vidal (1991), "Seismicity of the northern Baja California region: 1980 -1990". En P. L. Abbot y W. J. Elliot, Eds., *Environmental Perils San Diego Region*, San Diego Association of Geologists, San Diego, California, pp. 61-74.

Munguía, L, V Wong, A Vidal y M Navarro (1995). "La red de acelerógrafos del noroeste de México", en F. Medina, G. Suárez y L. Delgado (Eds.). *La sismología en México: 10 años después del temblor de Michoacán del 19 de septiembre de 1985 (M=8.1)*. Monografía No. 2, UGM, pp. 198-211.

Rockwell, T K y Y Klinger (2013). "Surface rupture and slip distribution of the 1940 Imperial Valley Earthquake, Imperial Fault, Southern California: implications for rupture segmentation and dynamics". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 2A, pp. 629-640, doi: 10.1785/0120120192

Rodríguez-Pérez, Q, L Ottemöller y R R Castro (2012). "Stochastic finite-fault ground-motion simulation and source characterization of the 4 April 2010 Mw 7.2 El Mayor-Cucapah earthquake", *Seismological Research Letters*, Vol. 83, No. 2, pp. 235-249, doi:10.1785/gssrl.83.2.235

Shor, G G, Jr., y E Roberts (1958). "San Miguel, Baja California Norte, earthquakes of February 1956: a field report", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 48, No. 2, pp. 101-116. <https://doi.org/10.1785/BSSA0480020101>

UNAM, (1998), *Servicio Sismológico Nacional*. UNAM. URL <http://www.ssn.unam.mx/> (accessed 5.17.21).

Vidal, A y L Munguía (1993). "Diez años de funcionamiento de la Red Sísmica del Noroeste de México", *Ciencia y Desarrollo*, Vol. 18, No. 108, pp. 77-85.

Vidal-Villegas, J A, L Munguía, J A González-Ortega, M A Nuñez-Leal, E Ramírez, L Mendoza, R R Castro y V Wong (2018), "The northwest Mexico seismic network: Real- time seismic monitoring in northern baja California and northwestern sonora, Mexico". *Seismological Research Letters*, Vol. 89, No. 2A, pp. 324-337. <https://doi.org/10.1785/0220170183>

Wong, V, J Frez y F Suárez (1997). "The Victoria, Mexico earthquake of June 9, 1980", *Geofísica Internacional*, Vol. 36, No. 3, pp. 139-159.