



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA MATANZA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN INFORMÁTICA

TESIS DE MAESTRÍA

*Optimización en los tiempos de localización de sismos en
Argentina*

Autor: Lic. Marcelo Pablo Moreno Zuanni

Director: Dr. Jens Havskov

Universidad de Bergen, Noruega

Buenos Aires, Agosto de 2014

A Fabiana

A mis hijas Tania, Florencia y Pili

A mis padres Lucía y José Manuel

Agradecimientos

En este apartado quiero agradecer a todas aquellas personas que han hecho posible este trabajo.

En primer lugar a mi director, el Dr. Jens Havskov por su desinteresado apoyo como así también al tiempo y esfuerzo dedicado a revisar este trabajo.

De forma especial al director del Instituto Nacional de Prevención Sísmica, Ing. Alejandro Giuliano, por permitir y apoyar que esta tesis se pueda desarrollar en el ámbito del INPRES, sin su colaboración, este trabajo no se podría haber llevado a cabo. De la misma manera, extender el agradecimiento a todo el personal del INPRES, por sus aportes en cada momento en que esta tesis lo ha requerido.

A Valeria Nicolía y al Ing. Ricardo Sifón, por la colaboración en la programación de los algoritmos escritos en lenguaje C y módulos escritos en lenguaje Perl.

A la Mgter. Mirta Navarro por su apoyo constante y su colaboración en la revisión de este documento, en particular en los capítulos relativos a la introducción y marco teórico.

Al director del Departamento de Informática de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de San Juan, Lic. Manuel Ortega, y en su nombre a los integrantes del Consejo Departamental, por su apoyo y por permitirme hacer uso de una licencia para culminar este trabajo.

A los Lic. Nelson Rodríguez, María Murazzo y Daniela Domínguez, compañeros de la cátedra Redes y Sistemas Distribuidos por su apoyo para reemplazarme mientras hacía uso de licencia para trabajar en esta tesis.

A la Universidad Nacional de San Juan, que me ha dado todo el soporte necesario para mi formación, como alumno primero, y como docente después.

Resumen

En esta tesis se presenta e implementa un modelo de integración entre una plataforma con capacidad de localización automática de sismos en tiempo real denominada *EarlyBird*, con un sistema orientado al análisis avanzado de sismos, pero con intervención humana, *Seisan*. El modelo permite que todos los sismos que detecte *EarlyBird* en tiempo real, sean incorporados inmediatamente a *Seisan* y, aquellos que pasen ciertos filtros de calidad definidos previamente, puedan ser informados inmediatamente sin intervención de un analista. La solución presentada también prevé etapas posteriores de revisión manual.

En Argentina, el Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) es el responsable de llevar a cabo el monitoreo sísmico en todo el territorio nacional. Consecuentemente, debe proveer información confiable, precisa y ágil a organismos dedicados a la atención de emergencias, medios de prensa, entes científicos y público en general. Para llevar a cabo esta tarea, el INPRES cuenta con una red sismológica de 50 estaciones distribuidas en la geografía nacional. Pero las plataformas con capacidad de localización automática en tiempo real, como *EarlyBird*, se diseñaron para grandes redes sísmicas, pero no para una red como la de Argentina, que es pequeña en relación con la dimensión geográfica del país. Las redes sísmicas con baja densidad de estaciones, inducen a los sistemas de localización automática a disminuir su capacidad de detección confiable. Por ese motivo, en INPRES no se utilizan esas plataformas, y en su lugar la localización de sismos se hace en forma manual con *Seisan*, proceso que introduce demoras, limitando la capacidad del INPRES en obtener localizaciones en forma inmediata.

La propuesta formalizada en esta tesis, trata de resolver esa problemática, combinando las mejores características de *EarlyBird*, con las de *Seisan*, permitiendo reducir los tiempos de respuesta del INPRES en informar sobre los sismos que ocurren en territorio argentino, beneficiando de esa manera a los organismos que requieran la información en tiempo perentorio.

El modelo diseñado en este trabajo, ha sido implementado en INPRES a mediados de Septiembre de 2013 y ha sido testado con datos reales durante seis meses de ejecución ininterrumpida, con resultados positivos y alentadores en la obtención de la información requerida por el INPRES y por otros organismos nacionales e internacionales.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1. PRESENTACIÓN DEL TEMA	3
2. JUSTIFICACIÓN	7
3. OBJETIVO GENERAL.....	9
<i>Objetivos Secundarios</i>	9
4. PROPUESTA.....	10
<i>Compleitud del Catálogo Sísmico</i>	10
5. ALCANCES.....	10
<i>Herramientas</i>	11
<i>Organización</i>	12
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	13
1. SISTEMAS DE PROCESAMIENTO SÍSMICO	15
<i>Clasificación</i>	15
<i>SPS de procesamiento</i>	16
<i>SPS de análisis</i>	17
<i>EarthWorm</i>	18
<i>Organización Modular</i>	19
<i>Almacenamiento de datos continuos</i>	20
<i>EarlyBird</i>	22
<i>Funcionamiento</i>	22
<i>El archivo oldquakex.dat</i>	22
<i>Los archivos de lecturas</i>	23
<i>Seisan</i>	24
<i>La Base de Datos</i>	24
<i>El S-file</i>	25
<i>Formas de onda</i>	26
2. TECNOLOGÍAS USADAS	28
<i>Marco histórico</i>	28
<i>SPS de procesamiento</i>	28
<i>SPS de análisis</i>	29
<i>Tendencias actuales</i>	29
3. ANTECEDENTES	31
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	33
1. PROCESO DE TRABAJO Y DEMORAS TEÓRICAS	35
<i>EarthWorm</i>	37
<i>EW para adquisición</i>	38
<i>EW de procesamiento</i>	38
<i>Transmisión y almacenamiento de señales sísmicas</i>	38
<i>Demoras Teóricas</i>	39
<i>Detección/Asociación de señales</i>	40
<i>Demoras Teóricas</i>	41
<i>El proceso de localización con Seisan</i>	43
<i>Demoras Teóricas</i>	44
<i>El proceso de publicación</i>	46
2. TIEMPOS DE DEMORAS OBSERVADOS	47
<i>Demoras ocasionadas por el tipo de guardias pasivas</i>	48
3. APRECIACIONES GENERALES	50
CAPÍTULO IV: MODELO DE INTEGRACIÓN	53
1. PROPUESTA.....	55
<i>Requisitos</i>	55
<i>Modelo arquitectónico propuesto</i>	56
2. EL LOCALIZADOR EARLYBIRD	58
3. EL MIDDLEWARE	59
<i>Estados de los sismos localizados automáticamente</i>	59

<i>Temporizadores</i>	60
<i>El servicio erb2db</i>	61
<i>Operador y Criterios de calidad</i>	62
<i>Control de funcionamiento</i>	64
<i>Componentes en la base de datos Mysql</i>	64
<i>Tabla oldquakes</i>	65
<i>Tabla sfiles</i>	66
<i>Pseudocódigo</i>	66
<i>Archivo de configuración</i>	68
<i>El servicio db2seisan</i>	68
<i>Pseudocódigo</i>	69
<i>Diagrama de flujo</i>	70
<i>Obtención de la forma de onda</i>	70
<i>Archivo de configuración</i>	71
4. SEISAN.....	71
5. FILTROS DE PUBLICACIÓN Y PÁGINA WEB.....	73
<i>Pseudocódigo</i>	74
6. IMPLEMENTACIÓN.....	75
<i>El Middleware</i>	75
<i>Seisan</i>	75
<i>Página Web</i>	75
CAPÍTULO V: VALIDACIÓN.....	79
1. INTRODUCCIÓN.....	81
<i>Catálogos</i>	81
<i>Consideraciones</i>	81
<i>Método</i>	83
<i>Muestras</i>	84
<i>Descripción de los datos de los catálogos</i>	85
2. VALIDACIÓN DEL MODELO.....	87
<i>Recuperación y desempeño ante cortes</i>	88
3. VALIDACIÓN DEL CATÁLOGO EARLYBIRD.....	89
<i>Diferencias epicentrales</i>	90
<i>Diferencias en profundidades</i>	91
<i>Diferencias en magnitudes (ML)</i>	93
<i>Sismos publicados</i>	94
<i>Sismos con magnitud local igual o mayor a 4 grados</i>	96
4. DEMORAS OBSERVADAS.....	97
<i>Demoras en catálogo INPRES</i>	97
<i>Demoras en el subconjunto de sismos de Argentina</i>	98
<i>Demoras en el subconjunto de sismos de sentidos</i>	99
5. APRECIACIONES GENERALES.....	99
<i>Grado de incidencia</i>	99
<i>Comportamiento de la implementación</i>	99
<i>Validación de los datos del localizador EarlyBird</i>	100
<i>Demora observadas</i>	100
6. HERRAMIENTAS UTILIZADAS.....	101
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES.....	103
1. CONCLUSIONES.....	105
2. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.....	108
CAPÍTULO VII: REFERENCIAS.....	111
1. REFERENCIAS.....	113
ANEXO I: CONCEPTOS BÁSICOS.....	115
1. INTRODUCCIÓN.....	117
2. LA SISMOLOGÍA EN ARGENTINA.....	117
<i>El instituto Nacional de Prevención Sísmica</i>	117
<i>La Red Nacional de Estaciones Sismológicas</i>	118

	<i>Sismicidad en Argentina</i>	121
3.	CONCEPTOS BASICOS DE SISMOLOGIA	122
	<i>Sismos</i>	122
	<i>Epicentro e Hipocentro</i>	123
	<i>Ondas Sísmicas</i>	124
	<i>Ondas de Cuerpo</i>	124
	<i>Sismogramas y cálculo de hipocentros</i>	125
	<i>Gap</i>	129
	<i>Intensidad y Magnitud</i>	129
	ANEXO II: ALGORITMOS, PARSER Y MIDDLEWARE	133
1.	INTRODUCCIÓN	135
2.	ALGORITMOS	135
	<i>Punto en polígono</i>	135
	<i>Descripción</i>	135
	<i>Regiones</i>	136
	<i>Casos ambiguos</i>	137
	<i>Implementación</i>	137
	<i>Distancias por el gran círculo</i>	137
	<i>Implementación</i>	138
	<i>Orientación geográfica</i>	139
	<i>Implementación</i>	139
3.	ANALIZADOR SINTÁCTICO. PARSER	140
	<i>Archivo oldquakex.dat</i>	140
	<i>Archivo .dat</i>	141
4.	EJEMPLO DEL FUNCIONAMIENTO DEL MIDDLEWARE	141

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1.1: Sismicidad desde 1900 hasta 2012.	3
Figura 2.1: Funciones de los Sistemas de procesamiento sísmico.	16
Figura 2.2: EarthWorm, instalaciones por año.	19
Figura 2.3: Ejemplo (parcial) de una implementación de EarthWorm.	20
Figura 2.4: Consulta sobre 24 hs. de datos continuos.	21
Figura 2.5: Vista parcial del archivo oldquakex.dat.	23
Figura 2.6: Vista parcial de un archivo S-file.	26
Figura 2.7: Datos continuos y forma de onda en seisan.	27
Figura 3.1: Esquema de procesamiento.	36
Figura 3.2: Detalle del esquema de procesamiento.	36
Figura 3.3: Sistema de adquisición, procesamiento y almacenamiento.	37
Figura 3.4: Resumen (parcial) de latencia para la red de estaciones.	40
Figura 3.5: Forma de onda para señales de diferentes estaciones.	41
Figura 3.6: Señales con picadas P y S realizadas por un sismólogo.	44
Figura 3.7: Archivo de lecturas asociado.	44
Figura 3.8: Diagrama de flujo para la publicación en la página Web.	47
Figura 3.9: Esquema de procesamiento con demoras incurridas en cada etapa.	51
Figura 4.1: Visión general del modelo propuesto.	58
Figura 4.2: Diagrama de transición de estados. Sismo calculado automáticamente.	61
Figura 4.3: Ejemplo de un sismo con azimut de 280°.	63
Figura 4.4: Vista parcial de un s-file inicialmente automático y luego revisado.	64
Figura 4.5: Diagrama DER. Tablas oldquakes y sfiles.	65
Figura 4.6: Diagrama de flujo para erb2db.	67
Figura 4.7: Archivo de configuración para erb2seisan.	68
Figura 4.8: Diagrama de flujo para erb2db.	70
Figura 4.9: Archivo de configuración para db2seisan.	71
Figura 4.10: Duplicidad forzada de sismos.	72
Figura 4.11: Forma de onda generada por db2seisan y lecturas por erb2db.	73
Figura 4.12: Diagrama de flujo para filtro de publicación.	74
Figura 4.13: Esquema de publicación.	76
Figura 4.14: Página oficial con sismos calculados automáticamente.	77
Figura 5.1: Esquema de validaciones.	84
Figura 5.2: El middleware como Caja Blanca.	87
Figura 5.3: Histograma de frecuencias para diferencias epicentrales.	91
Figura 5.4: Histograma de frecuencias para diferencias en profundidades.	92
Figura 5.5: Histograma de frecuencias para diferencias en magnitudes.	93
Figura 5.6: Histograma de frecuencias para diferencias en hipocentros.	95
Figura 5.7: Histograma de frecuencias para diferencias en magnitudes.	96
Figura 6.1: Curva de tendencia para sismos sentidos.	107
Figura A1.1: Red Nacional de Estaciones Sismológicas.	120
Figura A1.2: Sismos detectados por INPRES en el año 2012.	121
Figura A1.3: Subducción de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana.	122
Figura A1.4: Placas tectónicas.	122
Figura A1.5: Tipos de fallas.	123
Figura A1.6: Corte de la tierra ilustrando el esquema de la propagación de ondas.	124
Figura A1.7: Ondas internas (P y S) y ondas superficiales.	125
Figura A1.8: Sismograma con tiempos de arribo de las ondas P y S.	126
Figura A1.9: Sismograma registrado en las estaciones HJA, SLA y LVC.	127
Figura A1.10: Determinación de epicentro con tres estaciones.	128
Figura A1.11: Energía liberada según la magnitud del sismo.	131
Figura A1.12: Sismograma mostrando la Amplitud y el Δt entre las ondas P y S.	132
Figura AII.1: Punto en el interior de un polígono (adaptado de Filney).	136
Figura AII.2: Punto en el exterior de un polígono (adaptado de Filney).	136
Figura AII.3: Vista del archivo de ciudades de Argentina (parcial).	138
Figura AII.4: Vista de un archivo s-file con incorporación de ciudades y región.	139
Figura AII.5: División en cuadrantes del espectro geográfico.	139

Tabla 2.1: Principales sistemas de procesamiento.	17
Tabla 2.2: Principales sistemas de análisis.	18
Tabla 3.1: Duración promedio para las formas de onda asociadas a sismos.	42
Tabla 3.2: Demora promedio para actividades en el proceso de localización manual.	45
Tabla 3.3: Demora teóricas en el proceso completo.	46
Tabla 3.4: Demora promedio en localización para el total de sismos registrados en 2012.	50
Tabla 4.1: Rangos para determinar la calidad de las localizaciones automáticas.	63
Tabla 5.1: Datos en los catálogos EarlyBird e INPRES para 175 días de registro.	85
Tabla 5.2: Lista de fallas forzadas.	88
Tabla 5.3: Resumen para distancias epicentrales.	90
Tabla 5.4: Frecuencias acumuladas para diferencias epicentrales.	91
Tabla 5.5: Resumen para distancias en profundidades.	92
Tabla 5.6: Frecuencias acumuladas para diferencias en profundidad.	92
Tabla 5.7: Resumen para diferencias en magnitudes.	93
Tabla 5.8: Frecuencias acumuladas para diferencias en magnitud local.	94
Tabla 5.9: Resumen en hipocentros y magnitudes. (Sismos publicados).	95
Tabla 5.10: Frecuencias acumuladas para diferencias en hipocentros.	95
Tabla 5.11: Frecuencias acumuladas para diferencias en magnitudes.	96
Tabla 5.12: Diferencias para sismos $ML > 4$	97
Tabla 5.13: Demora promedio en localización para el total de sismos en cat. INPRES.	98
Tabla 5.14: Demora promedio en localización para el total de sismos registrados.	98
Tabla 5.15: Demora promedio en localización para el total de sismos sentidos.	99
Tabla A1.1: Diferencias de tiempos.	128
Tabla AII.1: Significado de los campos de oldquakex.dat.	141
Tabla AII.2: Significado de los campos del archivo de lecturas.	141

ABREVIATURAS

AVO: Alaska Volcano Observatory, Estados Unidos.

BGS: Servicio Sismológico de Gran Bretaña.

CSN: Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile.

CERESIS: Centro Regional de Sismología de América del Sur.

CTBTO: Tratado de Prohibición Completa de Ensayos Nucleares, Naciones Unidas.

DAS: Sistema de Adquisición de Datos.

GNU GPL: GNU General Public Licence

INPRES: Instituto Nacional de Prevención Sísmica, Argentina.

IRIS Incorporated Research Institutions for Seismology.

ISC: Centro Internacional de Sismología.

iSCASI Internet Small Computer System Interface

ISTI: Instrumental Software Technologies Inc.

MSEED: Formato utilizado para almacenar datos de forma de ondas sísmicas.

NAQS: Protocolo propietario de la empresa Nanometrics para transmisión de datos

RNES: Red Nacional de Estaciones Sísmológicas.

RTPD: Protocolo de transmisión de datos, propietario de la empresa Reftek Inc.

SAN: Storage Area Network

SIFEM: Sistema Federal de Emergencias, República Argentina.

SPS: Sistema de Procesamiento Sísmico.

USGS: Servicio sísmológico de los Estados Unidos.

WC/ATWC: West Coast and Alaska Tsunami Warning Center's.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1. PRESENTACIÓN DEL TEMA

Argentina es un país que posee un elevado grado de actividad sísmica, principalmente en la región Centro-oeste y Nor-oeste de su territorio¹ (Figura 1.1). Este fenómeno natural constituye un riesgo calificado como de alta peligrosidad para las personas, bienes y construcciones realizadas. Los daños que puede provocar un sismo dependerán de la intensidad y la localización del mismo. Por ese motivo, el monitoreo, análisis y determinación de la actividad sísmica en todo el territorio nacional resulta una tarea fundamental para el Estado. En Argentina, el responsable de llevar a cabo esa función es el Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) con sede en la ciudad de San Juan y ámbito de desarrollo de esta tesis.

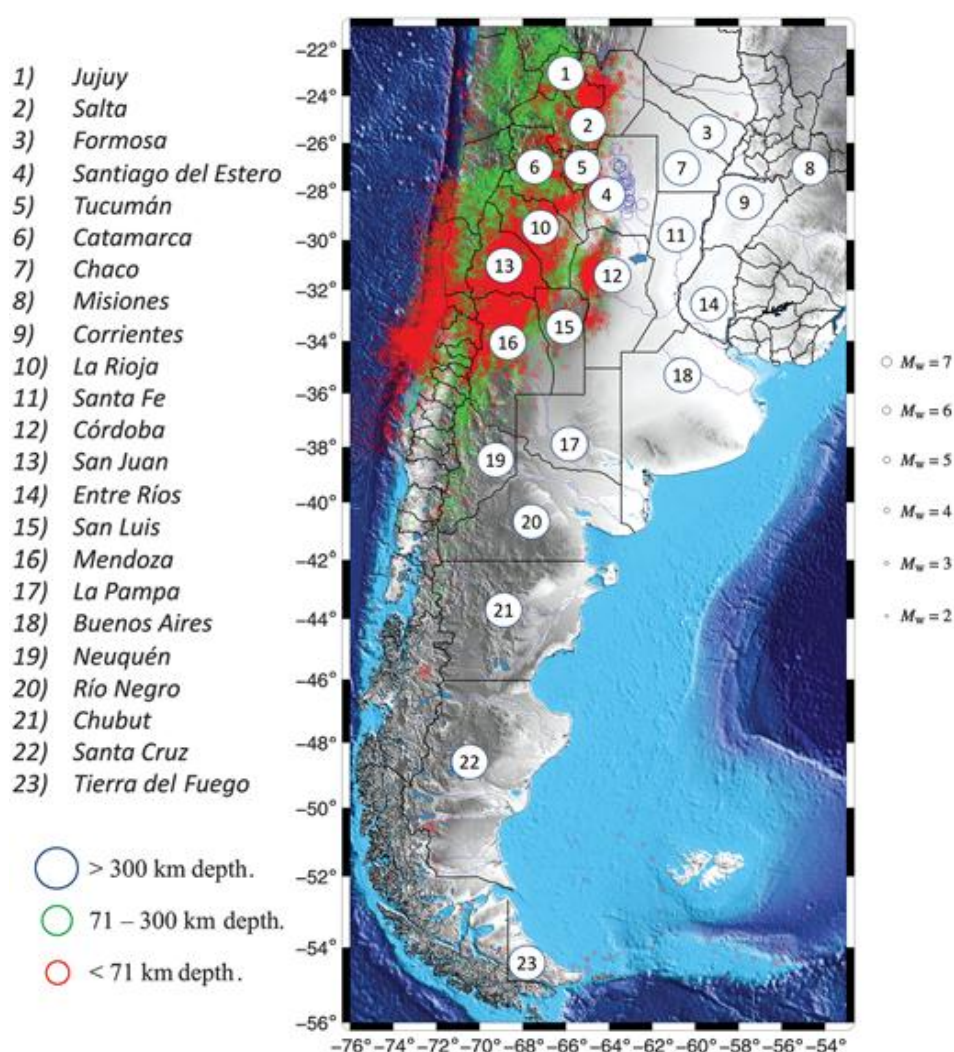


Figura 1.1: Sismicidad desde 1900 hasta 2012. (Tomado de Havskov, J., 2013)

¹ En el Anexo I, se presenta una imagen detallada de la sismicidad en la región Centro-Oeste y Nor-Oeste para el año 2012.

Uno de los objetivos primordiales del INPRES es el de proveer información confiable en el menor tiempo posible ante la ocurrencia de un sismo. Para su cumplimiento, los sismólogos efectúan el estudio, identificación y localización de sismos a partir de las señales sísmicas enviadas en tiempo real por la Red Nacional de Estaciones Sismológicas² (RNES), compuesta de medio centenar de estaciones diseminadas por toda la geografía argentina [Havskov, J., et al 2013]. En INPRES, estas señales son obtenidas, almacenadas y procesadas por un sistema de procesamiento sísmico de código abierto denominado EarthWorm [Jhonsosn, C. et al 1995].

EarthWorm, en su fase de procesamiento, realiza la función de detección de sismos y asociación de señales provenientes de las distintas estaciones sismológicas que corresponden a un evento determinado. Posteriormente, en forma manual y utilizando la plataforma de análisis sísmico Seisan [Havskov, J., Ottemöller, L. 1999], los analistas procesan cada uno de los sismos detectados, lográndose de esta manera la localización (o determinación de un hipocentro), cálculo de magnitudes y otros parámetros de importancia. Finalmente, los datos son publicados en la página Web www.inpres.gov.ar en forma automática. El proceso descrito [Havskov, J. et al 2013] es seguro en cuanto a la confiabilidad de los resultados, no siendo necesario volver a realizar controles de calidad sobre los resultados obtenidos, pero introduce demoras propias de un proceso que incluye actividades con intervención manual, que impiden poder informar de los resultados en forma inmediata a la ocurrencia de un evento.

Un estudio realizado por el autor de este trabajo en el periodo Enero-Marzo de 2013, basado en la observación de los tiempos que demanda la localización manual de los sismos en el proceso descrito, considerando desde el momento en que un sismólogo comienza con una localización hasta que finaliza su trabajo para un sismo cualquiera, arrojó como resultado 13.3 y 5.6 minutos de demora en promedio para los sismos sentidos y no sentidos respectivamente³.

Por otro lado, en INPRES no se trabaja con guardias activas de sismólogos las 24 horas del día. Sólo existen guardias pasivas para el caso de que ocurran sismos que sean percibidos por la población. De esta manera, los sismos que no son sentidos y que ocurren fuera del horario de trabajo (horas de la noche, fines de semana y días no

² Una descripción sobre el INPRES, la RNES y conceptos básicos sobre sismología, se presenta en el Anexo 1

³ La descripción del problema es desarrollado completamente en el Capítulo 3.

laborables), son calculados en horarios normales de trabajo. Sólo cuando un sismo es sentido por la población, se activan las guardias pasivas y un operador debe dar la información del evento lo antes posible, y si el evento ocurre fuera de horario de trabajo, el sismólogo debe dirigirse al INPRES para proceder a la localización del epicentro⁴. Así, el tiempo promedio demandado para calcular cada uno de los 8.081 sismos registrados por INPRES en el año 2012, fue de 8.4 horas para cada uno, si se considera desde la hora de ocurrencia del evento y el momento de la publicación de los resultados de la localización. Si sólo se consideran los 154 sismos sentidos en Argentina durante 2012, la demora promedio observada para cada uno de ellos es de 62 minutos. En ambos casos (sismos sentidos y no sentidos), el procedimiento descrito de localización con intervención manual del sismólogo y guardias pasivas es la causa de esa excesiva demanda de tiempo para el cálculo de un sismo, hasta que los resultados son obtenidos y publicados, constituyéndose en un obstáculo que impide el cumplimiento de uno de los objetivos institucionales más importantes del INPRES.

La solución para este tipo de problemas, implementada en diversos centros sismológicos internacionales, consiste en la utilización de Sistemas de Procesamiento Sísmico (SPS) con capacidades de realizar localización automática. Estas plataformas están enfocadas en la rapidez de la localización y realizan las determinaciones de sismos en escasos minutos sin requerir, en una primera instancia, la intervención manual del sismólogo. Para la implementación de tales sistemas, se deben cumplir al menos los requisitos de calidad y densidad de la red sean suficientes para alcanzar ese objetivo⁵:

- Calidad en la infraestructura de hardware tanto de los Sistemas de Adquisición de Datos (DAS) y de las comunicaciones, las que deben ser en tiempo real.
- Densidad de estaciones que cubren el área geográfica sujeta a monitoreo.

Si bien los aspectos vinculados a la localización automática no son prácticas novedosas, no hay antecedentes en Argentina de implementaciones de este tipo de sistemas. Esto se ha debido a que la RNES no ha reunido los requisitos enunciados, tanto para los Sistemas de Adquisición de Datos como para la infraestructura de las comunicaciones

⁴ Esta tarea también la puede hacer en forma remota, vía SSH.

⁵ Se enuncian los requisitos relevantes a este trabajo, otros aspectos relacionados a los requisitos y una ampliación de este punto, son enunciados en el Anexo 1.

en tiempo real y en segundo lugar, porque la extensión geográfica de Argentina requiere una cobertura de estaciones⁶ mucho mayor a la que la RNES ha tenido en el pasado y también en la actualidad (Mgter. Mario Araujo, jefe del Departamento de Investigaciones Sismológicas, INPRES, comunicación personal, 2 de agosto de 2013).

A partir del año 2007 se comenzó un proceso de modernización del equipamiento de la RNES con la adquisición de Sistemas de Adquisición de Datos de última generación y dotando a las estaciones sismológicas de sistemas de comunicación en tiempo real, alcanzando con esto calidad en la infraestructura de la red. Paralelamente, con el objeto de aumentar la densidad de estaciones, se realizaron convenios con institutos sismológicos de Chile, Bolivia, Paraguay y Brasil para el intercambio de señales sísmicas, aumentando con esto la cantidad de estaciones disponibles. Este último aporte ha servido para mejorar levemente la densidad de estaciones en algunas zonas geográficas del país, sobre todo las ya mencionadas como mas propensas a sufrir los efectos de los sismos (Nor-oeste y Centro-oeste), pero aún sin alcanzar el grado deseado.

Ante estos cambios, en Enero de 2013 se implementó, a modo de prueba, un SPS con capacidades de localización automática denominado EarlyBird (desarrollado por el West Coast and Alaska Tsunami Warning Center's -WC/ATWC, dependiente del National Oceanic and Atmospheric Administration's -NOAA-, Departamento de Comercio de los Estados Unidos). Como era lógico esperar [EarlyBird User Guide, 2007] dada la baja densidad de estaciones, los resultados obtenidos han sido dispares y vinculados al tamaño de los sismos, a la cantidad de estaciones que lo detectan y a la zona geográfica donde ocurren. Así, EarlyBird ha ignorado sismos pequeños captados por pocas estaciones o que ocurren en zonas de baja densidad de las mismas, o puede llegar a generar localizaciones erróneas. Sin embargo, EarlyBird esta diseñado para detectar sismos de relativa importancia [EarlyBird User Guide, 2007], que son los que pueden llegar a ocasionar daño y por lo tanto mas requeridos para tener información rápidamente. Ese tipo de sismos son susceptibles de ser captados por un número importante de estaciones sísmicas.

⁶ Japón, EEUU, algunos países de Europa y de América Central y Caribe poseen redes sísmicas con densidades que alcanzan a una estación cada 5.000 Km² aproximadamente. Chile, después del terremoto del 27 de Febrero de 2010, ha incrementado notablemente su red nacional llegando a tener actualmente más de 150 estaciones sismológicas propias, a las que se suman las que recibe de Argentina y de otros organismos internacionales.

Lo anterior sugiere que, bajo ciertos parámetros de calidad que permitan conocer el grado de confiabilidad de las localizaciones automáticas, un localizador automático se adecuaría a las condiciones actuales de la RNES para producir localizaciones rápidas de sismos de relativa importancia. No obstante ello, una implementación de este tipo sería una solución parcial, ya que en ese escenario podrían ocurrir los siguientes problemas:

- Se perderían los sismos de menor magnitud que quedarían fuera del universo de detección del localizador automático, por ocurrir en zonas de menor densidad de estaciones o porque el localizador automático no reúne la mínima cantidad de estaciones requeridas para una localización. Por ejemplo EarlyBird necesita señales de al menos 5 estaciones sísmicas para poder realizar una localización [Manual de EarlyBird], en tanto que otro sistema de localización automática como el muy difundido Seiscomp [Hanka et al. 2000] requiere un mínimo de entre 6 a 8 señales para poder realizar una localización [Módulo scautoloc, Manual de Seiscomp3, 2013].
- No sería posible revisar o corregir los resultados obtenidos por el localizador automático. (Aunque algunos localizadores automáticos permiten algún tipo de revisión posterior, la misma es limitada)
- Los sistemas de localización automática no poseen una base de datos de sismos integrada para estudios avanzados posteriores y de ser esto necesario, los datos deben ser migrados a plataformas de análisis para tal fin.

Lo anterior constituye el principal obstáculo para realizar una implementación tradicional de un sistema de localización automática como solución a la necesidad de rapidez en proveer información.

2. JUSTIFICACIÓN

Si bien el INPRES no es un organismo dedicado a las emergencias, es fuente permanente de consulta de diversos organismos dedicados a emergencia en Argentina, para los cuales es de relevancia la información de todos los eventos de importancia y obtener localizaciones precisas en forma inmediata, con estimaciones de magnitud coherentes, preferiblemente con alguna interpretación de la importancia del evento

(intensidad). Entre esos organismos están el Sistema Federal de Emergencias (SIFEM⁷) y el Consejo Federal y Gestión de Riesgos de la República Argentina⁸. Asimismo, el INPRES es objeto de consulta permanente por parte de diversos organismos de protección civil como oficinas municipales, bomberos y policía pertenecientes a distintas provincias argentinas.

Desde el punto de vista científico, las prioridades se centran menos en la notificación rápida, pero si en actividades de apoyo a la investigación, tales como mantener un catálogo de sismicidad actualizado y de alta calidad para la totalidad de los sismos registrados, incluyendo los de baja magnitud, archivos de forma de onda y metadatos relacionados. Para estos fines, la Argentina es signatario del tratado para la prohibición completa de explosiones atómicas CTBT⁹ que depende de Naciones Unidas y del cual el INPRES es el organismo nexo de Argentina para temas sismológicos. Desde 2011 es miembro del Centro Sismológico Internacional (ISC por sus siglas en inglés)¹⁰ organismo al que envía periódicamente los catálogos de la sismicidad completa de Argentina, y también es miembro del CERESIS (Centro Regional de Sismología de América del Sur).

Considerando lo mencionado, la solución planteada en esta tesis será altamente beneficiosa para el monitoreo sísmico en Argentina dado que logrará reducir los tiempos de demora en proveer información confiable, acortando la brecha de tiempo entre la ocurrencia de un sismo y el momento de publicar la información, garantizando la completitud del catálogo y posibilitando que diversos organismos puedan beneficiarse teniendo la información inmediatamente después de la ocurrencia de un evento. Esto genera, en consecuencia, un aporte de relevancia social para una gran parte

⁷ SISTEMA FEDERAL DE EMERGENCIAS (SIFEM) Creado por decreto 1250/99. Organización del Estado Nacional que articula los organismos públicos nacionales competentes y coordina su accionar con las provincias, el Gobierno Autónomo de la ciudad de Buenos Aires y los municipios, para prevenir y gerenciar eficientemente la atención de las emergencias o desastres naturales

⁸ Ámbito nacional de coordinación de las diferentes políticas y actividades en materia de respuesta, de prevención, de recuperación y de la gestión de riesgo. Integrado por Defensa Civil de todas las provincias argentinas y coordinado por el Ministerio de Ciencia y Técnica de la Nación

⁹ CTBT (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty por sus siglas en inglés), Organismo de las Naciones Unidas que tiene como objetivo prohibir los ensayos nucleares. 83 países han firmado el Tratado, de los cuales 159 también lo han ratificado (febrero de 2013), incluyendo tres de los estados poseedores de armas nucleares: Francia, Federación de Rusia y el Reino Unido. Sin embargo, 44 países específicos con tecnología nuclear deben firmar y ratificar el CTBT para que entre en vigor.

¹⁰ Centro Sismológico Internacional (www.isc.ac.uk) del cual Argentina es miembro y que tiene como objetivo la recopilación de los eventos sísmicos mundiales y hacerlos disponibles a la comunidad científica internacional.

de la población argentina que habita zonas con alto grado de peligro sísmico, como también para organismos científicos que requieran información rápidamente.

Por otro lado, el trabajo presentado aporta mejoras a Seisan, con la implementación de dos módulos, beneficiando con ello a la amplia comunidad internacional que utiliza esa plataforma.

El autor de esta tesis es integrante de la planta del INPRES desde hace 18 años y docente del Departamento de Informática en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), ámbito donde además de las carreras vinculadas a Informática, se dictan las carreras de Geofísica y Geología. Por ello el autor ha adquirido un conocimiento integral de la problemática que se presenta. Además conoce en primera persona, de las necesidades similares en países de América Latina, por lo que esta contribución puede ser útil no sólo al INPRES, sino también puede ser eventualmente provechosa para otras instituciones sísmicas de la región.

Finalmente, el autor quiere destacar que la propuesta que se presenta en este trabajo es implementada y probada en su confiabilidad y que continuará con el control y seguimiento realizando los ajustes que pudiera requerir, siendo su deseo acompañar al INPRES en el proceso continuo de adaptación a los cambios tecnológicos.

3. OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un modelo de integración entre una herramienta de localización automática, EarlyBird, con la plataforma de análisis avanzado Seisan, integrando de esta manera el procesamiento automático con el procesamiento asistido en forma manual.

Objetivos Secundarios

- Describir completamente el proceso de trabajo (workflow) utilizado en INPRES para realizar localizaciones de sismos, identificando las tareas involucradas y cuantificando las demoras introducidas por cada una de ellas.
- Proveer una solución útil a otros centros sismológicos internacionales con necesidades similares a las del INPRES.
- Incorporar a Seisan de módulos necesarios para la integración que se propone, pero a la vez, útiles a la comunidad de usuarios de esta plataforma.

4. PROPUESTA

La propuesta que se presenta consiste en el diseño y posterior implementación de un modelo de integración que permita que todas las localizaciones automáticas de EarlyBird estén disponibles inmediatamente en Seisan, y a partir de allí, publicarse aquellas que resulten confiables en términos de calidad. Posteriormente a la publicación las soluciones obtenidas pueden ser revisadas por un sismólogo. Aquellas soluciones que no sean confiables, serán publicadas después de haber sido revisadas y/o corregidas por el sismólogo.

Complejidad del Catálogo Sísmico

La solución debe considerar integrar a Seisan los sismos de menor magnitud que quedan fuera del universo de detección del sistema EarlyBird, garantizando de esta manera la completitud del catálogo (un catálogo sísmico es el registro de la totalidad de los sismos que ocurren en una región). Por lo tanto se debe conservar el actual proceso de ingreso de eventos asociados por EarthWorm (que tiene mayor capacidad de detección de eventos pequeños que EarlyBird) tal y como se hace actualmente, quedando en el operador la tarea de eliminar los sismos duplicados que producirá el hecho de contar con dos fuentes (EarthWorm y EarlyBird). Naturalmente, todos los eventos asociados por EarthWorm que ingresan a Seisan, al no tener localizaciones, no serán publicados hasta que un sismólogo lo localice en forma manual, o hasta que sea eliminado porque EarlyBird ya lo ha localizado.

5. ALCANCES

Para realizar este trabajo se han tenido en cuenta dos premisas: reducir los costos de implementación y tener el control de los desarrollos sin depender de productos comerciales, por lo tanto en esta tesis se utilizan plataformas de código abierto y libre, y herramientas de desarrollo con licencia GNU GPL, no considerando de esta manera productos con cualquier tipo de licencia que limite su uso libre.

Para localización automática se utiliza la plataforma EarlyBird a partir de las señales sísmicas adquiridas por EarthWorm, en tanto que para análisis avanzado se utiliza Seisan. Este trabajo se focaliza sólo en aquellos aspectos de dichas plataformas que son relevantes a efectos del objetivo de la tesis, tales como interfaces y formatos de archivos utilizados como intercambio entre ellas, omitiéndose deliberadamente factores muy importantes de esas plataformas, tales como aspectos relacionados al área sísmica,

configuración, tuning y performance, aspectos que demandarían un tratamiento extenso y que quedan fuera del alcance de este trabajo.

Puesto el presente es un desarrollo focalizado en las necesidades particulares del INPRES, se encuentra fuertemente condicionado a características inherentes a esta institución, fundamentalmente a la ausencia de guardias activas de sismólogos y también a la geografía y densidad de la RNES, factores determinantes en la solución propuesta, no obstante ello, como se ha dicho, la solución que se propone puede ser adaptada a otros organismos sísmicos con necesidades similares.

Se presenta el diseño y posterior implementación de un modelo de integración entre EarlyBird y Seisan, que permitirá el procesamiento automático y publicación WEB. La implementación cuenta con las siguientes etapas:

- Implementar EarlyBird para localización automática de sismos en forma preliminar y Seisan para refinamiento posterior de los sismos preliminares.
- Definir interfaces de integración.
- Implementar algoritmos que serán incorporados a Seisan.
- Definición de filtros para la publicación de los resultados confiables.

El tipo de aporte que realiza en este trabajo es principalmente algorítmico, consecuentemente generará, aunque leves, cambios en los procesos de trabajo (workflow). Se proponen mejoras sobre aspectos antes no considerados, haciendo implementaciones de métodos ya conocidos mucho más eficientes en términos de tiempos de respuesta ante la ocurrencia de sismos.

Herramientas

Teniendo en cuenta que, además del INPRES, otros institutos sismológicos pueden hacer uso de la solución presentada en esta tesis, y con el objetivo de que su implementación sea lo más simple posible, se ha tratado utilizar la menor cantidad de componentes adicionales. De esta manera, la solución propuesta sólo utiliza como componentes agregados el uso de:

- Módulos escritos en lenguajes de programación Perl y C.

- Bases de Datos Mysql.

Organización

Esta tesis consta de cinco capítulos adicionales. En el capítulo dos se presenta el marco teórico, describiendo en general los SPS, en particular aquellos involucrados a este trabajo: Seisan, EarlyBird y EarthWorm. Desde el punto de vista tecnológico, y con foco en el software, se describe la evolución histórica y la situación actual de las herramientas vinculadas a esas plataformas. En el capítulo tres se describe la forma de trabajo actual en INPRES y el problema de las demoras que introducen las actividades del proceso de localización manual. En el capítulo cuatro se presenta el modelo de integración entre Seisan y EarlyBird, así como su implementación. Se definen estándares de calidad para las localizaciones y en función de esos estándares, los filtros de publicación de resultados automáticos. El capítulo cinco presenta la validación del modelo sobre resultados de la implementación ejecutándose durante seis meses en un ambiente de producción con datos reales y posteriormente, en función de esas estadísticas, en el capítulo seis se presentan las conclusiones y se detallan los aportes más relevantes del trabajo desarrollado, como así también efectos secundarios y aspectos no considerados y que podrían ser objeto de mejoras posteriores. En el capítulo siete se incluyen las referencias utilizadas.

En el Anexo I, se describe el INPRES y se presentan algunos conceptos básicos propios del área sismológica. La descripción presentada se limita a describir términos utilizados en este trabajo pero no constituye una definición completa y detallada de términos utilizados en sismología.

En el Anexo II se mencionan aspectos relacionados a la implementación de la solución propuesta y a la descripción de los algoritmos utilizados y se presenta un caso de estudio con un ejemplo real.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se categorizan y describen los Sistemas de Procesamiento Sísmico, en especial tres plataformas que forman parte de las más utilizadas en la actualidad (2014), las cuales son: EarthWorm, EarlyBird y Seisan. De ellas, se detallan los aspectos relevantes a efectos del objetivo de la presente tesis. Posteriormente, desde la perspectiva del software, se describen las tecnologías informáticas utilizadas por las plataformas mencionadas. Finalmente se presentan los antecedentes directamente vinculados a la temática de la presente tesis

1. SISTEMAS DE PROCESAMIENTO SÍSMICO

Se puede definir a un SPS como el software con capacidad para llevar a cabo algunas o la totalidad de las siguientes actividades: adquirir, procesar, archivar y analizar grandes volúmenes de datos sísmicos [Olivieri, M. 2012]. Existe una amplia variedad de plataformas disponibles, algunas empresas que diseñan sistemas de adquisición de datos también poseen sus propios desarrollos comerciales, que van desde sistemas sencillos hasta muy sofisticados. Este tipo de sistemas suelen ser útiles para soluciones llave en mano y pueden estar altamente integrados a productos del propio fabricante por lo que se dificultan las modificaciones o adecuaciones propias del usuario, o estas mejoras están limitadas a lo que el proveedor pueda llegar a realizar, incrementando los costos notablemente. En particular, es importante que un sistema de procesamiento de datos pueda ser modificado de manera que se pueda integrar fácilmente con otras redes y adecuar a necesidades particulares, como es el caso de la problemática que se presenta en este trabajo. Por ese motivo, los sistemas de tipo comercial no son tenidos en cuenta en el desarrollo de esta tesis, que se enfoca exclusivamente en el uso de las soluciones de dominio público.

Clasificación

No existe una clasificación estándar para los SPS. Para este trabajo se ha tomado el propósito más relevante de aquellos más utilizados y de dominio público, para posteriormente, encuadrarlos según las características en las que tienen más relevancia. Bajo ese criterio, se consideran:

- Los enfocados a tareas de adquisición, procesamiento y almacenamiento, sistemas totalmente automatizados y en tiempo real.

- Los enfocados en análisis avanzado, que por lo general son sistemas operados en forma manual.

En la figura 2.1 se presenta un esquema de ejemplo típico de algunas de las funciones de los SPS.

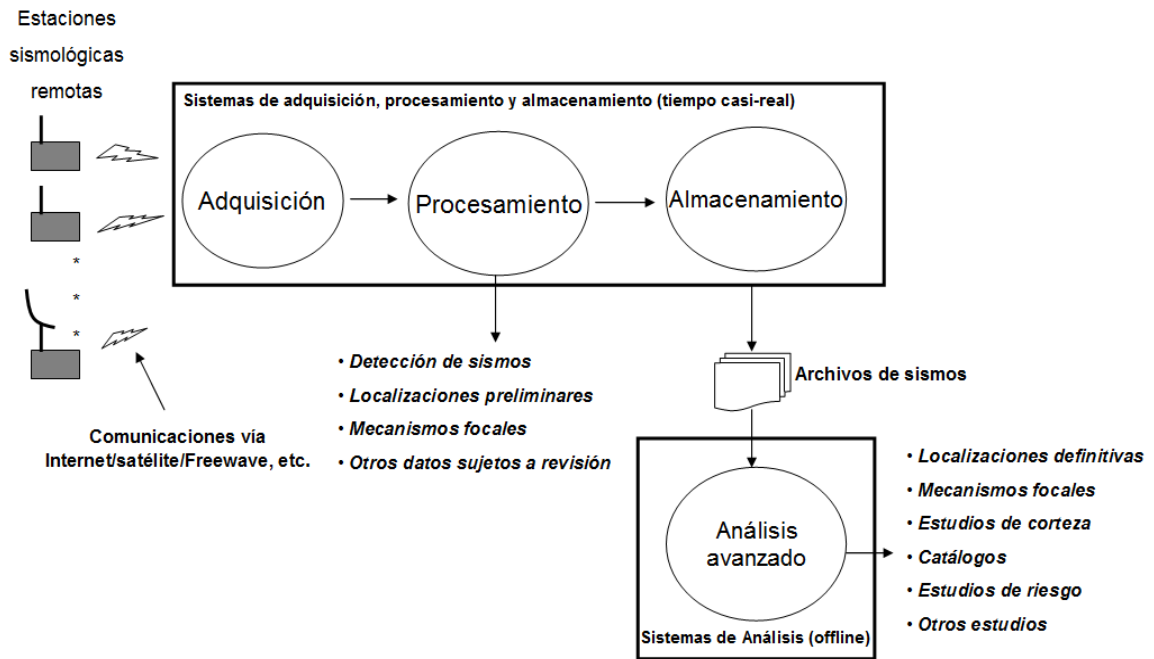


Figura 2.1: Funciones de los Sistemas de procesamiento sísmico.

SPS de procesamiento.

En general este tipo de sistemas están enfocados en la captura de señales en tiempo real desde estaciones sismológicas remotas. Es común que estas estaciones estén equipadas con DAS heterogéneos, enviando datos a la parte de adquisición del SPS, que hace la unificación de los datos en un solo formato para ser pasado a la parte de procesamiento, que es donde se realizan cálculos básicos tales como detección y/o localización de hipocentro, de magnitud y eventualmente mecanismos focales. Finalmente los SPS poseen capacidades de almacenamiento de las formas de onda en formatos estándares, por lo general en Mseed [Seed Reference Manual, 2012], que es un estándar internacional para el almacenamiento e intercambio de datos sismológicos, como así también datos adicionales fruto de sus capacidades de detección/localización, en ambos

casos, esos datos pueden ser utilizados posteriormente en forma offline por sistemas avanzados de análisis, como se muestra en la figura 2.1.

De los SPS de este tipo, los mas utilizados en la actualidad son EarthWorm y Seiscomp3 [Olivieri, M., Clinton, J., 2012], de los cuales EarthWorm es de dominio público y open source, en tanto que Seiscomp3 es de licencia libre para uso no comercial y es open source para algunos de sus programas, pero no para todos.

A partir de EarthWorm, se desarrolló otro de los SPS utilizados en este trabajo, EarlyBird, especializado en localización rápida y, principalmente, para prevención contra tsunamis. En la tabla 2.1 se muestran los tres SPS enunciados y sus características.

Sistema	Código abierto	Sistema Operativo
EarthWorm	Si	Solaris/Linux/Windows/Mac
EarlyBird	Si	Windows
Seiscomp	Mixto	Linux/Solaris

Tabla 2.1: Principales sistemas de procesamiento.

SPS de análisis

Los SPS orientados al análisis son sistemas que integran un gran conjunto de programas para realizar múltiples estudios sobre un conjunto de datos sísmicos. Este tipo de SPS mantienen los datos históricos en estructuras organizadas en bases de datos (relacionales o en estructuras de archivos) para que los programas asociados puedan trabajar con ellas. De esta manera se pueden hacer análisis avanzados sobre el conjunto de datos tales como estudios de corteza, sismicidad recurrente en un periodo de tiempo, búsqueda de sismos en regiones determinadas, etc. Este tipo de sistemas son operados manualmente en manera offline. Algunos de los SPS para análisis mas comunes son: Geotool, Sac, Seisan, Seismic Handler [Havskov, J., Ottemöller, L., 2010]. En la tabla 2.2 se puede apreciar un resumen de las funciones principales de los distintos SPS de análisis.

Sistema	Código Abierto	Sistema Operativo
GeoTool	No	Solaris/Linux
Sac	Parcial	Solaris/Linux/Mac

Sistema	Código Abierto	Sistema Operativo
Seisan	Si	Windows/Solaris/Linux/Mac
Seismic Handler	Si	Linux

Tabla 2.2: Principales sistemas de análisis.

Como se menciona en el Capítulo 1, en este trabajo se utilizará la plataforma Seisan, elección fundada principalmente en que Seisan es totalmente de dominio publico, permite interoperabilidad entre ambientes Linux, Unix, Windows y Mac, trabaja con el estándar Mseed, siendo actualmente el mas difundido en los centros sísmicos de América Latina y utilizado por la tercera parte de los institutos que envían datos al Centro Sismológico Internacional (Dr. Jens Havskov, comunicación personal 15 de Marzo de 2014).

EarthWorm

Earthworm comenzó a desarrollarse en 1990 en el USGS Menlo Park en los Estados Unidos. Es un software que fue diseñado originalmente pensando en cinco factores fundamentales: la escalabilidad, flexibilidad, longevidad, facilidad en el intercambio de datos y soporte permanente. Actualmente, después de haber sido utilizado y probado durante casi 25 años ha demostrando ser robusto y cumplir con los planteos originales. Earthworm está escrito principalmente en lenguaje C y no posee interfaz grafica, aunque en los últimos años, desarrollos de la comunidad de usuarios han contribuido con algunas interfaces. Es 100 % de código abierto y con promesa de seguir de esa manera [EarthWorm website, 2013] debido a esto, ha sido ampliamente enriquecido por desarrollos de la comunidad de usuarios quienes comparten experiencias, problemas y soluciones, así como nuevos desarrollos y sugerencias. A partir del código fuente, varias instituciones también han desarrollado sus propias extensiones de código de EarthWorm que luego se incluyen en la distribución o como software contribuido. Actualmente se encuentra en la versión 7.7 (lanzada en septiembre de 2013) e incluye documentación completa y bien actualizada [Eearthwormcentral, 2013]. Una empresa privada de software, Instrumental Software Technologies Inc. (ISTI, www.isti.com) financiada por el USGS, es la encargada de centralizar nuevos desarrollos, mantener la página Web, la lista de correo, y administrar un repositorio de código fuente de las distintas versiones.

Desde 1999 las instalaciones de EW han ido aumentando año a año, según datos de la empresa ISTI, solamente en 2011 EW fue instalado por cerca de 160 instituciones sismológicas alrededor del mundo (Figura 2.2), y a juzgar por el dinamismo de su grupo de usuarios, es probable que la tendencia siga en aumento.

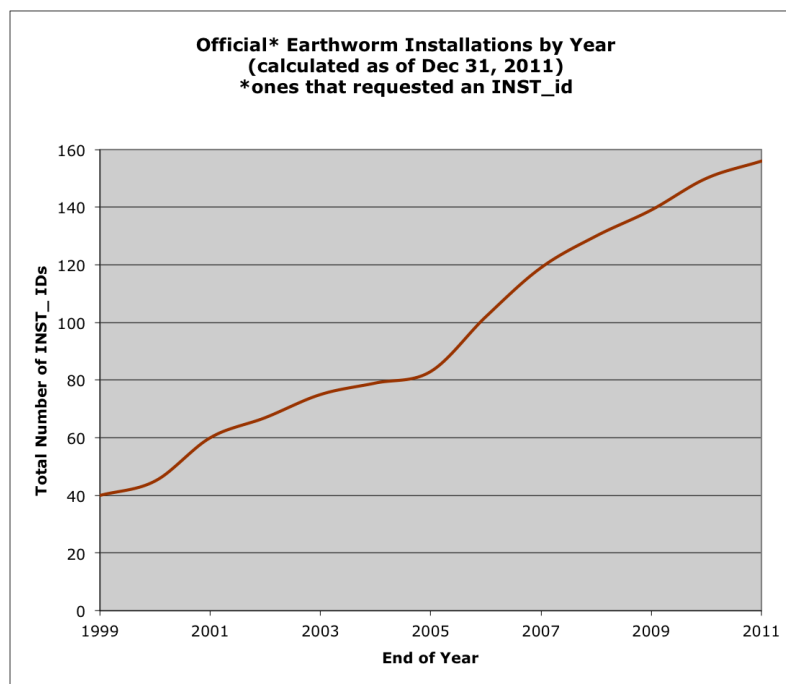


Figura 2.2: EarthWorm, instalaciones por año.
(www.earthworm.isti.com/trac/earthworm)

Organización Modular

EarthWorm puede ser pensado como kit de herramientas modular, con una gran variedad de módulos (mas de 100) que cumplen diferentes funciones, tales como adquisición, digitalización de señales analógicas, identificación de fases, identificación de eventos, localización de eventos, generación de alarmas, almacenamiento, generación de archivos de forma de onda a partir de la detección de un sismo, entre muchas otras. Uno de esos módulos, llamado startstop, es el que contiene la lista de módulos configurados para una instalación y cuando startstop inicia, arranca todos los módulos contenidos en él.

Cada módulo es un programa independiente y el sistema completo se puede configurar con la utilización de los módulos que se deseen (en startstop) y el proceso completo es totalmente automatizado, sin intervención humana. [Johnson, Carl et al, 1995]. Los

módulos se comunican entre ellos a través de regiones de memoria compartidas, llamados rings.

Un ejemplo de funcionamiento es mostrado en la figura 2.3, allí EarthWorm se ha configurado como un sistema de adquisición y almacenamiento. La parte de adquisición consta de varios módulos (nmxp tool, reftek2ew, import_generic y slink2ew) que se encargan de obtener las señales sísmicas provenientes de diversas estaciones remotas heterogéneas (de allí el uso de diferentes módulos de adquisición). Todas las señales son pasadas a un ring de memoria, desde donde son tomadas por otro módulo (scn2scnl) para establecer nombres de estación y las señales son dejadas en un segundo anillo a partir del cual son almacenadas en un sistema de archivos de disco por el módulo wave_server. Al mismo tiempo, las señales también son almacenadas en forma continua en una base de datos relacional Mysql por un módulo llamado import que forma parte de un paquete contribuido por el Alaska Volcano Observatory (AVO) llamado Winston.

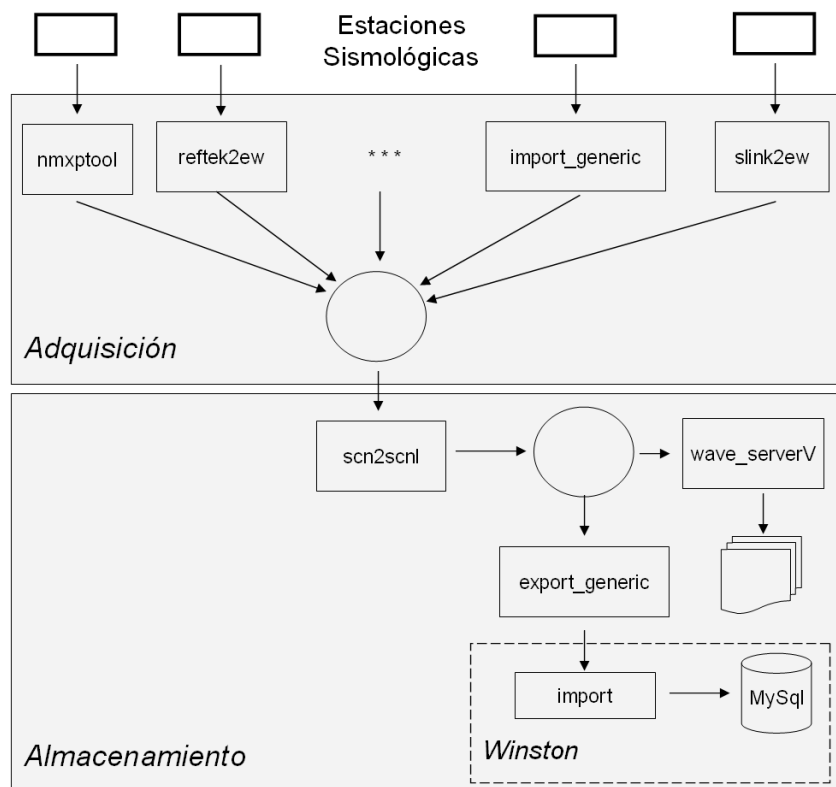


Figura 2.3: Ejemplo (parcial) de una implementación de EarthWorm.

Almacenamiento de datos continuos

Una de las actividades mas importantes de un SPS es el almacenamiento de los datos continuos en tiempo real, datos que posteriormente pueden ser usados para extraer

formas de onda de una ventana de tiempo acotada (para un sismo en particular, por ejemplo) o para consultas con herramientas graficas.

Earthworm tiene varias formas de almacenar los datos continuos, dos de ellas son las que se muestran en la figura 2.3. Wave_serverV, que registra las señales continuas en archivos de disco, denominados tanques. Este método es lento debido a la gran cantidad de lecturas de disco que debe hacer para escribir, leer o recuperar datos. Otra forma de almacenar datos continuos es a través del módulo Winston también utilizado en el diagrama de la figura 2.3, que almacena las señales sísmicas en tablas de una base de datos MySQL y actúa como emulador de wave_serverV, es decir que admite todas las acciones que se pueden realizar con wave_serverV. Winston es más rápido que wave_serverV y consume menos espacio en disco.

Sobre los tanques o sobre MySQL se pueden hacer consultas en tiempo real o extracciones de datos para una ventana de tiempo. En la figura 2.4 se muestra una consulta sobre la base de datos MySQL con una herramienta grafica, llamada Swarm, que también ha sido provista por usuarios de EarthWorm. Winston y Swarm están escritas en lenguaje Java y son desarrollos aportados por la comunidad de usuarios de EarthWorm.

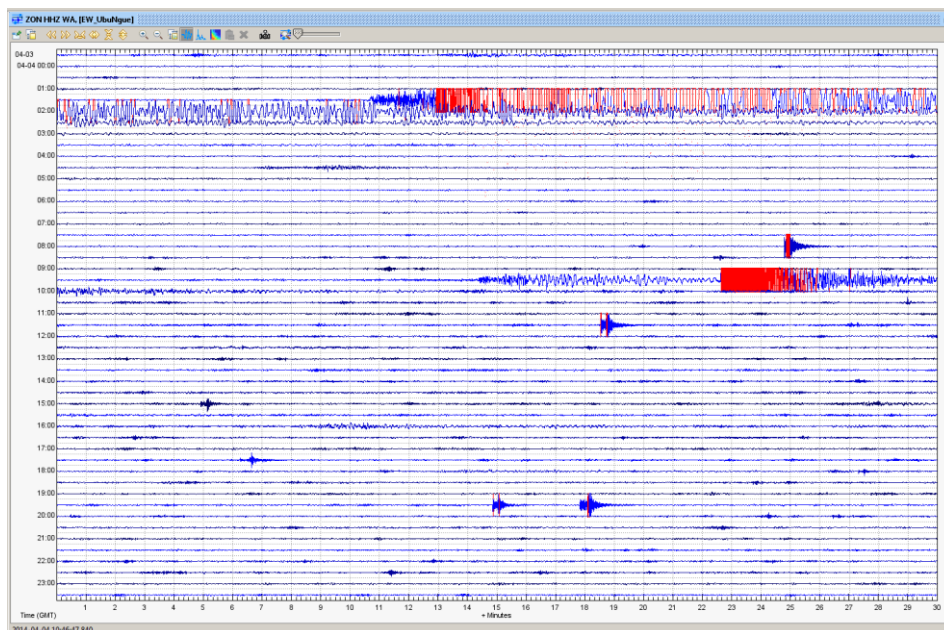


Figura 2.4: Consulta sobre 24 hs. de datos continuos.
(Estación ZON, San Juan, Argentina)

EarlyBird

EarlyBird es una plataforma desarrollada por WC/ATWC basándose en la arquitectura de EarthWorm, y por lo tanto muy similar a la estructura mostrada en la figura 2.3. Es un software dominio público y muchos institutos sismológicos alrededor del mundo lo han adaptado a sus necesidades para ser utilizado como localizador automático en tiempo real y alerta temprana [Huang, P., 2008]. Permite también algún post proceso sobre los sismos localizados automáticamente, aunque siempre para sismos individuales. Además de poseer el core de EarthWorm, incluye el agregado de módulos desarrollados en WC/ATWC (los módulos agregados a Earlybird son compatibles también en EarthWorm) y se han creado interfaces gráficas para algunos módulos de EarthWorm y los propios de EarlyBird, lo que permite cierto trabajo interactivo, adiciones y cambios a los datos calculados automáticamente durante el proceso de localización o después del proceso. De esa manera, los datos en tiempo real permiten ser monitoreados e incluso interactuados directamente a través de los módulos con interfaz gráfica. Los datos y resultados son almacenados en disco para que puedan ser analizados inmediatamente después por un software de análisis. EarlyBird localiza automáticamente y calcula distintos tipos de magnitudes para sismos mundiales, regionales y locales.

Funcionamiento

Una vez que detecta un sismo, EarlyBird genera una fila en un archivo llamado *oldquakex.dat*, con los datos de la localización, y varias filas en otro archivo donde aloja las lecturas de las estaciones (una lectura por fila). Conforme van ingresando nuevas señales provenientes de diferentes estaciones, EarlyBird va recalculando permanentemente ese sismo para mejorar la determinación, y consecuentemente, actualizando la fila relativa a ese sismo en el archivo *oldquakex.dat* y en el archivo de lecturas. El sistema genera las primeras localizaciones cerca de un minuto después de recibir las primeras señales, y este proceso puede durar hasta 20 minutos [EarlyBird User Guide, 2007].

El archivo oldquakex.dat

Al igual que todo SPS, EarlyBird interactúa con una gran cantidad de archivos, unos de configuración y otros para almacenar información sobre su actividad de rutina. Como se ha dicho, para la localización automática, siempre que realiza una localización de

hipocentro, EarlyBird genera una entrada en el archivo oldquakex.dat, que mantiene las 100 últimas localizaciones de hipocentro realizadas. Puesto que el proceso de localización de un evento determinado es un proceso dinámico que depende de las señales sísmicas de las estaciones sismológicas que se están recibiendo, un evento en particular puede ser re-localizado según ingresan ingresando nuevas señales sísmicas correspondientes a ese evento. Así, un sismo cualquiera puede ser localizado en una primera instancia con un cierto número de señales sísmicas (cinco como mínimo) y dar un resultado de hipocentro inicial, pero conforme se van recibiendo las señales de otras estaciones que ingresan al cómputo de re-localización, el resultado original de hipocentro puede variar respecto de la primera vez. Este proceso se puede repetir mientras se reciban señales involucradas en ese sismo. No obstante ello, el evento puede ser modificado aun por interacción humana, hasta una hora después de su ocurrencia En la figura 2.5 se muestra un ejemplo parcial del archivo oldquakex.dat.

```
1390395180.744357 -31.314430 -68.662854 2.922361 2 1 97 009167 7 13 0.609508 206.000000 0.000000 0 2.922361 2 0.000000 0 2.536289 4 0.000000 0 1390395194.665000 3
1390384082.554102 -31.111578 -68.456701 2.536582 2 1 94 008981 7 14 0.436033 291.000000 0.000000 0 2.536582 2 0.000000 0 2.452748 3 0.000000 0 1390384096.365000 3
1390378550.459297 -21.393188 -69.163299 2.657176 4 1 117 008733 2 8 1.098391 55.000000 0.000000 0 2.657176 4 0.000000 0 0.000000 0 0.000000 0 1390378567.125000 3
1390376118.854573 -31.700641 -67.969520 2.349012 1 1 20 008718 4 7 1.267939 245.000000 0.000000 0 2.349012 1 0.000000 0 2.620679 1 0.000000 0 1390376131.715000 2
1390372379.287041 -31.385165 -68.763004 2.662754 1 1 97 008740 5 14 0.700826 219.000000 0.000000 0 2.662754 1 0.000000 0 2.491795 2 0.000000 0 1390372393.165000 3
1390371289.530698 -31.494956 -68.994934 1.902478 3 1 112 008676 3 9 0.471113 190.000000 0.000000 0 1.902478 3 0.000000 0 0.000000 0 0.000000 0 1390371307.175000 3
1390364667.692175 -31.811642 -69.685257 2.260269 2 1 85 008518 4 7 0.096030 141.000000 0.000000 0 2.260269 2 0.000000 0 0.000000 0 0.000000 0 1390364687.215000 2
1390361481.829364 -23.768757 -67.462236 2.397904 7 1 190 008410 2 8 0.646742 67.000000 0.000000 0 2.397904 7 0.000000 0 0.000000 0 0.000000 0 1390361517.469500 3
1390355943.665617 -31.967986 -69.877230 2.222306 3 1 224 008271 4 10 0.732895 217.000000 0.000000 0 2.222306 3 0.000000 0 2.567753 1 0.000000 0 1390355970.985000 3
1390346002.737543 -31.532574 -67.907095 2.430403 3 1 20 008191 4 10 1.451042 178.000000 0.000000 0 2.430403 3 0.000000 0 0.000000 0 0.000000 0 1390346008.012500 3
1390345075.008437 -29.585173 -69.677379 2.552612 1 1 90 008103 3 7 1.406981 79.000000 0.000000 0 2.552612 1 0.000000 0 0.000000 0 0.000000 0 1390345105.665000 2
1390342001.774998 -20.954730 -69.209299 3.679703 5 1 117 008018 14 15 0.780894 102.000000 3.322879 1 3.679703 5 0.000000 0 3.089928 5 0.000000 0 1390342022.225000 3
```

Figura 2.5: Vista parcial del archivo oldquakex.dat.

Oldquakex.dat es un archivo en formato ASCII con una estructura de 24 columnas separadas por espacios. Cada fila representa un sismo, identificado unívocamente por un número entero, que es el identificador del sismo. Una descripción más detallada del contenido de este archivo se presenta en el Anexo 2.

Los archivos de lecturas

Para cada fila representando un sismo en oldquakex.dat, EarlyBird genera un archivo conteniendo las lecturas de todas las estaciones que han contribuido en la localización. Estos archivos tienen como nombre la identificación que EarlyBird le da al sismo, por ejemplo 12304.dat, donde 12304 es el identificador de sismo. Al igual que oldquakex.dat, este archivo también se modifica constantemente mientras EarlyBird detecta nuevas lecturas para un sismo dado. En el Anexo 2, se presenta una descripción detallada de los archivos de lecturas.

Seisan

Es un SPS orientado al análisis y se compone de una gran cantidad de programas de tratamiento y de análisis de datos, que son comúnmente de uso general en cualquier instituto sismológico. Un objetivo principal de Seisan es organizar los datos en una base de datos y permitir que esa gran cantidad de programas de tratamiento y análisis pueda interactuar con esa base de datos para facilitar el procesamiento de rutina y tareas de investigación. La base de datos Seisan no es una base de datos relacional, sino una organización de datos mediante el uso de la estructura de directorios organizados jerárquicamente. Seisan además, permite trabajar de una manera idéntica no importando la plataforma, que puede ser Linux, Windows, Sun o Mac, es decir que los datos de forma de onda (archivos binarios) y de lecturas (archivos ASCII) se pueden mover entre las distintas plataformas sin ninguna modificación.

Para trabajos propios de sismología, Seisan puede navegar en la base de datos para encontrar un determinado sismo y una vez que ha sido seleccionado, se pueden realizar un gran número de opciones. La mayoría del trabajo de rutina que realiza un sismólogo se hace con un programa denominado *eev*, que actúa como una interfaz entre el sismólogo y la base de datos. Los resultados del procesamiento interactivo se almacenan de nuevo en la base de datos.

Además de *eev*, para el trabajo en general, hay programas para la creación de bases de datos, de entrada y salida de grandes conjuntos de datos, de selección, conversión, manipulación de datos de forma de onda y muchas otras operaciones.

Seisan es de código abierto y como suele ocurrir con el software de dominio público, un gran número de usuarios ha aportado sugerencias, mejoras y nuevos programas, además es distribuido por diferentes empresas de instrumentos. Actualmente se encuentra en su versión 10 (lanzada en 2013), aunque este trabajo se ha realizado utilizando la versión anterior 9.1.

La Base de Datos

La base de datos Seisan no es un sistema de Base de Datos relacional, sino que es una estructura de archivos jerárquica, constituida por un conjunto de archivos de parámetros correspondientes, cada uno, a un sismo individual y que se denomina S-file.

Los S-file son archivos ASCII y en formato conocido como Nórdico [Havskov, J., 1990]. Como se dijo, los archivos S-file se almacenan en una estructura jerárquica con directorios anuales y mensuales, y los nombres de cada s-file se construyen con el tiempo origen del sismo con la forma *dd-hhmm-ssL.Syyyymm*. Por ejemplo el nombre del archivo s-file *04-0952-07L.S201404*, se refiere a un sismo del día 04 de Abril de 2014 a las 09 horas 52 minutos con 07 segundos (el s-file se muestra en la figura 2.6). La estructura reside bajo un directorio llamado con el nombre de la base de datos, y el Seisan puede tener cualquier número de bases de datos.

El S-file

Los S-files contienen toda la información relativa a un sismo, como de tiempo de origen, hipocentro, magnitudes, lecturas de fase, operador responsable de calcular ese sismo, archivo de formas de onda asociados, entre otros. Un ejemplo (parcial) de un S-file se muestra en la figura 2.6. El formato comienza con una serie de líneas de cabecera con el tipo de línea que se indica en la última columna (80). Puede haber cualquier número de líneas de cabecera, incluyendo líneas de comentarios. La primera línea incluye el tiempo de origen, hipocentro y magnitudes; la línea tipo I hace referencia entre otros datos, al operador o sismólogo que ha trabajado con el sismo (cada uno de los sismólogos posee un código de operador que es utilizado para identificar al sismólogo que ha trabajado en la localización de cada sismo en particular.) y al identificador del sismo en la base de datos Seisan. La línea tipo E es la estimación del error; la línea tipo 6 contiene el nombre del archivo de forma de onda correspondiente; la línea tipo 7 es la línea de encabezado de lecturas, las abreviaturas son: STAT (código de estación); SP (componentes); I (I o E); PHAS (fase); W (peso); D (polaridad); MGRH SECON (tiempo); CODA (duración); AMPLIT (amplitud); PERI (período); Azimu (acimut en la estación); VELO (velocidad aparente); SNR (relación señal a ruido); AR (azimut residual del lugar); TRES (residual tiempo de viaje); W (peso en lugar); DIS (distancia epicentral en Km.); CAZ (acimut de un evento a la estación). Las líneas de lecturas se ubican inmediatamente abajo de la línea de encabezado (tipo 7) y no tienen ningún indicador de tipo de línea.

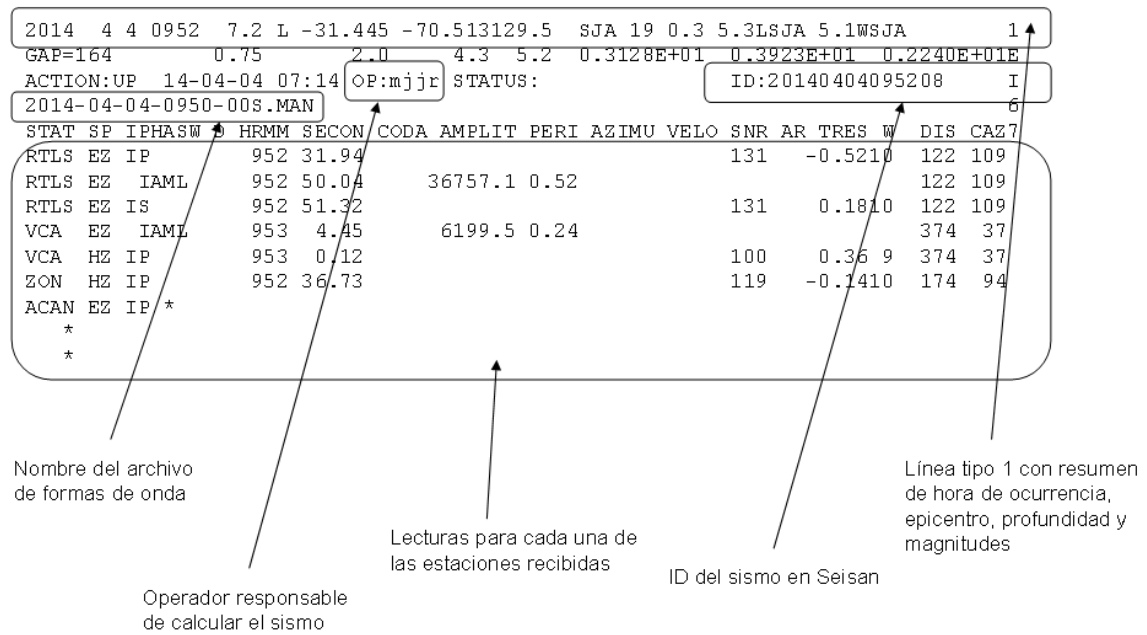


Figura 2.6: Vista parcial de un archivo S-file.

Formas de onda

Los archivos de forma de onda son archivos binarios que representan las señales crudas emitidas por cada una de las estaciones sismológicas, en INPRES estas señales se almacenan en formato Seisan [Havskov, J., and Ottemöller, L., 2000], o en formato Mseed. Al igual que los S-files, los archivos de forma de onda se pueden almacenar de la misma manera en una estructura jerárquica de directorios por año y mes, aunque otros tipos de organización también son válidas. En la base de datos Seisan, cada S-file se vincula con uno o más archivos de forma de onda (aunque puede haber s-files que no tienen forma de onda asociado). Los archivos de forma de onda que se almacenan en Seisan son sólo de una ventana de tiempo acotada, que depende de la duración del sismo, por lo general cerca de cinco minutos. En la figura 2.7 se observa un registro continuo de 24 horas tomado de la base de datos Winston, y abajo la forma de onda de tres minutos de duración almacenada en seisan.

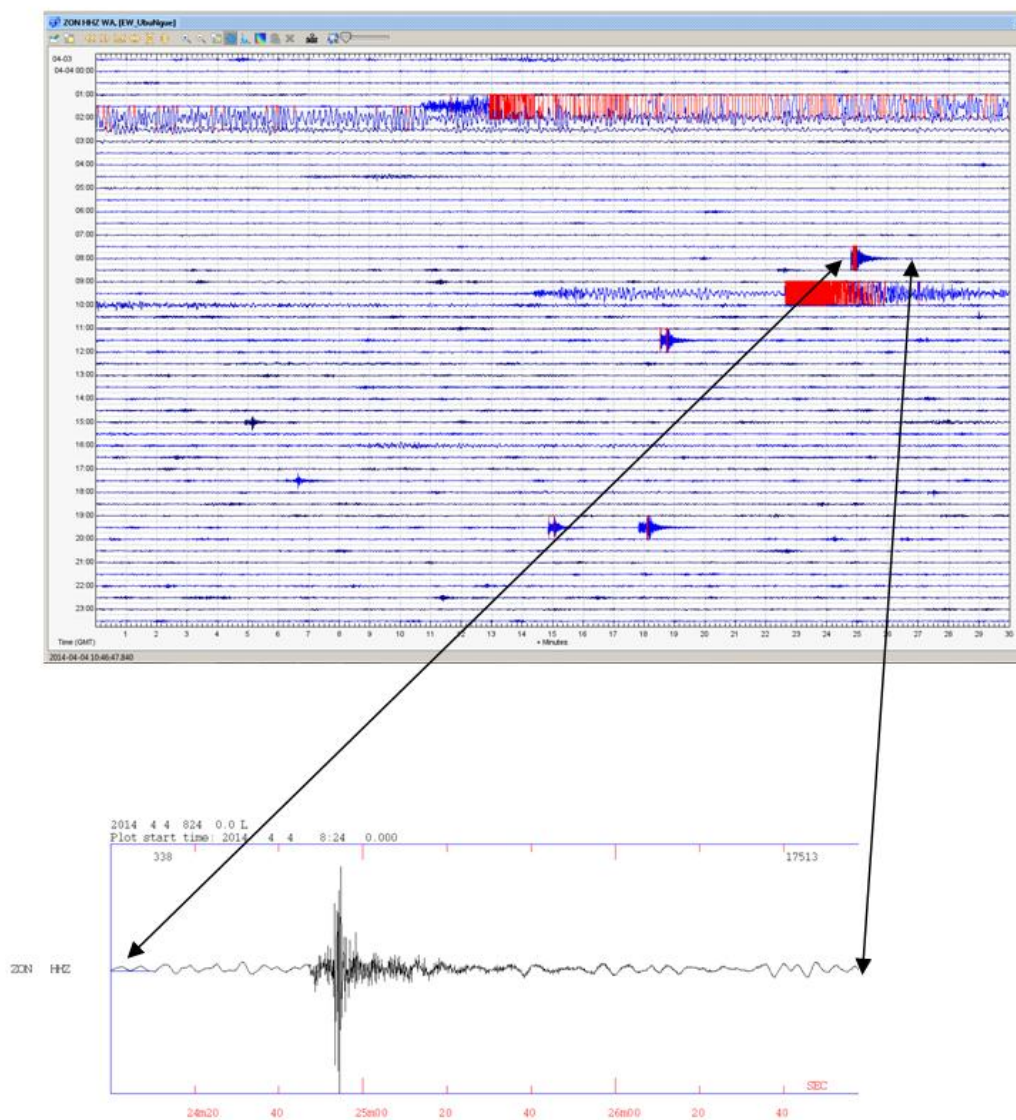


Figura 2.7: Datos continuos y forma de onda en Seisan.

2. TECNOLOGÍAS USADAS

Marco histórico

Como en la mayoría de las áreas científicas, en el campo de la sismología los avances tecnológicos han estado estrechamente ligados a los progresos en microelectrónica y a las ciencias de la computación. El origen de los primeros SPS de análisis surge como iniciativas académicas y se remonta a los años setenta, junto con el surgimiento de las primeras computadoras. Posteriormente, a mediados de los años ochenta, promovido por el nacimiento de las redes de computadoras, surgen las primeras redes sísmicas y consecuentemente de los primeros SPS de procesamiento, presentándose en este caso como soluciones centralizadas y propietarias.

SPS de procesamiento

Las empresas que proveían hardware para monitoreo sísmológico (Sistemas de Adquisición de Datos y sismómetros principalmente) tenían cada una, su propio desarrollo de SPS que se presentaba como paquetes cerrados y se instalaban llave en mano y a altos costos. Esto continuó hasta que hacia mediados de los años noventa, los SPS utilizados por la mayoría de las redes sísmicas estaban envejeciendo y los avances en sismología requerían de datos sísmicos de nuevos sismómetros que no eran compatibles con las soluciones propietarias existentes, además de que los costos de mantenimiento continuaban creciendo ya que los usuarios de tales sistemas se convertían en dependientes de un único proveedor, obligados a adquirir únicamente las soluciones de ese fabricante. Por otro lado los sistemas propietarios constituían un obstáculo para la creciente necesidad de intercambio de datos entre diferentes organismos sísmicos internacionales, cada uno con diversidad de implementaciones. Por ello, la mayoría de las instituciones ya no podían apoyar los esfuerzos de desarrollo de sistemas propietarios. Tal es el caso de la primera red sísmica digital de Argentina, constituida por 15 estaciones remotas, que el INPRES instaló en 1994 con un SPS de procesamiento propietario, y que se dejó de utilizar a comienzos de la década del 2000 debido a la obsolescencia de los equipos, el alto costo de mantenimiento y la falta de compatibilidad con otras redes sísmológicas internacionales.

Es en respuesta a todos esos problemas y necesidades comunes es que, a principio de los años noventa surge EarthWorm constituyéndose en el primer SPS de procesamiento

de código abierto, con organización modular, procesamiento distribuido y comunicación utilizando los protocolos TCP/IP, características que se han mantenido hasta la actualidad en otros SPS surgidos posteriormente como Seiscomp y EarlyBird.

Respecto a los Sistemas Operativos, la mayoría de los SPS de procesamiento se ejecutan en Unix y Linux, constituyendo este último el Sistema Operativo dominante en la actualidad para este tipo de plataformas, aunque algunos SPS han sido adaptados también a Windows y Mac.

El lenguaje de programación en el que se escribieron originalmente fue principalmente C y si bien en la actualidad mucho de ese código original constituye el núcleo de los SPS y se continúa utilizando para adaptaciones y mejoras, el uso de Bases de Datos relacionales, lenguajes de programación basados en scripts y también Java, han aportado un importante conjunto de herramientas que están siendo utilizadas para mejorar tareas alrededor de ese núcleo original. Entre las muchas funcionalidades incorporadas se encuentran actividades de configuración y testing, manejo de metadatos, reportes, interfaces graficas de usuario y sistemas de información geográfica.

SPS de análisis

El origen de los SPS de análisis es anterior a los de procesamiento y surgen principalmente en los ámbitos de las universidades tal el caso de SAC y Seisan que desde sus inicios fueron desarrollados para la plataforma Unix, sistema operativo dominante en los ambientes académicos y de investigación de ese entonces, aunque al igual que los SPS de procesamiento, en la actualidad Linux se ha constituido en el principal SO para estos sistemas. Al igual que los SPS de procesamiento, el lenguaje de programación utilizado fue C y también Fortran y de la misma manera, ese código constituye el actual núcleo de los SPS de análisis.

Tendencias actuales

Las tendencias actuales están orientadas a los objetivos de mejorar el monitoreo sísmológico, de lograr información en tiempo real y de mejorar la calidad de la misma. Para ello los organismos sísmicos internacionales se han enfocado en el crecimiento de las redes sísmicas, y de incluir cada vez más cantidad de estaciones sísmológicas. Cuentan para ello con un soporte tecnológico de conectividad maduro y variado entre los que se destacan los enlaces freewave y satelital, las redes inalámbricas, los enlaces 3G y 4G y el uso generalizado de Internet. Tal ha sido el crecimiento de las redes, que

ha surgido el concepto de “redes virtuales” [Trnkoczy, A., et al, 2009] que se aplica a grupos de estaciones seleccionadas entre muchas estaciones conectadas a Internet, las que han crecido fruto de la colaboración entre diferentes organismos internacionales. Esta situación ha sido posible gracias al surgimiento de un protocolo que se ha convertido en un estándar de facto para el intercambio de datos: el protocolo SeedLink [Heinloo, A., 2000] y del formato de archivos Mseed para intercambio de formas de ondas. Así, en la actualidad los SPS de procesamiento disponen de capacidad de procesar cientos de señales en tiempo real, provenientes de diversos organismos. Este crecimiento ha sido acompañado por la utilización de sistemas de almacenamiento masivos, tales como los sistemas de almacenamiento SAN (Storage Area Network), con el protocolo iSCSI (Internet Small Computer System Interface), en forma conjunta con el uso de Bases de Datos Relacionales.

Finalmente para los SPS de análisis han surgido una gran cantidad de utilidades, fruto de los ambientes colaborativos entre la comunidad sismológica, orientadas a la creación de interfaces (entre los SPS de análisis entre si y con los de procesamiento), para análisis, estadísticas, generación de mapas entre otros. En este ámbito, puesto que la mayoría de los SPS de análisis almacenan sus archivos de lecturas de fases, magnitudes, y de información de trabajo en archivos de texto en formato ASCII, (tales como los archivos s-files en Seisan o los event files de SAC) o en Bases de Datos relacionales como MySQL o PostgreSQL, la manipulación de datos se vale del uso de lenguajes de programación interpretados, multiplataforma y con facilidad para el manejo de archivos de texto y Bases de Datos, como Perl y Python. Estos lenguajes se han convertido en herramientas fundamentales sobre los que se han construido numerosos aportes, como es caso del modelo propuesto en esta tesis. De la misma manera, muchas interfaces con entorno grafico para análisis de formas de onda utilizan programación en Java.

3. ANTECEDENTES

Puesto que los SPS de análisis tienen su origen en una época en donde no existían las redes sísmicas ni los SPS de procesamiento, y también por estar enfocados en objetivos diferentes, han evolucionado con poca integración a los SPS de procesamiento en tiempo real. En el caso de Seisan la comunidad sismológica ha realizado esfuerzos tendientes a crear interfaces para integrar los SPS de procesamiento a Seisan. Tal es el caso del mismo EarlyBird, y también de EarthWorm, los cuales (ambos) poseen módulos (*Arcman*, *Trig2disk* y *Waveman2Disk*) que generan archivos de forma de onda en formatos compatibles con Seisan.

La última versión de EarthWorm (v7.7 Noviembre de 2013) incluye mejoras en la interacción con Seisan en los módulos mencionados. [EarthWorm Group. 2013]. Además al ser EarthWorm un software open source, existen diversos desarrollos de integración a Seisan realizados por la amplia comunidad de usuarios, tal es el caso del módulo *seisan_report*, contribuido por la British Geological Survey (BGS), que permite generar archivos de lecturas de fases en formato Seisan y archivos asociados de forma de onda para localizaciones automáticas de EarthWorm. El modelo de trabajo de *seisan_report* se acerca al objetivo planteado en esta tesis, pero genera archivos asociados de forma de onda solamente para las estaciones leídas (picadas), en tanto que deja de lado estaciones no leídas, pero cercanas al sismo y que por lo tanto, podrían ser de interés para el sismólogo. Otro factor para descartar el uso de *seisan_report* es la necesidad de contar con otros parámetros en el archivo de lecturas que indiquen grados de calidad de las localizaciones, región geográfica de ocurrencia y distancias epicentrales, aspectos que no son tenidos en cuenta por ese módulo.

Del lado de Seisan también se han hecho esfuerzos para vincularse al muy difundido SPS de procesamiento Seiscomp. El esfuerzo ha estado orientado a que Seisan pueda trabajar sobre cualquier porción de forma de ondas almacenadas en la estructura de archivos de Seiscomp [Rúben, L., et al, 2011].

A pesar de los esfuerzos enfocados en la integración, salvo *seisan_report*, los aportes se han circunscrito a la creación de módulos que hacen que las formas de onda de un sistema, sean compatibles con las del otro. Esto, como es lógico dado que son plataformas ampliamente difundidas, ha considerado intereses generales sin tener en cuenta necesidades particulares de cada red sísmica que los utilice.

Impulsado por las consecuencias del terremoto del 27 de Febrero de 2010, en Chile, el Centro Sismológico Nacional, dependiente de la Universidad de Chile (CSN) ha desarrollado un sistema de integración entre EarlyBird y Seisan que ha servido de inspiración de la presente tesis. Allí se ha implementado un sistema que, mediante alarmas, indica a los analistas la ocurrencia de un sismo y, a través de un middleware programado en el lenguaje Perl, lleva la información desde earlyBird hacia la base de datos de Seisan donde los sismos están disponibles para la interacción manual del sismólogo. Allí, el analista trabaja con la solución y, en última instancia tiene la decisión de publicar o no los resultados obtenidos. (Ulises Vergara, CSN, comunicación personal, Diciembre de 2011). Esta solución, tal como está implementada, no es adecuada para Argentina ya que en ese esquema de trabajo, la decisión de publicar resultados siempre es manual y está soportada por un sistema de guardias de sismólogos las 24 horas para todos los días del año, cosa que no es posible en INPRES. Por otro lado, el sistema de localización automático implementado en Chile provee certeza en los resultados obtenidos, ya que con menos de un tercio de la superficie de Argentina, Chile posee cerca de 150 estaciones sísmicas (a Mayo de 2014). Es probable que soluciones similares ya se hayan desarrollado en otros centros sismológicos pero, salvo lo mencionado para Chile, el autor no ha encontrado antecedentes de tales avances en países de América Latina.

Para el caso de la red sísmica de Argentina, los antecedentes mencionados no son suficientes para lograr el objetivo principal planteado en esta tesis. Para reducir tiempos de demora en las localizaciones de sismos, es necesario lograr una integración más amplia entre EarlyBird y Seisan, que trabaje en tiempo real, con control de la calidad de los resultados de las localizaciones automáticas que son pasadas a Seisan y que esté centrada en la problemática propia de redes sísmicas no densas (como la de Argentina), lo que hasta el momento no ha sido realizado.

**CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL
PROBLEMA**

La sismicidad en Argentina es elevada, por ejemplo, en el año 2012 en INPRES se registraron y localizaron un total de 8081 sismos, aproximadamente 22 sismos por día. Como se indica en el Anexo I, la mayoría ellos ocurridos en el nor-oeste de Argentina y zonas de Chile cercanas a la frontera Argentina. En ese contexto, el problema que se presenta es el excesivo tiempo de demora en informar sobre cada uno de los sismos detectados por la red sísmica de Argentina, con un promedio de 8.4 horas para cada sismo del año 2012. Tales demoras, considerando la necesidad de informar inmediatamente sobre un sismo, en especial para aquellos que son percibidos por la población y por los que pueden llegar a ocasionar daños, constituyen un factor limitante en las capacidades del INPRES. Este problema se pone de manifiesto en el caso de organismos internacionales tales como el IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), que, con redes sísmicas globales y densas, informen con mucha antelación al INPRES sobre sismos que ocurren en Argentina, esto es cerca de quince minutos después de ocurrido el evento.

En este capítulo se describe y analiza el proceso completo de detección-localización empleado en INPRES, y paralelamente se profundiza en identificar las causas que ocasionan las demoras en los tiempos de localización de sismos. En ese marco se presentan los puntos de demora teóricos que debería introducir cada una de las etapas del proceso y se presentan las estadísticas relacionadas. Finalmente se describe y la forma de trabajar con guardias activas y pasivas de sismólogos y las estadísticas de los tiempos reales de demora observados.

1. PROCESO DE TRABAJO Y DEMORAS TEÓRICAS

El proceso de trabajo que se describe, en el que ha intervenido el autor de la presente tesis, [Havskov, J., Moreno, M., 2013] consta de un sistema de asociación/detección por disparos con el uso de la plataforma EarthWorm y análisis manual en Seisan, con las siguientes funciones para cada uno de ellos:

- EarthWorm: A pesar de que posee capacidades de localización automática, el sistema implementado en INPRES está configurado en las funcionalidades de adquisición de datos que envían las estaciones sísmicas remotas, en la detección de sismos que es la asociación de señales de las estaciones para una ventana de

tiempo cuando ocurre un sismo, y en el almacenamiento de las formas de onda continuas en tiempo casi real en una Base de Datos MySql.

- Utilización de Seisan para la localización manual por parte de un sismólogo (utilizando los eventos asociados por EarthWorm en la etapa de detección de eventos) y también para estudios avanzados sobre conjuntos de datos históricos.

El esquema lógico con EarthWorm y Seisan implementado en INPRES, es mostrado en la figura 3.1.

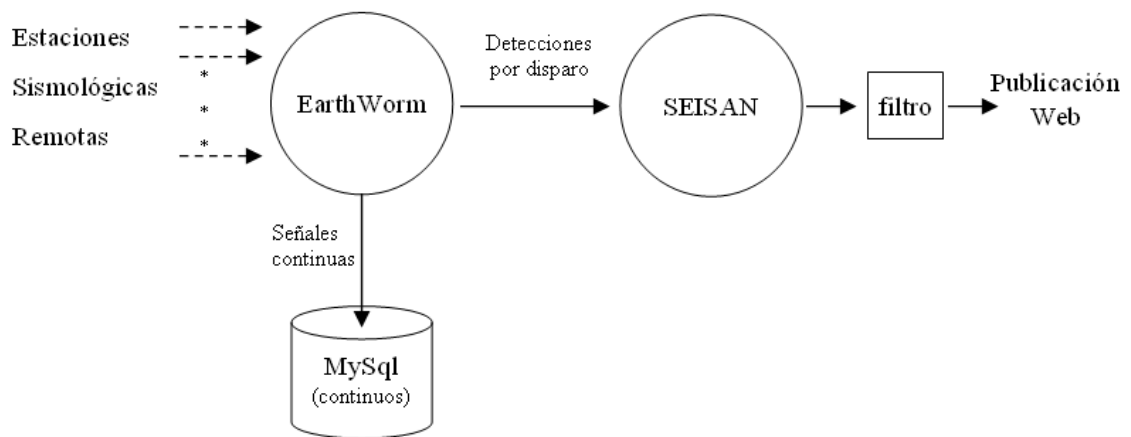


Figura 3.1: Esquema de procesamiento en INPRES.

Un detalle de mayor nivel se muestra en el grafico de la figura 3.2.

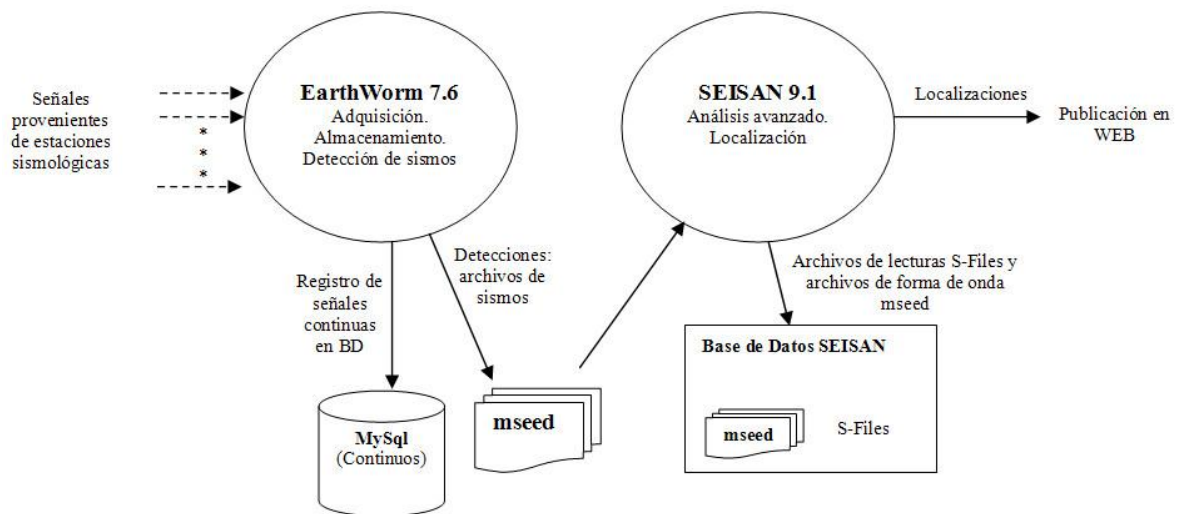


Figura 3.2: Detalle del esquema de procesamiento.

EarthWorm

En INPRES se ejecutan dos sistemas EW diferentes en distintos servidores, uno de ellos corriendo en Windows es utilizado para adquisición y unificación de señales desde las distintas estaciones sismológicas remotas, y el otro, corriendo en Linux, para procesamiento y para compartir datos con otras agencias.

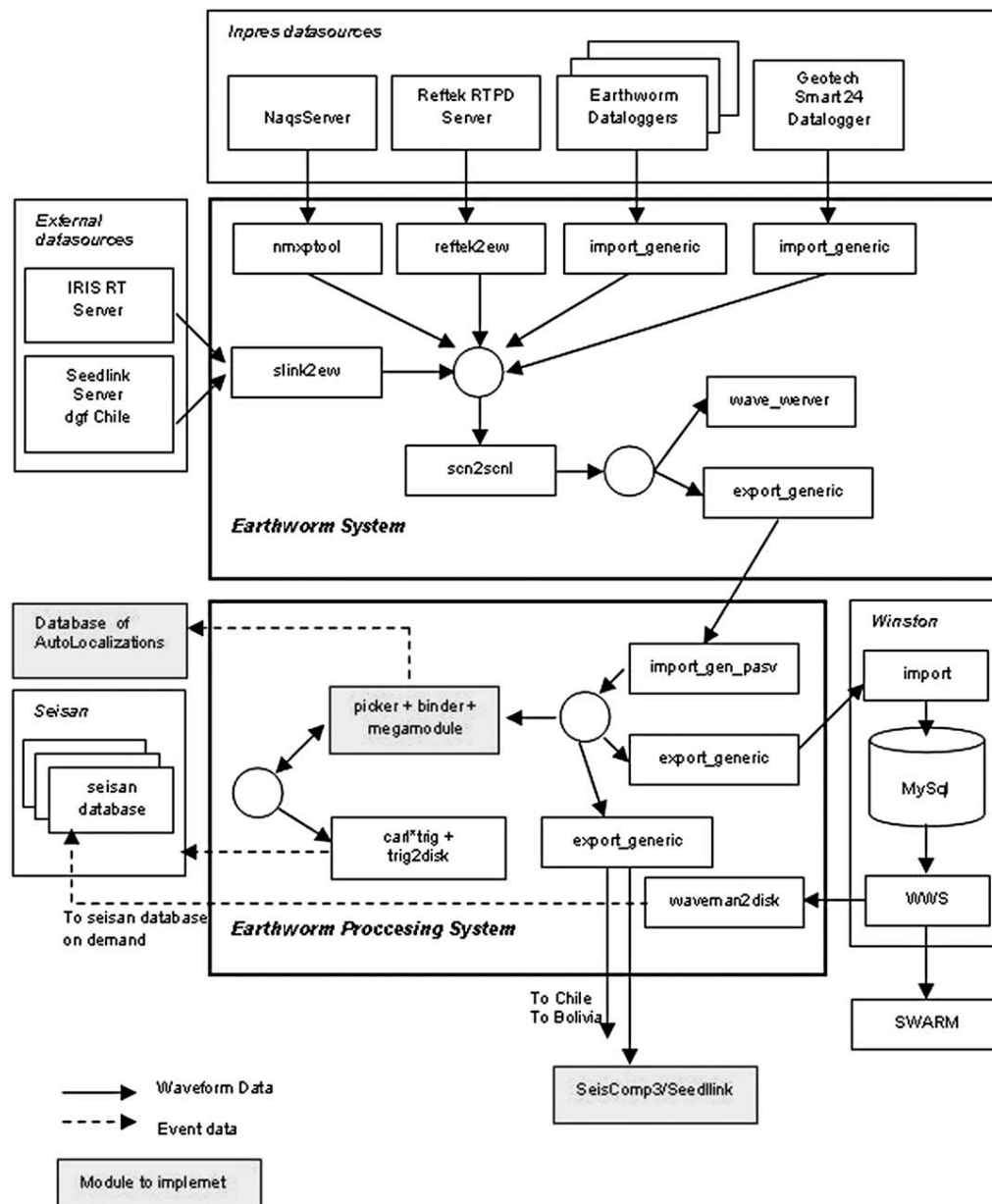


Figura 3.3: Sistema de adquisición, procesamiento y almacenamiento.

(Tomado de Havskov, J. Moreno, M., 2013)

En la figura 3.3 se muestran los esquemas de los sistemas de adquisición y procesamiento con sus respectivos módulos. En la figura se observan módulos en color blanco y con gris los módulos a implementar¹¹.

EW para adquisición

El sistema de adquisición recibe los datos desde diferentes orígenes y diferentes protocolos: Nanometrics NAQS, Reftek RTPD y EW Dataloggers para estaciones de la RNES, y también con el protocolo SeedLink para las estaciones internacionales. Posteriormente los datos son adquiridos por EW a través de los módulos *nmxptool*, *reftek2ew*, *import_generic* y por *slink2ew*, luego las señales son unificadas en su denominación¹² y almacenados en un ringbuffer (WaveServer) que mantiene 10 días las señales continuas de todas las estaciones y finalmente un módulo *export_generic* las envía al servidor de procesamiento.

EW de procesamiento

Ejecutándose en un servidor Linux, el sistema obtiene las señales del sistema de adquisición a través de un módulo *import_gen_pasv* y realiza la detección de eventos con los módulos *Carl*trig* y la generación de archivos asociados en formato Seisan o Mseed a través del módulo *trig2disk* y los transfiere a la base de datos Seisan. Este sistema de detección es muy sensible y capaz de detectar sismos que pueden ser registrados al menos con tres estaciones sísmicas. Al mismo tiempo, almacena todas las señales en forma continua en un ringbuffer de 200 días que está implementado en una base de datos MySQL denominada Winston, y exporta datos en tiempo real a centros sismológicos de Bolivia y Chile.

Transmisión y almacenamiento de señales sísmicas

Las formas de ondas o señales sísmicas digitalizadas provenientes de las estaciones sismológicas de la RNES llegan a INPRES por distintos medios: satelital, freewave, Internet o 3G. Todas estas señales son adquiridas por un servidor ejecutando un sistema

¹¹ La figura 3.3 es del año 2012, finalmente los módulos de localización automática de EarthWorm (indicados de color gris) no se implementaron, y en su lugar, se utiliza EarlyBird como localizador automático. En cambio, los módulos (Seiscomp3/Seedlink) sí se implementaron y se utilizan para compartir datos a organismos de Chile y Bolivia

¹² Se utiliza una convención para denominación de los datos de cada una de las estaciones sísmicas que incluye la sigla y otra información que depende de los sistemas de adquisición de datos empleados, la cantidad de muestras por segundo y tipo de sensor. La descripción de la forma de denominar las señales queda fuera del alcance de este trabajo, pero está bien documentado en el apéndice A del manual de Seed que se encuentra disponible en: www.fdsn.org/seed_manual/SEEDManual_V2.4_Appendix-A.pdf (accedido el 15 de enero de 2014)

EarthWorm versión 7.6 que captura las señales provenientes de las estaciones sísmicas remotas y, puesto que la mayoría de ellas poseen equipamiento de distintos proveedores, transmiten en formatos heterogéneos que deben ser unificados en un formato estándar. Además, algunas estaciones envían señales analógicas vía radio que se reciben en INPRES y posteriormente se digitalizan antes de ser ingresadas a EarthWorm, junto con las demás señales digitales.

Al tiempo que las señales arriban, EarthWorm las almacena continuamente en la Base de datos relacional MySQL, datos que estarán disponibles para cualquier consulta futura. Estos datos constituyen las señales crudas de todas las estaciones, sin ningún tipo de interpretación o lectura.

Demoras Teóricas

Aquí las demoras no son considerables y están dadas básicamente en la latencia de red, que es igual a la suma de retardos temporales producido por la demora en la propagación y transmisión de paquetes dentro de la red.

Este aspecto es inevitable, aún para cualquier solución a implementar, y por tal motivo no será considerado como un factor importante que introduzca demoras en el proceso completo. Una muestra de un periodo de 24 horas de control de latencia realizado del 29 al 30 de mayo de 2013, utilizando el módulo de EarthWorm *latency_mon*, (sin considerar las estaciones que estaban de baja o no enviaban señales), arrojó como resultado una latencia de 0,4 minutos en promedio para la red de estaciones.

En la figura 3.4 se muestra la salida (parcial) de *latency_mon*, la columna Stn, Chn y Net, representan cada una de las estaciones testeadas. La columna <1 representa la cantidad de veces en porcentaje, que los datos llegaron con una latencia de menos de un minuto, la columna 1-2 la cantidad de veces en porcentaje que la latencia estuvo entre 1 y 2 minutos y así para las columnas 2-3 y 3-5. Finalmente la columna off representa el porcentaje de veces que la latencia fue de más de 5 minutos, lo que son indicios de cortes (gaps) en la señal o que la estación esta fuera de funcionamiento si el valor es 100%.

```

STATION DATA TRANSMISSION STATUS

Time Period (UTC):
Start: Thu May 29 15:00:00 2013
End:   Fri May 30 15:00:00 2013

      Latency Summary
Stn  Chn  Net  <1  1-2  2-3  3-5  Off
-----
CPUP BHZ  GT  --   0.0  0.0  0.0  0.0 100.0
LPAZ BHZ  GT  --  28.4 69.5  0.4  0.4  1.3
LVC  BHZ  IU  --  87.7  6.6  0.4  0.7  4.6
YJA  SHZ  RI  --  97.9  0.6  0.0  0.0  1.5
YCA  BHZ  RI  --  96.1  0.0  3.0  0.0  0.9
AZAP SHZ  RI  --  95.0  4.9  0.0  0.0  0.1
ALOL SHZ  RI  --  96.2  0.0  0.0  0.0  3.8
ASTB SHZ  RI  --  98.4  0.0  0.0  0.0  1.6
PB04 BHZ  CX  --  98.0  0.3  0.3  0.6  0.7
PB05 BHZ  CX  --  98.1  0.4  0.4  0.7  0.4
PB06 BHZ  CX  --  98.0  0.3  0.4  0.5  0.8
PB09 BHZ  CX  --  98.0  0.3  0.3  0.6  0.7
PB15 BHZ  CX  --  96.0  1.0  0.9  1.7  0.3
SLA  BHZ  RI  --  95.2  4.0  0.8  0.0  0.0
FSA  SHZ  RI  --  95.1  2.0  2.0  0.9  0.0
AHML BHZ  RI  --  99.0  1.0  0.0  0.0  0.0
PB10 BHZ  CX  --  97.3  0.7  2.0  0.0  0.0
PB14 BHZ  CX  --  98.0  2.0  0.0  0.0  0.0
*
*
*
    
```

Figura 3.4: Resumen (parcial) de latencia para la red de estaciones.

Detección/Asociación de señales

A la vez que se reciben las señales en tiempo casi-real, y para hacer una detección de un sismo, EarthWorm, en sus módulos *Carl*trig*, aplica automáticamente para cada señal, un algoritmo conocido como ratio STA/LTA [EarthWorm Manual]. Este algoritmo mantiene un seguimiento constante del cambio presente en la amplitud del ruido sísmico (el ruido natural del suelo). Los cálculos se realizan repetidamente en tiempo casi-real, llevándose a cabo independientemente en todos los canales sísmicos de la red. Si el algoritmo detecta un cambio brusco de amplitudes promedios para una señal, entonces es probable que este ocurriendo un sismo (para una estación eso se llama disparo o trigger). Si lo anterior ocurre para un cierto conjunto de señales (depende de la configuración del sistema, pero por lo general es tres o mas) provenientes de distintas estaciones, entonces se está en presencia de la ocurrencia de un sismo y EarthWorm comienza a formar un archivo de forma de onda asociando todas las señales involucradas en la detección del sismo. El archivo tiene una ventana de tiempo que por lo general es de algunos minutos.

Finalmente el archivo generado contiene una ventana de tiempo con las señales sísmicas en formato Mseed. Una muestra de un archivo asociado de tres minutos de duración se muestra en la figura 3.5. A la izquierda de la imagen, se puede observar el nombre de cada una de las estaciones sísmicas, 11 en total para este caso.

El proceso de detección es realizado automáticamente.

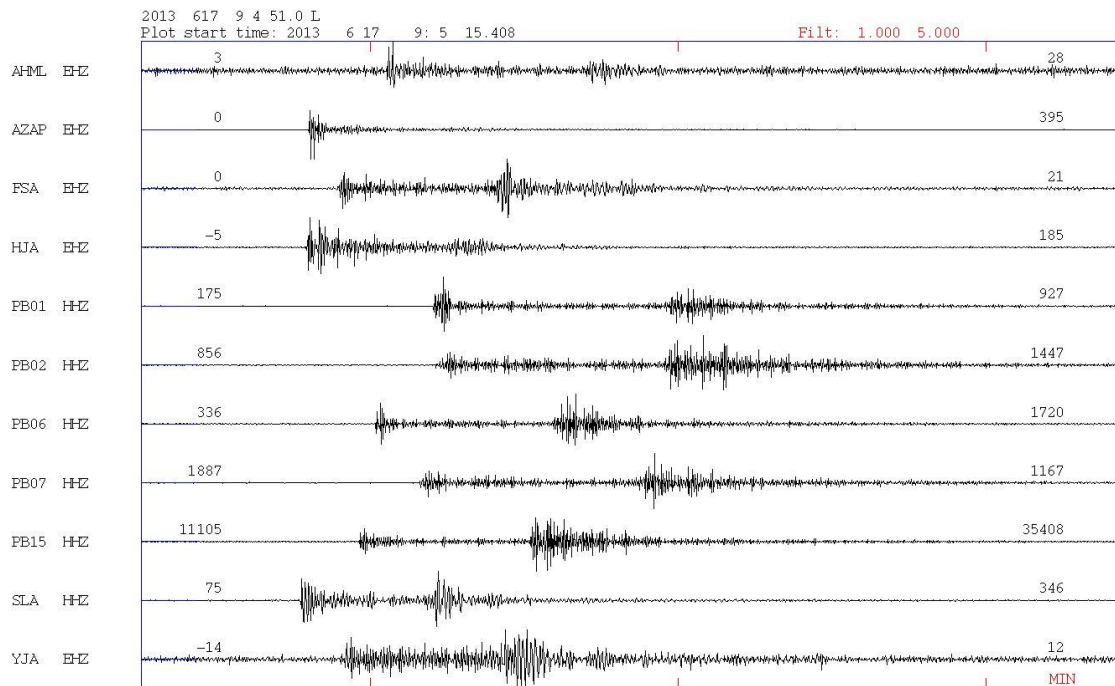


Figura 3.5: Forma de onda para señales de diferentes estaciones.

(Tres minutos de duración, vista con Seisan).

Es claro que detección no es lo mismo que localización de hipocentro. Lo primero es cuando EarthWorm detecta un sismo (cuando un cierto número de estaciones tienen disparos o triggers) pero sin conocer donde fue el hipocentro u otros datos de ningún tipo. En tanto que localización es saber exactamente donde ha ocurrido, el grado de la magnitud, profundidad, etc.

Demoras Teóricas

Las demoras que pueden ocurrir en la etapa de detección propiamente dicha son casi despreciables, ya que como se dijo ocurren en tiempo casi-real. Pero el sistema EarthWorm, cada vez que declara un evento, “espera” una cantidad de tiempo en segundos (que es configurable, pero en INPRES son 120) por la llegada de otras señales adicionales de estaciones para mejorar esa detección realizada.

Por otro lado, cada vez que se detecta un sismo, EarthWorm debe esperar a que todas las formas de onda del evento terminen de arribar para poder formar un archivo de formas de onda asociando todas las señales. Puesto que este proceso no tiene un tiempo fijo ya que la duración de un sismo depende de su tamaño¹³, para estimar el tiempo de espera demandado, se ha considerado las formas de onda para todos los sismos registrados entre Julio y Diciembre de 2012 y la duración promedio de los registros es de 4 minutos (tabla 3.1). Esto indica que, ante la ocurrencia de un sismo, se debe esperar aproximadamente ese tiempo hasta disponer el archivo de señales y para comenzar el trabajo manual de cálculo en ese sismo.

Mes	Cant. de Sismos	Tiempo total (en minutos)	Promedio (en minutos)
Julio 2012	587	2266.9	3.9
Agosto 2012	706	2843.6	4.0
Septiembre 2012	682	2898.6	4.2
Octubre 2012	782	3529.7	4.5
Noviembre 2012	756	3025.9	4.0
Diciembre 2012	771	3011.6	3.9
Total	4284	17576.3	4.08

Tabla 3.1: Duración promedio para las formas de onda asociadas a sismos. Segundo semestre de 2012. (Fuente: INPRES)

Considerando los tiempos insumidos en la etapa de detección/asociación, se puede afirmar que en el proceso se consumen en promedio aproximadamente 6 minutos.

Si bien la afirmación anterior es un valor medio y representativo para la base de datos del INPRES, es importante resaltar que mientras mayor sea la magnitud de un sismo, mayor será la duración de su forma de onda. Por ejemplo, un sismo ocurrido el día 14 de Noviembre de 2012 a las 19:01 horas GMT, de 5.8 grados de magnitud, con epicentro en la Republica de Chile, tiene asociada una forma de onda con duración de 10 minutos.

¹³ La explicación de cómo EarthWorm determina la duración de la ventana de tiempo es compleja y su descripción queda fuera del alcance de este trabajo.

El proceso de localización con Seisan.

Posteriormente a una detección, el archivo con las señales de las estaciones que han registrado el evento, es procesado en forma manual por un sismólogo utilizando Seisan.

Las actividades involucradas en este proceso son las siguientes:

- Identificar las ondas P y las ondas S en las señales de cada estación del archivo de forma de onda.
- Identificación de amplitudes para el cálculo de magnitud.
- Localización del hipocentro.
- Con las coordenadas de localización del hipocentro como resultado del proceso, también en forma manual, el sismólogo debe determinar la provincia o región del epicentro. La identificación de la zona geográfica para determinar la provincia Argentina (o país vecino) donde se encuentra el epicentro.
- Determinar las localidades cercanas, agregando orientación geográfica (azimut). Esta búsqueda se hace con la aplicación Google Maps. Cálculo de azimut en relación con tres localidades de referencia (Por ejemplo: Epicentro en la Provincia de San Juan, a 68 Km. al NO de San Juan Capital, 67 Km. al NE de Calingasta y a 76 Km. al NE de Barreal).

En la figura 3.6 se muestra un archivo de forma de ondas con las lecturas realizadas manualmente por un sismólogo y en la figura 3.7 se observa el archivo S-file de lecturas de fases correspondiente al mismo sismo, generado por seisan con los resultados de una determinación.

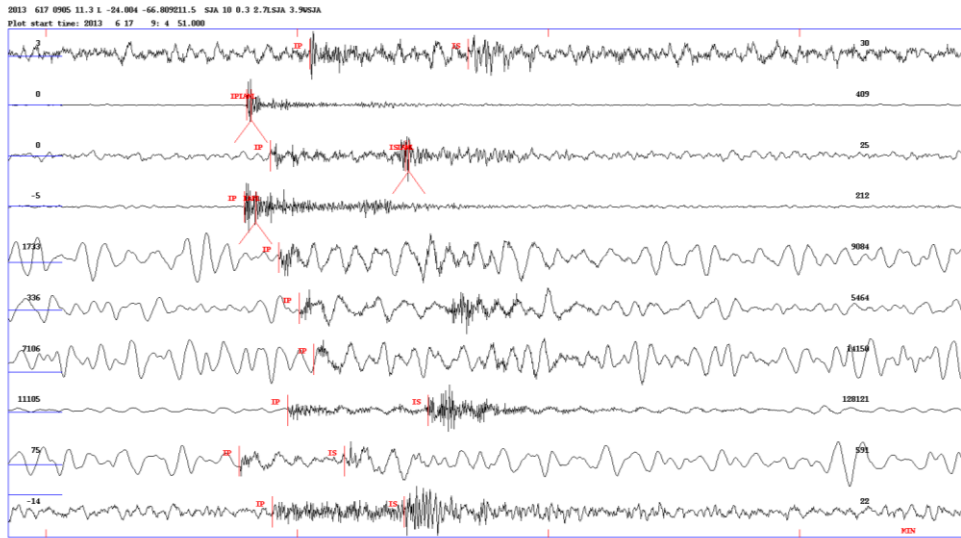


Figura 3.6: Señales con picadas P y S realizadas por un sismólogo.
(Vista parcial)

```

2013 617 0905 11.3 L -24.004 -66.809211.5 SJA 10 0.3 2.7LSJA 3.9WSJA      1
FELTPROV: JUJUY                                                           3
SPEC AVERAGE MO 14.9 ST 3.7 OM 2.8 f0 1.88 R1.1084 AL 3.12 WI 95.9 Mw 3.9 3
SPEC SD MO 0.5 ST 1.3 OM 0.2 f00.406 R0.5847 AL WI Mw 0.3 3
GAP=127 0.70 2.3 2.9 7.1 0.2384E+01 0.8853E+01 0.2029E+00E
SPEC HJA EH Z MO 14.7 ST 5.2 OM 2.9 f0 1.98 R0.7512 AL 3.38 WI104.9 Mw 3.7 3
SPEC HJA EH Z T 9 558 K 0.040 GD 270 VS 4.02 DE 3.40 Q0400.0 QA 0.70 VS 4.02 3
SPEC FSA EH Z MO 14.4 ST 4.0 OM 2.5 f0 2.32 R0.6411 AL 2.30 WI 76.0 Mw 3.5 3
SPEC FSA EH Z T 9 612 K 0.040 GD 325 VS 4.02 DE 3.40 Q0400.0 QA 0.70 VS 4.02 3
SPEC AZAPEH Z MO 15.5 ST 2.1 OM 3.0 f0 1.34 R1.9328 AL 3.67 WI106.9 Mw 4.3 3
SPEC AZAPEH Z T 9 552 K 0.040 GD 277 VP 7.00 DE 3.40 Q0400.0 QA 0.70 VS 4.02 3
ACTION:UP 13-06-17 06:28 OP:mjrr STATUS: ID:20130617090451 I
OLDACT:REE 13-06-17 06:26 OP:mjrr STATUS: ID:20130617090451 3
OLDACT:ARG 13-06-17 06:12 OP:auto STATUS: ID:20130617090451 3
2013-06-17-0904-51S.NOA_044 6
STAT SP IPHASW D HRMM SECON CODA AMPLIT PERI AZIMU VELO AIN AR TRES W DIS CAZ7
SLA HZ IP 9 5 46.14 140 0.3710 154 121
SLA HZ IS 9 6 11.23 140 -0.0710 154 121
HJA EZ IP 9 5 47.34 137 -0.0910 168 59
HJA EZ IAML 9 5 50.02 38.2 0.38 168 59
AZAP EZ IP 9 5 47.94 135 0.0510 179 98
AZAP EZ IAML 9 5 48.95 93.8 0.44 179 98
YJA EZ IP 9 5 54.01 126 -0.0010 242 34
YJA EZ IS 9 6 25.55 126 -0.0910 242 34
FSA EZ IP 9 5 53.61 125 -0.2810 248 160
FSA EZ IS 9 6 25.92 125 0.5010 248 160
FSA EZ IAML 9 6 26.63 9.1 0.52 248 160
LVC BZ IP 9 5 55.60 123 0.1010 265 305
PB15 HZ IP 9 5 57.70 120 0.3310 286 287
PB15 HZ IS 9 6 31.20 120 -0.2910 286 287
PB06 HZ IP 9 6 0.38 117 -0.1210 317 296
PB09 HZ IP 9 6 3.97 114 0.0710 349 314
AHML EZ IP 9 6 2.97 114 -0.0010 342 155
AHML EZ IS 9 6 40.73 114 -0.5010 342 155
    
```

Figura 3.7: Archivo de lecturas asociado.
(Vista parcial)

Demoras Teóricas

El proceso de trabajo manual del sismólogo contando a partir del momento en que se generó un archivo asociado con Seisan, requiere entre 5 y 13 minutos de análisis (tabla

3.2). Para la determinación de esas demoras, el estudio se basó en observaciones del trabajo de cada uno de los 9 sismólogos para cada una de las actividades descriptas que intervienen en el proceso de rutina para la localización manual con Seisan.

Además de lo anterior, si el sismo es sentido, el sismólogo de guardia debe atender a los medios de prensa, organismos de defensa civil y consultar información de la intensidad en distintos lugares donde el sismo ha sido percibido para lo cual se requiere tiempo adicional para recabar esta información, la que es obtenida a través de llamadas telefónicas a lugares cercanos al epicentro solicitando la información respectiva. Estas demoras no serán consideradas, ya que también deben realizarse en un sistema con localización automático.

En la tabla 3.2 se muestran las demoras promedio observadas para cada sismólogo en el proceso de localización manual, considerando si el sismo es sentido o no sentido.

Sismólogo	Demora promedio en minutos	
	Para sismos no sentidos	Para sismos sentidos
Raúl Goubat	5	10
Marcelo Peña	4	10
Mario Romero	5	10
Agostina Bernerdini	7	15
Brahim Aguil	7	15
Carlos Rufino	5	10
Gerardo Sánchez	7	20
Miguel Riveros	4	15
Luciana López	7	15
Promedio	5.6	13.3

Tabla 3.2: Demora promedio para actividades en el proceso de localización manual.
(Sismos ocurridos durante Diciembre de 2012)

En resumen, considerando la suma lineal de los tiempos de demoras que insume cada uno de los procesos involucrados, desde la detección del sismo hasta que los resultados están disponibles, el proceso completo debería arrojar una demora de entre 12 y 20 minutos (tabla 3.3) desde que se detecta el sismo hasta que los resultados están disponibles y publicados.

Actividad/Proceso	Demora promedio en minutos	
	Para sismos no sentidos	Para sismos sentidos
Transmisión de Señales	n/c	n/c
Detección/Asociación	6	6
Localización Manual	5.6	13.3
Demoras Teóricas (Aprox.)	12	20

Tabla 3.3: Demora teóricas en el proceso completo.

El proceso de publicación

Todos los sismos que están en la base de datos de Seisan, si cumplen ciertas condiciones implementadas como un filtro, están sujetos a ser publicados en la página oficial en forma automática. Las condiciones de publicación son:

- Sismos que tienen epicentro en la República Argentina. Si un sismo ocurre fuera de los límites nacionales, pero es percibido en la Argentina, también es publicado.
- Sismos de magnitud local mayor a 2.5.

Todas las acciones que los sismólogos realizan sobre los sismos de la base de datos de Seisan (registrar, modificar o eliminar), si pasan el filtro, son inmediatamente reflejadas en la página. En la figura 3.8 se muestra el diagrama de flujo para la publicación de hipocentros de sismos en la página Web.

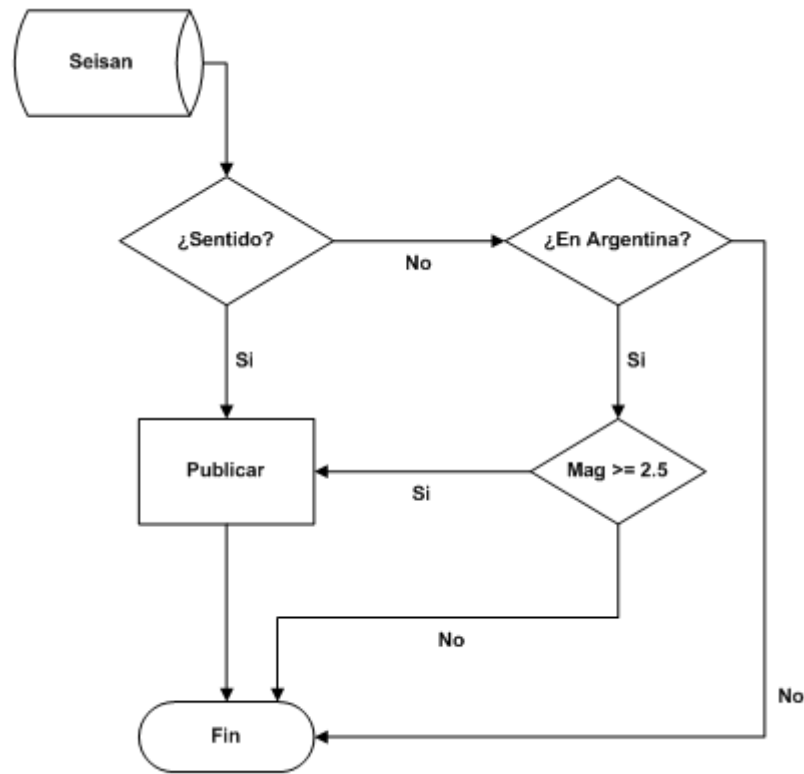


Figura 3.8: Diagrama de flujo para la publicación en la página Web.

2. TIEMPOS DE DEMORAS OBSERVADOS

Con un enfoque diferente al presentado en el punto 1, se hace un análisis de las demoras promedio observadas en el proceso completo detección-localización considerando desde hora exacta de la ocurrencia de un evento hasta hora exacta de publicación de la información respectiva, análisis realizado para todos los sismos registrados en el año 2012. La metodología para obtener los tiempos de demora efectiva entre la ocurrencia del sismo y la publicación en la página Web (con localización de hipocentro) se ha tomado de la diferencia entre el tiempo de la ocurrencia del sismo y el tiempo de su localización por un sismólogo (puesto que todo sismo que está en la base de datos de Seisan, si cumple las condiciones, es publicado inmediatamente en la página Web). Este análisis ha sido posible hacerlo ya que la hora de ocurrencia del sismo y la hora de localización por parte de un sismólogo, son atributos que forman parte del archivo de lecturas de un sismo (S-File).

Para poder describir el problema de las demoras observadas en el proceso completo de localización, es importante primero diferenciar claramente los sismos sentidos de los no sentidos y la prioridad de tratamiento que reciben.

Los *sismos sentidos*, son aquellos que la población o algún grupo de personas ha percibido y por lo tanto, factibles también de causar daños. Por el contrario, los *sismos no sentidos* son aquellos que por su baja magnitud o por ocurrir en zonas muy remotas no son percibidos por las personas. También puede ocurrir que el sismo sea de magnitud importante, pero con un hipocentro muy profundo (más de 200 Km.), situaciones en cuyo caso también pueden pasar desapercibidos para la población. Cabe aclarar que la intensidad del sismo no es determinante para que un sismo pueda ser sentido o no. Depende de distintos factores que quedan fuera del alcance de este trabajo.

El horario habitual de trabajo es de lunes a viernes de 06 a 21hs. En ese periodo de tiempo siempre hay sismólogos de guardia trabajando en la localización de sismos, esto constituye lo que se denomina *guardias activas*. Fuera de ese horario, los sismólogos no se encuentran en su lugar de trabajo, pero deben estar disponibles ante la eventual ocurrencia de un sismo que sea percibido por la población, constituyendo de esa manera *guardias pasivas*. En caso de ocurrir un sismo sentido, se activa la guardia de los sismólogos generada por alarma interna o, muchas veces, por llamadas telefónicas de las personas que han percibido el evento, avisando generalmente vía telefónica. A efectos de la urgencia en proveer la información, este tipo de eventos tienen prioridad de tratamiento. Si el sismo sentido ocurrió fuera del horario de trabajo habitual, el sismólogo debe dirigirse hasta el INPRES y hacer el cálculo del sismo

Por el contrario, los *sismos no sentidos* son calculados en forma rutinaria y, si ocurren fuera del horario de trabajo habitual, pueden pasar varias horas hasta que son localizados. En este caso, el sismólogo siempre prioriza, para el análisis, aquellos sismos con posible epicentro en Argentina, en detrimento de aquellos con posible epicentro en otros países.

Demoras ocasionadas por el tipo de guardias pasivas

Para los sismos que ocurren en horarios de guardias activas, el sismólogo calcula en forma inmediata la solución del evento y no se detectan mayores problemas de demoras, pero la organización del trabajo con la implementación de guardias pasivas para los horarios no laborables, justifica la mayoría de las demoras observadas.

En las guardias pasivas, sólo se realizan localizaciones de sismos sentidos, en ese caso, como se dijo, el sismólogo debe trasladarse al INPRES a realizar la localización correspondiente, perdiéndose tiempo valioso en la movilización hasta el centro de trabajo. Para el caso de sismos que no percibidos, estos eventos son calculados al inicio de la primera guardia activa.

Al no haber guardias activas en horarios no laborables, la estadística para el año 2012 muestra tiempos de demora muy diferentes a los tiempos teóricos de demoras expresados en el punto 1. Tomando el promedio de las diferencias entre la ocurrencia del sismo y hasta que la información del hipocentro es publicada en la Web, hay una demora de 8.4 horas para cada uno. Estas demoras observadas difieren de las demoras teóricas enunciadas antes, se deben principalmente a los sismos no sentidos que ocurren los fines de semana, feriados o en horario nocturno. Todos los sismos no percibidos por la población son calculados en horarios normales de trabajo, por ejemplo un sismo no sentido que ocurra un viernes a las 22PM (después de la última guardia activa del día viernes), recién es calculado el lunes siguiente a partir de las 06 de la mañana, o sea, a más de cincuenta horas de haber ocurrido.

La tabla 3.4 muestra las demoras obtenidas en promedio para todos los sismos del año 2012.

AÑO 2012	Cantidad total de sismos en la Base de Datos	Cantidad de sismos considerados ¹⁴	Promedio de demora entre determinación y publicación en la pagina WEB	
			En minutos	En Horas
Enero	744	562	746,09	12,4
Febrero	571	485	425,19	7,1
Marzo	586	512	591,84	9,9
Abril	714	569	354,08	5,9
Mayo	575	482	505,11	8,4
Junio	681	500	574,47	9,6
Julio	563	390	472,50	7,9
Agosto	670	479	548,14	9,1

¹⁴ Desafortunadamente, si por algún motivo, un sismo es procesado nuevamente después de haber sido publicado (alguna modificación de algún dato del S-File) la fecha de publicación pasa a ser la del reproceso, perdiéndose la fecha original de publicación. Debido a esto, para calcular la estadística no se han considerado los sismos reprocesados, quedando un total de 6339 sismos.

AÑO 2012	Cantidad total de sismos en la Base de	Cantidad de sismos considerados ¹⁴	Promedio de demora entre determinación y publicación en la pagina WEB	
Sep.	622	500	479,31	8,0
Oct.	828	731	304,30	5,1
Nov.	755	636	585,77	9,8
Dic.	772	493	485,37	8,1
Resumen	8081	6339	501.89	8,4

Tabla 3.4: Demora promedio en localización para el total de sismos registrados en 2012.
(Fuente: INPRES)

De los sismos sentidos en el año 2012, 97 han ocurrido en territorio argentino. En esos casos se activa la guardia no importando el día o la hora de ocurrencia y los sismólogos trabajan en la localización en la forma más rápida posible. El promedio de demora entre la ocurrencia y la publicación de la información para esos casos es de 61 minutos. La tabla 3.5 muestra los datos de demora promedio para todos los sismos sentidos de 2012.

2012	Sismos sentidos registrados en la Base de Datos	Cantidad de sismos considerados ¹⁵	Suma de la demora entre determinación y publicación en la pagina WEB (en horas)	Promedio (en minutos)
Enero A Dic.	105	97	6506.43	61.97

Tabla 3.5: Demora media en localización para el total de sismos sentidos en Argentina, año 2012.

(Fuente: INPRES)

3. APRECIACIONES GENERALES

Por lo presentado en los ítems 1 y 2 de este capítulo, es claro que las demoras observadas son mucho mayores a las demoras que teóricamente debieran ocurrir en el proceso. El factor fundamental de las diferencias se encuentra en la forma de trabajo organizado en guardias pasivas, sólo para sismos sentidos. En la figura 3.9 se presenta el mismo gráfico mostrado en 3.2, en este caso indicando los tiempos demandados por cada proceso.

¹⁵ Se consideran sólo los sismos sentidos y ocurridos en el territorio Argentino.

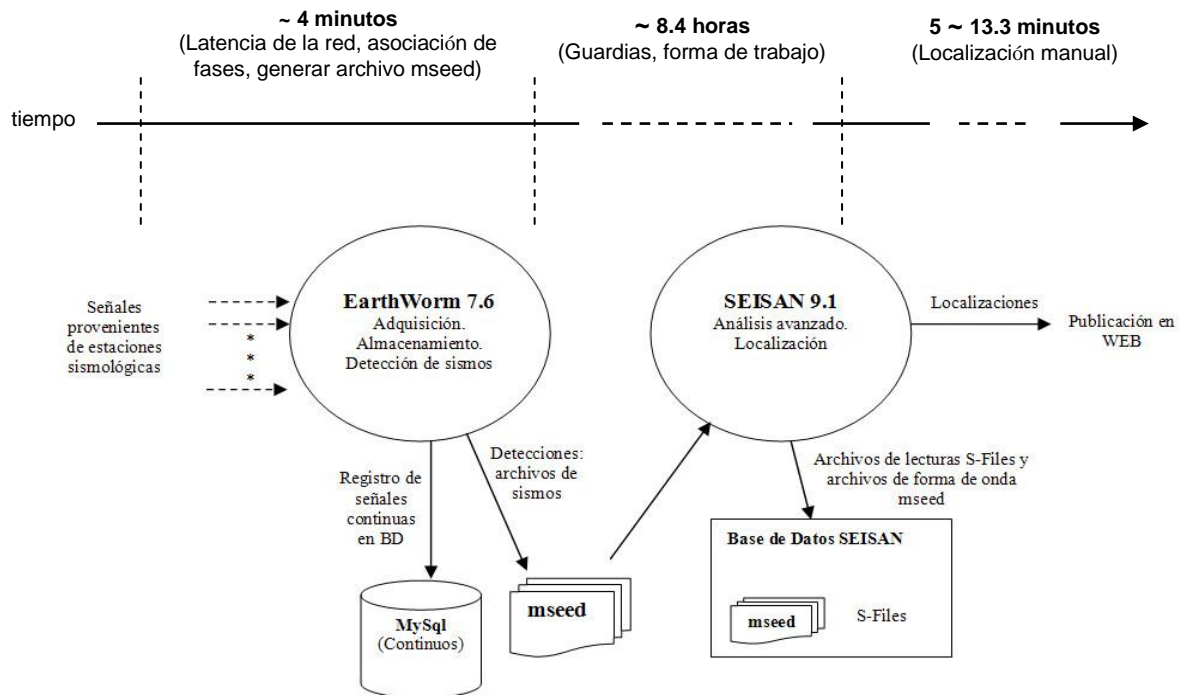


Figura 3.9: Esquema de procesamiento con demoras incurridas en cada etapa.

En caso de habilitar guardias las 24 hs. del día, se eliminaría el retardo de 8.4 horas y el proceso actual tendría demoras de pocos minutos, principalmente los que demande el proceso manual que realiza el sismólogo. Desafortunadamente, por disposiciones administrativas que son ajenas al INPRES, es imposible implementar esa solución, de allí la necesidad de soluciones alternativas como la que se presenta en este trabajo.

Fuera de horario de trabajo habitual, algunos sismólogos por iniciativa propia y en forma voluntaria, tienen la posibilidad de acceder vía SSH en forma remota y realizar localizaciones para evitar demoras excesivas, sin embargo esto es una iniciativa que no puede ser tomado como una solución definitiva.

CAPÍTULO IV: MODELO DE INTEGRACIÓN

1. PROPUESTA

Este capítulo presenta el diseño del modelo de integración entre EarlyBird y Seisan y la posterior implementación para abordar el problema de las demoras en los tiempos de localización, explicitado en el capítulo III.

Se propone como factor de integración a un Middleware entre EarlyBird y Seisan. La solución esta basada en servicios de comunicación y el modelo es lo suficientemente genérico como para que, con pocas modificaciones, sea aplicable a otros localizadores automáticos como fuente de datos hacia Seisan y pueda ser utilizado por terceros.

Inicialmente se analizan los requisitos que se han considerado como premisa y que el modelo pueda cumplir, posteriormente se presenta la implementación basada en el modelo de integración junto con la descripción de los servicios y se definen criterios de calidad que deberán cumplir los sismos calculados automáticamente para ser publicados oficialmente.

Finalmente se detalla la implementación, llevada a cabo en función del modelo propuesto y se muestran algunos ejemplos de funcionamiento.

Requisitos

Los requisitos listados fueron establecidos por el INPRES como políticas para la solución, la que deberá garantizar:

1. Ser lo más transparente posible en lo que refiere al proceso normal de rutina del sismólogo. Es decir que, desde el punto de vista del sismólogo, los cambios a introducir no deben afectar la forma de trabajar en la plataforma Seisan.
2. Que todos los sismos automáticos puedan ser revisados, modificados o eventualmente poder ser eliminados (por cualquier motivo) por los sismólogos, y que este hecho se vea reflejado en la página Web.
3. La trazabilidad de cada sismo localizado por EarlyBird, es decir que dentro del S-file de Seisan debe quedar registrado si ese sismo ha sido localizado inicialmente por EarlyBird.

4. Un mecanismo que permita evaluar, también en forma automática, la calidad de las soluciones de EarlyBird, y que esa calificación sea parte del S-file de Seisan.
5. La completitud del catálogo sísmico.
6. Proveer al sismólogo la mayor cantidad de información posible. Información sobre la provincia o región geográfica de ocurrencia, y la distancia epicentral a al menos tres ciudades o pueblos mas cercanos al epicentro. En cuanto a las formas de ondas, se debe garantizar que el archivo contenga todas las señales de las estaciones cercanas al sismo (en un radio del epicentro), aunque éstas no hayan sido consideradas por el localizador EB.
7. Que la implementación sea lo más simple posible, de manera que pueda ser aprovechada por la amplia comunidad de usuarios de Seisan y EarlyBird.
8. Minimizar la cantidad de componentes adicionales a instalar.
9. Garantizar la recuperación del sistema ante pérdida de conexión entre los distintos componentes.

Modelo arquitectónico propuesto

Puesto que como se dijo en el capítulo II, EarthWorm posee mayor capacidad de detección que EarlyBird, en una nueva propuesta se debe considerar conservar esa fuente de datos a los efectos de lograr la completitud del catálogo sísmico, por lo tanto Seisan deberá seguir recibiendo los eventos generados desde EarthWorm (con las detecciones por disparos sin localizaciones). Esto, mas la inyección de datos desde el localizador automático, indica que Seisan será alimentado desde dos fuentes y generará la posibilidad de sismos duplicados, que es el caso de los sismos detectados por EB y por EW. Esto último como costo a asumir a los efectos de asegurar la completitud del catálogo, siendo responsabilidad del sismólogo la detección y borrado de eventos duplicados si es que hubiere. Por lo tanto, para desarrollar la nueva solución, se aprovechan los componentes preexistentes del modelo actual descrito en el capítulo III, el cual consta de las estaciones sismológicas remotas enviando datos en tiempo real, EarthWorm como sistema de adquisición y también como sistema de asociación de

eventos por disparos en tiempo casi real (para garantizar la completitud del catálogo), el sistema manual de análisis Seisan y finalmente la publicación de sismos.

Tomando como punto de partida el modelo actual procesamiento, presentado en la figura 3.1 del capítulo III, la propuesta que se presenta introduce tres componentes adicionales:

- El localizador EarlyBird, que será alimentado desde EarthWorm por un módulo *export_generic* que le envía las señales continuas.
- Un Middleware entre EarlyBird y Seisan, que toma las localizaciones de EarlyBird y usa como interfaces el archivo *oldquakex.dat* y los archivos de lecturas *.dat*. Dejará las localizaciones en la base de datos Seisan, junto con la forma de onda asociada (*waveform*). Este middleware se implementa en forma de dos procesos distribuidos: *erb2seisan* y *db2seisan* ejecutándose en el servidor de EarlyBird y en el servidor de Seisan respectivamente. Estos procesos se comunican entre ellos a través de una base de datos *mysql*, la cual también es un nuevo componente agregado.
- Agregados al filtro original de publicación Web, que aplica sobre las localizaciones automáticas que provienen de EarlyBird.

El nuevo modelo se muestra en la figura 4.1, donde se pueden observar los componentes preexistentes con el agregado de los tres módulos enunciados, que se muestran en color gris.

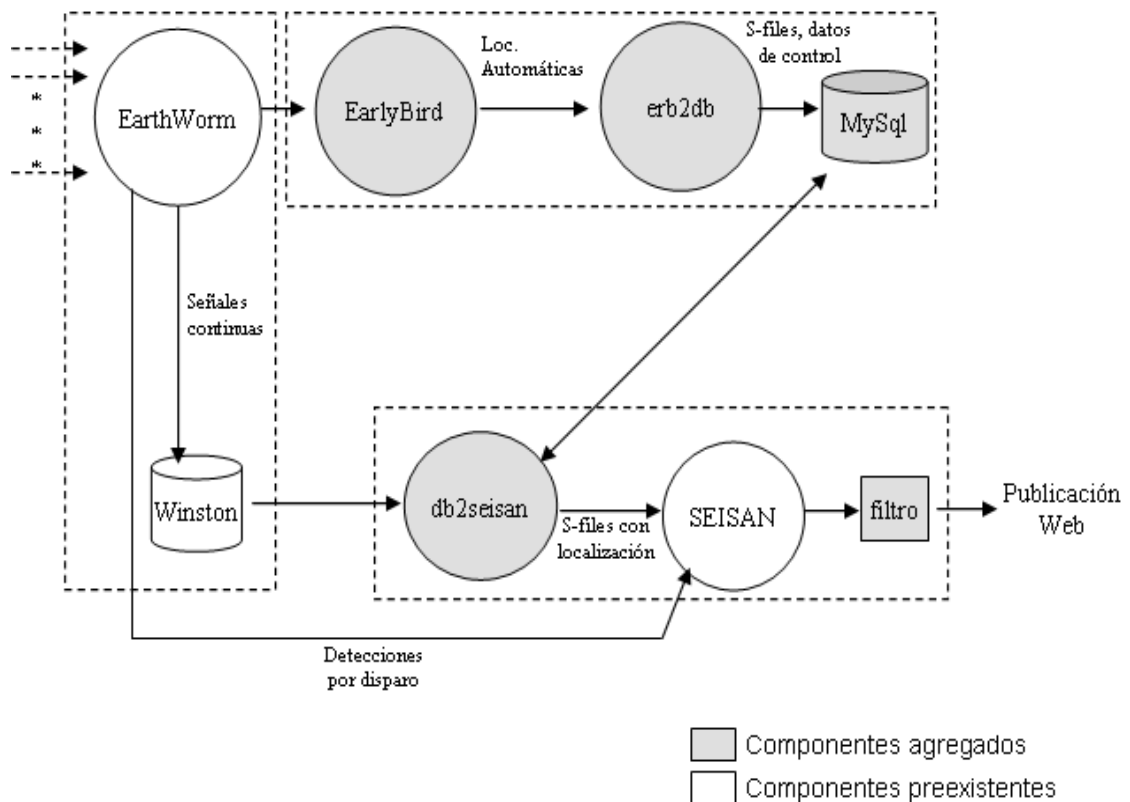


Figura 4.1: Visión general del modelo propuesto.

2. EL LOCALIZADOR EARLYBIRD

EarlyBird es la plataforma dedicada a la localización automática y recibe las señales sísmicas con un módulo *import_generic* desde su par *export_generic* en el sistema EarthWorm. Su función principal es la localización automática a partir de las señales recibidas.

Para desarrollar su tarea, EarlyBird requiere una configuración compleja [EarlyBird User Guide, 2012] cuyos términos quedan fuera del alcance de este trabajo y que en INPRES se realizó inicialmente con la colaboración de expertos en EarlyBird en los años 2011 (Ulises Vergara, Servicio Sismológico de la Universidad de Chile, en Diciembre de 2011) y 2012 (Dr. Víctor Huérfanos, Puerto Rico Seismic Network PRSN, en Mayo de 2012) Lo relevante para la descripción que se realiza en este capítulo, es que todas las localizaciones de EarlyBird quedan en el archivo *oldquakex.dat* y las lecturas de cada uno de los sismos de *oldquakex.dat* quedan en los

archivos .dat. Esos archivos son la fuente de datos y actúan como interfase con el middleware.

3. EL MIDDLEWARE

Es el núcleo principal de esta propuesta y, como se dijo, se compone de dos procesos distribuidos: *erb2seisan* y *db2seisan*, sin interfaz gráfica de usuario, que se ejecutan en los servidores EarlyBird y Seisan respectivamente. El motivo de elegir procesos distribuidos para implementar el middleware es que sus componentes deben ejecutarse en EarlyBird y en Seisan y estas plataformas se corren en servidores diferentes, con diferentes Sistemas Operativos. Por esto, y porque el middleware debe controlar los estados de desconexión que pudieren ocurrir entre esos servidores, es que los procesos del middleware son complementarios entre ellos de manera que deben funcionar juntos, pero son independientes ya que si alguno falla por algún motivo (o fallan ambos), el otro componente puede seguir trabajando y, al momento de sincronizarse nuevamente, pueden recuperarse automáticamente desde el último punto seguro de sincronización antes de la falla y proceder a la recuperación.

Para posibilitar ese proceso de sincronismo y recupero, la comunicación entre los dos procesos del middleware se hace por intermedio de MySQL, utilizando las tablas de bases de datos para almacenar datos intermedios (s-files, control de estados y logging).

Estados de los sismos localizados automáticamente

El desarrollo de la forma de trabajar del middleware se ha basado en función de de cuatro posibles estados relacionados al tiempo, que puede presentar un sismo calculado automáticamente, así para un sismo dado se define:

- El momento de la ocurrencia del sismo, que es cuando EarlyBird logra su primera localización para un sismo.
- El momento cuando se debe proceder por intermedio de un analizador sintáctico (parser), a generar el s-file a partir de la información que provea EarlyBird para ese sismo y que será registrado inmediatamente en la base de datos de Seisan. Para considerar este momento, se debe tener en cuenta que EarlyBird puede seguir relocalizando el sismo, conforme va recibiendo nuevas señales de estaciones remotas. Este momento supondrá un punto de corte para no considerar más las futuras relocalizaciones que pueda realizar EarlyBird para el

sismo en cuestión. Aquí también, si el sismo pasa ciertos filtros, es momento de publicar los resultados.

- El momento cuando se debe obtener la forma de onda desde los datos continuos y llevarla a la base de datos de formas de onda de Seisan para que quede asociado a su correspondiente s-file registrado en el momento anterior. Es claro que este tiempo debe ser superior al momento del paso antes mencionado (el momento de generar el s-file), ya que se debe esperar un tiempo adicional para que pueda llegar la señal completa del sismo.
- Un momento de control y de commit de que los estados anteriores han finalizado correctamente. Indica la finalización correcta del proceso automático para un sismo.

Queda claro que, ya fuera del proceso automático, un operador puede revisar eventualmente cualquier sismo en cualquier momento.

Temporizadores

En función de los estados mencionados antes, se establecen tres temporizadores que gobiernan el comportamiento del middleware y están directamente relacionados a los momentos mencionados en el apartado anterior. Se define a $t0$ como el tiempo de ocurrencia del sismo, a $t1$ como el tiempo que se espera a EB para que logre una mejor localización posible (recibiendo la máxima cantidad posible de señales) y que será el momento de registrar el s-file en la base de datos Seisan, $t1$ es un incremento en segundos respecto de la hora del sismo $t0$ y no debe ser tan grande como para que el proceso demore mucho tiempo, actualmente en 2 minutos a partir de $t0$ y es configurable. En tanto que $t2$ es un incremento en segundos respecto de la hora del sismo $t0$ y es el tiempo de espera necesario para que se pueda formar y recuperar la forma de onda, y que será el momento también de registrarla en la base de datos de formas de onda de Seisan. Actualmente $t2$ esta definido en 5 minutos a partir de $t0$ y es configurable. Resumiendo:

$$t1 = t0 + \Delta 1; t2 = t0 + \Delta 2;$$

Como se ha dicho en la definición de los momentos, a los efectos de la publicación, es claro que no es necesario esperar a $t2$ para publicar un sismo ya que cuando se vence $t1$

ya se tienen los resultados iniciales de la localización realizada por EB. Cuando se vence t_2 , el sismólogo tiene a su disposición la forma de onda completa para ese sismo. Mas adelante, en la descripción de los servicios `erb2sfile` y `seisan2db` se ampliará sobre el uso de estos temporizadores. En la figura 4.2 se muestra el diagrama de transición de estados para un sismo calculado automáticamente.

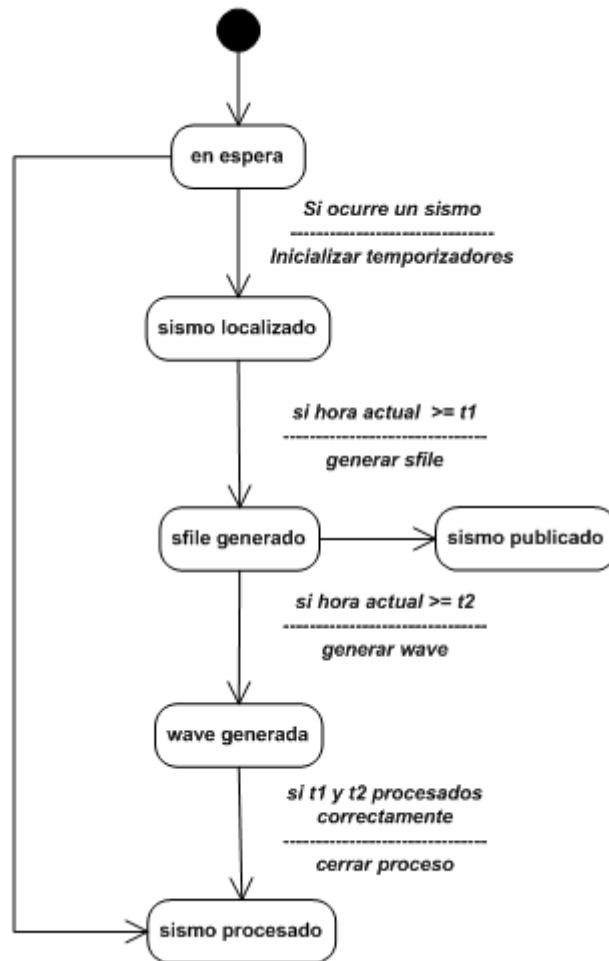


Figura 4.2: Diagrama de transición de estados. Sismo calculado automáticamente.

El servicio `erb2db`

Este proceso se ejecuta en el mismo servidor de EarlyBird (en INPRES en un sistema operativo Windows) y utiliza dos tablas de una base de datos MySQL (`sfiles` y `oldquakes`) para almacenar datos del sismo y para llevar un control de sus tareas. Se encarga de monitorear cualquier cambio en el archivo `oldquakex.dat` (ya sea por la ocurrencia de un nuevo sismo o porque EB en una etapa temprana de un evento ya localizado y conforme va recibiendo nuevas señales sísmicas, proceda a la relocalización con una nueva

solución), que cuando ocurre, lo refleja en la tabla *oldquakes* y controla el vencimiento de los temporizadores *t1* y *t2*. Cuando vence el temporizador *t1*, con la información almacenada en la tabla *oldquakes*, y los datos de picadas del archivo de lecturas *.dat* para ese sismo, genera el s-file y lo almacena en la tabla *sfiles*. En ese momento, también agrega datos de estaciones que por algún motivo no han sido picadas por EB, pero que pertenecen a estaciones cercanas al epicentro, para darle al sismólogo la posibilidad de generar algunas lecturas adicionales en la etapa de revisión manual. Vencido el temporizador *t2*, registra en la tabla *oldquakes* que ha finalizado su proceso para ese sismo.

La forma de crear un s-file, como se dijo, es a través de un parser que transforma la información de EarlyBird (en *oldquakex.dat* y los archivos de lecturas *.dat*) en la forma de s-files. Además, se implementan dos algoritmos bien conocidos para generar información adicional no provista por EarlyBird pero útil para el proceso completo de localización de sismos: la determinación de la provincia Argentina donde se encuentra el epicentro, y la distancia epicentral del sismo a distintas ciudades o pueblos. Para ello *erb2sfile* implementa:

- El algoritmo Punto en Polígono, conocido como teorema de la curva de Jordan, que determina si un punto se encuentra dentro o fuera de un polígono cerrado [Hales, Th., 2007]. Este algoritmo se utiliza para, dado un punto (el epicentro de un sismo) y un conjunto de polígonos (las provincias argentinas y regiones limítrofes) determinar en que provincia o región ha ocurrido el evento.
- El cálculo de la distancia por intermedio del Gran Círculo, que calcula la distancia más corta entre dos puntos en la superficie de una esfera (el epicentro del sismo, y una ciudad en este caso), medida a lo largo de la superficie de la esfera (la tierra) en oposición a una línea recta a través de la esfera interior.

La descripción del parser, del algoritmo Punto en Polígono y la Distancia por Gran Círculo, así como su adecuación a este trabajo se presentan en el Anexo 2.

Operador y Criterios de calidad

Para garantizar la trazabilidad, todos los s-files generados a partir de las soluciones automáticas de EarlyBird incluyen el dato de operador ERB, aunque ese sismo sea revisado posteriormente por un sismólogo. Además de ello, en el momento de generar el

s-file (tiempo $t1$) erb2db también procede a determinar la calidad de la localización automática, información que será incluida en el s-file como un carácter adicional al operador, que será “0” siempre que el sismo tenga un azimut alto (o, lo que es lo mismo, un gap bajo) y que actualmente esta configurado a un valor mayor o igual a 180 grados, es decir que este rodeado por las estaciones sísmicas que lo detectaron, como se observa en la figura 4.3 para un sismo de la zona de San Juan.

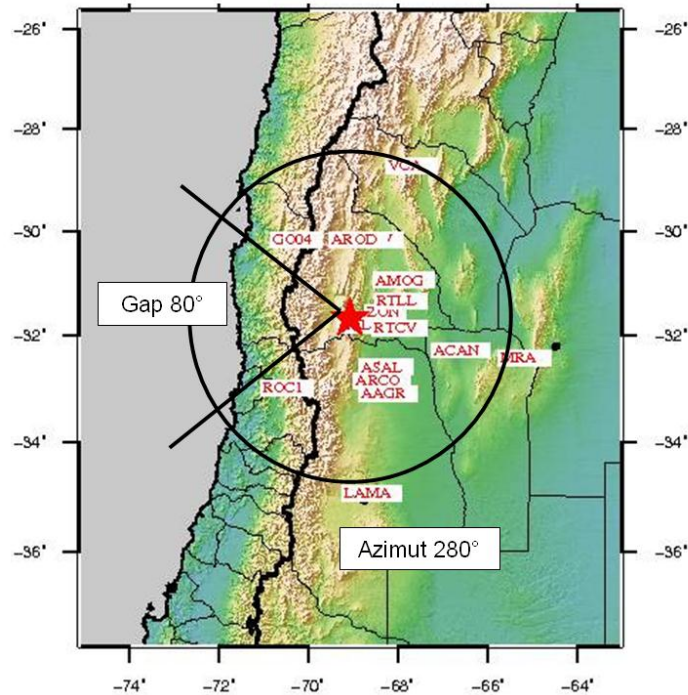


Figura 4.3: Ejemplo de un sismo con azimut de 280°.

Para otros casos la calidad se define como dudosa y no confiable. En la tabla 4.1 se muestran los rangos establecidos. Puesto que la calidad de un sismo no puede cambiar reduciendo los ángulos de azimut, estos valores no son configurables.

Operador	Calidad	Condición
ERB0	Confiable	Azimut ≥ 180
ERB1	Dudosa	$160 \leq \text{Azimut} < 180$
ERB0	No Confiable	Azimut < 160

Tabla 4.1: Rangos para determinar la calidad de las localizaciones automáticas.

En la figura 4.4 se muestra un s-file (vista parcial) que inicialmente fue calculado en forma automática por EB y con calidad confiable, por lo tanto OP: ERB0. Tiempo después, fue revisado por el operador mjjr.

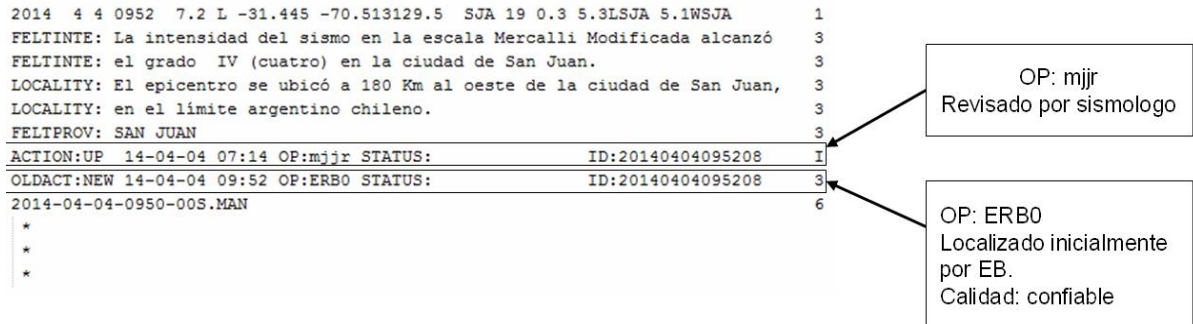


Figura 4.4: Vista parcial de un s-file inicialmente automático y luego revisado.

La información de Operador y Calidad será utilizada posteriormente en los filtros de publicación.

Control de funcionamiento

Para control de funcionamiento, erb2sfile se encarga de controlar los vencimientos de los temporizadores y de mantener dos estados de fin de proceso: *pt1* y *pt2*, que indican si se han procesado correctamente los temporizadores *t1* y *t2* respectivamente.

En el Anexo 2, se muestra un ejemplo completo de funcionamiento con datos reales.

Componentes en la base de datos Mysql

Todo la información generada por erb2sfile es almacenada en una base de Datos Mysql que, como se dijo, sirve de punto de comunicación y repositorio de datos entre los servicios del middleware erb2sfile y seisan2db (base de datos que no tiene relación a la utilizada para almacenar los datos continuos).

La base de datos contiene dos tablas simples del tipo Maestro-Detalle, *oldquakes* y *sfiles* respectivamente, relacionadas por el campo *id_old* y para cada fila (sismo) en *oldquakes* existen varias filas en *sfiles*, que representan el s-file respectivo. Su estructura se muestra en la figura 4.5.

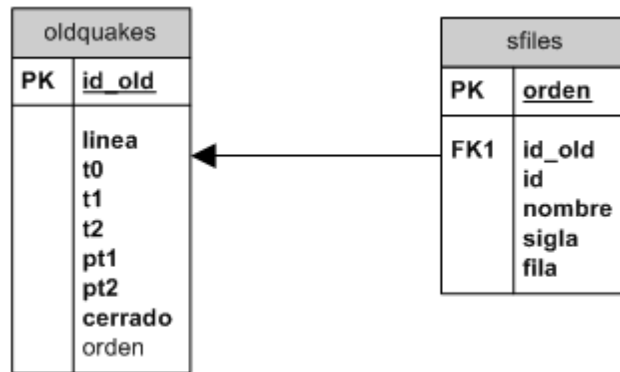


Figura 4.5: Diagrama DER. Tablas oldquakes y sfiles.

La descripción y función de cada uno de los campos de las tablas es la siguiente

Tabla oldquakes

Campo	Tipo de Datos	Descripción
id_old	int(11)	Id generado por EarlyBird PK
linea	varchar(200)	Línea completa del archivo oldquakex.dat
t0	datetime	Hora del sismo
t1	datetime	Temporizador para generar el s-file
t2	datetime	Temporizador para generar el waveform
pt1	tinyint	Control sobre como fue el proceso de registraci3n. Valores posibles (0,1,2) 0= Todavía no se vence t1 1= Se gener3 s-file en la tabla sfiles 2= Se registr3 s-file en seisan
pt2	tinyint	Control sobre como fue el proceso de extracci3n y registraci3n de la forma de onda. Valores posibles (0,1,2) 0= Todavía no se vence t2 1= Se venció t2 2= Se registr3 el waveform en seisan
Cerrado	tinyint	Control para cerrar el tratamiento sobre ese sismo. Valores posibles (0,1) 0= Sismo no cerrado (falta alg3n proceso) 1= Sismo cerrado (tratamiento finalizado)

Tabla sfiles

Campo	Tipo	Descripción
orden	int	Autogenerado, PK
id_old	varchar(6)	Id generado por EB
id	varchar(14)	id del s-file. compuesto por los datos de año mes día hora minuto y segundo
nombre	varchar(20)	Nombre físico que tendrá el s-file una vez registrado en la BD Seisan
sigla	varchar(5)	Campo de control. Indica si una línea es del Tipo 7 (de lecturas) en el futuro s-file. Incluye la sigla de la estación. Si no, lleva el string "NO"
fila	varchar(80)	La línea completa de 80 caracteres que irá al s-file.

Pseudocódigo

Para cumplir su función *erb2db* monitorea cada n segundos el archivo *oldquakex.dat* y mantiene un arreglo con los últimos x sismos del archivo. Para cada uno de los sismos del arreglo hace:

id=id del sismo

Si id no existe en la tabla oldquakes

$t0$ =hora del sismo, $t1=t0+\Delta 1$, $t2=t0+\Delta 2$, $pt1=0$, $pt2=0$, $cerrado =0$

inserta en tabla oldquakes valores (id, $t0$, $t1$, $t2$, registro, $pt1$, $pt2$, cerrado)

fin proceso para ese id

caso contrario

¿Es $pt2=0$? (el tratamiento del sismo no esta finalizado)

¿Se venció $t1$ y $pt1=0$ (se venció $t1$ y todavía esta sin generar s-file)

Actualiza registro en tabla oldquakes

Busca polígono y ciudades cercanas y estaciones cercanas no léidas

Generar s-file

Insertar s-file en tabla sfiles

$pt1=1$ (cerrar $pt1$)

fin proceso para ese id

caso contrario

¿Se venció t2 y pt1=1? (se venció t2 y se ha generado el s-file)
 pt1=1 (cerrar pt1)
 fin de proceso para ese id

Diagrama de flujo

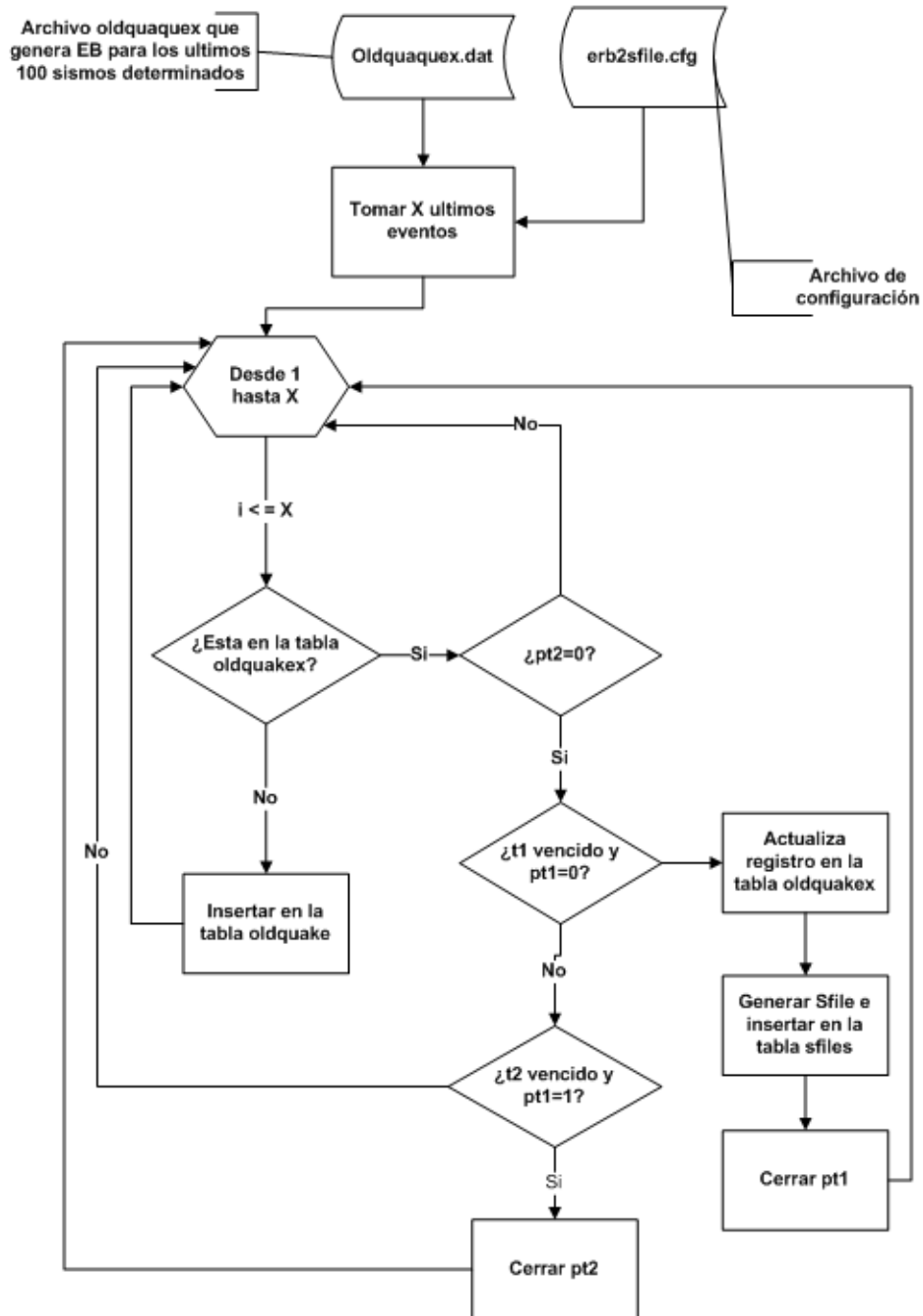


Figura 4.6: Diagrama de flujo para erb2db.

Archivo de configuración

Para la configuración de los parámetros de acceso a la base de datos y los incrementos para los temporizadores, ubicación de archivos de EarlyBird, archivos de log, entre otros, se utiliza un archivo de configuración `erb2seisan.cfg`, que es leído cada vez que el servicio es iniciado.

```
# Archivo de configuración 'erb2seisan.cfg'
{
  # Datos de La DB Mysql
  ip => '127.0.0.1',
  nombre_BD => 'sismosweb',
  user => 'root',
  pass => '',
  driv => 'mysql',
  oldquakex => 'C:/DoNotCopyToEB', # carpeta donde esta el archivo oldquakex
  dat_files => 'C:/DoNotCopyToEB/LocFiles', # carpeta donde estan los archivos de lecturas de EB.
  arch_estac => 'C:/erb2seisan/dat/estaciones_wave.txt', #archivo de estaciones sismologicas.
  distancia_minima => '400', # para estaciones cercanas en crear_sfile
  cantidad_iteraciones_old => '5', # cantidad de registros que toma del archivo oldquake en cada
                                iteración. Maximo 100
  log => 'C:/erb2seisan/log', #carpeta donde esta el archivo de log
}
```

Figura 4.7: Archivo de configuración para `erb2seisan`.

El servicio `db2seisan`

Este proceso se ejecuta en el mismo servidor de Seisan (en INPRES en sistema operativo Linux) y sus funciones son para cada sismo, generar el archivo `s-file` a partir de la información de la tabla `sfiles` y la forma de onda asociada, en ambos casos para registrarlos en la base de datos Seisan y finalizar el proceso automático para ese sismo

Para realizar esta función, el servicio lee constantemente todos los registros que cumplen la condición de `cerrado=0` en la tabla `oldquakes`. Con los registros (sismos) que la cumplan, mantiene un arreglo en memoria y para cada uno de ellos controla si se ha vencido el temporizador `t1` (registros que tengan la condición `pt1=1`), en cuyo caso obtiene la información del `s-file` de la tabla `sfiles`, lo genera en la base de datos de Seisan y pone `pt1=2`. Paralelamente, también controla si se ha vencido el temporizador `t2` (registros que tengan la condición `pt2=1`), en cuyo caso genera el archivo de forma de onda desde la base de datos continua del servidor EarthWorm, con todas las señales de las estaciones para ese sismo que están indicadas en la tabla `sfiles`, lo registra en la base de datos de formas de onda de seisan, pone `pt2=2` y `cerrado=1`, con lo que finaliza el proceso automático para ese sismo.

Pseudocódigo

Para cumplir su función, *db2seisan* monitorea cada *n* segundos la tabla *oldquakes* y mantiene un arreglo con todos los sismos que tengan el estado de *cerrado=0*. Para cada uno de los sismos del arreglo hace el siguiente proceso:

Para cada registro en arreglo_oldquakes con cerrado=0

lee id, pt1,pt2. = id del sismo,

¿Es pt1=1? (ya se venció el tiempo t1)

Generar el s-file y registrarlo en seisan

Marcar pt1=2 (indica que se registro con éxito el s-file en seisan)

caso contrario

¿Es pt2=1? (se venció el t2)

Generar el waveform y registrarlo en seisan

Marcar pt2=2 (indica que se registro con éxito el waveform en seisan)

fin de proceso para ese sismo

Diagrama de flujo

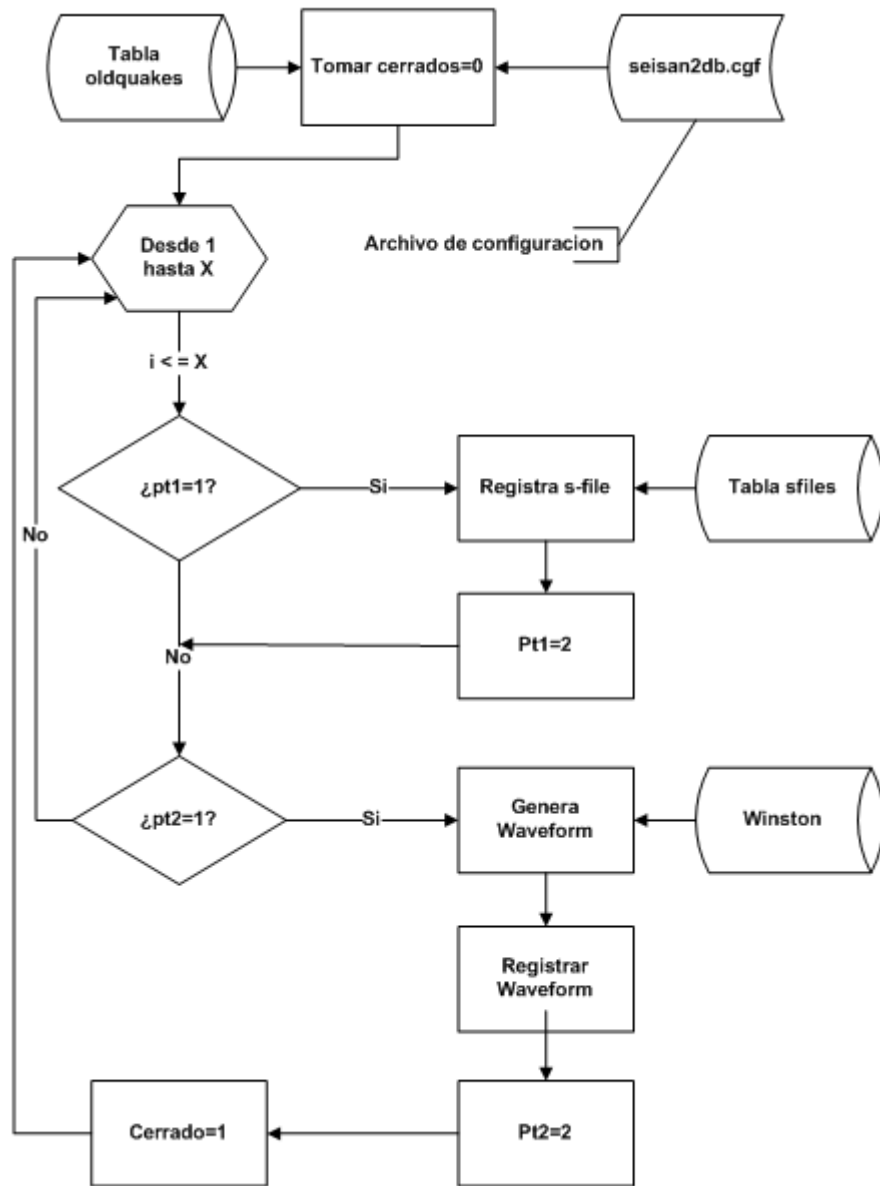


Figura 4.8: Diagrama de flujo para erb2db.

Obtención de la forma de onda

Como se ha visto, el servicio erb2seisan, cuando genera información en la tabla sfiles que incluye las estaciones cercanas al sismo, no sólo las estaciones picadas originalmente por EB. Con toda esa información, db2seisan utiliza un módulo de EarthWorm llamado *waveman2disk*, que permite recuperar ventanas de tiempo de las señales sísmicas desde la base de datos Winston, (en el servidor EarthWorm) que es

donde se alojan las señales continuas. Actualmente la ventana de tiempo para recuperar señales es de siete minutos, contando desde dos minutos antes de la hora del evento y cinco minutos después. Por lo tanto la duración de la forma de onda es:

desde $(t_0 - \text{preevento})$ hasta $(t_0 + \text{postevento})$,

con $\text{preevento} = 2$ minutos y $\text{postevento} = 5$ minutos.

Archivo de configuración

La configuración del servicio se realiza en el archivo `db2seisan.cfg`, que incluye los parámetros de acceso a la base de datos, los tiempos de pre y post evento, archivos de log, entre otros, se utiliza un archivo de configuración `erb2seisan.cfg`, que es leído cada vez que el servicio es iniciado

```
# Archivo de configuración 'db2seisan.cfg'
{
  ip => '10.0.0.53',
  nombre_BD => 'sismosweb',
  user => 'root',
  pass => '',
  driv => 'mysql',
  wor => '/home/seismo/WOR',
  REA_PRUEB => '/home/seismo/REA/PRUEB',
  REA_INPRE => '/home/seismo/REA/INPRE',
  WAV_INPRE => '/home/seismo/WAV/INPRE',
  pre => '2', # Preevento
  pos => '5', # postevento
}
```

Figura 4.9: Archivo de configuración para `db2seisan`.

4. SEISAN

Las consideraciones para Seisan son principalmente de forma de trabajo ya que el usuario puede, como se dijo, encontrar duplicidad de algunos eventos, en cuyo caso debe eliminar alguno de ellos y trabajar con el restante. En la figura 4.10 se muestra un caso de un sismo registrado desde `EarlyBird` y también desde `EarthWorm`. Como se ve en la imagen, el que proviene de `EarlyBird` está localizado, en tanto que el que proviene de `EarthWorm` está sin localización (por acción del filtro de publicación, este último sismo sólo sería publicado si fuera localizado manualmente). Para estos casos, es responsabilidad del sismólogo elegir alguno y eliminar el otro.

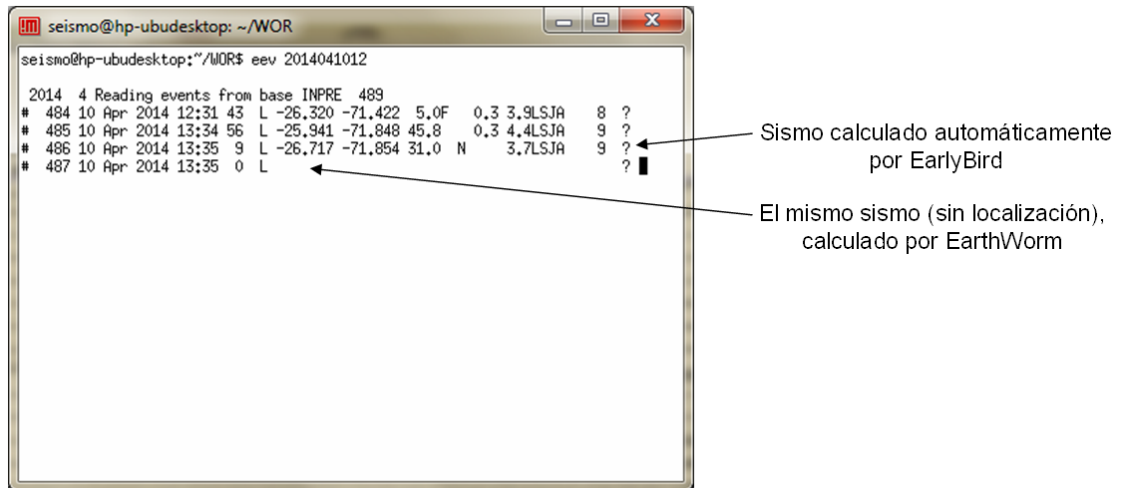


Figura 4.10: Duplicidad forzada de sismos

Notar que en la figura 4.10 para el sismo N°: 486, después de la fecha, hora, latitud, longitud y profundidad, aparece un carácter “N”, que indica que ese sismo ha sido localizado automáticamente, pero aun no ha sido revisado por un sismólogo.

También, puesto que se recuperan todas las formas de ondas de estaciones cercanas, aún si estas no han sido consideradas por EarlyBird, será tarea del sismólogo poder aprovechar este nuevo aporte y leer datos de esas estaciones en forma manual.

En la figura 4.11 se muestra un archivo de forma de onda con las estaciones leídas por EarlyBird y aquellas agregadas por el Middleware por ser cercanas al epicentro.

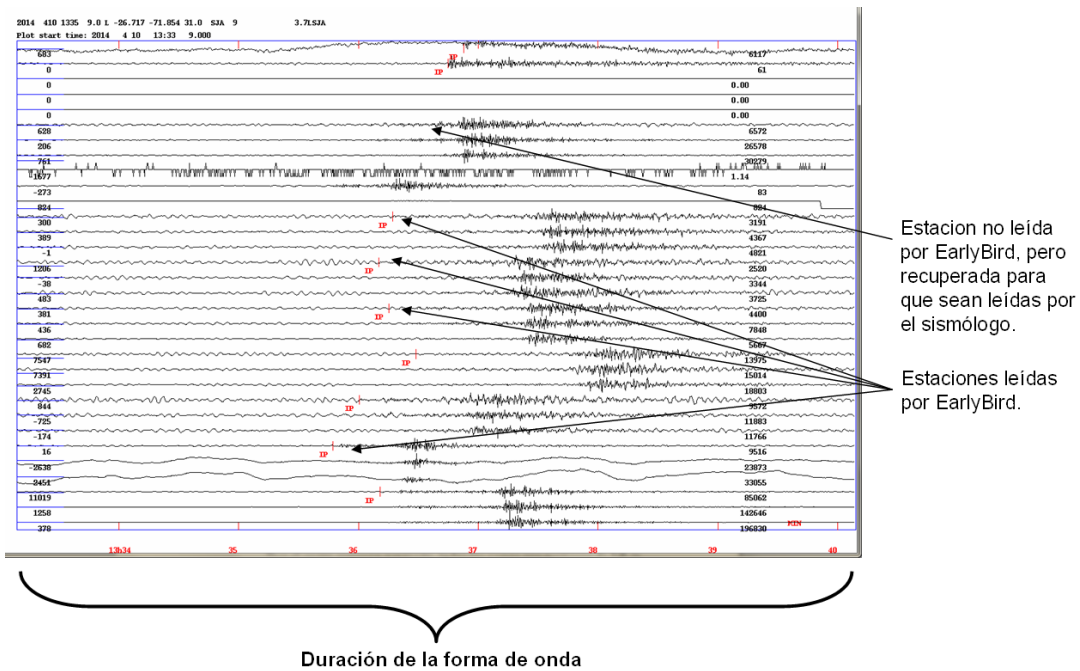


Figura 4.11: Forma de onda generada por db2seisan y lecturas por erb2db.

Ya fuera del procesamiento automático, un sismólogo, en cualquier momento posterior a una localización automática inicial, puede relocalizar con Seisan un sismo manualmente y que cualquier modificación realizada cambiará los datos del hipocentro y consecuentemente, las distancias a ciudades cercanas y probablemente, de región geográfica. Por ello, se incorporaron a Seisan esas capacidades, implementando también allí, los algoritmos Punto en Polígono y de Gran Circulo mencionados antes.

5. FILTROS DE PUBLICACIÓN Y PÁGINA WEB

Como se menciona en el Capítulo 3, todos los sismos que están en la base de datos de Seisan, si cumplen ciertas condiciones, están sujetos a ser publicados en la página oficial en forma automática. Para el nuevo escenario propuesto, todos los sismos que provienen de EB (y que ya se encuentran en la base de datos Seisan) tienen un control adicional, y sólo se publican aquellos que cumplen las condiciones enunciadas anteriormente, pero que además son del operador ERB0, es decir son confiables. Aún así, el hecho de que la información proviene de un localizador automático, debe ser informado, y en la página Web este tipo de sismos aparecen con un status que indica su procedencia y que esta "Sujeto a Revisión". Una vez que son revisados por un operador, cambian su status a sismo "Revisado".

Pseudocódigo

Para cada uno de los sismos que ingresa o se modifica en la base de datos de seisan se sigue el siguiente proceso:

lee operador,

¿Es operador \neq ERB1 y ERB2? (entonces operador es ERB0, o algún sismólogo)

¿Es sentido?

Publicar información del sismo

Caso contrario

¿Es con epicentro en la Republica Argentina?

¿Es de Magnitud > 2.5 ?

Publicar información del sismo

Fin de proceso para ese sismo

Diagrama de flujo

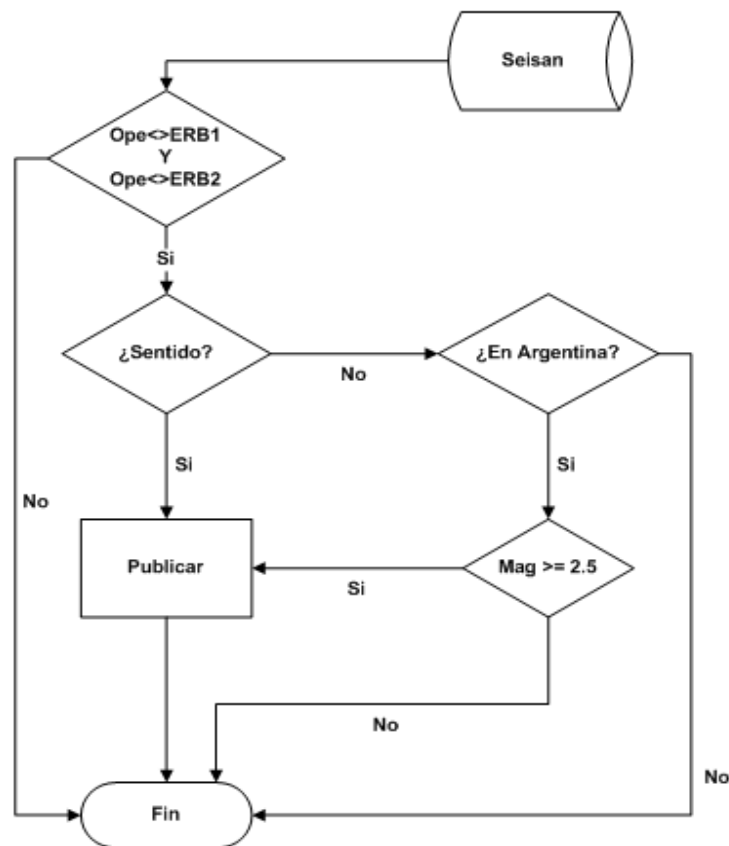


Figura 4.12: Diagrama de flujo para filtro de publicación.

6. IMPLEMENTACIÓN

Los aspectos fundamentales basados en el modelo propuesto, han sido implementados en la segunda mitad de 2013 y desde entonces se encuentra en funcionamiento. La adquisición, localización automática y análisis están distribuidos en tres servidores distintos, EarthWorm (Linux Ubuntu 12.04), EarlyBird (Windows) y Seisan (Ubuntu 12.04), los que en la figura 4.1 se muestran como cajas con líneas punteadas. Los tres servidores se encuentran en una red Lan.

El Middleware

Puesto que EarlyBird genera las localizaciones en un archivo de texto (oldquake.dat), y Seisan almacena la información de localizaciones en archivos de texto (los s-files), para el desarrollo de los procesos del middleware se utilizan scripts escritos en Perl, que es un lenguaje adecuado para manejar archivos de ese tipo.

Los procesos del middleware actuarán como servicios distribuidos en cada uno de los servidores en los que se alojan y cuando inician, leen las configuraciones iniciales indicadas en los respectivos archivos de configuración de cada uno de ellos. No poseen GIU (Interfaz Grafica de Usuario, por sus siglas en ingles) y se utilizará bases de datos MySQL para servir como punto de conexión entre ellos y también como logging del funcionamiento.

Seisan

Para la implementación de los algoritmos Punto en Polígono y Distancia por Gran Círculo en Seisan, se utilizó el lenguaje C y se implementó como rutinas embebidas en lenguaje fortran, que es el lenguaje de programación en que está escrito Seisan.

Página Web

La página Web esta diseñada en PHP en servidores Apache. Para esta propuesta, no ha habido cambios sustanciales en el diseño, salvo aquellos necesarios en el filtro de publicación para reflejar en forma diferenciada los sismos revisados de los que provienen del sistema automático, que todavía no han sido revisados por un sismólogo. Como se dijo, el esquema de publicación está basado en un ambiente de replicación de las bases de datos, donde la base de datos Master se encuentra en el mismo servidor del sistema Seisan, como se muestra en la figura 4.13. El hecho de mantener la base Master en el mismo servidor de Seisan es para garantizar conexión y el sincronismo entre ellos de manera asegurar que cualquier cambio en Seisan es reflejado inmediatamente en la

Base Master Mysql. Esa tarea es realizada por un proceso basado en scripts de Linux, que también implementa el filtro de publicación. Desde la Base master, se replica a los servidores Web alojados en un host local y otro remoto.

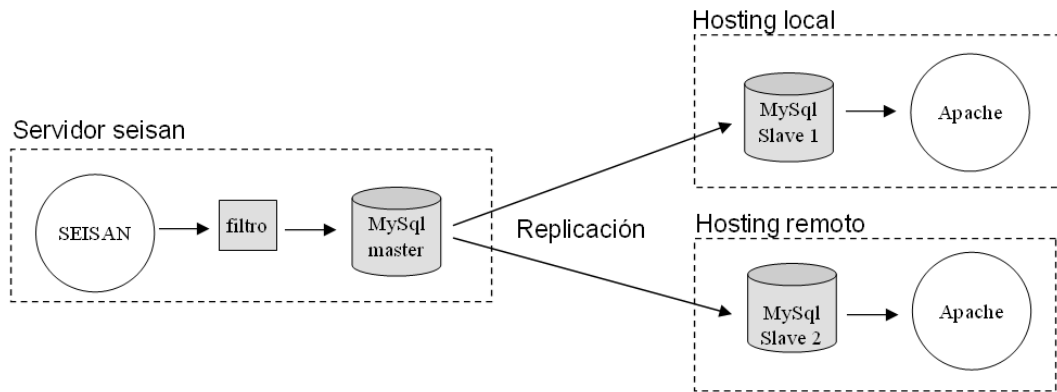


Figura 4.13: Esquema de publicación.

En la figura 4.14 se muestra una captura de pantalla de la página Web inicial con sismos publicados que han sido localizados automáticamente (sujetos a revisión) y con sismos que ya han sido revisados por un sismólogo¹⁶. Notar que en la figura, muestra la actividad sísmica del día domingo 23 de Marzo de 2014, con sismos sujetos a revisión, sismos revisados y un sismo sentido.

¹⁶ La página oficial de INPRES mantiene una gran cantidad de información relativa a sismos, graficación de epicentros, consultas, mapas históricos, entre otros, cuya descripción queda fuera del alcance de este trabajo

INPRES
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS - MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL, INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS

Últimos sismos en Argentina determinados por el INPRES

N°	Fecha	Hora	Profund.	Magn.	Latitud	Longitud	Zona
1	23/03/2014	11:19:01	107 Km.	2.8	-31° 28' 55.2"	-69° 14' 42"	SAN JUAN
2	23/03/2014	11:07:04	99 Km.	3.4	-32° 3' 3.6"	-69° 40' 4.8"	SAN JUAN
3	22/03/2014	17:47:29	107 Km.	3.0	-32° 2' 20.4"	-69° 41' 24"	SAN JUAN
4	22/03/2014	15:29:01	17 Km.	3.0	-34° 55' 19.2"	-68° 41' 16.8"	MENDOZA
5	22/03/2014	14:44:29	112 Km.	4.3	-31° 17' 46.6"	-68° 43' 33.6"	SAN JUAN
6	22/03/2014	13:55:51	110 Km.	3.8	-31° 50' 6"	-69° 6' 21.6"	SAN JUAN
7	22/03/2014	13:49:43	115 Km.	2.7	-31° 17' 24"	-68° 40' 19.2"	SAN JUAN
8	22/03/2014	07:27:53	55 Km.	3.0	-24° 7' 51.6"	-67° 9' 32.4"	SALTA
9	22/03/2014	07:19:06	128 Km.	2.8	-31° 13' 22.8"	-68° 27' 46.8"	SAN JUAN
10	22/03/2014	06:32:43	140 Km.	2.5	-32° 5' 42"	-69° 20' 20.4"	MENDOZA
11	22/03/2014	00:12:17	10 Km.	2.6	-32° 49' 30"	-69° 11' 2.4"	MENDOZA
12	21/03/2014	17:42:40	106 Km.	3.1	-31° 19' 1.2"	-68° 48' 32.4"	SAN JUAN
13	21/03/2014	16:54:59	214 Km.	2.6	-23° 5' 34.8"	-66° 38' 6"	JUJUY

Sismos en la República Argentina
 Búsqueda de sismos
 Terremotos Históricos
 ¿Sintió el sismo?
 RSS

INPRES - CIRSOC 103 (Reglamento)
Zonificación sísmica (Determinación)
 Los Nuevos Reglamentos "INPRES-CIRSOC 103 -2005-" Parte II: "Construcciones de hormigón armado" y sus comentarios y Parte IV: "Construcciones de acero" y sus comentarios, han sido aprobados por el Sr. Secretario de Obras Públicas, y entraron en vigencia a nivel nacional a partir del 1 de enero de 2013.
 La nueva Parte I del Reglamento "INPRES-CIRSOC 103" "Construcciones en general" y sus comentarios -2013-, han sido completados y elevados para su puesta en vigencia legal a nivel nacional por el Sr. Secretario de Obras Públicas.

Reconstrucción de San Juan (Ver lista)
 La presente lista tiene por objeto hacer un...

Legenda:
 Sismo en azul Sismo calculado automáticamente. A menos que esté revisado por un sismólogo el sismo puede contener errores en su determinación.
 Sismo en negro Sismo revisado por un sismólogo.
 Sismo en rojo Sismo sentido revisado por un sismólogo.

Figura 4.14: Página oficial con sismos calculados automáticamente.

CAPÍTULO V: VALIDACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de validar la propuesta presentada en el capítulo IV, se analiza una implementación que estuvo en ejecución en forma continua durante un período de casi seis meses con datos reales de la RNES y estaciones regionales. A tales efectos, se definieron tres etapas de análisis sobre los resultados obtenidos:

- Validación del modelo propuesto.
- Validación de los datos del localizador EarlyBird.
- Demoras observadas en las localizaciones.

En la primera etapa se evalúa el desempeño del modelo en sí, abstrayendo el aspecto sismológico y centrándose en los factores de rendimiento y recuperación ante fallas. La segunda y tercer etapa tienen relación directa a aspectos propios de la sismología, analizándose las tres variables que describen los resultados de las localizaciones: el hipocentro (epicentros y profundidades) y la magnitud local. Para las tres etapas, las estadísticas se acompañan en conjunto con el análisis respectivo.

Catálogos

El *catálogo INPRES* es la base de datos oficial del INPRES donde se encuentran todos los sismos ya revisados y, eventualmente, relocalizados por los sismólogos. Desde la implementación del modelo propuesto, la fuente de datos de este catálogo son los sismos que provienen del localizador automático EarlyBird y también del sistema por disparos EarthWorm.

Por otro lado, para propósitos de validación, se ha creado una base de datos en que se han registrado los sismos localizados exclusivamente por EarlyBird sin ninguna modificación posterior. Esta base de datos constituye el *catálogo EarlyBird*.

Ambos catálogos se encuentran en formato Seisan y para el mismo período de tiempo y constituyen la base para los estudios presentados en este capítulo.

Consideraciones

Las siguientes son consideraciones a tener en cuenta en relación con el tratamiento de los datos para las validaciones y conclusiones presentadas:

- Se considera que un sismo está localizado cuando su información de localización completa se encuentre efectivamente en un catálogo con formato

Seisan (ya sea el catálogo EarlyBird o Seisan) y no cuando EarlyBird finaliza el proceso de localización.

- EarlyBird posee un algoritmo de localización que considera un modelo global de velocidades de propagación de ondas sísmicas en la corteza terrestre (Iaspei91), en tanto que Seisan utiliza otro algoritmo y un modelo de corteza terrestre configurable¹⁷ (como por ejemplo para regiones de Argentina), con velocidades de propagación de ondas sísmicas también configurable, por lo que es normal y esperado que existan diferencias entre las comparaciones a realizar. Por ello, entre otros factores en comparación de catálogos sísmicos, diferencias de hasta 25 Km. entre localizaciones para un mismo evento, son consideradas aceptables [Bondár, I., and Storchak, D. 2011]. Teniendo en cuenta esos antecedentes y considerando la extensión geográfica de Argentina con una baja densidad de la red de estaciones, en INPRES, para publicaciones preliminares, se considera aceptable permitir errores de hasta 30 Km. para hipocentros (epicentros y profundidad). De la misma manera, tampoco es de esperar que las magnitudes sean las exactamente las mismas ya que EarlyBird y Seisan utilizan diferentes métodos de cálculo¹⁸, por lo que se aceptarán como válidas diferencias de hasta 0.5 grados de magnitud local (Mgter. Mario Araujo, jefe del Departamento de Investigaciones Sismológicas INPRES, comunicación personal, 2 de Agosto de 2013). Por lo tanto, a los efectos de las validaciones aquí presentadas, los sismos que localiza EB serán considerados con buena localización si tienen, respecto del mismo sismo pero revisado por un sismólogo, un margen de error de:
 - 30 Km. o menos de diferencia para sus epicentros.
 - 30 Km. o menos de diferencia para sus profundidades.
 - 0.5 grados o menos de diferencia en magnitud local (ML).
- Con el catálogo INPRES interactúan los sismólogos, y allí pueden realizar cualquier tipo de operación sobre los sismos, tal como modificarlos o eliminarlos, por ello la cantidad de sismos que están en el catálogo EarlyBird y que oportunamente pasaron al catálogo Seisan, no necesariamente permanecen

¹⁷ Para sismos locales Seisan utiliza un modelo de velocidades configurado al modelo de corteza de Argentina, pero para sismos lejanos, Seisan también usa Iaspei91.

¹⁸ Ver cómo EarlyBird y Seisan tratan el cálculo hipocentros y magnitudes en Capítulo II.

en este último al momento de tomar la muestra para este estudio. Un subconjunto de ellos pueden haber sido eliminados por los operadores, quienes eventualmente pueden haber preferido trabajar sobre el mismo sismo pero que provino del sistema por disparos EarthWorm.

- El sistema propuesto garantiza trazabilidad en tanto que el datos del operador ERB queda registrado en los s-files que genera el localizador automático, pero acciones posteriores que los sismólogos realizan en el catálogo Seisan (por ejemplo la acción UPDATE¹⁹) pueden sobrescribir información original de operadores y fecha de proceso, perdiéndose la trazabilidad del sismo. Por ese motivo, en los estudios realizados en este capítulo, para cada test se trabaja con subconjuntos de datos que provean la información que el test requiera, descartándose aquellos sismos que han perdido la trazabilidad necesaria para el estudio.

Método

En la primera etapa de validación se analiza el desempeño del modelo, principalmente ante caídas y posterior recuperación de los módulos que componen el middleware, aunque también se analiza su comportamiento ante caídas del servicio de base de datos MySQL y cortes en la red Lan. La evaluación realizada tiene la forma de pruebas modulares o pruebas de Caja Blanca, verificando para cada proceso del middleware cada uno de los bucles definidos, de sus límites y asegurando utilizar todas las estructuras de datos, lo que permitirá verificar el correcto funcionamiento del flujo de datos entre las componentes. Como los módulos del middleware son de diseño simple y con pocas funcionalidades, para el análisis, cada uno de ellos será considerado en su totalidad, sin subdividirlo en partes más pequeñas.

La segunda etapa de validación está orientada a establecer la calidad de los resultados que produce el localizador EarlyBird operando con datos reales provenientes de una red no densa como la que compone la RNES mas estaciones regionales. Para comprobarlo, se cotejan las localizaciones iniciales generadas en forma automática que se encuentran en el catálogo EarlyBird, contra las localizaciones existentes para los mismos sismos,

¹⁹ La acción de actualización en Seisan (UPDATE), sobrescribe la fecha y operador original, con el nombre del operador que realiza la acción y la nueva fecha de la acción UPDATE, perdiéndose la trazabilidad del operador y fecha de cálculo original.

pero ya revisadas por sismólogos en el catálogo INPRES. Las comparaciones entre los dos catálogos se realizan sobre las tres variables mencionadas: hipocentros (epicentros en Km. y profundidades en Km.) y para magnitudes (en grados de magnitud local, ML).

En la tercera etapa de validaciones, se utiliza únicamente el catálogo INPRES, con la finalidad de verificar el cumplimiento del objetivo principal planteado en esta tesis. Para ello se hacen estudios similares a los realizados en el capítulo III para demoras observadas entre el momento en que ocurre un sismo y el momento en que ese sismo es localizado. El test se aplica en primer lugar al catálogo completo, luego al subconjunto del catálogo que incluye los sismos que tienen epicentro en Argentina y finalmente se aplica para los sismos sentidos que contiene ese catálogo. Finalmente, se evalúa el grado de incidencia de los sismos con operador ERB0, incorporados al catálogo INPRES.

En la figura 5.1 se muestra el esquema de validaciones que se aplican en este capítulo.

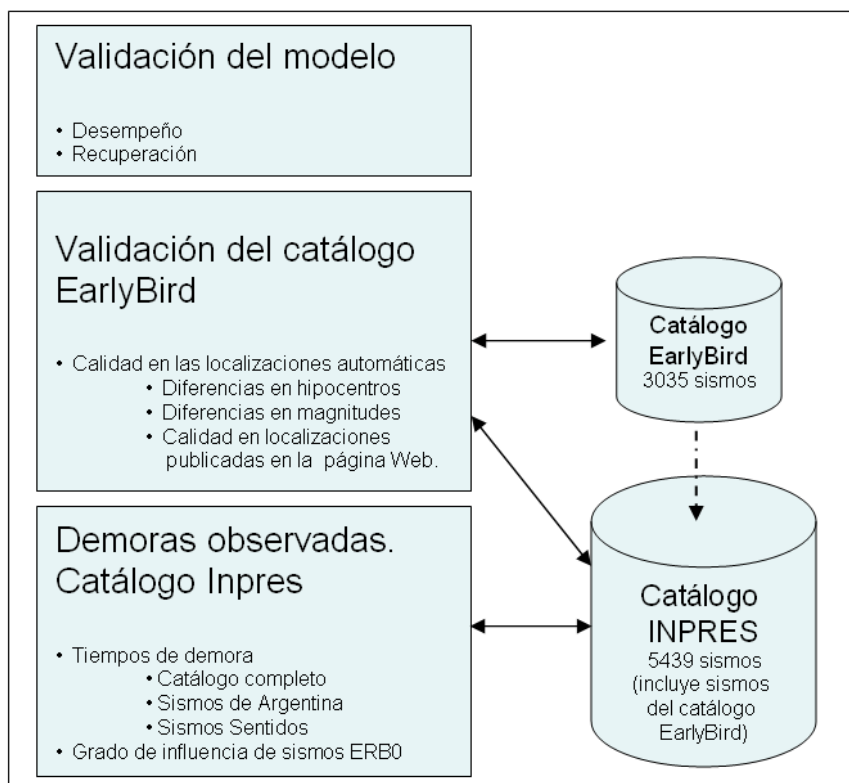


Figura 5.1: Esquema de validaciones.

Muestras

En Septiembre de 2013 se implementó la nueva propuesta, la que ha estado en funcionamiento en forma continua desde entonces. Los primeros cinco días de

funcionamiento (entre el 14 y 18 de ese mes) se utilizaron para someter al sistema a situaciones de stress (fallas y cortes entre sus componentes), con el objetivo de obtener datos estadísticos para la validación del modelo.

Posteriormente, entre el 19 de Septiembre de 2013 y hasta el 13 de Marzo de 2014, (en total 175 días) se tomaron muestras para validaciones del catálogo EarlyBird y de demoras observadas en el catálogo INPRES, en total 4160 sismos registrados, todos ellos almacenados en el catálogo EarlyBird. De ese conjunto, 3035 sismos se encuentran también en el catálogo oficial del INPRES y constituye el conjunto factible de comparar, por lo que serán la base para realizar el estudio de calidad de los resultados del localizador automático.

Para el mismo período, el catálogo INPRES esta compuesto por 5439 sismos, entre los que están los que provienen del localizador automático, más todos aquellos sismos no detectados por el sistema automático, pero sí por el sistema de disparos EarthWorm. Este catálogo será la base de los estudios de tiempos de demora.

La tabla 5.1 contiene un resumen de los datos contenidos en los dos catálogos que son objeto de estudio.

A) Operador ²⁰	B) Catálogo EarlyBird	C) Catálogo INPRES	D) Sismos comunes a los catálogos (por ID)	E) Sismos de EarlyBird sin trazabilidad de operador en catálogo INPRES	F) Sismos de EarlyBird sin trazabilidad de operador y fecha en catálogo INPRES
ERB0	2218	1436	1908	472	-
ERB1	361	203	277	74	-
ERB2	1581	906	1120	214	-
Sismólogos	-	2894	-	-	-
Totales	4160	5439	3305	760	797

Tabla 5.1: Datos en los catálogos EarlyBird e INPRES para 175 días de registro.

Descripción de los datos de los catálogos

La descripción de los datos objetos de estudio de la tabla 5.1 es la siguiente:

²⁰ Las definiciones de ERB0, ERB1 y ERB2 se detallan en la sección "Operador y criterios de calidad", en el Capítulo IV.

A) Operador: en esta columna se indica el operador que calcula un sismo. Si es ERB0, ERB1 o ERB2, indica que el sismo proviene del sistema automático, caso contrario indica que el sismo ha tenido su origen en el sistema de detección por disparos EarthWorm y ha sido calculado manualmente por un sismólogo.

B) El catálogo EarlyBird: contiene todos los sismos tal como fueron generados por el sistema automático, sin modificaciones. Se encuentra en formato Seisan. En total 4160 sismos para el período indicado.

C) El catálogo INPRES: contiene sismos con origen en el localizador automático (menos aquellos que hayan sido eliminados), los cuales pueden haber sido modificados por los sismólogos en las actividades de relocalización de rutina. También contiene sismos con fuente en el sistema de detección por disparos EarthWorm y que fueron calculados manualmente por los sismólogos. Al momento de este estudio, estaba compuesto por un total de 5439 sismos de los cuales 2894 provienen del localizador automático con trazabilidad de operador (ERB0, ERB1 o ERB2).

D) Sismos comunes en ambos catálogos: son todos los sismos que fueron calculados inicialmente por EarlyBird (inciso B en la tabla 5.1) y que, al momento de hacer la presente estadística, también existen (ya revisados) en el catálogo Seisan, y por lo tanto es posible vincularlos para comparación por su ID de s-file. Estos sismos constituyen la base de comparación para el test de calidad del catálogo EarlyBird. La diferencia de datos entre la columna B) y la columna D), en total 855 sismos, no existen en el catálogo INPRES por haber sido eliminados por los sismólogos.

E) Sismos de EarlyBird sin trazabilidad de operador: son aquellos sismos que se encuentran en el catálogo Seisan porque fueron inyectados desde EarlyBird, pero que por acciones de modificación en el recálculo del sismólogo, perdió la trazabilidad de operador original generado en el localizador automático (ERB0, ERB1, o ERB3). Para estos casos no es posible aplicar estudios estadísticos de demoras.

F) Sismos de EarlyBird sin trazabilidad de fecha: de la misma manera que en el caso anterior, pero para aquellos que perdieron la trazabilidad de fecha de cálculo original y también de operador. Para ellos tampoco es posible aplicar estudios estadísticos de demoras.

2. VALIDACIÓN DEL MODELO

En esta validación, se hace una abstracción del aspecto sismológico, enfocándose en evaluar el modelo propuesto desde el punto de vista informático, analizando su comportamiento en dos escenarios probables:

- Recuperación ante cortes.
- Desempeño.

Puesto que el middleware es totalmente independiente de fallas en el servicio EarlyBird, o en Seisan, esas situaciones no son evaluadas, mas allá de que en el primer caso (fallo de EarlyBird), el middleware no tendría sismos para procesar.

En la figura 5.2 se muestra una representación típica de pruebas de caja blanca, donde el cubo representa el middleware, con los dos componentes que forman parte del mismo, más la base de datos.

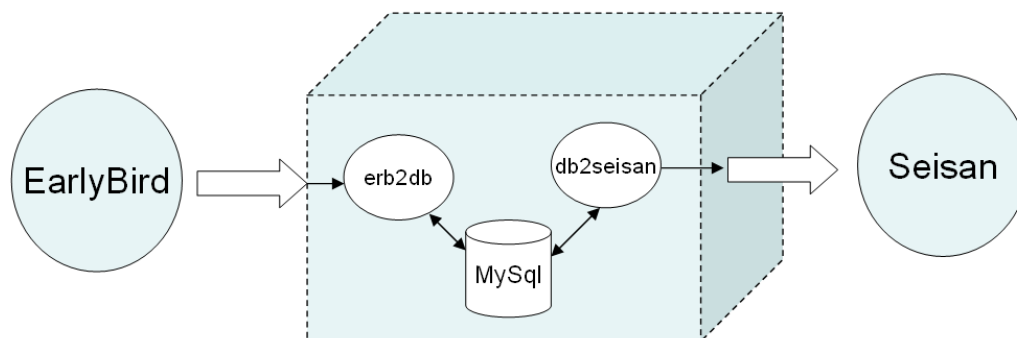


Figura 5.2: El middleware como Caja Blanca.

Los componentes del cubo son probados, forzando caídas en cada uno de ellos y, en ese contexto, controlando el funcionamiento de los demás componentes y el flujo de datos entre sus interfases (flechas) en la recuperación. Finalmente una integración no incremental es realizada, probando todo el sistema completo. Puesto que el middleware es un proceso distribuido en dos servidores ubicados en una red Lan, las fallas de conectividad de la red también se han incluido.

En la tabla 5.2 se muestra el resumen de las situaciones de fallas forzadas, la cantidad de sismos ocurridos durante el corte y los tiempos demandados para recuperar toda la

información de los sismos ocurridos durante ese periodo. Para control de desempeño, se han simulados situaciones de cortes de hasta dos días, de manera de incluir una considerable cantidad de sismos para evaluar el desempeño en la recuperación.

Falla N°	Situación forzada				Sismos ocurridos en el periodo de corte	Tiempo demandado para generar los s-file (en segundos)	Tiempo demandado para generar los archivos de forma de onda (en segundos)
	erb2db	db2seisan	mysql	Red			
1	detenido	ok	ok	Ok	1	1	3
2	detenido	ok	ok	Ok	9	5	25
3	ok	detenido	ok	Ok	5	3	15
4	ok	detenido	ok	Ok	12	6	39
5	detenido	detenido	ok	Ok	5	2	14
6	detenido	detenido	ok	Ok	12	5	32
7	ok	ok	detenido	Ok	4	2	10
8	ok	ok	detenido	Ok	19	8	57
9	ok	ok	ok	falla	3	1	8
10	ok	ok	ok	falla	32	15	90
Totales					102	48	293

Tabla 5.2: Lista de fallas forzadas.

Recuperación y desempeño ante cortes

Las fallas enumeradas del 1 al 6 en la tabla 5.2, son cortes forzados de los servicios del middleware, deteniendo tanto en forma alternada como en conjunto ambos componentes a la vez. Esto para periodos cortos, como en los casos 1, 3 y 5, y también para periodos de tiempo mas prolongados, con más sismos para procesar, como en los casos 2, 4 y 6.

En todos los casos después de reiniciar los servicios detenidos, el middleware se ha recuperado sin problemas, generando todos los sfiles y los archivos de forma de onda que ocurrieron en el periodo de corte, en la base de datos Seisan.

Las fallas 7 a la 10 de la tabla 5.2 no son fallas inducidas a los componentes del middleware, pero sí vinculadas a la conectividad entre sus dos componentes, como son: cortes en el vínculo de la red Lan, y la falla en el servicio MySql que sirve como punto

de comunicación entre erb2db y db2seisan. Para esos casos, después de que los servicios con fallas forzadas se restablecieron, el middleware fue capaz de recuperar todos los sismos que ocurrieron en el periodo de corte.

Considerando todos los casos de cortes inducidos, el tiempo demandado por el servicio erb2db en generar un s-file, resultó en aproximadamente un segundo por sismo, en tanto que para generar la forma de onda, el servicio db2seisan tiene una demora variable en función de la cantidad de señales a procesar, y cuyo promedio es de tres segundos para formas de onda de cuatro minutos.

Los sismos ocurridos en el periodo de prueba fueron 102. Al momento de recuperarse de la falla inducida, los sismos ocurridos en el periodo de falla fueron recuperados con una demora promedio de 0.47 segundos por cada uno de ellos. Para las formas de onda asociadas, el test también arrojó un comportamiento estable al generar la totalidad de los sismos, con una demora promedio de 2.8 segundos para cada una.

En relación a los recursos de procesador y memoria consumidos, el servicio erb2db demanda de 1.5 Mb memoria y menos del 0.1% del procesador, en tanto que el servicio db2seisan, ejecutándose en el servidor Seisan consume 1.7 Mb. de memoria y menos de 0.1% del procesador, en todos los casos el hardware utilizado es el descrito en el capítulo IV.

El rendimiento de la Base de Datos no presentó ningún problemas de desempeño en el periodo de evaluación, como tampoco lo ha presentado posteriormente, esto es normal ya que en promedio ocurren alrededor de 20 sismos diarios, con aproximadamente quince lecturas cada uno, con lo cual la carga de trabajo es muy baja, menor que para cualquier sistema transaccional elemental.

3. VALIDACIÓN DEL CATÁLOGO EARLYBIRD.

Como se dijo, para poder determinar la calidad de las localizaciones del sistema EarlyBird, se necesita comparar todas las localizaciones de ese catálogo, contra los mismos sismos que se encuentran en el catálogo INPRES. La base de la comparación a considerar serán los 3305 sismos del catálogo EarlyBird, indicados en la columna D) de la tabla 5.1. La comparación se realizó utilizando el valor de ID del s-file para poder identificar el mismo sismo en ambos catálogos. Los parámetros a analizar se corresponden a diferencias de hipocentros y magnitudes. Para encontrar esas diferencias

se ha utilizado un programa llamado *merge_seisan.pl*, escrito por Frederik Tilmann [F. Tilmann, et al 2005] en lenguaje Perl, que expresa las diferencias entre dos catálogos Seisan. Los estudios se harán primero cada una de las variables (epicentros, profundidades y magnitudes locales) por separado. Para los tres casos se representan histogramas de frecuencias en base a líneas y tablas de frecuencias acumuladas para las calidades ERB0, ERB1 y ERB2, pero con especial atención en los resultados obtenidos en los sismos de calidad confiable (ERB0) que son los factibles de ser publicados.

Posteriormente el estudio será restringido y acotado al subconjunto de sismos que originalmente pasaron el filtro de publicación WEB definido en el capítulo IV (ERB0, Mag. Local ≥ 2.5 y epicentro en Argentina), para este ultimo grupo, el estudio se hará en conjunto.

Diferencias epicentrales

En la tabla 5.3 se indican, para cada una de las tres calidades definidas como ERB0, ERB1 y ERB2, los valores mínimos y máximos encontrados, el promedio y la desviación estándar respecto de ese promedio. Se observa que el 62% de las localizaciones de EarlyBird son ERB0, lo que es un número aceptable considerando la baja densidad de estaciones de la red sismológica y la no uniformidad en su distribución espacial. Para dichas localizaciones, el promedio de las diferencias en epicentros es de 14 Km. con una desviación estándar de 22Km. Lo mismo se observa en el histograma de la figura 5.3, para frecuencias de diferencias, donde la máxima frecuencia se encuentra alrededor de los 14km. Finalmente en la tabla 5.4 se observa que las frecuencias acumuladas para diferencias en epicentro de los sismos de calidad confiable son altas, con más del 91% de los sismos con diferencias de epicentros de menos el error permitido de 30Km, alcanzando hasta el 94% con diferencias de menos de 40km.

Calidad	ERB0 (Confiable)	ERB1 (Dudoso)	ERB2 (No Confiable)
Cantidad de sismos	1908	277	1120
Dif. mínima	0	0	0
Dif. máxima	242	915	1626
Desv. Estándar	22	80	186
Dif. Promedio	14	36	108

Tabla 5.3: Resumen para distancias epicentrales.

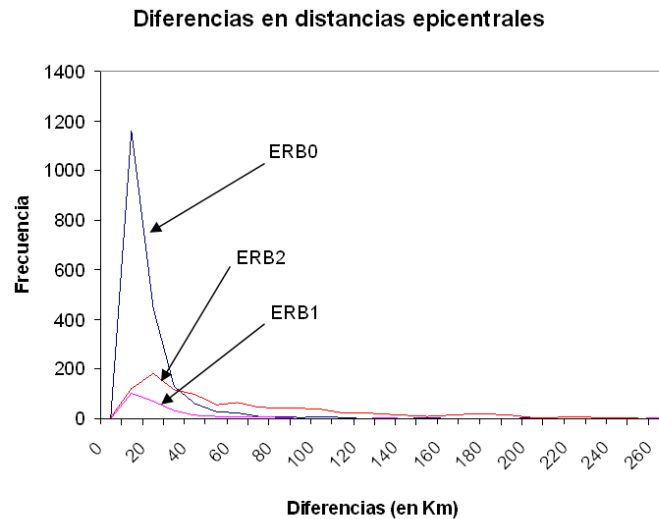


Figura 5.3: Histograma de frecuencias para diferencias epicentrales.

Diferencia en distancia epicentral (en Km.)	ERB0		ERB1		ERB2	
	Frec.	Acum. (en %)	Frec.	Acum. (en %)	Frec.	Acum. (en %)
10	1161	60.85%	103	37.18%	129	12.02%
20	443	84.07%	70	62.45%	184	27.95%
30	133	91.04%	34	74.73%	115	38.21%
40	59	94.13%	15	80.14%	96	46.79%
50	29	95.65%	8	83.03%	57	51.88%
60	22	96.80%	10	86.64%	64	57.59%
70	11	97.38%	8	89.53%	48	61.88%
80	10	97.90%	6	91.70%	43	65.71%
90	3	98.06%	2	92.42%	41	69.38%
100	11	98.64%	1	92.78%	38	72.77%
*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*

Tabla 5.4: Frecuencias acumuladas para diferencias epicentrales.

Diferencias en profundidades

Para las diferencias en profundidades, cuyo resumen se muestra en la tabla 5.5, se observa un resultado similar, aunque un poco menos favorable que las observadas para epicentros, puesto que en sismología es la variable calculada con menor precisión, principalmente por lo indicado en la sección consideraciones de este capítulo. A pesar de lo mencionado, el promedio de diferencias es de 21km y la desviación estándar es de 27km. Para el histograma de frecuencias de la figura 5.4, al igual que para las

diferencias en epicentros, aquí también, la máxima frecuencia ocurre sobre la media. Las frecuencias acumuladas para diferencias en profundidades en los sismos de calidad confiable están cerca del 80% de los sismos con diferencias de menos del margen de error aceptado de 30Km. (tabla 5.6).

Calidad	ERB0 (Confiable)	ERB1 (Dudoso)	ERB2 (No Confiable)
Cantidad de sismos	1908	277	1120
Dif. mínima	0	0	0
Dif. máxima	241	649	565
Desv. Estándar	27	47	46
Dif. Promedio	21	31	35

Tabla 5.5: Resumen para distancias en profundidades.

Diferencias en profundidades

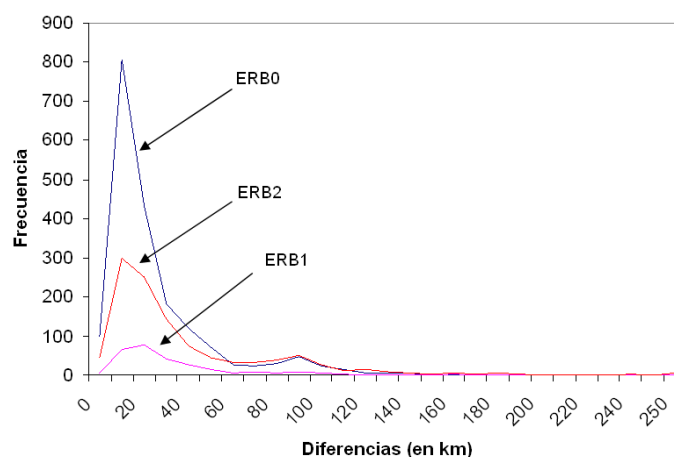


Figura 5.4: Histograma de frecuencias para diferencias en profundidades.

Diferencia en profundidades (en Km.)	ERB0		ERB1		ERB2	
	Frec.	Acum. (en %)	Frec.	Acum. (en %)	Frec.	Acum. (en %)
10	907	52,73%	74	29,24%	345	34,82%
20	434	70,28%	78	54,87%	251	53,21%
30	182	79,82%	41	69,68%	145	66,16%
40	119	86,06%	26	79,06%	76	72,95%
50	71	89,78%	14	84,12%	46	77,05%
60	26	91,14%	6	86,28%	32	79,91%
70	25	92,45%	8	89,17%	34	82,95%
80	29	93,97%	6	91,34%	40	86,52%
90	48	96,49%	10	94,95%	51	91,07%
100	24	97,75%	5	96,75%	28	93,57%

Tabla 5.6: Frecuencias acumuladas para diferencias en profundidad.

Diferencias en magnitudes (ML)

Para las diferencias en magnitudes, cuyo resumen se muestra en la tabla 5.7, se observa un resultado medio de diferencias de 0.57 grados de magnitud para los sismos ERB0, el cual supera el rango de error permitido por políticas de INPRES de 0.5 grados de magnitud. Las curvas de frecuencias de la figura 5.5 permiten observar una desviación estándar considerable teniendo en cuenta el valor de la media y consecuentemente, las tablas de frecuencias acumuladas de la tabla 5.8 registran un porcentaje del 58% alrededor de la media aceptada.

Calidad	ERB0 (Confiable)	ERB1 (Dudoso)	ERB2 (No Confiable)
Cantidad de sismos	1908	277	1120
Dif. mínima	0	0	0
Dif. máxima	3.7	3.6	5
Desv. Estándar	0.48	0.64	0.89
Dif. Promedio	0.57	0.73	0.93

Tabla 5.7: Resumen para diferencias en magnitudes.

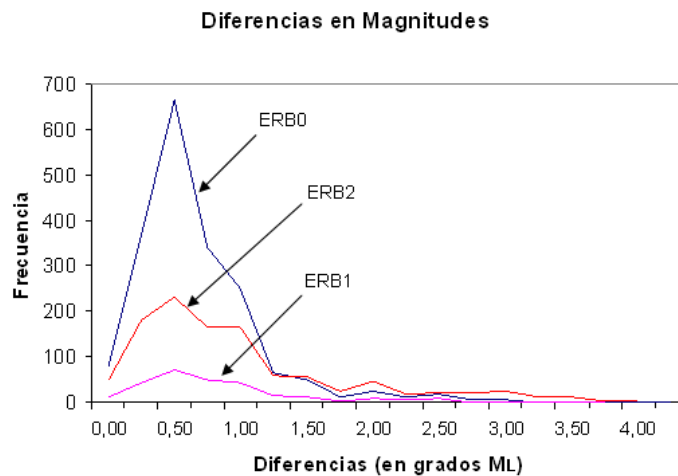


Figura 5.5: Histograma de frecuencias para diferencias en magnitudes.

Diferencia (en grados de magnitudes)	ERB0		ERB1		ERB2	
	Frec.	Acum.. (en %)	Frec.	Acum.. (en %)	Frec.	Acum.. (en %)
0,00	81	4,25%	11	3,97%	51	4,55%
0,25	370	23,64%	44	19,86%	182	20,80%
0,50	665	58,49%	73	46,21%	233	41,61%
0,75	342	76,42%	49	63,90%	165	56,34%
1,00	250	89,52%	43	79,42%	165	71,07%
1,25	66	92,98%	16	85,20%	60	76,43%

Diferencia (en grados de magnitudes)	ERB0		ERB1		ERB2	
	Frec.	Acum.. (en %)	Frec.	Acum. (en %)	Frec.	Acum. (en %)
1,50	50	95,60%	12	89,53%	57	81,52%
1,75	11	96,17%	2	90,25%	26	83,84%
2,00	25	97,48%	10	93,86%	47	88,04%
2,25	14	98,22%	5	95,67%	20	89,82%
*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*

Tabla 5.8: Frecuencias acumuladas para diferencias en magnitud local.

Sismos publicados

Para el análisis que sigue, se estudian los mismos parámetros (hipocentro y magnitud) que en las secciones anteriores, pero en lugar de los 3035 sismos, solamente se han considerado un subconjunto de ellos, aquellos que en primera instancia, sin revisión, pasaron el filtro de publicación, en total 973 sismos. La diferencia con los 1908 sismos de calidad ERB0 se fundamenta en que muchos de ellos tienen epicentro fuera del territorio Argentino, o bien una magnitud menor a 2.5.

En la tabla 5.9 y figura 5.6 se muestran los resultados para las tres variables. Allí se observa que el subconjunto de sismos publicados presenta mejores resultados que los obtenidos para la totalidad de los sismos del catálogo EarlyBird con calidad ERB0, lográndose una mejora en los valores medios para hipocentros, con 11.58 Km. para epicentro y 19.49 Km. para profundidad, lo mismo que para las desviaciones estándar para ambas variables, con 17.47 Km. y 27.85 Km. respectivamente. La tabla 5.10 de frecuencias acumuladas muestra una concentración de cerca del 93% para ambas variables.

La media para la magnitud no varía en relación al estudio del catálogo EarlyBird y sigue en torno a los 0.57 grados, pero sí ha disminuido el valor máximo de diferencias encontrado, alcanzando 2.2 como valor máximo y consecuentemente ha disminuido la desviación estándar, alcanzando 0.33 grados, en tanto que las frecuencias acumulan cerca del 50% en torno al valor de error aceptado (figura 5.7 y tabla 5.11).

Sismos publicados	Dif. en Epicentros	Dif. en Profundidad	Dif. en Magnitud
Cantidad de sismos	973	973	973
Dif. mínima	0.09	0	0
Dif. Máxima	214	240	2.2

Sismos publicados	Dif. en Epicentros	Dif. en Profundidad	Dif. en Magnitud
Desv. Estándar	17.47	27.85	0.33
Dif. Promedio	11.58	19.49	0.57

Tabla 5.9: Resumen en hipocentros y magnitudes. (Sismos publicados).

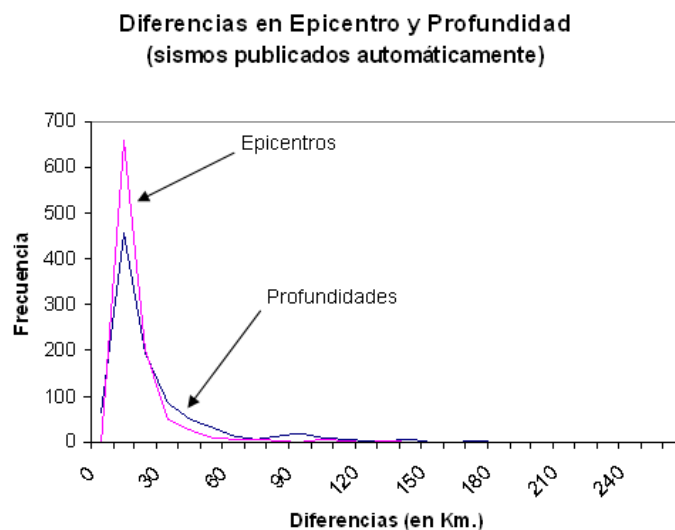


Figura 5.6: Histograma de frecuencias para diferencias en hipocentros. (Sismos publicados).

ERB0 Diferencia (en km.)	Epicentro		Profundidad	
	Frec.	Acum. (en %)	Frec.	Acum. (en %)
10	657	67,45%	773	79,36%
20	202	88,19%	92	88,81%
30	50	93,33%	34	92,30%
40	25	95,89%	15	93,84%
50	10	96,92%	16	95,48%
60	8	97,74%	6	96,10%
70	5	98,25%	1	96,20%
80	2	98,46%	8	97,02%
90	1	98,56%	14	98,46%
100	6	99,18%	5	98,97%
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*

Tabla 5.10: Frecuencias acumuladas para diferencias en hipocentros. (Sismos publicados).

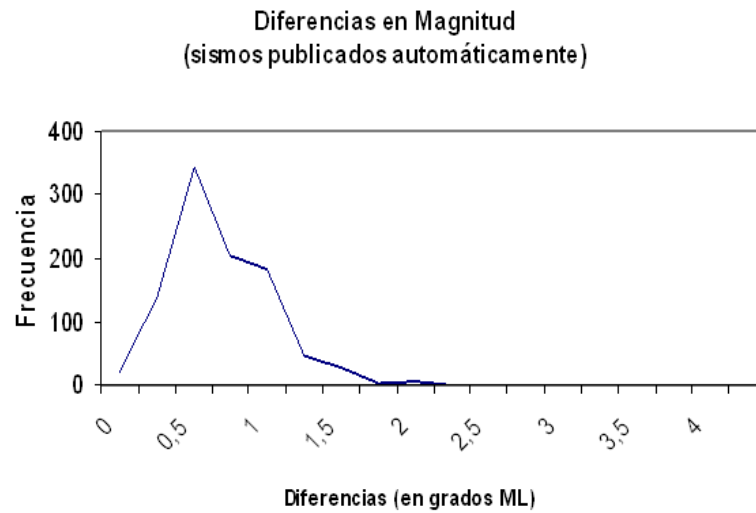


Figura 5.7: Histograma de frecuencias para diferencias en magnitudes. (Sismos publicados)

Diferencia (en grados de magnitudes)	ERB0	
	FREC.	Acum. (en %)
0	22	2,26%
0,25	138	16,43%
0,5	343	51,64%
0,75	205	72,69%
1	183	91,48%
1,25	46	96,20%
1,5	29	99,18%
1,75	2	99,38%
2	5	99,90%
2,25	1	100,00%

Tabla 5.11: Frecuencias acumuladas para diferencias en magnitudes. (Sismos publicados)

Sismos con magnitud local igual o mayor a 4 grados

Si se consideran los sismos que pasaron los filtros de publicación, y que son mas importantes en su magnitud (con un valor igual o mayor a 4 grado de ML), los resultados mejoran notablemente para hipocentros y, en esos casos las diferencias de magnitud se encuentran dentro de los márgenes de error aceptados (tabla 5.12).

Sismos ERB0 con $M_L \geq 4$ y epicentro en Argentina	Promedio de diferencias en Epicentros (Km.)	Promedio de diferencias en Profundidad (Km.)	Promedio de diferencias en grados de Magnitud Local
29	9.4	16.06	0.3

Tabla 5.12: Diferencias para sismos $M_L > 4$.
(Sismos publicados)

4. DEMORAS OBSERVADAS

De la misma manera que lo realizado para la muestra del capítulo III, se estudian las demoras observadas agrupadas por mes para el período de estudio, esta vez sobre el conjunto de datos del catálogo INPRES, que contiene el resultado de aplicar la nueva propuesta, con sismos ya revisados.

Puesto que se trabaja con el catálogo oficial ya revisado por sismólogos (y consecuentemente con cambios introducidos), de la muestra inicial de 5439 sismos indicados en la columna C) de la tabla 5.1, se excluyen aquellos indicados en la columna F) que han perdido la trazabilidad en operador y fecha de localización original, quedando finalmente un total de 4642 sismos a los que es posible estudiar.

El mismo estudio también se hace sobre dos subconjuntos de sismos del mismo catálogo: los que tienen epicentro en Argentina y los que han sido sentidos.

Demoras en catálogo INPRES

Para todos los sismos de operador ERB0 la demora en su localización es el valor asignado al temporizador t1, de dos minutos según la configuración al momento de la muestra, en tanto que para todos los otros sismos (ERB1, ERB2 y de operadores manuales), la hora de localización es la hora de revisión (para los ERB1 y ERB2) o de cálculo (para los eventos que provienen del sistema de disparos) por parte de un sismólogo.

La tabla 5.13 presenta el resumen obtenido donde el promedio de demoras para el conjunto estudiado arroja un valor de 6.6 horas para cada sismo del catálogo. Este valor no es una reducción importante comparadas con las 8.4 horas obtenidas antes de implementar el nuevo modelo y la reducción aproximada de dos horas, está justificada por el aporte de los 1437 sismos del operador ERB0.

Mes/Año	Cantidad de sismos en la Base de Datos para el período	Cantidad de sismos considerados	Sismos ERB0	Promedio de demora entre determinación y publicación en la página WEB	
				Minutos	Horas
Sep. 2013	234	205	28	475.8	7.9
Oct. 2013	1042	847	139	456.13	7.6
Nov. 2013	947	763	252	353.12	5.9
Dic. 2013	907	787	264	403.74	6.7
Ene. 2014	907	814	279	325.0	5.4
Feb. 2014	921	778	302	411.78	6.8
Mar. 014	481	448	173	420.47	7.0
Resumen	5439	4642	1437	397.44	6.6

Tabla 5.13: Demora promedio en localización para el total de sismos en catálogo INPRES.

Demoras en el subconjunto de sismos de Argentina

Si sólo se considera ese subconjunto de datos del catálogo oficial del INPRES, las estadísticas de demoras indicadas en la tabla 5.14, bajan a una media de 5.4 horas.

Mes/Año	Cantidad de sismos en la Base de Datos para el período	Cantidad de sismos considerados	Sismos ERB0	Promedio de demora entre determinación y publicación en la página WEB	
				Minutos	Horas
Sep. 2013	131	119	25	348.9	5.8
Oct. 2013	559	489	118	385.1	6.4
Nov. 2013	637	541	211	313.9	5.2
Dic. 2013	619	539	210	378.8	6.3
Ene. 2014	628	556	217	309.0	5.15
Feb. 2014	617	511	230	342.4	5.7
Mar. 014	317	314	147	283.9	4.7
Resumen	3508	3069	1158	325.28	5.4

Tabla 5.14: Demora promedio en localización para el total de sismos registrados. (Con epicentro en Argentina)

Demoras en el subconjunto de sismos de sentidos.

Para el mismo estudio aplicado al subconjunto de sismos sentidos para el período, las estadísticas de demoras son las indicadas en la tabla 5.15 y arrojan una media de 33 minutos, aproximadamente un 50 % del valor obtenido antes de implementar el modelo, que era de 62 minutos.

Sismos sentidos	Sismos ERB0	Promedio de demora entre determinación y publicación en la pagina WEB	
		Minutos	Horas
25	8	33.5	0.5

Tabla 5.15: Demora promedio en localización para el total de sismos sentidos.

5. APRECIACIONES GENERALES

Grado de incidencia

Si bien en este trabajo se plantea que todos los sismos que determina EarlyBird sean incorporados inmediatamente a la base de datos Seisan, es claro que no todos afectaran la reducción de tiempos pretendida, ya que muchos de esos sismos no pasarán los filtros de calidad para publicación. Por lo tanto a la reducción de tiempos contribuyen únicamente aquellos que se envíen desde EarlyBird a Seisan y que pasen los filtros de publicación, ingresando en forma directa a la página Web. El grado de incidencia para sismos que son incorporados al catálogo INPRES por el modelo propuesto y que son de calidad confiable (ERB0) son 1437 sismos, lo que representa el 31% del total. Esto indica que el 31% de ellos (37% para el caso de sismos de Argentina) sólo tienen una demora de dos minutos (el valor de t_1) entre que el localizador EarlyBird logra una localización y que el resultado es publicado.

Comportamiento de la implementación

En el periodo evaluado el sistema se desempeñó sin problemas ante situaciones inducidas de fallos en todos sus componentes, tanto en forma individual, como en forma combinada, los cortes no causaron pérdida de información y la recuperación del vínculo

hizo que los dos servicios del middleware sincronizaran la información almacenada en la Base de datos MySQL sin demoras considerables.

En particular, la recuperación ante un corte inducido de dos días fue satisfactoria, tanto para los s-files como para la generación de la forma de onda. Los dos servicios del middleware y los procesos en ejecución de la base de datos MySQL consumen muy pocos recursos de memoria y de procesador.

Validación de los datos del localizador EarlyBird

Considerando solamente los sismos ERB0 (que representan el 62% de los sismos localizados por EarlyBird), que son factibles de ser publicados, se puede concluir que las localizaciones de hipocentros son satisfactorias y los resultados obtenidos arrojan márgenes de error que se encuentran dentro de los parámetros aceptados por las políticas establecidas, y muy cerca de los hipocentros del catálogo oficial INPRES.

Los márgenes de error obtenidos al evaluar la variable magnitud superan los aceptados para el conjunto de sismos del catálogo EarlyBird, como también ocurre con el subconjunto de los que pasan el filtro de publicación. En este punto es de destacar que, de las tres variables sujetas a evaluación, la magnitud no depende tanto de la densidad de estaciones, como de otros factores mencionados en el Anexo I²¹, a los que se puede atribuir las diferencias encontradas. Pero si se consideran los sismos más importantes, de magnitud local igual o mayor de cuatro, que son factibles de ser detectados por más estaciones sísmicas, las diferencias entre catálogos se reducen notablemente, y los errores para las tres variables testeadas se encuentran dentro de los límites aceptados.

Demoras observadas

Del estudio realizado en la segunda etapa, se puede observar que con el nuevo modelo propuesto, la reducción de tiempos lograda en localización manual es de cerca de un 22% menor que el valor obtenido antes de la nueva implementación, si se considera el catálogo INPRES. Ese porcentaje de reducción se eleva a un 35% para el caso de sismos con epicentro en Argentina. El valor obtenido en reducción de tiempos para los sismos sentidos es mayor, llegando en ese caso a un 50%.

²¹ Ver "Magnitud", en el Anexo 1.

Se observa el aporte importante de los sismos ERB0 en el catálogo INPRES, cerca del 31% del total y el 37% para el caso de sismos con epicentro en Argentina. Esto significa que para esos casos, la reducción de tiempos es del 99.99% (2 minutos contra 8.4 horas), ya que sismos ERB0, como se dijo, tienen una demora indicada en valor establecido para t_1 , que es de 2 minutos en la actualidad. En otras palabras, para todos los sismos que pasen el filtro de publicación, los tiempos observados serán en definitiva los tiempos teóricos del nuevo sistema.

6. HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Las herramientas utilizadas en el presente capítulo, además del ya citado programa *merge_seisan* escrito en Perl para encontrar diferencias de catálogos Seisan, han sido scripts también escritos en lenguaje Perl para restringir los subconjuntos de datos sujetos a test y Microsoft Excel para confeccionar las tablas estadísticas, de frecuencias acumuladas y para los gráficos de histogramas.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas teniendo en cuenta el objetivo general y los objetivos específicos propuestos. Las mismas se apoyan en los resultados emanados al validar el modelo implementado, con la utilización de datos reales durante seis meses de ejecución, entre Octubre de 2013 y Marzo de 2014.

Posteriormente se enumeran los aportes realizados por esta tesis, como así también los problemas detectados durante todo el proceso y se finaliza con sugerencias sobre posibles líneas futuras de trabajo que permitan mejorar la propuesta presentada.

1. CONCLUSIONES

Considerando el promedio simple de demoras para la totalidad de sismos del catálogo, la reducción de tiempos pasó de 8.4 horas antes de implementar la propuesta, a un promedio de 6.6 horas en todo el catálogo y de 5.4 horas para sismos con epicentro en Argentina, después de la implementación del modelo. Si bien este aporte representa una disminución importante, esos resultados aún dejan un margen importante para mejorar y, en ese sentido, es el crecimiento de la red sísmica de Argentina la que posibilitará mejorar ese aspecto.

Sin embargo, el aporte más importante de esta tesis está dado por el grado de incidencia de los sismos que pasan los filtros de calidad definidos, que indica que con la integración propuesta, el 31% de la totalidad de los sismos registrados por INPRES en el período de validación, se han localizado y publicado en alrededor de 2 minutos posteriores a su ocurrencia. Y, si se considera solamente los sismos ocurridos en territorio Argentino, este porcentaje se eleva al 37%. Todo ello con resultados altamente confiables, como se ha demostrado en las validaciones de las calidades definidas como ERB0. De esta manera se logra una mayor capacidad de respuesta del INPRES ante eventos sísmicos, considerándose alcanzado el objetivo general propuesto en esta tesis.

En relación a los objetivos específicos, se describió el proceso de trabajo utilizado en INPRES para realizar localizaciones, identificando las tareas que involucra y cuantificando las demoras que generan cada una de ellas en el proceso completo. También, se logró diseñar e implementar un modelo simple que permite integrar EarlyBird con Seisan, lo que constituye una contribución a todos aquellos organismos sísmicos internacionales con necesidades similares a las del INPRES. Fruto de esa

integración, surgieron aportes adicionales a Seisan, con la incorporación de dos módulos necesarios para la vinculación con EarlyBird, pero que pueden trabajar en forma independiente, sin necesidad de integración y constituyen aportes propios a Seisan. Para ambos casos estos módulos pasan a formar parte de las contribuciones a la comunidad sísmica internacional que lo utiliza. Estos son:

- Módulo que permite determinar ubicación en región geográfica de ocurrencia (provincias o país) para cualquier sismo.
- Módulo que permite determinar distancias epicentrales a diferentes ciudades o pueblos en el proceso de análisis manual.

Además de los objetivos principal y específicos alcanzados, el aporte de esta tesis es el de reducir el trabajo de rutina del sismólogo, ya que todos los sismos procesados por EarlyBird son pasados a Seisan (catálogo INPRES) con lecturas de fases y con las formas de onda de las estaciones cercanas disponibles, por lo que el sismólogo tiene una parte importante de su trabajo realizado.

Por otro lado, este trabajo de tesis encuentra sus limitaciones en el impacto de la implementación del nuevo esquema y tiene relación con la disminución en la cantidad de sismos sentidos observados en el catálogo INPRES para el periodo de ejecución de la nueva propuesta.

El atributo de un sismo sentido es registrado manualmente por un sismólogo ante un aviso (llamado telefónico por lo general) por parte de organismos de Defensa Civil o personas que han percibido un movimiento sísmico, y el registro de esta información en el catálogo INPRES es muy importante para el cálculo de intensidad (ver Anexo I). El autor de esta tesis ha confirmado casos de sismos que han sido efectivamente sentidos (informados por medios de comunicación) y para los cuales ningún organismo de emergencias, personas en general o los mismos medios, solicitaron información al INPRES. Es de suponer que esto se debe a que la información (como resultado de implementar el modelo) está disponible inmediatamente en la página Web, no siendo necesario llamar a INPRES para información, como efectivamente ocurría antes de la implementación. Consecuentemente, en el catálogo INPRES no queda registrado ese sismo como que alguien lo ha sentido, perdiéndose de este modo, valiosa información.

Para comprobar la tendencia, se realizó una estadística tomando períodos anteriores con la misma cantidad de días que el período evaluado (175 días para cada uno), que se muestra en la tabla 6.1 y en la figura 6.1. Allí se observa que el semestre de evaluación (semestre N° 9), posee la menor tasa de sismos sentidos en relación con la cantidad de sismos del catálogo para ese período.

Semestre	Desde	Hasta	Cantidad de sismos sentidos (a)	Cantidad total de sismos (b)	Ratio (a/b)
1	11-Nov-09	5-May-10	34	4010	0.84
2	6-May-10	28-Oct-10	51	4659	1.09
3	29-Oct-10	22-Abr-11	46	4326	1.06
4	23-Abr-11	15-Oct-11	63	4109	1.53
5	16-Oct-11	8-Abr-12	34	3705	0.91
6	9-Abr-12	1-Oct-12	60	3674	1.63
7	2-Oct-12	26-Mar-13	21	2324	0.90
8	27-Mar-13	18-Sep-13	30	4520	0.66
9	19-Sep-13	13-Mar-14	25	5439	0.45

Tabla 6.1: Relación de sismos sentidos para los últimos nueve semestres.

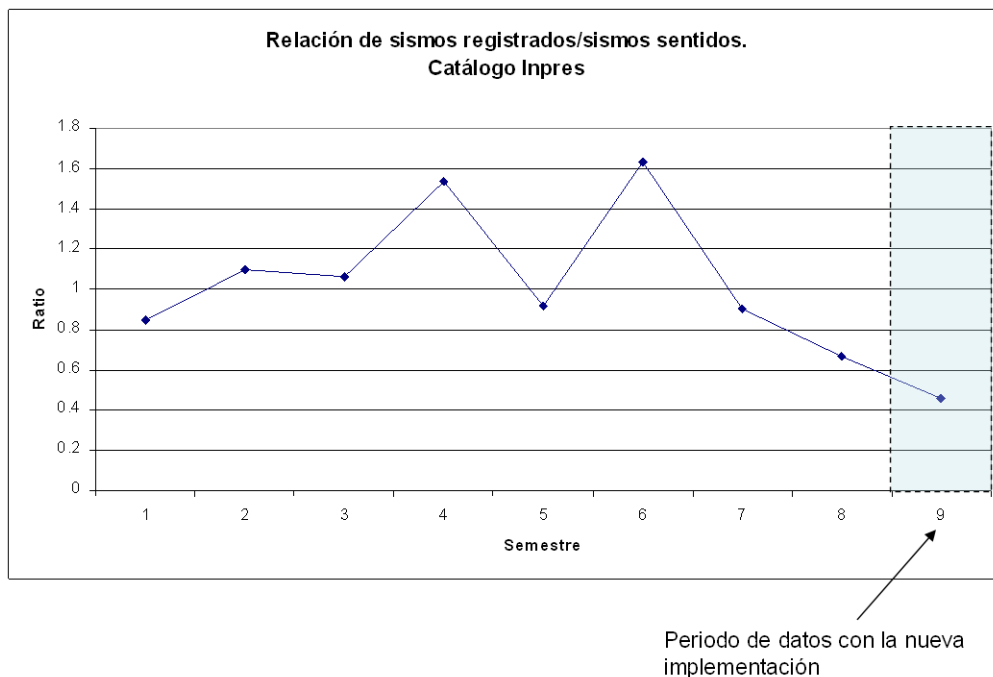


Figura 6.1: Curva de tendencia para sismos sentidos.

Estas estadísticas no aseguran una tendencia, pero si constituye un aspecto a tener en cuenta y futuros estudios deben ser realizadas para confirmarlo.

2. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

El modelo propuesto está diseñado con la premisa de que el sistema de análisis sísmológico sea Seisan, y que EarlyBird sea el localizador automático, pero puede trabajar en forma independiente como servicio standalone, por lo que está orientado a que se pueda integrar a otros localizadores automáticos, en particular a Seiscomp o EarthWorm.

Para el caso de Seiscomp, su módulo localizador (*scautoloc*) produce salidas que contienen el historial de localizaciones y también de lecturas o picadas, similar a los archivos *oldquakex.dat* y los archivos de lecturas *.dat* de EarlyBird. Con lo cual un cambio del actual parser podría ser una alternativa hacia el *s-file* de Seisan. Para obtener la forma de onda, se podría utilizar un wrapper (envoltorio) del protocolo Seedlink, aunque otras opciones pueden ser exploradas. De esta manera, sería posible utilizar el localizador automático Seiscomp en lugar de EarlyBird.

Si, en cambio, se decide utilizar EarthWorm como localizador automático, una opción podría ser utilizar las salidas que produce el llamado mega-módulo²², y desde allí obtener con un parser adecuado, los *s-file* para Seisan. En este punto, otra alternativa sería utilizar alguna variante del módulo *seisan_report*, mencionado en el capítulo I. Para obtener la forma de onda, no haría falta ningún cambio al modelo propuesto aquí, ya que se seguiría utilizando el wrapper al módulo *waveman2disk*

Los dos casos anteriores constituyen la principal línea de trabajo sugerida por el autor de este trabajo, sin embargo, un conjunto de aplicaciones para dispositivos móviles se pueden construir alrededor del modelo presentado, con variados objetivos. En particular, se debe considerar la posibilidad de incorporar al middleware de un sistema de notificaciones a los sismólogos que estén de guardia pasiva, ante sismos localizados automáticamente, aunque esto se puede hacer extensivo a organismos de emergencias, medios y público en general. En este sentido, la utilización de Really Simple Syndication (RSS), en conjunto con aplicaciones móviles, podría ser una alternativa válida.

Por otro lado, una de las principales inquietudes que ha surgido del estudio presentado en este capítulo, tiene que ver con la mejora en los valores obtenidos para diferencias de

²² El denominado mega-módulo de EarthWorm es un conjunto de módulos encargados de hacer las localizaciones automáticas en ese sistema

magnitudes, cuya media resultante fue mas alta que los valores aceptados, para ello en relación a las magnitudes, dos alternativas de trabajo futuro se sugieren en esta tesis:

- Utilizar el programa AUTOMAG, de Seisan, en lugar de la magnitud calculada por EarlyBird, en cuyo caso se estaría trabajando con un método de cálculo (de Seisan) oficial en INPRES. Considerar que en este caso se debería tener en cuenta la demora inducida al tener que esperar las más tardías ondas S, usadas por AUTOMAG.
- Sabiendo que la media de error es de 0.57 grados, se podrían corregir las magnitudes automáticas de EarlyBird en esos ordenes o en algún orden resultante de un estudio mas amplio que el realizado en este apartado.

Además de lo mencionado, durante el período de investigación han aparecido otros objetivos que constituyen lineamientos para nuevas mejoras, entre las que se destaca la de desarrollar interfaces GIU basadas en la Web para configuración y evaluación de desempeño del middleware.

CAPÍTULO VII: REFERENCIAS

1. REFERENCIAS

- Bondár, I., and D.Storchak, (2011) "Improved location procedures at the International Seismological Centre", *Geophys. J. Int.*, 186, 1220-1244.
- Cervelli, D., and Murray, T., (2004). "New software for long-term storage and analysis of seismic wave data" (abstract SF13A-0705), AGU (Fall Meet.), SF13A-0705.
- Cervelli, D. (2005). "Winston Manual" Disponible en www.avo.alaska.edu/Software/winston/W_Manual_TOC.html. (Visitado el 15 de enero de 2014).
- Chamberlain, Robert G. (1996). "Geographic Information Systems FAQ" (Caltech JPL rgc@solstice.jpl.nasa.gov y revisada en el grupo de discusión comp.infosystems.gis en Octubre de 1996) en <http://www.faqs.org/faqs/geography/infosystems-faq/>. (Visitado el 14 de Febrero de 2014).
- EarthWorm Central. (2013). "EarthWorm Central", www.earthwormcentral.org. (Visitado el 12 de Febrero de 2014).
- EarthWorm WebSite (2013). "EarthWorm 7.6", www.earthworm.isti.com/trac/earthworm (Visitado el 15 de Enero de 2014).
- EarlyBird User Guide, (2007). "EarlyBird User Guide" West Coast/Alaska TsunamiWarning Center (WC/ATWC).
- Finley, Darel, (2007). "Point-In-Polygon Algorithm Determining Whether A Point Is Inside A Complex Polygon". <http://alienryderflex.com/polygon/> (Visitado el 14/11/2013).
- Friberg, Paul., and Lisowski, Stephan, (2013). Post al grupo de usuarios de EarthWorm sobre el lanzamiento de Earthworm 7.7. https://groups.google.com/forum/#!topic/earthworm_forum/J4FgUG2wQOc. (Visitado el 17 de Enero de 2014)
- Hales, Thomas., (2007) "Jordan's Proof of the Jordan Curve Theorem", *Studies in Logic, Grammar and Rhetoric* 10(23). Disponible en <http://mizar.org/trybulec65/4.pdf>. (Visitado el 12/12/2013).
- Hanka, Heinloo, A., and Jackel, K.-H.(2000): "Networked Seismographs: GEOFON Real-Time data Distribution", *ORFEUS Electronic Newsletter*, Disponible en: <http://www.orfeus-eu.org>. (Visitado el 15/09/2013).
- Havskov, J (1990). "Replace the Hypo 71". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 1043-1045
- Havskov, J., and Ottemöller, Lars, (2000). "SEISAN earthquake analysis software". *Seismol. Res. Lett.* 70, 532-534.
- Havskov, Jens and Ottemöller, Lars (2010): "*Routine Data Processing in Earthquake Seismology*", Berlin, Alemania, Editorial Springer.
- Havskov, J., Recio, R., Sanchez, G., Marcuzzi, O.; Moreno, M., Araujo, et. al. (2013) "The Argentinean National Network of Seismic and Strong-Motion Stations". *Seismol. Res. Lett.* Vol 84 N° 5, 729-736.
- Huang, P. Y.; Nyland, D.; Medbery, A.; Lockett, R.; Whitmore, P. (2008) "Earlybird seismic processing system recent upgrades". *American Geophysical Union*, Fall Meeting 2008.
- Heinloo Andres (2000). "*Networked Seismographs: GEOFON Real-Time Data Distribution (SEEDLINK)*". Orfeus Newsletter, Volumen 2 N° 3, Diciembre 2000.

- Instituto Nacional de Prevención Sísmica (2012), “Catálogo de Sismos 2012”. INPRES, San Juan, Argentina.
- Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS) (2006) “*SEED Reference Manual*”. 3rd ed. 2006. Appendix G - Data Only SEED Volumes (Mini-SEED).
- Johnson, C. E., A. Bittenbinder, B. Bogaert, L. Dietz, and W. Kohler (1995). “Earthworm: a flexible approach to seismic network processing”, *IRIS Newsl.* 14, N° 2, 1–4.
- Kernighan, Brian, RitchiemDennis.(1991) “El Lenguaje de Programación C” ISBN 968-880-205-0. Segunda Edición, México, Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Seiscomp3 Manual (2012), “Módulo scautoloc”, disponible en:
<http://www.seiscomp3.org/doc/seattle/2013.015/apps/scautoloc.html> y en
<http://www.seiscomp3.org/wiki/FAQ/minimun-phases-autoloc> (accedido el 15 de enero de 2014).
- Olivieri, Marco and Clinton, John (2012). “An Almost Fair Comparison Between Earthworm and SeisComp3”. *Seismol. Res. Lett.* Vol 83 N° 4, 720-727.
- Richter, C.F. (1935). "An instrumental earthquake magnitude scale". *Bulletin of the Seismological Society of America* 25 (1-2): 1–32.
- Ruben, L., Havskov, J., Ottemöller, L., Voss, P., and Ferreira, T. (2011) “Integrated Access to miniSEED Archives Using SEISAN Earthquake Analysis Software”. *Geophysical Research* Vol. 13, EGU2011-11615.
- Seed Reference Manual (2012) “Standard for the Exchange of Earthquake Data SEED Format” Version 2.4. *International Federation of Digital Seismograph Networks Incorporated*. United States Geological Survey USGS.
- Tilmann, F., et al (2010). “The updip seismic/aseismic transition of the Sumatra megathrust illuminated by aftershocks of the 2004 Aceh-Andaman and 2005 Nias events”. *Geophys. J. Int.*, 181:1261-1274, 2010. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04597.x
- Trnkoczy, A., Havskov, J., Ottemöller, L., and Peter Bormann (2009) “Seismic Networks” disponible en
ftp://ftp.geo.uib.no/pub/seismo/REPORTS/POSTERS/Seismic_networks.ppt
(Visitado el 12 de Febrero de 2014).
- Wall, L., Christiansen, T. and Schwartz, R. (1996) “Programming Perl” ISBN 1-56592-149-6, 670 pag. Second Edition, New York, USA, Editorial O'Reilly.

ANEXO I: CONCEPTOS BÁSICOS

1. INTRODUCCIÓN

En esta sección se ofrece una descripción básica de la actividad sísmica que existe en Argentina y de las actividades y responsabilidades del INPRES como organismo responsable del monitoreo sismológico en Argentina y ámbito de desarrollo de esta tesis. Posteriormente se introducen descripciones de conceptos relacionados a sismología que son utilizados en el desarrollo de esta tesis. Todos se describen a nivel básico, lo suficiente como para poder comprender la problemática tratada, no pretendiendo ser ésta una definición que abarque todos los conceptos de la disciplina, ni tampoco exhaustiva en los conceptos utilizados.

2. LA SISMOLOGÍA EN ARGENTINA

Los antecedentes registrados de la sismicidad en Argentina se remontan al terremoto del 13 de septiembre de 1692 en Talavera del Esteco (Salta), que ocasionó numerosas víctimas, y produjo daños incluso en la ciudad de Salta, distante aproximadamente 120 kilómetros del epicentro. La falta de datos sísmicos históricos y la escasa recopilación de los mismos se han debido básicamente a la gran extensión territorial y a la baja densidad poblacional, con lo cual los datos existentes se encuentran muy dispersos.

Por su parte, el estudio de la sismología en la Argentina es aún más reciente, y comienza a fines del siglo XIX. La primera institución del país que comenzó a estudiar, a principios de este siglo, los aspectos geofísicos en general y, dentro de ellos los problemas de la sismología, fue el Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional de La Plata. Si bien la creación de este Observatorio se remonta al año 1882, recién en 1906 queda plasmado orgánicamente el estudio de la sismología como parte de las tareas científicas que en él se desarrollaban.

El instituto Nacional de Prevención Sísmica

El 15 de enero de 1944, la ciudad de San Juan fue destruida casi en su totalidad por un terremoto que se reconoce como el más catastrófico ocurrido en la República Argentina, con un saldo de aproximadamente 10.000 muertos y ocasionando un enorme impacto en la economía Argentina. Este acontecimiento puso de manifiesto la imprevisión con que se había actuado hasta entonces frente a la amenaza sísmica, a pesar de sus antecedentes. Consecuentemente, surgió la necesidad de adoptar adecuadas medidas en salvaguardia de la vida y bienes de los habitantes, partiendo de la certeza de que se está

frente a un fenómeno natural cuya ocurrencia a través del tiempo, se produce en forma reiterativa, inesperada e inevitable.

Es así como el Gobierno Nacional de aquella época tomó a su cargo la tarea de reconstruir lo devastado por dicho terremoto, para lo cual creó, por Decreto N° 17.432 del 1 de julio de 1944, un organismo autárquico dentro de la órbita del Ministerio del Interior, denominado Consejo Nacional de Construcciones Antisísmicas y de Reconstrucción de San Juan (CONCAR). El 8 de Mayo de 1972 por Ley 19616, el CONCAR se transforma en el Instituto Nacional de Prevención Sísmica. Actualmente (Agosto de 2013) depende del Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, a través de la Secretaría de Obras Públicas. Los objetivos principales y atribuciones conferidas a este organismo se enmarcan dentro de la política nacional de prevención sísmica que establece el Poder Ejecutivo Nacional.

Además de las funciones de monitoreo, análisis y determinación de la actividad sísmica en territorio Argentino, el INPRES es además, el organismo facultado para la elaboración del Código de Construcciones Sismorresistentes (INPRES-CRISOC-103), de carácter obligatorio para todas las obras nacionales que se realicen dentro del territorio argentino. La difusión de sus estudios, investigaciones y conclusiones, se realiza a través de publicaciones técnicas, cursos, conferencias y también son publicados en la página Web oficial.

La Red Nacional de Estaciones Sismológicas

Hasta la década de los ochenta la observación sísmica se basaba en estaciones individuales que operaban independientemente con registro fotográfico o similar. Algunas de estas estaciones operaban de forma conjunta remitiendo sus registros en papel a las oficinas del INPRES, en donde finalmente se efectuaba el análisis. En este contexto, el retardo desde que se producía el registro hasta que la información podía ser procesada conjuntamente era de varios días. En la actualidad, el concepto de Red Sísmica se encuentra asociado al denominado “tiempo real”, es decir, la recepción y procesado de datos cuasi-instantáneos. Para el cumplimiento de su misión, el INPRES debe monitorear en forma permanente, en tiempo real, la actividad sísmica (de origen volcánico o tectónica) del territorio nacional. Para ello cuenta con la Red Nacional de Estaciones Sismológicas (RNES), que esta compuesta de 50 estaciones en el territorio nacional (año 2013), tres de éstas forman parte del Sistema Internacional de Vigilancia

para el cumplimiento del Tratado de Prohibición Completa de Ensayos Nucleares (CTBTO).

Desde 2011, además, se han integrado a la RNES, señales de estaciones próximas a Argentina, pertenecientes a la República de Chile (Servicio Sismológico de la Universidad de Chile), de estaciones regionales de Bolivia, Brasil y Paraguay y de otros organismos internacionales. También se han realizado convenios de cooperación con universidades argentinas, como es el caso de la Universidad Nacional de San Juan y la Universidad Nacional de La Plata, que poseen estaciones propias y las comparten con el INPRES. (Figura AI-1).

La red está integrada por estaciones remotas de una (vertical) y tres componentes (una vertical, y dos horizontales), registrando la información "in situ" y transmitiéndola al INPRES por diferentes medios. Las zonas de mayor sismicidad, Nor-Oeste y Centro-Oeste, concentran la mayoría de las estaciones (33 estaciones). Con menor densidad de cobertura, el resto de las estaciones se encuentran ubicadas en otras regiones del país.

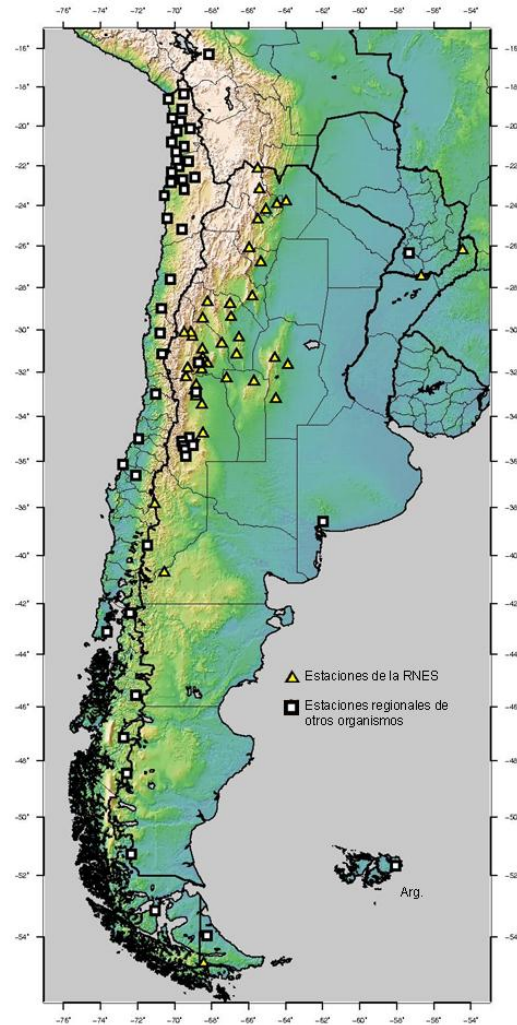


Figura A1.1: Red Nacional de Estaciones Sismológicas y estaciones regionales.

Actualmente el 90% de las estaciones de la RNES posee, como sistema de registro, un sistema digital de adquisición de datos de 24 bits, que incluye un GPS que incorpora la señal horaria y las coordenadas del lugar. Además cada estación posee un sistema de comunicación para enviar los datos al INPRES que varía según la infraestructura que posee la zona donde esta se ubica. Los canales de comunicación pueden ser satelital, Internet, radio enlaces, o telemetría analógica y posterior digitalización en INPRES Central.

Con el fin de evitar pérdidas de la información adquirida, ante una interrupción de las comunicaciones, los equipos de adquisición de datos digitales, utilizan como medio de almacenamiento un soporte magnético, de capacidad variable. Esta configuración, permite que el equipo siga adquiriendo información por un periodo suficiente, hasta

tanto se restablezca el enlace o el inconveniente que ocasionó la interrupción de la transferencia de la información.

Sismicidad en Argentina

La actividad sísmica de Argentina se concentra principalmente en el oeste partiendo desde los 34° de latitud sur hacia el norte, a lo largo de la cordillera de los Andes (Figura AI-2), por lo que es la zona donde se ha concentrado la mayor cantidad de estaciones sismológicas.

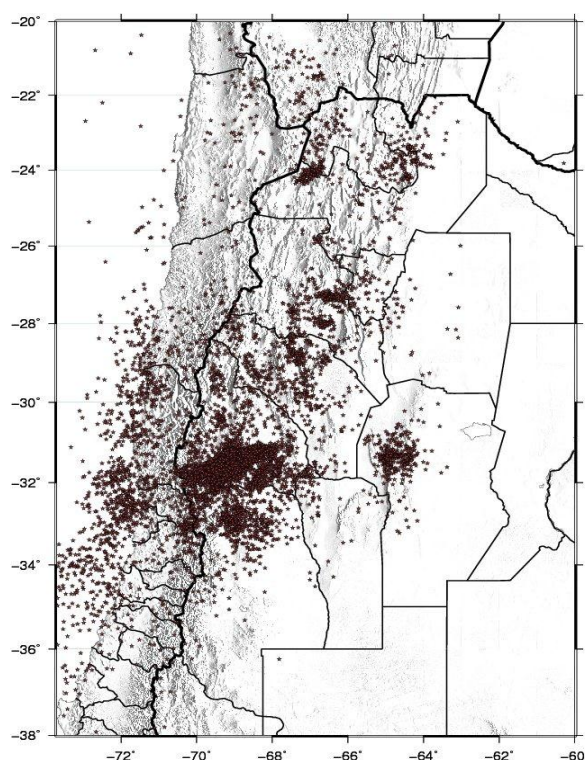


Figura AI.2: Sismos detectados por INPRES en el año 2012 (Fuente: INPRES).

Esta región se encuentra en un ambiente tectónico producto del choque entre la Placa de Nazca que se desplaza hacia el Este y la placa Sudamericana que se desplaza hacia el oeste. Ese choque produce el hundimiento, en forma de cuña, de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana, proceso que se denomina subducción (Figura AI-3). Estos esfuerzos tectónicos provenientes del oeste producto de la interacción de estas dos placas tectónicas, son generadores de sismos, deformaciones en superficie, fallas, y otras actividades geológicas.

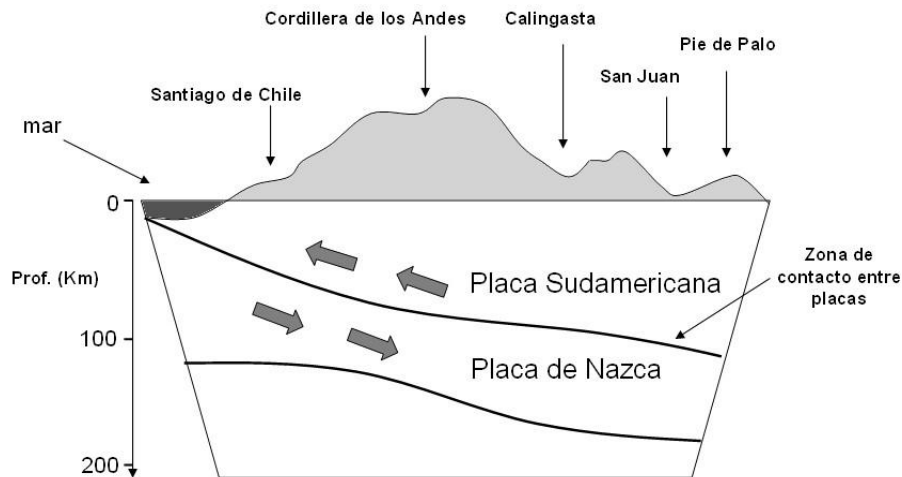


Figura A1.3: Subducción de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana. Corte transversal (Este-Oeste), a los 30-33° de latitud Sur. (Escala vertical ampliada).

3. CONCEPTOS BÁSICOS DE SISMOLOGÍA

Sismos

La superficie terrestre (litosfera) está compuesta por placas tectónicas, que flotan sobre rocas ígneas fundidas que conforman el centro de la tierra (astenósfera). Las placas tectónicas (Figura AI-4) se encuentran en constante movimiento produciendo rozamientos y deformaciones en los puntos de contacto (fallas), que lentamente con el transcurso del tiempo, acumulan grandes cantidades de energía en los puntos de contacto y también en el espacio interior de las placas.

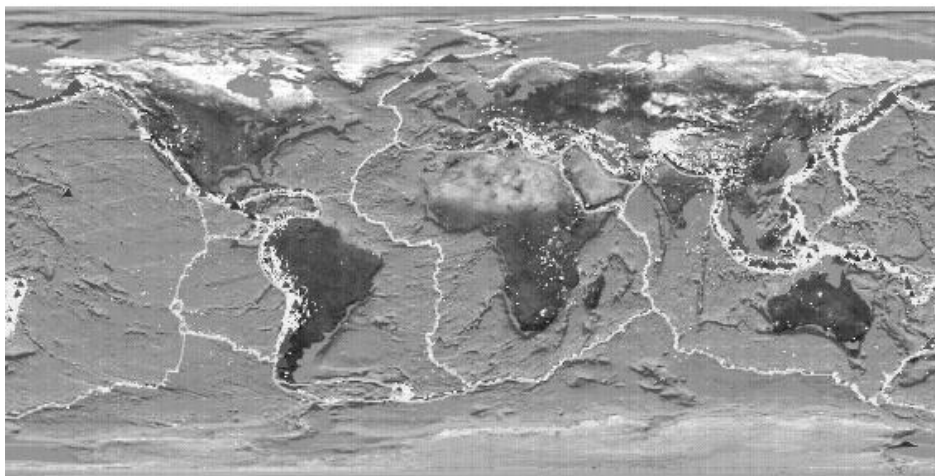


Figura A1.4: Placas tectónicas de la tierra (tomada de Havskov 2008).

Cuando la energía acumulada supera el límite elástico de las rocas, la energía es liberada, produciendo la rotura de las rocas en forma súbita y violenta (Figura AI-5). La liberación brusca de energía se transforma en energía calórica y en energía de deformación elástica de las rocas, esta última es la que genera ondas sísmicas que se propagan por el interior de la Tierra, que es percibida como una vibración y que se denomina Sismo. Aunque en Argentina es común utilizar la palabra Terremoto para referirse a un sismo importante, el significado de ambos términos es el mismo y en esta tesis se utilizan ambos en forma indistinta.

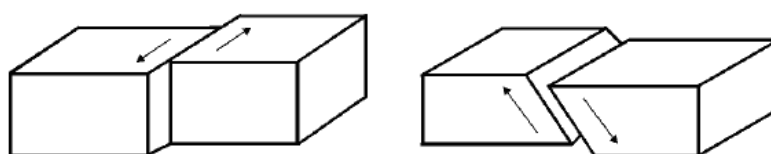


Figura AI.5: Tipos de fallas. Falla vertical moviéndose horizontalmente (izquierda) y falla inclinada moviéndose en un ángulo vertical (derecha). (Tomada de Havskov 2008.)

El movimiento de las placas es el principal generador de energía acumulada y los terremotos más grandes ocurren en los límites de las placas, llamados terremotos interplaca. Sin embargo, una cantidad importante de sismos pueden ocurrir en el interior de las placas (terremotos intraplaca). Esto ocurre cuando, por ejemplo, el estrés generado en los límites de las placas se propaga al interior de las mismas, formando fallas que pueden ser fuente de sismos más pequeños. Las fallas pueden ser muy pequeñas (metros) con sólo una fracción de un deslizamiento cuando hay una ruptura, a muy grandes (hasta miles de Km.), con decenas de metros de deslizamiento en las rupturas. Las fallas más grandes liberan mucha más energía que las mayores explosiones nucleares. El tamaño del sismo, relacionado con la liberación de energía, se expresa a través de la magnitud.

Epicentro e Hipocentro

El punto en el interior de la tierra, donde comienza la fractura, y del cual se irradian las ondas sísmicas, se denomina Hipocentro o foco. Por otra parte, la proyección a la superficie terrestre ubicado justo sobre el foco del sismo (determinado por latitud y longitud), se denomina Epicentro. En esta tesis se utilizan, según el caso que corresponda, uno u otro.

La distancia epicentral se define como la longitud que existe entre el epicentro y la estación sismológica, donde se efectuó el registro del sismo (Figura AI-6).

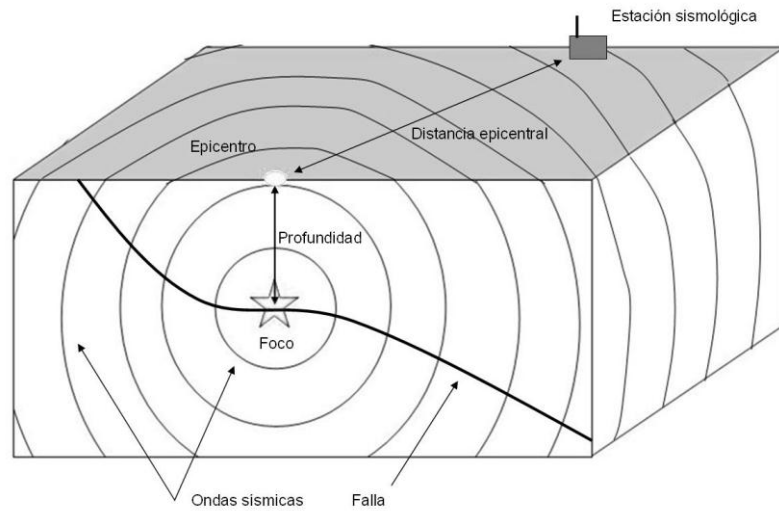


Figura AI.6: Corte de la tierra ilustrando el esquema de la propagación de ondas, hipocentro o foco, epicentro y distancia epicentral.

Ondas Sísmicas

Las ondas sísmicas son ondas de choque radiadas hacia el exterior desde el punto, en el interior de la tierra, donde se ha producido el terremoto. Hay dos tipos principales de ondas: las Ondas de Cuerpo u Ondas Internas que son las que viajan por el interior de la tierra y las Ondas Superficiales que viajan solamente por la superficie terrestre (Figura AI-7). Para los efectos de esta tesis, se conceptualizará las ondas de cuerpo.

Ondas de Cuerpo

Las ondas de cuerpo viajan a través del interior de la tierra, siguiendo caminos curvos debido a la variada velocidad y composición del interior de la Tierra. Este efecto es similar al de refracción de las ondas de luz. A su vez las ondas de cuerpo se dividen en dos grupos: ondas primarias (P) y secundarias (S) (Figura AI-7). Las Ondas Primarias u Ondas P son ondas longitudinales o compresionales, lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de propagación. Estas ondas generalmente viajan a una velocidad 1,73 veces mayor que la de las ondas S, y pueden viajar a través de cualquier tipo de material líquido o sólido. Velocidades típicas son 1,450Km/s en el agua y cerca de 7-8Km/s en el granito. Estas ondas, al ser las primeras en llegar, son las que se utilizan generalmente en los sistemas de localización

automática para poder determinar un sismo en forma rápida. Las Ondas Secundarias u Ondas S son tipos de ondas que poseen un desplazamiento transversal a la dirección de propagación. Su velocidad es menor que la de las ondas primarias.

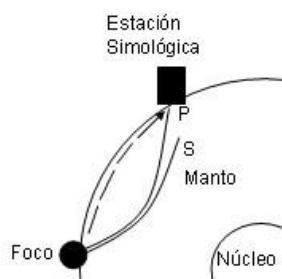


Figura A1.7: Ondas internas (P y S) y ondas superficiales (con línea discontinua), ilustrando los diferentes trayectos.

Debido a ello, éstas aparecen en el terreno un tiempo después que las primeras y son las que generan las oscilaciones durante el movimiento sísmico y las que producen la mayor parte de los daños. Sólo se propagan a través de elementos sólidos y no líquidos, esta es la razón por la que no atraviesan el núcleo terrestre.

Debido a la estructura interna de la tierra, las ondas sísmicas pueden viajar por diferentes caminos entre la fuente y el lugar de registro y esto puede resultar en señales que contiene muchas mas fases que las P y S, tales como las ondas Pn y Pg, entre otras, cuya definición y tratamiento, exceden el alcance de este trabajo.

Sismogramas y cálculo de hipocentros

Las estaciones sismológicas registran permanentemente, en forma continua, el movimiento del suelo. Esta información se almacena digitalmente y se denomina sismograma o waveform (archivo de forma de onda). En localización de hipocentros, una de las tareas más importantes es determinar a partir de los sismogramas, los tiempos de arribo de las ondas a la estación sismológica (también denominadas fases o lecturas). En la figura AI-8 se muestran 55 segundos de registro digital en la estación sismológica de La Laja (RTLL) ubicada en la provincia de San Juan. En este registro se observa la llegada de las ondas P y S. Como se ve en la figura AI-8, la marca de tiempo (timestamp) es realizada constantemente, de manera que se puede determinar la hora de cada una de las fases.

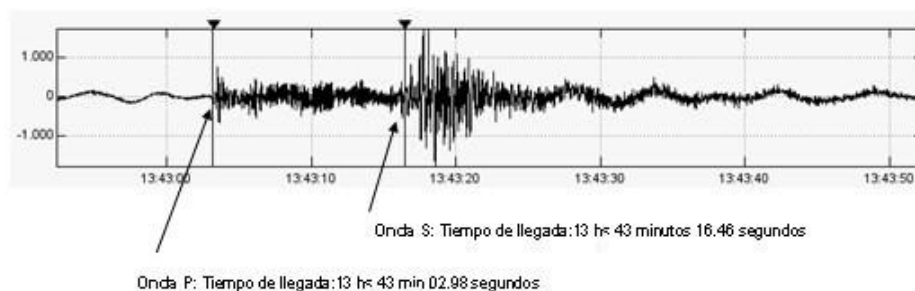


Figura A1.8: Sismograma con tiempos de arribo de las ondas P y S (Señal de la estación sismológica RTLL, La Laja, San Juan, Argentina).

Una manera simple de efectuar la localización del epicentro (no hipocentro) de un sismo es a partir de realizar una triangulación, para lo cual es necesario disponer, como mínimo, el dato de tres estaciones sismológicas.

Como se ha indicado, cuando se produce un sismo, las ondas P y S se irradian en todas las direcciones y, por sus características de propagación, estas ondas viajan a diferentes velocidades. Al ser la onda P más velóz que la S, la onda P se va alejando paulatinamente de la onda S a medida que el epicentro está más alejado. Por lo tanto, mientras más lejos se encuentre una estación del epicentro del terremoto, mayor será la diferencia de tiempo de llegada entre la onda P y la onda S; por lo tanto esta diferencia de tiempo (T_s-p) proporciona una medida de cuán distante está el epicentro del lugar de medición. Considerando a la Tierra compuesta por una sola capa y completamente homogénea, se puede adoptar la velocidad de la onda P como constante, y a partir de ella saber el recorrido en kilómetros que le demandó emplear el tiempo T_s-p .

Como ejemplo, en la figura AI-9 se ilustran los sismogramas de un sismo ocurrido a las 9:05:12 del 17 de junio de 2013 con ubicación en la provincia de Jujuy (latitud -24.050, longitud -66.830).

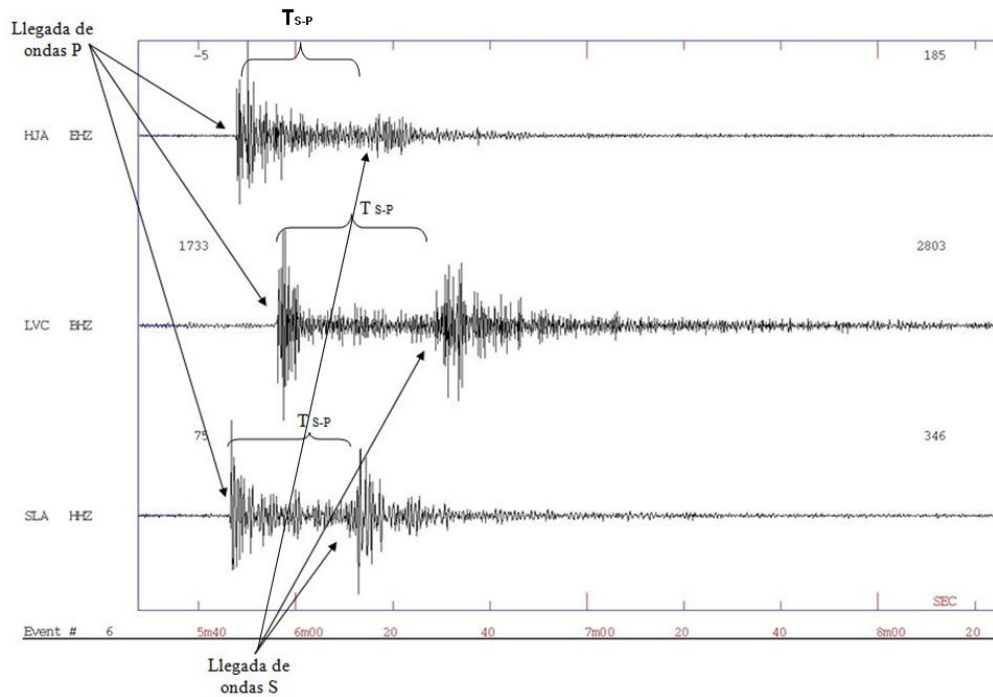


Figura A1.9: Sismograma registrado en las estaciones HJA, SLA y LVC, mostrando el tiempo S-P para LVC y SLA.

Estos registros son obtenidos en tres estaciones sismológicas diferentes: HJA (Jujuy Argentina), SLA (Salta Argentina) y LVC (Chile). Los símbolos Ts-p, corresponden a las diferencias de tiempos entre el arribo de las ondas P y el de las ondas S, para cada una de las estaciones. La mayor distancia del epicentro a la estación se da para LVC, ya que es la que posee mayor diferencia de tiempo Ts-p.

Adoptando los valores de Ts-p de: 26.2 seg. 43.6 seg. y 27.3 seg. para las estaciones SLA, LVC y HJA respectivamente (Tabla 1), y considerando la velocidad de la onda P constante $V_P = 7.0^{23}$ Km./seg., las distancias al epicentro de cada una de las estaciones serán: 183 Km., 305 Km. y 191 km.

Estación	Ts-p	Distancia (en Km)
SLA	26.2 seg.	183
LVC	43.6 seg.	305

²³ Existen numerosos modelos de tablas de tiempo, sin embargo el valor expresado de 7.0km para las ondas P es una medida general que actualmente se utiliza para sismos locales o regionales y se corresponden a la tabla de Jeffreys Bullen (1970). A medida que las distancias son mayores, los valores son menos confiables y es necesario utilizar un modelo global denominado IASPEI91.

Estación	Ts-p	Distancia (en Km)
HJA	27.3 seg.	191

Tabla A1.1: Diferencias de tiempos. Sismo de las 9h:05m:12s, día 17/06/2013 con epicentro en la provincia de Jujuy, Argentina.

Lo cual se interpreta que el hipocentro del sismo estará a 183 Km. de la estación SLA, a 305 Km. de la estación LVC y a 191 Km. de la estación HJA.

La manera de determinar el epicentro es trazando círculos con centro en cada estación, cuyos radios representan, a escala, las distancias calculadas, como se ve en la figura A1-10. El punto donde los tres círculos se interceptan será el punto origen del sismo o epicentro. Los círculos rara vez se cruzan en un punto, lo cual indica error en las observaciones y/o que se ha asumido un foco muy superficial. De hecho, Ts-p es el tiempo de viaje para distancia del hipocentro, que es para sismos con profundidad mayor a cero Km. y no a la distancia del epicentro.

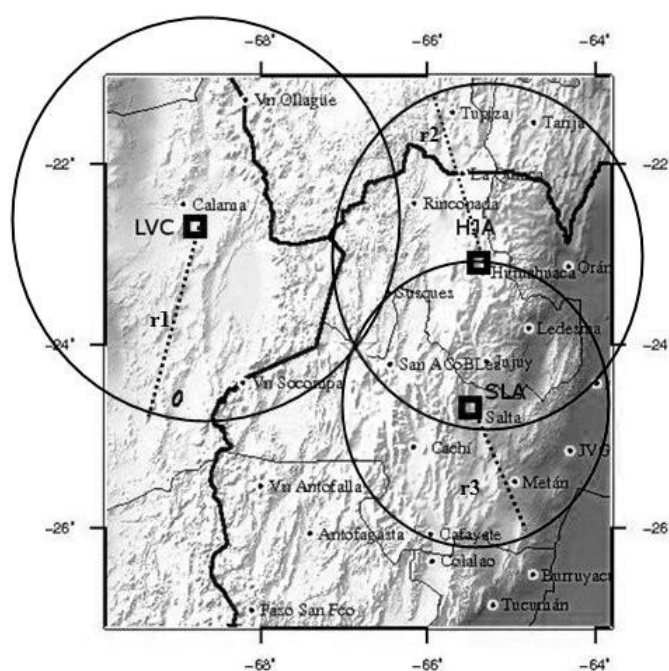


Figura A1.10: Determinación de epicentro con tres estaciones. LVC, HJA y SLA en la intersección de los tres círculos. (Fuente: INPRES).

El método antes descrito, tan simple y bastante ilustrativo, era utilizado antes del empleo de los programas de análisis existentes. En la actualidad el cálculo de hipocentro

(no de epicentro) es más complejo, se hacen intervenir todas las estaciones disponibles (no sólo tres), para considerar todas las direcciones posibles. En el proceso de cálculo intervienen modelos de cortezas específicos para cada región, lo que hace variar los tiempos de propagación de las ondas P y S en toda su trayectoria en función del modelo de corteza terrestre de las zonas donde ocurre el sismo.

Las señales sísmicas digitales ingresan automáticamente en los sistemas de procesamiento sismológico, y en éstos se efectúan cálculos en base a modelos matemáticos, realizando iteraciones de prueba y error, entregando valores con probabilidades máximas de localización.

Gap

Un concepto importante que se debe tener en cuenta en localización de sismos es el de gap, que es el mayor ángulo azimutal entre estaciones que registran el sismo y en general entre más pequeño sea este número (alrededor de 90°) más confiable es la localización del sismo. Este punto tiene relación con la distribución geográfica de las estaciones sismológicas que registran un sismo y si la distribución geográfica de las estaciones “rodean” al sismo, entonces el gap será menor.

Intensidad y Magnitud

Además de la localización de un sismo, otros datos importantes son el cálculo de Intensidad y de Magnitud. Ambos permiten cuantificar un sismo en distintas medidas. La Intensidad es una medida subjetiva de evaluar un sismo ya que no depende de medidas instrumentales, sino de la información de una persona que ha sentido el sismo, obtiene de los efectos y daños producidos por un terremoto en las construcciones hechas por el hombre, los objetos, el terreno y el impacto que provoca en las personas. Su valor depende de la distancia al hipocentro, tipo de construcciones, calidad del suelo o roca del lugar, etc. La naturaleza subjetiva de la intensidad sísmica genera problemas al comparar los efectos de los terremotos analizados en diferentes épocas de estudio, ya que se basa solamente en las evaluaciones, observaciones y percepciones que las personas realizan sobre los efectos ocasionados por el sismo. Los primeros intentos que se hicieron para catalogar y cuantificar los sismos se basaron en su poder destructivo, haciendo estudios descriptivos de los daños ocasionados por ellos. Existen diferentes escalas para medir la intensidad, sin embargo la mayoría de las escalas sísmicas poseen doce grados de intensidad y son aproximadamente equivalentes entre sí en los valores, y

tienen pequeñas variaciones en el grado de sofisticación empleado en su formulación. Ninguna de ellas posee una base matemática, sino que emplean una clasificación arbitraria basada en los efectos observados. La más utilizada en el hemisferio occidental es la Mercalli Modificada (MM), que es cerrada y contiene doce grados expresados en números romanos que van del I al XII indicando cada uno de ellos distintos niveles de intensidad desde imperceptible para la mayoría excepto en condiciones favorables (grado I) hasta la destrucción total con pocos supervivientes (grado XII).

La magnitud es una medida instrumental relacionada con la energía elástica liberada por un sismo. Es un valor único, que se obtiene matemáticamente del análisis de los sismogramas. Existen diferentes escalas para medir la magnitud, aunque la más difundida es la de Richter [Richter, C., 1935]. Ésta es una escala abierta, por lo cual no tiene límite superior ni inferior; su valor es logarítmico. En esta escala, un sismo de menos de 3.0 generalmente no es sentido por la población, un sismo de 3 a 5 grados es a menudo sentido, pero rara vez puede causar daño. A partir de allí puede causar daños que van de leves a grandes según la calidad de la construcción de los edificios. Un sismo de 6 a 7 grados puede ser destructivo en áreas de hasta unos 100 kilómetros. Un sismo de 7-7.9 puede causar graves daños en zonas más extensas y 8 grados o más, puede causar daños gravísimos en áreas de cientos de kilómetros.

El último gran terremoto ocurrido en Argentina el 23 de noviembre de 1977, con epicentro en la provincia de San Juan, alcanzó 7,4 grados de magnitud. Si bien la escala de Magnitud compara cuantitativamente grandes y pequeños terremotos, dice muy poco acerca de las características físicas de sus fuentes. Por lo tanto, para tener una mayor precisión de las características sísmicas, es necesario relacionar la escala de magnitud a un parámetro físico básico como lo es la energía. Esta comparación se puede apreciar en la figura AI-11, donde se muestran las magnitudes para todos los sismos registrados en Argentina y también sismos lejanos importantes durante el año 2012.

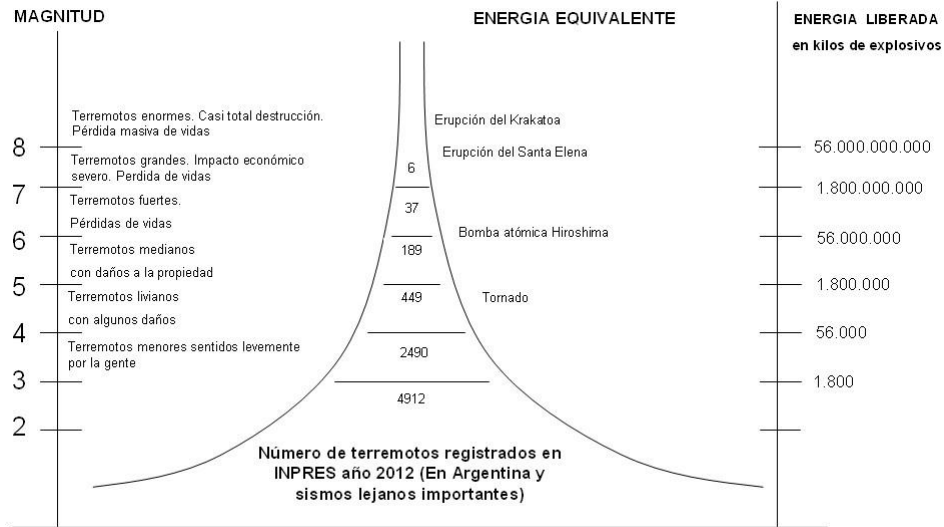


Figura A1.11: Energía liberada según la magnitud del sismo. Comparación con la energía equivalente. (Fuente: sismos registrados por INPRES en 2012)

El cálculo de la magnitud se efectúa automáticamente por software, y se obtiene exclusivamente a partir del dato instrumental suministrado por cada estación sismológica, esto exige que, previamente, cada estación deba estar debidamente calibrada²⁴. El proceso se basa en el análisis del máximo desplazamiento del suelo sufrido por la onda en cada estación. El valor definitivo de magnitud, para cada sismo, se obtiene a partir del promedio matemático del total de los valores de magnitudes surgidas de todos los registros sísmicos analizados. Previamente al cálculo del valor final, se debe establecer el margen de dispersión permitido, con lo cual el programa rechaza las magnitudes que se encuentran fuera de él.

Resulta evidente que para un mismo terremoto la intensidad tendrá distintos valores, dependiendo del lugar en dónde se realice el análisis de los daños causados en los edificios, efectos en el terreno y en las personas; mientras que la magnitud tendrá un único valor ya que está relacionada con la energía que liberó el terremoto.

Los estudios realizados por Richter demostraron que a mayor energía intrínseca de un terremoto, mayor era la amplitud del desplazamiento del terreno sufrido por el terreno para una distancia dada. Si bien, inicialmente su trabajo fue calculado únicamente para

²⁴ La calibración de los equipos sísmicos se refiere al conjunto de operaciones con las que se establece la correspondencia entre los valores indicados en las señales obtenidas, y los valores conocidos correspondientes a una magnitud de medida, asegurando así la trazabilidad de las medidas a las correspondientes unidades básicas y procediendo a su ajuste o expresando esta correspondencia por medio de curvas de corrección (curvas de calibración).

ciertos sismómetros específicos, y sólo para terremotos en el sur de California, los sismólogos han desarrollado factores de escala para ampliar la escala de magnitud Richter a muchos otros tipos de medición en todo tipo de sismómetros, y alrededor del mundo.

Para calcular la magnitud de un sismo a partir de un sismograma como se muestra en la figura AI-12, se parte de la medición de la amplitud A de la onda sísmica, que representa el máximo desplazamiento del terreno, y que está expresado en milímetros (tomando referencia que el sismograma fue registrado con un tipo especial de equipo denominado Word-Anderson) y se calcula Δt que es la diferencia de tiempo T_s-p (indicada en segundos), entre el arribo de la onda P y la onda S. La ecuación utilizada por Richter (para la región del sur de California) es:

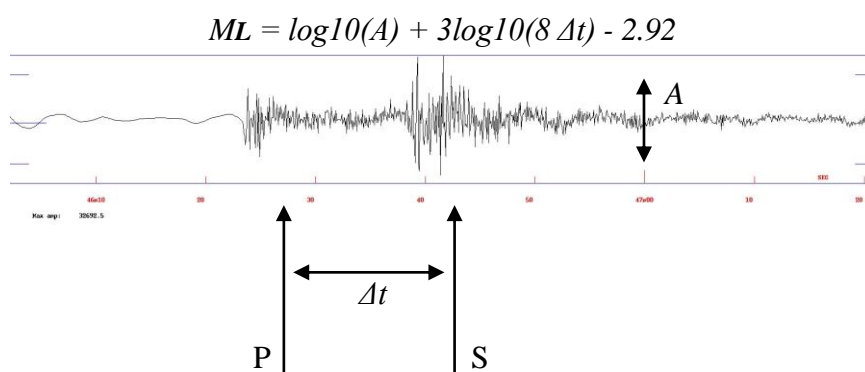


Figura AI.12: Sismograma mostrando la Amplitud y el Δt entre las ondas P y S. (señal de la estación SLA, San Lorenzo, Provincia de Salta Argentina para un sismo del 18 Julio 2013 a las 24.46.)

ANEXO II: ALGORITMOS, PARSER Y

MIDDLEWARE

1. INTRODUCCIÓN

En esta sección se ofrece una descripción detallada de aspectos utilizados para la propuesta del capítulo IV, entre los que se incluyen los algoritmos Punto en Polígono, Distancia por Gran Círculo y se describe la forma de obtener la orientación geográfica de un sismo en relación a ciudades cercanas utilizando el concepto de gap azimutal. Posteriormente se describe el funcionamiento del parser con el significado sintáctico de los datos relevantes almacenados en oldquake.dat y en los archivos de lecturas de EarlyBird relacionados. Finalmente se muestra el funcionamiento de los procesos del Middleware entre EarlyBird y Seisan con un ejemplo real.

2. ALGORITMOS

Punto en polígono

La determinación de la provincia, (o país/región) donde se encuentra ubicado el epicentro de un sismo se logra con una implementación del algoritmo basado en el Teorema de la curva de Jordan, comúnmente llamado “Punto en Polígono”, demostrado por [Hales, T., 2007] y utilizado para determinar si un punto se encuentra en el interior o exterior de un polígono complejo. La mayor parte de la referencia tratada en la sección Descripción, que sigue, ha sido tomada de [Finley, D. R, 2007]

Descripción

Dado un punto expresado en valores de (x,y) y dado una curva cerrada (polígono cerrado), también expresado en un conjunto de valores (x,y) , el algoritmo indica si el punto se encuentra en el interior o exterior del polígono. Para lograr esto, si se traza una semirrecta desde el punto de test hasta el exterior del polígono y si la recta cruza (no en forma tangencial) en un número par de puntos al polígono, entonces el punto está fuera. Si la cantidad de veces que el punto corta al polígono es impar, entonces el punto se encuentra dentro del mismo. Para implementar esta función, en esta tesis se adapta la formulación original de la semirrecta y en su lugar, se considera una sola recta que pase por el valor “y” del punto en cuestión. Luego se compara cada lado del polígono con el valor de la coordenada vertical “y” del punto a considerar. Se controla una lista de nodos, donde cada nodo es un punto donde el valor de “y” corta o cruza (no tangente) el polígono. Entonces, si hay un número impar de cruces en cada lado del punto de test, este se encuentra en el interior del polígono. Si hay un número par de cruces a cada

lado, entonces el punto está fuera del polígono. Al considerar una recta que pase por el valor de “y” se está considerando un caso especial de dos semirrectas que parten del punto de test.

Para ilustrar esto, se muestra la figura AII-1 de un polígono complejo con un punto de test en su interior, y la figura 2 con un punto en el exterior del polígono (en ambos casos el punto de test se dibuja como un punto sin relleno). En el caso de la figura AII-1, hay un punto a la izquierda del punto de test (por su valor en las y) y tres puntos a la derecha. Por lo tanto, hay un número impar de cruces a cada lado y el algoritmo concluye que el punto se encuentra en el interior del polígono.

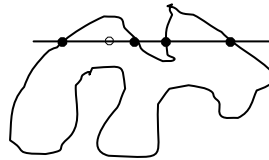


Figura AII.1: Punto en el interior de un polígono (adaptado de Filney, 2007)

En el caso de la figura AII-2, hay cuatro puntos a la izquierda del punto de test (por su valor en las y) y hay dos puntos a la derecha del punto de test. Por lo tanto, hay un número par de cruces a cada lado de las semirrectas y el algoritmo concluye que el punto se encuentra fuera del polígono.

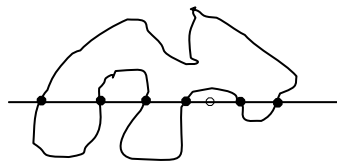


Figura AII.2: Punto en el exterior de un polígono (adaptado de Filney, 2007)

Regiones

Se ha considerado a cada una de las 23 provincias argentinas y a los países limítrofes como polígonos cerrados, donde los valores de los puntos (x,y) determinan su división política. El valor de las “x” se asocia a la longitud, en tanto que el valor de “y” se asocia a la latitud. La unión de los distintos puntos (x,y) hace segmentos, que a su vez son los lados del polígono que representa a cada provincia o región. También se ha definido un polígono para una región que abarca a la totalidad del mar argentino (incluyendo a las Islas Malvinas, Georgias y Sandwich del Sur).

Ejemplo de los primeros cinco puntos para el polígono Mendoza:

```
-69.1175665506573 -32.0137785424511  
-69.1169896086479 -32.0187583982646  
-69.1130910112391 -32.0224861191165  
-69.1105876280239 -32.0239219494347  
-69.1080970707150 -32.0253484063441
```

Ejemplo de los primeros cinco puntos para el polígono La Rioja:

```
-68.4992758326229 -27.7559883888503  
-68.5074849504654 -27.7810745325511  
-68.5078649591484 -27.7830517850572  
-68.5082956666432 -27.7850281137982  
-68.5087162555016 -27.7870046240783
```

Casos ambiguos

El algoritmo tiene una falla conocida, y es que no funciona para puntos donde la recta cruza tangencialmente a un polígono. Esto presenta una limitación para el caso de epicentros que se encuentren en el límite exacto de dos provincias. Aunque esto ultimo es muy poco probable, la solución que se propone en esta tesis ha sido confeccionar polígonos con puntos (x,y) que tienen mayor cantidad de valores después de la coma (trece lugares, como se ve en el ejemplo de puntos para Mendoza o La Rioja mostrado antes), sabiendo que el sistema de localización automática genera epicentros con puntos de hasta tres valores decimales, con lo cual un epicentro siempre estará dentro o fuera de un polígono, pero nunca en el limite.

Implementación

La implementación del algoritmo se hace con un programa que dado un punto (epicentro), retorna un string con el nombre del polígono donde ese punto se encuentra. El programa hace la búsqueda en cada polígono definido, comenzando en orden por aquellos que poseen mayor sismicidad histórica (San Juan, Mendoza, Salta, Jujuy, así sucesivamente) y evitar sobrecarga de trabajo. Una vez que encuentra el polígono contenedor del punto, finaliza el proceso. Si recorre todos los polígonos definidos sin resultado, retorna un string “No Encontrado”.

Distancias por el gran círculo

Hay varias formas de calcular la distancia entre dos puntos en la superficie de la tierra, definidos en términos de latitud y longitud. Puesto que la menor distancia entre dos puntos en una esfera (como la tierra) es un arco, no una línea recta, en esta tesis se

utiliza el método basado en trigonometría esférica denominado Gran Círculo y que considera un modelo de esfera para representar a la tierra. La distancia por Gran Círculo es la distancia mas corta entre puntos sobre la superficie de una esfera. Esta distancia coincide con un círculo que pasa por los dos puntos y también por el centro de la esfera.

El método aplicado en esta tesis asume la tierra con un radio de 6371.227 Km. y 111.2 Km. para la longitud de un arco con un ángulo de un grado.

Sean $(lat0, long0)$ y $(lat1, long1)$ las latitudes y longitudes (en radianes) respectivas para dos puntos geográficos, entonces la distancia entre ellos esta dada por la fórmula:

$$dist = 111.2 * (180 \div \pi) * \arccos \left(\begin{array}{l} sen(lat0) * sen(lat1) + \\ cos(lat0) * cos(lat1) * \\ cos(long1 - long0) \end{array} \right)$$

Dado que la consideración de esfera no es exacta para el caso de la tierra, este método tiene cierto grado de error, aprox. 200 metros por cada 50 Km. [Chamberlain, R., 1996], el cual se considera aceptable dado que el uso de este algoritmo es para ciudades cercanas a un epicentro (menos de 200 Km.).

Implementación

Para calcular la distancia de un sismo, respecto a una ciudad, se ha confeccionado un archivo con ciudades y pueblos de Argentina (214) indicando, para cada uno de ellos: latitud, longitud y nombre (figura AII-3). Entonces, dado un epicentro, se calcula la distancia a todos los pueblos o ciudades incluidas en el archivo y seleccionando los tres mas cercanos.

```
-58.86,-34.16,Campana
-58.65,-38.56,Necochea
-68.39,-33.07,San Martín
-59.01,-34.58,Luján
-60.35,-26.79,Roque Sáenz Peña
-60.86,-34.59,Junín
-60.23,-36.90,Olavarría
-60.47,-33.90,Pergamino
-69.14,-51.62,Río Gallegos
-61.40,-31.25,Rafaela
-58.94,-34.09,Zárate
-70.09,-22.09,Tocopilla
-63.16,-32.41,Villa María
-65.23,-43.25,Trelew
-59.05,-37.32,Tandil
-71.22,-41.14,Bariloche
-65.37,-33.69,Mercedes
-68.24,-34.62,San Rafael
-64.20,-36.62,Santa Rosa
-60.14,-33.33,San Nicolás
-67.39,-45.86,Comodoro Rivadavia
-57.93,-31.39,Concordia
-64.25,-33.13,Río Cuarto
-66.75,-29.41,La Rioja
-66.25,-33.31,San Luis
-65.68,-28.47,Catamarca
-58.08,-26.18,Formosa
-60.42,-31.74,Paraná
-68.15,-38.95,Neuquén
-64.69,-23.82,Ledesma
-59.34,-34.66,Mercedes
```

Figura AII.3: Vista del archivo de ciudades de Argentina (parcial).

Orientación geográfica

Otro aspecto necesario es poder determinar la orientación de un evento dado, como por ejemplo: “a 50 Km. al NO de San Juan”, en relación a las ciudades cercanas, información que será almacenada. La imagen AII-4, muestra la salida de un s-file con datos de orientación geográfica en relación a tres ciudades cercanas y de región donde ocurre el evento.

Relación a ciudades cercanas	→	2013 5 9 1040 13.9 L -31.270 -68.635106.7 SJA 17 0.4 3.8LSJA 4.0WSJA 1	1
		LOCALITY: 31 km al NO de San Juan	3
		LOCALITY: 53 km al NO de Caucete	3
		LOCALITY: 75 km al E de Calingasta	3
Provincia o región Geográfica	→	ACTION:UP 13-05-09 09:53 OP:rg STATUS: ID:20130509103737 I	
		OLDACT:UP 13-05-09 09:49 OP:mape STATUS: ID:20130509103737 3	
		OLDACT:REE 13-05-09 09:49 OP:ERBO STATUS: ID:20130509103737 3	
		FELTPROV: SAN JUAN	3
		2013-05-09-1037-37S.CBA___081	6
		STAT SP IPHASW D HRMM SECON CODA AMPLIT PERI AZIMU VELO AIN AR TRES W DIS CAZ7	
		RTLL HZ EP 1040 29.75 170 0.2910 16.6 113	
		RTLL HZ IAML 1040 29.90 4286.2 0.24 16.6 113	
		RTLL HZ ES 1040 40.45 170 -0.4910 16.6 113	

Figura AII.4: Vista de un archivo s-file con incorporación de ciudades y región.

Implementación

Para implementar la orientación geográfica, se divide todo el espectro geográfico (360 grados) en 8 cuadrantes de 45° cada uno, como se muestra en la figura AII-5,

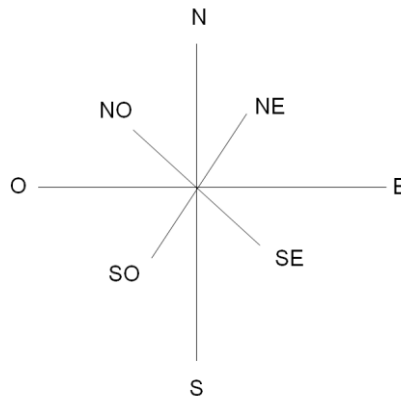


Figura AII.5: División en cuadrantes del espectro geográfico.

Considerando que el azimut, (orientación geográfica de un punto determinado por $lat0$, $long0$ respecto de otro, determinado por $lat1$, $long1$, puede ser calculado por la formula:

$$azimut = 180 - \frac{180}{\pi} \arctng \left(\frac{\frac{\text{sen}(long1 - long0)}{\text{sen}(lat0) * \cos(long1 - long0)} - \cos(lat0) * \tan(lat1)}{\cos(lat0) * \tan(lat1)}} \right)$$

, la que da un valor entre 0 y 359.99 grados. Entonces, habiendo definido los ocho cuadrantes, se puede encontrar que:

$$Cuadrante = \frac{8}{\left(\frac{azimut}{45} \right)}$$

Redondeando, da un resultado entre 1 y 8, numero que se relaciona con caracteres que representan cada uno de los cuadrantes: ("S", "SO", "O", "NO", "N", "NE", "E", "SE"). De esa manera se puede establecer en que cuadrante queda comprendido un epicentro en relación a cada una de las ciudades.

3. ANALIZADOR SINTÁCTICO. PARSER

En el proceso erb2db del middleware presentado en el capítulo IV, implementa un analizador sintáctico que obtiene los datos de localización de epicentro de un sismo a partir de los archivos oldquakex.dat y archivo .dat respectivo a ese sismo. Con esa información, genera los datos que serán incluidos en el s-file a registrar en Seisan.

Archivo oldquakex.dat

En este archivo, cada fila es el dato de la localización de un sismo los campos están separados por un espacio en blanco, una fila cualquiera de oldquakex.dat puede ser:

```
1396532840.468545 -21.338425 -66.425106 3.249390 3 1 245 012304 5 8 0.573437 109.000000
0.000000 0 3.249390 3 0.000000 0 2.372419 2 0.000000 0 1396532876.380000 3
```

En la tabla 1 se muestra el significado de los campos de cada línea de oldquakex.dat. Los campos están separados por el carácter espacio “ ” y numerando desde cero.

Campo	Significado
0	fecha y hora del ocurrencia del sismo en formato epoc (cantidad de segundos desde las 0 horas del 1 de Enero de 1970). Es el valor tomado por t0, mencionado en el capítulo 4.
1	Latitud
2	Longitud
6	Profundidad
7	id_old. Identificador que EarlyBird asigna al sismo
9	cantidad de estaciones leídas
11	Azimut
14	magnitud ML

Campo	Significado
18	magnitud MWP

Tabla AII.1: Significado de los campos de oldquakex.dat.

Para la descripción anterior, se ha omitido información no relevante para este trabajo, como los campos 3,4,5,7,8,10,12,13,14,15,16 y 17

Archivo .dat

En este archivo, cuyo nombre está dado por el identificador id_old de la fila relacionada en oldquakex.dat, con el cual tiene vínculo tipo Maestro-Eslavo. Para continuar con el ejemplo anterior (valor del campo 7) el nombre del archivo para las lecturas del sismo sería 12304.dat Un archivo completo tiene el conjunto de lecturas para un sismo dado. Una fila del archivo 12304.dat es una lectura de de una estación, por ejemplo la lectura de la estación YJA SHZ RI – para el sismo N° 12304 es:

```
YJA SHZ RI -- 1396532876.380000 eP 64.881328 0.300000 1396532876.980000 34.779646 0.300000  
1396532877.680000 0.000000 0.000000 0.000000 1.302590E-008 3.000000 -0.350937 1 4833 ?  
0.000000 0.000000 0.000000 2.261809
```

x

En la tabla 2 se muestra el significado de los campos relevantes utilizados para el presente trabajo para una fila, considerando que están separados por el carácter espacio “ ” y numerando desde cero.

Campo	Significado
0	sigla de la estación
1	componente
2	Identificador de la red sísmica (Para la RNES es RI)
4	fecha y hora del valor de la lectura para esa estación

Tabla AII.2: Significado de los campos del archivo de lecturas.

Para la descripción anterior, se ha omitido información no relevante para este trabajo.

4. EJEMPLO DEL FUNCIONAMIENTO DEL MIDDLEWARE

En esta sección se presenta un caso de estudio con el objeto de realizar un seguimiento del comportamiento del middleware. Se toma un sismo ocurrido a las 13:47 del 03 de Abril de 2014.

Una vez que el sismo ha sido localizado por EarlyBird, éste le asigna el número 12304 y, en el archivo oldquakex.dat se genera una fila:

1396532840.468545 -21.338425 -66.425106 3.249390 3 1 245 012304 5 8 0.573437 109.000000
0.000000 0 3.249390 3 0.000000 0 2.372419 2 0.000000 0 1396532876.380000 3

Y también se genera el archivo 12304.dat, que contiene las lecturas para cada estación sísmica recibida para ese sismo:

YJA SHZ RI -- 1396532876.380000 eP 64.881328 0.300000 1396532876.980000 34.779646 0.300000
1396532877.680000 0.000000 0.000000 0.000000 1.302590E-008 3.000000 -0.350937 1 4833 ?
0.000000 0.000000 0.000000 2.261809
HJA SHZ RI -- 1396532884.450000 eP 42.508456 0.300000 1396532884.950000 43.932184 0.300000
1396532886.600000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000E+000 0.000000 0.653284 1 4846 ?
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
AZAP SHZ RI -- 1396532894.015000 eP 6.297400 0.300000 1396532896.015000 6.927140 0.300000
1396532896.115000 0.000000 0.000000 0.000000 8.564280E-009 3.900000 -0.421720 1 4836 U
0.000000 0.000000 0.000000 2.483029
PB06 BHZ CX -- 1396532895.743300 eP 34.489260 0.300000 1396532896.643300 57.660536 0.300000
1396532897.093300 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000E+000 0.000000 0.443539 1 4837 ?
0.000000 3.443788 0.000000 0.000000
PB15 BHZ CX -- 1396532898.073300 eP 138.280950 0.300000 1396532899.323300 388.402569
0.300000 1396532900.823300 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000E+000 0.000000 0.943462 1 4839
? 0.000000 4.334720 0.000000 0.000000
PB10 BHZ CX -- 1396532907.935000 eP 7.742754 0.300000 1396532908.185000 10.610441 0.300000
1396532910.785000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000E+000 0.000000 -0.767088 1 4843 ?
0.000000 3.112197 0.000000 0.000000
PB14 BHZ CX -- 1396532914.665000 eP 6.404551 0.300000 1396532915.465000 9.100198 0.300000
1396532916.065000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000E+000 0.000000 -0.754001 1 4847 ?
0.000000 3.192185 0.000000 0.000000
ACCO SHZ RI -- 1396532973.550000 eP 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000E+000 0.000000 0.253460 1 4854 ? 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000

En el momento t0 (las 13:47:25 del 03 de Abril de 2014, que es el valor para 1396532840.468545), el servicio erb2seisan detecta un nuevo sismo con número 12304 (ya que hay un nuevo registro en oldquakex.dat y no existe en la tabla oldquakes), genera una nueva fila en la tabla oldquakes y se llenan los campos línea con el registro completo sacado del archivo oldquakes, t1 con las 13:49:25, t2 con las 13:53:25 y se ponen en cero pt1,pt2y cerrado. La tabla oldquakes queda como sigue:

id_old	línea	t0	t1	t2	Pt1	pt2	Cerrado
12304	1396532840.468545 - 21.338425 -66.425106 3.249390 3 1 245 012304 5 8 0.573437 109.000000 0.000000 0 3.249390 3 0.000000 0 2.372419 2 0.000000 0 1396532876.380000 3	2014-04-03 13:47:25	2014-04-03 13:49:25	2014-04-03 13:53:25	0	0	0

Al momento t1, si corresponde (con lo último que tenga oldquakex.dat para ese sismo, por si hubiera cambiado la localización, fruto de haber recibido nuevas señales

sísmicas), se actualiza el campo línea, se generan las filas respectivas (a través del parser) al sismo en la tabla sfiles (que ya no cambiará mas durante el proceso) y se pone t1=1 para indicar que ya se venció ese tiempo. Cualquier relocalización de EarlyBird posterior al tiempo t1, será ignorada por el proceso erb2seisan por haber vencido el temporizador. La tabla oldquakes queda en el siguiente estado:

id_old	Linea	t0	t1	t2	Pt1	pt2	Cerrado
12304	1396532840.468545 - 21.338425 -66.425106 3.249390 3 1 245 012304 5 8 0.573437 109.000000 0.000000 0 3.249390 3 0.000000 0 2.372419 2 0.000000 0 1396532876.380000 3	2014-04-03 13:47:25	2014-04-03 13:49:25	2014-04-03 13:53:25	1	0	0

Cuando se vence t1, se llena la tabla sfiles, como se muestra en el ejemplo siguiente:

orden	Id_old	Id	Nombre	sigla	fila
1	12304	20140403134720	03-1347- 20L.S201404	NO	2014 4 3 1347 20.0 L -21.375 -66.435245.0 SJA 9 0.0LSJA 1
2	12304	20140403134720	03-1347- 20L.S201404	NO	FELTPROV: BOLIVIA 3
3	12304	20140403134720	03-1347- 20L.S201404	NO	ACTION:NEW 14-04-03 13:47 OP:ERB2 STATUS: ID:20140403134720 I
4	12304	20140403134720	03-1347- 20L.S201404	NO	2014-04-03-1345-00S.MAN 6
5	12304	20140403134720	03-1347- 20L.S201404	NO	STAT SP IPHASW D HRMM SECON CODA AMPLIT PERI AZIMU VELO SNR AR TRES W DIS CAZ7
6				PB04	PB04 HZ IP 1348 19.14
7				PB14	PB14 HZ IP 1348 34.66
8				PB06	PB06 HZ IP 1348 15.74
9				PB10	PB10 HZ IP 1348 27.93
10				HJA	HJA EZ IP 1348 04.45
11				PB09	PB09 HZ IP 1348 09.46
12				AZAP	AZAP EZ IP 1348 14. 1
13				PB15	PB15 HZ IP 1348 18. 7
14				YJA	YJA EZ IP 1347 56.38
15				ALOL	ALOL
16				ASTB	ASTB
17				LVC	LVC
18				SLA	SLA
19				HMBX	HMBCX
20				PATCX	PATCX

Al momento t2, se pone t2=1 para indicar que ya se venció el temporizador para generar la forma de onda. La tabla oldquakes queda como sigue:

id_old	linea	t0	t1	t2	pt1	pt2	Cerrado
12304	1396532840.468545 - 21.338425 -66.425106 3.249390 3 1 245 012304 5 8 0.573437 109.000000 0.000000 0 3.249390 3 0.000000 0 2.372419 2 0.000000 0 1396532876.380000 3	2014-04-03 13:47:25	2014-04-03 13:49:25	2014-04-03 13:53:25	1	1	0

En este momento, erb2seisan finaliza su trabajo.

db2seisan

Monitorea permanentemente la tabla oldquakes. Para cada uno de los sismos que están con el valor de campo cerrado igual a 0.

Siguiendo el ejemplo del sismo 12304, controla el campo t1 que este =1 (es decir que se ha vencido), en cuyo caso toma de la tabla sfiles el campo fila y genera el s-file respectivo en seisan con el nombre físico de archivo indicado en el campo Nombre. Si el proceso fue completado sin errores, pone pt1=2 para indicar que el s-file respectivo ya esta en Seisan. En la figura siguiente se observa el estado de la tabla oldquakes:

id_old	linea	t0	t1	t2	pt1	pt2	Cerrado
12304	1396532840.468545 - 21.338425 -66.425106 3.249390 3 1 245 012304 5 8 0.573437 109.000000 0.000000 0 3.249390 3 0.000000 0 2.372419 2 0.000000 0 1396532876.380000 3	2014-04-03 13:47:25	2014-04-03 13:49:25	2014-04-03 13:53:25	2	1	0

Cuando db2seisan detecta que pt2=2 (ya se venció el momento de generar la forma de onda) procede a extraer la forma de onda desde Winston con el programa waveman2disk. Y registrar esa forma de onda en la base de datos seisan de formas de ondas. Si el proceso fue completado sin errores, pone pt2=2 para indicar que la forma de onda asociada al s-file registrado en el momento t1, ya esta en Seisan y cerrado=1 para finalizar el proceso automático de ese sismo. En la siguiente figura se observa el estado final para el sismo 12304.

id_old	linea	t0	t1	t2	pt1	pt2	Cerrado
12304	1396532840.468545 - 21.338425 -66.425106 3.249390 3 1 245 012304 5 8 0.573437 109.000000 0.000000 0 3.249390 3 0.000000 0 2.372419 2 0.000000 0 1396532876.380000 3	2014-04-03 13:47:25	2014-04-03 13:49:25	2014-04-03 13:53:25	2	2	1

Si en el tiempo t1, el sismo pasa los filtros de publicación, se encuentra también en la página Web oficial. Este es el fin de ese proceso, de ahora en más el sismo puede ser modificado eventualmente por un sismólogo en forma manual.