



ELSEVIER



CrossMark

ScienceDirect

Disponible en www.sciencedirect.com

RIAI

Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 12 (2015) 260–269

www.elsevier.es/RIAI

Sistema Distribuido de Detección de Sismos Usando una Red de Sensores Inalámbrica para Alerta Temprana.

Ana Zambrano Vizueté*, Israel Pérez Llopis, Carlos Palau Salvador, Manuel Esteve Domingo.

Departamento de Comunicaciones, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, no14, 46022, Valencia, España

Resumen

El detectar eventos disruptivos usando sensores COTS como los utilizados en *smartphones* representa un gran desafío pero también una oportunidad interesante. En este artículo se presenta una arquitectura de sistema de tiempo real crítico, jerárquica y distribuida, que hace uso de *smartphones* que actúan como sensores a través de una aplicación de bajo consumo de energía que convierte a sus acelerómetros en acelerógrafos. Los *smartphones* desplegados forman una red de sensores que detecta, analiza y notifica un pico sísmico. El sistema optimiza cálculos distribuidos y capacidades de comunicación en *smartphones* para proveer tiempo extra para alertas tempranas en escenarios de desastre de tipo sísmico, aunque puede ser empleada como solución a otros desastres naturales. Se propone una solución innovadora de bajo coste que realiza análisis tanto espaciales como temporales, no presentes en otros trabajos, lo cual lo hace más preciso y personalizable permitiendo adaptarse a las características geográficas de la zona, de red, y recursos tanto humanos como monetarios. La arquitectura ha sido validada mediante una extensa evaluación, consiguiendo como resultado notificaciones tempranas que adelantan en decenas de segundos el pico máximo del sismo en la zona del epicentro y aún más para zonas más alejadas; y la considerable reducción de falsas alarmas. Adicionalmente la arquitectura propuesta incluye una administración post-evento que mejora la capacidad operativa, logística y de telecomunicaciones desde un solo nivel central, y al mismo tiempo, mantiene al usuario informado de centros de refugios cercanos, mejores rutas, rutas seguras para una mejor decisión. *Copyright* © 2015 CEA. *Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.*

Palabras Clave:

Acelerómetros, Arquitectura, Detección Distribuida, Integración Multi-sensor, Tiempo real.

1. Introducción

La actividad sísmica es uno de los más frecuentes y destructivos desastres naturales que cuesta miles de millones de euros en pérdidas de bienes y servicios, y peor aún, vidas humanas. La vida de una persona tiene un coste incalculable, por tanto el tener un mecanismo de prevención es de gran importancia, y el poder tomar una decisión acertada durante y después de la catástrofe se torna transcendental. La idea principal del proyecto que describe el presente artículo es analizar, diseñar y desarrollar una arquitectura en tiempo real crítico que sea eficiente, rápida y escalable aprovechando recursos sociales existentes como el *smartphone* (SP) para construir un sistema completo de alertas tempranas de bajo coste para zonas e incluso países, como Ecuador (STGR, 2012), que se encuentra situado en la zona circuí-Pacífica donde se origina el 80% de los sismos terrestres, en cuyos datos se basa parte de la investigación desarrollada. Sismos como los de Ecuador en 1949, Colombia en 1999, Perú 1970 y en 2007, y Chile en 1939 y en 2010, que dejaron alrededor de 105.000 pérdidas humanas en segundos, son una pequeña muestra de lo citado (USGS, 2013).

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: anzamvi@posgrado.upv.es (A. Zambrano Vizueté) ispello0@upvnet.upv.es (I. Pérez Llopis), cpalau@dcom.upv.es (C. Palau Salvador), mesteve@dcom.upv (M. Esteve Domingo).

El tráfico de nube móvil representará el 71%, ó 7.6 exabytes por mes del total del tráfico de datos móviles para el año 2016 y crecerá 18 veces en los próximos 5 años. El fuerte aumento se debe, en parte, al incremento proyectado del número de dispositivos conectados con internet móvil que excederá el número de personas sobre la tierra que se estima para el año 2016 será de 7.3 mil millones (Cisco Systems, 2014). Se aprovecha éste obvio auge tecnológico, un avanzado ordenador multipropósito y multisensor en un pequeño dispositivo, el SP, como elemento principal en el propósito de la arquitectura al comportarse como un acelerógrafo, y aunque sus capacidades sean mucho menores que un *hardware* sísmico específico, sirve para tener miles de sensores cubriendo todo un territorio lo cual se torna económicamente imposible con dispositivos específicos. Estos dispositivos pueden servir como puente al conocimiento del mundo físico real a través de una gran cantidad de datos recopilados de los SPs, conocido como “*mobile crowdsensing*” (Raghu Gantl *et al.*, 2011). Existen ya muchas aplicaciones de detección oportunista (Raghu Gantl *et al.*, 2011) que sustenta el hecho de que aunque los pesos individuales no sean suficientes (calidad baja de los sensores), el peso medio de la comunidad (dado un número suficiente de individuos) puede ser computado con alto grado de precisión.

Se pretende construir una red de acelerógrafos en una arquitectura jerárquica para alerta temprana en 3 niveles. El Nivel 1 donde los SPs son usados como sensores y unidades de procesamiento que enviarán muestras cuando detecten un incremento de aceleración significativo que corresponda a un pico sísmico a un Servidor Intermedio (IS) correspondiente al Nivel 2. Cada IS debe identificar si ha existido verdaderamente un evento e inmediatamente notificar al usuario, y al mismo tiempo comunicar al Centro de Control (CC) este incidente. Finalmente el CC, correspondiente al Nivel 3, suministrará información y generará alarmas a otros ISs (que a su vez notificarán a sus respectivos SPs), a organismos encargados de la toma de decisiones y centros de ayuda.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: Primero, se presentan trabajos previos relacionados y su respectiva contribución en el área. La siguiente sección contiene la estructura de la arquitectura propuesta con su respectiva justificación; posteriormente el proceso del IS es detallado para finalmente terminar con los resultados y conclusiones obtenidas de la investigación.

2. Motivación y Trabajos relacionados

Cuando un evento sísmico ocurre, la primera decisión puede ser la diferencia entre permanecer vivo o no, y esta depende del tiempo disponible para pensar la mejor opción (Kontogiannis and Kossiavelou, 1999); por ejemplo en México en 1995 en un sismo de 8.0 grados de magnitud, miles de vidas pudieron ser salvadas porque se pudo alertar a la población con 50 segundos de antelación con un sistema de este tipo (Allen, 2011). El principal objetivo del trabajo es detectar la ocurrencia de actividad sísmica (picos de aceleración) en un corto tiempo, típicamente en el orden de minutos o segundos. Aunque este podría ser considerando un plazo de tiempo muy pequeño, muchos estudios revelan que es suficiente para salvar vidas (considerando que es suficiente tiempo para salir de un edificio y de grandes estructuras) (Allen, 2011). De ahí el carácter de tiempo real crítico de un sistema de detección y alerta temprana.

Los trabajos más recientes de la literatura se han orientado a mejorar los sistemas de monitorización y alerta temprana usando diferentes procedimientos. A continuación algunos de los proyectos más relevantes en la detección sísmica son citados:

- *QuakeCast* (Chandy et al., 2011): Es un proyecto que detecta eventos usando acelerómetros en 3 ejes, localiza su epicentro, determina su intensidad y envía alarmas. Este usa un dispositivo estático compuesto de un acelerómetro y de un ordenador personal lo cual entrega una alta precisión en el uso de ondas P y S (Bormann et al., 2012) como mecanismo de detección de picos.
- *IShake* (Ervasti et al., 2011): Es un sistema desarrollado por la Universidad de Berkeley que usa SPs para medir aceleraciones y determinar la llegada de un sismo bajo el Sistema Operativo IOS de Apple, contradiciendo la tendencia de mercado que lidera Android (Bimal, 2010). Al contrario de nuestra propuesta que usa un acelerómetro como sensor principal, *IShake* añade una brújula como nuevo sensor para validación de picos.
- *Community Sensor Network (CSN)* (Faulkner et al., 2011): Creado por California Institute of Technology es uno de los proyectos más completos, que obtiene información desde los SPs e implementa procesos de decisión bajo la nube Google,

usando servidores virtuales dentro de la arquitectura Google App Engine (Google Cloud Plataform, 2013). Y usando el mismo tipo de infraestructura en *cloud*, (Finazzi et al., 2014) es un proyecto en uso, con gran acogida, implementado con análisis estocásticos.

Por su diseño estático, *QuakeCast* no ofrece movilidad ni distribución espacial mientras que esta propuesta sí, por tanto la arquitectura planteada aporta un valor añadido al incorporar dispositivos heterogéneos tanto en *hardware* y *software*, escalabilidad y nuevos algoritmos de detección que involucren la movilidad del usuario y que mejoren la fiabilidad del sistema. Mientras que *QuakeCast* gana en precisión, este pierde en cobertura y número de sensores por el incremento en coste económico y dificultad de implementación.

IShake presenta limitaciones de uso ya que una orientación precisa no puede ser obtenida si el dispositivo se encuentra en constante movimiento, y por tanto fuerza al sistema a mantenerse estacionario, y así ha sido probado. Por el contrario, nuestra propuesta ha sido evaluada emulando condiciones reales obteniendo resultados alentadores. *IShake* usa como servidor un equipo especializado de U.S. Geological Survey (USGS) que por su magnitud y coste tiene la certeza de si sucedió un evento o no; realiza la comparación entre muestras recibidas para lo cual es necesario que este servidor haya detectado previamente el evento, dejando de ser un sistema en tiempo real crítico ya que toma tiempo extra en la doble validación. El sistema propuesto toma en cuenta requisitos temporales estrictos que conlleva consideraciones adicionales.

Si un día un desastre se presenta y *Google* deja de existir, *CSN* también; o de forma más realista, si *Google App Engine* deja de brindar servicios por 1 hora, *CSN* dejará de prestar servicios de la misma manera; así *CSN* se encuentra en manos de *Google*. La arquitectura propuesta se ha desarrollado usando *software* libre y no depende de productos de terceros, que obligue a cumplir condiciones para su operación; se vea obligada a realizar cambios constantes por actualizaciones o por cambios de licencia de uso. Se presenta una arquitectura bajo una plataforma independiente, personalizable a los requerimientos de la zona, de la población y comunicaciones disponibles funcionando con redes heterogéneas.

Pensando que es un sistema de prevención suponemos que las comunicaciones se encuentran funcionales cuando la alarma es generada dando tiempo suficiente para agilizar procesos de evacuación y rescate (Gelenbe et al., 2012); sin embargo en el caso de un evento sísmico donde es posible que las comunicaciones caigan, otras soluciones pueden ser empleadas (Gorbil et al., 2011).

El proyecto (Finazzi et al., 2014) usa SPs para obtener data cuando supere un umbral fijo y posteriormente enviar un "vibration event" al servidor de análisis. Nuestra propuesta distribuida permite que la información sea previamente procesada por cada SP antes de ser enviada al Servidor; permitiendo optimizar en consumo de batería móvil (Ver resultados), y las ventajas implícitas en una arquitectura distribuida (Coulouris et al., 2011).

La incorporación de un tercer agente, el CC, incorpora una nueva ventaja al permitir un manejo post evento para ayudar a los diferentes centros de ayuda y usuarios a tomar una mejor decisión como: (i) conocer la ubicación de centros más cercanos a cada usuario. (ii) escoger la mejor ruta. (iii) Dar a conocer las áreas que necesitan mayor asistencia. (iv) Cuantificar los daños.

3. Arquitectura

La arquitectura del sistema sigue un modelo jerárquico y está compuesta por tres niveles mostrados en la Figura 1. El primer nivel es básicamente una red de sensores de SPs que obtienen la información a procesar; el segundo, compuesto por ordenadores con los recursos necesarios, tanto *hardware* y *software*, llamados ISs, que reciben y envían información a todos los SPs que se encuentren en su rango de cobertura; y por último el nivel 3, correspondiente al CC, que mantiene una visión global, certera y actualizada de la situación, siendo el responsable de organizar y ordenar toda la arquitectura con una gestión eficiente de recursos.

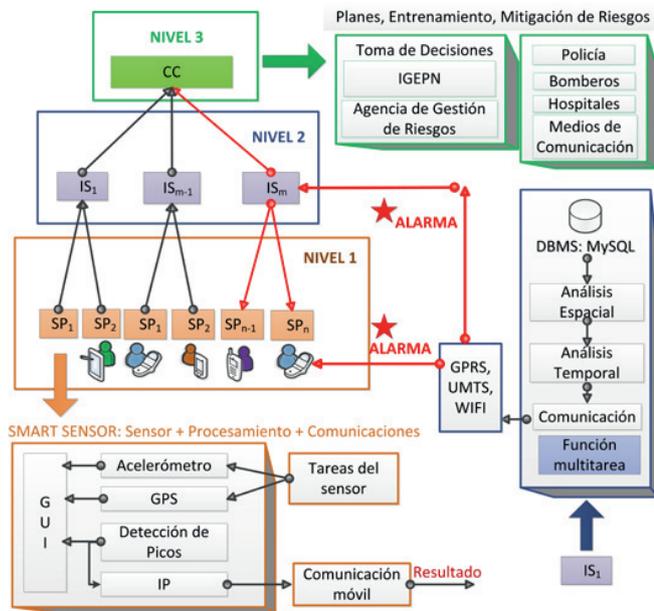


Figura 1: Arquitectura en 3 niveles: Nivel 1: Red de smartphones; Nivel 2: Servidores Intermedios; Nivel 3: Centro de Control y toma de decisiones.

La arquitectura presenta las siguientes características: (i) Mantenimiento sencillo: Es responsabilidad del usuario suponiendo pocos segundos en la instalación y actualización de la aplicación. (ii) Adaptable y Escalable: Los SPs no deben percibir un cambio excesivo de prestaciones por la presencia de 10, 100, 1000 o incluso 10000 SPs en el sistema; para ello se permite la instalación de nuevos ISs para ayudar con peticiones, notificaciones y proceso a un servidor que lo necesite, y así distribuir la carga de trabajo entre múltiples servidores. (iii) Confiable: El fallo de un componente individual no deshabilita el sistema en conjunto pudiendo continuar ejecutando sus acciones. (iv) Seguro: Para evitar que la información sea interceptada o adulterada, se ha empleado *MQTT* sobre *SSL* junto con un mecanismo de autenticación mediante prefijos (prefijo secreto y oculto proporcionado por el IS más cercano una vez que el Cliente pida la instalación de la aplicación); (v) Sincronización: Se usa *Network Time Protocol* (NTP) para la sincronización entre niveles donde el CC actúa como servidor NTP. (vi) Comunicaciones: Soportan diferentes tecnologías de comunicaciones por las capacidades multi interfaz de los SPs. (WiFi, GPRS, WIMAX, 3G o 4G). Desde el punto de vista de la aplicación esta puede conmutar de una tecnología a otra cuando se detecta la pérdida de conexión. (vii) Bajo consumo de batería:

Se ha considerado para evitar el alto impacto en la experiencia de usuario y fomentar el uso de la aplicación. (viii) Despliegue de bajo coste: Una gran cantidad de sensores con costo nulo. (ix) Cobertura: Puede cubrir cualquier espacio físico, e instalarse en cualquier localidad solamente ajustando la validación a las condiciones de cada zona. (x) Precisión: Los picos sísmicos deben ser manejados con cuidado porque una falsa alarma puede causar el caos y también disminuir la credibilidad del sistema. El sistema logra un alto nivel de precisión llegando al 90% apoyado en las pruebas realizadas.

3.1. Aplicación Cliente y Proceso de Aceleración

La aplicación en los SPs debe ser simple, no interferir en el uso diario que el usuario da al SP y cuidar el consumo de batería ya que es el motivo principal para dejar de usar una aplicación (Wasserman, 2010). Con respecto a los problemas de implementación, el Sistema Operativo Android ha sido escogido por las amplias ventajas que presenta, citadas en (Bimal, 2010). La aplicación ha sido desarrollada para adaptarse a las ventajas y capacidades de la plataforma Android API 2.2 “Froyo”, que presenta las funcionalidades necesarias para la manipulación de sensores y redes; y cubre más del 95% de los usuarios en este Sistema Operativo (Bimal, 2010), con tendencia creciente gracias a que nuevas versiones siempre son compatibles con las anteriores. Ya que la precisión del sistema aumenta a medida que aumente el número de SPs, se están desarrollando diferentes versiones de la aplicación tanto en Windows Mobile y Apple. La Figura 2 muestra el algoritmo diseñado y desarrollado para detectar picos de aceleración que representen el poder de destrucción de un sismo y posteriormente detallado.

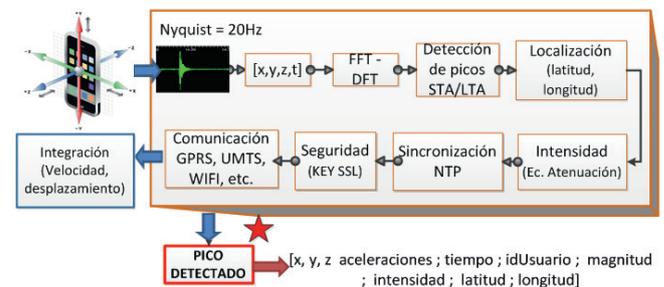


Figura 2: Proceso de detección de picos en un smartphone.

Ya que las señales sísmicas generalmente presentan componentes de frecuencia en el rango de 1 a 10 Hz, se crea un proceso en *background* que recopila muestras siguiendo el teorema de muestreo de *Nyquist* (Herron and Latimer, 2011), que dice que “la frecuencia de muestreo debe ser el doble que la máxima frecuencia contenida en la señal”; por tanto se analizan muestras 20 veces por segundo (intervalo de muestreo de 0.05 segundos); y aunque parezca una tasa de muestreo elevada, no lo es, considerando que equipos especializados más precisos (sismógrafos o acelerógrafos) toman 100 o más muestras por segundo. El realizar el proceso con la mínima frecuencia permitida es una de las razones primordiales de la mejora en consumo de batería con respecto a trabajos previos.

Un acelerómetro mide los cambios de aceleración en cada eje [x, y, z] y para obtener la aceleración neta se usa Pitágoras sin

olvidar la aceleración de la gravedad g como señala (1) y gráficamente mostrada en la Figura 3 (por ejemplo).

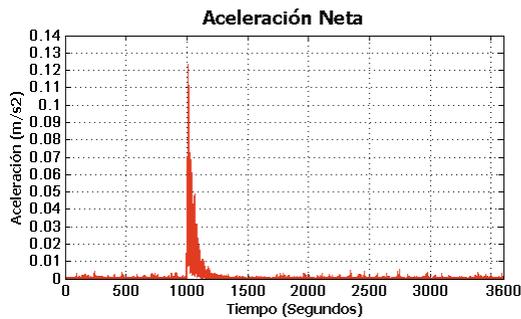


Figura 3: Aceleración neta obtenida del sismo Colombia 09/02/2013.

$$a = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - g, \quad g = 980 \text{ gals} \quad (1)$$

Habiendo obtenido la aceleración total para un instante de tiempo determinado, se debe tener en cuenta la repercusión que el ruido tiene sobre este acelerograma; de esta manera definimos a un acelerograma como la unión de la señal sísmica y ruido en función del tiempo. Se usa la transformada discreta de Fourier (*DFT*) (Sheng et al., 2005) para cambiar del dominio del tiempo al de la frecuencia, el cual permite aplicar filtros pasa-bajos para eliminar las altas frecuencias que corresponden al ruido que afecta directamente a los picos de la señal (Carreño et al., 1999). Aunque existen otros filtros usados en sismología, la *DFT* por medio de la transformada rápida de Fourier (*FFT*), es de las más usadas por su facilidad y reducción de cálculo al poder ser representada de forma matricial (Carreño et al., 1999) que simplifica incluso su programación.

Posteriormente se usa *Short Term Averaging / Long Term Averaging (STA/LTA)* (Sharma et al., 2010) por su gran uso en sismología en la detección de eventos; su sencillez otorga una gran ligereza y poca cantidad de cálculo permitiendo ahorrar energía contribuyendo al éxito global del sistema, e incluso siendo usados en otros ámbitos como (Casamayor et al., 2010). Mientras que *STA* permite el cálculo del valor actual (*VA*) a partir de las últimas N muestras, *LTA* permite aproximar el valor predicho (*VP*) a partir de M muestras, siendo $N < M$; y por tanto las muestras de *STA* están contenidas en las de *LTA*. Se considera un pico sísmico siempre y cuando la relación VA/VP supere un umbral determinado. Un sismógrafo común toma un umbral fijo ya que este dispositivo se encuentra en reposo, sin embargo en el escenario planteado no se puede garantizar que el SP se encuentre en este estado, razón por la cual se define un umbral dinámico que varía dependiendo del valor que tome VA/VP ; si esta relación aumenta, el umbral aumenta al último valor medido; y si disminuye éste disminuye también; el objetivo está en captar los cambios bruscos de aceleración. El mantener un umbral dinámico ayuda a que movimientos periódicos del usuario como correr, trotar, caminar, etc., que presentarán un umbral superior al normal, sean descartados como un pico sísmico.

A continuación, si el algoritmo *STA/LTA* detecta que ha existido un pico, la aplicación accede al sensor GPS para obtener la localización actual del usuario, que es necesaria para una validación realizada en el IS (Ver apartado 4.1). En el caso en que la aplicación no logró conseguir la ubicación del usuario, la muestra no será enviada al IS.

Posteriormente, en un sistema de tiempo real crítico es necesario mantener una misma línea temporal en toda la arquitectura, para lo cual implementamos el protocolo *NTP* que sincroniza relojes con un servidor situado en el CC. Por último, si los SPs y el IS determinan un sismo, se envían alarmas usando *Message Queue Telemetry Transport (MQTT)* (Hunkeler et al., 2008), un protocolo de mensajería para notificaciones en tiempo real diseñado específicamente para pequeños dispositivos por su mensajería de baja carga, uso mínimo de batería, envío mínimo de paquetes (memoria), distribución eficiente de la información de uno a varios receptores, facilidad para la conexión con dispositivos remotos y otros.

3.2. Aplicación Servidor Intermedio

El núcleo de la aplicación ha sido desarrollado en JAVA, actualmente es compatible con plataformas Windows y UNIX 64 bits y su principal objetivo es lograr precisión y una pronta respuesta. El IS se desarrolla mediante eventos asíncronos por diferentes hilos de trabajo, y se encuentra siempre escuchando un puerto en espera de información proveniente de los SPs, que será almacenada en una base de datos *MySQL*. Cada IS toma todas las muestras y computa tan rápido como le es posible determinando si estos datos representan un peligro real, y si debe o no ser notificado a cada uno de los usuarios.

Para determinar la existencia de un sismo y reducir la tasa de falsas alarmas, el IS realiza algunas validaciones que incrementan la confiabilidad en el sistema completo. La Figura 4 representa un diagrama de flujo que detalla el proceso que sigue un IS, que se analiza con detalle en el apartado 4.

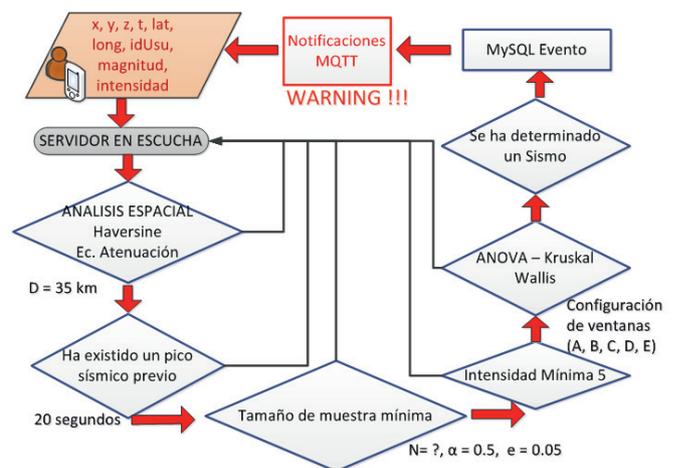


Figura 4: Diagrama de Flujo de validación en el Servidor Intermedio.

3.3. Centro de Control

El CC es un nodo central que actúa como puesto de mando y control, liderando la gestión de emergencias a través de información actualizada enviada por los usuarios del sistema. Éste nos permite extendernos a una ayuda bidireccional entre niveles, donde primero, cada SP ayuda al CC enviando información multimedia (comentarios, videos e imágenes) logrando así una visión global del desastre, y por tanto puede gestionar de mejor manera a los diferentes cuerpos de ayuda: zonas más afectadas, búsqueda de personas, distribución de suministros, etc. Y por otro lado, ayuda a los usuarios a tomar una mejor decisión con información de centros de ayuda cercanos, con la ruta más adecuada, segura o rápida que el usuario debe seguir.

4. Descripción de Servidor Intermedio

4.1. Análisis Espacial

Este análisis se realiza por medio de ecuaciones de atenuación y la distancia de *Haversine* (Robusto, 1957) logrando definir el radio o la distancia óptima que cada IS debe cubrir para aceptar o rechazar muestras (distancia entre el IS y cada SP). Otros proyectos relacionados se limitan a dividir en el área de monitorización en áreas rectangulares como (Faulkner, 2011), sectorizar (Finazzi et al., 2014) o simplemente no lo toman en consideración. Aunque estas son específicas y difieren dependiendo de cada zona geográfica, esto se convierte en una ventaja al crear un servidor personalizado y específico que se acopla a las características únicas de la zona. Las ecuaciones o leyes de atenuación son relaciones semi-empíricas que relacionan magnitud M_w , intensidad/aceleración A_{gals} y distancia Hipocentral/Epicentral D ; por ejemplo, la de Ecuador (Beauval, et al., 2010) en (2), la cual fue empleada para el análisis.

Las ecuaciones de atenuación muestran como la intensidad disminuye conforme la distancia aumenta; entonces si existe un sismo, los SPs en un área A medirá una aceleración mayor que una zona más lejana B . De no realizar esta sectorización se tendrían valores de intensidad en el rango I_{MM} [0-12] (Wood and Neumann, 1931) que no tendría sentido analizar, porque no reflejarían una coherencia. Es necesario un balance entre número de muestras y efectividad, si la distancia D es demasiado pequeña puede ser el caso de que el IS se quede sin muestras de análisis porque no existen SPs dentro de la cobertura; y si es muy largo, las muestras pueden dejar de estar correlacionadas perdiendo significado.

Para calcular este rango es necesario dos consideraciones: (a) La magnitud mínima a detectar es 5 porque la precisión de un SP no permite detectar valores menores de aceleración correspondientes a esta intensidad y porque la percepción de una persona ante un evento menor no tiene sentido de ser alertada. (b) La aceleración A_{gals} se obtiene de (Aguiar, et al., 2010); y reemplazando estos valores en (2), y posteriormente desglosada, se obtiene una distancia D igual a 35 kilómetros, la cual corresponde a la distancia máxima de hipocentro, que como vemos en la Figura 5 que corresponde al a distancia del epicentro que es la distancia medida en la superficie, y la de interés.

$$\log(A_{gals}) = 1.2474 + 0.3735 * M_w - 0.4383 * \ln(D + 10) \quad (2)$$

$$\log(5.2496) = 1.2474 + 0.3735(5) - 0.4383 * \ln(D + 10)$$

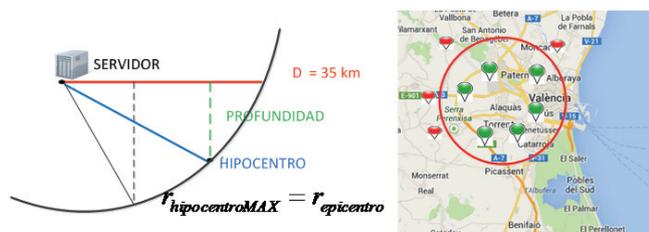


Figura 5: Distancia D calculada para una $I_{MM} = 5$. Radio de cobertura de un IS para aceptar o rechazar muestras.

Las muestras llevan asociadas una latitud y longitud que de no satisfacer la función de *Haversine* entre la localización del IS y la del SP, como muestra la Figura. 5, serán descartadas debiendo ser considerada por otro IS más cercano.

4.2. Prueba de muestra mínima

Esta prueba determina si el número de muestras de SPs enviadas son suficientes para deducir que un sismo ha sucedido (Cochran, 1963). Los SPs activos mantienen una comunicación constante con el IS, mientras que los SPs inactivos no tienen una localización o han perdido conexión de red o no tienen batería, etc. La prueba muestra cuantos SPs (activos) de todos los registrados serían suficientes para generalizar la población con un porcentaje de confiabilidad de $(0.95 = 1.96 \text{ sigma/error})$ y un margen de error del (0.05 %).

Tanto los SPs como los ISs hacen validaciones para determinar que SPs están activos y cuáles no; primero, los SPs envían *beacons* y constantemente monitorizan la red para prontas reconexiones, y segundo, los ISs validan la última conexión y después de un tiempo definido en 30 minutos cambia de estado el SP en la base de datos de activo a inactivo. La variación de estos parámetros es importante para el consumo de batería de los SPs.

4.3. Prueba de Kruskal Wallis

Kruskal Wallis (Kruskal and Wallis, 2004) es una prueba estadística no paramétrica que determina si un conjunto de datos proviene de una misma población, dado que dos grupos son diferentes cuando la variabilidad entre grupos es mayor que la variación dentro del grupo. *Kruskal Wallis* retorna un umbral que representará cuanto las muestras de cada grupo están correlacionadas en una misma ventana de tiempo. Para este trabajo, el umbral debe ser mayor a 0.5 tratando de evitar las falsas alarmas pero garantizando una correlación media. Para usar *Kruskal Wallis* se ha desarrollado un algoritmo de ventanas deslizantes, detallados en la Figura 6, definida por 5 valores de configuración (A, B, C, D, E):

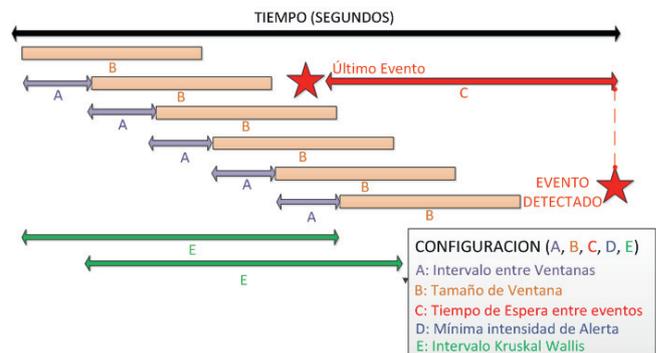


Figura 6: Algoritmo de ventanas deslizantes y Configuración de ventanas.

Cada configuración es analizada y comparada (Apartado 5.2) tanto en probabilidad de correlación, número de picos sísmicos detectados, intensidad mínima detectada, y lo más importante, con cuanto tiempo se anticipa al mayor pico del evento sísmico. Tras este proceso, se llega a la configuración óptima:

- *Configuración Óptima (0.3, 1, 20, 5, 1)*: el algoritmo se realiza tres veces en cada ventana ($A = 0.3, E = 1$) de tamaño 1 segundo ($B = 1$), probando si la variabilidad entre muestras excede el umbral de *Kruskal Wallis* de 0.5 o no. Siguiendo, intentando eliminar el riesgo de notificar réplicas al usuario, este valida que el tiempo entre el último y el presente evento sea al menos de 20 segundos ($C = 20$). Y por último, la mínima intensidad de alerta es 5 en escala de Mercalli Modificada ($D = 5$).

4.4. Message Queue Telemetry Transport (MQTT)

MQTT es un modelo suscripción/publicación en tiempo real. Trabaja con un agente intermedio llamado *Broker* que es el encargado de conseguir paquetes desde/hacia un/varios cliente/s. Ofrece privacidad, autenticación y seguridad sacándole ventaja a la utilización de *UDP*, que a pesar de ser usado en la mayoría de proyectos de emergencia por su sencillez (sin control de congestión), reducida sobrecarga y la rápida transferencia de datos, es un protocolo poco fiable; razón por la cual existen nuevas variantes específicas como *Real-Time transport protocol (RTP)* (Waraporn et al., 2011). Es capaz de acoplarse a los requerimientos de cada sistema usando diferentes tipos de calidades de servicios (QoS) de los cuales el más bajo, sin ACKs, es el empleado (Cero retardos).

5. Evaluación y Resultados

5.1. Aplicación Cliente

La aplicación ha sido probada mediante la agitación de una mesa de demostración donde los SPs descansan tal como en (Suzuki et al., 2007); y a pesar de que los SPs no presenten la misma calidad de acelerómetro que grandes dispositivos específicos, la aplicación logra percibir incluso la vibración debida a la llegada de un mensaje de texto al terminal; de esta manera verificamos que los acelerómetros *MEMS* (Sistemas-Micro-Electro-Mecánicos) tienen la capacidad suficiente para esta investigación, y a su vez, sustenta otros trabajos de manipulación de este sensor en diferentes ámbitos como salud (Kwapisz, et al., 2010), transporte (Mohan, et al., 2008), etc.

Para probar la eficiencia del proceso de aceleración, la aplicación fue instalada en 40 SPs voluntarios donde fueron usados durante 2 meses sujetos a actividades cotidianas. Durante este tiempo en promedio, la aplicación ha funcionado con gran precisión (dado que ha sido probado en un escenario real tiempo, localización, actividades de usuario) obteniendo la Tabla 1.

Tabla 1: Desempeño de validación de picos en Servidor Intermedio.

	Sismo (simulado)		No Sismo	
	Reposo	No Reposo	Reposo	No Reposo
#SPs	33-35	39	2-3	0
%SP	82.5 – 87.5	97.5	5-7	0
% Falso Negativo			8.75%	
% Falso Positivo			3.25%	

Falso Negativo: No alertar un sismo existente.
Falso Positivo: Alertar un sismo inexistente.
Tabla con valores promedio.

De la Tabla. 1 podemos concluir que se supera una eficiencia en movimiento del 90%(No reposo), siendo mayor obviamente cuando el SP se encuentra en reposo. De esta prueba también se observa que el porcentaje de error, sea un falso-positivo o un falso-negativo es menor al 10%, que en ambos casos podrían acarrear consecuencias irreparables. El restante 10% debe analizarlo el IS.

Es importante recalcar que la eficiencia del sistema en global incrementa cuanto mayor sea la densidad de móviles, por lo que la satisfacción del cliente con respecto a la aplicación desarrollada, la cual va directamente ligada con el consumo de batería, puede ser la razón por la que ésta deje de ser usada. Los resultados actuales indican que puede permanecer 42 horas sin carga, que representa más del 68% que (Faulkner, et al., 2011)

(con 25 horas de carga), que es el resultado de una baja tasa de muestreo de 25 Hz, la cuarta parte que (Ervasti, et al., 2011) con 100Hz y que (Faulkner, et al., 2011) que necesita (50-100 Hz). Este porcentaje puede ser significativamente reducido modificando la tasa de muestreo, tiempos de reconexión y número de *beacons*.

El porcentaje de batería es constantemente monitoreado y si se detecta un bajo nivel del mismo, deja de trabajar como sensor y solamente mantiene arriba el protocolo *MQTT* para poder ser alertado; entonces, aun si perdemos un sensor, se puede alertar al usuario porque el móvil permanece funcional. El consumo de batería se ha evaluado variando el número de *beacons* enviados desde el SP en entornos WiFi y 3G obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2: Consumo de Batería en los SPs.

# beacons	5 minutos		15 minutos	
	3G (%)	WIFI (%)	3G (%)	WIFI (%)
Batería/Hora	0.1553	0.0245	0.0021	0.00037

5.2. Servidor Intermedio

Para una mejor y real validación del IS, el Instituto Geofísico Nacional de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador (*IGEPN*) (IGEPN, 2011), ha proporcionado datos de sismos sentidos en la ciudad de Quito detallados en la Tabla 3.

Tabla 3: Información sísmica proveniente de acelerógrafos en Quito.

Fecha	Lugar	Pico de Aceleración máxima [gals]	I _{MM}	I _{MM} Quito
09/02/2013	Pasto Colombia	12.33	7.4	3.67
08/02/2012	Esmeraldas Ecuador	5.48	5.2	2.69
29/10/2011	Quito Ecuador	21.02	4.57	4.57

I_{MM}: Intensidad sentida en el lugar del Epicentro.
I_{MM} Quito: Intensidad sentida en la ciudad de Quito-Ecuador; lugar donde están los acelerógrafos.

La información obtenida corresponde a datos de aceleración medidos por dos acelerógrafos de alta precisión situados en la ciudad de Quito-Ecuador: *LILI*: Latitud: -0.272; Longitud: -78.531; Altitud: 2865 metros y; *EPN*: Latitud: -0.212; Longitud: -78.491; Altitud: 2848 metros.

Para determinar el mejor conjunto de valores de la configuración (A, B, C, D, E) que valida el IS, cada señal de la Tabla 3 es sometida al proceso de detección tomando en cuenta las siguientes consideraciones, y como resultado la Tabla 4:

- A: Intervalo entre ventanas (segundos); B: Tamaño de la ventana deslizante (segundos); C: Tiempo de espera entre eventos (segundos); D: I_{MM}; E: Intervalo Kruskal Wallis (segundos).
- El parámetro C, que corresponde al tiempo entre dos sismos detectados, es puesto en 1 segundo (C=1), para comparar cuál de las configuraciones detecta un mayor número de picos presentando mejor correlación; si C es muy pequeño el algoritmo puede detectar demasiados eventos en un corto tiempo, y si este es demasiado largo, un pico puede no ser detectado incluso si este sea mayor que el anterior.

- El parámetro D (Intensidad Mínima) se coloca en 2 ($D = 2$) demostrando la capacidad de determinar sismos de baja intensidad. Sin embargo, en la configuración real óptima, C corresponde a un valor de 20 segundos ($C = 20$) para evitar alertar réplicas demasiado cercanas, y D toma el valor de 5 I_{MM} porque según la escala de Mercalli Modificada (Wood and Neumann, 1931), este tiene un potencial de daño leve y su percepción moderada.

Tabla 4: Comparación entre Configuración de Ventanas Deslizantes.

SISMO PASTO - COLOMBIA 09/02/2013			
Máximo pico = 3.57 I_{MM}			
Hora del pico: 16:47			
Configuración Ventana (A,B,C,D,E)	Parámetros de Comparación		
	# picos detectados	Mínima Intensidad Detectada	Tiempo de ganancia (Segundos)
(1,1,1,2,2)	8	2.1802	1
(0.5,1,1,2,1)	10	2.1186	2
(0.3,1,1,2,1)	11	2.0697	2
(0.5,0.5,1,2,1)	10	2.1186	2
SISMO ESMERALDAS – ECUADOR 08/02/2012			
Máximo pico = 2.69 I_{MM}			
Hora del pico: 50:53			
Configuración Ventana (A,B,C,D,E)	Parámetros de Comparación		
	# picos detectados	Mínima Intensidad Detectada	Tiempo de ganancia (Segundos)
(1,1,1,2,2)	3	2.1803	1
(0.5,1,1,2,1)	5	2.1186	3
(0.3,1,1,2,1)	6	2.0496	4
(0.5,0.5,1,2,1)	6	2.0491	3
SISMO QUITO – ECUADOR 29/10/2011			
Máximo Pico = 4.57 I_{MM}			
Hora del pico: 55:27			
Configuración Ventana (A,B,C,D,E)	Parámetros de Comparación		
	# picos detectados	Mínima Intensidad Detectada	Tiempo de ganancia (Segundos)
(1,1,1,2,2)	3	1.0064	11
(0.5,1,1,2,1)	5	0.0890	11
(0.3,1,1,2,1)	9	1.0064	12
(0.5,0.5,1,2,1)	8	1.0895	11

La Tabla 4. detalla las 4 configuraciones (A, B, C, D, E) que presentaron mejores resultados, que como podemos observar casi todas presentan el mismo intervalo entre ventanas (B) pero diferente tamaño de ventana (A); que en sí son los parámetros que cambian el comportamiento de detección en el algoritmo de *Kruskal Wallis*.

Del análisis de la Tabla 4 y las siguientes Figura 7, Figura 8, Figura 9, y Figura 10 se concluye que la mejor configuración de ventanas deslizantes realizado, es (0.3, 1, 20, 5, 1)

proporcionando un buen equilibrio obteniendo los siguientes resultados:

- De entre todas las configuraciones es aquella que en todas las señales entrega el mayor número de picos sísmicos detectados: 11 picos sísmicos en Pasto (Figura 8), 6 picos sísmicos en Esmeraldas (Figura 9), 9 picos sísmicos en Quito (Figura 10).
- Tanto en la Figuras 8, 9, 10 y la Tabla 4 se verifica la buena correlación entre muestras, pudiendo detectar la mayor cantidad de picos con la configuración, incluso cuando la señal parecería más dispereja (en el pico máximo) *Kruskal Wallis* es capaz de detectar buenas correlaciones entre las muestras.
- Puede detectar intensidades I_{MM} más bajas que las otras configuraciones, permitiendo ser más sensible a sismos de menor intensidad: 2.0697 I_{MM} en Pasto, 2.049 I_{MM} en Esmeraldas, 1.00 I_{MM} en Quito. Por tanto se deduce que a una mayor I_{MM} , el IS podrá detectarlo con mayor facilidad.
- En la Figura 7, la probabilidad media de detección *Kruskal Wallis* entregada por esta configuración es la mayor de todas las, siendo 0.362; que aunque pueda parecer insuficiente no lo es, sino que evita que cualquier muestra sea detectada como pico sísmico.
- La configuración escogida anticipa el pico sísmico, el cual es el de mayor aceleración: 2 segundos de antelación en el sismo de Colombia, 4 segundos de antelación en el sismo de Esmeraldas, y 12 segundos de antelación en el sismo de Quito. Gráficamente se nota en la Figura 8, Figura 9 y Figura 10 respectivamente, donde claramente se puede notar la ventaja. Por tanto, el desempeño cumple completamente el objetivo del sistema, donde el IS puede detectar un sismo hasta con 12 segundos antes que el máximo pico en el mismo lugar del epicentro, pudiendo variar, incluso mayor, dependiendo de las características propias del sismo.
- Se corrobora que aunque *Kruskal Wallis* no haya sido usado anteriormente para un sistema de este tipo, este presenta grandes resultados verificando que satisface los requerimientos de detección del IS.

Por tanto, de todo lo anterior, la configuración escogida (0.3, 1, 20, 5, 1), proporciona tiempo adicional a la comunidad antes que el máximo movimiento cause el mayor desastre: tiempo de respuesta, tiempo de decisión, tiempo de ayuda.

5.3. Sistema Completo

Tanto el Cliente como el Servidor Intermedio fueron probados como un solo sistema, donde uno o varios usuarios fueron notificados con un retardo menor a 1 segundo desde que el IS ha detectado un pico tanto en WiFi como en 3G gracias a las amplias ventajas de *MQTT*.

También por medio de un gran número de pruebas, se encuentra que la arquitectura notifica en tiempo real para el lugar del epicentro, y anticipa (decenas de segundos o unidades de minutos) en lugares más lejanos; incluso, pudiendo ser más o menos, dependiendo de las características del sismo.

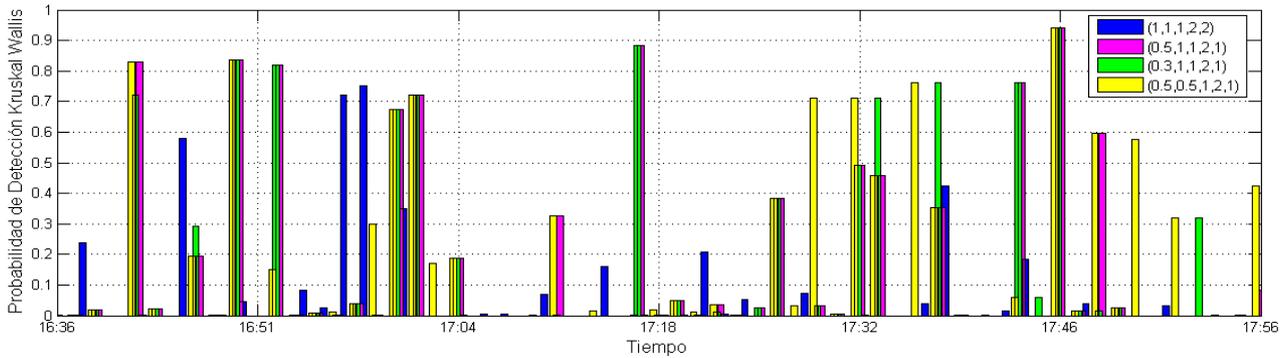


Figura 7: Sismo de Colombia 09/02/2013. Probabilidad de Detección Kruskal Wallis en Servidor Intermedio entre diferentes Configuraciones de Ventana.

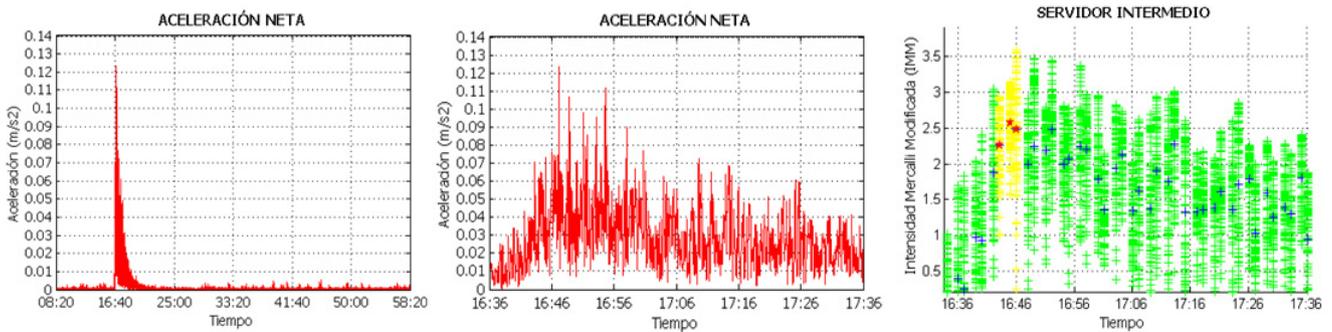


Figura 8: Sismo Colombia 09/02/2013: (a) Aceleración neta (60 minutos). (b) Aceleración Neta (1 minuto) que incluye el pico de aceleración máxima en 16:47. (c) Proceso de detección de picos en Servidor Intermedio usando la configuración escogida de prueba (0,3, 1, 1, 2, 1).

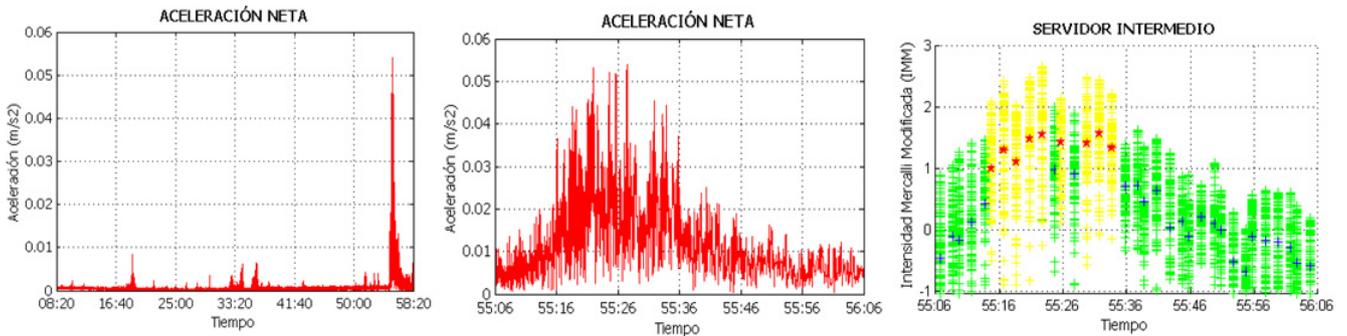


Figura 9: Sismo Esmeraldas 08/02/2012. (a) Aceleración neta (60 minutos). (b) Aceleración Neta (1 minuto) que incluye el pico de aceleración máxima en 50:53. (c) Proceso de detección de picos en Servidor Intermedio usando la configuración escogida de prueba (0,3, 1, 1, 2, 1).

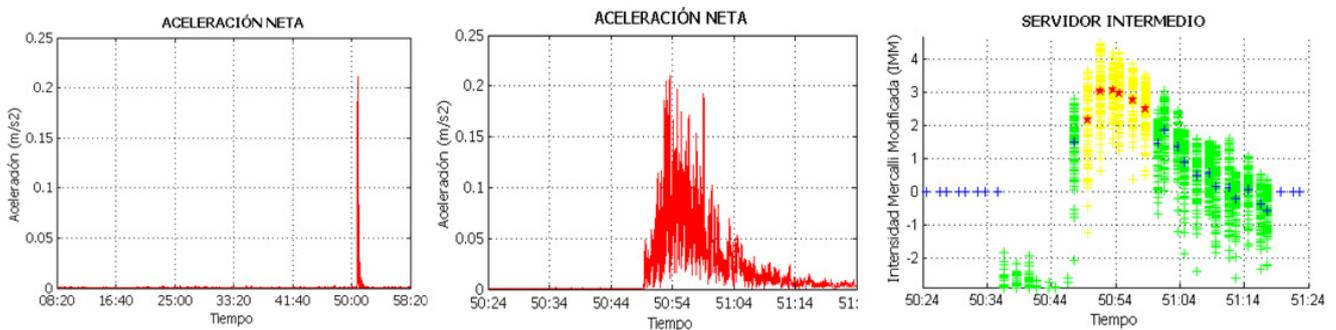


Figura 10: Sismo Quito 29/10/2011. (a) Aceleración neta (60 minutos). (b) Aceleración Neta (1 minuto) que incluye el pico de aceleración máxima en 55:27. (c) Proceso de detección de picos en Servidor Intermedio usando la configuración escogida de prueba (0,3, 1, 1, 1, 1).

6. Conclusiones y Trabajo Futuro

Los sismos son un peligro constante al que todos estamos expuestos y son difíciles de prevenir porque son totalmente impredecibles, pero cuando uno se presenta, el tomar una buena decisión puede ser la diferencia entre permanecer vivo o no. Se propone una solución económica, segura, simple, y personalizable intentando brindar tiempo (decenas de segundos) a la comunidad para la toma de una mejor decisión en una situación de emergencia.

Esta solución corresponde a una arquitectura de sistema de tiempo real crítico en 3 niveles que satisface los objetivos de un sistema de alerta temprana en términos de tiempo, seguridad y adaptabilidad, aprovechado el nuevo auge electrónico como es el uso masivo de *smartphones*, como dispositivo multi-sensor, multi-red, multi-tarea con capacidades suficientes y capaz de ser programado.

Este tipo de sistemas son difíciles de probar en condiciones reales, y por tanto se ha testado en laboratorio y con ayuda de voluntarios obteniendo resultados prometedores en cada uno de los niveles de la arquitectura, la cual puede ser implementada en corto plazo, y con recursos monetarios mínimos. Se ha obtenido una arquitectura rápida, distribuida y de bajo coste que puede ser implementada especialmente en lugares de constante riesgo sísmico como Ecuador. Esta solución garantiza que el rendimiento temporal del sistema cubre ampliamente la resolución del problema al que está dedicado, una emergencia sísmica; logra anticipar el máximo pico con 12 segundos en el epicentro y puede alertar con mayor antelación en un área más lejana; los beneficios pueden ser cada vez mayores dependiendo de las características del mismo (cuando, duración, tiempo y lugar).

Como trabajo futuro se propone extender la funcionalidad post evento; una alta calidad del proceso permitirá que el usuario reciba un servicio adecuado de la situación personal en la que se encuentra, en forma de detalle por ejemplo:

(i) una vez que un evento sísmico ha sido detectado y verificado por el CC, la aplicación SP presentará una única pantalla que permitirá a los usuarios pedir ayuda al CC, el cual conoce la ubicación específica de cada uno, pudiendo guiarlos de la mejor manera (la más segura, la más rápida) a centros de ayuda y refugio gracias a los recursos multimedia compartidos por otros usuarios en el sistema.

(ii) Teniendo una completa perspectiva del desastre, el CC dará soporte a cuerpos de ayuda (policía, bomberos, hospitales, etc.) optimizando así tiempo de rescate y, recursos humanos y monetarios.

Para terminar es necesario citar que existen otros parámetros a tomar en cuenta para llegar a ofrecer incluso mejor eficiencia y precisión, tal como el análisis del filtro implícito que el ser humano proporciona a un *smartphone*, o factores externos como determinación de caídas, etc. Estos parámetros serán tomados en cuenta en el trabajo futuro.

English Summary

Quake Detection System Using Smartphone-based Wireless Sensor Network For Early Warning.

Abstract

Detecting disruptive events using COTS sensors like the ones embedded in smartphones is a difficult challenge but also an interesting opportunity. In this paper, we present a distributed, reliable, hierarchical and hard real-time system architecture of smartphones acting as opportunistic sensor nodes. Using a low energy-consumption application, we have used the smartphones inertial sensor as an accelerograph. The deployed smartphones and the application form a low-cost wireless sensor network, that detects, analyses and notifies a seismic-peak. The systems optimizes the distributed calculations in the smartphones; communication capabilities and integration in order to provide extra time for early warning in disaster scenarios (e.g. earthquakes), although the architecture may be extended to other disruptive and rare events. We propose an innovative real-time solution which considers time and spatial analyses, not present in another works, making it more precise and customizable, coupling it to the features of the geographical zone, network and resources, so as providing evidence of the feasibility of earthquake early warning using a distributed network of cell phones. The architecture has been validated by extensive evaluation and the most relevant result has been the improvement in notifications delivery about a seismic-peak 12 seconds earlier than previous works in the epicenter zone, and a reduction in the number of false positives. Additionally the proposed architecture includes a post-event management to help users and strengthen coordination between aid-agencies in order to optimize human resources and time to implement measures in order to eliminate negative effects on the population.

Keywords:

Accelerometers, Architecture, Distributed detection, Multisensor integration, Real Time.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con el apoyo del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional IGEPN, situado en Ecuador.

Referencias

- Aguilar R.; García E.; Villamarín J.; “Leyes de Atenuación para Sismos Corticales y de Subducción Para el Ecuador”; Revista Ciencia; Escuela Politécnica del Ejército; Vol 13.1; 1-18; 2010.
- Allen, R., 2011. “Seconds Before the Big One: Progress in Earthquake Alarms. Scientific American 2011. Permanent Address: <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=tsunami-seconds-before-the-big-one>.
- Beauval, C., Yepes, H., Bakun, W., Egred, J., Alvarado, A., Singaicho, J.C., 2010. Historical Earthquakes in the Sierra of Ecuador (1587 – 1996). *Geophysical Journal International*, 181 (3), 1613-1633.
- Bimal, G., Khushbu, S., 2010. Analysis of The Emerging Android Market. Master Thesis – San José State University - Department Of General Engineering. Developer Android. Available at: <http://developer.android.com/about/dashboards/index.html>.
- Bormann, P., Engdahl, B., and Kind, R., 2012. Seismic Wave Propagation and Earth models. In P. Bormann (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2)* (pp. 1-105).

- Carreño, E.; Bravo, B.; Suarez, A. y Tordesillas, M.; Registro y Tratamiento de Acelerogramas; Física de la Tierra; ISSN: 0214-4557; 1999.
- Enrique de Lucas; Manuel Javier Miguel García; Algoritmos de Triggering para Detección de Eventos y Su Aplicación Para Detección de Dust Devils Sobre FPGAS; Universidad Complutense de Madrid -Facultad de Informática; 2010.
- Chandy, R., Rita, A. and Skjellu, Q., 2009. QuakeCast: Distributed Seismic Early Warning. Caltech Undergraduate Research Journal Winter 2011.
- Cheng, G., 2011. How to Convert 3-Axis Directions and Swap X-Y Axis of Accelerometer Data within Android™ Driver. FreeScale, Document Number AN4317.
- Cisco Systems, Inc, 2014. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2013–2018. Available at: http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.html
- Cochran, W.G., 1963. Sampling Techniques. 2nd Edition, New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Coulouris, G.; Dollimore, J.; Kindberg, T.; Blair, G. Distributed System: Concepts and Design, Addison Wesley, 2011, ISBN 978-0-13-214301.
- Ervasti, M., Dashti, S., Reilly, J., Bray, J.D., Bayen, A., Glaser, S., 2011. IShake: Mobile Phones as Seismic Sensors – User Study Findings. Proceedings of the 10th international Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, NUM 11, 43-52.
- Faulkner, M., Olson, M., Chandy, R., Krause, J., Chandy, M., Krause, A., 2011. The next big one: Detecting earthquakes and other rare events from community-based sensors. ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks IPSN'11, 10.
- Finazzi, F.; Fasso, A., 2014, Earthquake monitoring using volunteer smartphone-based sensor networks, Proceedings of the METMA VII and GRASPA14 Conference. Torino (IT).
- Gelenbe, E., Wu, F.J., 2012, Large scale simulation for human evacuation and rescue, Computers and Mathematics with Applications, Vol 64 No. 12, 3869-3880.
- Google Cloud Plataform- official Site. Available at <http://cloud.google.com/>
- Gorbil, G., Gelenbe, E., 2011, Opportunistic Communications for Emergency Support Systems, Proceedings of the 2nd International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies, the 8th International Conference on Mobile Web information Systems, Niagara Falls, Canada, 19-21,2011.
- Herron, D. and Latimer, R., 2011, First Steps in Seismic Interpretation, ISBN 978-1-56080-280-8, Vol.16, Chapter 6.
- Hunkeler, U., Truonh, H.L. and Stanford-Clark, A., 2008. MQTT-S A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks. Communication Systems Software and Middleware and Workshops, 978-1-4244-1796-4, 791-798.
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador (IGEPN), 2011. Informe sísmico para el Ecuador. Available: http://www.igepn.edu.ec/images/collector/collection/informes-de-actividad-sismica/informe_ssmico_para_el_ao_2011_final.pdf
- Kontogiannis, T. and Kossiavelou, Z., 1999. Stress and team performance: principles and challenges for intelligent decision aids. Safety Science. Vol.33, 103 -106.
- Kruskal, W. and Wallis, W.A.,2004. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. Journal of the American Statistical Association. Vol. 3.
- Kwapisz, R., Weiss, G. and Moore, S. 2010, Activity Recognition using Cell Phone Accelerometers, SIGKDD Explorations, Vol. 12, 74 – 82.
- Mohan, P., Padmanabhan, V. N., and Ramjee, R., 2008, Nericell: rich monitoring of road and traffic conditions using mobile smartphones. In SenSys '08: Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems.
- Raghu Gantl, K., Fan Ye, and Hui Lei, 2011, Mobile Crowdsensing: Current State and Future Challenges, IEEE Communications Magazine – November 2011, 32-39.
- Robusto, C., 1957. The cosine-Haversine formula. The American mathematical Monthly, 38-40.
- Secretaría Técnica de Gestión de Riesgos Ecuador (STGR), 2012. (last visited January 2013). Guía para la incorporación de la variable de riesgo en la Gestión integral de nuevos proyectos de infraestructura. 99-108, Available: <http://www.gestionderiesgos.gob.ec/>.
- Sharma, B., Klumar, A., Murthy, V.M., 2010. Evaluation of Seismic Events Detection Algorithms. Journal Geological Society of India, Vol.75, 533-538.
- Sheng, X., Zhang, Y., Pham, D. and Lambaré, G., 2005. Antileakage Fourier transform for seismic data regulation. Geophysics, Vol. 70, no. 4, 87-95.
- Suzuki, M., Saruwatari, S., Kurata, N. and Morikawa, H., 2007. Demo Abstract: A High-Density Earthquake Monitoring System Using Wireless Sensor Networks. Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems, 373-374.
- U.S. Geological Survey (USGS), 2013. Earthquake Hazards Program. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/world_deaths.php
- Warapon, N., Triyason, T., Angsuchotmetee, C., Tilkanont, P., 2011, Emergency Service Warning System Using SIP for Integrated Media, Networked Computing and Advanced Information Management (NCM), 2010 Sixth International, 978-89-88678-26-8, 312-317.
- Wasserman, A. I; 2010; Software Engineering Issues for Mobile Application Development FoSER 10, Proceedings of the FSE/SDP workshop on Future of software engineering research ; pp.397–400. USA.
- Wood, H.O. and Neumann, F.,1931. Modified Mercalli Intensity Scale. Bulletin of the Seismological Society of America 21, 4, 277-283.