



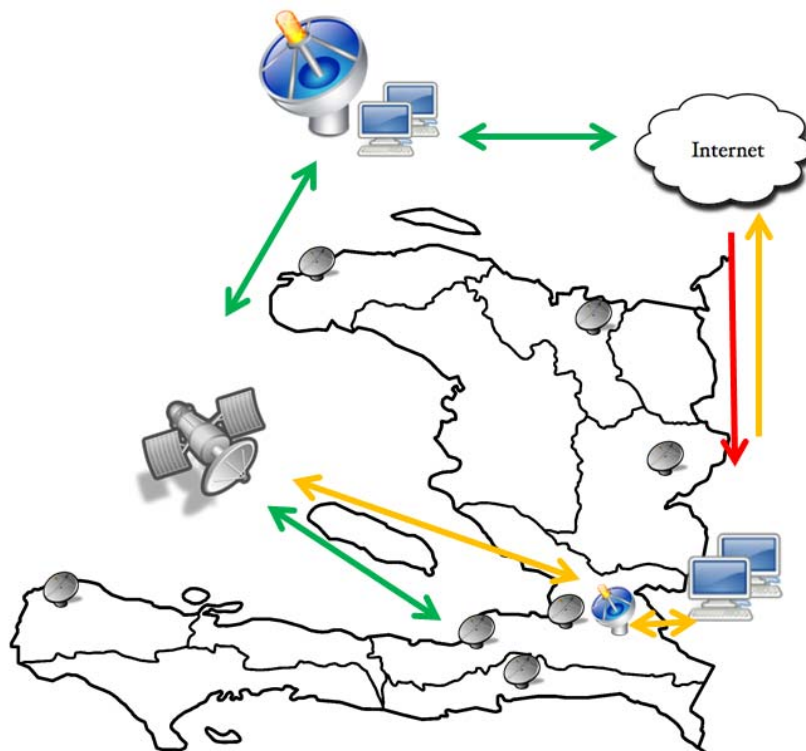
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA,
GEODESIA Y CARTOGRAFÍA



Máster Universitario en Ingeniería Geodésica y
Cartografía

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO DE LA RED SÍSMICA DIGITAL POR SATÉLITE HAITIANA



Alumno: Jean Michael Haendel Dorfeuille

Tutora: Dra. M^a Belén Benito Oterino

Cotutor: Carlos Meneses Guevara



Agradecimientos

Al final de estos dos años de estudios, el presente documento es el lugar adecuado para agradecer:

A mi madre Evrodie por su fe en la educación y por el esfuerzo que ha puesto en la mía.

A mi esposa Dashka, por los enormes sacrificios, y a mi "hija": os quiero mucho más que mucho.

Al Gobierno Español, por haberme concedido una beca, a través de la Conferencia de los Rectores de las Universidades Españolas, a pesar de la crisis.

Al Ministerio del Medio Ambiente y al Observatorio Nacional del Medio Ambiente y de la Vulnerabilidad de Haití por la oportunidad que me han ofrecido al permitirme aprovechar de ésta beca.

Al Grupo de Investigación de Ingeniería Sísmica y a sus miembros, por el gran apoyo y el buen ambiente de trabajo.

Al Instituto Geográfico Nacional y al personal de la Red Sísmica Nacional de España, por no dudar en dedicarme el tiempo necesario para preparar este proyecto.

A mis tutores por la orientación que me han dado y su paciencia al largo de la elaboración de este trabajo.

A los organismos y personas que han facilitado información para la realización de este trabajo: Recursos Naturales Canadá, Centro Nacional de investigaciones Sismológicas de Cuba, Red Sísmica de Jamaica, Instituto Sismológico Universitario de la Republica Dominicana, Red Sísmica de Puerto Rico.

A mis profesores del Máster por todo el conocimiento compartido.

A los compañeros del Máster por todo el castellano que me han enseñado y esos momentos de pura alegría que hemos compartido. Gracias a vosotros el tiempo me ha parecido más corto.

A la buena gente de la cafetería de la escuela por esa sonrisa cada día.

A mi País, al pueblo haitiano por seguir luchando a pesar de las dificultades.

Al Buró de Minas y Energía de Haití por su buena intención de colaborar.

Al resto de mi familia.

A mi familia política.

A mi hermano Shidex por su amistad.

A los Amigos, los que estén en nuestro querido país y los que vivan fuera.

También doy las gracias a los obstáculos encontrados en el camino. Me han dado un motivo más para llegar aquí y demostrar que la voluntad es el arma más potente que tenemos.



ÍNDICE

1	RESUMEN	4
2	INTRODUCCIÓN	5
3	MOTIVACIÓN	7
4	OBJETIVOS Y ALCANCE	8
5	TRABAJOS PREVIOS	9
5.1	FASE DE FORMACIÓN	9
5.2	LAS REDES SÍSMICAS	12
5.2.1	<i>Objetivos de las redes sísmicas</i>	12
5.2.2	<i>Estaciones Sísmicas y Sensores</i>	14
5.2.3	<i>Configuración de las redes sísmicas</i>	15
5.2.4	<i>Adquisición y procesamiento de datos sísmicos</i>	16
5.2.5	<i>Algoritmos</i>	18
6	REDES SÍSMICAS EN PAÍSES DEL CARIBE PRÓXIMOS A HAITÍ	19
6.1	RED SÍSMICA DE CUBA	19
6.2	RED SÍSMICA DE JAMAICA.....	24
6.3	RED SÍSMICA DE REPUBLICA DOMINICANA.....	25
6.4	RED SÍSMICA DE PUERTO RICO.....	27
7	ESTADO ACTUAL DE LAS ESTACIONES EXISTENTES EN HAITÍ	31
8	DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE LA RED SÍSMICA DIGITAL POR SATÉLITE HAITIANA	36
8.1	EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE DATO VÍA SATÉLITE	36
8.1.1	<i>Estación remota</i>	37
8.1.2	<i>El HUB</i>	42
8.2	EL CENTRO DE DATOS.....	44
8.3	ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.....	45
8.3.1	<i>Software Apollo para adquisición de datos</i>	45
8.3.2	<i>Software SeisComp3 para Procesar los datos</i>	48
8.4	UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES	54
8.4.1	<i>Estudios de gabinete</i>	54
8.4.2	<i>Estudios en el campo</i>	56
8.4.3	<i>Distribución espacial de las estaciones</i>	57
8.5	DIFUSIÓN DE LA INFORMACIÓN SÍSMICA	61
9	PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y ECONÓMICA DE LA IMPLANTACIÓN DE LA RED	63
10	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
10.1	CONCLUSIONES	68
10.2	RECOMENDACIONES.....	68
11	REFERENCIAS	70



12	ANEXOS.....	73
13	NOTAS DEL AUTOR.....	72



1 Resumen

En 2010, Recursos Naturales Canada (RNC) instaló 3 estaciones sísmicas con transmisión vía satélite en Jacmel, Léogane y Puerto Príncipe, la capital de la República de Haití. Dicha instalación tenía como objetivo la monitorización de las réplicas del terremoto del 12 de enero del mismo año. Con el objetivo de ampliar la cobertura de la monitorización sísmica a todo el país y tener un centro de control propio, el Observatorio Nacional de Medio Ambiente y de la Vulnerabilidad (ONEV) del Ministerio del Medio Ambiente de Haití (MDE) compró 4 estaciones sísmicas completas con transmisión vía satélite de Nanometrics Inc. y el software correspondiente.

Desafortunadamente, no se está sacando provecho de dichas estaciones compradas. En la actualidad, dos de ellas, que están instaladas en Hinche y Cabo Haitiano, no están configuradas, y las otras siguen en el almacén del ONEV. No se ha conseguido el presupuesto para completar la instalación, ni tampoco para implantar el centro de control de la red sísmica digital por satélite que se quiere configurar en el país.

El presente trabajo propone un diseño completo de la Red Sísmica Digital por Satélite Haitiana y la planificación para su implantación real, incluyendo las estaciones y el centro de control. Por ello se han estudiado las redes sísmicas modernas, las características de las redes sísmicas del Caribe, el sistema de transmisión Libra de Nanometrics y los software de adquisición y procesamiento de datos sísmicos Apollo y SeisComp3. También se ha estudiado la distribución espacial de las estaciones sísmicas con transmisión vía satélite instaladas en el país proponiendo alternativas y recomendaciones para futura ampliación, considerando los aspectos científicos, políticos y económicos, a la Isla de Vaca (Ile-à-Vache) en el extremo sur del país y la Isla de la Tortuga (Ile de la Tortue) al norte de la Falla Septentrional en el extremo norte del territorio haitiano.

2 Introducción

La República de Haití se localiza al oeste de la República Dominicana, constituyendo entre ambos estados la isla de La Española. Su situación económica es de las más críticas de la región. A pesar de sus problemas políticos y económicos, su población está muy orgullosa de su gran historia. Para los haitianos, Haití es la Madre de la libertad, por haber dado lugar a la primera revolución negra que puso fin a la esclavitud y dio luz a la primera república negra del mundo en 1804. En los primeros días de la república, la libertad era una garantía para cualquier esclavo que pisara el territorio haitiano.

Esta misma historia reciente de la isla testifica de la sismicidad de la misma (Figura 1). El 18 de octubre de 1751 y el 13 de junio de 1770 Puerto Príncipe fue golpeado por terremotos que destruyeron gran parte de la ciudad (De Saint-Méry M. 1797). La parte Norte de la Isla también sufrió por los sismos; en 1842 Cabo Haitiano fue destruido, en 1887 y 1904 se registraron daños importantes en el Norte de Haití y en 1946 ocurrió un terremoto seguido de un tsunami en la parte Noreste de la República Dominicana (Calais E. 2007).

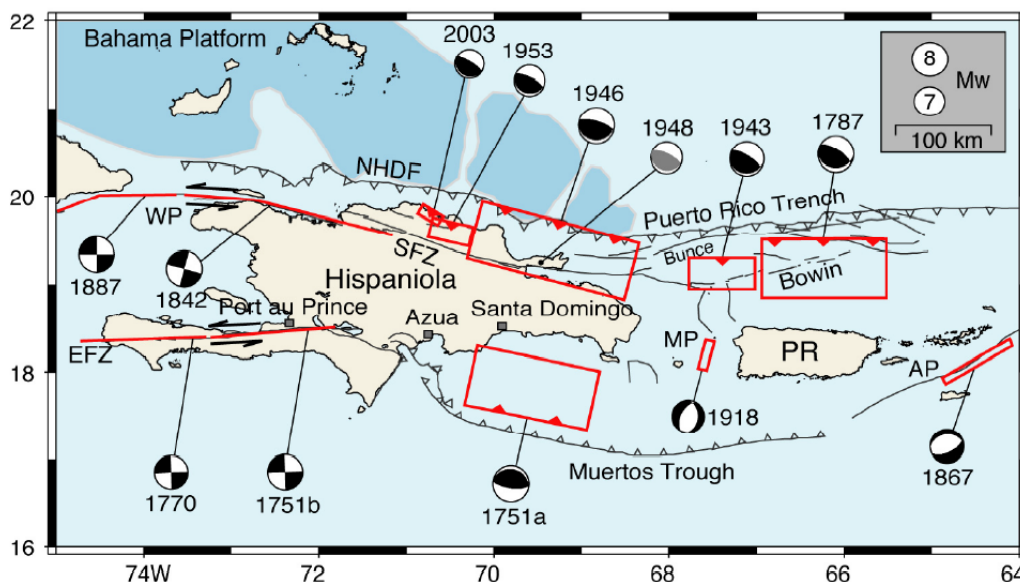


Figura 1. Sismos históricos recientes en la española. Las líneas rojas indican las zonas de ruptura sísmica estimada. (Calais E. 2007)

Pero es en 2010 cuando la República de Haití descubrió de la manera más dura posible lo que es vivir en la ignorancia del riesgo sísmico. En efecto, el 12 de enero de dicho año, un terremoto de magnitud Mw 7.0 destruyó más de 200.000 edificios y dejó al menos 250.000 víctimas mortales. Haití no disponía de red sísmica para la detección de terremotos, que es el elemento primordial para registrar los datos y constituir la base del conocimiento de la sismicidad del territorio.



Unos días después de esta catástrofe, el Gobierno Canadiense (RNC) instaló las tres primeras estaciones sísmicas de transmisión vía satélite en el país, con ayuda de un equipo de técnicos del Observatorio Nacional del Medio Ambiente y de la Vulnerabilidad (ONEV) del Ministerio de Medio Ambiente (MDE) del gobierno haitiano, entre los que yo me contaba. El objetivo de dichas estaciones era localizar las réplicas de aquel terremoto, pero no se planteó en aquel momento configurar una red que cubriese toda la actividad sísmica del país.

Ese mismo año, el ONEV inició una línea de cooperación con la Universidad Politécnica de Madrid en materia de peligrosidad y riesgo sísmico. En el marco de esta cooperación, la UPM concedió a dos alumnos haitianos sendas becas para la realización de estudios de máster, siendo yo uno de ellos.

Con la realización del presente TFM se ha conseguido por un lado, contribuir a la formación del personal técnico del ONEV (apartado 5.1), y por otro, reforzar la infraestructura local de la red de sísmica de Haití (apartado 8) para impulsar el estudio de su sismicidad.



3 Motivación

En 2009, participé en una de las campañas de medidas GPS realizadas por el científico Eric Calais en Haití cuyo informe alertaba sobre la posibilidad de que ocurriese un terremoto en Haití. Aquel terremoto ocurrió el 12 de enero de 2010, lo que me hizo ser consciente de la importancia de conocer la sismicidad de mi país, su alcance y sus consecuencias.

Después de aquella catástrofe, colaboré en la instalación de las 3 estaciones sísmicas que donó la RNC a Haití, instalación que se realizó conjuntamente con el ONEV. La dotación al país de una estructura de monitorización permanente ha merecido todo el reconocimiento a la RNC por parte de los haitianos. No obstante, ha resultado poco operativo el hecho de que la gestión y el mantenimiento de la red dependan de la disponibilidad de los técnicos canadienses. Los datos producidos y registrados por las estaciones son enviados directamente a la RNC, que, tras procesarlos, los devuelven a Haití vía internet. Por tanto, el papel del ONEV en la gestión de la red sísmica de su país es de consumidor de datos, y no de proveedor de los mismos, como debería ser a tenor de sus competencias (dictadas por el Ministerio de Medioambiente de Haití). En definitiva, la detección de eventos y la generación de alertas no se están gestionando en el país.

Uno de los objetivos que debe conseguir el estado haitiano es que el ciudadano se habitúe a acceder a los datos sísmicos, y que el acceso le resulte sencillo e intuitivo. De esa forma será siempre consciente del riesgo sísmico del país. Las aplicaciones que se han hecho hasta el momento para difundir esa información utilizan datos del Servicio Geológico de EE.UU. (USGS) u otras agencias, donde se hace patente la falta de disponibilidad temporal de los datos y su baja resolución.

Ante todo eso, la motivación de este TFM es completar la red sísmica digital por satélite haitiana y ponerla bajo responsabilidad y control del gobierno de Haití, para que se puedan proporcionar datos para investigación y sensibilización social y adopción de medidas de mitigación del riesgo sísmico.



4 Objetivos y alcance

El objetivo general de este trabajo fin de máster es diseñar la red sísmica digital de transmisión por satélite haitiana. Este es un objetivo ambicioso que requiere conocer la situación actual en el país caribeño en materia de detección sísmica, aprender el funcionamiento de una red y de todos los aspectos asociados a su implantación y puesta en producción, y por tanto, precisa de una capacitación de alto nivel de cualificación en temas como:

- equipos de detección de terremotos, instalación y mantenimiento de los mismos
- características de los emplazamientos donde se establecen las estaciones sísmicas
- sistemas de comunicación remota de datos
- elementos del centro de control de datos
- software específico de análisis y producción de datos sísmicos

La consecución del objetivo general se derivará de la realización satisfactoria de las siguientes tareas conducentes a cubrir estos objetivos específicos:

1. Aprendizaje crítico general del funcionamiento de una red sísmica
2. Estudio de la estructura de las redes sísmicas que se utilizan hoy en día
3. Estudio de las características de los emplazamientos y de las estaciones instaladas en Haití por el ONEV y la RNC
4. Diseño del centro de control de la red
5. Estudio de los software de análisis de datos sísmológicos Apollo y SeisComP3
6. Diseño final de la red sísmica digital de transmisión por satélite haitiana

El alcance del trabajo que se presenta en esta memoria trasciende el ámbito puramente académico y los resultados encontrarán una aplicación práctica real: Las deficiencias en materia de detección y monitoreo sísmico de disponibilidad de personal local cualificado existentes en la República de Haití podrán ser soslayadas con los resultados de este proyecto y el aprendizaje desarrollado por su autor. Así, se contribuirá a que el estado de Haití tenga el control de la infraestructura completa de monitorización sísmica en el país.

Una muestra de la relevancia y del interés de los resultados del proyecto y de la formación especializada de su autor es que otras organizaciones relacionadas con la sismología pero ajenas al mundo puramente académico se han implicado de manera decisiva en el desarrollo del trabajo. Así, el proyecto ha contado con la participación de personal del Instituto Geográfico Nacional de España (IGN) y de la empresa Tekpam Ingeniería SL, representante en España de la firma Nanometrics, que es uno de los principales proveedores de equipos sísmicos de la Red Sísmica Nacional del IGN. La capacitación especializada proporcionada por estos organismos ha sido crucial para el buen desarrollo del trabajo.

Este trabajo, así como las estancias formativas de su autor en varias instituciones y empresas españolas, muestra la viabilidad de las actividades de cooperación como motor de desarrollo para sociedades que lo precisan.

5 Trabajos previos

5.1 Fase de formación

Al ser un trabajo de diseño de una red sísmica digital de transmisión vía satélite se ha debido completar la formación del master en “Ingeniería Geodésica y Cartografía” con unas prácticas desarrolladas en la Red Sísmica Nacional de España (RSN) del instituto Geográfico Nacional (IGN) y en la empresa Tekpam Ingeniería SL.

El IGN gestiona la RSN y en cumplimiento el Real Decreto RD 1476/2004 de 18 de Junio por el que se desarrolla la estructura orgánica básica del Ministerio de Fomento. Es La RSN la cual es “responsable de la observación, detección, y comunicación de los movimientos sísmicos que ocurran en el territorio nacional y áreas adyacentes” (Díaz R.L. 2005) .

La RSN está compuesta de un centro de recepción y control de datos con sede en la Sección de Sismología del IGN en Madrid , que controla un conjunto de redes e instalaciones independientes como:

- Red Sísmica Digital
 - A través de satélite
 - Vía telefónica
- Red Sísmica de Interrogación
- Red Sísmica Analógica
- Red de Acelerógrafos
- Centro Sismológico de Sonseca

Las similitudes de las tecnologías utilizadas en la red sísmica digital vía satélite de la RSN de España con las estaciones sísmicas instaladas por el ONEV y RNC han justificado la realización de prácticas durante un mes y medio en dicha red del IGN , incluyendo visitas de campo (Dos estaciones Libra Nanometrics Figura 2 y Figura 3).



Figura 2. Foto panorámica de la estación sísmica de Badajoz, España (RSN) en 2013



Figura 3. Estación sísmica de Jacmel, Haití en 2010

En aquellas prácticas se han adquirido los conocimientos y habilidades imprescindibles para diseñar y luego implantar la red sísmica en Haití. Entre las principales competencias adquiridas en cabe destacar:

- **Instalación de sismómetros y acelerómetros.** Se ha aprendido el funcionamiento de los sensores que miden los movimientos del suelo los cuales son de dos tipos. Los sismómetros, que miden la velocidad del movimiento del suelo y los acelerómetros, que miden la aceleración del mismo. Se ha estudiado los requisitos del espacio donde se van a colocar. La orientación, la calibración y la protección de los correspondientes sensores han sido objeto de mucha atención.
- **El picado de fases y la revisión de eventos.** Los movimientos de la tierra registrados por los sensores se pueden visualizar gráficamente en lo que se llama un sismograma. Para interpretar un sismograma hay que tener en cuenta que lo registrado por el sensor es el resultado de un fenómeno complejo donde intervienen la fuente sísmica, la propagación de las ondas en un medio físico (Tierra y/o masa oceánica) y la respuesta del mismo sensor. Esa respuesta es la traducida en datos digitales o analógicos del movimiento registrado el cual además de la onda sísmica lleva atrás señales de diferente origen llamado ruido y el efecto local del sitio (*Análisis de datos sísmicos digitales. Técnicas de lectura, IGN*). Una vez aplicados los filtros adecuados el sismograma se interpreta para identificar las diferentes fases P y S cuyas características permiten calcular los parámetros de un terremoto como la distancia epicentral (Δ), la profundidad focal (h), hora origen (H_o), magnitud (m), acimut de llegada del rayo sísmico (Az) y determinación de la zona epicentral (Payo G. 1986). Existen algoritmos que pican esas fases automáticamente pero siempre en el proceso se necesita la revisión de un técnico en la materia.



- **El modelo de base de datos quakeML.** QuakeML es una representación XML¹ flexible, ampliable y modular de los datos sísmológicos que se destinan a cubrir una amplia gama de campos de aplicación de la sismología moderna (ver el UML² del quakeML en el Anexo I). Es un estándar abierto desarrollado por un equipo compuesto de profesional de diferentes universidades y organismos del mundo. Es el modelo de base utilizado por el programa de adquisición y procesamiento de datos SeisComp3 (<https://quake.ethz.ch/quakeml/> Último acceso julio de 2013).
- **La configuración del sistema Libra I y II de Nanometrics.** El sistema Libra encapsula los datos del sensor y se encarga de su transmisión al centro de datos (apartado 8.1). Utiliza una segmento satelital donde la Red Sísmica digital por Satélite Haitiana (RSDSH) es el único responsable de las comunicaciones, e independiente de las eventualidades de los sistemas de comunicaciones estándares tipo ISP³. El conjunto formado por unos programas de configuración, los dispositivos electrónicos digitalizadores, transceptores y antenas VSAT⁴ se utilizan para manejar la comunicación entre el centro de datos y las estaciones sísmicas remotas de la red.
- **La tecnología VSAT.** Una vez registrados los datos del sensor deben ser transmitidos a un centro de procesamiento. La comunicación por satélite es una de las técnicas utilizadas para transmitir esos datos desde la estación sísmica al centro utilizando toda una electrónica espacial y unos protocolos de comunicación para cumplir los objetivos de la red sísmica (apartado 8.1) .
- **Instalación y apuntamiento de antenas VSAT de diferentes tamaño.** Para establecer la mejor conexión posible con el satélite, se debe instalar la antena VSAT adecuada respetando unas reglas para emitir y recibir la señal de forma óptima.
- **Mantenimiento del centro de datos.** El centro de datos donde se hace todo el procesamiento de los datos como todos los sistemas informáticos requiere mantenimiento, hay que mantener el tanto del hardware como el software sin interrumpir el funcionamiento de la red sísmica.
- **Mantenimiento de estaciones remotas.** Las estaciones sísmicas no requieren mucho mantenimiento pero siempre hay que vigilar su estado de salud desde el centro de datos y hacer unas visitas para asegurarse que todo está operativo, cambiar o reparar los dispositivos cuando se necesita y actualizar los programas (Anexo II).

¹ **XML**, siglas en inglés de *eXtensible Markup Language* ('lenguaje de marcas extensible'), es un lenguaje de marcas desarrollado por el World Wide Web Consortium (W3C) utilizado para almacenar datos en forma legible. (<http://es.wikipedia.org/wiki/XML>)

² **Lenguaje Unificado de Modelado** (LUM o **UML**, por sus siglas en inglés, *Unified Modeling Language*) es el lenguaje de modelado de sistemas de software más conocido y utilizado en la actualidad; está respaldado por el OMG (Object Management Group). Es un lenguaje gráfico para visualizar, especificar, construir y documentar un sistema. (<http://es.wikipedia.org/wiki/Uml> Último acceso julio de 2013)

³ Un **proveedor de servicios de Internet** (o **ISP**, por la sigla en inglés de *Internet Service Provider*) es una empresa que brinda conexión a Internet a sus clientes. Un ISP conecta a sus usuarios a Internet a través de diferentes tecnologías como DSL, Cablemódem, GSM, Dial-up. ([http://es.wikipedia.org/wiki/ISP_\(Internet\)](http://es.wikipedia.org/wiki/ISP_(Internet)) Último acceso julio de 2013)

⁴ VSAT: Antenas parabólica de tamaño pequeño del inglés Very Small Aperture Terminal.



- **El NaqsServer de Nanometrics y el programa de adquisición Apollo.** El sistema Libra de Nanometrics utiliza un formato propietario de recepción de datos y petición de retransmisiones con lo cual antes de procesar los datos transmitidos vía este sistema hay que adquirirlos utilizando un programa de Nanometrics el cual a su vez proporciona los servicios de un Servidor de Datos. El Apollo es el software que reemplaza al antiguo NaqsServer (apartado 8.3.1). Se ha aprendido a instalar, configurar y utilizar esos *software* en la RSN.
- **El software SeisComP3.** Este es un programa gratuito (para uso sin fines de lucro) que permite adquirir y procesar datos sísmicos de formato estándar abierto. Se analiza con detalle en el apartado 8.3.2 .

5.2 Las redes sísmicas

En la actualidad, la conceptualización de una red sísmica difiere de la idea mantenida antes de los 60s. En aquella época, las estaciones sísmicas funcionaban de forma independiente en el registro de información, cada una disponía de su propio tiempo de referencia, sin ningún tipo de interconexión entre ellas, de manera que las que se encontraban en una misma región geográfica o pertenecían a un mismo país, se consideraban como una red sísmica (Havskov J. et al. 2012).

A partir de los 60s, cuando se conectan las estaciones con un centro de control mediante cable y/o conexión de radio, las redes sísmicas toman un sentido diferente. Este centro de control, proporcionaba un tiempo único para todas las estaciones de la red, lo que facilitaba los cálculos, aumentando la exactitud en la localización de hipocentros. Posteriormente, la evolución de la tecnología ha cambiado la manera de transmitir y de registrar los datos de las mencionadas redes, pasando de la era analógica a la era digital. En la actualidad, las redes pueden ser locales, regionales o globales; diferenciándose entre ellas por su resolución espacial, la calidad de sus datos y el alcance de la investigación que estos permiten, pero no por la dificultad de interconexión entre las estaciones y el centro de control.

5.2.1 Objetivos de las redes sísmicas

Según el nuevo manual de prácticas de observatorio sismológico de 2011 en su capítulo 8 (Havskov J. et al. 2012) una red sísmica moderna se implementa para cumplir uno o más de los objetivos siguientes:

- **Determinación de la localización y la magnitud de los terremotos.** La determinación de la localización hipocentral y la estimación de la magnitud del terremoto (a la mayor brevedad) permitirán conocer si éste puede suponer una amenaza real, con el consiguiente riesgo para la población. Para cumplir este objetivo satisfactoriamente, es decir, con un nivel de incertidumbre relativamente pequeño, se necesita contar con al menos seis estaciones sísmicas adecuadamente distribuidas alrededor del epicentro (este número se puede reducir a 4 estaciones, pero el nivel de incertidumbre aumenta de manera significativa).

- **Generación de una alerta sísmica.** Los gobiernos dan especial importancia al este objetivo, ya que esperan de la red obtener una información que les permita reconocer cuando un terremoto puede conducir a una situación de emergencia, y así poder tomar la mejor decisión posible para proporcionar ayuda a la población y ejecutar acciones tendentes a minimizar las consecuencias adversas para la sociedad.
- **Monitorización sísmica.** El objetivo de monitorización sísmica es tener un buen control de la sismicidad del país, además del seguimiento de procesos concretos, como pueden ser la vigilancia de pruebas nucleares, la evolución de la cámara magmática de un volcán, el llenado de un embalse, etc...
- **Investigación de la estructura interna de la Tierra.** Finalmente, el último objetivo es el más científico de todos y está ligado a los demás, pues para la estimación de la localización hipocentral y de la magnitud del terremoto se requiere disponer de un modelo de velocidades de propagación de las ondas sísmicas a través de la Tierra. Este modelo se construye, en parte a partir de los tiempos de llegada de ondas P⁵ y S⁶ en diferentes estaciones de la red. Una vez construido el modelo, las diferencias entre los tiempos de llegada de las ondas P y S en cada estación, son utilizadas para calcular el epicentro de un terremoto dado (Figura 4), asumiendo un modelo de velocidades de Tierra. De esta forma se resuelve así un problema directo y otro inverso mediante la interpretación de sismogramas.

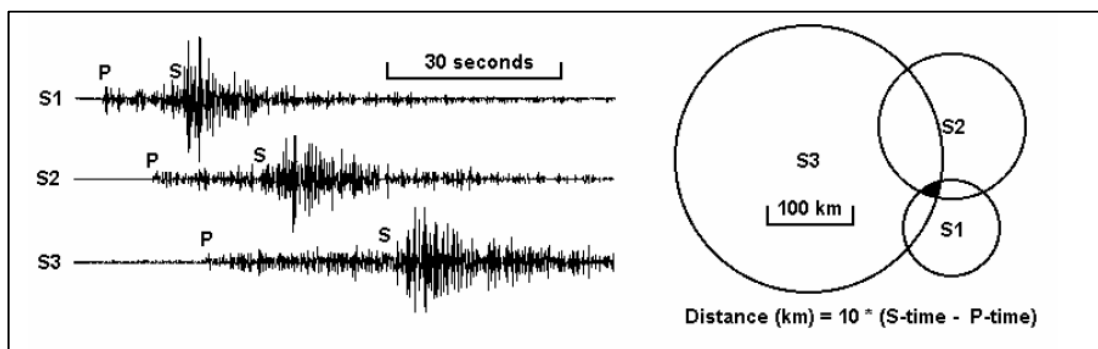


Figura 4. Localización del epicentro. S1,S2,S3 son sismogramas de las estaciones 1,2 y 3. (Havskov J. et al. 2012)

⁵ Las **ondas P** (primarias o *primae* del verbo griego) son ondas longitudinales o compresionales, lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación. Estas ondas generalmente viajan a una velocidad 1.73 veces de las ondas S y pueden viajar a través de cualquier tipo de material líquido o sólido. Velocidades típicas son 1450m/s en el agua y cerca de 5000m/s en el granito. (<http://es.wikipedia.org> Último acceso julio de 2013)

⁶ Las **ondas S** (secundarias o *secundae*) son ondas en las cuales el desplazamiento es transversal a la dirección de propagación. Su velocidad es menor que la de las ondas primarias. Debido a ello, éstas aparecen en el terreno algo después que las primeras. Estas ondas son las que generan las oscilaciones durante el movimiento sísmico y las que producen la mayor parte de los daños. Sólo se trasladan a través de elementos sólidos. (<http://es.wikipedia.org> Último acceso julio de 2013)



A largo plazo, una red sísmica proporciona datos valiosos que son la base para el desarrollo de diferentes estudios, como son:

- generación de mapas de peligrosidad sísmica,
- definición de espectros de diseño sismorresistentes como, por ejemplo, los de los códigos de construcción,
- monitorización de la actividad volcánica,
- identificación de sismos artificiales (pruebas atómicas, minería, etc.).

5.2.2 Estaciones Sísmicas y Sensores

Los elementos principales de una estación sísmica moderna son:

- **El sensor.** Es el instrumento que mide los movimientos de la tierra. Puede ser un sismómetro (medida en velocidad) o un acelerómetro (medida en aceleración) de hasta de tres componentes es decir que mide los movimientos en tres ejes, un vertical y dos horizontales.
- **El pozo.** Es donde se instala físicamente el sensor para registrar los sismos. Es un agujero más o menos profundo dependiendo de las especificaciones del sensor y del nivel de ruido que se pretende registrar en el sitio.
- **El digitalizador.** Es un instrumento electrónico el cual convierte la señal analógica del sensor en una señal digital.
- **Los medios de almacenamiento de datos.**
- **Los sistemas de comunicaciones.** Son las tecnologías utilizadas para conectar las estaciones remotas a la estación central. Pueden ser vía radio, cable, red móvil, satélite etc.

La elección del sensor que se va a utilizar en una estación sísmica es un elemento clave para cualquier red sísmica. Se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- Tipo de sensor (acelerómetro y/o sismómetro)
- Número de componentes por sensor
- Sensibilidad del sensor y su rango dinámico
- Rango de frecuencias
- Manejo del sensor

Los sensores se pueden dividir en 2 grandes categorías según la señal que registran:

- Los sismómetros modernos, son más sensibles y pueden registrar movimientos muy débiles de la tierra, midiendo su velocidad, pero se saturan cuando se producen terremotos grandes.
- Los acelerómetros, pueden registrar movimientos fuertes, midiendo la aceleración del suelo. No se saturan en caso de terremotos fuertes pero no registran los terremotos débiles, lejanos.



En las zonas con alto riesgo sísmico, lo recomendable es tener un sismómetro y un acelerómetro en cada estación sísmica. De esta manera se asegura que la estación tenga un rango dinámico muy amplio, registrando los movimientos más débiles y los más fuertes.

Hoy en día, los sensores con 3 componentes ortogonales, son más asequibles, debido a su cada vez mejor rendimiento y su bajo precio. Los sensores con un solo componente no se suelen encontrar en las redes sísmicas modernas.

Respecto a la sensibilidad de los sensores, se puede señalar que los acelerómetros aunque son diseñados para registrar movimientos fuertes, tienen un rango muy amplio, que puede cubrir desde ± 0.25 g hasta más de ± 4 g en el ($1 \text{ g} = 9.81 \text{ m/s}^2$) con una resolución bastante buena. Esto les permite registrar los movimientos débiles en la red, aunque los sismómetros estén bloqueados después de una saturación.

Actualmente en el mercado existen sismómetros capaces de registrar amplitudes menores que la amplitud del movimiento natural más débil que se puede producir en la Tierra. Por ello, para registrar movimientos débiles, lo más difícil no es encontrar el sensor capaz de registrarlos, sino, por el contrario, la tarea se centra en encontrar un buen sitio con poco ruido donde instalarlo (Havskov J. et al. 2012).

Los sismómetros se pueden clasificar en 4 categorías:

- Corto periodo (*short-period, SP*):
- Largo periodo (*long-period, LP*):
- Sismómetro de banda ancha (*Broadband seismometer, BB*)
- Sismómetros de banda muy ancha (*Very Broadband seismometer, VBB*)

Los SP y LP están diseñados para registrar señales en rangos de frecuencias diferenciados. Así, los SP registran por encima de 0.1 Hz y los LP por debajo de ese nivel. Por su parte, los BB cubren un intervalo ancho, desde 0.01 Hz hasta 50 Hz y los VBB pueden registrar desde 0.001 Hz hasta 10 Hz. Los acelerómetros, por su lado, registran movimientos hasta frecuencias de 200 Hz.

Los aparatos de corto y largo periodo se basan en dispositivos mecánicos fundamentalmente, siendo relativamente fáciles de instalar y operar. La elección del sitio donde situar el aparato demanda poca exigencia. Los instrumentos más modernos son más difíciles de manejar y de instalar, requiriendo un alto nivel de exigencia para la elección del emplazamiento y el manejo del equipamiento.

5.2.3 Configuración de las redes sísmicas

Las redes sísmicas antiguas son un conjunto de estaciones autónomas que no tienen ningún tipo de comunicación con un centro de datos, de modo que se debe visitar la estación para recoger la información registrada. La mayoría de las estaciones sísmicas modernas no funcionan así. En ellas las estaciones están transmitiendo telemáticamente datos en tiempo real, casi real o bajo demanda a un centro de datos vía una conexión radio, cable, red móvil, satélite etc.



A menudo se suelen combinar los medios de transmisión/conexión de las estaciones de una misma red, según lo requerido por la situación particular del lugar donde están instaladas. En una misma red se pueden encontrar estaciones conectadas vía cable, otras vía satélite, otras vía red móvil, etc.

En la actualidad han proliferado las estaciones sísmicas conectadas a internet, lo que hace que la clasificación de las redes con carácter *local*, *regional* y *global* se refiera más a como se procesan los datos y quien gestiona la red (Havskov J. et al. 2012). La mayoría de las redes sísmicas actual son redes virtuales es decir redes que se conectan a estaciones de redes vecinas o remotas, vía internet para adquirir datos y mejorar sus cálculos.

En el mercado están disponibles varios *software* que permiten procesar y compartir datos en tiempo real o casi real vía internet, de ellos podemos mencionar:

- Seiscomp3 (<http://www.seiscomp3.org> Último acceso julio de 2013), el más popular en Europa, fue desarrollado en Alemania.
- Earthworm (<http://www.isti2.com/ew/> Último acceso julio de 2013), desarrollado por USGS
- SEISNET (<http://www.ssdenver.com/SeisNet.htm> Último acceso julio de 2013), desarrollado por la Red Sísmica Nacional Noruega
- ANTELOPE (<http://www.iris.edu/dms/nodes/dmc/software/downloads/antelope/> Último acceso julio de 2013)
- Apollo (<http://www.nanometrics.ca/products/apollo-data-acquisition> Último acceso julio de 2013) desarrollado por Nanometrics.

Otra característica importante de las redes, es la forma de almacenar los datos. La gran disponibilidad de los dispositivos de almacenamiento de datos, más baratos y más potentes, hace que las redes no tengan ningún problema para registrar los datos de manera continua. Antiguamente, solo los eventos significativos estaban almacenados. Hoy en día los algoritmos de disparo (*trigger algorithms*) ayudan en la identificación de esos eventos, y en algunos casos, como en el caso de los movimientos fuertes, se siguen almacenando solamente los eventos más significativos.

5.2.4 Adquisición y procesamiento de datos sísmicos

La tecnología con la cual las redes adquieren datos sísmicos, permite otra clasificación de ellas (Tabla 1). Se pueden dividir en tres:

- **Analógica**, todo el procedimiento es analógico, desde los sensores, hasta el sismograma que se registra sobre papel o *film*. Por ello no se pueden utilizar sus datos en análisis con computadora, ni se registra todo el rango dinámico de los eventos, lo que supone serias desventajas que hacen que estos sistemas se utilicen cada vez menos.

- **Mixta**, en la red mixta el sensor y la transmisión son analógicos pero el archivado, el procesamiento y la adquisición de datos son digitales (Figura 5), lo que la diferencia de la red analógica. Tiene muchas de las limitaciones de la red analógica, pero sus datos pueden utilizarse en análisis con computadora.
- **Digital** (Figura 6), esta red es una red donde todo es digital salvo el sensor. Es la tendencia de las nuevas redes implementadas.

Tabla 1. Comparativo de redes analógica, mixta y digital.

RED	SENSOR	SEÑAL	DEMULTIPLEXOR	ADQUISICIÓN	PROCESAMIENTO	ARCHIVADO
Análoga	Análogo	Análogo	Análogo	Análogo	Análogo	Análogo (papel, film)
Mixta	Análogo	Análogo	Análogo	Digital	Digital	Digital
Digital	Análogo	Digital	Digital	Digital	Digital	Digital

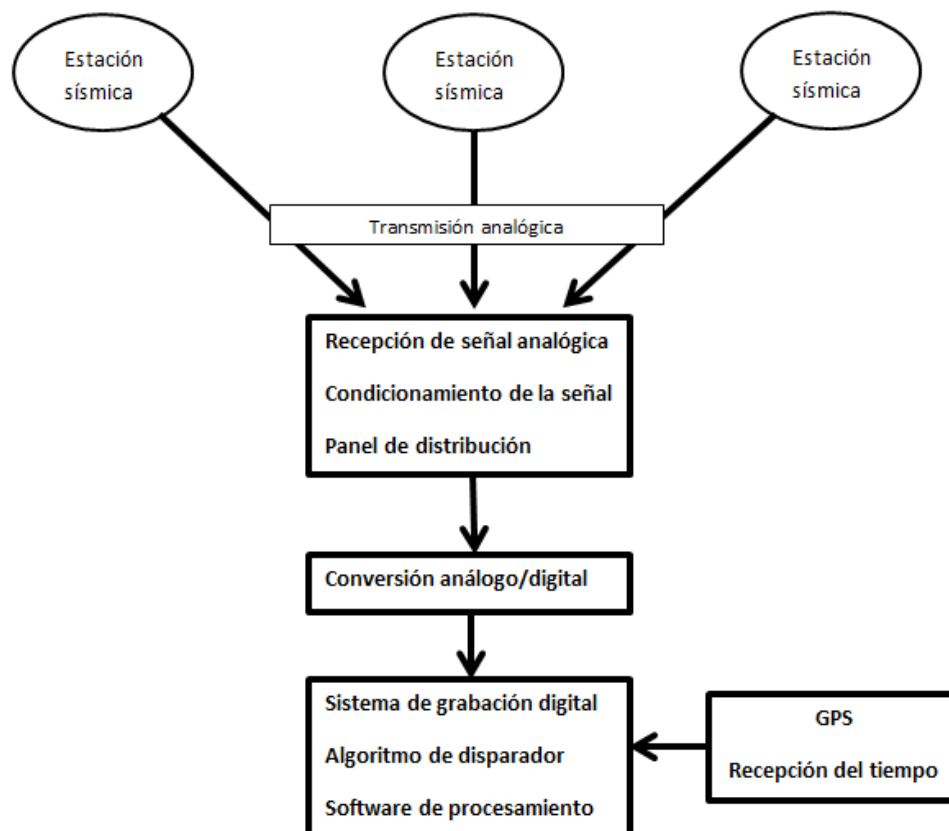


Figura 5. Esquema de una red sísmica mixta. Fuente Havskov J. et al. 2012.

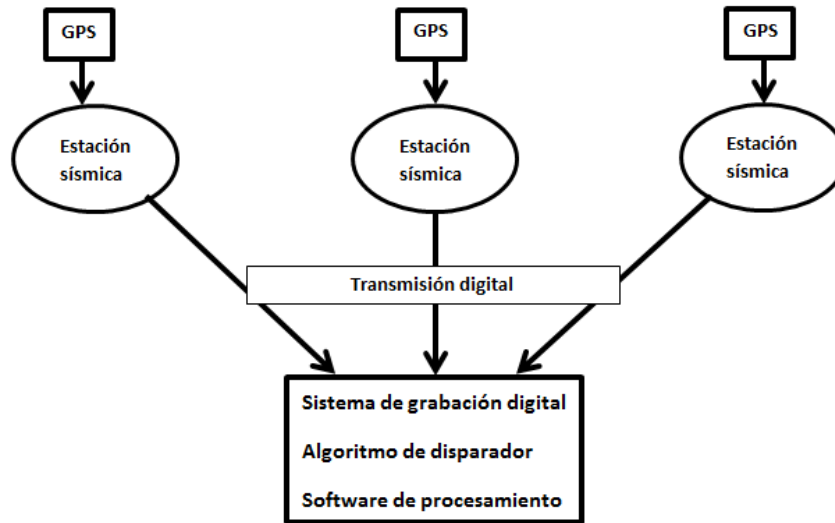


Figura 6. Esquema de una red digital típica. Fuente Havskov J. et al. 2012

5.2.5 Algoritmos

Los algoritmos permiten automatizar unos procesos en el análisis de los datos sísmicos. Hay que señalar dos tipos:

- **Algoritmos de disparo**, los cuales permiten identificar un evento cuando se detecta en una estación sísmica, y esencialmente se basan en:
 - Amplitud umbral de disparo, cuando llega la señal a una amplitud dada el algoritmo alerta o ejecuta una secuencia de comandos.
 - Media cuadrática (Root Mean Square, RMS) umbral de disparo utiliza la media cuadrática de los valores de la señal durante un periodo dado para disparar o no.
 - Ratio del promedio corta duración por el promedio de larga duración (STA/LTA) de la señal sísmica. Según el valor de este ratio se dispara o no. Muchos algoritmos se basan en este algoritmo.
- **Algoritmos de coincidencias**, los cuales intentan identificar un evento sísmico real de la red, relacionando los eventos de las estaciones sísmicas entre sí buscando la correlación en tiempo y espacio.



6 Redes sísmicas en países del Caribe próximos a Haití

Se presentan en este capítulo las principales características de las redes sísmicas de los países del Caribe próximos a Haití, que previsiblemente interactuarán con la Red Sísmica Digital por Satélite Haitiana propuesta en este trabajo. Dichos países son Cuba, Jamaica, Puerto Rico y República Dominicana, cuyos servicios sismológicos han facilitado la información necesaria de las correspondientes redes.

6.1 Red Sísmica de Cuba

La información contenida en este apartado ha sido facilitada por el Centro Nacional de investigaciones Sismológicas de Cuba: CENAIH (www.cenais.cu, Bladimir Moreno, comunicación personal)

Desde la instalación de las primeras estaciones sismológicas en Soroa y Rio Carpintero en 1964 y 1965 respectivamente y hasta el año 1998, el equipamiento instalado en Cuba consistió en diferentes canales sismográficos analógicos, donde los métodos de registro evolucionaron desde los obsoletos galvanómetros de espejo que realizaban el registro en papel fotográfico hasta los registradores visuales de papel y tinta.

Una nueva etapa de desarrollo estuvo marcada por la introducción de la telemetría analógica en Cuba, que permitió la instalación de una red regional de estaciones de corto periodo alrededor de la ciudad de Santiago de Cuba. El uso de canales de radio para transmisión de señales y los primeros experimentos de digitalización de señales sísmicas entre los años 1988-1994 representaron otro notable avance posibilitando la paulatina automatización del análisis, en tiempo real, de estas señales sísmicas.

En 1998 y como resultado de la ejecución de un proyecto de desarrollo tecnológico, con apoyo gubernamental, para la modernización de la infraestructura técnica de la red sísmica cubana, fueron adquiridos en China e instalados equipos que, en su momento, representaron un cambio tecnológico significativo en Cuba con una estructura dividida en:

- una red nacional de banda ancha, dotada de sensores de 20 segundos de periodo y digitalizadores de 16 bits de rango dinámico
- una red regional de corto período, formada por sismómetros de 1segundo y similares digitalizadores
- una red acelerográfica compuesta por 4 estaciones en régimen de disparo y almacenamiento “in situ” de la información.

Desde el punto de vista del análisis fueron introducidos programas de adquisición en tiempo real y de análisis de terremotos que garantizaban el cálculo de los epicentros y una determinación de los parámetros energéticos-espaciales de los eventos sísmicos con relativa precisión.

Sin embargo, la concepción de una red sísmica conectada en tiempo real al Observatorio Geodinámico quedaba comprometida por las limitaciones de conectividad del país, teniendo en cuenta la lejanía de



algunas estaciones, ausencia de líneas de transmisión de datos y complejidades topográficas de las zonas de emplazamiento de las estaciones de campo. La modernización de este equipamiento se convirtió pues, en una necesidad insoslayable del CENAI y de su Servicio Sismológico en aras de mantener el monitoreo de la actividad sísmica en Cuba y zonas adyacentes del Caribe con un alto grado de precisión y fiabilidad.

En la actualidad existen dos redes en Cuba: una de banda ancha cubriendo todo el territorio y otra de corto periodo entorno a Santiago de Cuba.

Red de banda ancha: se compone de 7 estaciones de 60 segundos (excepto la estación Cascorro que dispone de un sismómetro de 120 segundos). La conectividad está garantizada mediante canales de transmisión de datos usando tecnología ADSL, SHDSL y enlaces satelitales, con velocidad de transmisión limitada en la actualidad a 128 Kbytes/s. Los sensores instalados son de 3 tipos:

- Sismómetros BBVS-60⁷ y acelerómetros BBAS-2, instalados en la zona oriental de Cuba cercanos a zonas de fallas potencialmente muy peligrosas y con una actividad sísmica constante.
- Sismómetro de súper banda ancha BBVS-120 en el caso particular de la estación de Cascorro.
- Sismómetros BBVS-60 en el resto de las estaciones del país.

Los sismómetros y acelerómetros están conectados a un digitalizador de 3 ó 6 canales según sea el caso (EDAS-24IP3 ó IP6 respectivamente). Sus principales características son su resolución extendida de 24 bits que representa un rango dinámico de ~ 140 dB, suficiente para el registro de las señales sísmicas. Además soporta el protocolo TCP⁸/IP para transmisión de datos, teniendo la posibilidad de grabación interna de la traza a través de una memoria CP de 8 Gbytes y el marcaje de tiempo mediante una tarjeta GPS que garantiza la precisión en el orden de 10⁻⁶ s. A diferencia de los digitalizadores instalados anteriormente, estas unidades, además la conversión del dato analógico en digital, constituyen equipos inteligentes de adquisición, grabación y tráfico de datos pudiendo ser configurados y encuestados de forma remota usando cualquiera de las vías de conectividad existentes.

La Figura 7 muestra un mapa con la posición de las estaciones de la red sísmica actual de Cuba.

⁷ China Seismological Bureau: www.geodevice.cn/EN/ProductTech.aspx?m=20090918173056659407 Último acceso julio de 2013

⁸ **Transmission Control Protocol** (en español *Protocolo de Control de Transmisión*) o **TCP**, es uno de los protocolos fundamentales en Internet. Este protocolo garantiza que los datos serán entregados en su destino sin errores y en el mismo orden en que se transmitieron. También proporciona un mecanismo para distinguir distintas aplicaciones dentro de una misma máquina, a través del concepto de puerto. (http://es.wikipedia.org/wiki/Transmission_Control_Protocol Último acceso julio de 2013)

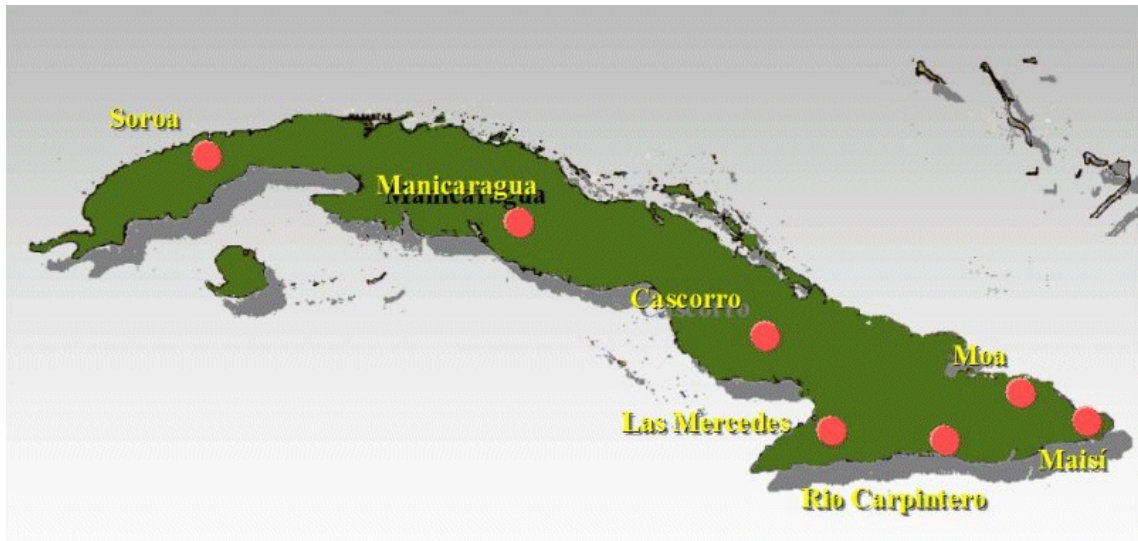


Figura 7. Posición de las estaciones sísmicas de la red sísmica de Banda Ancha de Cuba.

Red de Corto Período: En semicírculo, alrededor de la ciudad de Santiago de Cuba, se extiende una red de 5 estaciones de corto período destinada al monitoreo de la actividad sísmica local. Las 2 que operan en este momento tienen canales de medición formados por sismómetros FSS-3M, sensores de 2 segundos de periodo y alta sensibilidad. Con un montaje tri-axial, acomodan tres sensores correspondientes a las tres componentes N/S, E/W y vertical Z encapsuladas en un solo contenedor.

Los digitalizadores son EDAS-24IP de tres canales de adquisición de datos analógicos, similares a los empleados en la red de banda ancha con solo tres canales analógicos de entrada. La Figura 8 muestra un mapa con la ubicación de estaciones de esta red de periodo corto.

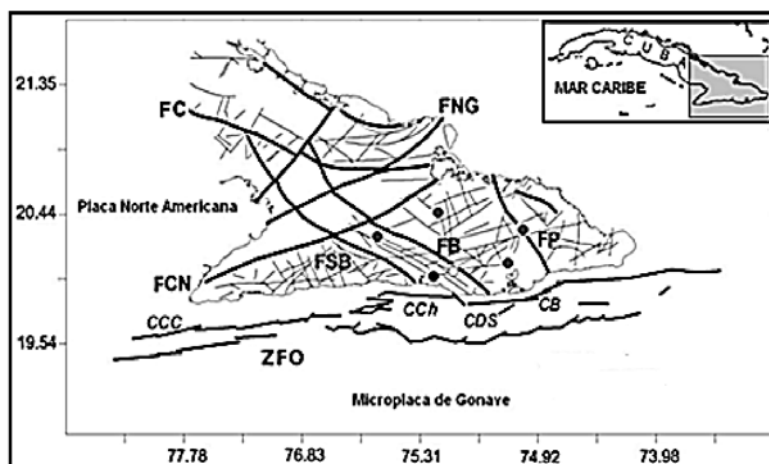


Figura 8. Posición de las estaciones sísmicas de la red de periodo corto entorno a Santiago de Cuba.



Sistema de comunicación

Teniendo en cuenta las peculiaridades de la topografía de la zona de emplazamiento de estas estaciones, fue necesario repetir en un punto dominante todas las señales provenientes de las estaciones de campo. El sistema adopta 2 tipos fundamentales de enlaces de radio profesionales para construir el canal de comunicaciones, de manera que asegure alta fiabilidad, seguridad y velocidad de transmisión en tiempo real. Los enlaces de radio primarios son en la banda de VHF (en el entorno de los 200 MHz) mediante los radios de transmisión de datos serie MDS-2710⁹, configurados en enlaces punto a punto entre las estaciones de campo y el repetidor.

Operando con una velocidad de transmisión de datos de 192Kbps y una potencia de 5 watts, su bajo consumo energético, ideal para aplicaciones de campo donde existe alimentación con baterías, energía solar o ambas garantiza, con antenas direccionales de 9 y 12 dB de ganancia, enlaces fiables de hasta 80 kilómetros de distancia. El programa de interacción con el dispositivo funciona bajo plataforma Windows y una interface amigable de usuario que permite configurar los parámetros descritos con anterioridad.

El segundo enlace de esta red se diseñó usando una pareja de radios Ethernet MDS iNET-II 900, equipos de transmisión de datos a través del protocolo TCP/IP en la frecuencia de 902-928 MHz. El primero de ellos, localizado en la estación repetidora, recibe una trama digital de datos que contiene las señales de todas las estaciones conectadas al sistema. Usando un servidor serial, modelo MOXA 5610, se convierten los datos series provenientes de los radios MDS-2710 en una trama digital afín al protocolo TCP/IP para su posterior transmisión. El servidor serial dispone de hasta 8 canales de entrada seriales bidireccionales para expansiones de la red con la posibilidad de acceso a los servicios TCP Server, TCP Client, UDP y Real Comp. La configuración de sus parámetros se hace mediante interfaces WEB, TELNET o a través de un programa específico sobre plataforma Windows.

El radio MDS iNET-II 900 es un transceptor del tipo “Plug and Play” que provee una conexión tipo “Ethernet Bridge” y tiene la posibilidad de configuración IP soportando los protocolos DHCP y DNS de manera que su integración en una red de transmisión de datos se simplifica. Con una potencia de transmisión de 1 watt y bajo consumo energético, asegura un enlace de hasta 40 km en línea visual sin interferencias topográficas. Sus parámetros principales pueden ser configurados a través de interfaces WEB, TELNET y programas propietarios bajo Windows.

Soporte energético:

Las estaciones de campo de la red de corto período son autónomas desde el punto de vista energético, dotadas de paneles solares, controladores de carga inteligentes y un banco de baterías. La combinación

⁹ <http://www.logic-control.com/datasheets/18/Data%20Acquisition/x710/3447G-1710-2710ACD.pdf> Último acceso julio de 2013



de estos elementos, la alta eficiencia de conversión de los paneles solares unido a la capacidad de las baterías garantizan el funcionamiento ininterrumpido de las estaciones independientemente de la red eléctrica nacional.

Centro de datos o Estación Central:

La estación central cumple los siguientes requisitos fundamentales:

- Posibilidad de recibir los datos digitales correspondientes a las señales sísmicas detectadas en tiempo real a través de Internet o enlaces inalámbricos de transmisión de datos, almacenar estos localmente y generar los ficheros de datos para su posterior análisis.
- Auto-detección de los posibles eventos sísmicos, realización de la localización automática de sus epicentros y cálculo de sus parámetros energéticos para generar los ficheros de eventos y temporales.
- Capacidad de brindar información sobre el estatus de la red
- Ofrecer la posibilidad de la acción humana en el sistema a partir del re-análisis de los datos registrados.
- Gestionar una base de datos online que permita el control de los registros de eventos y el resultado de su análisis, la elaboración de mapas de epicentros, el intercambio de información, la generación de reportes temporales y la edición de catálogos de terremotos.

Hardware

El hardware de la estación central está integrado por los siguientes elementos:

- Un servidor de adquisición en tiempo real de los datos sísmicos que además funciona con servidor de intercambio de datos.
- Un servidor que soporta la base de datos online y los programas de monitoreo del sistema y la red.
- Un servidor de adquisición en SCO Unix para soporte, en caso de fallo del servidor Windows.
- Un set de computadoras para análisis de los registros sísmicos on-line y off-line.
- Elementos de interconexión, ruteadores, conmutadores y otros.

Software

El software se compone de los siguientes programas:

- Programa de procesamiento en tiempo real (EDSP-RTP)
- Programa interactivo de análisis de datos (EDSP-IAS).
- Programa de análisis de datos de terremotos fuertes (SMA-IAS).
- Programa para servidor de intercambio de datos.
- Sistema de monitoreo en tiempo real (EDSP-MON).
- Sistema de manejo de base de datos (SCATA, DBMAG, SCC, STNADM).



- Windows Server 2008.
- Windows SQL 2008.

6.2 Red Sísmica de Jamaica

La información de esta red ha sido facilitada por Harleen Black, (Earthquake Unit. Comunicación Personal) y a través de consultas a la página Web del Centro Sismológico del país (<http://www.mona.uwi.edu/earthquake/jamseisnet.php> Último acceso julio de 2013).

La Jamaican seismological Network (JSN) es operada y mantenida por el staff de la Unidad de terremotos (EQU). Se presentan a continuación de forma resumida las principales características de esta red.

Sensores:

La red dispone de 12 sismógrafos permanentes de corto período, de los cuales 10 son estaciones simples de componente vertical y 2 son estaciones de 3 componentes. Hay también 8 acelerógrafos digitales y 4 estaciones de banda ancha.

En febrero de 2013, la Oficina de Preparación ante Desastres y Gestión de la Emergencia (Office of Disaster Preparedness and Emergency Management, ODPEM) donó 4 acelerógrafos que serán colocados sobre edificios y puentes para registrar el movimiento fuerte causado por terremotos de magnitudes iguales o mayores que 5.

Las estaciones están equipadas con sismómetros Mark-L-4 de periodo de 1 s y electrónica de campo Geotech¹⁰. El monitoreo es continuo, sin embargo el registro tiene lugar solo cuando 3 o mas estaciones son disparadas, lo que supone un aumento en la probabilidad de que el terremoto ha ocurrido.

Sistema de comunicación (transmisión):

7 de las 12 estaciones son alimentadas con energía solar. Los datos son transmitidos por radio UHF al centro de datos de la estación central.

Centro de datos:

La Central Recording Station (CRS) se encuentra situada en el Campus Mona de la universidad West Indies en Kinstong. Allí las señales son digitizadas a 50 y 100 Hz. Es alimentada mediante un array de 24 paneles solares

¹⁰ <http://www.geoinstr.com/digital.htm> Último acceso julio de 2013

Se usa el software Seislog¹¹ para adquisición de datos y SEISAN para la determinación del hipocentro y otros análisis. Como respaldo a estos programas, siguen usando PC Seismic Data Processing (PC-SDP) para adquisición de datos y Seismic Data Processing (PC-SDP) para el procesamiento (comenzaron a usarlos en 1997).

La Figura 9 muestra un mapa con la posición de las estaciones de la red sísmica de Jamaica.

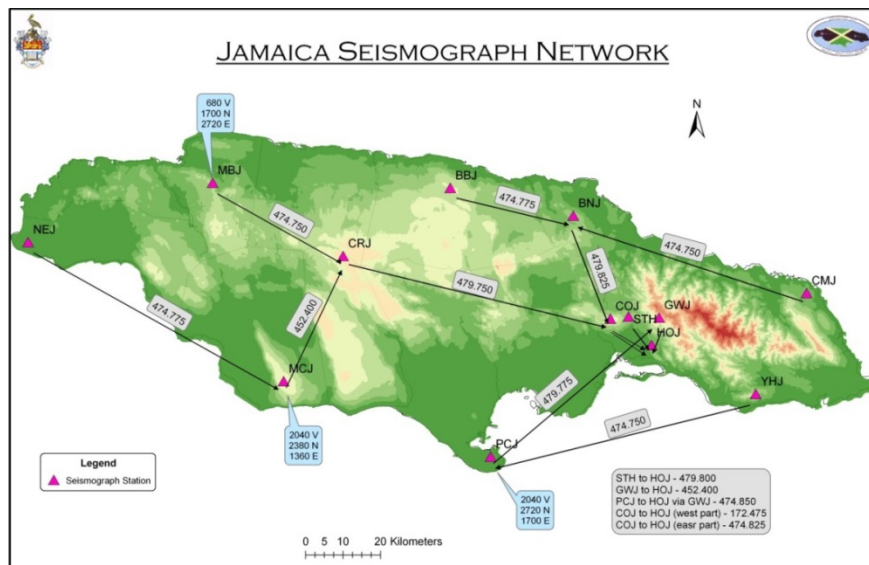


Figura 9. Posición de las estaciones sísmicas de la red sísmica de Jamaica

6.3 Red Sísmica de Republica Dominicana

La información de esta red ha sido facilitada por Eugenio Polanco (Instituto Sismológico Universitario de la Republica Dominicana (ISU), Comunicación Personal) y a través de consultas a la página Web del Centro Sismológico del país.

(<http://sismologiard.onlinewebshop.net/> Último acceso julio de 2013)

La ocurrencia de un gran sismo el 4 de agosto de 1946, hizo que las autoridades de turno se interesaran en traer a un científico para construir la primera estación sismológica del país. Este fue el Reverendo Joseph Lynn, procedente de la Universidad de Fordhan en los Estados Unidos. Trajo al país una estación temporal y los planos arquitectónicos del edificio donde hoy se aloja el ISU.

El edificio del ISU fue inaugurado el 26 de febrero de 1946, como Estación Central Sismológica, ya cuenta con 61 años de funcionamiento. Su estructura es muy fortificada.

¹¹ http://www.geoarmatech.com/home_htm_files/seislog.pdf Último acceso julio de 2013

Se instalaron dos estaciones: una de período corto y otra de período largo, cada estación era análoga, de tres componentes N-S, E-W y Z . Estos equipos eran de la marca Sprengnether. Con esta instrumentación empezó sus trabajos el ISU.

Durante el primer cuarto de año de 1998 un equipo de sismólogos, ingenieros y técnicos de Kinematics¹² instalaron la primera red sísmica de República Dominicana, cuyo objetivo era establecer una red temporal desplegada en la parte noreste del país. Después de un año de operación la red fue relocalizada a lo largo de todo el territorio nacional y operada por la Universidad Nacional, formando parte de la Red Sismológica Nacional.

Actualmente la red depende de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Santo Domingo.

Sensores:

La red consta de un sistema de monitoreo Kinematics Sierra de 16 canales e incluye 10 estaciones de campo equipadas con sismómetros SS-1¹³, digitalizadores de Kinematics K2 y los radio-tranceptores FreeWave¹⁴ del tipo Spread Spectrum para transmisión de datos digitales en tiempo real a alta velocidad

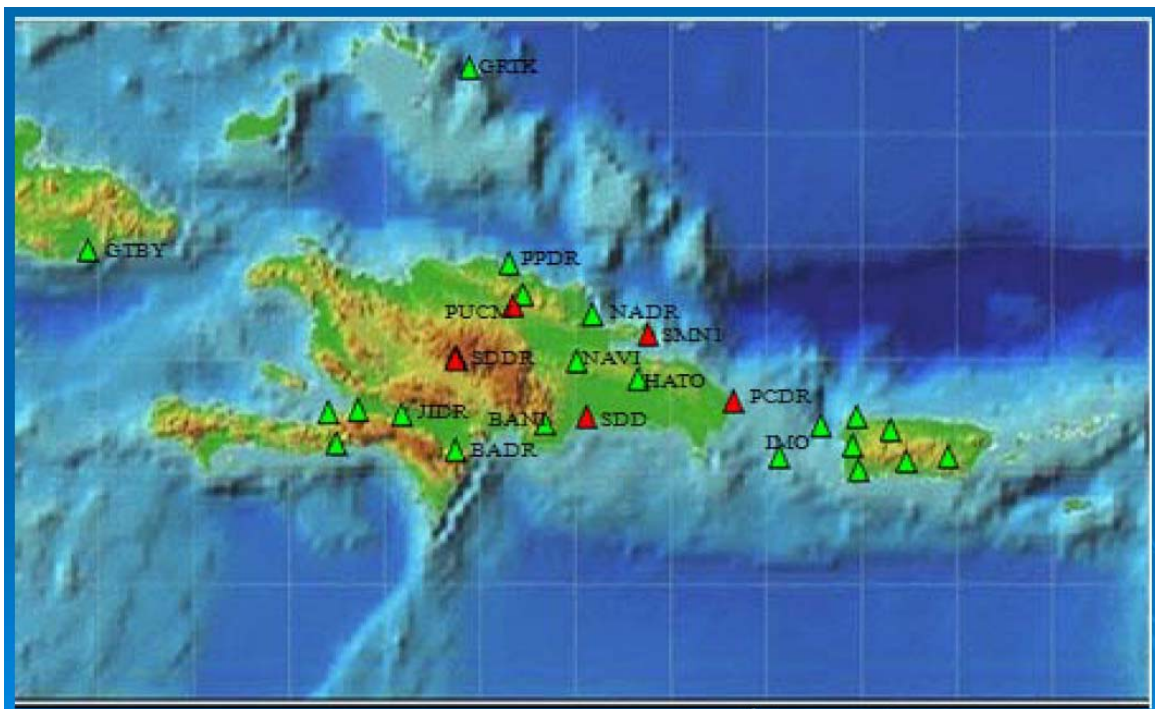


Figura 10. Posición de las estaciones sísmicas de la red sísmica de República Dominicana

¹² <http://kinematics.com/> Último acceso julio de 2013

¹³ <http://www.kmi.com/p-82-SS-1.aspx> Último acceso julio de 2013

¹⁴ <https://www.freewave.com/> Último acceso julio de 2013



Sistema de comunicación (transmisión):

Las estaciones transmiten datos digitales en continuo y esos datos son retransmitidos a la estación central mediante el uso de 7 repetidoras (usando los radios transceptores configurados como repetidoras) con antenas dirigidas.

Centro de datos:

En la estación central, un sistema de procesamiento en tiempo real Sierra adquiere los datos para su procesamiento en tiempo real o diferido. El sistema basado en PC's procesa los datos en tiempo real y da acceso a una información preliminar y rápida del terremoto para la actuación inmediata de la autoridades.

Software:

El software usado incluye las aplicaciones Earthworm¹⁵, Earlybird (para detección automática) y PRDANIS¹⁶ y SEISAN (para análisis interactivo).

6.4 Red Sísmica de Puerto Rico

Todos los datos recopilados en este apartado han sido proporcionados por Víctor Huérfano, director de la Red Sísmica de Puerto Rico, y extraídos de la página web (<http://www.prsn.uprm.edu/Spanish/> Último acceso julio de 2013).

La Red Sísmica de Puerto Rico (RSPR) opera actualmente unas 25 estaciones sísmicas en Puerto Rico, República Dominicana e Islas Vírgenes Americanas y Británicas. Existen dos tipos de estaciones según su tecnología; están las estaciones análogas las cuales consisten de un sensor, un sistema de comunicación, baterías y panel solar y otro equipo electrónico periférico. Y las estaciones digitales que además de contener los equipos ya mencionados necesitan de un digitalizador.

Sensores:

¹⁵ <http://www.earthwormcentral.org/> Último acceso julio de 2013

¹⁶ RDANIS Broadcast, an user-friendly software developed at PRSN by Dr. Victor Huérfano, is the main tool used to generate and disseminate tsunami products.

http://redsismica.uprm.edu/Spanish/tsunami/media/Tsunami_Protocol_Poster.pdf Último acceso julio de 2013

Hay tres tipos principales de sensores: período corto, banda ancha y acelerómetro. Las estaciones de período corto y banda ancha se conocen también como estaciones de movimiento suave pues detectan los eventos de menor intensidad muy bien, pero cuando son muy fuertes, se pueden saturar; su ubicación se muestra en la Figura 11. Los acelerómetros se consideran de movimiento fuerte porque están diseñados para registrar en escala los eventos de mayor intensidad; su ubicación se muestra en la Figura 12.

Sensores de período corto: son Teledyne Geotech S-13 de componente vertical y los Mark L-4 de tres componentes, tienen una frecuencia natural de 1 Hz.

Sensores de banda ancha : la RSPR tiene los siguientes modelos: CMG-40T (30s a 50 Hz), CMG-3ESP (100s a 50 Hz) y CMG-3T y STS-1 (360s y 120s a 50 Hz)

Acelerómetros: son Episensor (FBA de 2g y 4g).

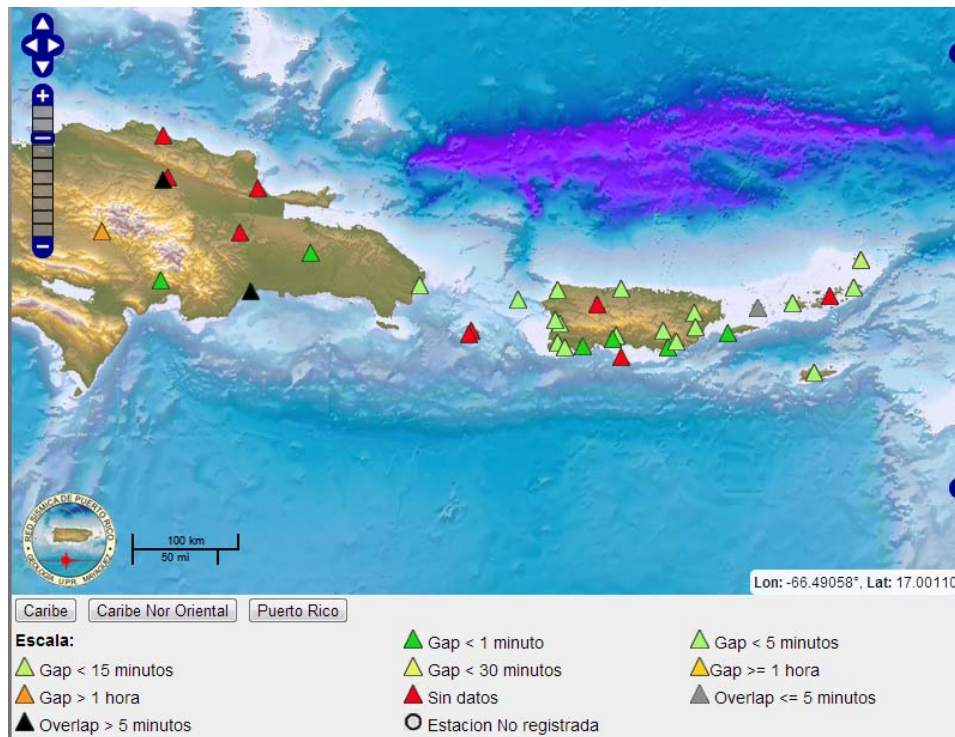


Figura 11. Posición de los sismógrafos de la Red Sísmica de Puerto Rico

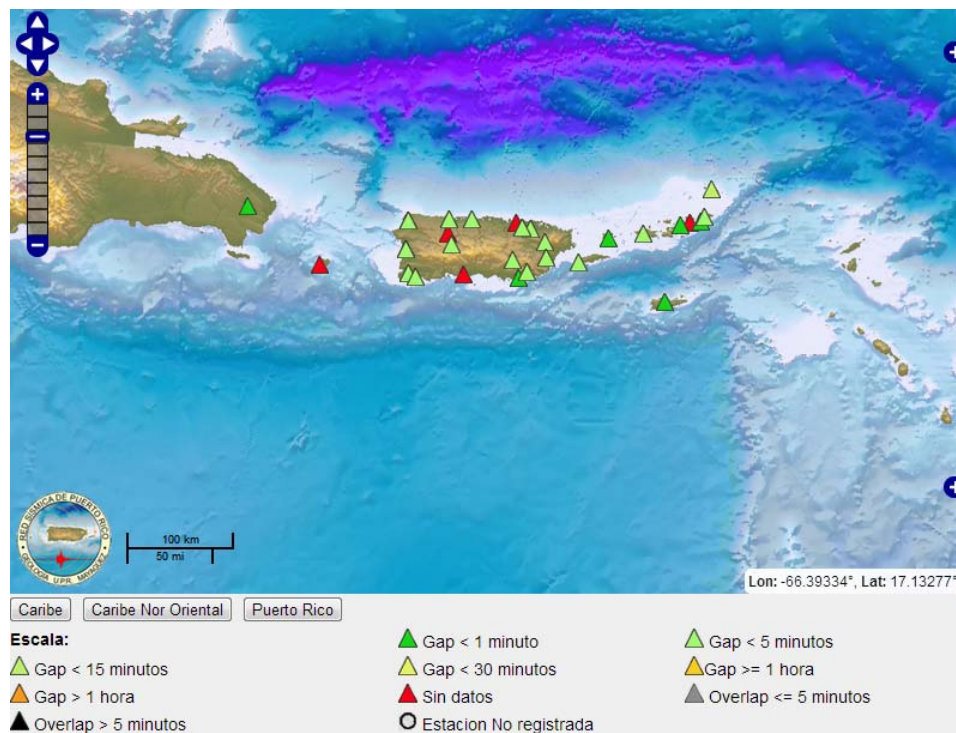


Figura 12. Posición de los acelerómetros de la Red Sísmica de Puerto Rico

Todas las señales son digitalizadas antes de su procesamiento. Los de periodo corto se digitalizan en las oficinas de la Red Sísmica de Puerto Rico, mientras que las de banda ancha y movimiento fuerte se digitalizan en la misma estación. Los instrumentos de período corto al igual que los acelerómetros, se digitalizan a 100 muestras por segundo (sps), mientras que las de banda ancha a 40 muestras por segundo (sps). Para la digitalización de las estaciones de banda ancha se utilizan digitalizadores de la compañía Refraction Technology (Reftek), Q330 Kinematics y Data Acquisition Systems.

Sistema de comunicación:

Para la transmisión de los datos, en tiempo real, son utilizados radios en las bandas de VHF, UHF. También se utilizan radios spread spectrum, microonda, líneas telefónicas dedicadas, transmisión por satélite e Internet. Los datos de las estaciones se envían directamente o a través de repetidoras a Mayagüez. Existen cuatro estaciones repetidoras: Cerro Piña en Caguas, Cerro La Santa en Guavate, Cerro Santa Ana en Maricao y Cerro Punta en Jayuya. En estas repetidoras las señales de las estaciones se combinan y se retransmiten. En Tortola se combinan los datos de las estaciones de Tortola y Anegada para su envío a Mayaguez, Puerto Rico, donde se encuentra la estación central.

Centro de datos o Estación Central:

En la oficina central, ubicada en las oficinas de la RSPR en el Recinto Universitario de Mayagüez, se reciben y se almacenan todas las señales. Todos los datos son procesados de manera digital e incorporados en los catálogos. Hay 6 estaciones que son registradas simultáneamente en papel. En



muchas de las estaciones de banda ancha también hay un grabado de datos temporal en el campo o en la repetidora.

Todos los sismos que la RSPR registra, procesa y localiza son sismos locales o regionales cercanos, no telesísmicos. Para procesar los sismos se utiliza un programa desarrollado en la RSPR, que a su vez utiliza el programa de localización HYPO 2000. Este programa de procesamiento es PRSN Data Analysis and Information System, mejor conocido como PRDANIS.

En el banco de datos de la RSPR se mantienen las series de tiempo en formato PC-SUDS (para aquellos sismos grabados en el sistema IASPEI), SOUFRIERE-nativo, WGSN, GSE-2X, GSE, GRF y REFTEK. Los formatos WGSN y GSE-1 se utilizaron para los sismos grabados con el sistema ViSeis. Las soluciones de todos los sismos en el Catálogo de la RSPR, han sido transformadas al formato PR-HYPO hasta junio de 2004. A partir de julio de 2004, las soluciones de los sismos en el Catálogo de la RSPR están en HYPO-2000.

7 Estado actual de las estaciones existentes en Haití

Justo después del terremoto devastador de 2010 en Haití, la respuesta internacional fue casi inmediata. Hay que reconocer que, además de la ayuda humanitaria de la comunidad internacional, los científicos también se interesaron por el caso haitiano. Así Canadá y Estados Unidos (EEUU), cada uno por su lado y con colaboración de científicos y técnicos haitianos, instalaron sismómetros y acelerómetros en el país para localizar las réplicas y determinar su magnitud con mayor exactitud.

Por un lado, Canadá a través de Recursos Naturales Canadá (RNC) con la participación activa del ONEV instaló tres (3) estaciones permanentes alrededor de la falla de Enriquillo formando así un triángulo que rodeaba el epicentro de aquel terremoto (Figura 13). Con la ayuda de este equipo de técnicos del ONEV, entre los que me contaba, se instalaron un total de seis (6) sensores de tres componentes, un sismómetro BB Trillium acoplado a un acelerómetro Titan conectados cada uno a un digitalizador Trident en cada estación (Figura 14). Aquellas estaciones se alimentaban con energía de paneles solares y transmitían datos en tiempo real al centro de control de la red sísmica de Canadá en RNC a través del satélite SATMEX5, utilizando el sistema de comunicación por satélite Nanometrics Libra.



Figura 13. De izquierda a derecha: Haendel Dorfeuille del ONEV y un técnico canadiense instalando la estación sísmica de Léogane

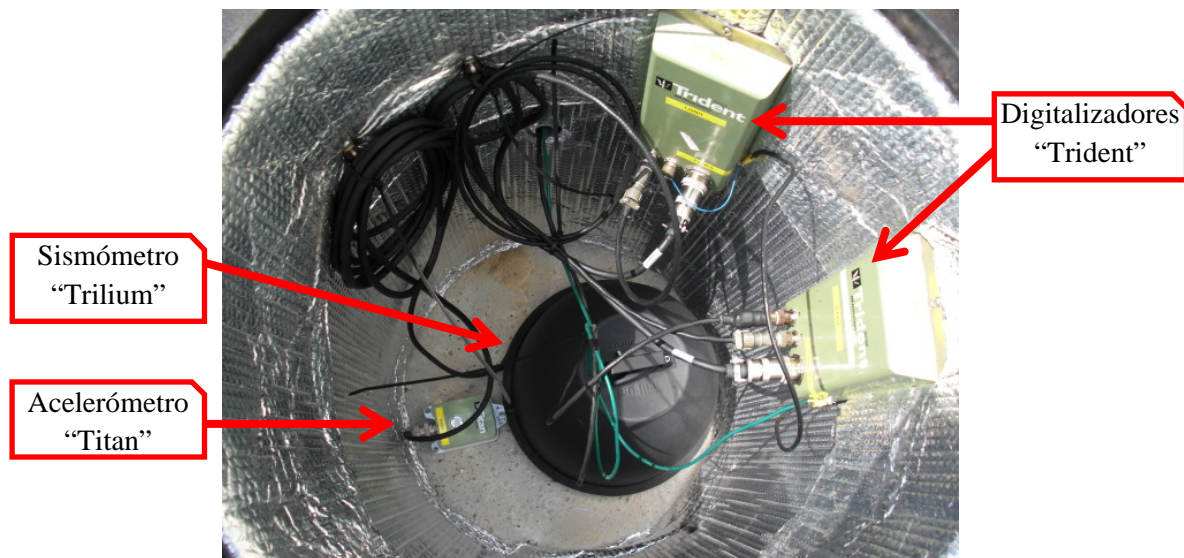


Figura 14. El Pozo de la estación sísmica de Léogane

Por otro lado, EEUU, a través del United States Geological Survey (USGS) con la colaboración del personal del Buró de Minas y de la Energía de Haití (BME) y otras instituciones internacionales desplegó una red de estaciones sísmicas temporal con unos nueve (9) K2, Ocho (8) RefTek y tres (3) BB entre otros dispositivos (Altidor J. et al. 2010). Con estos equipos, se investigaron las variaciones de las sacudidas debidas a las condiciones geológicas locales en Puerto-Príncipe utilizando acelerómetros y se localizaron las réplicas con mayor exactitud alrededor de la falla de Enriquillo combinando todo tipo de sensores. Además, se ubicaron dos (2) estaciones en el norte del país para el monitoreo de la falla septentrional.

Desafortunadamente esos dos embriones de redes han evolucionado de manera separada en el seno del mismo gobierno. Al no tener claro quién debía llevar la responsabilidad de la gestión del monitoreo de la actividad sísmica del país, el Ministerio de Medio Ambiente (MDE) al cual pertenece el ONEV y el Ministerio Transporte Público y Comunicación (MTPTC), que encabeza el consejo de administración del BME, hicieron crecer sus semillas de red de forma aislada con ayuda de organismos y/o instituciones internacionales distintos.

En efecto, en 2011 el ONEV compró cuatro (4) estaciones completas de última generación con el sistema "Libra II" del fabricante Nanometrics¹⁷ para asegurar su compatibilidad total con las tres primeras. No obstante, no consiguió el presupuesto ni para instalarlas ni para montar un centro de control de su red digital por satélite en Haití. El ONEV tomó entonces la decisión de dotarse de las competencias técnicas

¹⁷ Fabricante canadiense de sensores sísmicos, meteorológicos y sistemas de telecomunicación
<http://www.nanometrics.ca/> Último acceso julio de 2013

requeridas para completar y gestionar la red y por ello mandó parte de su personal a otros países para estudiar el tema. Mi estancia en España, becado por la UPM para estudiar este máster, así como las prácticas en la RSN del IGN y en la empresa Tekpam se enmarcan en esta iniciativa. Mientras tanto, en 2012, dos de esas estaciones han sido instaladas con la ayuda de la RSN pero todavía no han sido configuradas correctamente. Uno de los objetivos de este TFM es aprender a instalar y configurar estaciones, completando la instalación de las dos estaciones restantes y la correcta configuración de las cuatro (4).

De momento RNC recibe los datos de las tres antiguas estaciones directamente del satélite, el ONEV como otras instituciones del mundo pueden acceder a esos datos a través una conexión web (Figura 15).

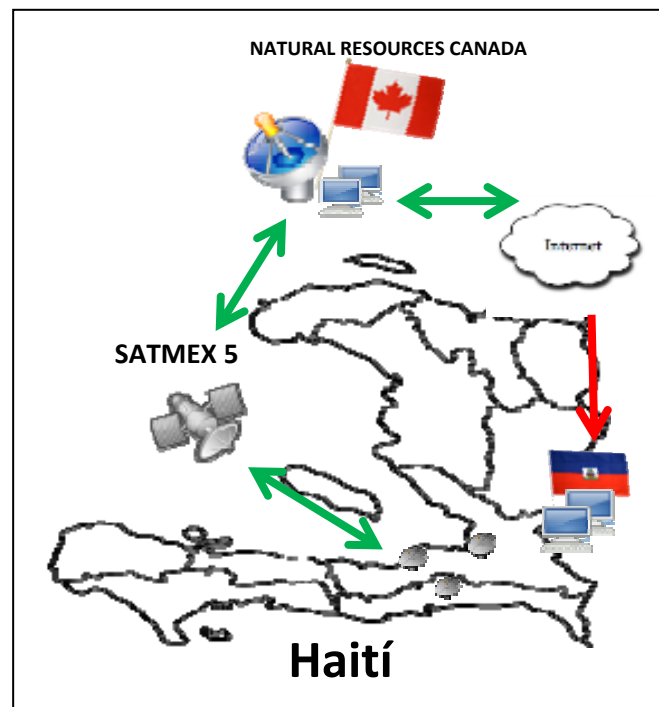


Figura 15. Esquema del flujo de datos entre las estaciones, RNC y el ONEV.

La estación de Puerto Príncipe está en un sitio seguro pero siempre ha tenido problemas de alimentación y de visibilidad al satélite debido a la cantidad de árboles que la rodean (Figura 16). Al estar dentro de la casa de un diplomático canadiense a veces no es fácil conseguir el permiso para hacer el mantenimiento. Se le ha añadido un cable eléctrico conectado a la red eléctrica de la casa pero más de una vez se ha desenchufado sin realmente conocer el motivo y la estación por supuesto se queda sin electricidad y no puede emitir. Las baterías de esta estación deben ser cambiadas lo antes posible.



Figura 16. Mala visibilidad de SATMEX5 desde la estación de Puerto Príncipe. El punto rojo indica la posición del satélite en programa de realidad aumentada para iPhone “Dish Pointer AR”

A pesar de encontrarse en el aeropuerto de Jacmel, la estación de Jacmel ha sufrido las consecuencias de actos de vandalismo. Se le robaron los paneles solares al menos dos (2) veces en 2011. Entonces, el ONEV tomó la decisión de proteger la instalación. Para ello se construyó una valla, se soldaron los paneles solares a la estructura y se contrató vigilancia propia para la estación. Aquella estación tiene muy buena visibilidad, y como el tráfico aéreo es bajísimo, tiene un nivel de ruido bastante aceptable. Las baterías deben ser cambiadas lo antes posible.

La estación de Léogane es la que menos problemas da. Está encerrada por una valla, dentro de las instalaciones de un orfanato, que a su vez está vallado. Nunca robaron nada de la misma, y recibe la energía solar suficiente para alimentar sus baterías las cuales deben ser cambiadas lo antes posible. Lo único es que en la forma de onda que viene de esta estación se sabe si los niños se han acostado o no.



Figura 17. Estación sísmica de Hinche (2012)

Las dos estaciones instaladas en Hinche y Cabo Haitiano se han beneficiado de las lecciones aprendidas de los robos de Jacmel. Se han instalado dentro de una valla y los paneles solares están soldados a un mástil clavado en suelo con hormigón, como se ve en la Figura 17. Su antena está bien apuntada pero la configuración su modem no es correcta.

La Tabla 2 presenta un resumen del estado actual de las estaciones instaladas por el ONEV.

Tabla 2. Estado de las estaciones sísmicas ONEV/RNC

Estación	Latitud	Longitud	Baterías	visibilidad	Transmisión VSAT	configuración
Puerto Príncipe	18.5225	-72.2993	malas	mala	no transmite	completa
Jacmel	18.2376	-72.5180	malas	buena	intermitente	completa
Léogane	18.5109	-72.6058	malas	buena	intermitente	completa
Hinche	19.1866	-72.0137	nuevas	buena	no transmite	incompleta
Cabo Haitiano	19.3849	-72.1274	nuevas	buena	no transmite	incompleta

8 Diseño y Configuración de la Red Sísmica Digital por Satélite Haitiana

La RSDSH que se configura en este proyecto está compuesta por las estaciones remotas, el sistema de transmisión de datos vía satélite y el centro de control de la red. Esas estaciones utilizan un sistema de transmisión propietario para comunicarse con el centro de control a través de su centro de recepción o *Hub*. El sistema Libra de Nanometrics está formado por el *Hub* y el sistema de transmisión de las estaciones remotas. A continuación se describe en detalle la composición de la RSDSH.

8.1 El sistema de transmisión de dato vía satélite

El sistema Libra es un conjunto de dispositivos y software de Nanometrics que facilita la implantación de redes de sensores sísmológicos o meteorológicos con bajo coste de mantenimiento. Este sistema permite conectar una estación remota a un centro de control mediante una conexión vía satélite (Figura 18). Es fácil de instalar, tiene un consumo de energía muy bajo y puede ser colocado en cualquier parte del mundo donde haya una visibilidad directa con un satélite geoestacionario que se encargue de la conexión entre estación y centro de control. En nuestro caso el satélite utilizado es el SATMEX5.

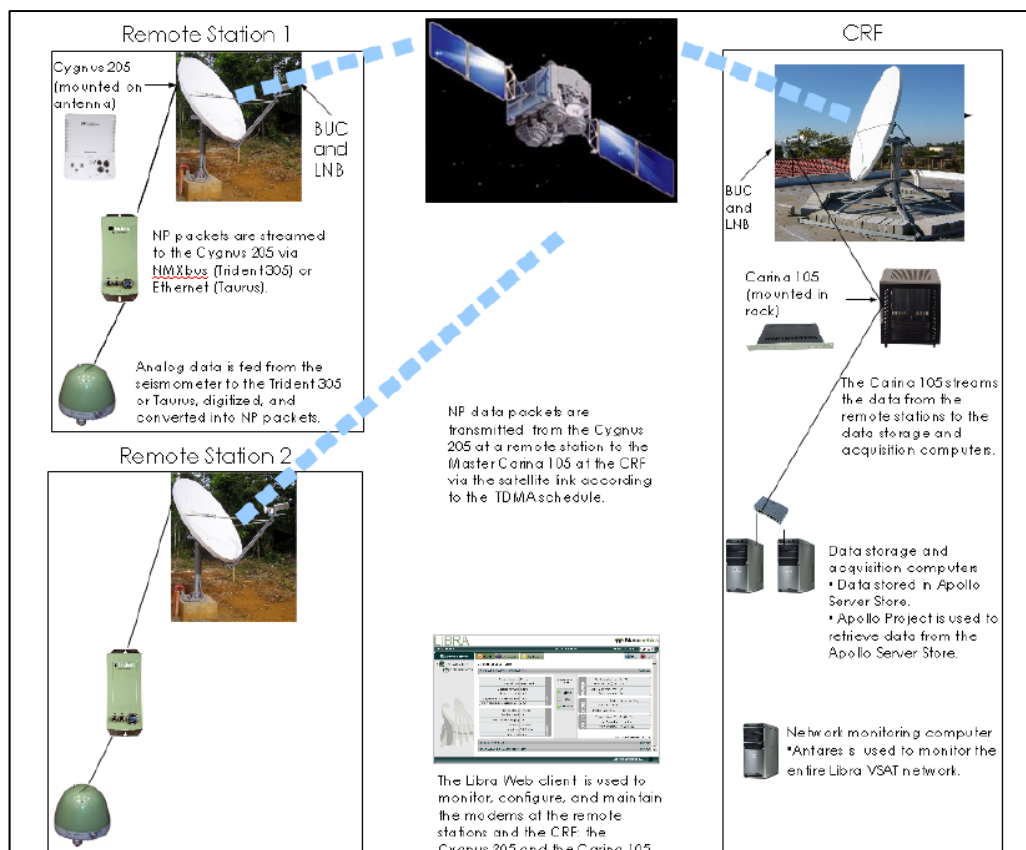


Figura 18. Esquema de la composición del sistema Libra. A la izquierda están las estaciones remotas y a la derecha el centro de control. Fuente: *Libra VSAT Network Operation and Maintenance Guide*.

El sistema Libra se divide en dos partes: por un lado están las estaciones remotas, que registran los sismos, y por otro lado está el centro de control, donde se reciben y se procesan los datos de la red.

8.1.1 Estación remota

Como se puede ver en la Figura 19 una estación Libra típica está compuesta por:

- un **sensor analógico**, el cual registra el sismo
- un **digitalizador** que digitaliza la señal del sensor
- un **transceptor** que maneja la transmisión y la recepción de señal de la estación
- una **antena GPS** que proporciona el tiempo de referencia a todos los dispositivos que lo necesitan para su buen funcionamiento
- una **antena VSAT**, la cual se encarga de la transmisión dúplex entre el transceptor y el satélite
- un **sistema de energía** con paneles solares que alimenta a todos esos dispositivos .

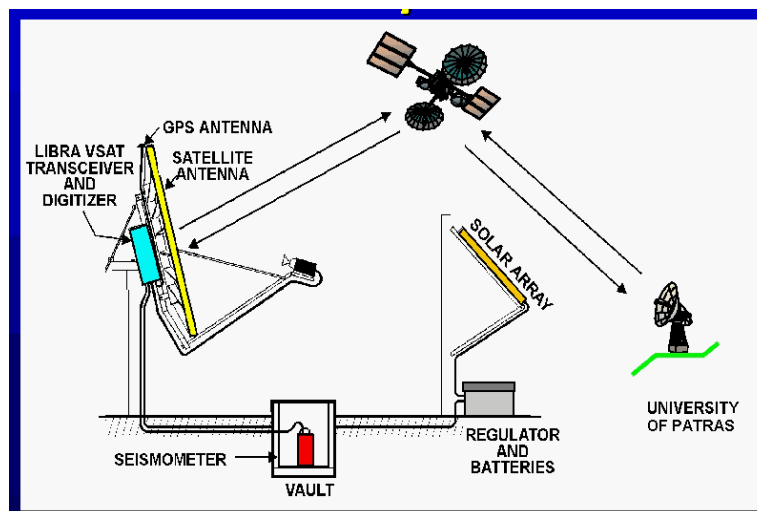


Figura 19. Esquema de una estación Libra conectada a la *University of Patras*. Fuente <http://seismo.geology.upatras.gr/heliplots/about.htm> Último acceso julio de 2013

En nuestro caso cada estación se ubica en el interior de una estructura que la protege y que sustenta los equipos (Figura 20).

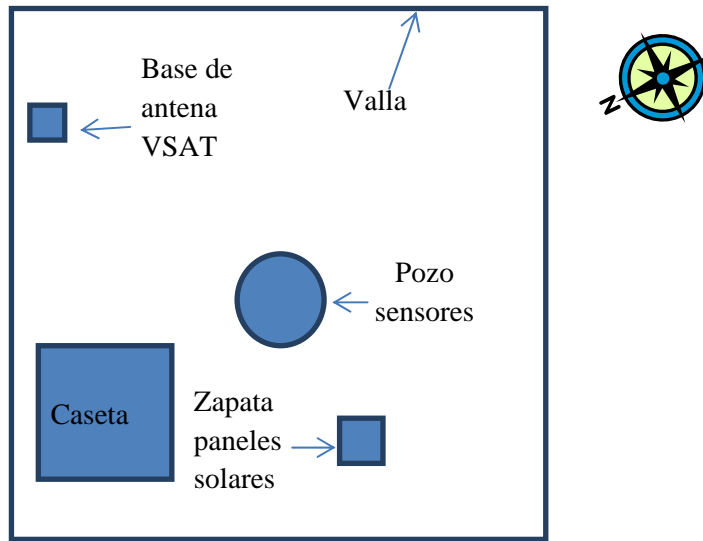


Figura 20. Configuración típica de una estación sísmica de la red

Como se ha mencionado antes, el sensor es el aparato que registra los movimientos de la tierra, y puede ser un sismómetro o un acelerómetro. Como la sismicidad de Haití es especialmente alta, una particularidad de sus estaciones es que cada una lleva dos sensores de tres componentes:

- un acelerómetro **Titan**, escalable de ± 0.25 g, ± 0.5 g, ± 1 g, ± 2 g hasta ± 4 g, con un rango dinámico¹⁸ de 166 dB y que puede trabajar sin problema a temperaturas de -40° C hasta 60° C lo que cubre el rango de temperatura que se suele encontrar en Haití (ver anexo III *Especificaciones*).
- y un sismómetro **Trillium Compact 120s**, el cual mide velocidades de 120 segundos hasta 100 Hz, trabaja en el mismo rango temperatura que el Titan y consume típicamente 180 mW (ver anexo III). (Las 3 estaciones de RNC llevan **Trillium 120PA**, ver anexo III)

Cada sensor está conectado a un digitalizador Trident 305, el cual es un conversor analógico/digital de 3 canales de 24 bit de resolución, con un rango dinámico de 142 dB y capaz de tomar de 10 a 1000 muestras por segundo (*Sample Per Second, SPS*) (ver anexo III). Él envía los datos al transceptor Cygnus en el formato *NMX*¹⁹.

¹⁸ Rango dinámico es el margen que hay desde el *nivel de pico* y el nivel de ruido de fondo. El rango dinámico en $\text{dB} = 20 \log (V1/V0)$ donde V1 es el pico y V0 el nivel más bajo que se puede registrar.

¹⁹ *NMX* es un formato propietario de Nanometrics.



El transceptor *Cygnus 205* envía los datos en banda L (950 Mhz a 1750 Mhz) al SSPB²⁰. Los digitalizadores además de transportar la señal registrada por el sensor, llevan información del estado del mismo y de su propio estado de salud (*State Of Health, SOH*). Esta información se puede ver desde el centro de control de la red mediante el programa *Nanometrics User Interface*. Los datos se encapsulan utilizando el protocolo UDP²¹ antes de ser transmitidos al satélite. Este transceptor dispone de una memoria interna de tipo buffer circular²² de 4 Gb, que le permite descargar y almacenar los datos en la estación con un PC o reenviarlos al centro de control vía el satélite. La memoria aplica la filosofía FIFO²³, es decir, que cuando esta memoria se llena, los datos más antiguos se borran y los datos nuevos se graban en su lugar. El transceptor está conectado a un GPS que le proporciona el dato de tiempo universal, con el estampa la referencia de tiempo en la señal registrada por los sensores. Así se sincroniza la estación con toda la red. Sin este tiempo, la estación no transmite datos.

La antena VSAT de la estación cuenta con un reflector parabólico de 1.8 m, un BUC o SSPB y un LNB²⁴ conectados al transceptor (Figura 21). Establece una comunicación bidireccional con el satélite en la banda Ku (ver las diferentes bandas de transmisión en la Figura 22) con una frecuencia de transmisión diferente de la frecuencia de recepción, las cuales están indicadas en el plan de transmisión del satélite. Utiliza su SSPB para convertir la señal que le llega del transceptor de la banda L a la banda Ku para su transmisión al satélite. Su LNB recibe la señal del satélite y la convierte a la banda L antes de mandarla al transceptor.

En el caso de Haití. Las nuevas estaciones tienen las siguientes frecuencias contratadas con el SATMEX5 (recientemente remplazado por el SATMEX8): 14368.5000 MHz (Vertical) / 12068.5000 MHz (Horizontal)

²⁰ SSPB o BUC : Bloque convertidor de transmisión del inglés *Solid State Power Block-Up Converter, SSPB*. Es responsable de enviar la señal al satélite.

²¹ UDP: User Datagram Protocol, uno de los protocolos del conjunto TCP/IP, que manda los datos sin verificar si han llegado a destino. Es muy utilizado en los sistemas de tiempo real donde se prefiere tener datos rápidamente que esperar para el reenvío de los datos perdidos.

²² Buffer circular: *Ring Buffer* en inglés, es un mecanismo que permite almacenar datos en un espacio de tamaño dado sobrescribiendo los datos más antiguos con los nuevos datos una vez llegado al límite de la capacidad del espacio (http://es.wikipedia.org/wiki/Buffer_circular. Último acceso julio de 2013)

²³ Primero en entrar primero en salir del inglés *First In First Out, FIFO*.

²⁴ LNB: Bloque convertidor de recepción del inglés *Low Noise Block-downconverter, LNB*. Es responsable de recibir la señal del satélite.

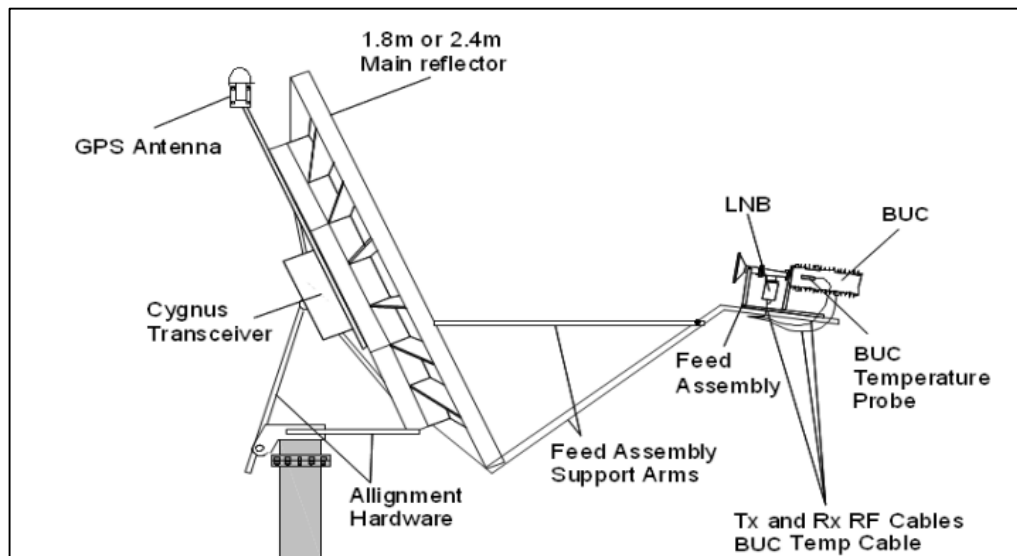
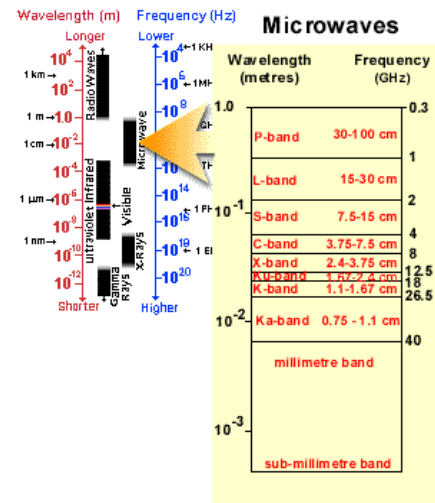
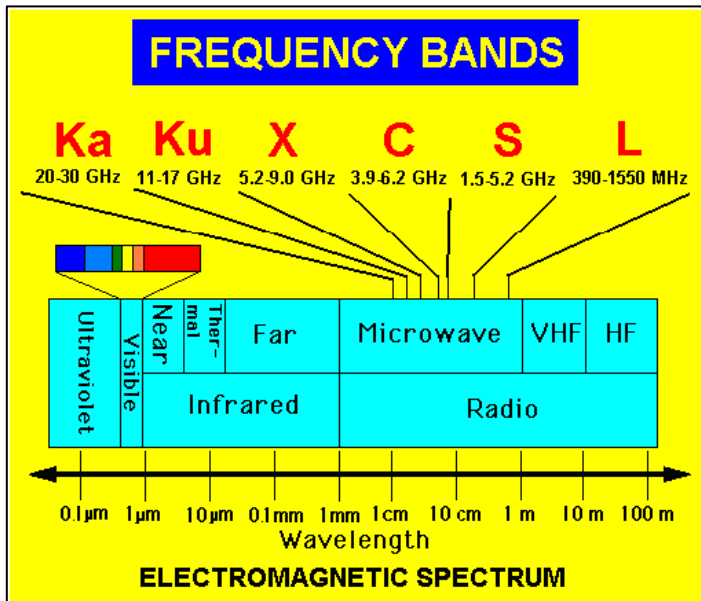


Figura 21. Esquema de una antena Libra II. Fuente *Libra II VSAT network*
http://axil.igp.gob.pe/redes/nanometrics/LibraII_PP_R1.pdf Último acceso julio de 2013

El Libra II consume menos energía que el Libra I (1/4), lo que hace que en las nuevas estaciones se utilicen 3 veces menos paneles solares, necesitando solo 2 paneles solares de 120 vatios con dos baterías de 200 Amp.h²⁵ cada una. El hecho de que Haití tenga radiación media anual de 6.5 a 7 Kvatios/m²/día) asegura la recarga de las baterías²⁶. Este sistema también proporciona información sobre su estado de salud (*State Of Health*, SOH).

²⁵ Amperio x hora

²⁶ <http://prod-http-80-800498448.us-east-1.elb.amazonaws.com/w/images/1/1d/NREL-dircarib.pdf> Último acceso julio de 2013



© CCRS / CCT

Figura 22. Bandas de frecuencia de microondas del espectro electromagnético. Fuente <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geography-boundary/remote-sensing/fundamentals/1879> Último acceso julio de 2013

El transceptor tiene un puerto Ethernet donde se conecta un PC y se configura con la aplicación web Libra (Figura 23). Esto permite configurar los parámetros de transmisión desde la misma estación. La estación necesita el tiempo del GPS para transmitir. Los detalles de la configuración están en el Anexo IV.

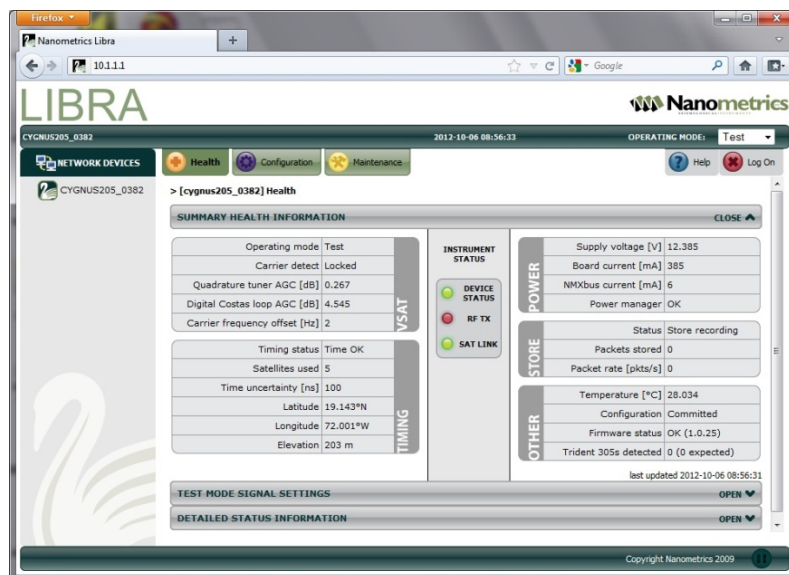


Figura 23. Captura de pantalla de la aplicación web Nanometrics Libra el cual permite configurar el Cygnus 205.



8.1.2 El HUB

El HUB es el elemento de la red que comunica con las estaciones a través del satélite (Figura 24). Recibe datos en tiempo casi real de las estaciones Libra (retraso < 10s), su composición básica es la siguiente:

- Una **antena VSAT** cuyo tamaño depende del plan de transmisión del satélite
- Un transceptor ***Carina Transceiver***,
- Un combinador ***Carina splitter/combiner*** (opcional),
- Un **antena GPS** por cada transceptor

En nuestra red se plantean dos *Carinas Transceiver* y por consiguiente un *Carina Splitter/Combiner* y dos antenas GPS. Nuestro HUB recibe los datos de las estaciones remotas vía el LNB de su antena VSAT de 2.4 m y transmite datos vía el SSPB de la misma antena en la banda Ku. El LNB y el SSPB están conectados al *Carina Splitter/combiner* a través de un cable en la banda de frecuencia L. Aquel dispositivo divide y/o combina las señales de las estaciones según el sentido de la transmisión. Al recibir la señal del LNB, la divide y la manda tal cual a los transceptores *Carina* conectados. Los datos transmitidos por cada *Carina* se agrupan para transmitirlos al SSPB para su transmisión al satélite en una única señal.

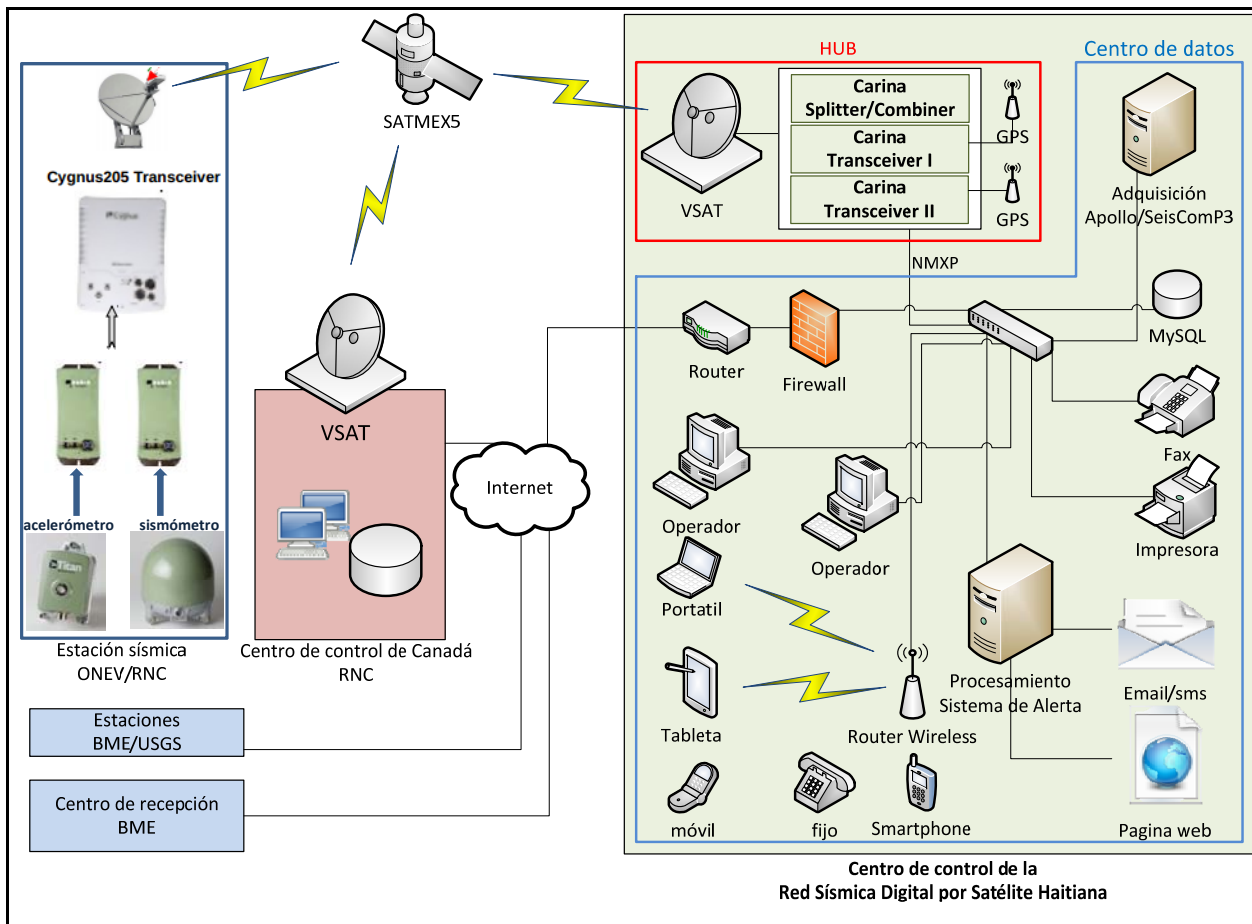


Figura 24. Esquema de la Red Sísmica Digital por Satélite Haitiana

Según el manual de Nanometrics es necesario un Splitter/combiner cuando se instalan de dos (2) a cuatro (4) Carina transceiver (Nanometrics, 2009a) pero en nuestro caso se utilizan solo dos (2), uno que reciba las 3 antiguas estaciones Libra I y otro que reciba las nuevas Libra II. Cada transceptor está conectado a una antena GPS, la cual marca el tiempo universal y garantiza la sincronización del equipo con todos los transceptores de la red.

En el Libra I los Carina se configuran a través de una herramienta gráfica el programa Nanometrics User Interface (Nanometrics, 2004b). En el *Libra II* se utiliza la aplicación web *Nanometrics Libra* la cual esta asequible desde un navegador web de un PC que tenga acceso al HUB. Deben ser configurados para recibir un tramo de 100 KHz determinado del espectro electromagnético. También determinan el orden de transmisión de las estaciones que están bajo su responsabilidad. Así, para evitar cacofonías, y por tanto, pérdidas de información, cada estación debe estar programada para realizar la transmisión en la ventana temporal adecuada. Como no todas las estaciones transmiten simultáneamente, se aprovecha una misma banda de frecuencia compartida del satélite en toda la red. Esta técnica se llama Acceso Múltiple por División en el Tiempo, *TDMA* (Maral G. 2003).



Los diferentes elementos descritos se conectan entre si configurando la Sísmica Digital por Satélite Haitiana, según el esquema de la Figura 24.

8.2 El centro de datos

El centro de datos es donde se adquieren y se procesan los datos de la red sísmica, de forma que la unión de dicho centro y el HUB constituyen el centro de control de la Red Sísmica Digital por Satélite Haitiana (Figura 24). Normalmente los Carina son conectados al centro de datos por medio de un router. En nuestro caso existe un router que conecta la red local (Local Area Network, LAN) del centro de datos con internet y un firewall el cual se encarga de filtrar esa comunicación. No es obligatorio filtrar los datos del Hub antes de transmitirles al LAN pero si es posible es conveniente protegerse para mayor seguridad. Un switch activo constituye el nodo principal de la LAN y distribuye la señal a todos los dispositivos de la misma. Así a este switch están conectados los siguientes elementos:

- Un servidor con Seiscomp3 y Apollo²⁷. El Apollo recibe los datos en formato NMXP de los Carina y les convierte en otro formato legible por otros programas. En nuestro modelo se utiliza el SeisComP3 el cual adquiere los datos del *Apollo server*, les procesa y emite las alertas según se configuren. El mismo también adquiere datos de otras redes vía internet.
- Un servidor de base de datos (BB.DD.) MySQL. Esta es la que utiliza por defecto el software Seiscomp3.
- Dos PC que están dedicados al picado manual, revisión de eventos, cálculo de la magnitud y de la localización de los terremotos. Se desea tener dos operadores simultáneamente trabajando sobre esos dos PC 24X7.
- Un ordenador que gestione el sistema de alerta de la red el cual puede mandar fax, email, sms etc. a las personas de interés según el terremoto calculado por el sistema SeisComP3. El mismo sistema de alerta actualiza la información de la página web del centro y de sus cuentas en las redes sociales.
- Un Fax para recibir y mandar información a otras instituciones.
- Una impresora de red.
- Un router inalámbrico para la conexión de los dispositivos inalámbricos, como portátiles o tabletas

En este centro hay por lo menos una pantalla grande donde siempre se muestran las formas de onda recibidas de las estaciones. Además, una red de telefonía local PBX facilita la comunicación entre los diferentes despachos del centro. Para asegurarse de que siempre haya conexión con el mundo exterior se

²⁷ Apollo es un programa de la casa Nanometrics. Es un servidor que permite leer el formato NMXP entre otras funcionalidades



contrata el servicio con diferentes proveedores de telefonía fija y móvil así como de acceso a internet cableado y/o satélite.

Para tener completa autonomía energética y proteger el equipamiento el centro cuenta con un generador eléctrico un inversor (eléctrico) y un UPS²⁸.

8.3 Adquisición y procesamiento de los datos

En este apartado se presenta los dos Software de adquisición y procesamiento que se utilizan en el centro de datos que son el Apollo y el SeisComp3.

8.3.1 Software Apollo para adquisición de datos

Para adquirir y procesar los datos sísmológicos se necesita un software especial como los que se han mencionado en el capítulo de las redes sísmicas. En el sistema Libra II los datos salen del HUB en el formato NMX, lo que hace imprescindible la utilización de un software de Nanometrics que pueda leerlos y reenviarlos a otros programas en otro formato. En el conjunto de programas comprados por el ONEV juntos a las estaciones Libra están los programas de adquisición de datos Apollo.

8.3.1.1 Arquitectura de Apollo para adquisición de datos

La arquitectura de Apollo es multiplataforma, es decir que los programas que la integran pueden ser instalados en MacOs, Linux o Windows sin problema. Utilizan un interface gráfico web para su configuración y operación. Los *software* específicos de adquisición de datos Apollo son:

- **Apollo Server** el cual permite adquirir, archivar y distribuir los datos. Reemplaza los antiguos NaqsServer, DataServer, NaqsToUDP, SeedlinkToUDP y NpToNMXP de Nanometrics. Recibe datos del HUB directamente. Además de los datos sísmicos de las estaciones puede también recoger datos de otra fuente por medio de su cliente Seedlink (Nanometrics, 2010). Implementa también un emulador de servidor Seedlink lo que le permite proporcionar datos a otro cliente Seedlink en formato SEED²⁹. Se detallara más sobre este programa más adelante en este capítulo.
- **Apollo Project** es un programa que facilita el archivo de datos. Es capaz de encontrar los datos perdidos o que faltan y cuando están disponible de nuevo actualiza la BB.DD. automáticamente.

²⁸ Un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI), por sus siglas en Inglés Uninterrupted Power System

²⁹ SEED: Formato estándar para el intercambio de datos sísmicos, del inglés *Standard for the Exchange of Earthquake Data*. Esta compuesto de los datos y de los metadatos de los sensores. Básicamente un *miniSEED* es un fichero SEED tomado sin sus metadatos, mientras que una *data less SEED* contiene los metadatos sin los datos. (SEED reference manual Version 2.4, August, 2012)



Puede proporcionar datos en formato miniSEED³⁰, SEGY, SAc o ASCII. La licencia de este software depende del número de canales que se van a archivar a la vez. El ONEV compró una licencia para 30 canales.

- **Antares Network Management** el cual simplifica el monitoreo del estado de los equipos y del funcionamiento de la red sísmica. Este programa da una visión general de toda la red en tiempo real así como la historia del SOH de todos los equipos de la red. Es una herramienta muy potente y muy simple para el monitoreo y el análisis de la red.
- y **Apollo Waveform** es una herramienta grafica que muestra la forma de onda de los canales recogidos por el *Apollo Server*. Utiliza el protocolo UDP para adquirir los datos del servidor, lo que hace que pueda ser instalado en cualquier ordenador que tenga acceso al mismo. Además de graficar por separado la forma de onda de cada canal de su lista de canales, también proporciona su SPS, su media, su mínimo, su máximo y su media cuadrática.

8.3.1.2 Descripción del funcionamiento del Sistema Apollo para adquisición de datos

El funcionamiento del conjunto esta resumido en el esquema de la Figura 25. El *Apollo Server* funciona como un servidor web lo que permite su manejo desde cualquier navegador web que tenga acceso a él vía la red. Este servidor recibe y distribuye datos sin necesidad de configuración particular. Implementa aplicaciones que solicitan los paquetes de datos perdidos a las estaciones para completar los datos recibidos.

Este servidor utiliza BB.DD. *STORE* para archivar los metadatos, las series temporales, los SOH, los ficheros Logs y la configuración de los equipos de la red. Esta BB.DD. emplea un mecanismo de *ring buffer* cuyo tamaño determina la licencia del *Apollo Server*, que en nuestro caso es una licencia de 10 Gb.

³⁰ miniSEED es un SEED sin los metadatos.

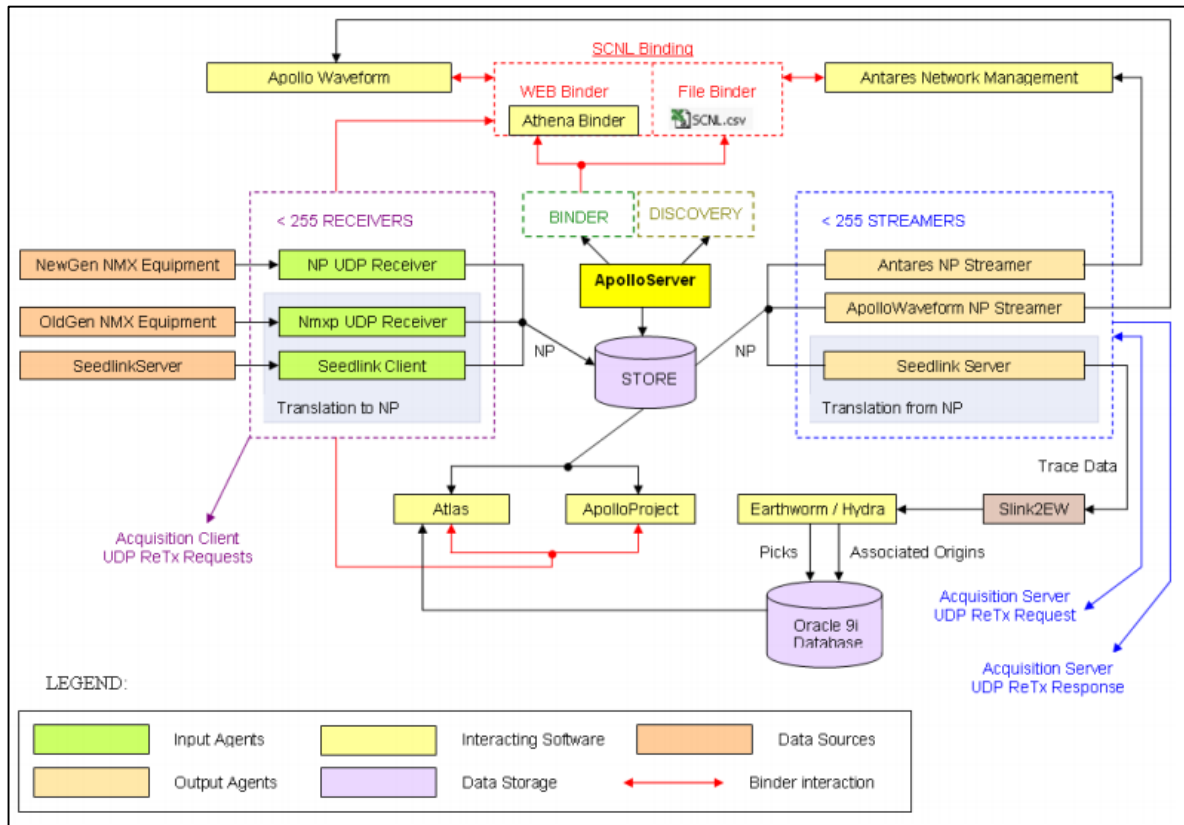


Figura 25. Diagrama del servidor Apollo

Este servidor recibe los datos en formato NMX de los antiguos y nuevos equipos de Nanometrics y los guarda en formato NP³¹ en el STORE. El servidor Seedlink convierte los datos en formato NP del STORE a SEED lo que permite la conexión de otro cliente Seedlink al Apollo Server. Los programas Antares, Project y Apollo Waveform utilizan directamente los datos del STORE sin necesidad de hacer transformación.

8.3.1.3 Instalación de Apollo Server

Como se ha dicho antes el Apollo es multiplataforma y está disponible para:

- Linux (GNU/ Linux kernel 2.4 +)
- Windows
- MacOS X.

³¹ NP: Protocolo para empaquetar y procesar datos sísmicos de la marca Nanometrics, Nanometrics Protocol (NP) Seismic Data Packet Format and Processing. (Nanometrics, 2006a)



Respeto a los software del sistema donde se va a instalar, el Apollo Server requiere:

- Navegador estándar con JavaScript activado
- Java Runtime Environment (JRE) 1.6 actualización 7 o más reciente.

La instalación no requiere mucho esfuerzo dado que el software viene con un auto instalador. Una vez instalado toda la configuración se hace vía un navegador web. Toda la configuración está protegida así para acceder a la página de configuración se necesita un nombre de usuario y una contraseña. Los que vienen por defecto son *central/central*.

8.3.2 Software SeisComP3 para Procesar los datos

En este apartado se describe el funcionamiento del Procesador de Comunicación Sismológica (Seismological Communication Processor, SeisComP) "SeisComP3"³² que es el programa que se utiliza para procesar los datos en nuestro centro de datos.

Además de ser gratuito para uso no comercial, el SeisComP3 se beneficia de una comunidad cada vez más grande y dispuesta a ayudar. Es uno de los programas más utilizados en su categoría. Fue desarrollado inicialmente para la red GEOFON³³, y posteriormente fue extendido en el proyecto MEREDIAN bajo el liderazgo de GEOFON/GFZ Potsdam y ORFEUS (Heinloo et al. 2004)³⁴. Se le han añadido más funcionalidades para cumplir con las exigencias de monitorización de 24 horas al día y 7 días a la semana de los centros de control de alerta temprana del proyecto GITEWS³⁵. En 2007 se ha pasado a la versión SeisComp3. Hoy en día SeisComP3 es uno de los programas de adquisición e intercambio de datos sismológicos en tiempo real más usado en todo el mundo.

Según Pesaresi D. (2011) El SeisComP3 es un programa de análisis de datos sismológicos y permite realizar los siguientes tareas:

- Adquisición de datos
- Control de calidad de datos
- Archivo de datos
- Intercambio de datos en tiempo real
- Monitorización del estado de la red
- Procesamiento de datos en tiempo real
- Generación de alerta de evento
- Generación de archivo de forma de onda

³² Damiano Pesaresi , *ANNALS OF GEOPHYSICS*, 54, 1, 2011; doi: 10.4401/ag-4972

³³ <http://geofon.gfz-potsdam.de/> Último acceso julio de 2013

³⁴ SeisComP 2.1 Manual

³⁵ GITEWS project (German Indian Ocean Tsunami Early Warning System)



- Distribución de datos de forma de onda
- Detección automática de eventos y localización del evento
- Detección interactiva de evento y localización con el sismólogo de guardia
- Archivo de datos paramétricos de los eventos
- Acceso fácil a la información relevante sobre estaciones, formas de onda y terremotos recientes

8.3.2.1 Arquitectura de SeisComp3

El SeisComp3 se puede ver como un conjunto de programas independientes cumpliendo cada uno una tarea concreta de la cual se alimentan los demás. La documentación presenta esos programas en cuatro grupos que se describen a continuación.

- **Adquisición**, en este grupo se encuentran los programas que se encargan de la adquisición y del archivo de datos. Por un lado, el Seedlink es un protocolo orientado a la conexión que permite adquirir datos de diferentes proveedores sin perder los paquetes en caso de interrupción de la conexión, lo que garantiza un flujo de datos en tiempo real en el formato SEED (formato estándar de intercambio de datos sísmicos, del inglés *Standard Exchange of Earthquake Data* "SEED"). Por otro lado está el Arclink, el cual se encarga de servir los datos previamente archivados. Los dos pueden conectarse a diferentes proveedores de datos con una dirección IP y un número de puerto (Figura 26). A diferencia de Seedlink, arclink no descarga flujo de datos en tiempo real pero los dos están basados en TCP³⁶. En nuestro caso el cliente Seedlink del SeisComp3 está configurado para conectarse al servidor Seedlink del Apollo mediante la dirección IP y el número de puerto adecuados. Así los datos de la red están disponibles para ser procesados por el SeisComp3.

³⁶ Protocolo de control de transmisión (Transmission Control Protocol)

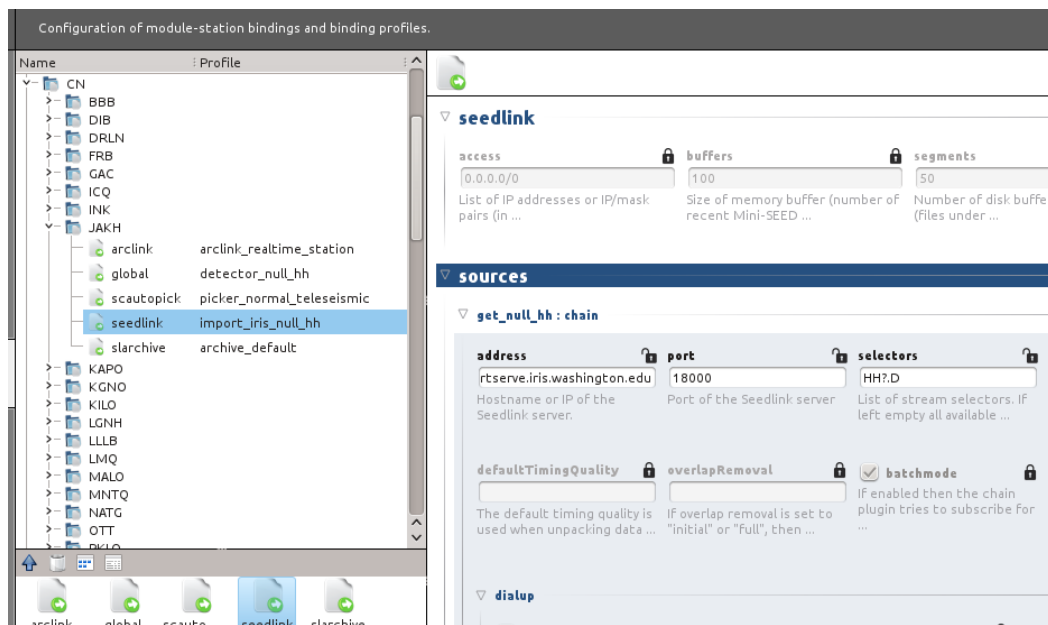


Figura 26. Configuración de seedlink para conectarse a rtserve.iris.washington.edu via el puerto 1800

- **Procesamiento**, es el conjunto de programas que procesa la información sísmológica. En este grupo uno de ellos determina la calidad de la forma de onda, otro hace el picado automático (Figura 27) de la fase P y un tercero detecta y localiza los eventos automáticamente, calcula la magnitud, la amplitud y el tiempo origen de los terremotos. Un programa muy importante que es el “scmaster” es el que se encarga de pasar los mensajes o información entre los diferentes programas del software y el único que escribe en la BB.DD. (Figura 28).
- **GUI**, aquí están todos los programas que proporcionan herramientas gráficas al usuario. Se encuentra el programa que permite ver las formas de ondas en tiempo real y el que muestra la calidad y el estado de las estaciones, entre otros. Uno de los más interesantes es “scolv” con el cual el usuario puede revisar los eventos generados automáticamente.
- **Utilidades**, son unos programas que permiten realizar varias tareas en el software. Permiten importar y exportar datos entre sistemas, extraer información de la BB.DD sin utilizar SQL³⁷, crear los boletines, generar alertas de eventos con voz, etc. Hay muchos más programas que aparecen listados en el wiki del software.

³⁷ Structured Query Language, lenguaje de consultas estructuro es utilizado en casi todos los sistemas de gestión de BB.DD.

The screenshot displays the configuration interface for the 'global' station in SeisComP3. The interface is organized into several sections:

- global**: Contains parameters for the preferred stream used for detection, such as `detectStream` (value: HH) and `detectLocid` (value: "").
- MLh**: Contains parameters for the Maximum Likelihood (MLh) combiner, including `maxavg` (value: max), `ClippingThreshold` (value: 80), and `params`.
- amplitudes**: Contains parameters for amplitude calculation, including `enable` (checked), `saturationThreshold` (value: -1), and `enableResponses` (unchecked).
- amp**: Contains an `Amplitude type profile` button.
- mag**: Contains a `Magnitude type profile` button.
- picker**: Contains parameters for the picker algorithm, including `signalBegin` (value: -20), `signalEnd` (value: 80), `filterType` (value: BP), `FilterPoles` (value: 2), `F1` (value: 5), `F2` (value: 20), `thrsh1` (value: 10), and `thrsh12` (value: 20).

Figura 27. Configuración del autopick

8.3.2.2 Descripción del funcionamiento de SeisComP3

El principal objetivo una red sísmica es generar una alerta de terremoto junto con la oportuna información para ser distribuida a las autoridades competentes responsables de la toma de decisiones. Para generar una alerta se necesitan los siguientes parámetros:

- Latitud
- Longitud
- Profundidad
- Hora origen
- Magnitud

A continuación se explica de forma sintética como funciona el SeisComP3 para la identificación de eventos y cálculo de los correspondientes parámetros (Figura 28), realizando una serie de tareas que pueden englobarse en cuatro fases:

Identificación de un evento: El “scautopick” utiliza entre otros, el algoritmo bien conocido STA/LTA para picar las fases P de las señales registradas por los sensores. Cuando se realiza un picado automático, el *mediator* “scmaster” difunde el mensaje para que los programas que requieren esta información la

conozcan. Así, cuando se detecta la llegada de una fase P, una vez que el “scamp” recibe el correspondiente mensaje de identificación, se procede al cálculo de la amplitud.

Localización del sismo: Una vez calculada, scmaster difunde el mensaje con el dato. Scatolock escucha el picado y se activa, disponiendo de una cola de picados de diferentes estaciones y busca una relación entre ellos para localizar un terremoto. Normalmente, el SeisComP3³⁸ requiere de un mínimo de 6 a 8 picados para realizar la localización. En primera aproximación, se utiliza la ubicación de estaciones como epicentros provisionales y se va realizando un ajuste de datos de forma iterativa por mínimos cuadrados hasta converger a la solución de mínimo error. Esta proporciona la localización definitiva, es decir las coordenadas del hipocentro (latitud, longitud y profundidad) y el tiempo origen del sismo. El usuario puede aumentar el número mínimo de picados para calcular la localización automática en la configuración del software. El origen calculado también se transmite a los demás como mensaje y se guarda en la BB.DD.

Cálculo de la magnitud: El “scmag” está escuchando los mensajes, tiene una cola de orígenes, de picados y de amplitudes con los cuales se calcula una magnitud. El tipo de magnitud calculada depende también de la configuración del programa.

Generación de evento: Con el origen, magnitud y picados el “scevent” genera un evento y lo almacena en la base de datos. Según la configuración esos eventos pueden generar alertas automáticas dependiendo del umbral establecido o después de una revisión manual del operador. También son utilizadas por otros programas para generar las alertas. El modelo de datos utilizado por SeisComP3 es el quakeML cuyo esquema está en Anexo I.

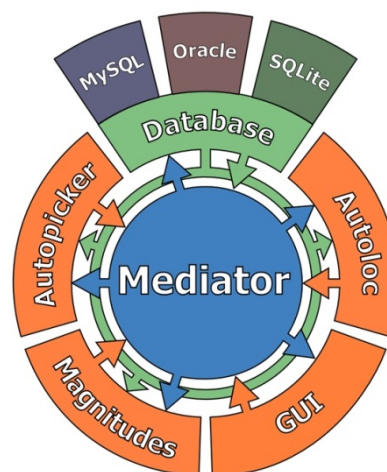


Figura 28. Sistema simplificado de SeisComP3 (www.Seiscomp3.com/wiki Último acceso julio de 2013)

³⁸<http://www.seiscomp3.org/wiki/doc/applications/scatolock> Último acceso julio de 2013



8.3.2.3 Instalación y configuración del SeisComp3

El SeisComp3 no requiere una máquina muy compleja para ser utilizado. La configuración del ordenador en el que se va a instalar depende del tamaño de la red sísmica o, dicho de otra manera, del número de estaciones que se van a procesar.

La configuración mínima necesaria para instalar SeisComp3 en un ordenador normalmente es:

- 1 procesador, no es necesario tener más de un procesador
- Una memoria de 2 Gb
- Un disco duro de 20 Gb
- Cualquiera de esas distribuciones de Linux: OpenSuSE, Ubuntu, Debian, Fedora o CentOS en 32 o 64 bit. Hay que señalar que no existe una versión para Microsoft Windows.

En el caso de una red de más de 100 estaciones se recomienda instalar cada subsistema del software en un equipo aparte y los siguientes requisitos mínimos:

- **Sistema de adquisición de datos**
 - 1 procesador
 - 2 Gb de memoria
 - Disco duro en RAID³⁹ 1/5/0+1 de más de 200Gb
- **Sistema de procesamiento**
 - 2 procesadores
 - 4 Gb de memoria
 - RAID 1/5/0+1 de más de 100 Gb
- **Sistema del Interface Gráfico del Usuario (GUI)**
 - 2 procesadores
 - 2 Gb de memoria
 - Disco duro de más de 50 Gb
 - (2x) tarjeta gráfica con 2 puertos dependiendo del número de pantallas (<http://www.seiscomp3.org/wiki/doc/installation-and-configuration> Último acceso julio de 2013).

La instalación requiere dedicación, pero todos los pasos están descritos en la documentación del software. Previamente, según su sistema operativo, se debe descargar unos ficheros que contienen el código binario de las aplicaciones gráficas, el código fuente del subsistema de adquisición y el código procesamiento.

³⁹ Conjunto redundante de discos independientes (*Redundant Array of Independent Disks*, RAID). Es un sistema de almacenamiento de datos que permite hacer deferentes tipos de backup según que sea RAID 1 o 5 etc.



El SeisComp3 no se conecta a ningún servicio de mapas como “Google Maps” o “Open Street Map”, por lo cual se deben descargar localmente los mosaicos para poder visualizar la ubicación de las estaciones de su red sísmica y representar gráficamente los epicentros en un mapa de mejor resolución. Desde el principio se configuran generalmente las estaciones con sus ficheros de configuración, pero esto tampoco es obligatorio para instalar SeisComp3.

8.4 Ubicación de las estaciones

En este TFM se propone una distribución espacial de las estaciones sísmicas partiendo de la distribución de las 5 estaciones ya instaladas y de las ubicaciones elegidas para las 2 nuevas estaciones disponibles, teniendo en cuenta que la localización de los terremotos en el territorio de la República de Haití, con la mayor fiabilidad posible, es el primer objetivo de la RSDSH. Este apartado describe las prácticas recomendadas en el capítulo 7 del *New Manual of Seismological Observatory Practice*, señalando los criterios que han sido aplicados y los que no lo han sido en la configuración de dicha red.

Se propone instalar la estación central o centro de control en un sitio seguro, en el local del ONEV al oeste del Aeropuerto Internacional Toussaint Louverture. El ONEV dispone de espacio suficiente para colocar la antena del Hub y para acomodar el centro de datos.

Según este manual el proceso de determinación de los emplazamientos donde colocar las estaciones remotas engloba dos fases distintas que son: estudios en gabinete y estudios en el campo.

8.4.1 Estudios de gabinete

Los estudios de gabinete se hacen con mapas tradicionales y/o con un Sistema de Información Geográfica (SIG). Se han considerado los siguientes criterios

- **La zona geográfica de interés.** Se deben “definir los objetivos de la red y la zona geográfica de interés teniendo en cuenta el aspecto socioeconómico y la información sísmica que se busca” (Havskov J. 2012). En nuestro caso, el objetivo es monitorizar la sismicidad del país, por lo cual se considera todo el territorio de la República de Haití.
- **Las condiciones sismogeológicas.** Se debe conocer la composición del suelo en el emplazamiento de cada estación para determinar la velocidad de la onda sísmica en él. Uno de los principales criterios de selección de estos emplazamientos es que el terreno sea lo menos blando posible. El *bedrock* (basamento rocoso) es el tipo de suelo óptimo porque tiene un menor efecto local en la señal registrada.
- **Las condiciones topográficas.** Considerando que las pendientes influyen en la onda registrada y que un emplazamiento en la cima de una montaña está más sujeto a ser afectado por el viento y los relámpagos, siempre es mejor evitar este tipo de emplazamientos. En la RSDSH todas las



estaciones están en sitios con condiciones topográficas bastante buenas, salvo la de Puerto Príncipe, que está en una ladera con una pequeña pendiente.

- **Las condiciones de accesibilidad.** Hay que pensar que para instalar y mantener una estación hay que llegar a ella con el equipamiento necesario. Por esta razón se debe saber si hay carretera, camino etc. para alcanzar el sitio. En nuestro caso, la estación de Puerto Príncipe tiene un problema de accesibilidad preocupante pero manejable (ver 5.3 Estado actual de la red)
- **El Ruido sísmico del sitio.** Se deben determinar sobre un mapa las posibles fuentes de ruido sísmico que pueden afectar el sitio. A modo de ejemplo sobre la información que debe recopilarse al respecto en cada estación, en la Tabla 3 se presentan las fuentes de ruido más importantes en la estación sísmica Loma Palo, indicando además la distancia de dichas fuentes (Willmore, 1979). Así se determina el nivel de ruido teórico esperado en el sitio. La tabla vacía y las indicaciones para su uso están en el Anexo V.
- **Las condiciones para la transmisión de datos y fuente de energía eléctrica.** Se debe pensar también en la fuente de alimentación eléctrica de la estación. En Haití hay que contar con que la red eléctrica nacional sufre interrupciones frecuentemente. Por ello, la energía fotovoltaica es la mejor opción para dotar de autonomía a la estación. También hay que pensar en el modo de transmisión y localizar los posibles obstáculos, a fin de evitarlos. En nuestro caso no debe haber ningún edificio o árbol alto al suroeste del sitio considerado, para no interrumpir la conexión con el satélite geoestacionario SATMEX5, que se localiza al suroeste de Haití (114.9 Oeste) .
- **El propietario de la parcela y el futuro de la parcela.** Se debe determinar quién es el propietario de la parcela donde se va a colocar la estación para firmar un acuerdo con él, comprar o alquilar el terreno. Si es propiedad del estado hay que obtener una autorización de las autoridades competentes. En todo caso, hay que pensar en el desarrollo urbanístico de la zona donde está ubicada. Por ejemplo, un nuevo edificio puede degradar la calidad de la señal del satélite, una nueva carretera puede generar demasiado ruido sísmico, etc.
- **Las condiciones climáticas.** Se han considerado los parámetros climáticos siguientes:
 - la temperatura mínima y máxima para determinar si los equipos pueden funcionar a esas temperaturas
 - duración de la insolación en invierno para determinar el número de paneles solares,
 - el nivel de las precipitaciones, que es un dato importante. Hay que saber cuáles son las zonas inundables para evitar instalar estaciones en ellas.
 - la velocidad del viento en el sitio, (cuanto menor sea, mejor es el sitio) (Presencia de árboles cercanos que induzcan ruido sobre el suelo)
 - Posibilidad de relámpagos. Dependiendo del sitio una protección especial contra ellos puede ser necesaria.



Tabla 3. Fuentes de ruido que se deben considerar para elegir el emplazamiento de una estación sísmica (Willmore, 1979), indicando las distancias mínimas recomendadas. Se muestra como ejemplo la tabla de la estación de Loma Palo Bonito

STATION SITE NAME: Loma Palo Bonito COORDINATES: N 18° 46' 58.4" W 70° 13' 20.1"		SITE #:7			DATE OF VISIT: 02/14/1998			ACTUAL DISTANCE [km]
		HARD ROCK GRANITE, ETC.			HARDPAN HARD CLAY, ETC.			
		RECOMMENDED MINIMAL DISTANCES [KM]						
		A	B	C	A	B	C	
1. Oceans, coastal mountains systems		300	50	1	300	50	1	75
2. Large lakes		150	25	1	150	25	1	22
3. Large dams, waterfalls	a	40	10	1	150	25	5	22
	b	60	15	5	50	15	10	
4. Large oil pipelines	a	20	10	5	30	15	5	
	b	100	30	10	100	30	10	
5. Small lakes	a	20	10	1	20	10	1	20
	b	50	15	1	50	15	1	
6. Heavy machinery, reciprocating machinery	a	15	3	1	20	5	2	25
	b	25	5	2	40	15	3	
7. Low waterfalls, rapids of a large river, intermittent flow over large dams	a	5	2	0.1	15	5	1	
	b	15	3	1	25	8	2	6
8. Railway, frequent operation	a	6	3	1	10	5	1	40
	b	15	5	1	20	10	1	
9. Airport, air traffic		6	3	1	6	3	1	
10. Non-reciprocating machinery, balanced industrial machinery	a	2	0.5	0.1	10	4	1	25
	b	4	1	0.2	15	6	1	
11. Busy highway, large farms		1	0.3	0.1	6	1	0.5	2.3
12. Country roads, high buildings		0.3	0.2	0.05	2	1	0.5	2.0
13. Low buildings, high trees and masts		0.1	0.03	0.01	0.1	0.1	0.05	0.03
14. High fences, low trees, high bushes, large rocks		0.05	0.02	0.005	0.06	0.03	0.01	0.02

Legend:

- A - Seismic station with a gain of 200,000 or more at 1 Hz
- B - Seismic station with a gain from 50,000 to 150,000 at 1 Hz
- C - Seismic station with a gain of approximately 25,000 at 1 Hz
- a - Source and seismometer on widely different formations or that mountain ranges or valleys intervene
- b - Source and seismometer on the same formation and with no intervening alluvial valley or mountain ranges

8.4.2 Estudios en el campo

La segunda fase es la de los estudios de campo. En esta fase, según el manual de las prácticas de observatorio sísmológico (Havskov J. et al. 2012) se recomienda primero recoger los resultados de los estudios de gabinete. Después se debe planificar una visita de campo (al menos tres días) formando un equipo integrado por un sísmólogo, un sísmogeólogo y un experto en comunicación, realizando las siguientes tareas en la visita a cada emplazamiento:



- determinar cómo es de fácil llegar al sitio en todas las posibles condiciones climáticas en el momento de la instalación y mantenimiento de la estación.
- identificar las fuentes de ruido que pueden afectar el sitio
- realizar medidas del ruido sísmico que se encuentra en el sitio
- estudiar las condiciones sismogeológicas del sitio
- Averiguar la disponibilidad de la energía eléctrica y de las líneas telefónicas.

En el caso de la RSDSH las ubicaciones de las 4 nuevas estaciones fueron determinadas como resultados de tres visitas de 4 días cada una en diferentes partes del país con un equipo compuesto de técnicos de la BME y del ONEV (Saint Louis Mildor, 2011). En esas visitas se han considerado los siguientes criterios: la seguridad, el ruido, fuente de energía eléctrica, conexión a internet, accesibilidad etc. Este proceso condujo a la elección de 4 emplazamientos para las estaciones Libra II: Hinche, Cabo Haitiano, Môle-Saint-Nicolas y Jérémie.

8.4.3 Distribución espacial de las estaciones

La buena distribución espacial de las estaciones permite calcular los hipocentros de los terremotos con mayor precisión y exactitud. En general, no se espera determinar eventos sísmicos con fiabilidad, a menos que el “gap sísmico”⁴⁰ sea inferior a 180 grados (Havskov et al. 2011). Se recomienda evitar la alineación de las estaciones de una red sísmica, dado que una buena distribución acimutal de esas estaciones mejora de manera considerable la localización de los eventos.

Aplicando la recomendación del “gap sísmico”, en las Figura 29 se ve como las tres estaciones de RNC en Puerto Príncipe, Jacmel y Léogane aportan una cobertura reducida respecto al territorio Haitiano. Con las cuatro nuevas estaciones la cobertura de la red aumenta de manera significativa Figura 30.

⁴⁰ Gap sísmico: el más grande de todos los ángulos entre las líneas de conexión de un epicentro potencial con todas las estaciones de la red que registraron el evento.



Figura 29. Cobertura de las tres Estaciones de la RNC considerando el "gap sísmico" de menos de 180 grados.

Tal y como se visualiza en la Figura 30 la RSDSH no cubre todo el país sin aportación de estaciones añadidas a la red. Una buena parte de la Falla de Enriquillo se queda fuera de esa cobertura, al igual que sucede con la Falla Septentrional. Toda la parte Noreste y Sureste de Puerto Príncipe quedan también fuera de esa cobertura. Además hay que señalar la alineación de las estaciones de Jacmel y de Puerto Príncipe con la estación de Hinche o la alineación de Jérémie, Leogane y Puerto Príncipe. Ambas alineaciones constituyen una debilidad de la red actualmente instalada.

Para mejorar aún más la cobertura de la RSDSH sin aportación de otra red se propone añadir dos estaciones más a medio plazo en la Isla de Vaca (*Ile-à-vache*) en el extremo sur del país y otra en la Isla de la Tortuga (*Ile de la tortue*) en el extremo norte (Figura 31).



Figura 30. La cobertura de la red con las 4 nuevas estaciones Libra II en Jérémie, Môle Saint Nicolas, Cap Haitien e Hinche. Los triángulos verdes son estaciones de la RNC, los amarillos son del ONEV y no son configuradas y los rojos son sitios elegidos todavía las estaciones no se han instalado.

Una estación sísmica en *Ile-à-vache* permitirá aumentar la cobertura de la falla de Enriquillo en su parte Haitiana. Así, la ciudad de “Les Cayes”, la tercera en importancia del país, entra en la zona de la red que quedaría cubierta. Además, el Gobierno Haitiano tiene previsto “un desarrollo turístico de 350 millones de dólares USD en un periodo de siete años”⁴¹ en esa isla (Michel C. 2013), por lo que los datos sísmicos que registre esa estación serán útiles para determinar la acción sísmica de diseño de las nuevas construcciones. Es una oportunidad para confirmar cómo se toma en serio la seguridad en las nuevas infraestructuras y mejorar la imagen de Haití como destinación turística segura.

Una estación en “Ile de la Tortue” ofrecerá registros al norte de la “Falla Septentrional”. Además de ser la posición más cercana al norte de esta falla es también la posición más próxima a la zona de choque entre la placa del Caribe y la Norteamericana.

⁴¹ <http://lenouvelliste.com/article4.php?newsid=116663> Último acceso julio de 2013



Figura 31. Cobertura conseguida por dos estaciones más colocadas una en el extremo norte y otra en el extremo sur del país

Otra posibilidad a corto plazo es instalar las dos estaciones en las Islas. Así se perdería la cobertura del golfo de la Gônave pero se cubriría parte la Falla de Enriquillo y parte de la falla Septentrional, sin necesidad de adquirir más estaciones, en vez de Môle-Saint-Nicolas y Jérémie, siempre entendiendo que el fin último es instalar también aquellas estaciones.

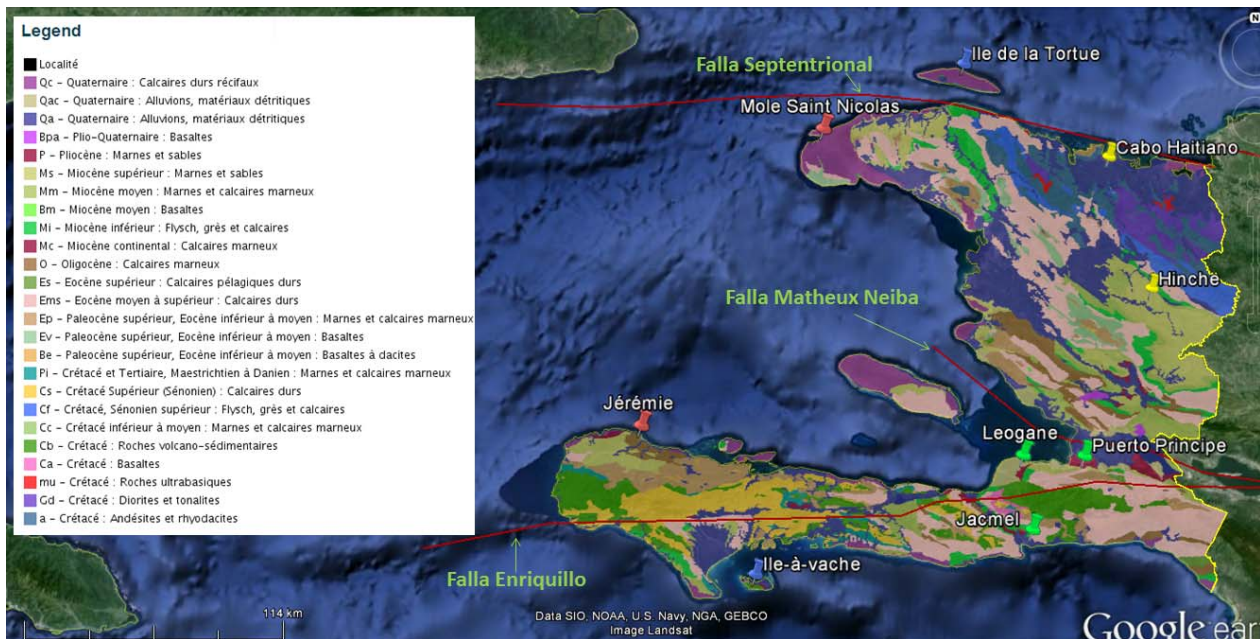


Figura 32. Las estaciones sísmicas y la geología de Haití. (Capa geologica creada por el BME en 2005 a 1:250.000)

Como se puede observar en la Figura 32 las estaciones sísmicas, están situadas sobre materiales aluviales detríticos (Léogane, Puerto Príncipe, Jacmel y Cabo Haitiano), calizas margosas (Jérémie), margas y arenas (Hinche) o piedra caliza dura (Mole Saint Nicolas). Todas ellas son rocas sedimentarias de edades recientes, del Cuaternario principalmente, con escasa dureza.

Idealmente las estaciones de la red sísmica deberían instalarse sobre suelo duro o roca, es decir sobre litologías mas consolidadas que las señaladas en el párrafo anterior. Sin embargo, ha dominado como criterio de prioridad, la idea de lograr una mejor cobertura de las estaciones alrededor del país, en lugar atender a las condiciones geológicas de los respectivos emplazamientos.

8.5 Difusión de la información sísmica

La difusión de la información sísmica se debe realizar esencialmente en dos ámbitos, el científico y el social. Indudablemente, los datos sísmicos son valiosos para los científicos. Pero si la finalidad última de implementar una red sísmica se dirige a proteger la población, ¿por qué no implicarla lo más posible en la cultura sismológica? La población debe entender que está viviendo con una amenaza constante, y por eso es necesario diseminar la información sísmica para que sea consciente de lo que se está ocurriendo bajo sus pies.

Una forma de realizar estas tareas de difusión es mediante el desarrollo de aplicaciones que proporcionen esa información a la prensa y al ciudadano de forma amigable y fácil de entender. Además de una página web con toda la información recogida de los terremotos y de la RSDSH es conveniente crear aplicaciones más sencillas para los ciudadanos. Un ejemplo es una aplicación web desarrollada por el autor de este TFM (Figura 33) la cual permite visualizar los epicentros de los terremotos de los últimos días utilizando

datos del USGS (número de días configurables por el usuario). Este visualizador de epicentros de terremotos muestra la posición actual del usuario y su distancia respecto a cada epicentro. La aplicación proporciona una búsqueda dinámica donde el usuario selecciona una ciudad para ver los terremotos cercanos a esa ciudad. Esta aplicación se ha desarrollado con código abierto, la API de Google, PHP5, Javascript y CSS3.

Convenría crear más aplicaciones de este tipo para móviles, que son cada vez el medio más utilizado para conectarse a la web. Esta herramienta permitirá a medio plazo implementar un sistema de alerta temprana con una base de usuario ya acostumbrado a la información sísmica.

Aplicación web: Visualizador de terremotos

Reutilización de código
API Google maps
HTML5
PHP
Javascript

BÚSQUEDA DINÁMICA

SERVICIOS BASADOS EN LOCALIZACIÓN

DETAILS ON DEMAND

OVERVIEW

Epicenter Near	Magnitude	Distance to Epicenter	Local Time	Link
49 mi (64 km) NE of Road Town, British Virgin Islands	2.9	510 mi (820 km)	Tue, 25-Jun-2013 17:47:49	View
21 mi (24 km) NW of Road Town, British Virgin Islands	2.9	413 mi (664 km)	Tue, 25-Jun-2013 03:23:29	View
61 mi (64 km) E of Road Town, British Virgin Islands	2.8	519 mi (835 km)	Tue, 25-Jun-2013 02:28:03	View
25 mi (41 km) ENE of Pointe-à-Pitre, Guadeloupe	3.9	218 mi (351 km)	Mon, 24-Jun-2013 21:08:21	View
45 mi (68 km) ENE of Miravalles, Dominican Republic	3.4	221 mi (352 km)	Mon, 24-Jun-2013 03:21:30	View
41 mi (62 km) NE of Miches, Dominican Republic	3.3	228 mi (367 km)	Sun, 23-Jun-2013 20:37:59	View
53 mi (65 km) NW of Road Town, British Virgin Islands	3.2	469 mi (751 km)	Sat, 22-Jun-2013 21:18:41	View
58 mi (64 km) N of Road Town, British Virgin Islands	3.0	416 mi (668 km)	Sat, 22-Jun-2013 13:42:24	View
29 mi (47 km) N of Charlotte Amalie, U.S. Virgin Islands	2.5	461 mi (742 km)	Sat, 22-Jun-2013 12:23:23	View
50 mi (63 km) NE of Road Town, British Virgin Islands	2.7	560 mi (896 km)	Sat, 22-Jun-2013 07:27:04	View
55 mi (64 km) NW of Road Town, British Virgin Islands	3.2	467 mi (751 km)	Sat, 22-Jun-2013 02:17:45	View
61 mi (67 km) N of Charlotte Amalie, U.S. Virgin Islands	2.6	437 mi (704 km)	Sat, 22-Jun-2013 00:43:55	View
32 mi (41 km) NW of Road Town, British Virgin Islands	2.5	466 mi (751 km)	Fri, 21-Jun-2013 21:56:11	View
52 mi (69 km) NW of Road Town, British Virgin Islands	3.0	466 mi (750 km)	Fri, 21-Jun-2013 17:04:10	View
5 mi (8 km) N of Corozal, Puerto Rico	2.8	378 mi (606 km)	Fri, 21-Jun-2013 07:59:22	View
4 mi (7 km) WNW of Loquillo, Puerto Rico	2.6	315 mi (507 km)	Thu, 20-Jun-2013 07:28:02	View
45 mi (72 km) NW of Charlotte Amalie, U.S. Virgin Islands	3.3	448 mi (721 km)	Thu, 20-Jun-2013 12:33:52	View
27 mi (43 km) NNE of Loquillo, Puerto Rico	2.8	419 mi (675 km)	Thu, 20-Jun-2013 10:19:29	View

Figura 33. Visualizador de terremotos de la zona del Caribe.



9 Planificación temporal y económica de la Implantación de la red

Antes de firmar el contrato para ejecutar el presente proyecto, primero hay que reunirse con las autoridades competentes en Haití para su evaluación. El presente se debe ejecutar con la participación de todas las instituciones implicadas en la monitorización sísmica del país. El equipo debe ser multidisciplinario y multi-institucionales.

La planificación de este proyecto tiene en cuenta 5 días laborales de lunes a viernes de 8 horas que van de las 8 h de la mañana hasta las 16 horas, lo que es el horario normal de los funcionarios haitianos. El director de proyecto debe ceñirse a esta planificación en lo máximo posible.

Las etapas previas a la firma del contrato de ejecución del presente proyecto no están contempladas en esta planificación. Se supone que el presupuesto necesario para la implantación de esta red está disponible al día 1 del proyecto. Los precios están en Dólares EE.UU. (USD) que es una forma común de presentar y ejecutar presupuesto en Haití.

El proyecto dura 83 días laborables y necesita un presupuesto de 394.575 USD, de éste 224.263 USD ya están disponibles en equipos y software adquiridos desde hace dos años.

Este proyecto de implantación de la Red Sísmica Digital por Satélite Haitiana, una vez firmado el acuerdo se divide en 5 fases que son:

- 0 Firma del contrato
1. Análisis de requisitos
2. Materialización del diseño de la red
3. Implantación de la red sísmica
4. Documentación
5. Formación

En la fase de **Análisis de requisitos**, en 7 días un equipo compuesto por un sismólogo, un geólogo y un especialista de redes hacen un inventario de todo lo que está disponible respecto a la monitorización sísmica en el país y se informan de las estaciones disponibles en los países vecinos. Así definen los requisitos actualizados de la RSDSH. En esta fase se toma la decisión de los emplazamientos finales de las estaciones y se consumen 2.000 USD de recursos.

La segunda fase **Materialización del diseño de la red**, cuya duración es de 4 días consume 1.472 USD de recursos. En ella se discute el diseño con el equipo de especialistas constituido durante la fase anterior; se replantean las estaciones de campo, se localiza el mejor sitio para la estación central, se revisa el diseño propuesto en este trabajo. Y finalmente se actualiza éste con la información obtenida de la fase anterior.

La fase de **Implantación de la red sísmica** es la más costosa y la más larga del proyecto. Se divide en cinco sub-fases que son:



- a. **Pedido del equipamiento.** En este apartado se eligen los proveedores de equipamiento (equipos y mobiliarios) mediante convocatorias públicas, las cuales son analizadas por el equipo de especialistas, se escogen las mejores propuestas. Este proceso se realiza en 36 días con un coste de 19.740 USD.
- b. **Acondicionamiento físico de las sedes y de las remotas.** Se hace otra convocatoria específica para los detalles constructivos de la sede central. Se elige un arquitecto que se encarga de acondicionar dicha sede para recibir el centro de control. También en esta fase se realizan las obras en las estaciones remotas. El coste de esta fase es de 48.851 USD y dura 27 días.
- c. **Recepción y transporte del equipamiento.** Se divide en dos partes, por un lado se reciben los equipos canadienses, incluyendo los trámites aduanales y por otro lado se reciben y transportan los equipos locales. El tiempo estimado para esa fase es de 25 días y el costo es de 1220 USD.
- d. **Análisis y contratación de los servicios de telecomunicaciones.** Se comparan las tarifas y los servicios de las compañías de telecomunicaciones locales y se contratan las mejores ofertas de ADSL, HSPA, satélite, varias líneas fijas y móviles (el centro requiere diversos sistemas de telecomunicaciones que garantizan la conexión del centro con los organismos nacionales e internacionales). El tiempo requerido es de 4 días y se gasta 241 USD.
- e. **Instalación y configuración de las remotas y del centro de control.** En esta fase se instalan las dos estaciones remotas, el Hub y el centro de datos. Así como los software de adquisición y procesamiento de los datos sísmicos. Con un consumo de recursos de 316.395 USD es el capítulo más costoso de la implantación de la red y el más largo con 66 días. Cabe recordar que buena parte de los recursos materiales necesarios en esta fase se encuentran disponibles en nuestro almacén.

En paralelo en la fase de **Documentación** se redactan los manuales de mantenimiento de las estaciones remotas y del centro de recepción. El tiempo requerido es de 10 días y se gasta 1.200 USD.

Por último se imparte un curso de **Formación** a todo el personal involucrado en la red tanto en el *hardware* como en el *software* con el fin de mantener un equipo humano competente en las diferentes labores del funcionamiento de la red. El equipo de sismólogos que analizara los eventos registrados por el sistema tendrá especial relevancia en este entrenamiento. El tiempo planificado es de 16 días y se gasta 3.456 USD.

A continuación se presenta el diagrama de Gantt con las tareas de las distintas fases del proyecto.



Implantación de la Red Sísmica Digital por Satélite Haitiana Tareas de resumen

Código	Descripción	Duración	Comienzo	Fin	Valor de actividad	Costo
01	Yacimiento	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$12,417.00
02	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$100.00
03	Medio	23 d	26/07/15	18/08/15	64 d	\$5,500.00
04	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
05	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
06	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
07	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
08	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
09	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
10	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
11	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
12	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
13	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
14	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
15	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
16	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
17	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
18	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
19	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
20	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
21	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
22	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
23	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
24	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
25	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
26	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
27	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
28	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
29	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
30	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
31	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
32	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
33	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
34	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
35	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
36	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
37	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
38	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
39	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
40	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
41	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
42	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
43	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
44	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
45	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
46	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
47	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
48	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
49	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
50	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
51	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
52	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
53	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
54	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
55	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
56	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
57	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
58	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
59	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
60	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
61	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
62	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
63	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
64	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
65	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
66	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
67	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
68	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
69	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
70	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
71	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
72	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
73	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
74	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
75	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
76	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
77	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
78	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
79	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
80	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
81	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
82	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
83	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
84	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
85	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
86	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
87	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
88	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
89	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
90	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
91	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
92	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
93	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
94	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
95	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
96	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
97	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
98	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
99	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00
100	Medio	12 d	01/07/17	13/07/17	38 d	\$1,000.00

Legenda:

- Medio de sensores: [Barra azul]
- Medio de cables: [Barra roja]
- Medio de tareas: [Barra negra]
- Medio de tareas críticas: [Barra roja con borde negro]

Estado de las actividades:

- Medio de tareas: [Barra negra]
- Medio de tareas completadas: [Barra verde]
- Medio de tareas suspendidas: [Barra amarilla]
- Medio de tareas en curso: [Barra roja]
- Medio de tareas pendientes: [Barra azul]

Resumen de la actividad:

- Tareas críticas: [Barra roja]
- Tareas normales: [Barra negra]
- Tareas suspendidas: [Barra amarilla]
- Tareas en curso: [Barra roja]
- Tareas pendientes: [Barra azul]

Resumen del proyecto:

- Inicio: [Fecha]
- Fin: [Fecha]
- Progreso: [Barra de progreso]
- Costo total: [Moneda y valor]
- Costo actual: [Moneda y valor]
- Costo pendiente: [Moneda y valor]

Implantación de la Red Sísmica Digital por Satélite Haitiana Tareas de resumen

		5-2	5-3	5-4	5-5	5-6	5-7	5-8	5-9	5-10	5-11	5-12	5-13
		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Comienzo	Fin												
Duración	Margen de Sección												
instalar estación	2 d												
instalar 2.4 m (GPS, SDRB...)	1 d												
instalación	1 d												
de telefonía (PSTN) e Internet	1 d												
configuración de software y 2 CARTRIDGES (modem)	2 d												
conexiones, parámetros generales y proyecto	1 d												
ajustación de la red Ethernet	2 d												
prueba finalizada	3 d												
configuración de software	9 d												
Operativo: Línea	1 d												
IP	3 d												
de	1 d												
instalación software	1 d												
de	3 d												
de software finalizada	3 d												
configuración del centro de datos finalizado	3 d												
pruebas de equipamiento finalizado	3 d												
de	10 d												
entonces de las estaciones verticales	5 d												
entonces de los centros de recepción	3 d												
de	3 d												
estaciones verticales	10 d												
y	3 d												
COMPT. Apoyo	10 d												
de	3 d												
de	3 d												

		5-2	5-3	5-4	5-5	5-6	5-7	5-8	5-9	5-10	5-11	5-12	5-13
		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Comienzo	Fin												
Duración	Margen de Sección												
instalar estación	2 d												
instalar 2.4 m (GPS, SDRB...)	1 d												
instalación	1 d												
de telefonía (PSTN) e Internet	1 d												
configuración de software y 2 CARTRIDGES (modem)	2 d												
conexiones, parámetros generales y proyecto	1 d												
ajustación de la red Ethernet	2 d												
prueba finalizada	3 d												
configuración de software	9 d												
Operativo: Línea	1 d												
IP	3 d												
de	1 d												
instalación software	1 d												
de	3 d												
de software finalizada	3 d												
configuración del centro de datos finalizado	3 d												
pruebas de equipamiento finalizado	3 d												
de	10 d												
entonces de las estaciones verticales	5 d												
entonces de los centros de recepción	3 d												
de	3 d												
estaciones verticales	10 d												
y	3 d												
COMPT. Apoyo	10 d												
de	3 d												
de	3 d												



10 Conclusiones y recomendaciones

10.1 Conclusiones

- Con este TFM, se proporciona a Haití un diseño de una red sísmica digital por satélite completa donde se detallan todos los elementos estratégicos y logísticos necesarios para finalizar la implantación de dicha red.
- Los datos sísmicos que puedan obtenerse con esta red proveerán en primer lugar criterios para la alerta sísmica y aportarán además una información valiosa a la comunidad científica nacional e internacional que servirá para:
 - Optimizar los modelos geológicos de nuestro país
 - Los estudios de amenaza y riesgo sísmico
 - El código de construcción sismo resistente
 - Mayor conocimiento de la sismicidad de la región del Caribe
 - Un mejor entendimiento de la actividad asociada a las fallas sísmicas de la Española así como de las de los países de la placa del caribe.
- Haití dispone de la instrumentación, del personal y el conocimiento técnico necesarios para hacer viable la implantación de la citada red.
- El equipamiento y la tecnología utilizados son de los más avanzados disponibles actualmente a nivel global en temática de redes sísmicas.
- La red sísmica digital por satélite propuesta tiene una estructura homologable con la de la comunidad internacional facilitando con ellos el intercambio de datos y su integración en BB.DD. a nivel mundial.
- La arquitectura de la red con la ayuda del IGN podrá continuar evolucionando con los avances que esta institución vaya teniendo
- En el presente proyecto, se planteó la utilización de software libre junto al software comercial Apollo, con el fin de reducir costos futuros y brindar la posibilidad de hacer nuevos desarrollos en el tema.
- Este proyecto aporta una configuración y un sistema de transmisión vía satélite con control local de los datos en el proceso completo, desde el registro del movimiento por el sensor de cada estación hasta el procesado de los datos en el centro de control. Esto confiere a esta red una completa autonomía para el cálculo de los parámetros sísmicos, con el consiguiente control de la sismicidad

10.2 Recomendaciones

- Las autoridades Haitianas deben impulsar los recursos materiales financieros y humanos para dar a esta estructura de red una viabilidad y continuidad en el tiempo.



- Se deben establecer protocolos para dar la alerta y comunicarla a la sociedad a partir de los datos que en el futuro se registren en dicha red.
- Se deben firmar convenios con las instituciones responsables del monitoreo sísmico de los países de la región para compartir datos y optimizar el uso de los mismos, mejorando así las estimaciones de los parámetros de sismicidad (Localización, magnitud, momento sísmico, mecanismo focal).
- Sería conveniente el trabajo conjunto entre las instituciones del país que disponen de estaciones sísmicas para optimizar recursos y configurar una única red nacional. La red que se presenta en este proyecto, con el control local de los datos, se pone a disposición del gobierno para que si lo considera oportuno constituya el núcleo esencial de dicha red nacional.
- La ampliación de la red sísmica de Haití debe tener en cuenta la distribución de las estaciones dominicanas a lo largo de la frontera y si es posible adquirir los datos de dichas estaciones. Como se busca cooperación y no dependencia, la parte haitiana debería instalar estaciones cerca de la frontera en los *gaps* existentes debidos a la distribución dominicana.



11 Referencias

Altidor J. et al. *Seismic Monitoring and Post-Seismic Investigations following the 12 January 2010 Mw 7.0 Haiti Earthquake*. American Geophysical Union, Fall Meeting 2010.

Andres Heinloo, Chad Trabant (2004). SeisComp 2.1 Manual.

Damiano Pesaresi (2011). The EGU2010 SM1.3 Seismic Centers Data Acquisition session: an introduction to Antelope, EarthWorm and SeisComp, and their use around the World. ANNALS OF GEOPHYSICS, 54, 1, 2011.

Danijel Schorlemmer, Joachim Saul, Fabian Euchner, Jan Becker, Ray Buland, Andres Heinloo, Linus Kamb, **Diaz Ruben Lopez** (2005), Elaboración de la documentación técnica de los sistemas de adquisición y tratamiento de datos de la Red Sísmica Nacional, Departamento de Tecnología Electrónica, Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Madrid.

Eric Calais (2005). Projet d'identification de la menace sismique en Haïti. Bureau Des Mines Et De l'Énergie. <http://www.bme.gouv.ht/alea%20sismique/projet%20alea%20sismique.pdf> Último acceso julio de 2013

Eric Calais (2007). Mesures GPS en Haiti Application à l'Aléa Sismique Rapport d'Etape – Informe BME

Gonzalo Payo Subiza (1986). Introduccion al análisis de sismogramas. Instituto Geografico Nacional (Monografias;3)

IRIS (2012). Standard for the Exchange of Earthquake Data. SEED Reference Manual, SEED Format Version 2.4. International Federation of Digital Seismograph Networks Incorporated Research Institutions for Seismology United States Geological Survey.

Jens Havskov, Lars Ottemöller, Amadej Trnkoczy, and Peter Borman (2012). New Manual of Observatory Practice (NMSOP-2, 2nd web edition). IASPEI, GFZ German Research Center For Geosciences. <http://nmsop.gfz-potsdam.de/> Último acceso julio de 2013

Maral G. (2003). VSAT networks, second edition, Jhon Wiley & Sons, LTD.

Moreau De Saint-Méry (1797). Description topographique, physique, civile, politique et historique de la partie française de l'île Saint Domingue.

Nanometrics (2001). Carina Splitter/Combiner Manual.

Nanometrics (2004b). Nanometrics UI version 5.13 User Guide.

Nanometrics (2006a). Nanometrics Protocol (NP) Seismic Data Packet Format and Processing.



Nanometrics (2006b). Trillium 120PA Seismometer User Guide.

Nanometrics (2009). Trillium Compact Seismometer User Guide.

Nanometrics (2009a). Libra Satellite Network Reference Guide.

Nanometrics (2010). Apollo Server version 2 User Guide.

Philipp Kästli, Alessandro Spinuso, Bernd Weber (2013). QuakeML—An XML Representation of Seismological Data Basic Event Description Version 1.2.

<http://quakeml.org/docs/REC?action=AttachFile&do=get&target=QuakeML-BED-20130214a.pdf> Último acceso julio de 2013

Saint Louis Mildor (2011). Rapport des missions conjointes (ONEV/BME) réalisée dans le cadre d'Installation de sismomètres en Province. Informe ONEV/BME Marzo-Mayo 2011.

Willmore, P. L. (Ed.) (1979). Manual of Seismological Observatory Practice. World Data Center A for Solid Earth Geophysics, Report SE-20, September 1979, Boulder, Colorado, 165 pp.



12 Notas del autor

Sobre la historia de Haití:

Después de haber vencido a la armada más grande de aquella época, la de Napoleón el 18 de Noviembre 1803, se expulsó a los franceses de esa parte del Caribe y se proclamó la independencia del país el 1 de enero de 1804. Además de haber sido aislado por la comunidad internacional, Haití tuvo que pagar una cantidad de dinero descomunal al estado Francés. Esta compensación de la pérdida de la colonia fue reclamada para que fuera reconocida la independencia del país. Este pago ha sido durante años uno de los pesos grandes que impidieran el crecimiento económico del estado y, por consecuencia, el desarrollo interno.

Haití no siempre ha sido un estado débil y dependiente de la ayuda de los demás. La historia de Haití también está marcada por los 21 años de unificación de la isla bajo la bandera haitiana, durante los cuales, la armada haitiana invadió el actual territorio de la República Dominicana para liberarla de España bajo petición de sus ciudadanos. Asimismo, los haitianos están orgullosos de haber ayudado a independizarse a otros países de América Latina. No es muy conocido el hecho de que la bandera venezolana nació en Haití y que se proporcionaron armas, soldados y munición a los guerreros que lograron independizar Venezuela con la condición de acabar con la esclavitud. Probablemente tampoco es sabido que muchos de los héroes de la independencia haitiana lucharon en la guerra de independencia de los Estados Unidos juntos con los "americanos", los mismos que han ocupado Haití entre 1915 y 1934.

Después de los 29 años de dictadura de François Duvalier y Jean-Claude Duvalier (conocidos como Duvalier padre e hijo, respectivamente), en 1986 el país cayó en un periodo caótico de crisis política, económica y social. Esta situación propició una segunda invasión de los EE.UU. en 1994 y la presencia desde 2004 de una armada internacional MINUSTAH (Misión de las Naciones Unidas para la Estabilización de Haití) en el territorio nacional.

Sobre el terremoto de 2010:

Entre los más de 250.000 muertos que causó el terremoto de enero de 2010, se encuentran amigos y conocidos míos. Entre las miles de viviendas y edificios destruidos están mi instituto, mi colegio y las universidades haitianas donde estudié; las casas de muchos familiares se suman a las cifras de la catástrofe recogidas en los informes.

Aquel terremoto me dejó sin techo y mató a personas que yo conocía.



13 Anexos

- I. Diagrama del QuakeML
- II. Mantenimiento Estaciones remotas (Andrews Calvin)
- III. Configuración cygnus 205 (Carlos Meneses)
- IV. Especificaciones técnicas de los equipos
- V. Tabla de Fuentes de ruido y distancias mínimas recomendadas