



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**CATÁLOGO DE TERREMOTOS SUBDUCTIVOS CHILENOS PARA LA  
GENERACIÓN DE CURVAS DE FRAGILIDAD**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**ROBERTO ANDRÉS JORQUERA VALENZUELA**

**PROFESOR GUÍA:**  
FABIÁN ROJAS BARRALES

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**  
RODOLFO SARAGONI HUERTA  
SERGIO RUIZ TAPIA

SANTIAGO DE CHILE  
ABRIL 2014

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**POR:** Roberto Andrés Jorquera Valenzuela

**FECHA:** 14 de Abril de 2014

**PROFESOR GUÍA:** Fabián Rojas Barrales

**CATÁLOGO DE TERREMOTOS SUBDUCTIVOS CHILENOS PARA LA  
GENERACIÓN DE CURVAS DE FRAGILIDAD**

El trabajo de Título está acotado por dos objetivos generales, como se desprende del título del tema: en una primera etapa se creará un catálogo de terremotos, el cual almacenará parámetros sísmicos calculados a partir de registros de terremotos relevantes de Chile. Y en una segunda etapa se evaluará la vulnerabilidad de un modelo estructural simplificado con características del tipo de edificio que sufrió mayor daño para el terremoto del Maule de 2010.

Para desarrollar la primera etapa del trabajo será necesaria una recopilación de los registros de aceleraciones de las estaciones instaladas en todo el territorio chileno, además de la actualización de las bases de datos ya creadas, que contienen información de eventos, registros y estaciones. A partir de estas bases de datos, se calcularán los parámetros sísmicos más usados (estos son: PGA, PGV, PGD, Intensidad de Arias, Intensidad Espectral de Housner, Potencial Destructivo, Velocidad Absoluta Acumulada, Intensidad JMA) y almacenarán en el catálogo con la información básica de cada evento, tal como, estación, equipo, tipo de suelo y fuente sismogénica.

Este catálogo permitirá analizar gráficamente la tendencia entre los distintos parámetros y PGA para todos los registros. Posteriormente, los registros serán escalados, y de esta manera se fijará un rango de PGA en que los valores escalados se ajustan mejor a los no escalados. Con ello, usar el conjunto de registros que representan mejor los parámetros sísmicos de la base de datos de terremotos Subductivos Chilenos para generar las curvas de fragilidad, usando el análisis dinámico incremental (IDA). Dicho análisis escala los registros y permite obtener la respuesta no lineal de un modelo estructural simplificado para los distintos rangos de PGA. Este método se aplicará para el grupo seleccionado de registros y para todo el universo de registros del catálogo, con ello se compararán las curvas y se identificarán las diferencias. De esta manera es posible concluir la influencia de la selección de los registros en análisis dinámico incremental (IDA) y las curvas de fragilidad estudiadas.

## AGRADECIMIENTOS

Al concluir este trabajo y Dios mediante, concluir la carrera, no puedo pasar por alto la mención de personas importantes durante esta etapa, entre una especie de dedicatoria y agradecimiento sincero:

A Dios, agradezco que por gracia me haya permitido vivir esta etapa y llegar a esta instancia. Él me lo ha entregado y hoy se lo entrego, teniendo claro que no ha sido fácil, y habiendo tenido momentos felices y satisfactorios, y otros frustrantes y tristes, entre logros y fracasos, puedo decir finalmente: *Soli Deo Gloria*.

A Rodolfo y Paulina, mis padres, junto a mi hermana, Pau, agradezco que me hayan educado y ser los primeros maestros, maestros en la vida misma, que me han guiado no sólo en lo académico sino más aún en lo espiritual, en lo moral, con su ejemplo enseñándome a vivir.

A Esmeryt, mi Mele, polola, compañera y amiga que Dios ha puesto en esta última etapa de mi carrera, siendo un apoyo constante. Agradezco sus oraciones, su preocupación y cada abrazo que me fueron aliento y ánimo para seguir avanzando.

A mi familia toda, porque abuelos, tíos y primos se han alegrado con esto. A los cabros de siempre: el Maldo con la Bala, el Endy y el Pancho, a los de la UJ y amigos de iglesias, al Braulio, amigo y compañero de siempre, y a mis compañeros civiles.

Al profe Fabián, agradezco todo lo que me ha enseñado en este último año, por la preocupación, la disposición y toda la ayuda para que pudiera terminar este trabajo. A Sergio, agradezco su buena disposición en todo momento para enseñar, y aportar con toda la información necesaria.

*No quebrará la caña cascada, ni apagará el pábilo que humeare...*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	1
1.3. METODOLOGÍA .....	1
1.4. ALCANCES .....	2
<b>CAPÍTULO II: ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO</b> .....	5
2.1. TECTÓNICA DE PLACAS .....	5
2.2. TERREMOTOS DE SUBDUCCIÓN .....	7
2.3. SISMICIDAD CHILENA .....	9
2.4. TERREMOTOS IMPORTANTES DEL ÚLTIMO SIGLO .....	12
2.5. RELACIÓN GUTENBERG - RICHTER .....	13
<b>CAPÍTULO III: PARÁMETROS SÍSMICOS</b> .....	15
3.1. INTENSIDAD DE ARIAS .....	16
3.2. POTENCIAL DESTRUCTIVO .....	17
3.3. INTENSIDAD ESPECTRAL DE HOUSNER .....	18
3.4. VELOCIDAD ABSOLUTA ACUMULADA .....	19
3.5. INTENSIDAD SÍSMICA AGENCIA METEOROLÓGICA DE JAPÓN .....	20
3.6. ESPECTRO DE RESPUESTA .....	22
3.7. VALORES MÁXIMOS DEL SUELO .....	24
3.8. DURACIÓN DE MOVIMIENTO FUERTE .....	25
<b>CAPÍTULO IV: CATÁLOGO DE TERREMOTOS</b> .....	26
4.1. REGISTROS .....	27
4.2. EVENTOS .....	28
4.3. ESTACIONES .....	34
4.4. EQUIPOS .....	38
4.5. CATÁLOGO .....	40
4.6. ESCALAMIENTO DE REGISTROS .....	47
<b>CAPÍTULO V: ANÁLISIS DEL CATÁLOGO</b> .....	50
5.1. CLASIFICACIÓN POR DIRECCIÓN DEL REGISTRO .....	50
5.2. CLASIFICACIÓN POR TIPO DE SUELO .....	53
5.3. CLASIFICACIÓN POR FUENTE SISMOGÉNICA PARA SUELO DURO .....	55

5.4.	CLASIFICACIÓN POR FUENTE SISMOGÉNICA PARA ROCA DURA .....	57
5.5.	ANÁLISIS DE REGISTROS ESCALADOS .....	59
<b>CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DINÁMICO INCREMENTAL .....</b>		<b>63</b>
6.1.	DEFINICIÓN DEL MÉTODO.....	63
6.2.	ANÁLISIS NO-LINEAL .....	65
6.3.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO .....	69
6.4.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS.....	74
<b>CAPÍTULO VII: CURVAS DE FRAGILIDAD .....</b>		<b>76</b>
7.1.	ELEMENTOS PARA GENERACIÓN DE CURVAS DE FRAGILIDAD .....	77
7.2.	ESTADOS LÍMITES DE UNA ESTRUCTURA .....	78
7.3.	RESULTADOS DE CURVAS DE FRAGILIDAD.....	79
<b>CAPÍTULO VIII: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES .....</b>		<b>83</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>89</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>92</b>
A.1.	BASES DE DATOS.....	92
A.2.	POTENCIAL DESTRUCTIVO DE REGISTROS ESCALADOS EN ROCA DURA .....	100
A.3.	FUNCIONES .....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Placas Tectónicas. (Kious y Tilling, 1996).....	6
<b>Figura 2.</b> Subducción y deformación de la corteza. (Instituto Geográfico Nacional De La República Argentina).....	7
<b>Figura 3.</b> Fuentes Sismogénicas. (a) Interplaca Tipo ‘Thrust’. (b) Intraplaca de Profundidad Intermedia. (c) Intraplaca Cortical. (d) ‘Outer-rise’. (Leyton, Ruiz y Sepúlveda, 2010). .....	8
<b>Figura 4.</b> Sismicidad de Chile (1980-2009). .....	10
<b>Figura 5.</b> Sismicidad de Chile (1980-2011). .....	11
<b>Figura 6.</b> Zonas de rupturas de los sismos mayores de subducción ocurridos desde 1835. (LIA Montessus de Ballore (CNRS-INSU and Univ. de Chile) and IPGP tectonics lab (R. Lacassin)). .....	13
<b>Figura 7.</b> Ley Gutenberg-Richter incluyendo terremoto característico. (Benito y Jiménez, 2005) .....	14
<b>Figura 8.</b> Potencial destructivo versus IMM para registros destructivos (Saragoni et al, 1989).....	18
<b>Figura 9.</b> Filtros de frecuencias para cálculo de Intensidad JMA.....	21
<b>Figura 10.</b> Suma vectorial de las 3 componentes de aceleraciones en el tiempo. ....	21
<b>Figura 11.</b> Ejemplo de duración de movimiento fuerte. ....	25
<b>Figura 12.</b> Diagrama esquemático de base de Registros.....	28
<b>Figura 13.</b> Distribución de Registros.....	28
<b>Figura 14.</b> Diagrama esquemático de la base de Eventos. ....	29
<b>Figura 15.</b> Distribución de Eventos.....	30
<b>Figura 16.</b> Distribución de Magnitudes. ....	31
<b>Figura 17.</b> Curva Gutenberg-Richter para los eventos de Magnitud > 5.0 usados en la base de Datos. ....	31
<b>Figura 18.</b> Distribución de Profundidades.....	32
<b>Figura 19.</b> Eventos en planta.....	33
<b>Figura 20.</b> Distribución de Fuente Sismogénica. ....	33
<b>Figura 21.</b> Diagrama esquemático de la base de Estaciones.....	35
<b>Figura 22.</b> Distribución de Estaciones de Registro. ....	36
<b>Figura 23.</b> Acercamiento en Zonas punteadas.....	37

<b>Figura 24.</b> Distribución de Tipo de Suelo.....	38
<b>Figura 25.</b> Diagrama esquemático de la base de Equipos. ....	39
<b>Figura 26.</b> Filtro Butterworth. ....	41
<b>Figura 27.</b> Comparación de Filtros. ....	42
<b>Figura 28.</b> Comparación de filtros para Velocidad y Desplazamiento. ....	42
<b>Figura 29.</b> Intensidad de Arias en el tiempo. ....	43
<b>Figura 30.</b> Cruces por cero en el tiempo. ....	44
<b>Figura 31.</b> Espectros de Respuestas.....	46
<b>Figura 32.</b> Esquema Catálogo.....	47
<b>Figura 33.</b> Esquema Archivo Resultados.mat.....	49
<b>Figura 34.</b> Gráficos PGA vs parámetros sísmicos. ....	51
<b>Figura 35.</b> Clasificación por Tipo de Suelo. ....	54
<b>Figura 36.</b> Clasificación por fuente sismogénica para Suelo Duro. ....	56
<b>Figura 37.</b> Clasificación por fuente sismogénica para Roca Dura. ....	58
<b>Figura 38.</b> Potencial Destructivo de registros escalados para Suelo Duro .....	61
<b>Figura 39.</b> Curvas IDA. ....	65
<b>Figura 40.</b> Curva Fuerza-Deformación de material inelástico.....	66
<b>Figura 41.</b> Modelo Bilineal. (Mostaghel, 1999) .....	67
<b>Figura 42.</b> Oscilador de un grado de libertad.....	70
<b>Figura 43.</b> Forma Primer Modo.....	72
<b>Figura 44.</b> Curva capacidad para un modelo de 20 pisos (Droguett, 2008). ....	73
<b>Figura 45.</b> Curva de fragilidad para el Set de terremotos. ....	80
<b>Figura 46.</b> Curva de fragilidad para todo el Catálogo. ....	80
<b>Figura 47.</b> Ajuste de curvas de fragilidad para todo el catálogo. ....	81
<b>Figura 48.</b> Ajustes de curvas de fragilidad para Set de terremotos. ....	82
<b>Figura 49.</b> Comparación de Curvas de fragilidad. ....	86
<b>Figura 50.</b> Estados de daño para PGA = 0.4g.....	87
<b>Figura 51.</b> Potencial Destructivo de registros escalados para Roca Dura .....	102

# **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

## **1.1. INTRODUCCIÓN**

Chile es uno de los países más sísmicos del mundo, por la frecuencia con que ocurren terremotos importantes. Consecuencia de esto, se han producido numerosas pérdidas humanas y materiales producto del daño que provoca un terremoto, siendo mayor aún al provocarse maremotos en las zonas costeras del país. Frente a esto, resulta importante identificar y estudiar los eventos sísmicos chilenos. Al identificar los terremotos, es posible evaluar parámetros que representan un grado de destructividad, como son: PGA, Potencial Destructivo, Intensidad de Arias, etc. De esta manera, resulta beneficioso contar con alguna plataforma con toda esta información y así poder manipularla y organizarla para análisis que se quieran realizar. En vista de esto, se pretende crear un catálogo de todos los terremotos chilenos relevantes con sus parámetros sísmicos.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo General**

Crear un catálogo de terremotos subductivos chilenos y generar curvas de fragilidad con registros escalados para un modelo estructural simplificado, las cuales permitan estudiar la influencia de escalar registros de un determinado PGA.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Realizar un catastro de terremotos subductivos chilenos
- Desarrollar funciones que calculan parámetros sísmicos instrumentales
- Analizar catálogo para registros escalados y sin escalar
- Realizar un análisis dinámico incremental
- Realizar comparación entre el set seleccionado de registros escalados y set total de la base de datos.

## **1.3. METODOLOGÍA**

A continuación se identifican los puntos principales y claves que resumen la metodología para la elaboración del trabajo de título.

- Identificación de eventos sísmicos:

Consiste en la recopilación, almacenamiento y manipulación de los registros sísmicos y su información relevante, tales como: eventos, estaciones y equipos, para la construcción de las bases de datos principales y el posterior cálculo del catálogo de terremotos con sus parámetros sísmicos. Este proceso de recopilación es fundamental,



ya que una información verificada y una manipulación apropiada de los datos permite obtener resultados confiables.

- Creación del Catálogo:

A partir de las bases de datos elementales formadas según lo mencionado en el punto anterior y que condensan toda la información recopilada, se crea un catálogo definitivo que organiza los registros de aceleraciones con sus respectivos parámetros sísmicos calculados. El cálculo de estos parámetros se realiza mediante funciones programadas en MATLAB (MATLAB, The MathWorks).

- Análisis Dinámico Incremental:

A partir del análisis del catálogo de terremotos, se escalan los registros y se observa los registros que muestran una mejor tendencia para un determinado parámetro en cuestión. Con ello, se determina un set de terremotos para realizar el análisis dinámico incremental y obtener las respuestas para un modelo estructural simplificado.

- Generación de curvas de fragilidad:

Mediante el método de análisis dinámico incremental se obtienen las respuestas del modelo, y una vez definidos los estados de daños se generan las curvas de fragilidad para el set de terremotos y para todo el catálogo.

## **1.4. ALCANCES**

A continuación se detallan de manera resumida los capítulos que conforman el trabajo de título:

### **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

En este capítulo, se presenta el tema del trabajo de título, indicando sus objetivos generales y objetivos específicos. Además, se describe de manera resumida la metodología para la realización del presente trabajo y los alcances que abarcan cada capítulo.

### **CAPÍTULO II: ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO**

En este capítulo, se desarrolla y organiza la recopilación bibliográfica que enmarca el trabajo de título. Se presenta principalmente la teoría de la tectónica de placas y se contextualiza a Chile tectónicamente y su sismicidad.

### CAPÍTULO III: PARÁMETROS SÍSMICOS

En este capítulo, se desarrollan las definiciones de los parámetros sísmicos que se utilizan en el presente trabajo. Se expresa su definición matemática y el sentido físico que representa. Los parámetros definidos son: Intensidad de Arias, Potencial Destructivo, Intensidad Espectral de Housner, Velocidad Absoluta Acumulada, Intensidad Sísmica de la Agencia Meteorológica de Japón, Espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento, la duración de movimiento fuerte, y los valores de aceleración, velocidad y desplazamiento máximos del suelo.

### CAPÍTULO IV: CATÁLOGO DE TERREMOTOS

En este capítulo, se presentan los componentes del catálogo de terremotos, es decir, se describen los Eventos, Registros y Estaciones que dan forma al catálogo. Para cada uno de estos, se definen los elementos que lo conforman (se muestra en detalle los componentes de la estructura de MATLAB). Además, se indica la manera en la que se desarrolla el catálogo, el tratamiento de los registros y la aplicación de las funciones, principalmente.

### CAPÍTULO V: ANÁLISIS DEL CATÁLOGO

En este capítulo, se discute los resultados que se pueden extraer del catálogo, es decir, se presenta gráficamente los parámetros (según tipo de suelo, dirección de los registros, fuente sismogénica, etc) y así observar la tendencia que siguen los parámetros de los registros en función del PGA. Además, se muestran los resultados de escalar los registros para un determinado rango de PGA, con esto se determinan los registros según PGA que presentan una mejor tendencia para el análisis dinámico incremental (Vamvatsikos y Cornell, 2002).

### CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DINÁMICO INCREMENTAL

En este capítulo, se define el método de análisis dinámico incremental y sus componentes, con la correspondiente referencia. Además, se describe el modelo estructural a utilizar y se presentan los supuestos en la determinación de las características que definen dicho modelo. Finalmente, se presentan los resultados.

### CAPÍTULO VII: CURVAS DE FRAGILIDAD

En este capítulo, se desarrolla el concepto de las curvas de fragilidad, haciendo mención a la vulnerabilidad sísmica. Además, se describen los elementos principales para el desarrollo y construcción de las curvas.

## CAPÍTULO VIII: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

En este capítulo, se comentan las etapas en el desarrollo del trabajo de título y se enuncian las conclusiones finales para cada etapa comentada.

## CAPÍTULO II: ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

Chile es catalogado uno de los países más sísmicos del mundo debido a la frecuencia con que ocurren los terremotos a lo largo de todo el territorio nacional. Este fenómeno no sólo ocurre en Chile, sino que se observa que los movimientos sísmicos y la actividad volcánica son identificados con mayor frecuencia en determinados lugares del planeta, concentrándose a lo largo de bordes continentales, de cadenas de islas o de crestas oceánicas.

Estas básicas observaciones son relacionadas en la actualidad mediante la teoría de la Tectónica de placas. Esta teoría consiste en un modelo dinámico en base a placas litosféricas que están en movimiento en la superficie terrestre.

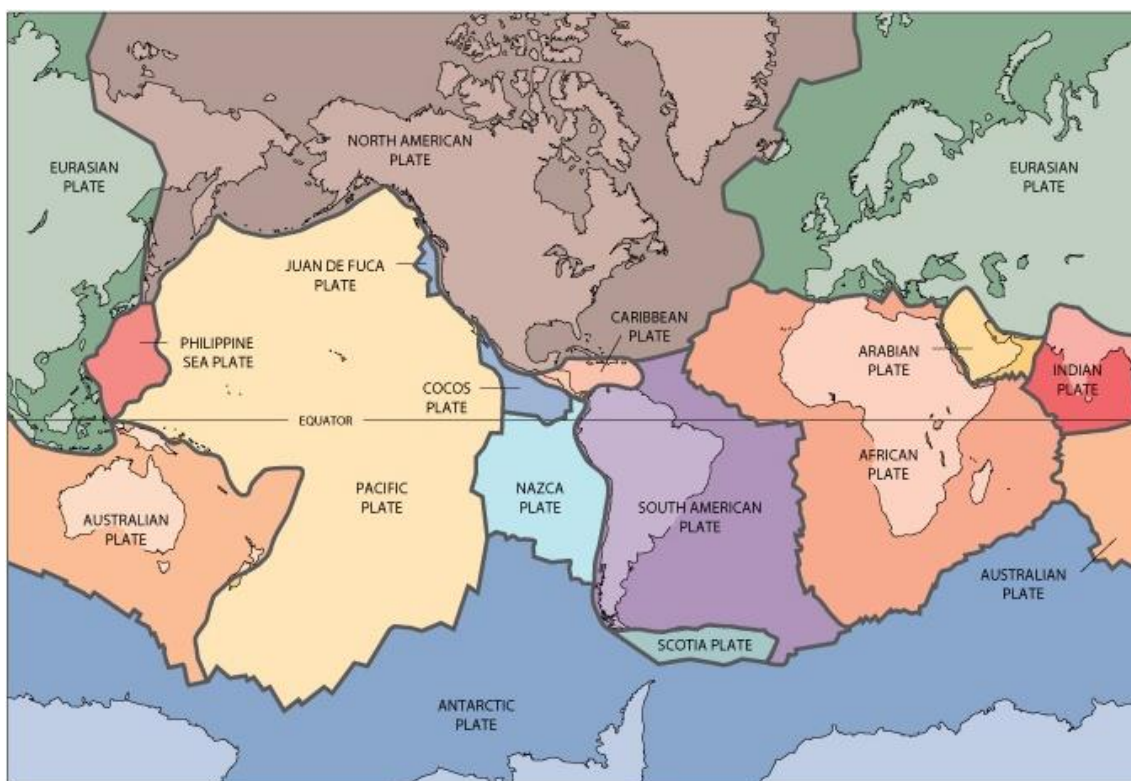
Tuzo Wilson, en 1968, reúne en una sola teoría toda la serie de conceptos desde la teoría de la Deriva Continental de Alfred Wegener hasta la teoría de la Expansión del fondo oceánico de Harry Hess. Mediante esta teoría se desarrollan conceptos que permiten la explicación lógica y coherente, principalmente, de la distribución de continentes, de cuencas oceánicas, de cordones montañosos, de volcanes y de la actividad sísmica. Los límites entre estas placas son lugares con una intensa actividad geológica, donde se producen terremotos y erupciones volcánicas (Kious y Tilling, 1996).

### 2.1. TECTÓNICA DE PLACAS

La litosfera está dividida en grandes bloques rígidos que varían en forma y tamaño, denominados placas tectónicas. La figura 1 muestra las principales placas, estas son: Pacífica, Sudamericana, Norteamericana, Africana, Australiana, Índica, Antártica y Euroasiática. Las placas secundarias son: de Nazca, de Cocos, Juan de Fuca, Filipina, Arábica, del Caribe y Scotia.

Según Kious y Tilling (1996), en *This Dynamic Earth: The story of plate tectonics*, las placas se desplazan a una determinada velocidad sobre una capa más dúctil y de mayor temperatura, llamada Astenósfera. El movimiento relativo entre placas se debe al calor interno de la Tierra, ya que se producen corrientes de convección en el manto por gradientes de temperatura y diferencias de densidad, de esta manera el material con mayor temperatura asciende y el material con menor temperatura, al ser más denso, desciende.

El ascenso de material caliente ocurre en las dorsales oceánicas, donde al llegar a la parte más superficial de la litósfera, el material se enfría y aumenta su densidad, desplazándose hacia una zona de subducción donde por gravedad la placa se hunde formando parte del material del manto.



**Figura 1.** Placas Tectónicas. (Kious y Tilling, 1996).

El movimiento de las placas genera tres tipos de interacción entre bordes: límites divergentes, límites convergentes, y límites transformantes.

- Divergentes: son límites en los que las placas se separan unas de otras, debido a la formación de nuevo material desde la Astenósfera, creando Litósfera Oceánica. Los bordes divergentes actuales coinciden con dos estructuras de relieves: las dorsales oceánicas y los valles de Rift intracontinentales.
- Convergentes: son límites en los que una placa colisiona con otra. Existe un tipo de colisión continente-continente, en el cual las placas colisionan y se comprimen, y otro en el cual se forma una zona de subducción. En este último, se produce cuando una placa se hunde bajo otra placa (Oceánica-Oceánica u Oceánica-Continental), donde la más densa subducta bajo la menos densa. Debido a la subducción se forman sistemas montañosos y volcanes.
- Transformantes: son límites donde las placas se deslizan una con respecto a la otra a lo largo de una falla de transformación, es decir, corresponde a un movimiento paralelo relativo entre ambas placas.

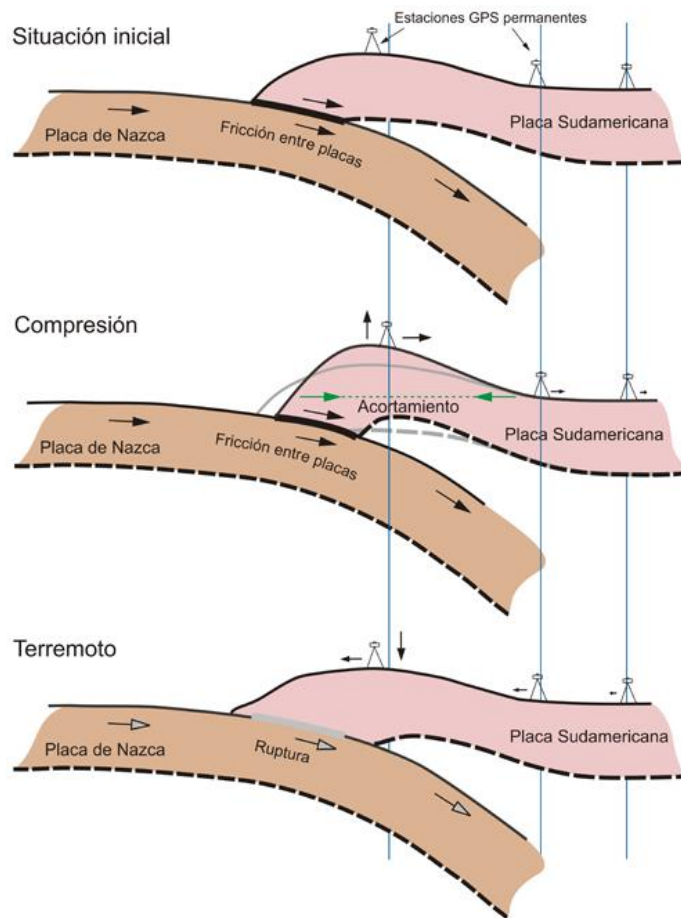
En la mayor parte del territorio Chileno, entre las latitudes 18°S y 47°S, se presenta el contacto de las placas de Nazca y Sudamericana, existiendo una interacción de bordes convergente entre ellas, de manera que la primera subducta bajo la segunda.

Debido a esta situación, Chile es afectado principalmente por tres tipos de terremotos o fuentes sismogénicas: de contacto entre placas o interplaca, intraplaca de profundidad intermedia e intraplaca superficial o cortical (ver figura 3).

## 2.2. TERREMOTOS DE SUBDUCCIÓN

Actualmente, se estima la velocidad de convergencia entre las placas en 6-7 cm/año (Khazaradze y Klotz, 2003) produciendo la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. El proceso de subducción de una placa bajo la otra produce la deformación de la corteza, este fenómeno es posible observarlo actualmente con la ayuda de GPS instalados a lo largo de la placa Sudamericana.

Se tiene una situación inicial donde la convergencia entre la placa de Nazca y la Sudamericana genera una zona de fricción, acumulándose tensión entre las mismas ya que no hay desplazamiento.

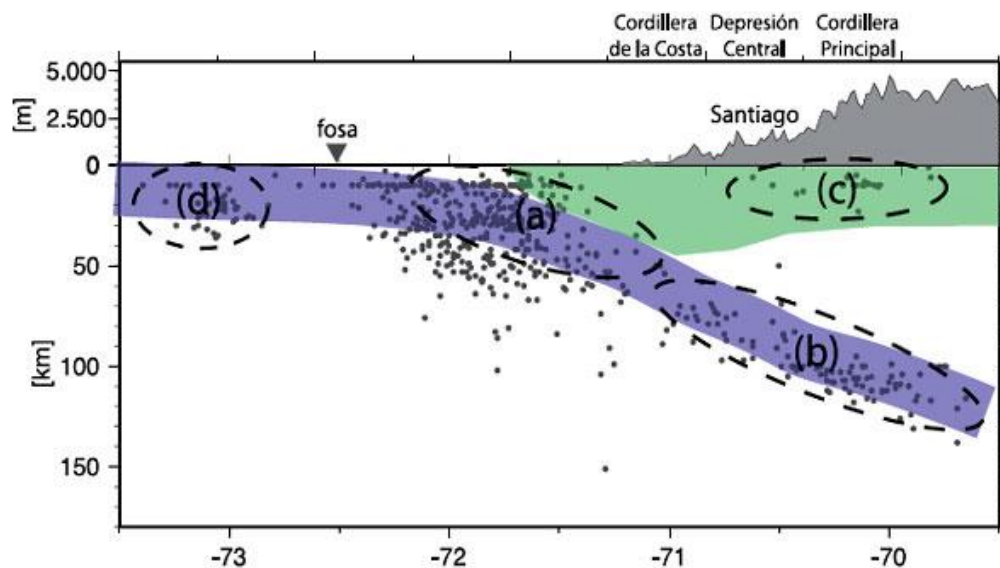


**Figura 2.** Subducción y deformación de la corteza. (Instituto Geográfico Nacional De La República Argentina).

Esta acumulación de tensión es constante lo que permite observar compresión y deformación de la corteza. Debido a esta deformación, los GPS sobre la placa Sudamericana indican un desplazamiento hacia el este, que disminuye a medida que se alejan de la zona de fricción.

En algún momento, luego de la acumulación de suficiente tensión se produce la ruptura que genera el terremoto, en ese instante se libera la energía acumulada y la corteza se descomprime. En esta situación los receptores GPS geodésicos indican un desplazamiento brusco hacia el Oeste de los mismos, recuperando parte de su posición inicial.

Debido a la alta velocidad mencionada con que convergen ambas placas se traduce en una alta sismicidad, la que permite realizar una representación esquemática de las placas mediante un perfil. La figura 3 muestra el perfil esquemático con la sismicidad del catálogo NEIC (National Earthquake Information Center), registrada entre 1973 y 2007 de la zona en la latitud 33,5°S (considerando 0,5° en dirección norte y sur), cada punto representa un sismo, independiente de su magnitud o fecha de ocurrencia. El color azulado representa la posición esquemática de la placa de Nazca y verde, la placa Sudamericana. Las líneas punteadas indican la posición de las principales fuentes sismogénicas.



**Figura 3.** Fuentes Sismogénicas. (a) Interplaca Tipo 'Thrust'. (b) Intraplaca de Profundidad Intermedia. (c) Intraplaca Cortical. (d) 'Outer-rise'. (Leyton, Ruiz y Sepúlveda, 2010).

Las principales fuentes sismogénicas presentes en la zona de subducción son (Leyton, Ruiz y Sepúlveda, 2010):

- Interplaca tipo 'Thrust': producida en el contacto de las placas Sudamericana y de Nazca, extendiéndose desde la fosa hasta unos 50 km de profundidad (figura 3, zona (a)).
- Intraplaca de profundidad intermedia: comprende aquella actividad que ocurre dentro de la placa de Nazca. Se extiende desde los 50 km y será considerada solo hasta una profundidad de 200 km debido a que históricamente no se han observado en Chile daños producidos por sismos de mayor profundidad (figura 3, zona (b)).
- Cortical: es aquella sismicidad que ocurre en el interior de la placa Sudamericana, principalmente en los sectores precordilleranos y cordilleranos, ubicándose a una profundidad menor de 30 km (figura 3, zona (c)).
- 'Outer-rise': producida por la flexión de la placa de Nazca previa a la subducción. Es caracterizada por generar eventos de magnitud moderada a distancias mayores a 150 km de la costa, por lo que no produce daños significativos en la zona de estudio, no siendo considerada en el análisis. Existe una posibilidad de que este tipo de terremotos produzca tsunamis (figura 3, zona (d)).

### **2.3. SISMICIDAD CHILENA**

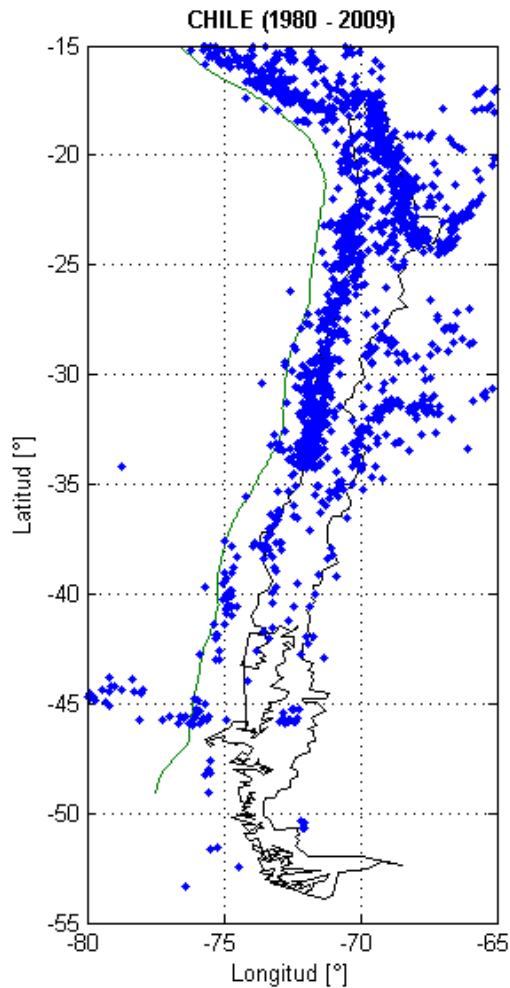
Como se ha mencionado, Chile es uno de los países más sísmicos del mundo: en promedio un terremoto de magnitud superior a 8 se produce cada diez años en alguna parte del país (Madariaga, 1998). La gran mayoría de los eventos sísmicos chilenos se producen ya sea en la zona de acoplamiento entre las placas (Interplaca) o en el interior de la placa de Nazca (Intraplaca de profundidad intermedia).

El nivel de sismicidad es apreciable considerando que en los últimos 30 años, desde 1980, se han producido más de 2.000 sismos de magnitud superior a 5. La sismicidad de este periodo no está repartida uniformemente a lo largo del territorio.

Se muestra en la figura 4 la sismicidad de Chile para el período 1980-2009, de esta manera se describe la sismicidad anterior al terremoto del 27 de febrero de 2010, para considerar aparte los efectos de este.

Los datos de la figura 4 se extrajeron del International Seismological Centre (ISC), considerando los eventos sísmicos registrados entre la latitud 15°S – 55°S y longitud 65°W – 80°W, de magnitud (cualquiera) mayor que 5, entre el período 01/01/1980 y 31/12/2009.





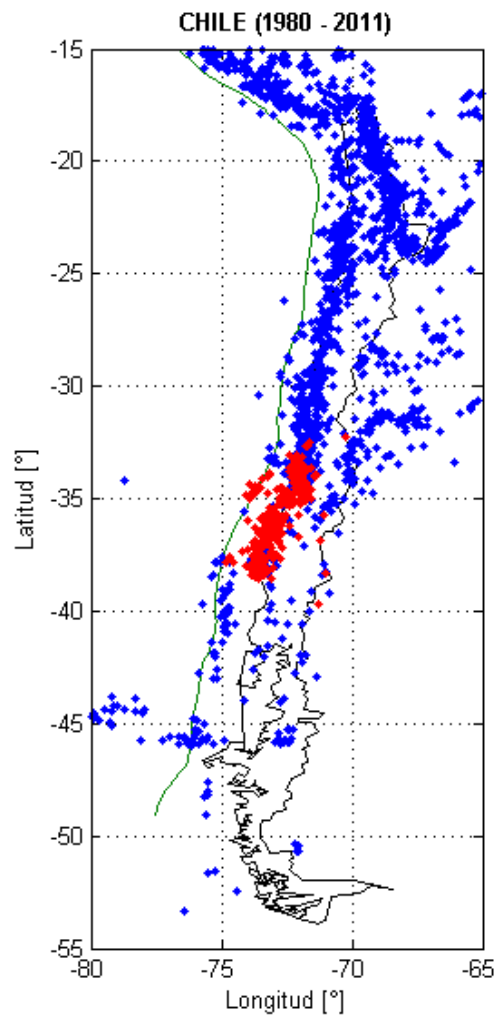
**Figura 4.** Sismicidad de Chile (1980-2009).

La figura 4 evidencia de una abundante sismicidad (desde 1980 a 2009), mayor en el norte de Chile que en el sur. Según Madariaga (1998) esto se debe en parte a la relativa calma sísmica que se produjo en el sur de Chile, a partir del paralelo 35°S, desde que en esa zona se terminaron las últimas réplicas del terremoto de 1960. Si bien Madariaga lo menciona en 1997, hasta 2009 no había ocurrido un sismo importante en la zona.

Desde el norte de Chile hasta la zona central (33°S) resulta ser la región más activa del territorio nacional con una sismicidad que se extiende de manera continua desde la fosa y a todo lo largo de la zona de Benioff. En toda esta región, comparando con Madariaga, no se ha producido ninguna reducción de la sismicidad (mayor a magnitud 5) desde 1962, lo que abarca cerca de 50 años.

La zona sur, cerca de la fosa alrededor de 35°S, es la región que presentaba una reducida sismicidad debido a la falta de terremotos. Esta región corresponde al extremo sur de la zona de ruptura de 1985 y se identificó como la laguna sísmica de Constitución-Concepción. Ningún gran terremoto de subducción hasta 2010 se había

producido en esta zona desde el terremoto de Concepción en 1835. De esta manera, el terremoto de 2010 es importante en el marco de la sismicidad actual del país, la siguiente figura lo representa.



**Figura 5.** Sismicidad de Chile (1980-2011).

La figura 5 muestra la sismicidad, considerando eventos de magnitud mayor que 5, para el período entre 1980-2011. Los puntos rojos de la figura representan los sismos ocurridos durante 2010-2011, lo que evidencia el efecto en la sismicidad del terremoto del 27 de febrero de 2010 ( $M_w=8.8$ ) y sus réplicas, que delimitan el largo de fractura cercano a 500 km.

Además, se visualiza que en el extremo sur de Chile la sismicidad es considerablemente reducida, esto se debe a que más allá de la latitud  $47^\circ\text{S}$ , termina la influencia de la placa de Nazca y se produce el contacto de la placa Sudamericana con la placa Antártica, con una velocidad de convergencia menor de 2 cm/año.

## 2.4. TERREMOTOS IMPORTANTES DEL ÚLTIMO SIGLO

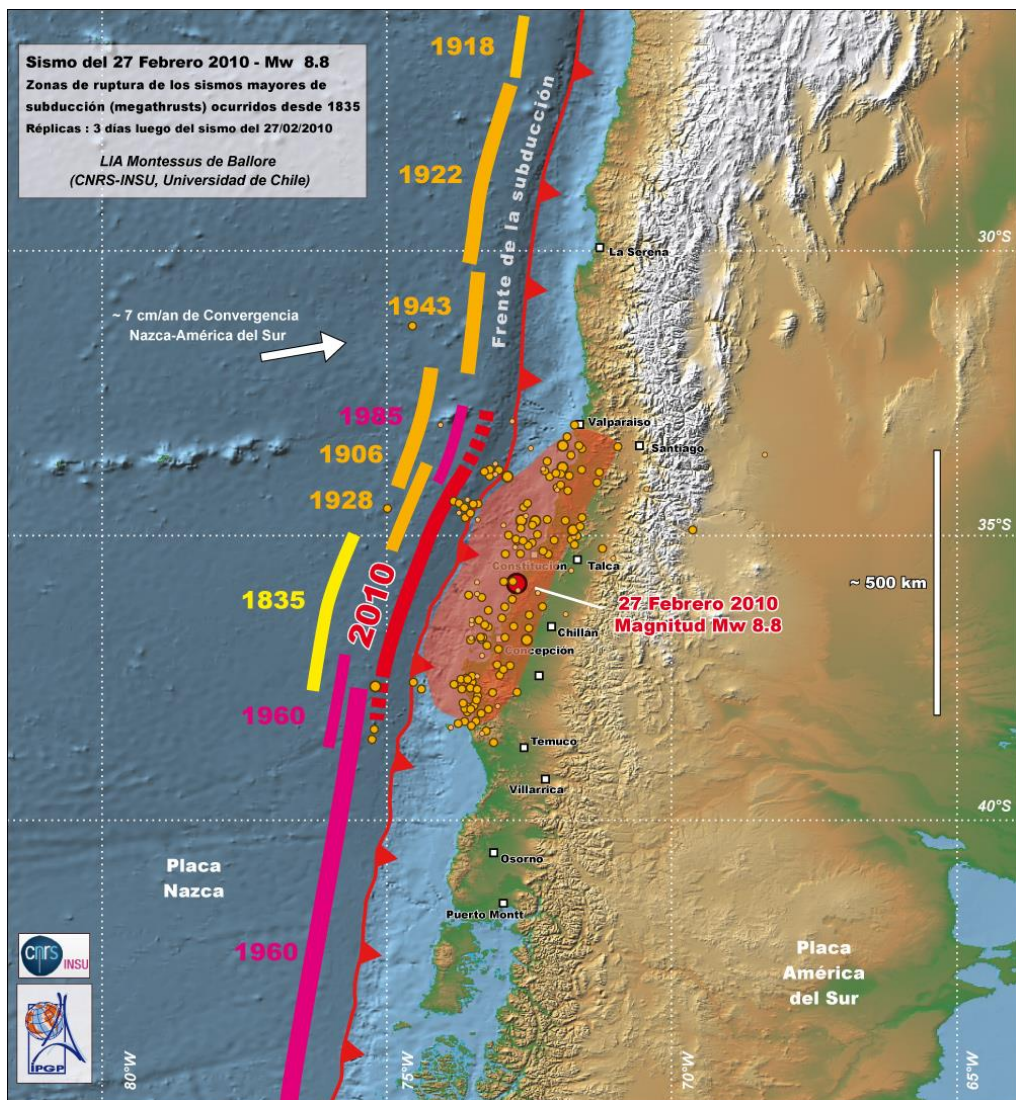
Con todo lo desarrollado en este capítulo, se entiende a Chile como país sísmico, con una alta actividad sísmica y con terremotos de distintas características. Es por ello que en Chile se han presentado numerosos terremotos de gran magnitud desde que se tiene historia registrada, como por ejemplo los sismos de magnitud ( $M_w$ ) sobre 8.0 de 1575, 1647 y 1730 en la zona central.

La tabla 1 muestra los terremotos importantes que han ocurrido en el último siglo, con información recopilada desde el Centro Sismológico Nacional. Como era de esperar, la gran mayoría es de tipo Interplaca tipo 'thrust' o Intraplaca de profundidad intermedia, ya que no se tienen antecedentes de grandes magnitudes para terremotos corticales. Sin embargo, en la zona central de Chile existen fallas activas que podrían generar eventos de magnitud mayor a 7.0.

Lugar	Año	Tipo	Magnitud
Valparaíso	1906	Interplaca	7.9 (Ms)
Copiapó	1918	Interplaca	8.2 (Ms)
Vallenar	1922	Interplaca	8.5 (Mw)
Talca	1928	Interplaca	8.3 (Ms)
Chillán	1939	Intraplaca	8.3 (Ms)
Ovalle	1943	Interplaca	8.2 (Mw)
Las Melosas	1958	Cortical	7.3 (ML)
Valdivia	1960	Interplaca	9.5 (Mw)
La Ligua	1965	Intraplaca	7.4 (Ms)
Valparaíso	1985	Interplaca	8.0 (Mw)
Arica	1987	Intraplaca	7.1 (Ms)
Antofagasta	1995	Interplaca	8.0 (Mw)
Punitaqui	1997	Intraplaca	7.1 (Mw)
Tarapacá	2005	Intraplaca	7.8 (Mw)
Tocopilla	2007	Interplaca	7.7 (Mw)
Maule	2010	Interplaca	8.8 (Mw)

**Tabla 1.** Terremotos importantes del último siglo. (Centro Sismológico Nacional. Universidad de Chile).

La figura 6 permite visualizar mediante una esquematización del largo de ruptura, la proporción y el tamaño de los principales terremotos a lo largo del territorio nacional. Estos abarcan en extensión todo el contacto entre placas.



**Figura 6.** Zonas de rupturas de los sismos mayores de subducción ocurridos desde 1835. (LIA Montessus de Ballore (CNRS-INSU and Univ. de Chile) and IGP tectonics lab (R. Lacassin)).

Una de las maneras para estimar el área de ruptura es mediante las réplicas que se tienen inmediatamente una vez ocurrido el sismo, como muestra la zona en rojo y puntos amarillos que grafican réplicas en la figura 6. De esta manera se tiene un dimensionamiento de las zonas donde el contacto entre placas ha liberado esfuerzos para un tiempo definido.

## 2.5. RELACIÓN GUTENBERG - RICHTER

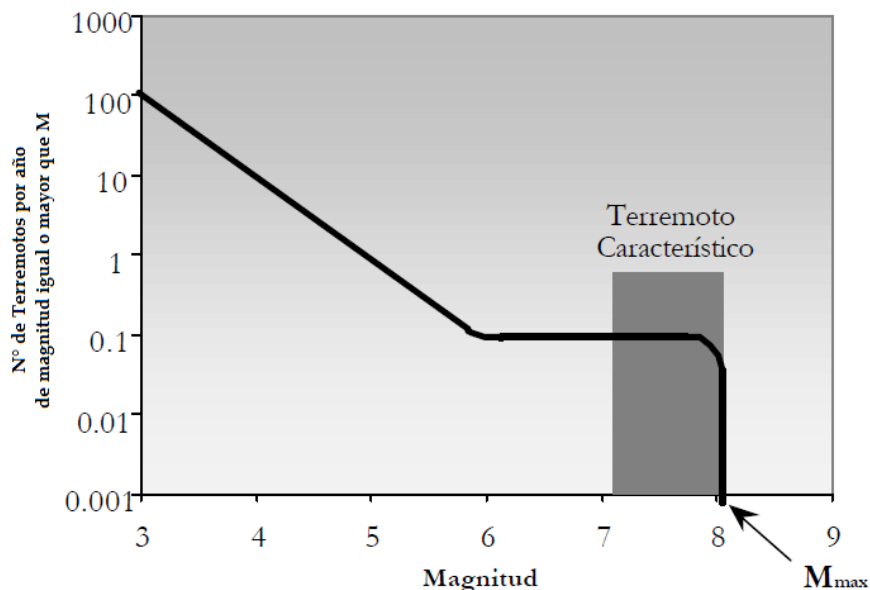
Gutenberg y Richter en 1954 desarrollaron estadística de la sismicidad de la Tierra. Llegaron a una relación en que el número  $N$  de sismos mayores de una magnitud  $M$ , para un determinado tiempo, es función de la magnitud, según la siguiente expresión:

$$\log N = a - b \cdot M$$

Donde  $N$  representa la recurrencia sísmica anual de magnitud mayor o igual a  $M$ , y  $a$  (numero de sismos) y  $b$  (dimensión fractal) son constantes determinadas por la naturaleza sísmica de la región. Al realizar una gráfica del logaritmo del número de sismos en función de la magnitud, la relación de Gutenberg-Richter define una recta, donde el parámetro  $b$  es la pendiente y representa la proporción entre el número de sismos grandes y pequeños en la zona, y el parámetro  $a$  la ordenada en el origen, a partir de la cual se puede estimar la tasa anual de terremotos que superan una magnitud de referencia.

Esta relación es utilizada para definir la recurrencia de sismos de una zona, y para la obtención de una buena estimación se requiere disponer de observaciones en un amplio intervalo de tiempo, ya que los terremotos de gran magnitud en una zona son menos frecuentes.

En muchos casos de fallas individuales, y en áreas como la zona de subducción del Pacífico, donde se observan terremotos característicos con una cierta frecuencia, la sismicidad no queda reflejada tan claramente por medio de la ley de Gutenberg-Richter. Es decir, los terremotos grandes, de tamaño medio y los pequeños no se distribuyen como contempla dicha ley, sino que los eventos de mayor magnitud que definen el terremoto característico tienen un intervalo regular de recurrencia, que no corresponde a una relación lineal, ilustrado en la figura 7 (Benito y Jiménez, 2005).



**Figura 7.** Ley Gutenberg-Richter incluyendo terremoto característico. (Benito y Jiménez, 2005)

### CAPÍTULO III: PARÁMETROS SÍSMICOS

En ingeniería siempre ha sido importante caracterizar y medir los terremotos y sus efectos de alguna manera lógica, esto permite realizar estudios de peligro sísmico y resulta fundamental para el diseño sísmico de estructuras.

Una manera de describir el tamaño de un movimiento sísmico, es mediante la magnitud, la cual representa la energía liberada. Existen diferentes escalas que grafican la energía como: magnitud local, magnitud de ondas superficiales, magnitud de ondas de cuerpo y magnitud momento. Por otro lado, la intensidad describe la perceptibilidad del sismo y los daños que se observan en las estructuras en un lugar específico. La escala de uso más común es la Intensidad de Mercalli Modificada (IMM), la cual está conformada por 12 grados de intensidad del movimiento descritos en la Tabla 2.

GRADOS	DESCRIPCIÓN
I	No se advierte sino por unas pocas personas y en condiciones de perceptibilidad especialmente favorables
II	Se percibe sólo por algunas personas en reposo, particularmente las ubicadas en los pisos superiores de los edificios
III	Se percibe en los interiores de los edificios y casas. Sin embargo, muchas personas no distinguen claramente que la naturaleza del fenómeno es sísmica, por su semejanza con la vibración producida por el paso de un vehículo liviano
IV	Los objetos colgantes oscilan visiblemente. Muchas personas lo notan en el interior de los edificios aún durante el día. En el exterior, la percepción no es tan general
V	La mayoría de las personas lo perciben aún en el exterior. En los interiores, durante la noche, muchas personas despiertan. Los objetos inestables se mueven o se vuelcan
VI	Lo perciben todas las personas. Se siente inseguridad para caminar. Se quiebran los vidrios de las ventanas, la vajilla y los objetos frágiles. Los cuadros suspendidos de las murallas caen. Los muebles se desplazan o se vuelcan. Se producen grietas en algunos estucos.
VII	Los objetos colgantes se estremecen. Se experimenta dificultad para mantenerse en pie. Se producen daños de consideración en estructuras de albañilería mal construidas o mal proyectadas. Sufren daños menores (grietas) las estructuras corrientes de albañilería bien construidas. Caen trozos de estuco, ladrillos, parapetos, cornisas y diversos elementos arquitectónicos
VIII	Se hace difícil e inseguro el manejo de vehículos. Se producen daños de consideración y aún el derrumbe parcial en estructuras de albañilería bien construidas. En estructuras de albañilería especialmente bien proyectadas y construidas sólo se producen daños leves. Caen murallas de albañilería. Las casas de madera se desplazan y aún se salen totalmente de sus bases. Los tabiques se desprenden
IX	Se produce pánico general. Las estructuras de albañilería mal proyectadas o mal construidas se destruyen. Las estructuras corrientes de albañilería bien construidas se dañan y a veces se derrumban totalmente. Las estructuras de albañilería bien proyectadas y bien construidas se dañan seriamente. Los cimientos se dañan. Las estructuras de madera son removidas de sus cimientos. Sufren daños considerables los depósitos de agua, gas, etc. Se quiebran las

	tuberías (cañerías) subterráneas. Aparecen grietas aún en suelos secos. En las regiones aluviales, pequeñas cantidades de lodo y arena son expelidas del suelo.
X	Se destruye gran parte de las estructuras de albañilería de toda especie. Se destruyen los cimientos de las estructuras de madera. Algunas estructuras de madera bien construidas, incluso puentes, se destruyen. Se producen grandes daños en represas, diques y malecones. Se producen grandes desplazamientos del terreno en los taludes. El agua de canales, ríos, lagos, etc. Sale proyectada a las riberas. Cantidades apreciables de lodo y arena se desplazan horizontalmente sobre las playas y terrenos planos. Los rieles de las vías férreas quedan ligeramente deformados.
XI	Muy pocas estructuras de albañilería quedan en pie. Los rieles de las vías férreas quedan fuertemente deformados. Las tuberías (cañerías subterráneas) quedan totalmente fuera de servicio.
XII	El daño es casi total. Se desplazan grandes masas de roca. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados

**Tabla 2.** Descripción de Intensidad de Mercalli Modificada.

Sin embargo, existen parámetros sísmicos que representan la energía e intensidad de un movimiento sísmico y que pueden ser obtenidos de diferentes formas numéricas. De esta manera los sismos son caracterizados cuantitativamente, los cuales son introducidos en los cálculos dinámicos de estructuras. Estos parámetros permiten relacionar la caracterización del movimiento y el comportamiento estructural.

Los parámetros concernientes con el movimiento son la aceleración máxima del suelo (PGA), la velocidad y desplazamiento máximo del suelo (PGV y PGD), de los cuales el PGA es comúnmente correlacionado con la Intensidad de Mercalli Modificada. Otros son indicativos de la energía como Intensidad de Arias ( $I_A$ ), CAV, Intensidad de Housner ( $I_H$ ) y la Intensidad JMA. Por otro lado, el Potencial Destructivo ( $P_D$ ) considera el contenido de frecuencia y representa la capacidad destructora del terremoto. Finalmente, el Espectro de respuesta permite identificar y graficar la respuesta estructural.

A continuación se detallan los parámetros considerados para el presente trabajo de título:

### 3.1. INTENSIDAD DE ARIAS

La Intensidad de Arias definida por Arias (1970), es un parámetro que refleja la energía total contenida en el registro de aceleraciones y se relaciona con la capacidad de los movimientos sísmicos de producir daño en las estructuras.

La Intensidad de Arias representa la suma de energía disipada por unidad de masa por un conjunto de osciladores elásticos amortiguados de un grado de libertad cuyas

frecuencias están uniformemente distribuidas en todo el rango de frecuencias, entre 0 e infinito (Arias, 1970).

La propuesta original de Arias se basaba en la medida de intensidad para el diseño sísmico de centrales nucleares como un tensor simétrico. Sin embargo, para este trabajo se aplicará la Intensidad de Arias para cada eje según corresponda.

Se define según la siguiente expresión:

$$I_A = \frac{\pi}{2 \cdot g} \int_{t_0}^{t_0+D} a(t)^2 dt$$

Donde:

- $I_A$ : Intensidad de Arias.
- $g$ : Aceleración de gravedad.
- $t_0$ : Tiempo inicial del registro de aceleraciones.
- $D$ : Duración del registro de aceleraciones.
- $a(t)$ : Registro de aceleraciones.

### 3.2. POTENCIAL DESTRUCTIVO

El Potencial Destructivo definido por Araya y Saragoni (1984), es un parámetro que permite evaluar la capacidad destructora de un evento sísmico, vale decir, mediante este parámetro es posible distinguir entre un sismo que realmente es capaz de producir daño y otro que no lo es para distintas lugares del mundo.

Se define según la siguiente expresión:

$$P_D = \frac{I_A}{v_0^2}$$

Donde:

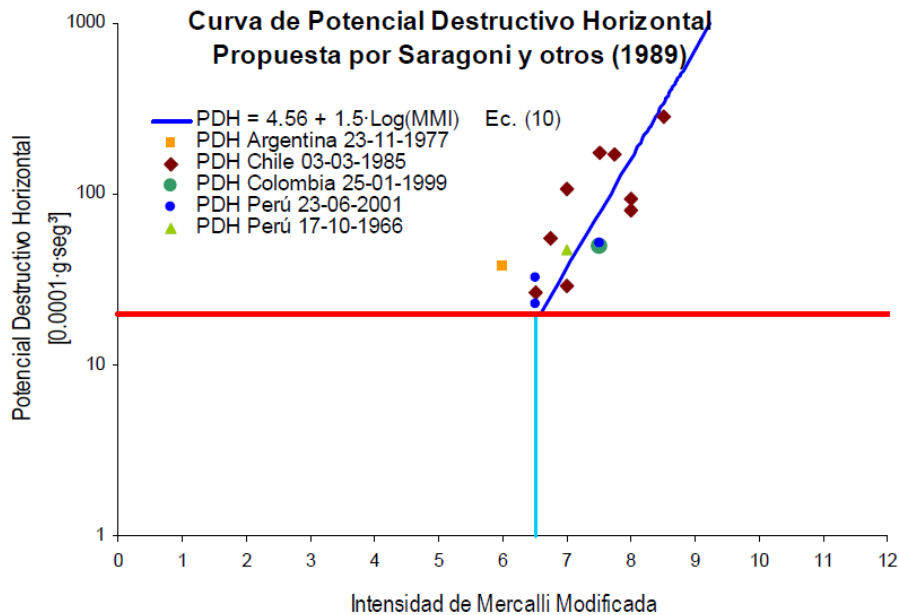
- $P_D$ : Potencial Destructivo.
- $I_A$ : Intensidad de Arias.
- $v_0$ : Intensidad de cruces por cero.

Esta definición considera tres parámetros que caracterizan el movimiento sísmico, estos son: la aceleración máxima del suelo, la duración del movimiento fuerte y el contenido de frecuencia mediante la intensidad de cruces por cero, que es calculado directamente del registro de aceleraciones contabilizando la cantidad total de cruces por cero dividido por el tiempo total transcurrido.



Diversos estudios e investigaciones han puesto en evidencia que este parámetro resulta bastante bien correlacionado con los daños observados y con la Intensidades macrosísmicas equivalentes. Este es el parámetro más completo y el que mejor se ajusta a los daños observados (Orosco y Alfaro, 2007).

En la figura 8 es posible ver gráficamente esta correlación entre el Potencial Destructivo y la Intensidad de Mercalli Modificada que fue propuesta por Saragoni (1989), la curva permite reconocer valores de Potencial Destructivo para ciertos grados de daño producido por terremotos destructivos sudamericanos.



**Figura 8.** Potencial destructivo versus IMM para registros destructivos (Saragoni et al, 1989).

### 3.3. INTENSIDAD ESPECTRAL DE HOUSNER

La Intensidad Espectral definida por Housner (1952) es un parámetro que mide la severidad de un movimiento en estructuras elásticas. Está definida por el área bajo la curva del espectro de respuesta de velocidades. De esta manera el parámetro caracteriza la severidad del movimiento considerando la respuesta de un oscilador de un grado de libertad, en un rango de períodos definido y con un determinado amortiguamiento (Housner, 1952).

Está definida según la siguiente expresión:

$$I_H = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \beta = 0.2) dT$$

Donde:

- $I_H$ : Intensidad Espectral de Housner.
- $S_v(T, \beta)$ : Espectro de velocidades.
- $T$ : Período.
- $\beta$ : Fracción de amortiguamiento crítico.

Housner definió los límites de integración, entre 0.1 y 2.5 segundos, ya que son valores que incluyen el rango de períodos comunes en el diseño de estructuras de edificación. Por otro lado, la fracción de amortiguamiento crítico la definió con un valor de 20%.

La mayor desventaja de este parámetro es la incapacidad para considerar el efecto de la duración del movimiento fuerte, por lo que resulta un buen indicador si se utiliza comparando movimientos de similar duración y contenido de frecuencias.

Housner (1952) propone que si la Intensidad es dividida por el intervalo de períodos de integración, 2.4 para el caso, equivale a tomar el valor medio del espectro de respuesta de velocidades en ese rango de períodos, de esta manera el parámetro adquiere dimensiones de velocidad. Esta expresión es utilizada frecuentemente, sin embargo para este trabajo se considera la definición original de Housner.

### 3.4. VELOCIDAD ABSOLUTA ACUMULADA

La Velocidad Absoluta Acumulada, mencionada generalmente por su sigla en inglés CAV (Cumulative Absolute Velocity), fue definida por el Electrical Power Research Institute (EPRI) en 1988, siendo modificada en 1991. EPRI (1991) lo define como el área bajo la curva del acelerograma absoluto. De esta manera considera la contribución de la amplitud y la duración del movimiento, y además, elimina la influencia de pequeñas amplitudes, no dañinas para las estructuras.

Está definido por la siguiente expresión:

$$CAV = \int_{t_0}^{t_0+D} |a(t)| dt$$

Donde:

- $CAV$  : Velocidad Absoluta Acumulada.
- $a(t)$ : Registro de aceleraciones.
- $t_0$ : Tiempo inicial del registro de aceleraciones.
- $D$ : Duración del registro de aceleraciones.

Para su estimación se consideran ventanas de 1 segundo y se consideran los valores de aceleración de aquellas ventanas en las que se excede el umbral fijado (típicamente 0.025g). Se integran estos valores y el área resultante es la suma de todas las ventanas

significativas. Resulta así un parámetro para determinar un umbral de daño de terremoto.

### 3.5. INTENSIDAD SÍSMICA AGENCIA METEOROLÓGICA DE JAPÓN

La Intensidad Sísmica de la Agencia Meteorológica de Japón, denominada por las siglas JMA (Japan Meteorological Agency), fue creada como una estimación del daño estructural producido por un movimiento sísmico, determinado de manera subjetiva mediante una escala de 1 a 7. Esta escala se utilizó por varios años, sin embargo, en la década de 1990, la Agencia Meteorológica comenzó a desarrollar una intensidad sísmica instrumental que reemplazara la del juicio humano. En 1996, la escala de intensidad JMA fue revisada y se desplegaron más de 500 acelerómetros que miden intensidad JMA.

Para calcular este parámetro se aplica la transformada de Fourier para las tres componentes de aceleración del registro. Luego, se aplica un filtro pasa-banda en el dominio de las frecuencias. Este filtro está determinado por (Karim y Yamazaki, 2001):

$$F(f) = F_1(f) \cdot F_2(f) \cdot F_3(f)$$

Donde:

$$F_1(f) = \sqrt{1/f}$$

Filtro Pasa-Bajo

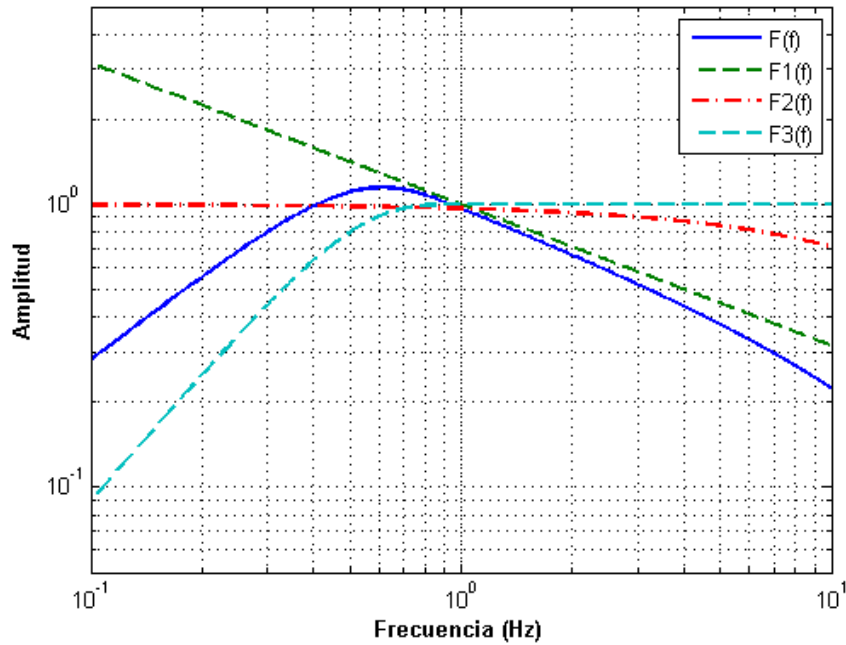
$$F_2(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.694x^2 + 0.241x^4 + 0.0557x^6 + 0.009664x^8 + 0.00134x^{10} + 0.000155x^{12}}}$$

$$(x = \sqrt{f/f_c})$$

Filtro Pasa-Alto

$$F_3(f) = \sqrt{1 - e^{(-f/f_0)^3}}$$

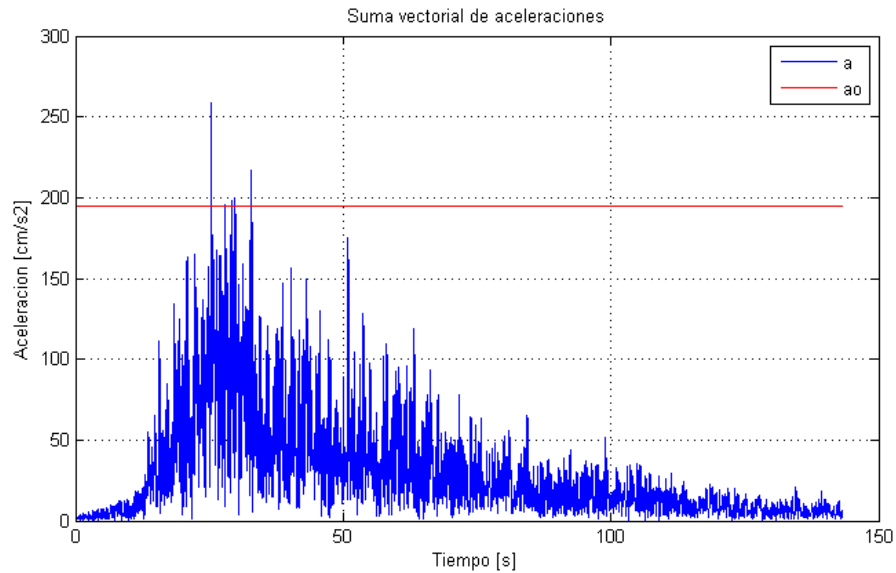
Donde  $f$  es la frecuencia de campo libre,  $f_c$  frecuencia pasa-bajo y  $f_0$  frecuencia pasa-alto.



**Figura 9.** Filtros de frecuencias para cálculo de Intensidad JMA.

Se aplica la inversa de transformada de Fourier, y de la suma vectorial de las 3 componentes de la aceleración se obtiene una aceleración característica  $a_0$  la cual debe cumplir que  $\tau(a_0) \geq 0.3 \text{ seg}$ , donde  $\tau(a)$  es el total de tiempo el cual excede la aceleración  $a$ . Finalmente, se calcula la Intensidad Sísmica JMA con la siguiente expresión:

$$I_{JMA} = 2.0 \cdot \log a_0 + 0.94$$



**Figura 10.** Suma vectorial de las 3 componentes de aceleraciones en el tiempo.

### 3.6. ESPECTRO DE RESPUESTA

Desde su introducción Benioff en 1934, y su propuesta formal por Biot en 1941 y el desarrollo de Housner y otros, los espectros de respuesta de movimientos fuertes se han transformado en una herramienta importante en la dinámica de estructuras, siendo útiles en problemas de diseño sismorresistente.

Los espectros son calculados a partir de la respuesta máxima (expresada en aceleración, velocidad y desplazamiento) que produce un movimiento fuerte a un conjunto de osciladores de 1 grado de libertad que abarcan un rango definido de períodos con un amortiguamiento determinado. Esta respuesta es representada en un gráfico cuya abscisa corresponde al período de las estructuras y la ordenada corresponde a la respuesta máxima para un determinado parámetro como aceleración, velocidad y desplazamiento. Estas curvas proporcionan una descripción de las características de la frecuencia del movimiento de la tierra y condensan la máxima respuesta de estructuras simples durante un terremoto. Sin embargo, los espectros de respuesta omiten información importante dado que los efectos del terremoto sobre la estructura dependen no solo de la respuesta máxima sino también de la duración del movimiento.

A continuación, se detalla la formulación del método (Nigam y Jennings, 1969) usado en el cálculo del espectro de respuesta en este trabajo de título:

Los Espectros se definen por la respuesta máxima de un oscilador simple sujeto a una aceleración base  $a(t)$ . La ecuación de movimiento del oscilador es:

$$\ddot{x} + 2\beta\omega\dot{x} + \omega^2x = -a(t)$$

Donde:

- $\beta$ : Fracción de amortiguamiento crítico.
- $\omega$ : Frecuencia natural de vibración del oscilador.

Asumiendo que  $a(t)$  puede ser aproximada por una función lineal en tramos pequeños, la ecuación de movimiento queda expresada por:

$$\ddot{x} + 2\beta\omega\dot{x} + \omega^2x = -a_i - \frac{\Delta a_i}{\Delta t_i}(t - t_i); \quad t_i \leq t \leq t_{i+1}$$

Donde:

$$\begin{aligned}\Delta t_i &= t_{i+1} - t_i \\ \Delta a_i &= a_{i+1} - a_i\end{aligned}$$

La solución de la ecuación de movimiento, para  $t_i \leq t \leq t_{i+1}$  esta dada por:

$$x = e^{-\beta\omega(t-t_i)} \left[ C_1 \text{sen} \left( \omega\sqrt{1-\beta^2}(t-t_i) \right) + C_2 \cos \left( \omega\sqrt{1-\beta^2}(t-t_i) \right) \right] - \frac{a_i}{\omega^2} + \frac{2\beta}{\omega^3} \frac{\Delta a_i}{\Delta t_i} - \frac{1}{\omega^2} \frac{\Delta a_i}{\Delta t_i} (t-t_i)$$

Donde  $C_1$  y  $C_2$  son constantes de integración.

Fijando  $x = x_i$  y  $\dot{x} = \dot{x}_i$  para  $t = t_i$  y resolviendo para  $C_1$  y  $C_2$ , se tiene:

$$C_1 = \frac{1}{\omega\sqrt{1-\beta^2}} \left( \beta\omega x_i + \dot{x}_i - \frac{2\beta^2 - 1}{\omega^2} \frac{\Delta a_i}{\Delta t_i} + \frac{\beta}{\omega} a_i \right)$$

$$C_2 = x_i - \frac{2\beta^2}{\omega^3} \frac{\Delta a_i}{\Delta t_i} + \frac{a_i}{\omega^2}$$

Al reemplazar  $C_1$  y  $C_2$  se tiene que el desplazamiento y velocidad,  $x$  y  $\dot{x}$ , respectivamente, para  $t = t_i$  están dados por:

$$\bar{x}_{i+1} = A(\beta, \omega, \Delta t_i) \bar{x}_i + B(\beta, \omega, \Delta t_i) \bar{a}_i$$

Donde,

$$\bar{x}_i = \begin{Bmatrix} x_i \\ \dot{x}_i \end{Bmatrix} \text{ y } \bar{a}_i = \begin{Bmatrix} a_i \\ a_{i+1} \end{Bmatrix}$$

Definiendo las siguientes expresiones:

$$\varphi = \sqrt{1-\beta^2} \text{ y } \zeta = e^{-\beta\omega\Delta t_i}$$

La ecuación para la velocidad queda definida por:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{i+1} = & \left( -\frac{\omega\zeta}{\varphi} \sin \omega\varphi\Delta t_i \right) x_i + \zeta \left( \cos \omega\varphi\Delta t_i - \frac{\beta}{\varphi} \sin \omega\varphi\Delta t_i \right) \dot{x}_i \\ & + \left\{ \zeta \left[ \left( \frac{2\beta^2 - 1}{\omega^2\Delta t_i} + \frac{\beta}{\omega} \right) \left( \cos \omega\varphi\Delta t_i - \frac{\beta}{\varphi} \sin \omega\varphi\Delta t_i \right) \right. \right. \\ & \left. \left. - \left( \frac{2\beta}{\omega^3\Delta t_i} + \frac{1}{\omega^2} \right) (\omega\varphi \sin \omega\varphi\Delta t_i + \beta\omega \cos \omega\varphi\Delta t_i) \right] + \frac{1}{\omega^2\Delta t_i} \right\} a_i \\ & + \left\{ -\zeta \left[ \frac{2\beta^2 - 1}{\omega^2\Delta t_i} \left( \cos \omega\varphi\Delta t_i - \frac{\beta}{\varphi} \sin \omega\varphi\Delta t_i \right) \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{2\beta}{\omega^3\Delta t_i} (\omega\varphi \sin \omega\varphi\Delta t_i + \beta\omega \cos \omega\varphi\Delta t_i) \right] - \frac{1}{\omega^2\Delta t_i} \right\} a_{i+1} \end{aligned}$$

La aceleración absoluta,  $\ddot{z}_i$ , para el tiempo  $t_i$  esta dado por:

$$\ddot{z}_i = \ddot{x}_i + a_i = -(2\beta\omega\dot{x}_i + \omega^2 x_i)$$

Para construir los espectros de respuesta, es necesario encontrar los máximos valores de desplazamiento, velocidad y aceleración:

$$S_d(\omega, \beta) = \max_{i=1,N} x_i(\omega, \beta)$$

$$S_v(\omega, \beta) = \max_{i=1,N} \dot{x}_i(\omega, \beta)$$

$$S_a(\omega, \beta) = \max_{i=1,N} \ddot{z}_i(\omega, \beta)$$

Donde:

- $S_d$ : Espectro de respuesta de desplazamiento.
- $S_v$ : Espectro de respuesta de velocidad.
- $S_a$ : Espectro de respuesta de aceleración.

### 3.7. VALORES MÁXIMOS DEL SUELO

- Aceleración Máxima del Suelo (PGA)

La aceleración máxima del suelo, denominada por las siglas en inglés PGA (Peak Ground Acceleration), es la amplitud máxima del registro de aceleraciones del suelo. El PGA está relacionado con la fuerza de un movimiento sísmico.

El PGA es el parámetro más usado para describir la intensidad y la destructividad de un terremoto en un lugar dado por su determinación simple y porque las fuerzas de inercia dependen directamente de la aceleración.

- Velocidad Máxima del Suelo (PGV)

La velocidad máxima del suelo, es denominada por PGV (Peak Ground Velocity)

- Desplazamiento Máximo del Suelo (PGD)

El desplazamiento máximo del suelo, corresponde a PGD (Peak Ground Displacement). El efecto de estos parámetros en la dinámica estructural es menos evidente que el PGA.

En la mayoría de los casos, los valores máximos se alcanzan en las componentes horizontales, sin embargo, para este trabajo se calcula el parámetro PGA como el mayor valor en todas las componentes del registro (2 horizontales y 1 vertical). El PGV,

es calculado como el mayor valor de la integración del registro de aceleraciones y el PGD, corresponde al mayor valor de la integración de las velocidades.

### 3.8. DURACIÓN DE MOVIMIENTO FUERTE

Se define como el intervalo de tiempo entre los instantes en que la función que representa el diagrama de Husid alcanza el 5% y el 95% de su valor final (Trifunac y Brady, 1975).

$$H(t) = \int_{t_0}^{t_0+t} a(t)^2 dt$$

Esta función se relaciona directamente con la Intensidad de Arias, determinando la duración significativa del terremoto entre los mismos límites dichos anteriormente. La figura 11 muestra un ejemplo del tiempo limitado por estos rangos para un registro de Tarapacá 2005.

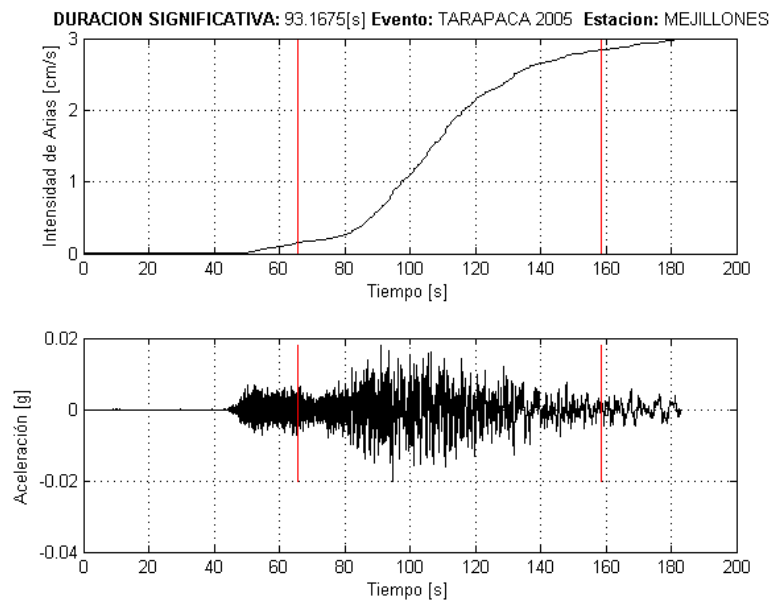


Figura 11. Ejemplo de duración de movimiento fuerte.



## CAPÍTULO IV: CATÁLOGO DE TERREMOTOS

Esta etapa del trabajo de título consiste en la recopilación, almacenamiento y manipulación de los registros sísmicos y su información relevante, tales como: eventos, estaciones y equipos, para la construcción de las bases de datos principales y el posterior cálculo del catálogo de terremotos con sus parámetros sísmicos. Este proceso de recopilación es fundamental, ya que una información verificada y una manipulación apropiada de los datos permite obtener resultados confiables.

La principal fuente de obtención de la información fue el Centro Sismológico Nacional y la Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos, RENADIC, del departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Esta red de cobertura nacional de acelerógrafos funciona desde inicios de la década de los 70, en la división Estructuras-Construcción-Geotecnia del Departamento de Ingeniería Civil, y está destinada a registrar terremotos en Chile para fines de investigación.

La RENADIC posee instrumentos tanto de campo libre como en estructuras y tiene como objetivos:

- Establecer las características de movimientos sísmicos fuerte a nivel nacional.
- Identificar y establecer la demanda sísmica sobre estructuras.
- Monitorear la respuesta sísmica de suelos.
- Monitorear la respuesta sísmica de sistemas estructurales.

Los equipos de campo libre de la RENADIC están destinados a registrar eventos sísmicos en distintas condiciones de suelo y sin alteración significativa por obras civiles.

Los registros sísmicos digitalizados están disponibles en [www.renadic.cl](http://www.renadic.cl) y [www.terremotos.ing.uchile.cl](http://www.terremotos.ing.uchile.cl), plataformas que contienen la información analizada y condensada por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (DIC), desde 1993.

Los responsables del desarrollo y mantención de esta red y del procesamiento de los datos han sido el Profesor Rubén Boroschek, el Ingeniero Pedro Soto y el señor Ricardo León.

La información recopilada está organizada por Eventos, Registros, Estaciones y Equipos. Toda esta información está almacenada utilizando el programa computacional MATLAB, en base a estructuras (struct), que son arreglos que permiten guardar distintos tipos de datos (string, cell, array, struct, etc).

Se organiza la información en cuatro archivos de datos principales (archivos de formato .mat):

- Registros.mat
- Eventos.mat
- Estaciones.mat
- Equipos.mat

#### 4.1. REGISTROS

Los registros se descargaron desde el portal [www.terremotosuchile.cl](http://www.terremotosuchile.cl) (a partir de 1994) y del Centro Sismológico Nacional (antes de 1994). Todos los registros recopilados se almacenan en un archivo de datos de MATLAB denominado Registros.mat que corresponde a un archivo de 203 estructuras (<1x203 struct>). La figura 12 muestra cómo se organiza el archivo. Cada estructura contiene los siguientes campos:

- Evento : <string> indica nombre del evento que se registró.
- Estacion : <string> indica nombre de la estación donde se registró.
- Equipo : <string> indica número de serie o modelo del equipo usado.
- Muestreo : <double> indica frecuencia de muestreo en [Hz]
- Canal1 : <array> con valores registrados en Canal1.
- Canal2 : <array> con valores registrados en Canal2.
- Canal3 : <array> con valores registrados en Canal3.

Los campos Canal1, Canal2 y Canal3 almacenan directamente los valores registrados, vale decir, cada canal es un vector con el registro no corregido con unidades de fracción de aceleración de gravedad [g].

Los Registros corresponden a eventos sísmicos desde 1981 hasta 2010 que se encuentran en un rango de PGA entre 0.05g y 1g. La figura 13 grafica la distribución de los registros en ese período de tiempo. Se aprecia que en 1985 se tiene una gran cantidad de registros debido a la abundante instrumentación del terremoto de Valparaíso del 3 de marzo de 1985. Además, el gráfico refleja el mayor número de registros a partir de 2005 a 2010, producto de la gran cantidad de eventos tanto importantes como menores, entre los importantes está Tarapacá 2005, Tocopilla 2007 y el Maule 2010

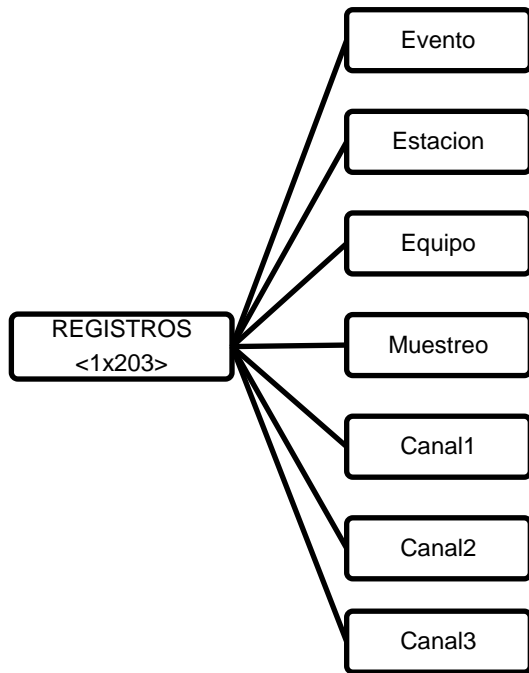


Figura 12. Diagrama esquemático de base de Registros.

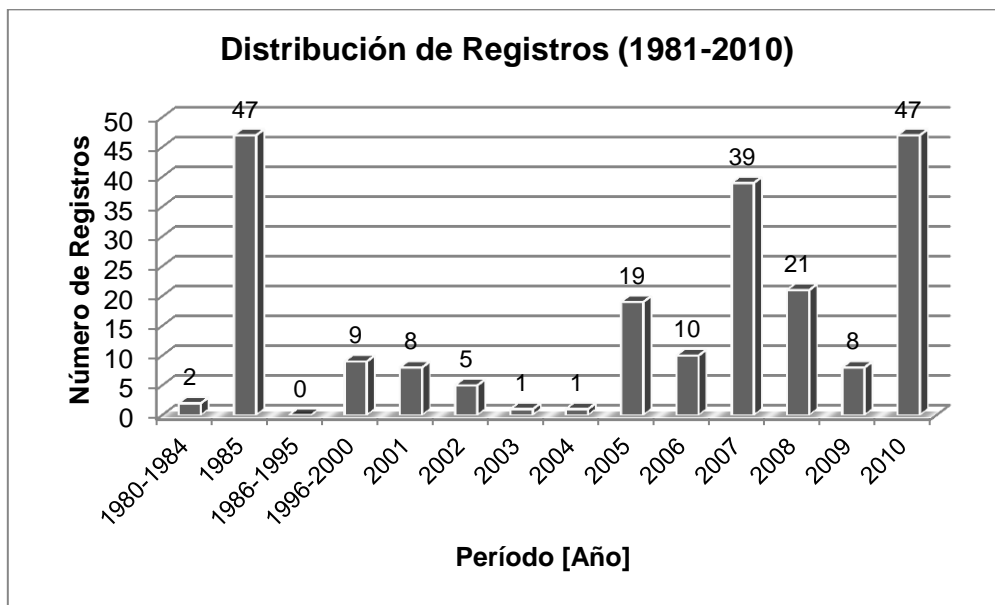


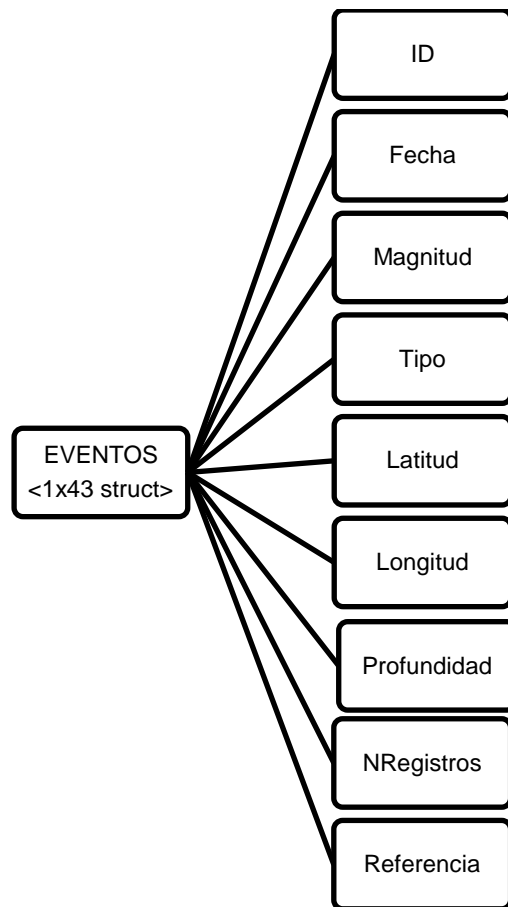
Figura 13. Distribución de Registros.

#### 4.2. EVENTOS

Cada registro está asociado a un evento. La información de cada evento se obtiene principalmente desde los catálogos: International Seismological Centre (ISC) y Centennial Earthquake Catalog (CEN). Otra fuente de información son los informes del Centro Sismológico Nacional, administrado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (GUC) y en casos particulares de trabajos académicos.

Se almacena toda la información relevante de los eventos en un archivo de datos de MATLAB denominado Eventos.mat que corresponde a un archivo de 43 estructuras (<1x43 struct>). La figura 14 muestra cómo se organiza el archivo. Cada estructura contiene los siguientes campos:

- ID : <string> indica el nombre del evento.
- Fecha : <string> indica fecha del evento (AAAA-MM-DD).
- Magnitud : <double> indica magnitud Mw del evento.
- Tipo : <string> indica la fuente sismogénica.
- Latitud : <double> indica la latitud del evento [°].
- Longitud : <double> indica la longitud del evento [°].
- Profundidad : <double> indica la profundidad del evento.
- NRegistros : <double> indica la cantidad de registros del evento.
- Referencia : <string> indica la referencia de la información.



**Figura 14.** Diagrama esquemático de la base de Eventos.

El campo ID indica el nombre del evento con un código que corresponde a la fecha más un número que indica si es un evento único (ejemplo: 8503032, donde 850303 corresponde a la fecha del evento de 1985/03/03 y 2 indica que es una réplica

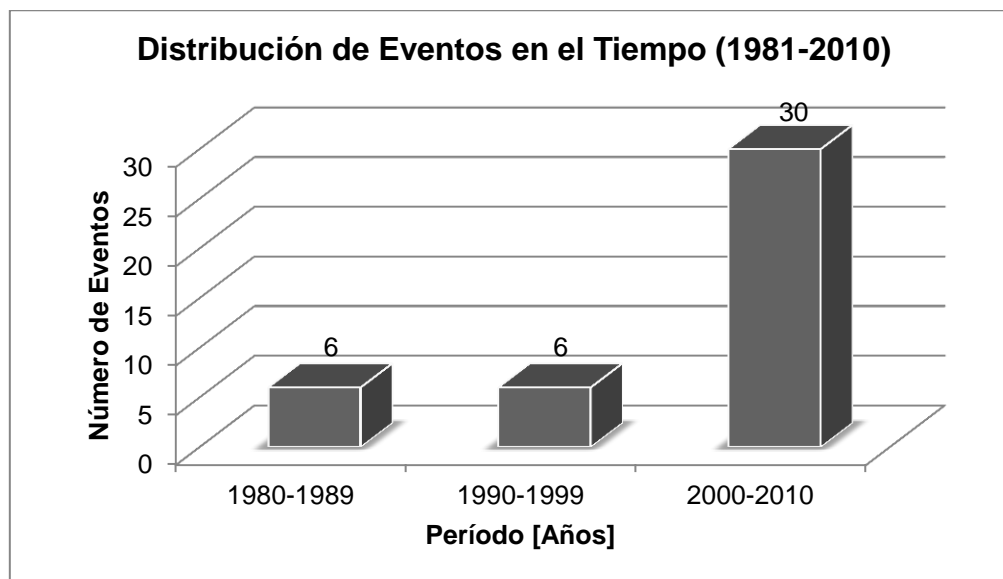
inmediata del evento). Para eventos importantes lleva el nombre del lugar y año del terremoto (ejemplo: MAULE 2010).

Como se mencionó en el punto anterior, los eventos considerados van desde 1981 hasta 2010, incluyendo seis terremotos importantes: Valparaíso 1985, Punitaqui 1997, Sur de Perú 2001, Tarapacá 2005, Tocopilla 2007 y Maule 2010. La tabla 3 detalla los eventos mencionados.

Evento	Fecha	Magnitud, Mw (Ref. GUC)
Valparaíso 1985	03 de marzo de 1985	8.0
Punitaqui 1997	15 de octubre de 1997	7.1
Sur de Perú 2001	23 de junio de 2001	8.4
Tarapacá 2005	13 de junio de 2005	7.8
Tocopilla 2007	14 de noviembre de 2007	7.7
Maule 2010	27 de febrero de 2010	8.8

**Tabla 3.** Eventos importantes en Base de Datos.

La figura 15 muestra la distribución de los eventos en el período de tiempo mencionado, separado en tres décadas.



**Figura 15.** Distribución de Eventos.

La cantidad de eventos registrados aumenta considerablemente en la década de 2000-2010, esto se debe a que desde el año 2001 se instalaron nuevos equipos a la red de acelerógrafos, además, en este período ocurren 4 terremotos importantes que provocan réplicas importantes.

Los eventos considerados tienen magnitud Mw sobre 4. La figura 16 muestra la distribución, en la que se puede apreciar que la mayor cantidad de eventos son de magnitud entre 5.0 y 6.9, y para magnitudes mayores hay cada vez menos eventos;

esto debido a que la probabilidad de ocurrencia decrece a medida que aumenta la magnitud del evento, es decir, sigue la relación Gutenberg-Richter (figura 17). Los eventos de magnitud 4.0 son casos especiales considerados, que tienen PGA mayor a 0.1 [g].

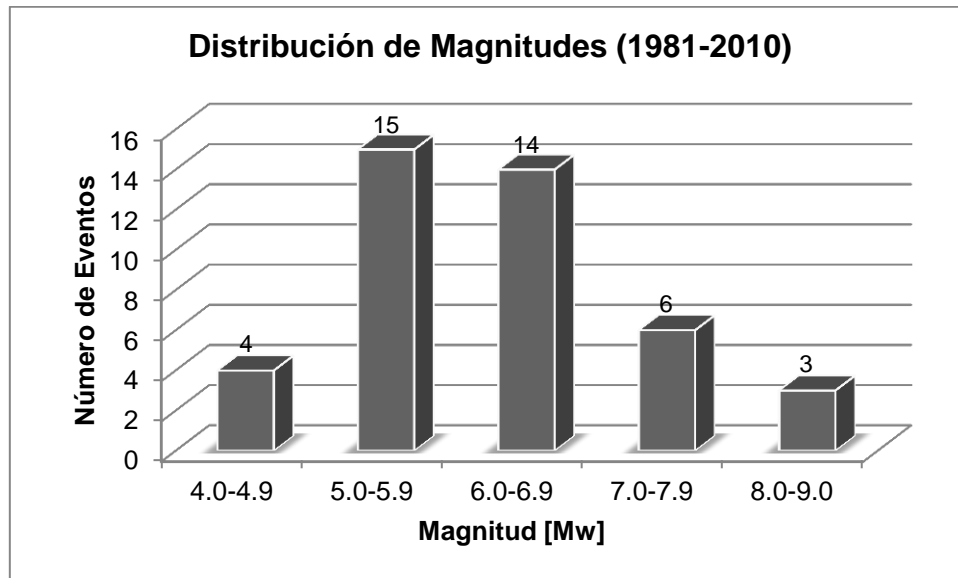


Figura 16. Distribución de Magnitudes.

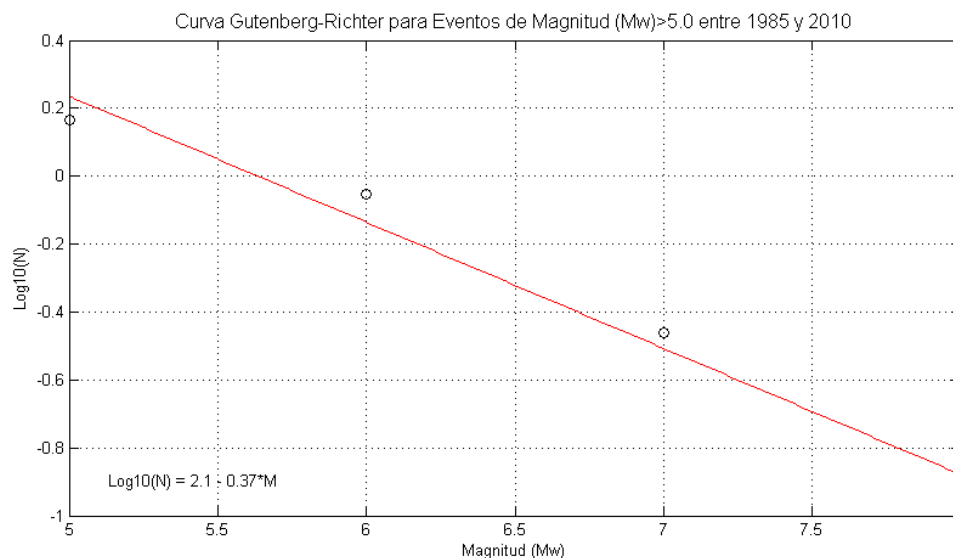
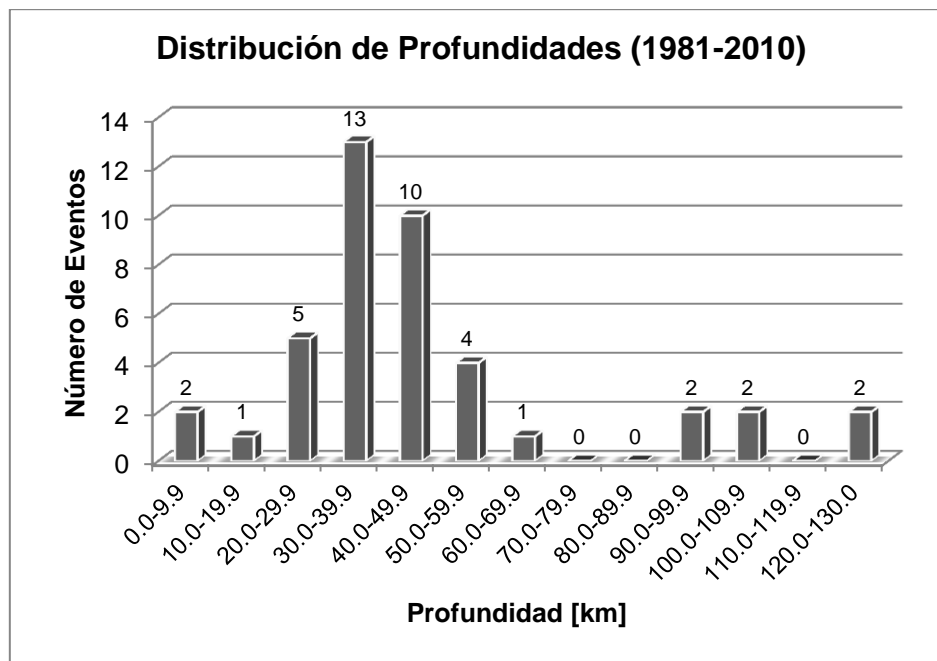


Figura 17. Curva Gutenberg-Richter para los eventos de Magnitud > 5.0 usados en la base de Datos.

Por otro lado, la figura 18 permite visualizar la distribución de hipocentros, como es de esperar la mayor cantidad de terremotos son de interplaca tipo thrust y luego de intraplaca profunda.



**Figura 18.** Distribución de Profundidades.

Con la información de latitud y longitud obtenida de los catálogos se identifica en la figura 19 la distribución de los eventos en planta a lo largo del territorio nacional indicando el epicentro con una estrella. Se observa que los eventos considerados para este trabajo grafican principalmente la sismicidad en el norte grande y en la zona centro de Chile para el período de tiempo determinado.

A cada evento se le asigna la fuente sismogénica basado en la definición detallada en el capítulo II, donde se establecen límites en profundidad que enmarcan los distintos tipos de fuente: superficial, interplaca tipo thrust e intraplaca de profundidad intermedia. Para aquellos eventos que se encuentran al límite de dos clasificaciones, fueron consultadas referencias que explicitan el tipo de terremoto y se detalla en la base de datos.

En la figura 20 se corrobora lo presentado en términos generales en la figura 18, visualizándose la gran cantidad de eventos de tipo interplaca tipo thrust (69% de la muestra), mientras que los intraplaca son sólo un tercio de estos últimos.

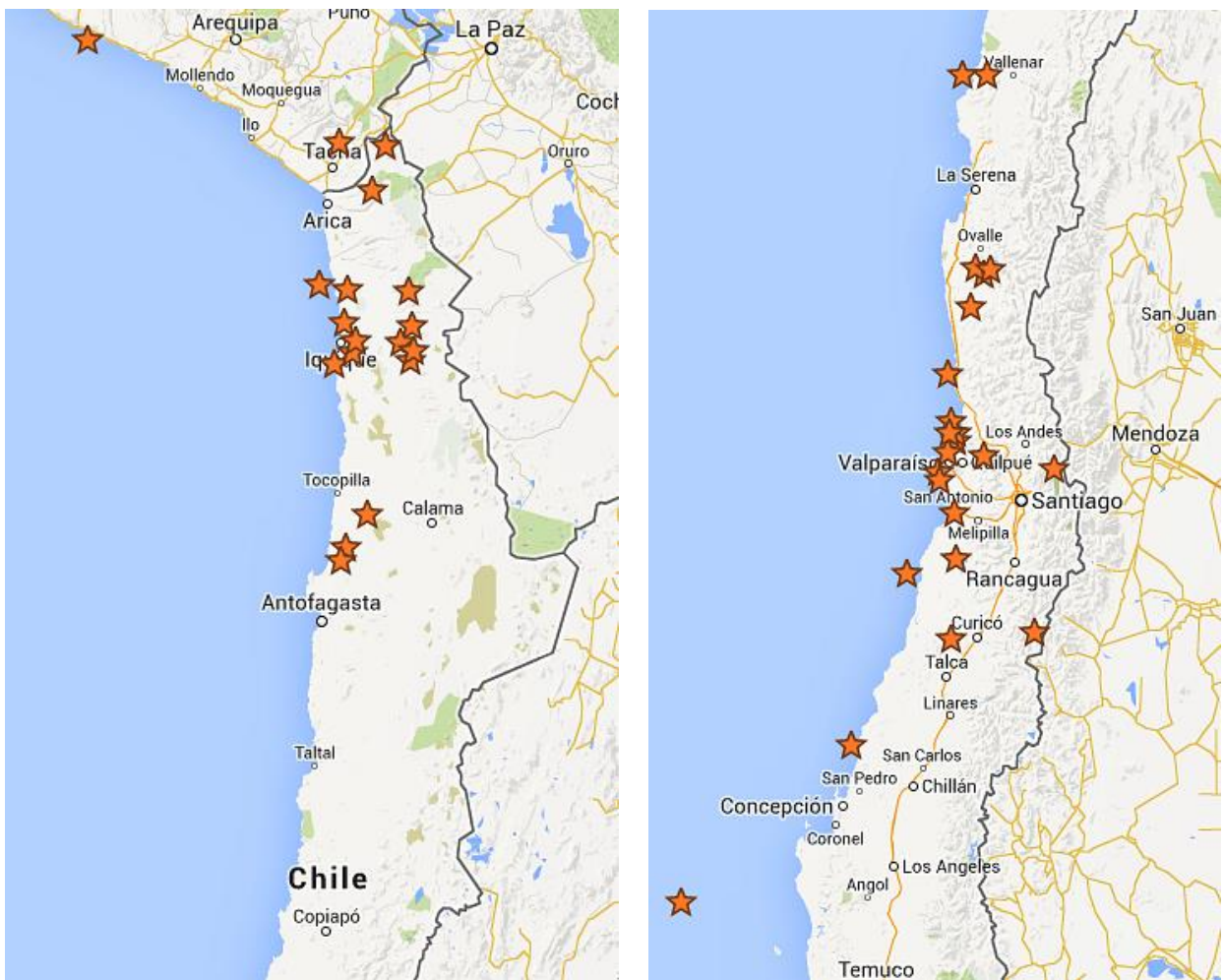


Figura 19. Eventos en planta.

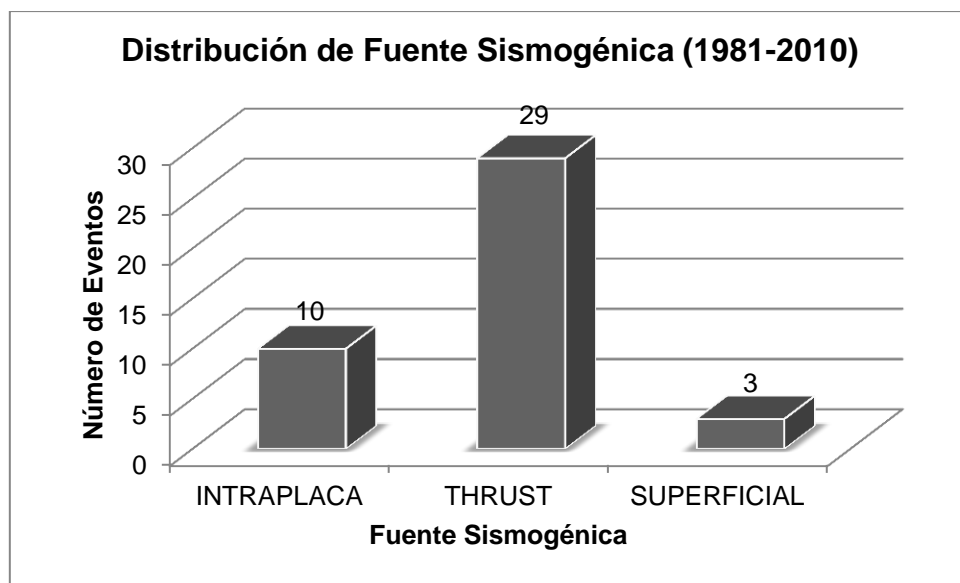


Figura 20. Distribución de Fuente Sismogénica.



A continuación se detalla los eventos considerados para el trabajo de título:

FECHA	MAGN.	FUENTE	LAT.	LONG.	PROF. [km]	REGISTROS	REF.
1981-11-07	6.7	INTRAPLACA	-32.240	-71.470	56.1	2	RUIZ, 2002
1985-03-03	8	THRUST	-33.1390	-71.7610	35	26	CEN
1985-03-03	6.4	THRUST	-32.9550	-71.1420	17.8	7	CEN
1985-03-04	7.4	THRUST	-33.2360	-71.7400	40	2	CEN
1985-03-25	6.3	THRUST	-34.2650	-72.1730	37.5	2	CEN
1985-04-09	7.1	THRUST	-34.1160	-71.5130	49.4	10	CEN
1996-02-22	6	THRUST *	-33.5880	-71.5520	47.3	2	CEN
1997-10-15	7.1	INTRAPLACA	-30.8910	-71.1540	62.3	3	CEN
1997-10-22	4.6	THRUST	-32.0283	-71.6300	41	1	DGF*
1997-11-03	6.2	INTRAPLACA	-30.800	-71.260	52	1	PARDO, 2002
1998-04-17	5.1	THRUST	-32.7867	-71.5250	36	1	DGF*
1999-08-02*	5	INTRAPLACA	-33.1040	-70.1970	105.3	1	ISC
2001-06-23	8.4	THRUST	-16.3800	-73.5000	32	7	CEN
2001-07-24	6.3	SUPERFICIAL	-19.5500	-69.2300	9	1	CEN
2002-02-26*	5.3	INTRAPLACA	-18.2890	-69.7220	92.5	3	ISC
2002-06-18	6.4	THRUST	-30.8300	-71.0600	54	2	CEN
2003-07-09	4.6	THRUST	-32.6928	-71.5178	27.5	1	GUC
2004-08-28	6.5	SUPERFICIAL	-34.9200	-70.4600	20	1	CEN
2005-03-24	5.2	INTRAPLACA	-20.4360	-69.2120	95	1	GUC
2005-06-13	7.8	INTRAPLACA	-20	-69.1900	105.5	14	CEN
2005-10-17*	5.6	INTRAPLACA	-17.7322	-69.5480	123.3	4	ISC
2006-02-10*	5	THRUST	-32.5680	-71.5968	34.2	2	ISC
2006-04-09	5.3	THRUST	-20.4669	-70.2285	36.2	2	ISC
2006-06-19	4.9	THRUST	-32.9189	-71.6378	42	2	GUC
2006-10-12	6.3	THRUST	-31.2600	-71.3300	31	1	CEN
2006-11-20	5	THRUST	-17.6936	-70.1605	41.5	3	ISC
2007-11-14	7.5	THRUST	-22.3208	-69.7803	33.6	23	ISC
2007-11-15	6.6	THRUST	-22.7389	-70.0773	35	1	ISC
2007-12-15	5.7	THRUST	-32.6934	-71.6189	28.9	3	ISC
2007-12-16	6.4	INTRAPLACA	-22.8877	-70.1289	57	12	ISC
2008-01-22	5.2	THRUST	-19.9547	-70.1008	49.4	4	GUC
2008-02-04	6.2	THRUST	-20.1855	-69.9476	42.8	4	ISC
2008-03-01	5.2	THRUST	-20.3148	-69.9822	38.8	4	ISC
2008-03-24	6.3	INTRAPLACA	-20.1960	-69.3410	122.5	3	GUC
2008-07-30	4.2	THRUST	-19.5410	-70.0570	26.7	1	GUC
2008-09-10	5.3	SUPERFICIAL	-20.3049	-69.1785	3.9	5	ISC
2009-05-25*	5.4	THRUST	-28.5463	-71.4415	47.2	1	ISC
2009-11-13	6.4	THRUST	-19.4690	-70.4181	36	6	ISC
2009-12-22*	5	THRUST	-28.5620	-71.0940	36.2	1	ISC
2010-02-27	8.5	THRUST	-36.1485	-72.9327	28.1	45	ISC
2010-02-27	7.3	THRUST	-37.8400	-75.2105	35	1	ISC
2010-02-28	5.8	THRUST	-35.0028	-71.5955	41.6	1	ISC

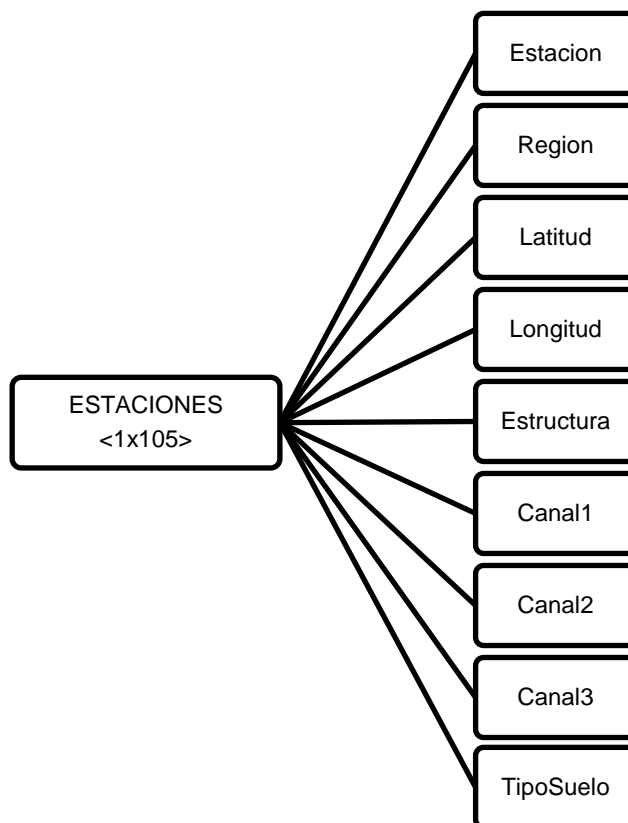
Tabla 4. Detalle completo de Eventos considerados para el catálogo.

#### 4.3. ESTACIONES

Los instrumentos de la red de acelerógrafos se encuentran distribuidos a lo largo del territorio nacional desde Arica hasta Valdivia. Todas las estaciones se almacenan en un archivo de datos de MATLAB denominado Estaciones.mat que corresponde a un

archivo que contiene 105 estructuras (<1x105 struct>). La figura 21 muestra cómo se organiza la base. Cada estructura está conformada por los siguientes campos:

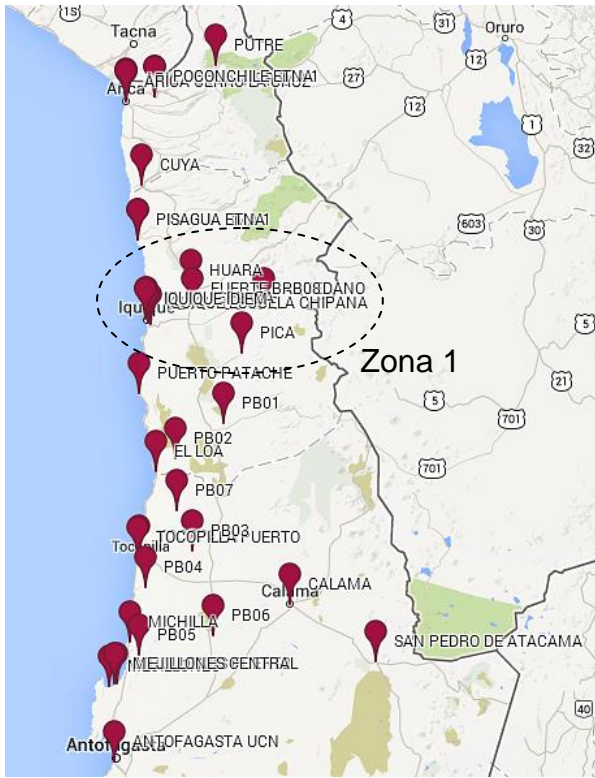
- Estacion : <string> indica el nombre de la estación.
- Region : <string> indica en romanos el número de la región.
- Latitud : <double> indica la latitud de la estación.
- Longitud : <double> indica la longitud de la estación.
- Estructura : <string> indica el tipo de estructura donde se instrumentó.
- Canal1 : <string> indica la dirección de lo registrado en Canal1.
- Canal2 : <string> indica la dirección de lo registrado en Canal2.
- Canal3 : <string> indica la dirección de lo registrado en Canal3.
- TipoSuelo : <string> indica la clasificación del suelo.



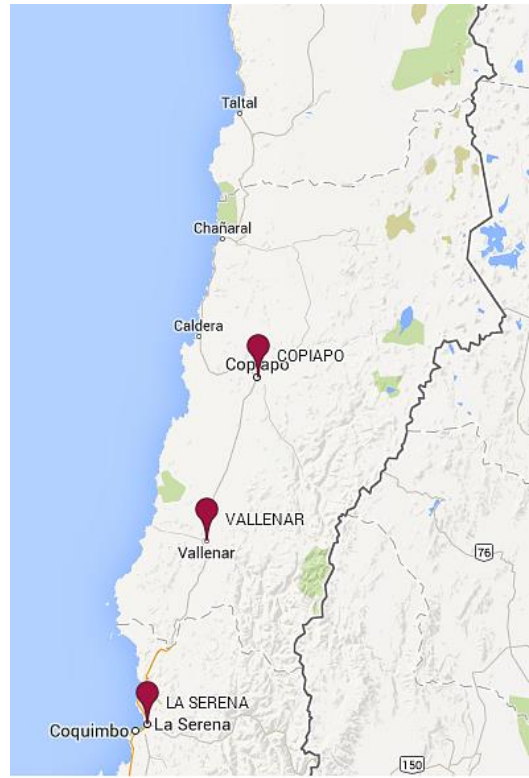
**Figura 21.** Diagrama esquemático de la base de Estaciones.

La estación se nombra según la ciudad donde se ubica, además, en casos particulares se agrega el tipo de instrumento o un lugar más específico dentro de la ciudad, por ejemplo, escuela, cerro, universidad, etc.

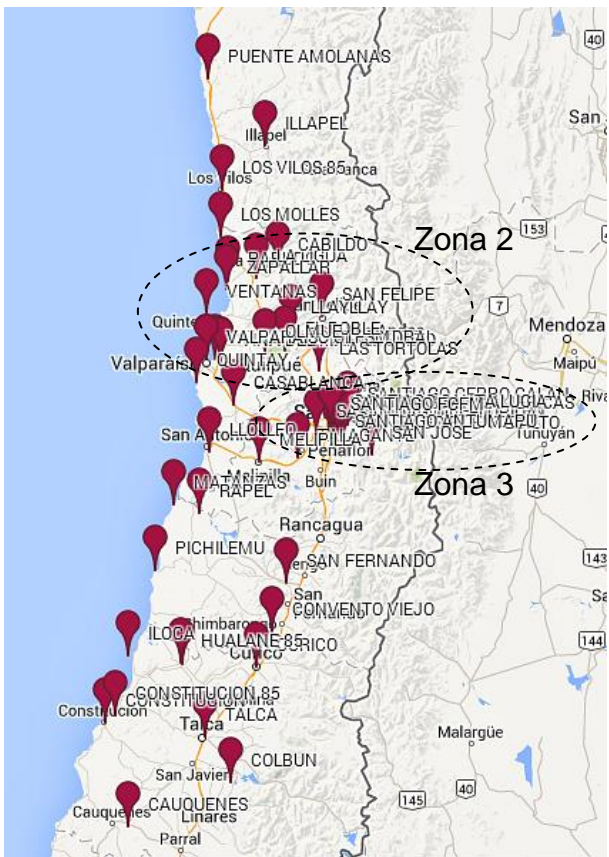
La figura 22 grafica la distribución de las estaciones a lo largo del territorio nacional, cada estación se identifica con una burbuja y se indica el nombre en mayúsculas.



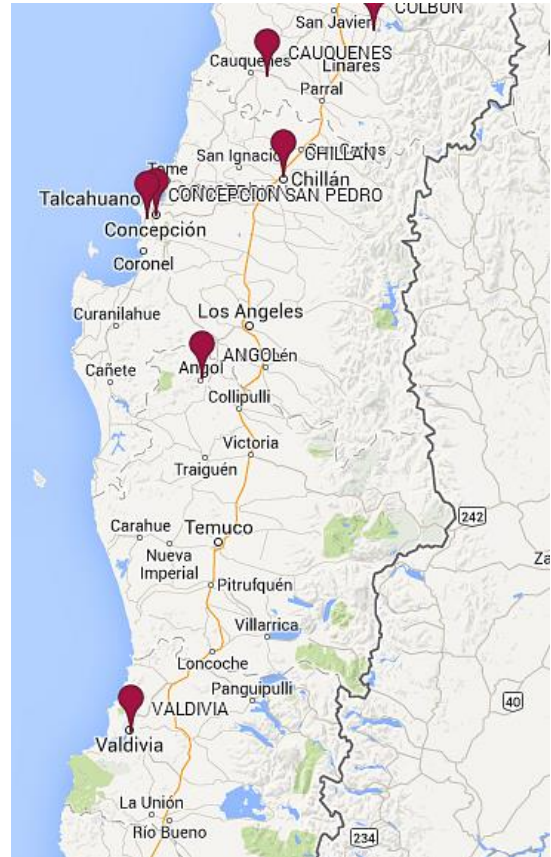
(a)



(b)

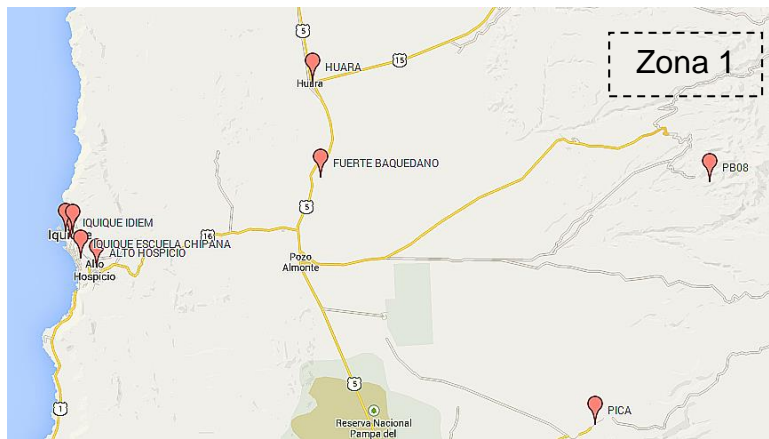


(c)

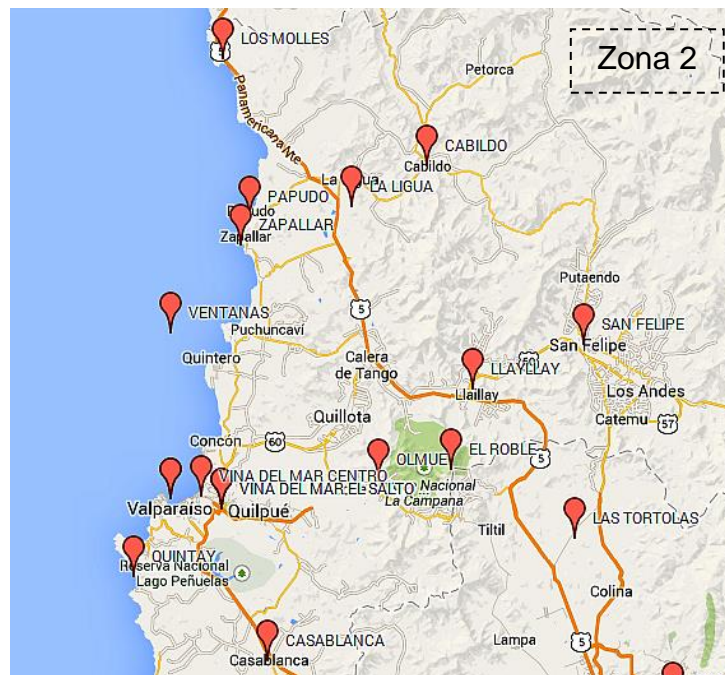


(d)

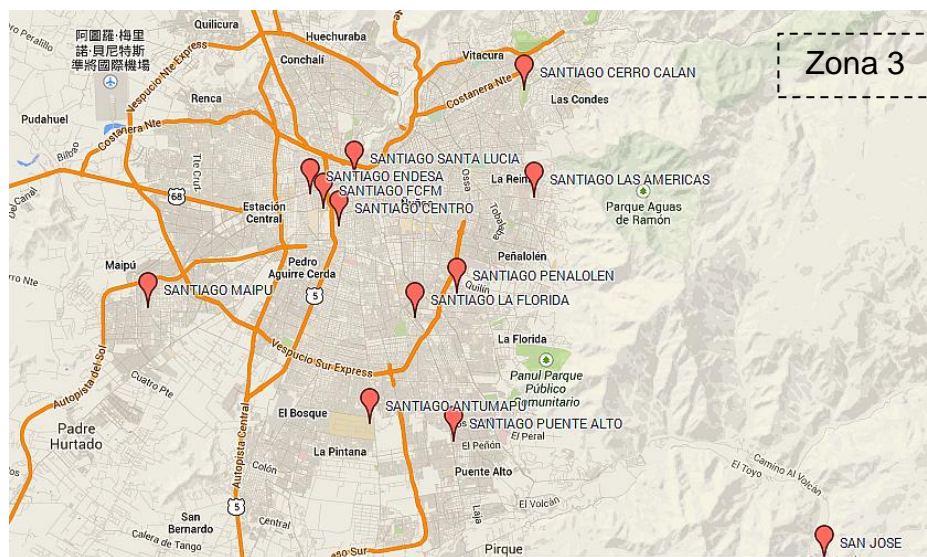
**Figura 22.** Distribución de Estaciones de Registro.



(e)



(f)



(g)

Figura 23. Acercamiento en Zonas punteadas.

La clasificación del Tipo de Suelo de cada estación se basa en el trabajo de título de Ruiz (2002) titulado: “Fórmulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos principales de sismogénesis y los efectos del suelo y las asperezas”. Donde se especifica que los suelos chilenos en que se han registrado acelerogramas han sido clasificados dinámicamente en dos grupos, dependiendo de la velocidad de propagación de onda de corte, aplicando una división basada en el UBC 97, que considera: roca dura con  $v_s > 1500 [m/seg]$  y ‘roca y suelo duro o roca frágil’ entre  $360 [m/seg] < v_s < 1500 [m/seg]$  (Ruiz, 2002).

La figura 24 grafica la distribución de las estaciones según tipo de suelo, donde un 59% de la base de datos corresponde a Suelo Duro y un 41% a Roca Dura.

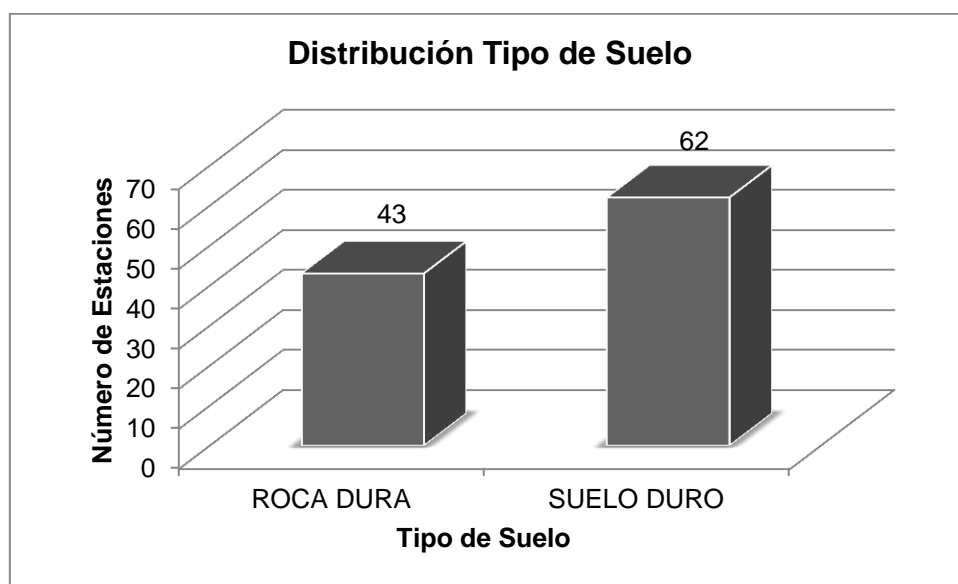
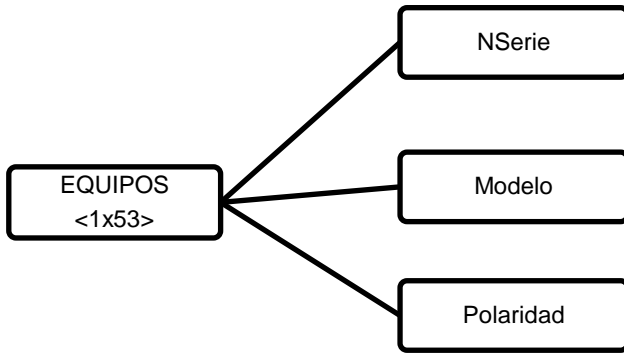


Figura 24. Distribución de Tipo de Suelo.

#### 4.4. EQUIPOS

La información concerniente a los equipos se almacena en un archivo de datos de MATLAB denominado Equipos.mat, que consiste en un archivo que contiene 53 estructuras (<1x53 struct>). La figura 25 muestra cómo se organiza la base. Cada estructura está conformada por los siguientes campos:

- NSerie : <string> indica el número de serie del instrumento.
- Modelo : <string> indica el modelo del instrumento.
- Polaridad : <string> indica la polaridad de la aceleración positiva.



**Figura 25.** Diagrama esquemático de la base de Equipos.

## 4.5. CATÁLOGO

A partir de estas cuatro bases de datos elementales, que condensan toda la información recopilada, se crea un catálogo definitivo que organiza los registros de aceleraciones con sus respectivos parámetros sísmicos instrumentales, definidos en el capítulo III. El cálculo de estos parámetros se realiza mediante funciones programadas en MATLAB que desarrollan la definición de dichos parámetros de manera numérica.

El catálogo se elabora mediante una rutina que genera un archivo de 203 estructuras, donde cada estructura tiene los siguientes campos:

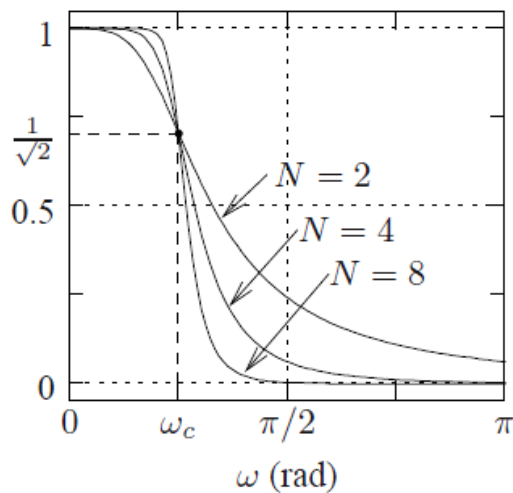
- Evento : <string> indica nombre del evento.
- Estacion : <string> indica el nombre de la estación.
- Equipo : <string> indica el equipo.
- Muestreo : <double> indica la frecuencia de muestreo [Hz]
- TipoSuelo : <string> indica el tipo de suelo.
- Fuente : <string> indica la fuente sismogénica.
- Canal1 : <struct> almacena los parámetros del Canal1.
- Canal2 : <struct> almacena los parámetros del Canal2.
- Canal3 : <struct> almacena los parámetros del Canal3.

Como se menciona cada Canal es una estructura que guarda para cada registro, el cálculo de los parámetros definidos en el capítulo III. Los campos de dichas estructuras son:

- Registro : <array> almacena el registro original sin corregir.
- RegistroCorr : <array> almacena el registro filtrado.
- PGA : <double> indica la Aceleración máxima del suelo [g].
- PGV : <double> indica la Velocidad máxima del suelo [cm/s].
- PGD : <double> indica el Desplazamiento máximo del suelo [cm].
- IA : <double> indica la Intensidad de Arias [cm/s].
- IH : <double> indica la Intensidad de Housner [cm/s].
- IJMA : <double> indica la Intensidad JMA.
- CAV : <double> indica la Velocidad absoluta acumulativa [cm/s].
- PD : <double> indica el Potencial destructivo [cm\*s].
- Sa : <array> almacena el Espectro de aceleraciones [g].
- Sv : <array> almacena el Espectro de velocidades [cm/s].
- Sd : <array> almacena el Espectro de desplazamientos [cm].
- No : <double> indica la Intensidad de cruces por cero [1/seg].
- Duracion : <double> indica la duración efectiva del registro [seg].
- DuracionTotal : <double> indica la duración total del registro original [seg].
- Direccion : <string> indica la dirección del registro.

- Ignore : <double> indica si el registro es ignorado o no.

El Registro Corregido (*RegistroCorr*) se obtiene mediante un filtrado del Registro original no corregido. Este proceso consiste en la corrección del registro por línea base y la aplicación de un filtro no-causal, es decir, se filtra en ambas direcciones del registro, aplicando la función *filtfilt(b,a,reg)* de MATLAB, donde *b* y *a* son los coeficientes del numerador y denominador de la función transferencia, respectivamente. Estos coeficientes se obtienen mediante el filtro Butterworth de orden *N*, el cual se aplica mediante la función *butter(N,w)* de MATLAB, donde el *N* indica el orden del filtro, tal que cuanto más alto es el orden más abrupta es la banda de transición (figura 26), y *w* es la frecuencia de corte, la cual debe estar entre  $0.0 < w < 1.0$ , con 1.0 correspondiente a la mitad de la frecuencia de muestreo ( $F_s$ ).



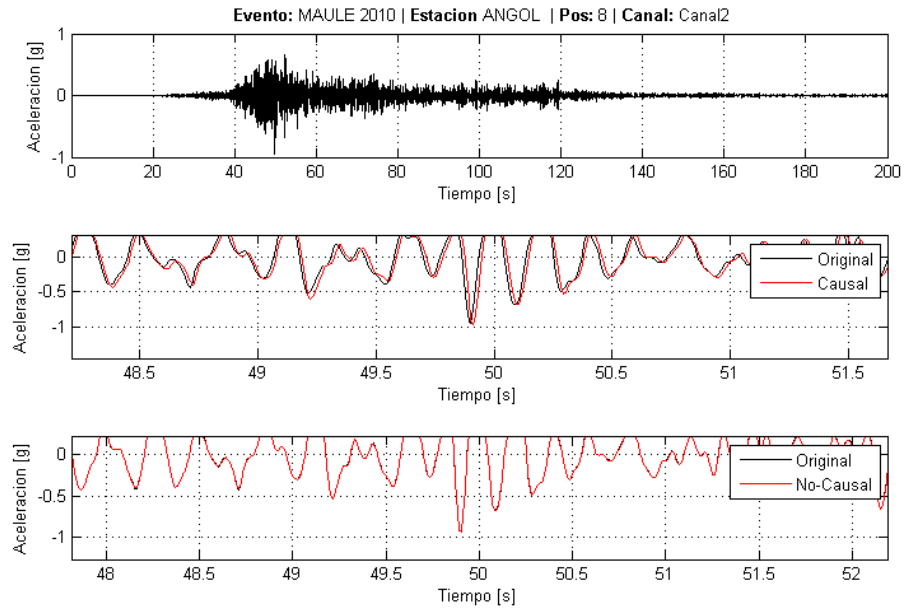
**Figura 26.** Filtro Butterworth.

Los valores fijados para el cálculo son:

Orden  $N=4$ ,  $f_1=0.1$  [Hz],  $f_2=20$  [Hz] y  $NoFase=1$  (no-causal).

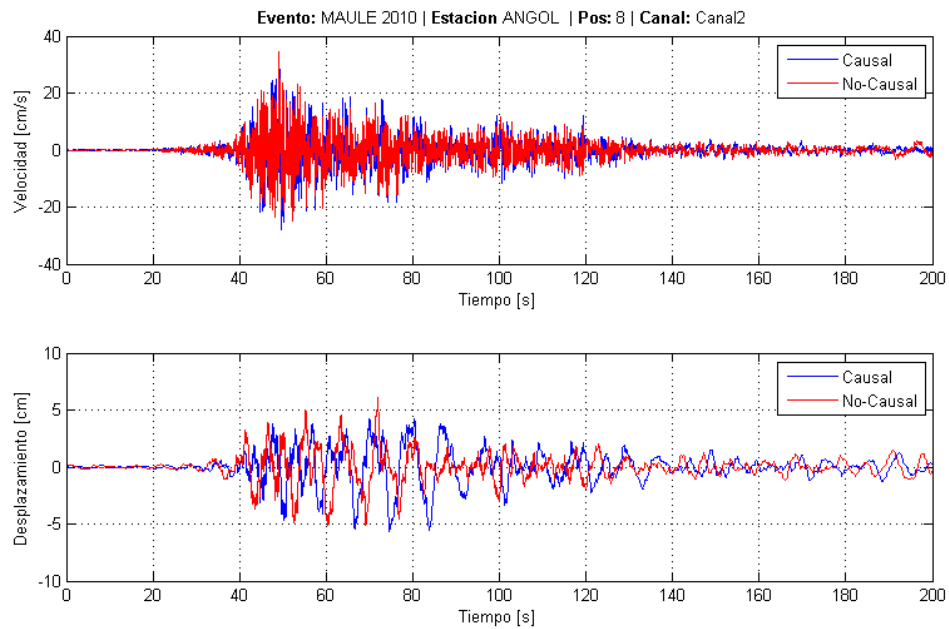
La razón de considerar un filtrado en ambas direcciones se grafica en la figura 27, donde se observa mediante un acercamiento a la zona de la aceleración máxima para un registro del Maule 2010, que para un filtrado en una dirección se produce un desfase respecto al registro original, y no ocurre así para el caso de estudio, de esta forma los valores picos varían levemente.





**Figura 27.** Comparación de Filtros.

Además, al determinar la velocidad y desplazamiento del suelo se observan diferencias entre ambos criterios, debido a la integración directa del registro (Figura 28). Considerando esto, son consultados informes elaborados por el RENADIC y donde se observa que los valores picos de aceleración, velocidad y desplazamiento, son similares a los resultados obtenidos mediante el filtro no-causal.

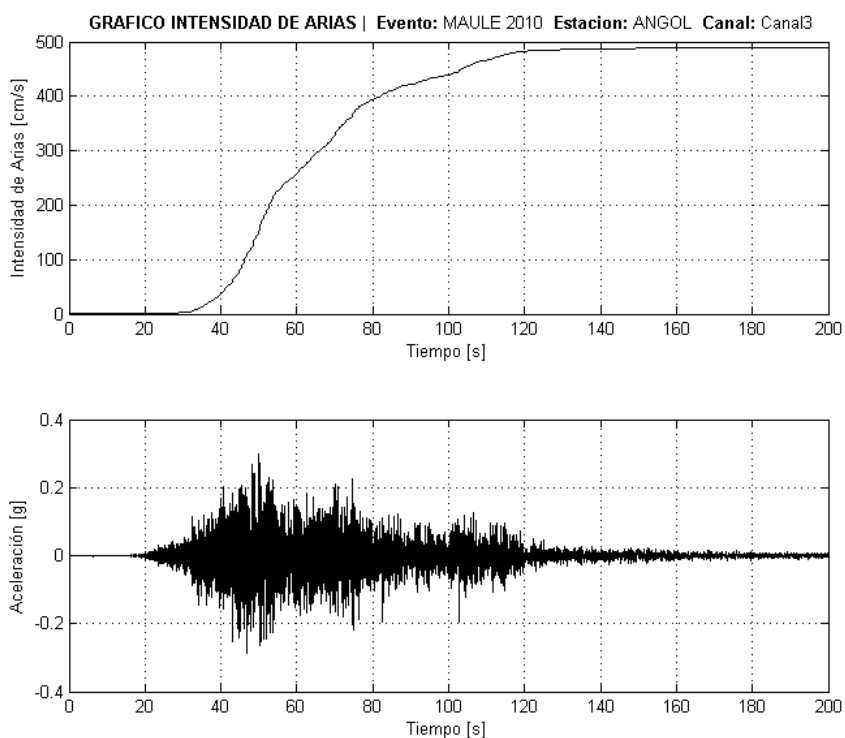


**Figura 28.** Comparación de filtros para Velocidad y Desplazamiento.

Para determinar los valores máximos del suelo -  $PGA$ ,  $PGV$  y  $PGD$  - se utiliza la función: **Peak(vector)**, cuyo argumento corresponde a la aceleración, velocidad o desplazamiento (según corresponda) obtenidos del filtrado del registro, esto entrega el valor máximo absoluto de dicho vector.

La *Intensidad de Arias* se calcula para cada registro mediante la función: **IArias(reg,Fs)**, donde se ingresa el registro (reg) con su frecuencia de muestreo (Fs) y retorna el valor de la intensidad.

Para el cálculo de este parámetro se considera todo el tiempo de registro (Duración Total) ya que aún cuando el registro comience con aceleración nula o cercana a cero, estos valores no aportan mayor energía al indicador de intensidad, así mismo para los valores de aceleración finales que son bajos. Así es posible identificar en la figura 29 la zona de movimiento fuerte en que la Intensidad de Arias crece abruptamente y zonas de bajo valor donde permanece constante.



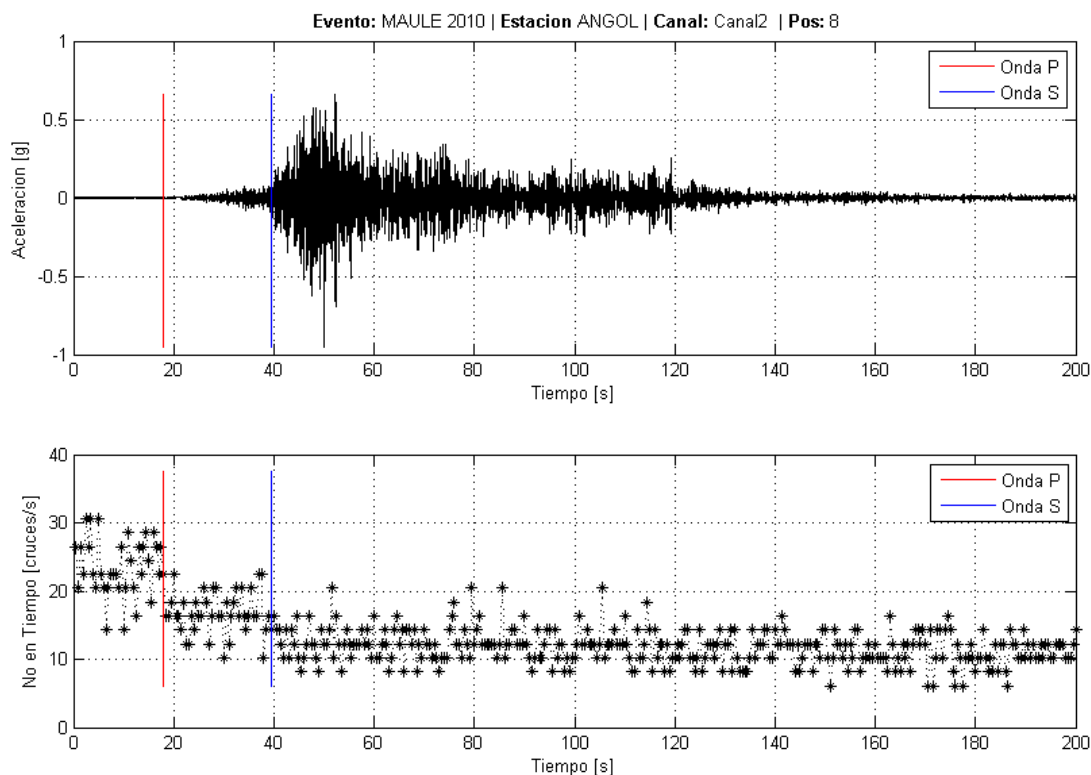
**Figura 29.** Intensidad de Arias en el tiempo.

La *Intensidad de Housner* es calculada mediante la función **IHousner(reg,Fs,b,DTn)**, donde se ingresa el registro (reg) con su frecuencia de muestreo (Fs), la constante de amortiguamiento por definición,  $b=0.2$  y el incremento de períodos definido en  $DTn=0.05$ .

La función ***IJMA(reg1,reg2,reg3,Fs)*** permite obtener el valor de la *Intensidad de la Agencia Meteorológica de Japón*. Debido a que este parámetro es calculado con las tres componentes del registro, se ingresa el registro de cada canal (reg1, reg2, reg3) y su frecuencia de muestreo (Fs) y entrega el mismo valor para cada canal del registro.

La *Velocidad Absoluta Acumulada* se obtiene con la función ***CAV(reg,Fs,au)***, la cual requiere el registro (reg), su frecuencia de muestreo (Fs) y la aceleración umbral (au), esta última corresponde a  $au=24.5 \text{ [cm/s}^2\text{]}$  por definición.

El *Potencial Destructivo* es definido como la Intensidad de Arias sobre la Intensidad de Cruces por cero. Como se menciona anteriormente la Intensidad de Arias considera todo el tiempo de registro ya que la mayor energía se concentra en el movimiento fuerte y los valores bajo de aceleración no aportan significativamente, sin embargo, la Intensidad de cruces por cero presenta valores variables a lo largo de todo el registro, por ello se debe definir un rango en el cual se considera que el parámetro es representativo del registro.



**Figura 30.** Cruces por cero en el tiempo.

En la figura 30 se observa la variación de la Intensidad de cruces por cero en función del tiempo para cierto registro ejemplo. En la mayoría de los registros es posible identificar tres tramos en el tiempo:

- El primer tramo ocurre antes de la llegada de la onda P, donde algunos acelerogramas presentan más ruido que otros, esto resulta en variaciones considerables en la intensidad de cruces por ceros. Algunos registros tienen intensidades altas, mientras que otros muy cercanas a cero, esto debido a que durante ese tiempo aún no se registra el movimiento telúrico.
- 
- El segundo tramo corresponde al intervalo de tiempo entre la onda P y la S, esto muestra una intensidad en promedio constante.
- 
- El tercer tramo corresponde al intervalo de tiempo posterior a la onda S hasta el término del registro. También es posible visualizar en todos los registros que la intensidad de cruces por cero permanece en promedio constante a un nivel menor que el segundo tramo. Esto último se debe a que el contenido frecuencial de la onda P es más alto que el de la onda S.

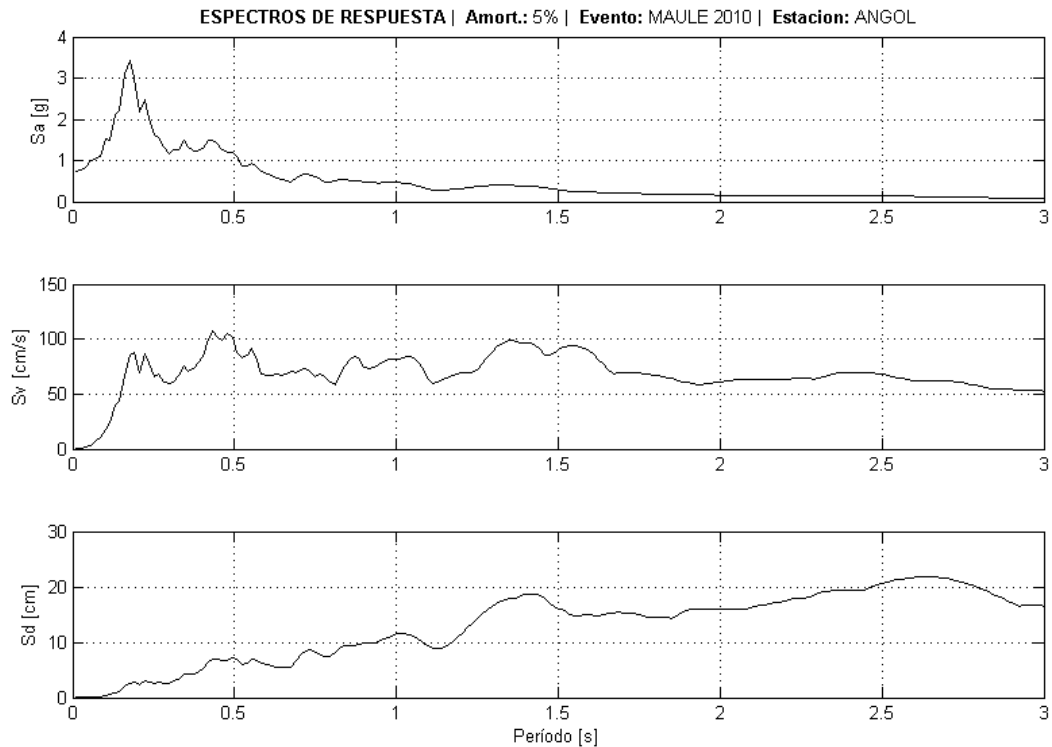
Al identificar estos tramos se descarta considerar el primer tramo antes de la llegada de la onda P según lo mencionado ya que no representan el contenido de frecuencia del terremoto. Por lo tanto, se opta por considerar un promedio entre el segundo y tercer tramo a modo de caracterizar el terremoto producto del efecto de ambas ondas. Esto involucra identificar para cada registro la llegada de la onda P y considerar la *Duración* de éste como el intervalo de tiempo entre la llegada de la onda P y el término del registro.

Con lo dicho anteriormente, se realiza una función que calcula la Intensidad de cruces por cero, ***CrucesPorCero(reg,Fs,ti,tf)***, a la cual se le ingresa el registro (reg) con su frecuencia de muestreo (Fs), el tiempo inicial (ti) y el tiempo final (tf) que identifica el rango de tiempo para el cual se considera la medición.

De esta forma, el Potencial Destructivo se calcula con la función ***PDestructivo(reg,Fs,ti,tf)***, que considera los mismos argumentos que descritos en el párrafo anterior y que involucra la función *IArias* y *CrucesporCero*.

Los Espectros de respuestas de aceleraciones, velocidades y desplazamientos son calculados con la función ***Espectro(reg,Fs,b,DTn,Tmax,Tmin)***, para la cual se ha considerado el registro (reg) con su frecuencia de muestreo (Fs), la constante de amortiguamiento  $b=0.05$ , el incremento de períodos  $DTn=0.015$ , el período máximo  $Tmax=3$  y el período mínimo  $Tmin=0.01$ .

Con los valores mencionados se obtienen las curvas de espectros mostrados en la figura 31, calculados como ejemplo para el registro de Angol del terremoto del Maule 2010.



**Figura 31.** Espectros de Respuestas.

El campo *Dirección* indica 'H' si la dirección del registro es horizontal y 'V' si es vertical. Se extrae la dirección de cada registro mediante la base de datos Estaciones.mat, la cual indica para cada canal la componente del registro.

Finalmente, el campo *Ignore* identifica si el registro es ignorado (1) o considerado (0) para el cálculo en cuestión, para que el registro sea ignorado se debe a falta de información o que la información del registro no es correcta en su totalidad.

Con todo lo descrito anteriormente se obtiene un catálogo con toda la información deseada almacenada en una estructura, de la cual es posible recuperar cualquier valor, dato o parámetro para el análisis requerido. Para este caso de estudio se analizará la tendencia que presentan todos los registros al comparar dos parámetros entre sí, siendo clasificados por dirección, tipo de suelo y fuente sismogénica.

A continuación, se muestra un diagrama que permite visualizar la organización del catálogo, con sus estructuras y campos:

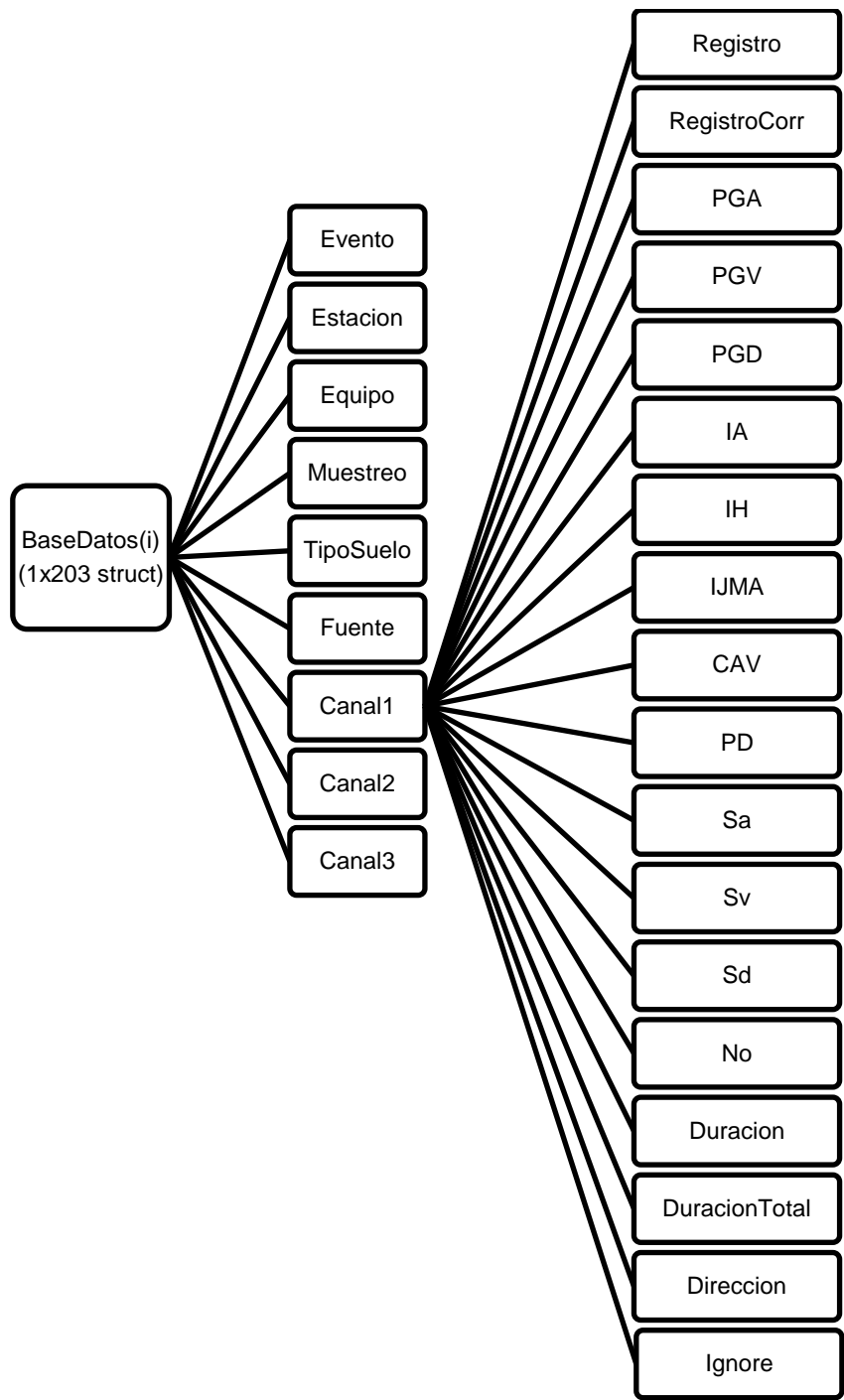


Figura 32. Esquema Catálogo.

#### 4.6. ESCALAMIENTO DE REGISTROS

Con el catálogo elaborado, en primer lugar, se pretende analizar la distribución de los registros recopilados en función de dos de sus parámetros, con ello identificar una tendencia. En segundo lugar, se quiere visualizar la distribución de los registros al ser escalados por un determinado factor, de manera que a partir de un registro

cualquiera se tenga un conjunto de registros escalados para un rango determinado de PGA.

Se establece que los registros deben ser escalados de manera tal que generen registros con PGA de: 0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g, 0.5g, 0.6g, 0.7g, 0.8g, 0.9g y 1.0g. Esto significa que cada registro real genera 10 registros escalados para los cuales se calculan los parámetros sísmicos definidos anteriormente.

El procedimiento consiste en generar un registro normalizado, esto se obtiene dividiendo el registro real por su PGA, tal que:

$$\overline{Reg}_n = \frac{Reg}{PGA}$$

Luego, se genera un vector  $\alpha$  con los PGA que se pretende obtener, es decir:

$$\alpha = [0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0]$$

Finalmente, el registro escalado se calcula:

$$Reg_i = \alpha_i \cdot \overline{Reg}_n$$

Al obtener el registro modificado se recalculan los parámetros sísmicos mediante la misma rutina descrita anteriormente. Con esto, se genera un nuevo archivo de datos en MATLAB, denominado *Resultados.mat*, el cual agrupa tres filas de 203 estructuras <3x203 struct>, donde la primera fila corresponde a los registros de Canal1, la segunda a Canal2 y la tercera a Canal3.

De esta manera, cada estructura presenta los siguientes campos: *Evento*, *Estacion*, *Registro*, *PGA* y 10 estructuras correspondiente a los valores de PGA de 0.1g a 1.0g, denominadas: *PGA1*, *PGA2*, *PGA3*, *PGA4*, *PGA5*, *PGA6*, *PGA7*, *PGA8*, *PGA9* y *PGA10*. Cada una de estas estructuras almacena los siguientes campos: *PGA*, *PGV*, *PGD*, *IA*, *IH*, *IJMA*, *CAV*, *PD*, *No*, *Dirección* e *Ignore*.

A continuación, se muestra mediante un diagrama cómo se organiza el archivo de datos *Resultados.mat* que contiene la información de registros escalados:

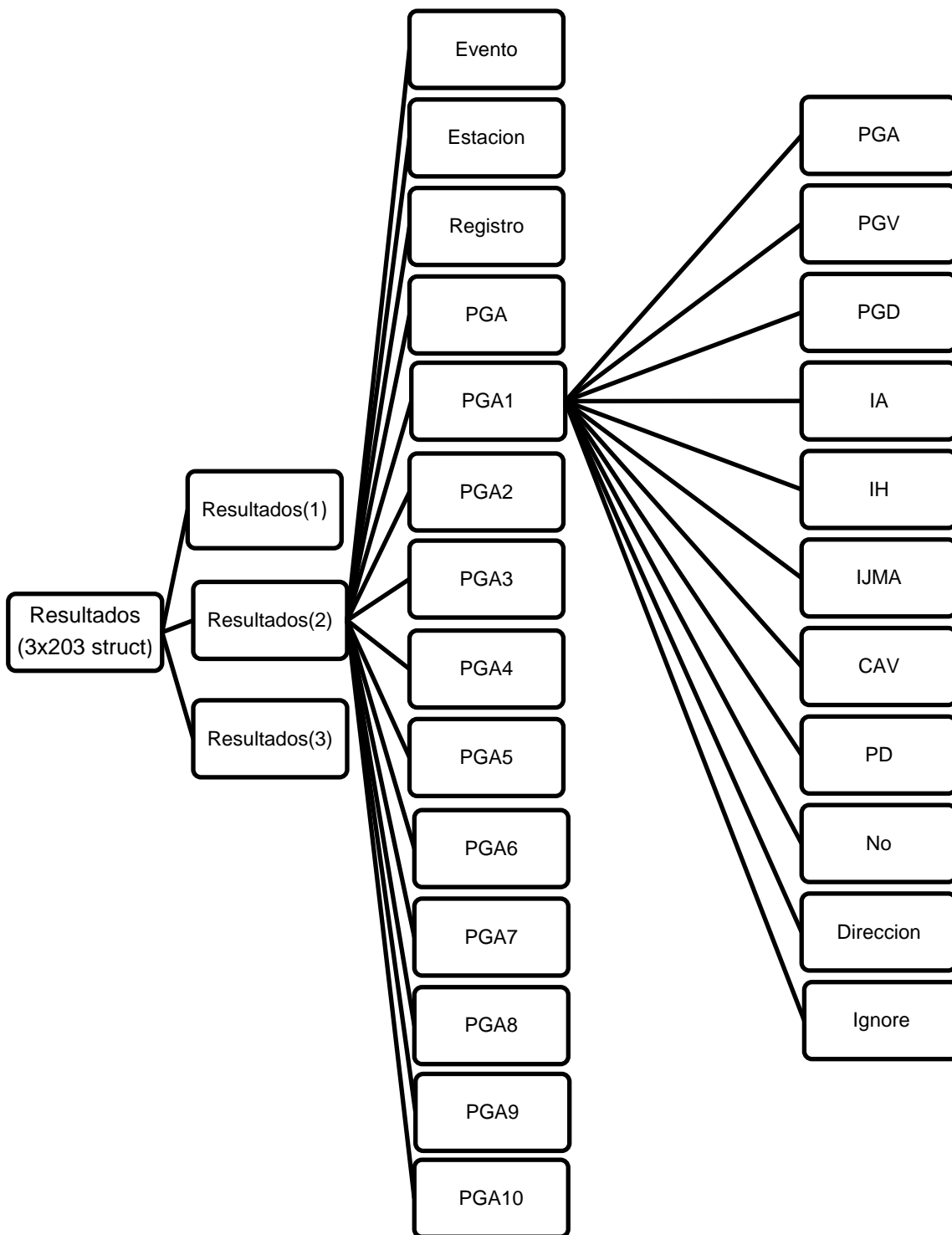


Figura 33. Esquema Archivo Resultados.mat.

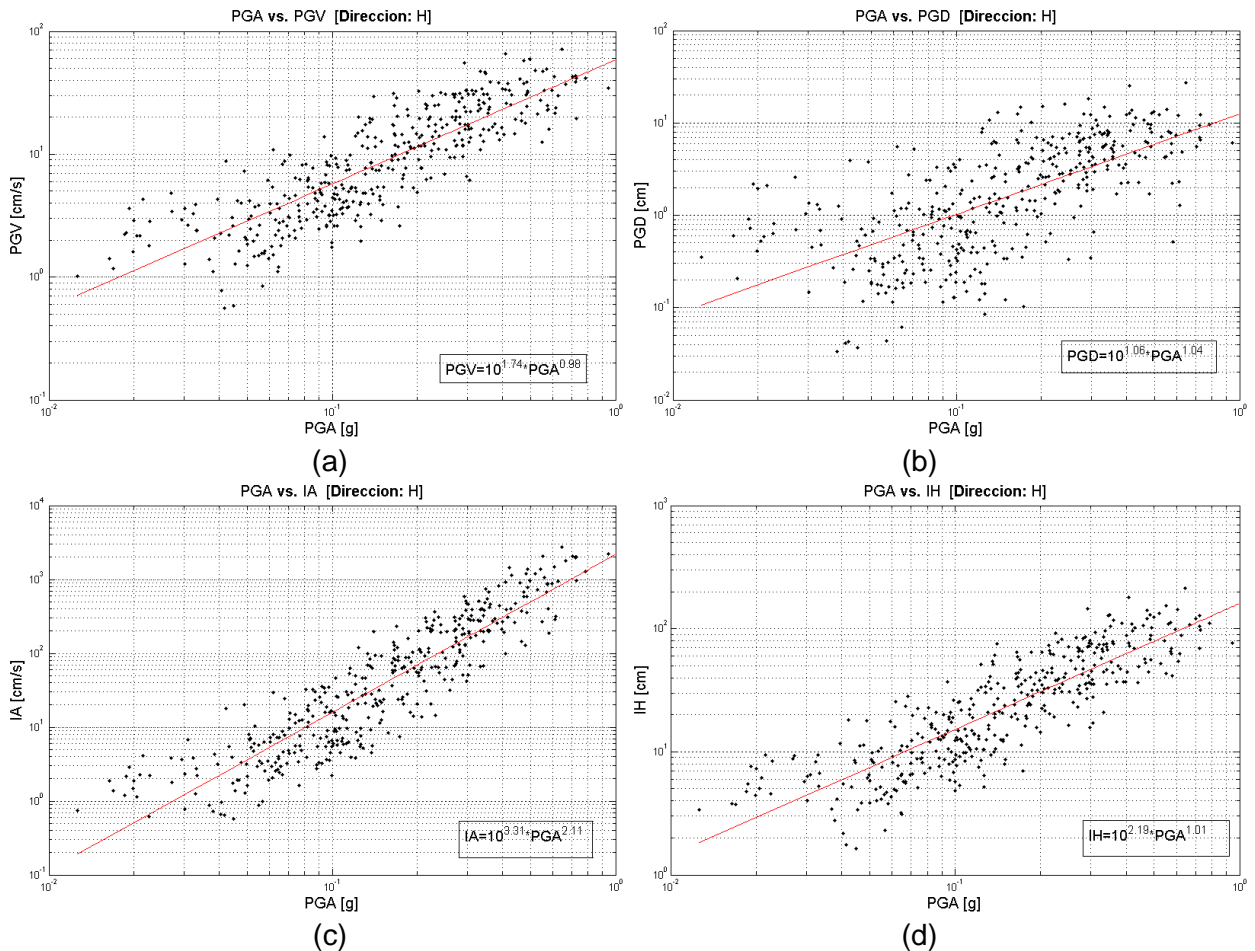


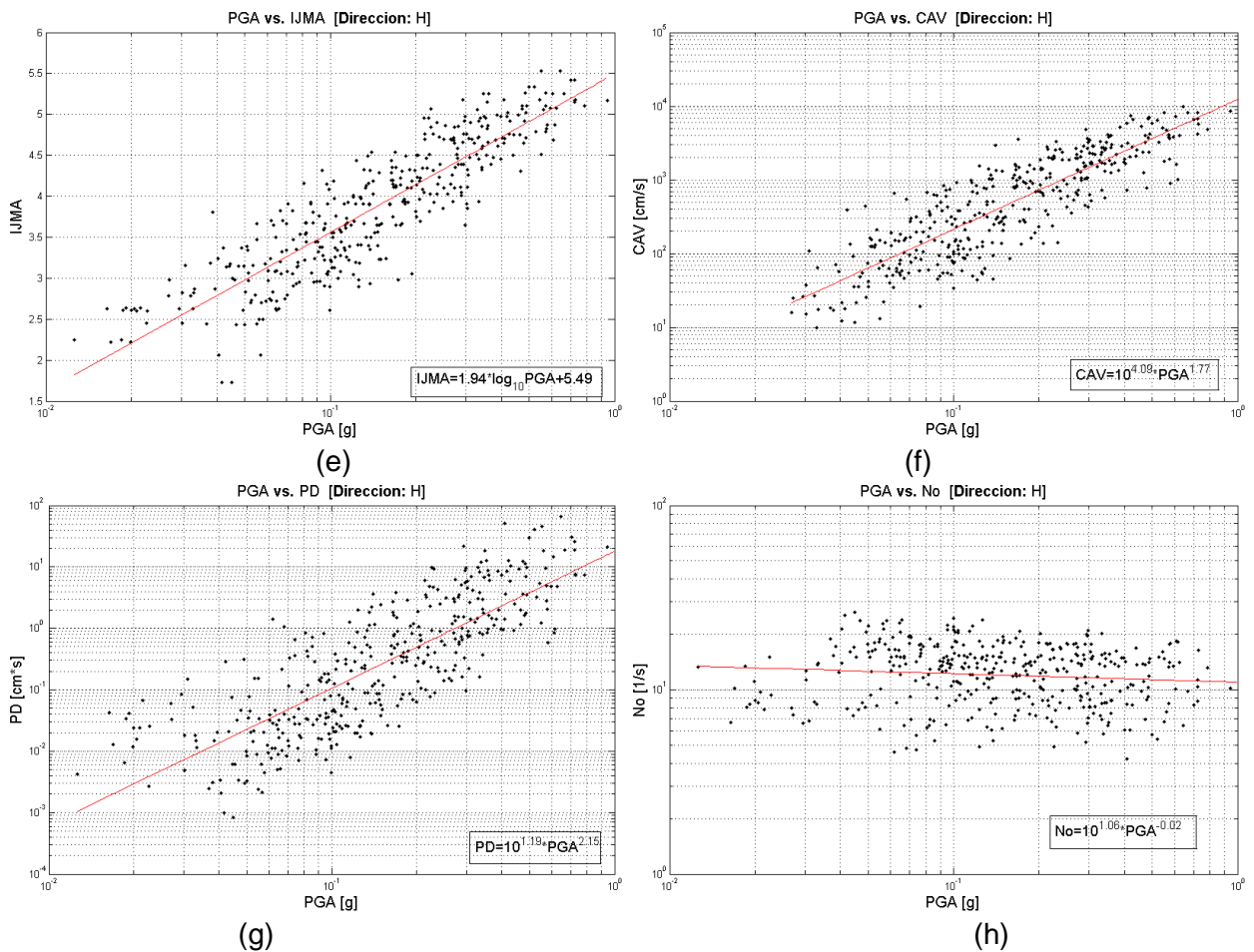
## CAPÍTULO V: ANÁLISIS DEL CATÁLOGO

El catálogo resulta en una herramienta útil que permite acceder directamente a todos los datos almacenados, con esto es posible graficar un parámetro en función de otro y analizar la distribución de los datos. Para el caso de estudio se ha fijado el PGA como parámetro base, por lo que los parámetros: PGV, PGD, IA, IH, IJMA, CAV, PD y No, se grafican en función del PGA. Se realiza una primera clasificación según dirección del registro, luego, se clasifica según tipo de suelo y finalmente según fuente sísmogénica. Esto permite identificar tendencias particulares según la clasificación realizada, y de esta manera reconocer los rangos en que se determinan los parámetros definidos para un conjunto de terremotos reales

### 5.1. CLASIFICACIÓN POR DIRECCIÓN DEL REGISTRO

A continuación se presentan los resultados obtenidos al graficar los parámetros mencionados en función del PGA de todos los registros de dirección horizontal, en escala logarítmica:





**Figura 34.** Gráficos PGA vs parámetros sísmicos.

La figura 34 muestra con puntos negros el valor de cada registro horizontal para los parámetros en cuestión, y la curva en rojo grafica la tendencia de los puntos. Las ecuaciones que describen la tendencia se detallan en los gráficos de la figura 34.

La definición y trazado de la curva de tendencia permite visualizar la dispersión de los datos, de esta manera se observa una gran dispersión en cada uno de los gráficos mostrados en la figura 34.

Como es de esperar, cada gráfica refleja una distribución creciente en función del PGA, vale decir, dado un bajo PGA se observan menores daños por lo que se tiene una medida de la intensidad baja y para un alto PGA, son mayores los daños observados por lo que se tiene una medida de la intensidad mayor, marcada por la dispersión de los datos. Esta medida de la intensidad mencionada se refiere a los parámetros: PGV, PGD, IA, IH, IJMA, CAV y PD.

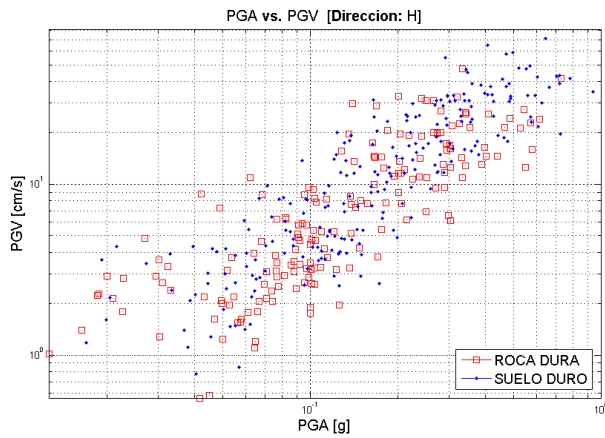
Por otro lado, la intensidad de cruces por ceros no es un parámetro que representa la intensidad y/o destructividad de un terremoto, por esto no se evidencia lo dicho anteriormente, sino más bien, el gráfico de cruces por cero en función del PGA (figura

34(h)) muestra una tendencia constante desde una bajo PGA a un alto PGA, enmarcados los datos en una notoria dispersión.

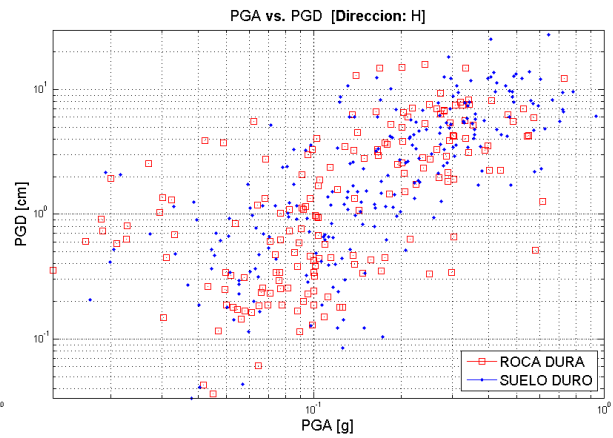
Se espera que al diferenciar los datos por tipo de suelo se obtengan mejores resultados, de tal manera que se evidencie una agrupación de los datos según su tipo de suelo dentro de la distribución observada.

## 5.2. CLASIFICACIÓN POR TIPO DE SUELO

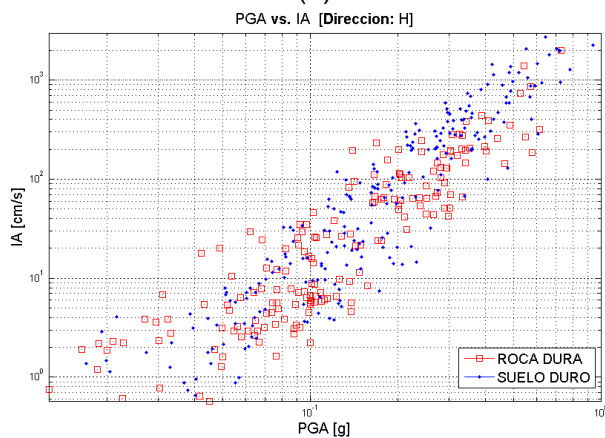
A continuación se presentan los resultados obtenidos al graficar los parámetros mencionados en función del PGA de todos los registros de dirección horizontal diferenciados por tipo de suelo - Roca Dura y Suelo Duro - en escala logarítmica:



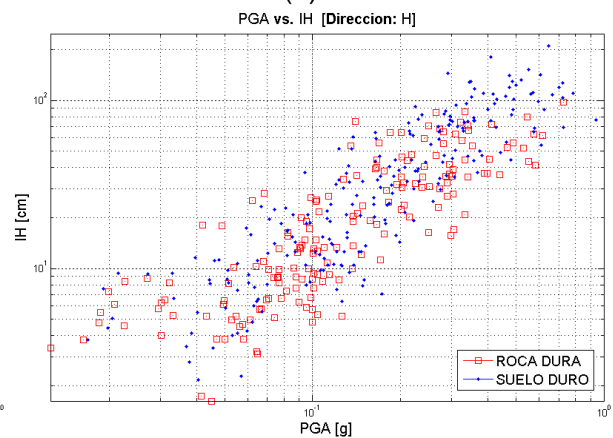
(a)



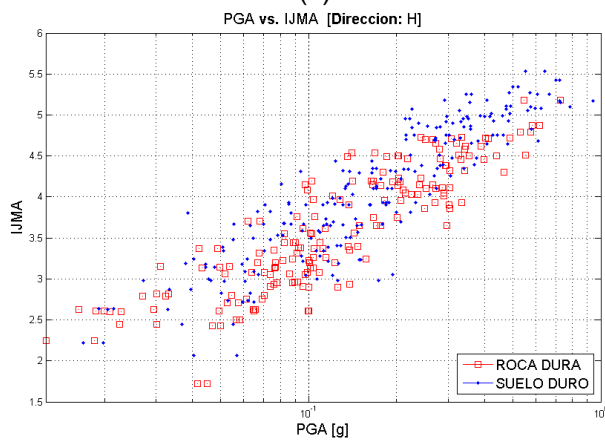
(b)



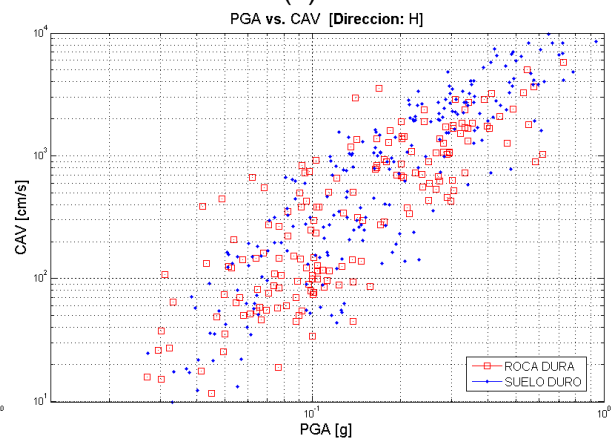
(c)



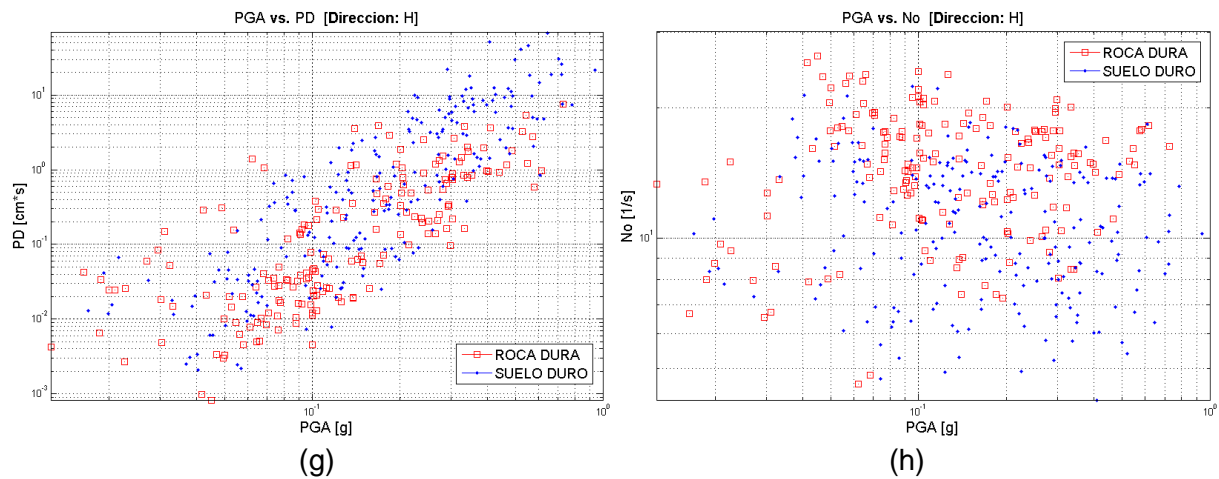
(d)



(e)



(f)



**Figura 35.** Clasificación por Tipo de Suelo.

La figura 35 muestra los mismo 8 gráficos de la figura anterior pero diferencia los datos según el tipo suelo: Roca Dura y Suelo Duro, clasificación basada en el trabajo realizado por Ruiz (2002).

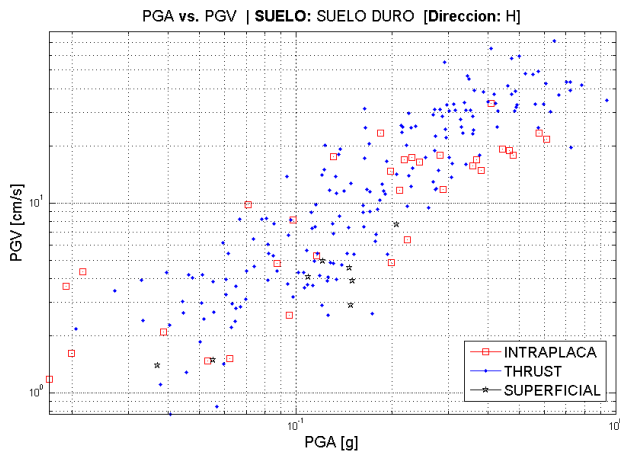
Los puntos azules corresponden a los datos que tienen por tipo de suelo clasificado en SUELO DURO, mientras que los cuadrados rojos corresponden a los datos de ROCA DURA.

Como muestran las figuras, en la agrupación de datos tanto para Roca Dura como para Suelo Duro se aprecia una gran dispersión de los puntos. De estos gráficos, no es claro poder realizar un análisis respecto a cómo se distribuyen los datos según tipo de suelo para cada una de los parámetros de intensidad, según el nivel de PGA. Sin embargo, el único parámetro en que se visualiza una leve separación de los datos, resulta para la intensidad de cruces por cero. En la figura 35(h) se observa por sobre un determinado PGA que los puntos que corresponden a ROCA DURA se agrupan en mayores valores de cruces por cero que los puntos que corresponden a SUELO DURO. Esta observación es un resultado esperado, ya que se espera que el Suelo atenúe más las ondas de alta frecuencia que la Roca Dura, llegando las ondas con mayor alta frecuencia en Roca.

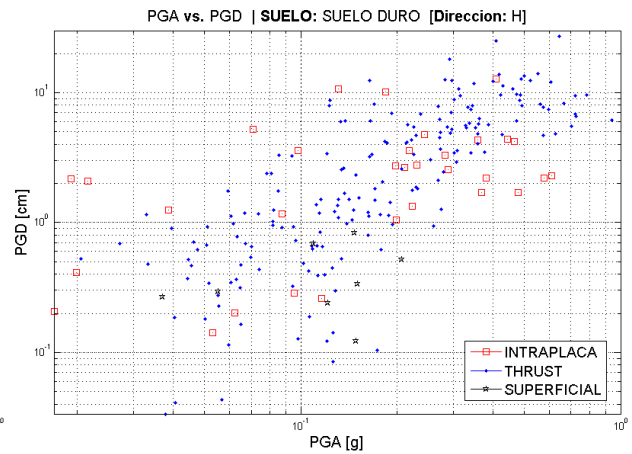
Dado que las primeras gráficas no permiten definir una tendencia, se espera que la clasificación por fuente sismogénica arroje mejores resultados.

### 5.3. CLASIFICACIÓN POR FUENTE SISMOGÉNICA PARA SUELO DURO

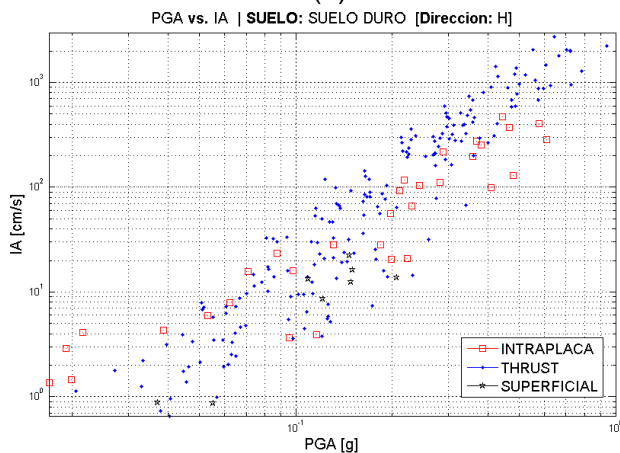
A continuación se presentan los resultados obtenidos al graficar los parámetros mencionados en función del PGA de todos los registros de dirección horizontal con tipo de suelo, Suelo Duro, diferenciados por fuente sismogénica - Intraplaca, Interplaca tipo Thrust y Superficial - en escala logarítmica:



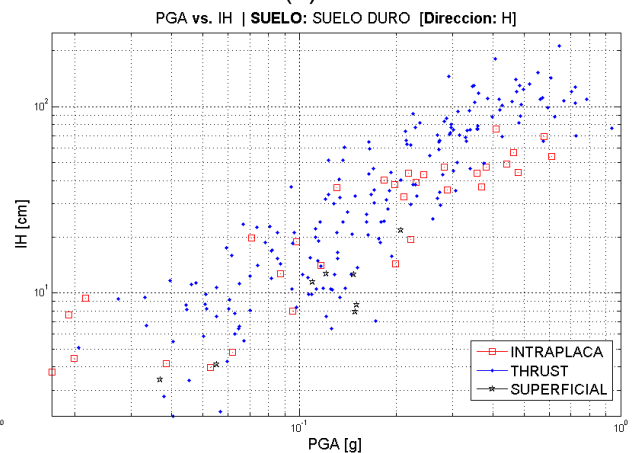
(a)



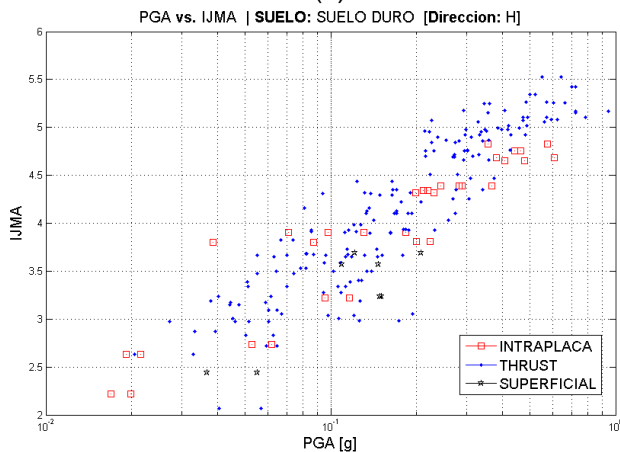
(b)



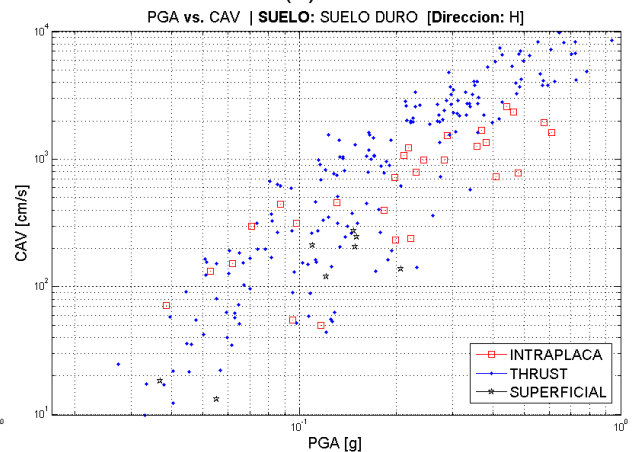
(c)



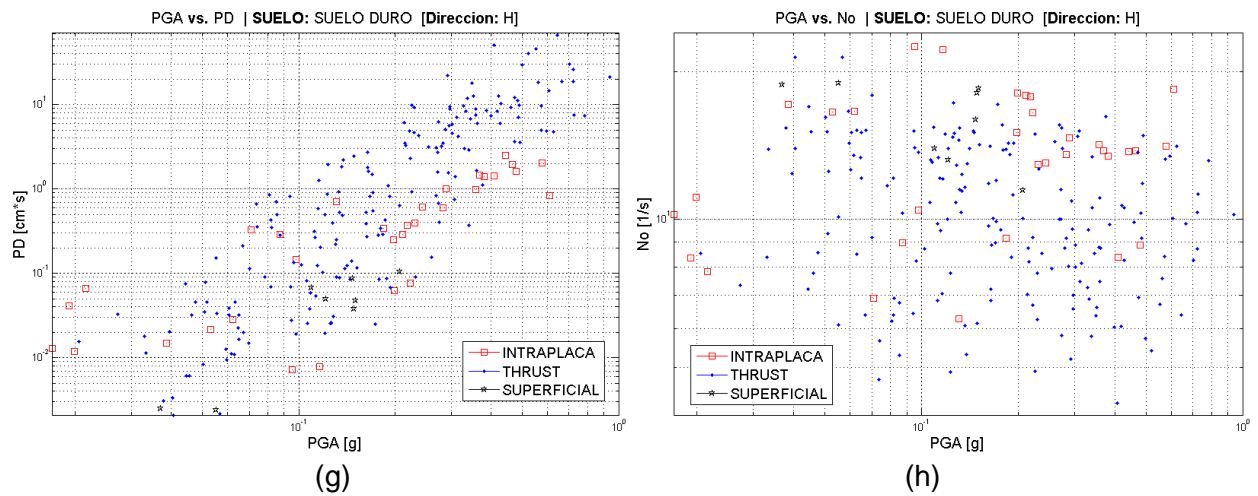
(d)



(e)



(f)



**Figura 36.** Clasificación por fuente sismogénica para Suelo Duro.

La figura 36 muestra 8 gráficos con los parámetros utilizados en este capítulo, sin embargo, los datos se han clasificado según tipo de suelo, con ello cada gráfico muestra todos los terremotos medidos sólo en Suelo Duro, por lo que se observan menos puntos que los ya analizados anteriormente. Además, para cada gráfica se han diferenciado los terremotos según la fuente sismogénica: Interplaca tipo ‘Thrust’, representados por los puntos azules, Intraplaca, corresponden a los cuadrados rojos y Superficial, corresponden a las estrellas negras.

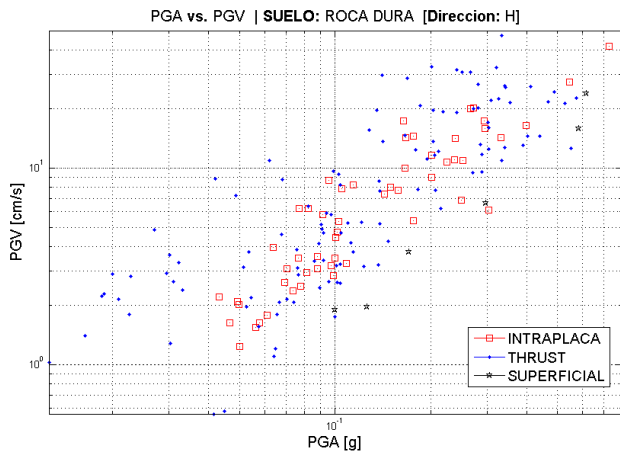
Se observa claramente que para un determinado PGA en adelante, los datos se agrupan de forma evidente. Es decir, para valores bajos de PGA para cada una de las gráficas de intensidad de Arias, de Housner, de JMA, la CAV y el Potencial Destructivo, se tiene una mayor dispersión de los datos, evidenciado principalmente por los terremotos intraplacas ya que son menos puntos, no así para los tipo thrust ya que estos muestran una clara tendencia. Sin embargo, es posible encontrar un valor de PGA tal que para todos los datos sobre este valor, los valores de las intensidades se agrupan siguiendo la tendencia según la fuente sismogénica (figura 36).

Esta agrupación resulta en que para un mismo valor de PGA los terremotos intraplaca observan menor intensidad que los interplaca tipo ‘thrust’. Al observarse el parámetro de Potencial Destructivo, se ve con mayor claridad esta diferenciación. Esto se traduce en que los terremotos intraplaca resultan ser menos dañinos que los interplaca.

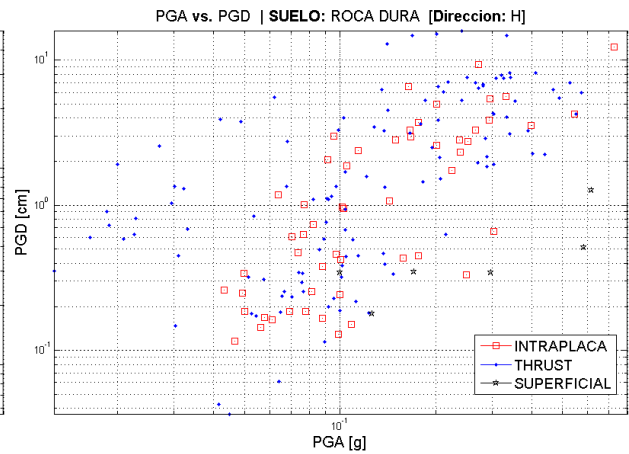
Por otro lado, en general los valores de intensidad de cruces por cero de los terremotos intraplaca se ubican por sobre los de tipo ‘thrust’.

## 5.4. CLASIFICACIÓN POR FUENTE SISMOGÉNICA PARA ROCA DURA

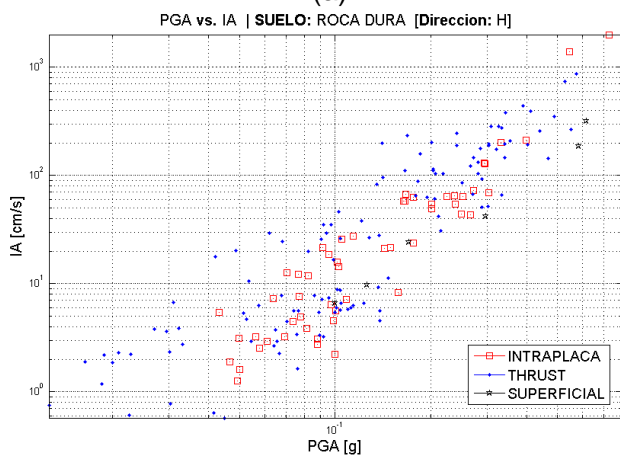
A continuación se presentan los resultados obtenidos al graficar los parámetros mencionados en función del PGA de todos los registros de dirección horizontal con tipo de suelo, Roca Dura, diferenciados por fuente sísmogénica - Intraplaca, Interplaca tipo Thrust y Superficial - en escala logarítmica:



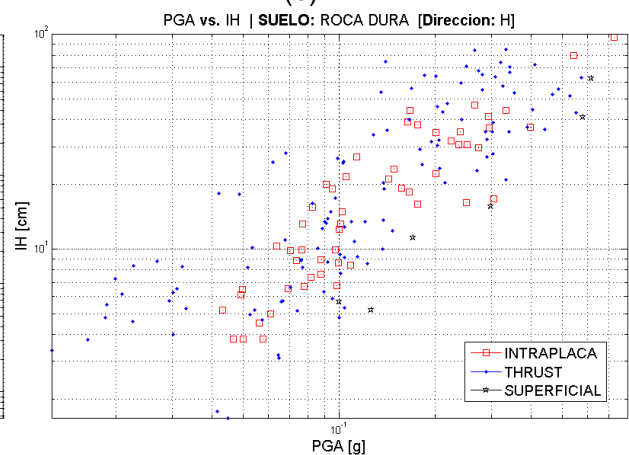
(a)



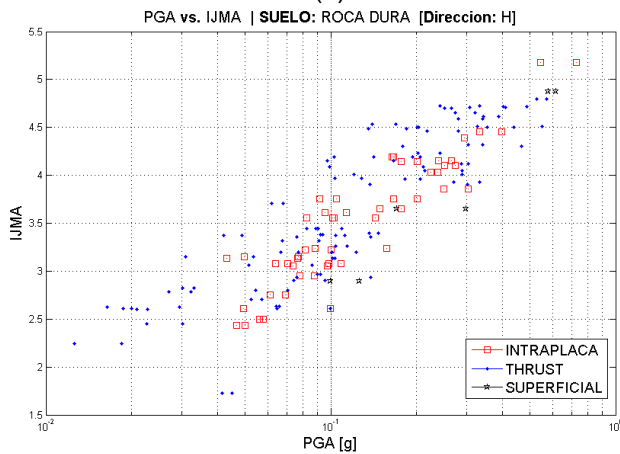
(b)



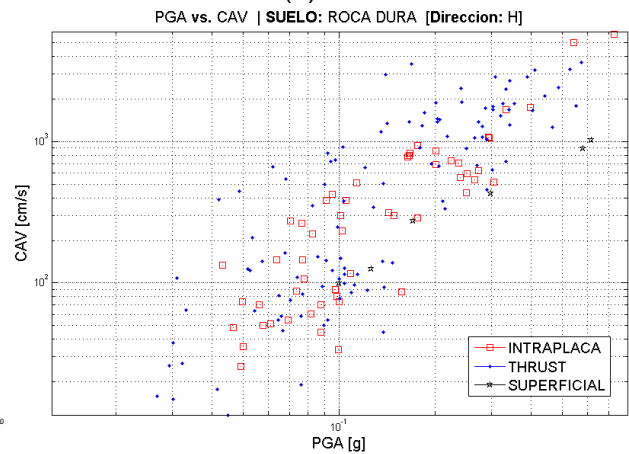
(c)



(d)

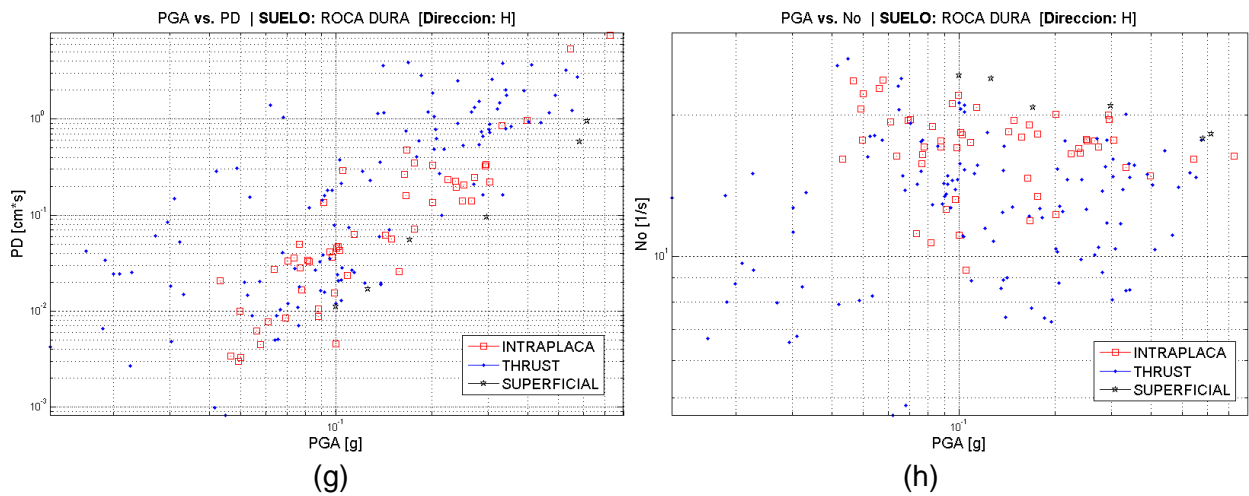


(e)



(f)





**Figura 37.** Clasificación por fuente sismogénica para Roca Dura.

Al igual que el punto anterior, la figura 37 muestra los 8 gráficos con los mismos parámetros, con los datos clasificados según tipo de suelo, con ello cada gráfico muestra todos los terremotos medidos sólo en Roca Dura. De igual manera, para cada gráfica se han diferenciado los terremotos según la fuente sismogénica: Interplaca tipo 'Thrust', representados por los puntos azules, Intraplaca, corresponden a los cuadrados rojos y Superficial, corresponden a las estrellas negras.

A pesar de observarse una mayor dispersión de los datos, es posible identificar cómo se agrupan los datos según la fuente sismogénica, para cada uno de los parámetros en cuestión.

Nuevamente, esta agrupación resulta en que para un mismo valor de PGA los terremotos intraplaca observan menor intensidad que los interplaca tipo 'thrust'. Al observarse el parámetro de Potencial Destructivo, se ve con mayor claridad esta diferenciación. Esto se traduce en que los terremotos intraplaca resultan ser menos dañinos que los interplaca.

Por otro lado, en gran medida los valores de intensidad de cruces por cero de los terremotos intraplaca se ubican por sobre los de tipo 'thrust'. Además, considerando que en Roca Dura no se espera mayor atenuación de las ondas, se tiene que los terremotos intraplaca tienen mayor frecuencia que los 'thrust'.

Finalmente, mediante estos análisis de las gráficas expuestas en este capítulo, se han clasificado los datos de tal manera de obtener tendencias claras que permitan diferenciar los terremotos considerando su origen y medición, por lo cual resulta lógica la clasificación de tipo de suelo y de la fuente sismogénica. Con esto, los terremotos evidencian una alineación, a pesar de una cierta dispersión dada por la cantidad de datos, que permite rescatar y determinar el mejor parámetro a considerar para caracterizar la intensidad o destructividad de los terremotos.

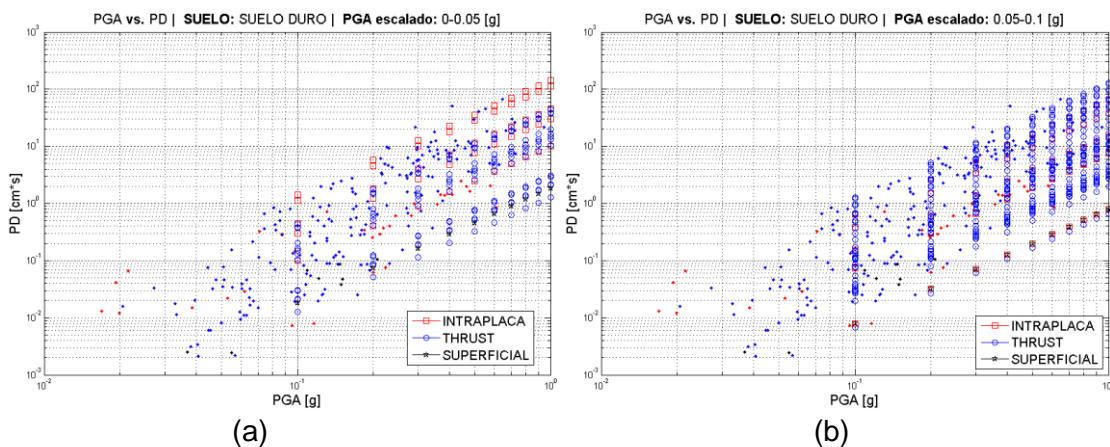
En conclusión, el parámetro que refleja una clara y lógica tendencia de los datos, y que además permite caracterizar la destructividad de los terremotos, resulta ser el Potencial Destructivo. Este último, contiene la información de la energía del terremoto y su intensidad, y además considera la intensidad de cruces por cero. Como se observa en las figuras, además, la Intensidad de Arias permite agrupar los datos observándose la diferencia entre intraplaca y 'thrust', sin embargo, al considerar el efecto de los cruces por cero, la alineación de los datos es mucho más clara, esto se debe a la evidente diferencia en frecuencia que muestran los datos en las gráficas de cruces por cero.

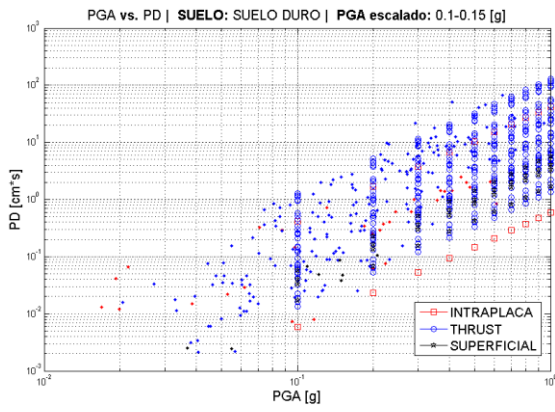
## 5.5. ANÁLISIS DE REGISTROS ESCALADOS

A continuación se presentan los resultados del escalamiento de los registros, cuya metodología de cálculo fue desarrollada en el apartado 4.6. Según esto, la estructura Resultados.mat permite visualizar todos los registros escalados – para 0.1g a 1.0g – para cada parámetro en cuestión, sin embargo, para el desarrollo de este trabajo se presenta el escalamiento de registros para el Potencial Destructivo, ya que como se mencionó en punto anterior resulta ser el parámetro que muestra una mejor tendencia para ambos suelos.

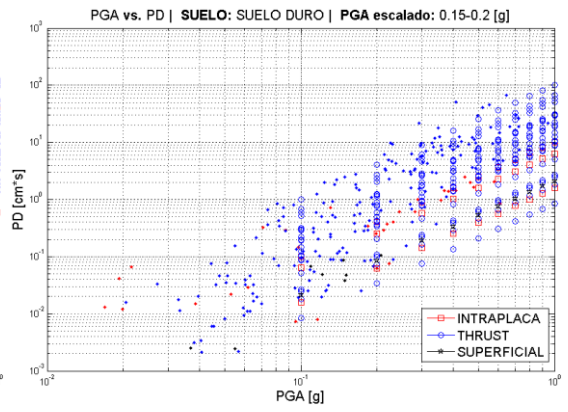
Cada grafico identifica cada registro según su PGA, y muestra el Potencial Destructivo del registro, además, muestra el valor de Potencial Destructivo para cada registro escalado. Cada cuadro grafica los valores escalados para un rango de registros que fueron escalados, vale decir, el primer cuadro comprende todos los valores escalados para los registros que se encuentran en un rango entre 0g y 0.05g.

- Potencial Destructivo en Suelo Duro

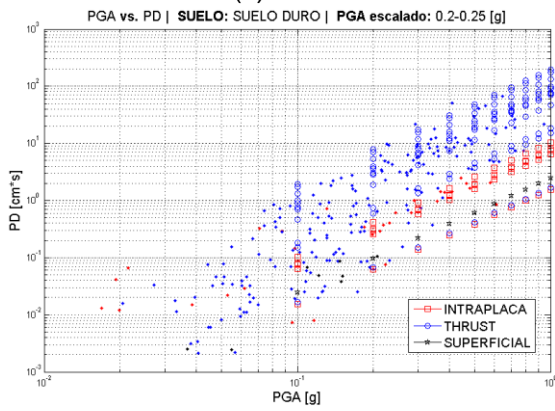




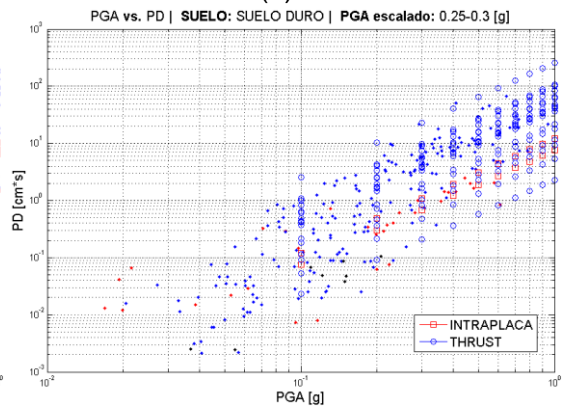
(c)



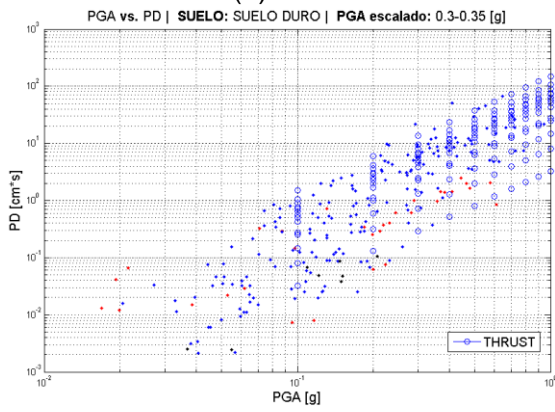
(d)



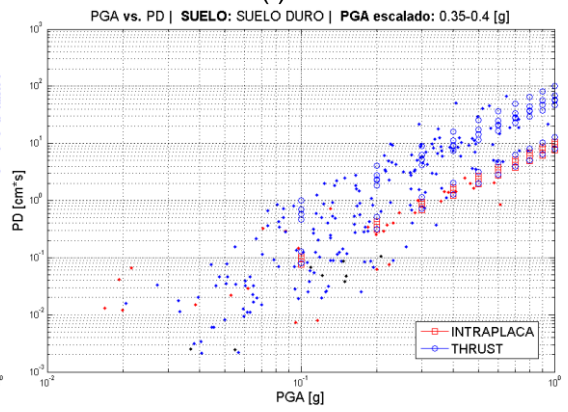
(e)



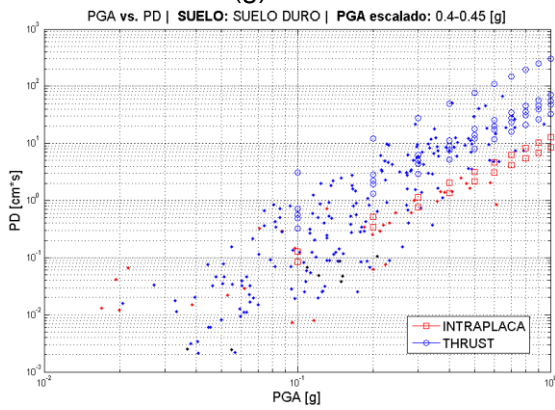
(f)



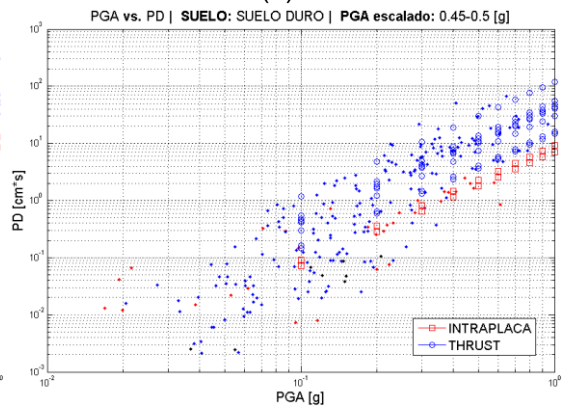
(g)



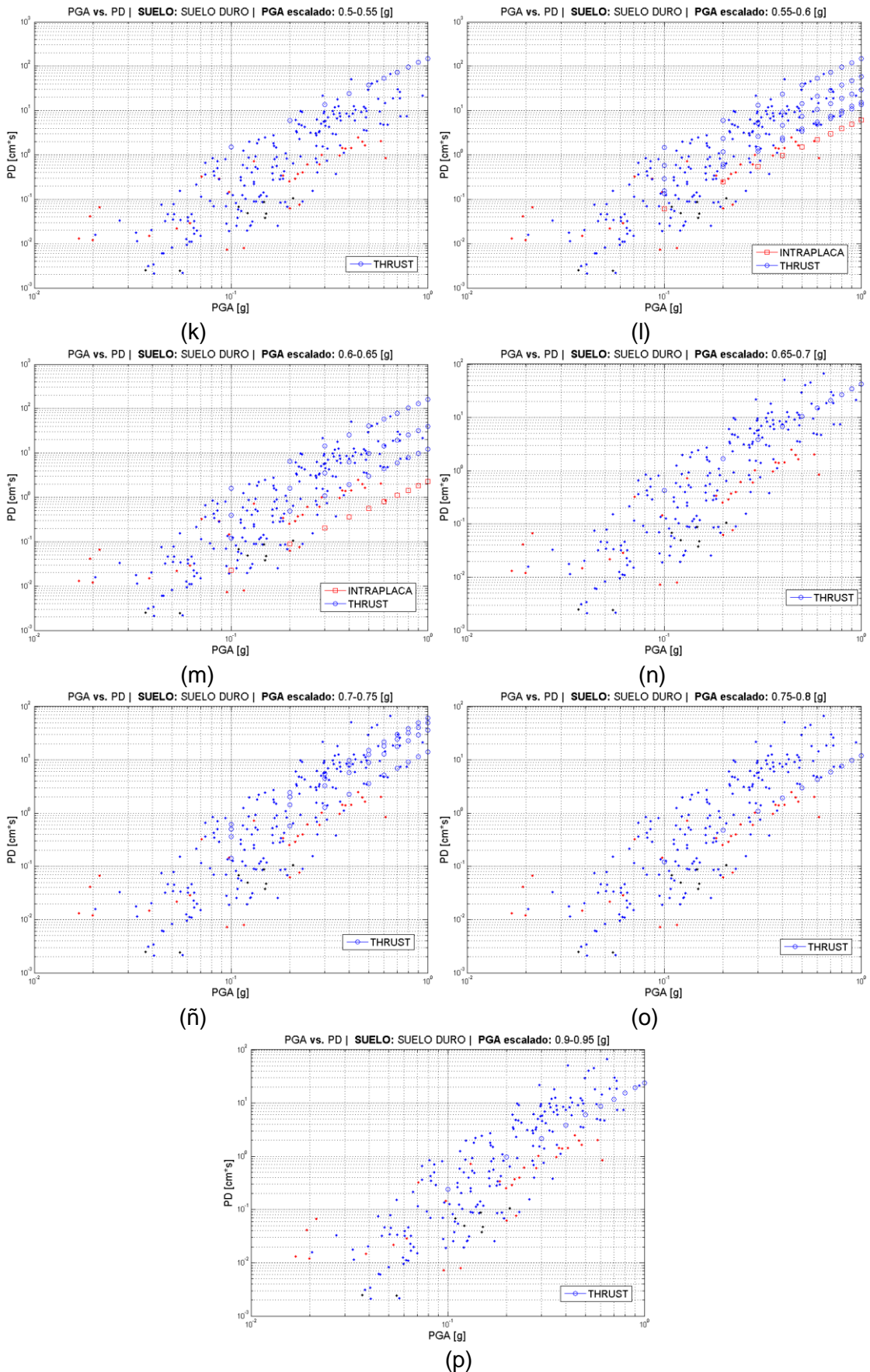
(h)



(i)



(j)



**Figura 38.** Potencial Destructivo de registros escalados para Suelo Duro

La figura 38 permite realizar un análisis de los datos, de tal manera de encontrar un rango de registros (según PGA) para el cual todos los valores escalados de Potencial Destructivo siguen la tendencia de los registros reales. En este sentido, las figuras entre (a) y (g) muestran que los valores escalados abarcan una amplia banda de valores debido a la gran dispersión en registros de bajo PGA, lo que significa que se obtienen valores mucho mayor (y por otro lado, mucho menor) de destructividad al ampliar registros bajos, al observarse que escapan de la banda de valores reales (figura 38). Para las figuras (h) a (p) – es decir, para registros originales de 0.30g en adelante – la banda de valores escalados se reduce producto de ser menos los registros que se están escalando en ese rango, con ello se observa un ajuste mejor a la banda de valores reales, por lo que para ese valor de PGA tiene sentido la función de escalar, ya que los valores obtenidos se asemejan a los que se tienen verdaderamente de los registros reales.

Los gráficos para el caso del Potencial Destructivo en Roca Dura se presentan en anexos y se tiene el mismo análisis para estos. En definitiva, se concluye que el conjunto de registros para los cuales se tiene mayor probabilidad de obtener resultados similares a los reales al ser escalados, resulta ser para un PGA mayor a 0.30g. Por el contrario, para registros con menor PGA que 0.30g aumenta la probabilidad de que los valores escalados no sean representativos de la realidad. Este resultado es importante para lo que sigue en el desarrollo del trabajo, ya que para realizar un análisis dinámico incremental se debe tener en consideración que la respuesta obtenida no resulte ser ni sobreestimada ni subestimada.

## CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DINÁMICO INCREMENTAL

La idea del Análisis Dinámico Incremental (denominado en inglés como Incremental Dynamic Analysis, IDA) fue introducida primeramente por Bertero en 1977 (Elnashai y Di Sarno, 2008), siendo desarrollado por varios investigadores y adoptado por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, EE.UU). El IDA se describe como un método para determinar la capacidad de colapso global, en este sentido, el método describe una colección de análisis dinámicos no-lineales de un modelo estructural, de tal manera que proveen una idea de cómo el modelo reacciona a la excitación sísmica. Sin embargo, resulta ser un método ampliamente aplicable teniendo como objetivos (Vamvatsikos y Cornell, 2002):

- Comprensión del rango de respuesta o demandas versus el rango de niveles posibles de un registro de aceleraciones.
- Comprensión de las implicaciones estructurales de registros de aceleraciones de niveles mayores.
- Produce estimaciones de la capacidad dinámica de un sistema estructural global.

La idea principal del IDA es escalar incrementalmente un registro de aceleraciones de esta manera crear múltiples terremotos con un rango de intensidades y analizar individualmente el modelo estructural para cada nivel de excitación.

La respuesta máxima de la estructura es registrada para cada análisis no-lineal. Una vez que todos los análisis se realizan, las respuestas guardadas pueden ser graficadas como puntos versus una medida de la intensidad de la excitación. Al conectar esos puntos se crea una curva única IDA.

El gráfico de una curva única IDA provee una buena idea de cómo una estructura en particular respondería a variaciones de intensidades de un terremoto. Si se sujeta la estructura a distintos registros de aceleraciones y cada registro es representado en la figura por una curva única IDA, se obtienen un conjunto de curvas que definen el estudio de múltiples IDA. Esto último es útil ya que diferentes terremotos pueden provocar diferentes respuestas para una misma estructura (figura 39).

### 6.1. DEFINICIÓN DEL MÉTODO

Para la aplicación del Análisis Dinámico Incremental es necesario definir y reconocer algunos conceptos desarrollados por Vamvatsikos y Cornell (2002) que establecen los fundamentos del método.

Para comenzar se debe seleccionar un registro de aceleraciones en el tiempo desde una base de datos, el cual se identifica como  $a_1$ , correspondiendo al registro sin escalar. Para contar con registros más severos o leves se realiza una transformación

simple, donde las amplitudes son escaladas por un escalar  $\lambda \in [0, +\infty)$  tal que se escala uniformemente:  $a_\lambda = \lambda \cdot a_1$ .

- Definición 1: Factor de Escala (SF)

El Factor de Escala de un acelerograma escalado ( $a_\lambda$ ) es el escalar no-negativo  $\lambda \in [0, +\infty)$  que produce  $a_\lambda$  al ser multiplicado el registro de aceleraciones no-escalado,  $a_1$ .

De esta manera si  $\lambda = 1$  corresponde al acelerograma natural (no-escalado),  $\lambda < 1$  corresponde a un acelerograma reducido y si  $\lambda > 1$  corresponde a uno aumentado.

- Definición 2: Medida de Intensidad (IM)

La Medida de Intensidad de un acelerograma escalado ( $a_\lambda$ ) es un escalar no-negativo  $IM \in [0, +\infty)$  que constituye una función,  $IM = f_{a_1}(\lambda)$ , que depende de un acelerograma no-escalado ( $a_1$ ) y es monóticamente creciente con el factor de escala,  $\lambda$ .

No todos los parámetros que se proponen para caracterizar un terremoto resulta evidente escalarlos (por ejemplo, Magnitud Momento o duración), así también no resulta simple escalar los distintos parámetros que representan la intensidad de un evento, como por ejemplo, la Intensidad de Mercalli Modificada, siendo designados como no-escalables.

Los ejemplos comunes de Medida de Intensidad escalables son la Aceleración Máxima del Suelo (PGA), Velocidad Máxima del Suelo (PGV), la Aceleración Espectral con un amortiguamiento de 5% ( $S_a(T_1, 5\%)$ ).

- Definición 3. Medida de Daño (DM)

La Medida de Daño o variable de estado estructural es un escalar no-negativo que caracteriza la respuesta del modelo estructural debido a una carga sísmica.

Posibles opciones de Medida de Daño podrían ser máximo corte basal, rotaciones nodales, desplazamiento de techo, el ángulo máximo de desplazamiento entrepisos. Puede ser conveniente utilizar dos o más Medidas de Daño (resultantes de los mismos análisis no lineales) para evaluar características de respuesta diferentes.

- Definición 4. Estudio de Registro-Único IDA

Es un estudio de análisis dinámico de un modelo estructural dado, parametrizado por el factor de escala de un registro de aceleraciones dado.

El propósito es registrar DMs de un modelo estructural para cada nivel de IM del registro de aceleraciones escalado, los valores resultantes de la respuesta son graficados versus el nivel de intensidad, obteniendo curvas continuas, denominadas curvas únicas IDA.

- Definición 5. Estudio Multi-Registros IDA

Es una colección de estudios de Registro-Único IDA de un mismo modelo estructural, bajo diferentes acelerogramas. Es posible generar una colección de curvas IDA para un mismo modelo estructural bajo diferentes acelerogramas que son parametrizados con los mismos IMs y DM.

Un estudio de multi-registros IDA se observa en la figura 39. Para una misma estructura analizada, se observan diferencias en la respuesta estructural a niveles equivalentes de intensidad sísmica. Por ejemplo, mientras que la curva B se comporta casi linealmente a intensidades más altas, la curva C muestra una respuesta mucho más inelástica, y el registro representado por la curva A causaría un completo colapso de la estructura. Así también, mientras que la curva A refleja el tramo lineal, el punto de fluencia y una eventual falla de la estructura, las otras dos curvas muestran un comportamiento mucho menos intuitivo. Las particularidades evidentes en este ejemplo efectivamente demuestran la utilidad de realizar múltiples análisis no lineales.

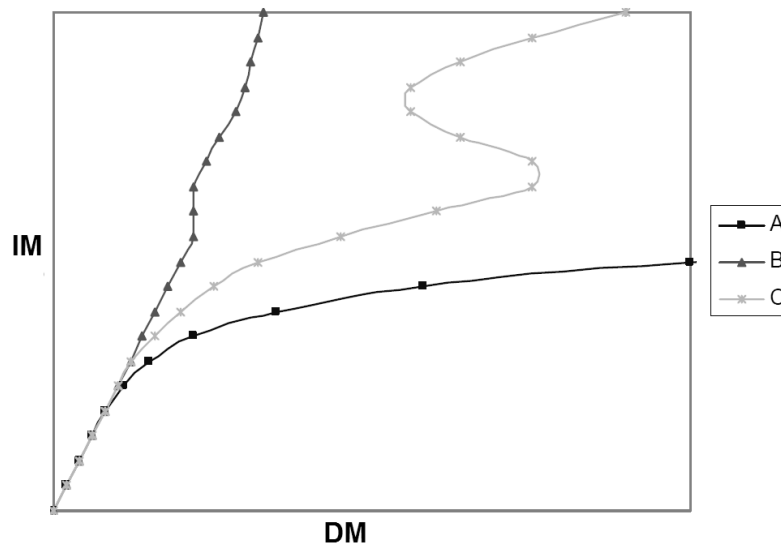


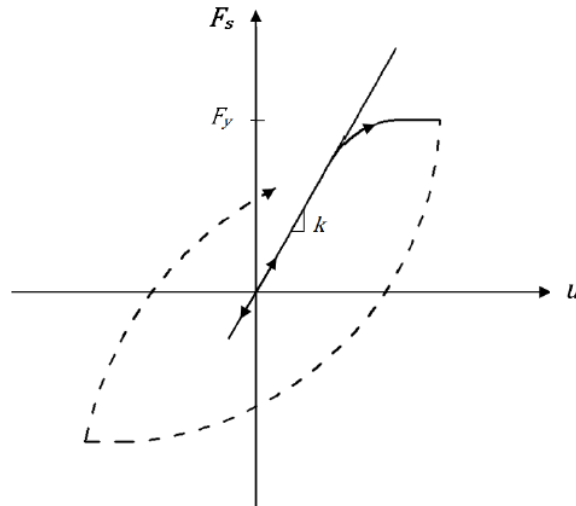
Figura 39. Curvas IDA.

## 6.2. ANÁLISIS NO-LINEAL

Las fuerzas laterales que actúan sobre un sistema estructural elástico sometido a registros de aceleraciones de un terremoto severo, resultan ser muy grandes y el diseño de estructuras para estos altos niveles de las fuerzas laterales no resulta económico y factible para un evento que puede ocurrir con una baja probabilidad durante su vida útil. El enfoque recomendado: en diseño sísmico es considerar una fuerza lateral  $F_y$  que es menor que la demanda de fuerza elástica  $F_e$ , lo que permite que el sistema experimente una deformación plástica liberando energía, tal que puede deformar más allá del rango elástico lineal durante un evento sísmico.



Cuando se excede el desplazamiento de fluencia, la rigidez - que corresponde a la pendiente de la curva fuerza-deformación - se suaviza, como lo muestra la figura 40 de una típica curva fuerza-deformación de un sistema de un grado de libertad sujeto a un único ciclo. Este tipo de comportamiento no-lineal se debe a la no-linealidad del material debido al deterioro de propiedades del material frente a grandes desplazamientos.



**Figura 40.** Curva Fuerza-Deformación de material inelástico.

La ecuación de movimiento de un sistema no-lineal de un grado de libertad está definida por:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + F_s(u) = -m\ddot{u}_g$$

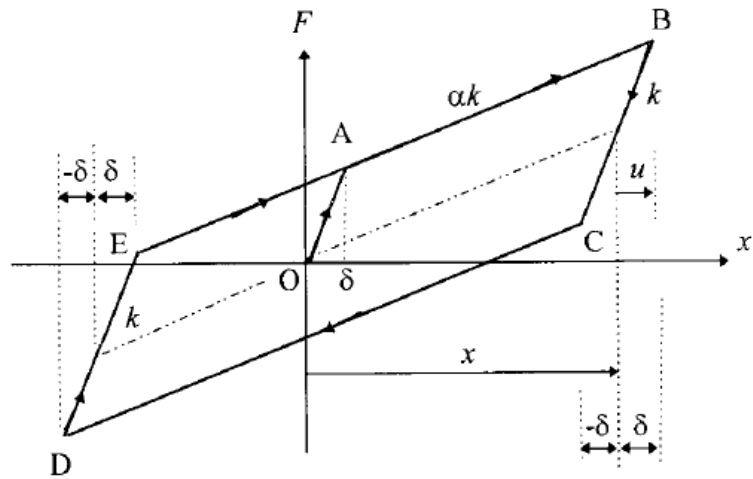
Donde:

- $u$ : Desplazamiento.
- $F_s$ : Fuerza restauradora.
- $\ddot{u}_g$ : Aceleración del suelo.
- $c$ : Constante de amortiguamiento.
- $m$ : Masa del sistema.

La no-linealidad está dada por  $F_s(u)$ , ello significa que la rigidez varía con el desplazamiento según muestra la figura 40.

Uno de los modelos histeréticos para representar esta variación en la rigidez, y que se considera para este caso de estudio, consiste en un modelo elasto-plástico bilineal. Este modelo bilineal está formado por una rigidez elástica  $k$  y una rigidez post-fluencia  $\alpha \cdot k$ .

La figura 41 representa un modelo bilineal, en el cual se observa que al iniciar la carga el sistema tiene una rigidez elástica  $k$  y cuando la resistencia interna alcanza el estado plástico, el sistema fluye a lo largo del plató con la rigidez post-fluencia .



**Figura 41.** Modelo Bilineal. (Mostaghel, 1999)

El método para resolver la ecuación no-lineal de movimiento utilizado en este trabajo, se denomina método de integración paso a paso (Paz, 1996). Este método considera la ecuación de movimiento en su forma incremental:

$$m\Delta\ddot{u} + c\Delta\dot{u} + \Delta F_s(u) = -m\Delta\ddot{u}_g$$

La respuesta se calcula para sucesivos incrementos de tiempo  $\Delta T$ . Al comienzo de cada intervalo se establecen las condiciones de equilibrio dinámico y a continuación se calcula aproximadamente la respuesta para un incremento de tiempo, suponiendo que los coeficientes  $k(u)$  y  $c(\dot{u})$  permanecen constantes durante el intervalo de tiempo. Las características no lineales de estos coeficientes se consideran en el análisis mediante su cálculo al comienzo de cada incremento, resultando en un comportamiento no-lineal aproximado del sistema por una secuencia de sucesivos sistemas lineales. Para llevar a cabo esta integración paso a paso se opta por el método de aceleración lineal, el cual supone que la aceleración varía linealmente durante el intervalo.

Cuando se supone que la aceleración es una función lineal durante el intervalo de tiempo  $t_i$  a  $t_{i+1} = t_i + t$ , se puede expresar la aceleración como:

$$\ddot{y}(t) = \ddot{y}_i + \frac{\Delta\ddot{y}_i}{\Delta t}(t - t_i)$$

Donde la aceleración incremental  $\Delta\ddot{y}_i$  está definida por:

$$\Delta\ddot{y}_i = \ddot{y}(t_i + \Delta t) - \ddot{y}(t_i)$$

Integrando  $\ddot{y}(t)$  con respecto al tiempo dos veces entre los límites  $t_i$  y  $t$  resulta:

$$\dot{y}(t) = \dot{y}_i + \ddot{y}_i(t - t_i) + \frac{1}{2} \frac{\Delta \ddot{y}_i}{\Delta t} (t - t_i)^2$$

$$y(t) = y_i + \dot{y}_i(t - t_i) + \frac{1}{2} \ddot{y}_i(t - t_i)^2 + \frac{1}{6} \frac{\Delta \ddot{y}_i}{\Delta t} (t - t_i)^3$$

Al evaluar las ecuaciones anteriores en el instante  $t = t_i + \Delta t$  se obtiene:

$$\Delta \dot{y}_i = \ddot{y}_i \Delta t + \frac{1}{2} \Delta \ddot{y}_i \Delta t$$

$$\Delta y_i = \dot{y}_i \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{y}_i \Delta t^2 + \frac{1}{6} \Delta \ddot{y}_i \Delta t^3$$

Al combinar ambas ecuaciones se obtiene el incremento de aceleración y velocidad:

$$\Delta \ddot{y}_i = \frac{6}{\Delta t^2} \Delta y_i - \frac{6}{\Delta t} \dot{y}_i - 3 \ddot{y}_i$$

$$\Delta \dot{y}_i = \frac{3}{\Delta t} \Delta y_i - 3 \dot{y}_i - \frac{\Delta t}{2} \ddot{y}_i$$

Estas ecuaciones aplicadas en  $\Delta F_s = k_i \Delta y_i$

$$m \left\{ \frac{6}{\Delta t^2} \Delta y_i - \frac{6}{\Delta t} \dot{y}_i - 3 \ddot{y}_i \right\} + \left\{ \frac{3}{\Delta t} \Delta y_i - 3 \dot{y}_i - \frac{\Delta t}{2} \ddot{y}_i \right\} + k_i \Delta y_i = \Delta F_i$$

Reordenando los términos se tiene que:

$$\bar{k}_i \Delta y_i = \Delta \bar{F}_i$$

Siendo  $\bar{k}_i$  la constante equivalente del resorte, dada por:

$$\bar{k}_i = k_i + \frac{6m}{\Delta t^2} + \frac{3c_i}{\Delta t}$$

Y  $\Delta \bar{F}_i$  es la fuerza equivalente incremental, expresada por:

$$\Delta \bar{F}_i = \Delta F_i + \left\{ \frac{6}{\Delta t} \dot{y}_i + 3 \ddot{y}_i \right\} + \left\{ 3 \dot{y}_i + \frac{\Delta t}{2} \ddot{y}_i \right\}$$

Con ello el desplazamiento incremental se resuelve:

$$\Delta y_i = \frac{\Delta \bar{F}_i}{\bar{k}_i}$$

Con esto, se tiene desplazamiento, velocidad y aceleración en el instante  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$

$$y_{i+1} = y_i + \Delta y_i$$

$$\dot{y}_{i+1} = \dot{y}_i + \Delta \dot{y}_i$$

$$\ddot{y}_{i+1} = \frac{1}{m} \{F(t_{i+1}) - F_{D,i+1} - F_{S,i+1}\}$$

Una vez calculado el desplazamiento, velocidad y aceleración en el instante  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ , el procedimiento descrito se repite para calcular estas cantidades en el siguiente paso de tiempo.

### 6.3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

La aplicación del método descrito anteriormente considera un modelo estructural simplificado, basado en un oscilador de 1 grado de libertad. Este modelo debe estar bien definido en sus propiedades para los efectos que se deseen considerar, por ello, las propiedades a considerar que definen el modelo son argumentadas a continuación.

A raíz del terremoto de Febrero de 2010, los edificios de la Región Metropolitana se vieron afectados principalmente en sectores como Maipú, Ñuñoa, Macul, Santiago, Independencia y la Ciudad Empresarial, estos edificios eran de poca antigüedad, evidenciando la vulnerabilidad estructural de algunas edificaciones relativamente nuevas ante un evento de gran magnitud. Varios edificios recientes de hormigón armado sufrieron fallas que obligaron a desalojarlos declarándolos inhabitables. Con estos antecedentes se determina definir un modelo que represente de manera simplificada el conjunto de los principales edificios que mayormente sufrieron daños para el terremoto de 2010, considerando que se trata del segundo evento de mayor magnitud en Chile y el quinto a nivel mundial.

Basado en la memoria “Vulnerabilidad sísmica de edificios habitacionales de hormigón armado dañados en el sismo del 27 de febrero de 2010 en la Región Metropolitana” (Cardemil, 2011), se identifican los siguientes edificios con daño severo y en situación inhabitable, los cuales tienen entre 18 a 20 pisos:

- Emerald (20 pisos)
- Los Cerezos (26 pisos)
- Regina Oriente (21 pisos)

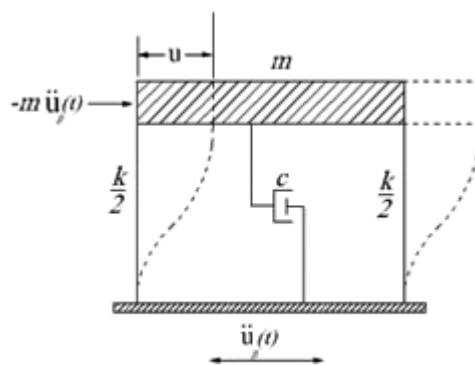
- Central Park (19 pisos)
- Sol Oriente I (18 pisos)
- Sol Oriente II (18 pisos)
- Don Manuel (19 pisos)
- Vista Hipódromo (21 pisos)

Los daños más comunes se clasifican en: fallas en ascensores, daños en elementos no estructurales, fallas de corte en dinteles. Falla de flexo-compresión en muros de los niveles inferiores, caracterizada por descascaramiento de hormigón con falla. Pandeo de armadura longitudinal y en algunos casos fractura de armadura. Descenso vertical en cabezas de muro con eventuales desplomes que se traducen en desplazamientos horizontales en niveles superiores. Agrietamiento en losas, especialmente en zonas de pasillos angostos de vanos de puertas sin dinteles (Cardemil, 2011).

De esta manera, se define un modelo con características de un edificio de muros típico chileno para el uso habitacional, con 19 pisos y 2 subterráneos. De manera aproximada y simplificada se define lo siguiente:

- Planta piso tipo: 600 m<sup>2</sup>
- Planta piso subterráneo: 900 m<sup>2</sup>
- Número de pisos: 19 y 2 subterráneos
- Altura de piso tipo: 2.5 m
- Altura de subterráneo: 2.8 m
- Altura Total: 53.1 m
- Período: 1.025 seg ( $T = 0.05 \cdot N$  (Lagos et al. 2012))
- Peso sísmico: 13200 Tonf (Aproximación: 1 Tonf/m<sup>2</sup> de piso (Lagos et al, 2012))
- Masa sísmica: 1345 Tonf\*seg<sup>2</sup>/m

Con estas características se busca definir un modelo de un oscilador de un grado de libertad, equivalente al primero modo fundamental de la estructura.



**Figura 42.** Oscilador de un grado de libertad.

La figura 42 muestra un oscilador de un grado de libertad con amortiguamiento  $c$ , rigidez  $k$ , masa  $m$ , y que al ser sometido a una aceleración basal  $\ddot{u}_g(t)$  se deforma lateralmente con un desplazamiento  $u$ .

Al considerar una estructura de N-grados de libertad sometida sólo al movimiento del suelo, la ecuación de movimiento del sistema es:

$$[m]\{\ddot{u}(t)\} + \{\Gamma\}\ddot{u}_g + [c]\{\dot{u}(t)\} + [k]\{u(t)\} = 0$$

Donde:  $\{\Gamma\}$  es un vector de coeficientes de influencia, en el cual la componente  $\{\Gamma_i\}$  representa la aceleración en la coordenada de desplazamiento  $i$  causada por una unidad de aceleración en la base. Para este caso  $\{\Gamma\}$  corresponde a un vector unitario con componentes iguales a 1.

Es posible representar el desplazamiento relativo a la base usando superposición modal, esto es:

$$\begin{aligned}\{u(t)\} &= [\phi]\{q(t)\} \\ \{\dot{u}(t)\} &= [\phi]\{\dot{q}(t)\} \\ \{\ddot{u}(t)\} &= [\phi]\{\ddot{q}(t)\}\end{aligned}$$

Sustituyendo esto en la ecuación de movimiento se tiene:

$$[m][\phi]\{\ddot{q}(t)\} + [c][\phi]\{\dot{q}(t)\} + [k][\phi]\{q(t)\} = -[m]\{\Gamma\}\ddot{u}_g$$

Premultiplicando por  $[\phi]^T$  y debido a que la matriz de masa, rigidez y amortiguamiento modal son matrices diagonales, la ecuación de movimiento para el nuevo sistema queda desacoplada y el sistema de N-grados de libertad queda representado por N osciladores de 1-grado de libertad.

$$M_r \ddot{q}_r(t) + C_r \dot{q}_r(t) + K_r q_r(t) = P_{ef_r}(t)$$

Donde:

$M_r = \{\phi\}_r^T [m] \{\phi\}_r$ , corresponde a la masa del modo  $r$

$C_r = \{\phi\}_r^T [c] \{\phi\}_r$ , corresponde al amortiguamiento del modo  $r$

$K_r = \{\phi\}_r^T [k] \{\phi\}_r$ , corresponde a la rigidez del modo  $r$

$P_{ef_r} = -(\{\phi\}_r^T [m] \{\Gamma\}) \ddot{u}_g(t)$ , corresponde a la fuerza modal efectiva, en donde el término  $(\{\phi\}_r^T [m] \{\Gamma\}) = L_r$ , se refiere al factor de participación modal.

Para determinar las propiedades del primer modo de la estructura se considera un análisis para un sistema de 20-grados-de-libertad, para el cual se identifica masa y

rigidez de los pisos, formas modales, masas y rigideces modales, factor de participación modal.

Las características se describen a continuación:

- Matriz de masa ( $M$ ): matriz con masa de piso tipo y masa de subterráneo en los valores de su diagonal. Masa piso tipo: 60 Tonf\*seg<sup>2</sup>/m y Masa subterráneo: 90 Tonf\*seg<sup>2</sup>/m.
- Matriz de rigidez ( $K$ ): matriz con rigidez de piso tipo y rigidez de subterráneo en los valores de su diagonal. Rigidez piso tipo: 360000 Tonf/m y Rigidez subterráneo: 720000 Tonf/m. Los valores de rigidez se tienen por iteración, de tal manera que del análisis se obtenga un período para el primer modo igual a 1. Además, se estima una rigidez del subterráneo igual al doble de la rigidez de piso tipo.
- Las formas modales ( $\phi$ ) y el cuadrado de la frecuencia angular ( $\omega^2$ ) corresponden a los vectores y valores propios de ( $M^{-1} \cdot K$ ), respectivamente. De esta manera se tiene el período y se normaliza las formas modales. La figura 34 grafica el primer modo normalizado.

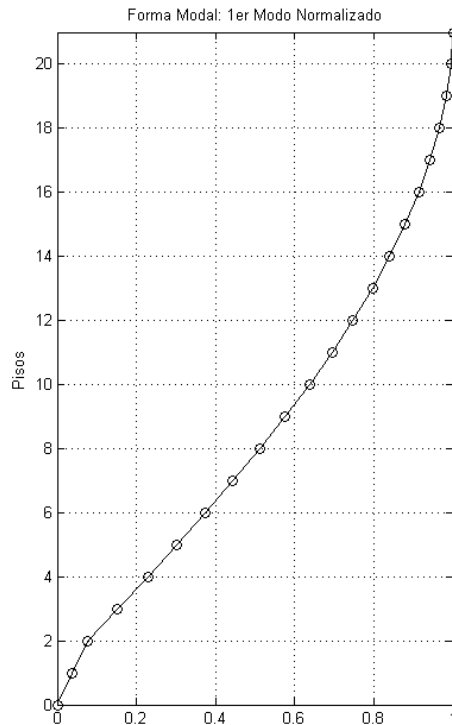


Figura 43. Forma Primer Modo.

- Masa y Rigidez modal: Se obtienen de la expresión,  $Mm = \phi^T M \phi$  y  $Km = \phi^T K \phi$
- Factor de participación modal: Se tiene de la expresión,  $Lm = \phi^T M \cdot e$ , donde  $e$  corresponde al vector de coeficientes de influencia, siendo para este caso un vector unitario con componentes igual a 1.

- Masa efectiva del 1° modo: Se tiene de la expresión,  $M_{eff} = Lm_1^2 / Mm_1$

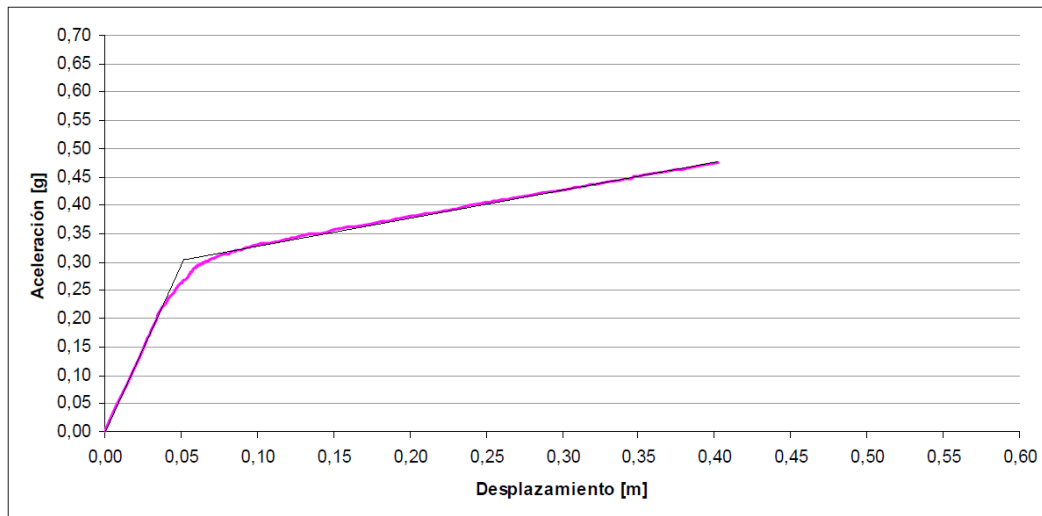
Según lo descrito y del análisis correspondiente se obtienen los siguientes resultados:

- $Mm_1 = 616.4 \text{ Tonf} \cdot \text{seg}^2 / \text{m}$
- $Km_1 = 21692 \text{ Tonf} / \text{m}$
- $Cm_1 = 365.66 \text{ Tonf} \cdot \text{seg} / \text{m}$  ( $\beta = 5\%$ .)
- $Lm_1 = 789.2 \text{ Tonf} \cdot \text{seg}^2 / \text{m}$
- $M_{eff} = 1011 \text{ Tonf} \cdot \text{seg}^2 / \text{m}$  (corresponde a un 75% de la masa total)

Además, se considera:

- Pendiente de rigidez post-fluencia,  $\alpha$ : 8%
- Resistencia de fluencia,  $R_y$ : 2975.4 Tonf

La pendiente de rigidez post-fluencia se determina a partir del estudio desarrollado en la memoria “Análisis comparativo de vulnerabilidad y costo entre edificios de marcos y muros con una misma superficie en planta” (Droguett, 2008). En este trabajo se considera un modelo de 20 pisos con similares características a las descritas en este capítulo, al cual se aplica un análisis Pushover obteniendo una curva de capacidad, a la cual se le calculó de manera aproximada la pendiente luego de la fluencia, mostrada en la figura 44.



**Figura 44.** Curva capacidad para un modelo de 20 pisos (Droguett, 2008).

Asumiendo que la no-linealidad se concentra en el primer modo, siendo pequeña la contribución de los otros modos, la fuerza  $R_y$  se estima a través de la misma curva capacidad obtenida por Droguett (2008), para la cual se ajusta una curva bilineal, identificándose el punto de cambio de pendiente. De esta manera,  $R_y/m$  se estima en 0.30g.



## 6.4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS

Una vez realizada la descripción del modelo e identificado los datos en el punto anterior, se procede a calcular la respuesta del modelo para dos conjuntos de registros: El primer conjunto de registros corresponde a los registros determinados en capítulo V y el segundo, corresponde a todos los registros del catálogo.

Según los criterios argumentados en el capítulo V, vale decir aquellos registros por sobre un PGA de 0.30g, se tiene el primer conjunto de terremotos (tabla 5):

EVENTO	ESTACIÓN	CANAL	EVENTO	ESTACIÓN	CANAL
'0712161'	'MEJILLONES PUERTO'	Canal1	'MAULE 2010'	'TALCA'	Canal3
'0712161'	'MEJILLONES PUERTO'	Canal2	'MAULE 2010'	'VALPARAISO UTFSM'	Canal3
'0803241'	'PICA'	Canal1	'MAULE 2010'	'VINA DEL MAR EL SALTO'	Canal3
'0809101'	'PICA'	Canal1	'MAULE 2010'	'CASABLANCA'	Canal3
'0809101'	'PICA'	Canal2	'PUNITAQUI 1997'	'ILLAPEL'	Canal3
'8111071'	'LA LIGUA'	Canal1	'SUR DE PERU 2001'	'ARICA COSTANERA'	Canal1
'8111071'	'PAPUDO'	Canal1	'SUR DE PERU 2001'	'ARICA CEMENTERIO'	Canal3
'8111071'	'LA LIGUA'	Canal2	'TARAPACA 2005'	'CUYA'	Canal1
'8111071'	'PAPUDO'	Canal3	'TARAPACA 2005'	'PICA'	Canal1
'9804171'	'PAPUDO'	Canal1	'TARAPACA 2005'	'POCONCHILE ETNA'	Canal1
'MAULE 2010'	'ANGOL'	Canal1	'TARAPACA 2005'	'PICA'	Canal2
'MAULE 2010'	'CONCEPCION'	Canal1	'TARAPACA 2005'	'POCONCHILE ETNA'	Canal2
'MAULE 2010'	'CONSTITUCION'	Canal1	'TARAPACA 2005'	'CUYA'	Canal3
'MAULE 2010'	'CURICO'	Canal1	'TOCOPILLA 2007'	'MEJILLONES'	Canal1
'MAULE 2010'	'HUALANE'	Canal1	'TOCOPILLA 2007'	'TOCOPILLA'	Canal1
'MAULE 2010'	'LLOLLEO'	Canal1	'TOCOPILLA 2007'	'TOCOPILLA PUERTO'	Canal1
'MAULE 2010'	'MATANZAS'	Canal1	'TOCOPILLA 2007'	'PB02'	Canal1
'MAULE 2010'	'PAPUDO'	Canal1	'TOCOPILLA 2007'	'PB04'	Canal1
'MAULE 2010'	'SANTIAGO MAIPU'	Canal1	'TOCOPILLA 2007'	'PB05'	Canal1
'MAULE 2010'	'TALCA'	Canal1	'TOCOPILLA 2007'	'PB07'	Canal1
'MAULE 2010'	'VINA DEL MAR CENTRO'	Canal1	'TOCOPILLA 2007'	'PB08'	Canal1
'MAULE 2010'	'VINA DEL MAR EL SALTO'	Canal1	'TOCOPILLA 2007'	'MEJILLONES'	Canal2
'MAULE 2010'	'SANTIAGO ANTUMAPU'	Canal1	'TOCOPILLA 2007'	'TOCOPILLA PUERTO'	Canal2
'MAULE 2010'	'SANTIAGO SANTA LUCIA'	Canal1	'TOCOPILLA 2007'	'PB02'	Canal2
'MAULE 2010'	'CONVENTO VIEJO'	Canal1	'TOCOPILLA 2007'	'PB04'	Canal2
'MAULE 2010'	'MELIPILLA'	Canal1	'TOCOPILLA 2007'	'PB05'	Canal2
'MAULE 2010'	'SAN JOSE'	Canal1	'TOCOPILLA 2007'	'PB06'	Canal2
'MAULE 2010'	'CONCEPCION SAN PEDRO'	Canal1	'TOCOPILLA 2007'	'PB07'	Canal2
'MAULE 2010'	'ANGOL'	Canal2	'TOCOPILLA 2007'	'PB08'	Canal2
'MAULE 2010'	'SANTIAGO MAIPU'	Canal2	'TOCOPILLA 2007'	'EL LOA'	Canal3
'MAULE 2010'	'SANTIAGO PENALOEN'	Canal2	'TOCOPILLA 2007'	'TOCOPILLA'	Canal3
'MAULE 2010'	'CABILDO'	Canal2	'VALPARAISO 1985'	'LLOLLEO'	Canal1
'MAULE 2010'	'CONVENTO VIEJO'	Canal2	'VALPARAISO 1985'	'SAN ISIDRO'	Canal1
'MAULE 2010'	'SANTIAGO LAS AMERICAS'	Canal2	'VALPARAISO 1985'	'SAN FELIPE'	Canal1
'MAULE 2010'	'MELIPILLA'	Canal2	'VALPARAISO 1985'	'MELIPILLA'	Canal1
'MAULE 2010'	'OLMUE'	Canal2	'VALPARAISO 1985'	'ZAPALLAR'	Canal1
'MAULE 2010'	'SAN JOSE'	Canal2	'VALPARAISO 1985'	'LLAYLLAY'	Canal2

'MAULE 2010'	'CONCEPCION SAN PEDRO'	Canal2	'VALPARAISO 1985'	'SAN ISIDRO'	Canal2
'MAULE 2010'	'CONSTITUCION'	Canal3	'VALPARAISO 1985'	'SAN FERNANDO'	Canal2
'MAULE 2010'	'CURICO'	Canal3	'VALPARAISO 1985'	'SAN FELIPE'	Canal2
'MAULE 2010'	'HUALANE'	Canal3	'VALPARAISO 1985'	'MELIPILLA'	Canal2
'MAULE 2010'	'LLOLLEO'	Canal3	'VALPARAISO 1985'	'RAPEL'	Canal2
'MAULE 2010'	'PAPUDO'	Canal3	'VALPARAISO 1985'	'VINA DEL MAR CENTRO'	Canal2
'MAULE 2010'	'SANTIAGO CENTRO'	Canal3	'VALPARAISO 1985'	'LLOLLEO'	Canal3

**Tabla 5.** Conjunto de terremotos para análisis.

Estos registros son escalados de manera que se tenga un PGA de 0.1g a 1.5g con un incremento igual a 0.1g. Mediante la función ***SDOFBi(reg,Fs,ke,alfa,m,c,fy,Lm1)*** se obtiene la respuesta del oscilador de un grado de libertad; donde *reg* corresponde al registro escalado, *ke* es la rigidez elástica, *alfa* es la fracción de *ke* que determina la rigidez post-fluencia, *m* es la masa, *c* la constante de amortiguamiento, *fy* la fuerza de fluencia y *Lm1* el factor de participación modal.

Se calcula la respuesta para cada registro escalado. En definitiva se tiene un archivo de datos de MATLAB con 61 estructuras donde se identifica el evento, la estación, el canal, y la respuesta para los distintos PGA: de 0.1g a 1.5g.

Para el segundo conjunto de datos se calcula de igual modo la respuesta, esta vez se consideran todos los registros del catálogo. Se almacena en un archivo de datos de MATLAB con 406 estructuras que contiene los mismos campos mencionados anteriormente.

Los resultados de este análisis no lineal para registros escalados se almacenan para generar las curvas descritas en el capítulo siguiente.

## CAPÍTULO VII: CURVAS DE FRAGILIDAD

Las curvas de fragilidad se enmarcan en el análisis sísmico, como una medida de la vulnerabilidad sísmica. Así mismo, la vulnerabilidad se cuadra con conceptos como el Peligro Sísmico y Riesgo Sísmico, por lo que resulta importante desarrollar brevemente dichos conceptos y como se relacionan entre sí.

El Peligro Sísmico se puede definir de manera simple como la probabilidad de que en un lugar determinado, ocurra al menos un movimiento sísmico de intensidad mayor o igual a un cierto valor establecido, para un determinado periodo de interés. Mientras que el Riesgo Sísmico se refiere a la probabilidad de excedencia de que en un determinado sitio y durante un tiempo de exposición dado, las consecuencias económicas y sociales producidas por un evento sísmico, excedan valores preestablecidos, como número de víctimas, cuantías de daños y pérdidas económicas.

Por otro lado, la Vulnerabilidad Sísmica corresponde al grado de daño o pérdida que presenta determinada construcción o cualquier elemento a causa de un sismo de una magnitud o intensidad dada. Es una propiedad intrínseca de la estructura, una característica de su comportamiento, que puede entenderse como la capacidad inherente de un elemento o grupo de elementos expuestos a ser afectado o ser susceptible de sufrir daño ante la ocurrencia de un evento sísmico determinado (Silva, 2011)

Estos tres conceptos se relacionan entre sí como:

$$Riesgo = Peligro \cdot Vulnerabilidad$$

Por lo tanto, dado que el Peligro está condicionado por las características tectónicas del lugar, resultando ser una variable no controlable, entonces para reducir el Riesgo es necesario reducir la Vulnerabilidad. Una de las herramienta para desarrollar dicho concepto, son las curvas de fragilidad, que se entienden como una medida de la vulnerabilidad sísmica de una estructura en términos probabilísticos.

Las curvas de fragilidad representan la probabilidad de que la respuesta de una estructura exceda un determinado estado de daño o estado límite, en función de un parámetro que define la intensidad del movimiento del suelo (como por ejemplo el PGA, PGV, etc).

La construcción de estas curvas, requiere calcular la respuesta del sistema estructural para diferentes niveles de la demanda sísmica, los cuales varían entre sismos frecuentes de baja intensidad hasta sismos fuertes poco frecuentes. Generalmente para

estos últimos, el comportamiento de la estructura es altamente no-lineal, por ello, se realiza un análisis que permita modelar este comportamiento.

Existen diferentes metodologías para la generación de curvas de fragilidad, por ejemplo: a partir de la información disponible, de la experiencia y de la capacidad para desarrollar la experimentación o análisis apropiados. Análisis numéricos pueden ser empleados para zonas donde no se dispone de observaciones de daños debidos a sismos, ni de suficientes resultados de ensayos de laboratorio.

## **7.1. ELEMENTOS PARA GENERACIÓN DE CURVAS DE FRAGILIDAD**

Para aplicar dicho método se identifican a continuación los elementos principales propios de la generación de curvas de fragilidad:

- Parámetro indicador de la intensidad sísmica

Se debe definir un Parámetro Indicador de la Intensidad Sísmica (PIS) que caracterice el nivel del terremoto, por lo que debe representar sismos de baja, mediana y alta intensidad.

Tradicionalmente, la fuerza de los terremotos ha sido relacionada con la aceleración máxima del suelo, PGA. Sin embargo, se acostumbra a utilizar otros parámetros como: la velocidad máxima del suelo (PGV), el desplazamiento máximo del suelo (PGD), la Intensidad Mercalli Modificada (IMM) o la aceleración espectral, Sa.

- Modelo estructural

Una vez caracterizada la acción sísmica, se define el modelo analítico de la estructura, el cual debe representar todas las componentes que influyen sobre su masa, resistencia, rigidez y deformabilidad.

Se propone un modelo estructural simplificado de un grado de libertad con una masa, rigidez y amortiguamiento.

- Parámetro indicador de daño

Para este modelo propuesto se debe definir un Parámetro Indicador del Daño estructural (PID) que sea característico de la respuesta de una estructura. Se propone el desplazamiento del techo.

- Análisis dinámico no lineal

Se debe conocer la respuesta de la estructura frente a la acción sísmica, por lo que el análisis dinámico no-lineal resulta ser uno de los análisis más sofisticados, mediante el cual es posible predecir las fuerzas y los desplazamientos que se producen como consecuencia de un movimiento sísmico. Para el caso de este trabajo se ha realizado

un análisis dinámico incremental (IDA), que une un parámetro característico de la estructura, un modelo y el análisis no-lineal.

Se puede concluir que los elementos descritos anteriormente ya han sido definidos en el análisis dinámico incremental (IDA), donde se modela una edificación típica chilena en base a muros de hormigón armado, con las propiedades equivalentes para un oscilador de un grado de libertad, el cual es sometido a la acción sísmica mediante registros escalados, teniendo como parámetro indicador de la intensidad la aceleración máxima del suelo (PGA).

## **7.2. ESTADOS LÍMITES DE UNA ESTRUCTURA**

Las curvas de fragilidad están determinadas por la excedencia de los estados límites de daño en una estructura ante la acción de un determinado sismo. Por ello se define un parámetro indicador del daño y de esta manera medir y cuantificar el daño frente a un esquema de evaluación definido consensuadamente.

La cuantificación del daño estructural se enmarca dentro del diseño basado en el desempeño sísmico, el cual busca precisamente que una estructura no sea dañada más allá de ciertos estados límites y considerando el impacto que tienen estos daños en las actividades posteriores al evento sísmico.

El nivel de desempeño describe el estado límite de daño. Representa una condición límite establecida en función de los posibles daños físicos sobre la edificación, la amenaza sobre la seguridad de los ocupantes en consecuencia de estos daños y la funcionalidad de la estructura posterior al terremoto. Los niveles de desempeño se expresan en términos cualitativos en cuanto al significado público (impacto en ocupantes) y en términos técnicos para el diseño o evaluación de la estructura (degradación de elementos estructurales o no estructurales, etc) (SEAOC, 1995).

La propuesta del Comité VISION 2000 define cuatro niveles de desempeño identificados a través de los siguientes calificadores (SEAOC, 1995):

- A. Totalmente Operacional: Nivel de desempeño en el cual no ocurren daños. Las consecuencias sobre los usuarios de las instalaciones son despreciables. La edificación permanece totalmente segura para sus ocupantes. Todo el contenido y los servicios de la edificación permanecen funcionales y disponibles para su uso. En general no se requiere reparaciones.
- B. Operacional: Nivel de desempeño en el cual ocurren daños moderados en elementos no estructurales y en el contenido de la edificación, e incluso algunos daños ligeros en elementos estructurales. El daño es limitado y no compromete

la seguridad de la edificación, ésta debería permanecer disponible para cumplir con sus funciones normales inmediatamente después del sismo, aunque los daños en elementos no estructurales pueden interrumpir parcialmente algunas funciones. En general se requieren algunas reparaciones menores.

C. Seguridad: Nivel de desempeño en el cual ocurren daños moderados en elementos estructurales, no estructurales y en el contenido de la edificación. Degradación de la rigidez lateral y la capacidad resistente del sistema. Interrupción de servicios eléctricos, mecánicos y perturbación de las vías de escape. El edificio probablemente requerirá reparaciones importantes.

D. Pre-Colapso: Nivel de desempeño en el cual la degradación de la rigidez lateral y la capacidad resistente del sistema compromete la estabilidad de la estructura aproximándose al colapso estructural. Se interrumpen servicios y vías de escape. La edificación es completamente insegura para los ocupantes y la reparación puede resultar no factible técnica o económicamente.

Frente a estos niveles de desempeño se definen estados de daño que están asociados a un “desplazamiento objetivo”, representando por la fracción “ $\delta/H$ ”, donde  $\delta$  es el desplazamiento lateral máximo del nivel superior con respecto a la base y  $H$  es la altura del edificio (Guendelman et al, 1997). La relación de los estados de daño y el desplazamiento objetivo se grafica en la siguiente tabla (tabla 6):

Nivel de desempeño	Estado de daño	Desplazamiento objetivo $\delta/H$
Totalmente Operacional	No Daño	0.002
Operacional	Ligero	0.005
Seguridad a la vida	Moderado	0.015
Pre-Colapso	Severo	0.025
Colapso	Colapso	> 0.025

Tabla 6. Desplazamiento objetivo de Estados de daño.

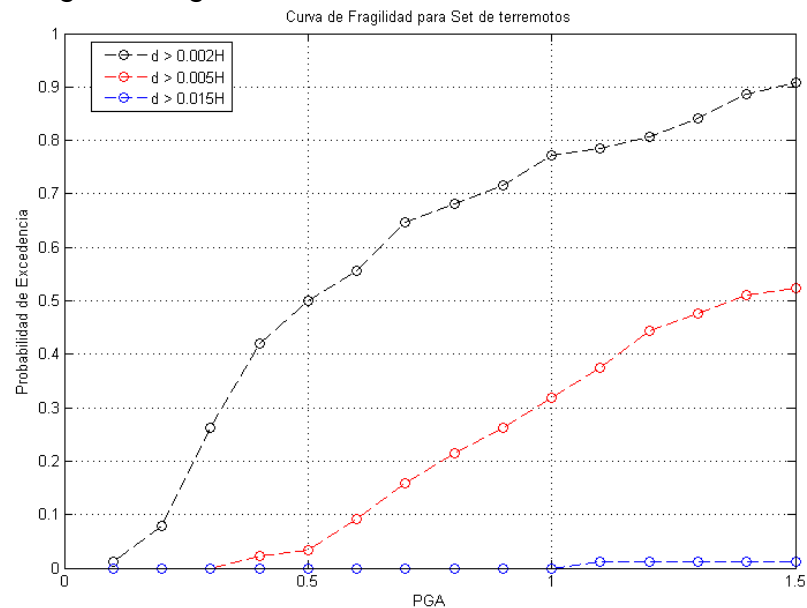
### 7.3. RESULTADOS DE CURVAS DE FRAGILIDAD

Para obtener las curvas se deben retomar los resultados del capítulo VI, donde se guardó la respuesta del Análisis Dinámico Incremental para el modelo estructural considerando 2 conjuntos de registros escalados: el set de terremotos (especificado en la tabla 5) y el conjunto de todos los registros del Catálogo. Con estos valores de respuesta se generaron las curvas de fragilidad para ambos conjuntos según la relación  $\delta/H$ , que determina los distintos estados de daño.

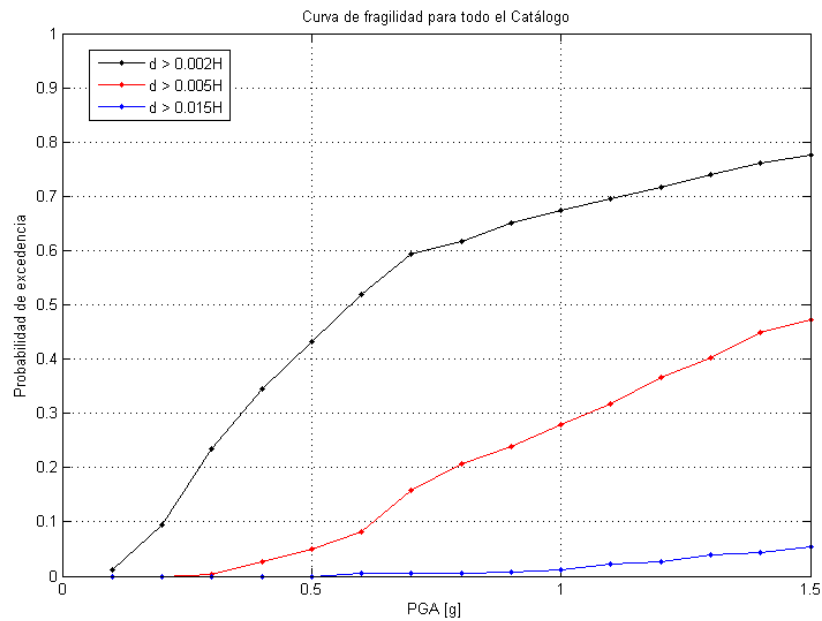
El procedimiento para obtener las curvas consiste en determinar para cada PGA (es decir, de 0.1g a 1.5g) la cantidad de respuestas de desplazamiento que cumplen las

condiciones límites según los estados de daño establecidos en la Tabla 6, lo que permite graficar una probabilidad en función del PGA.

Se obtuvieron los siguientes gráficos:



**Figura 45.** Curva de fragilidad para el Set de terremotos.



**Figura 46.** Curva de fragilidad para todo el Catálogo.

La figura 45 y 46 grafican 3 curvas que identifican los límites de los estados de daño. Vale decir, la zona por sobre la curva de color negro define la probabilidad de que para un determinado PGA *no existe daño* en el tipo de estructura analizada. La zona entre la curva de color negro y rojo, define la probabilidad de que para un determinado PGA existe *daño ligero*. La zona entre la curva roja y azul define la probabilidad de que exista

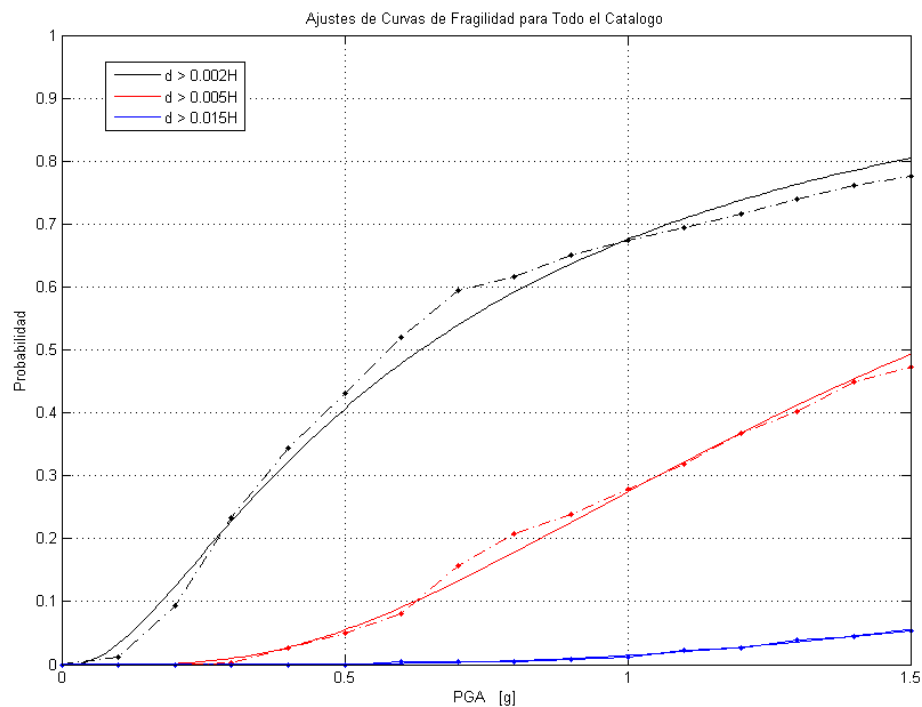
*daño moderado*. Finalmente, la zona bajo la curva azul define la probabilidad de que exista *daño severo*.

Las curvas de fragilidad definitivas se obtienen mediante una función de distribución lognormal, que corresponde a la función de distribución que mejor se ajusta a los datos. Esta función tiene la siguiente forma:

$$F = \Phi \left[ \frac{1}{\sigma_{PE}} \ln \left( \frac{PE}{\overline{PE}} \right) \right]$$

Donde,  $\sigma_{PE}$  corresponde a la desviación estándar del logaritmo natural del Parámetro Estructural y  $\overline{PE}$  el valor medio.

La figura 47 muestra el ajuste de las curvas realizadas para todo el catálogo y para los tres estados de daño usando el método de "Maximum Likelihood Estimation". Por otro lado, la figura 48 muestra el ajuste de las curvas para el set de terremotos seleccionado.



**Figura 47.** Ajuste de curvas de fragilidad para todo el catálogo.



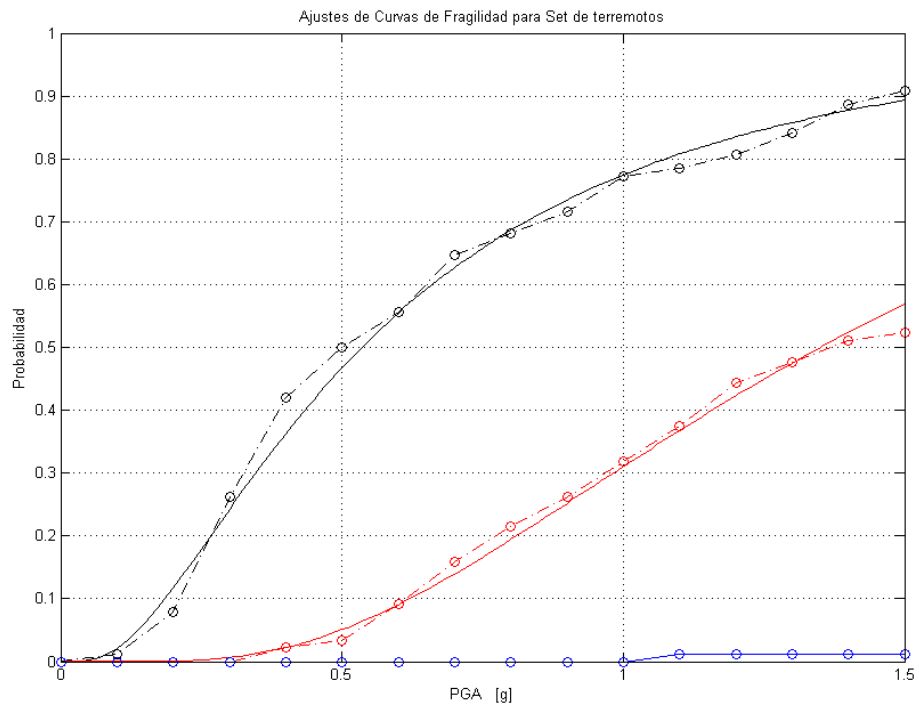


Figura 48. Ajustes de curvas de fragilidad para Set de terremotos.

## CAPÍTULO VIII: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

El presente trabajo de título fue desarrollado en base al cumplimiento de dos objetivos fundamentales: el primero, la realización de un catálogo de terremotos subductivos chilenos, el cual se utilizó para el segundo objetivo correspondiente a la generación de curvas de fragilidad. La primera etapa se realizó mediante un detallado tratamiento de registros de manera de calcular los siguientes parámetros a utilizar durante todo el trabajo: PGA, PGV, PGD, Intensidad de Arias, Potencial Destructivo, Intensidad Espectral de Housner, Velocidad Absoluta Acumulada, e Intensidad Sísmica de la Agencia Meteorológica de Japón. Estos parámetros fueron los elementos principales que definieron el Catálogo de terremotos, el cual consiste en una plataforma de MATLAB que almacena todos los registros de eventos sísmicos relevantes de Chile (desde 1981 hasta 2010) con la información de eventos, estaciones, tipo de suelo, fuente sismogénica correspondiente, y los parámetros mencionados anteriormente.

Este catálogo resulta una herramienta útil para numerosos estudios y análisis que se quieran realizar con registros y parámetros sísmicos, al ser una plataforma que identifica la información relevante de cada sismo mencionada. Para este trabajo, el catálogo fue fundamental ya que mediante éste se generan gráficos que muestran la relación entre dos parámetros a elección teniendo además la información de cada sismo y estación (fuente sismogénica y tipo de suelo). Para el caso de estudio, se generaron gráficos donde se relaciona el PGA con los demás parámetros ya mencionados. Estos gráficos fueron clasificados por dirección del registro, fuente sismogénica y tipo de suelo, y así observar si la relación entre los parámetros mostraba mejores resultados. Con esto dicho, se tienen las siguientes conclusiones:

- Los gráficos para registros con dirección horizontal que relacionan cada uno de los parámetros con el PGA, se observan de mejor manera en escala logarítmica y muestran que la intensidad es menor para bajos PGA aumentando linealmente (en log-log) para altos PGA. Además, se tiene una gran dispersión de los datos.
- Al generar los mismos gráficos descritos anteriormente, e identificando los registros por tipo de suelo no se logra observar una distribución clara de los datos para Roca Dura y Suelo Duro, habiendo una gran dispersión de los datos para ambos suelos. Sin embargo, el gráfico que relaciona *Cruces por cero* con PGA sitúa a los registros en Roca Dura con valores por sobre los de Suelo Duro, entendiéndose que el Suelo atenúa más las altas frecuencias que la Roca Dura.
- Al clasificar los registros por tipo de suelo, en Roca Dura y Suelo Duro, y además, identificar los registros por eventos tipo Interplaca 'Thrust', Intraplaca de profundidad intermedia y superficial, se observa en los gráficos una mejor distribución de los datos. Donde los Intraplaca se agrupan en la parte baja de la

tendencia para todos los parámetros, viéndose con mayor claridad en la relación entre PGA y Potencial Destructivo. Se entiende con esto que basado en el concepto de energía, los terremotos de tipo Interplaca 'Thrust' resultan ser más dañinos que los terremotos de tipo Intraplaca. Por otro lado, se observa que los terremotos Intraplaca presentan mayor intensidad de cruces por cero que los Interplaca para un mismo PGA, agrupándose evidentemente en la parte superior del gráfico.

- Se concluye a raíz de lo analizado y observado en los gráficos, que al comparar las tendencias y agrupaciones de los datos según las distintas clasificaciones mencionadas anteriormente, se considera el Potencial Destructivo como el parámetro que mejor agrupa y muestra una diferencia más clara entre un terremoto Interplaca e Intraplaca tanto para un tipo de suelo Roca Dura como Suelo Duro. Se deduce que esto se debe a que el Potencial Destructivo considera no sólo la energía del terremoto en base a la amplitud de su aceleración sino también la intensidad de cruces por cero. Ésta última se ha mencionado en los puntos anteriores ya que muestra una evidente diferencia al ser clasificada tanto en tipo de suelo como en fuente sismogénica, lo que se esperaba que sea un parámetro a considerar.

Esta primera etapa puede ser complementada en un futuro teniendo mayor información sobre los tipos de suelo de las estaciones, debido a que en este trabajo las estaciones se han clasificado sólo en 2 grupos según la información recogida. Para un trabajo futuro, cuando se tenga claridad del tipo de suelo de todas las estaciones en Chile, será posible primero clasificar en más grupos de suelos, y luego, identificar tendencias para los distintos tipos de suelos.

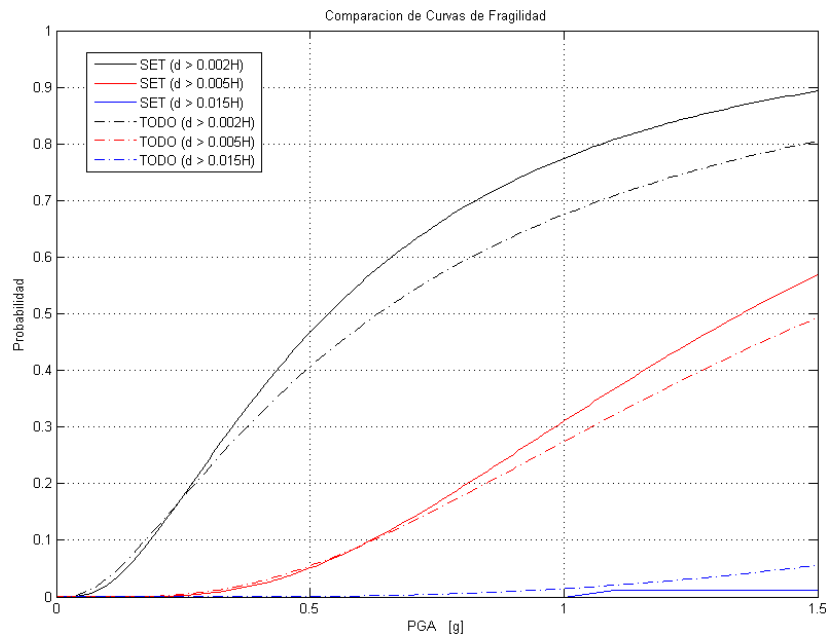
Por otro lado, para este trabajo no se consideró en el análisis los terremotos de tipo superficial debido a los pocos registros que se recopilaron, si bien, se incorporaron en la base de datos y en los gráficos, no se realizaron conclusiones con estos, ya que es imposible concluir para tan pocos datos. Por ello, se espera que para un trabajo futuro se puedan considerar los terremotos superficiales al tener más información de estos.

La siguiente etapa del trabajo de título correspondió al escalamiento de registros, lo que resulta ser una transición entre los dos objetivos definidos en un principio. Ya que las curvas de fragilidad se generan a partir del método de Análisis Dinámico Incremental (IDA) el cual se define básicamente como el escalamiento de un registro de aceleraciones de manera de crear múltiples terremotos en un rango de un parámetro sísmico y analizar el modelo estructural para cada uno de esos niveles o rango. Por otro lado, el Catálogo fue fundamental para escalar todos los registros contando con la información pertinente. Al escalar todos los registros para un rango entre 0.1g y 1.0g de

PGA y graficar el Potencial Destructivo en función del PGA, se obtuvo la siguiente conclusión principal:

- Al realizar una comparación gráfica que relaciona el Potencial Destructivo y PGA para registros escalados y registros no-escalados, se debió observar por tramos de PGA. Para bajos PGA originales que son escalados, se tiene un gráfico con una gruesa banda de datos, esto se debe a que en la zona de bajos PGA existe una gran dispersión de los datos lo que hace que al amplificar los registros la banda de valores sea grande, mostrando algunos datos alejados de la tendencia original. Al ir viendo los gráficos para rangos de mayor PGA original, los valores de registros escalados se ajustan mejor a la tendencia original. Esto lleva a definir un rango de PGA original que al ser escalados se encuadran en la tendencia original. De esta manera, se deduce que el escalamiento de registros tiene sentido para valores de PGA original por sobre 0.30g. Es decir, que para registros con PGA menor que 0.30g aumenta la probabilidad de que los valores escalados no sean representativos de registros para altos valores de PGA. Este resultado es importante ya que limita escalar ciertos registros entendiendo que al escalar registros de bajo PGA, se sobreestima o subestima (según corresponda) la destructividad para PGA mayores.

Posteriormente, se definió un set de terremotos que cumple con el criterio de PGA, mencionado anteriormente, para realizar el Análisis Dinámico Incremental. Este análisis permite obtener la respuesta del oscilador de un grado de libertad, considerado como el modelo estructural simplificado para el primer modo del tipo de edificio habitacional que sufrió daños para el terremoto de Maule de 2010. Se generan las curvas de fragilidad para el set de terremotos y para todos los registros del catálogo, obteniéndose los resultados gráficos en las figuras 47 y 48. Además, se ilustra la comparación entre ambos gráficos en la siguiente figura:



**Figura 49.** Comparación de Curvas de fragilidad.

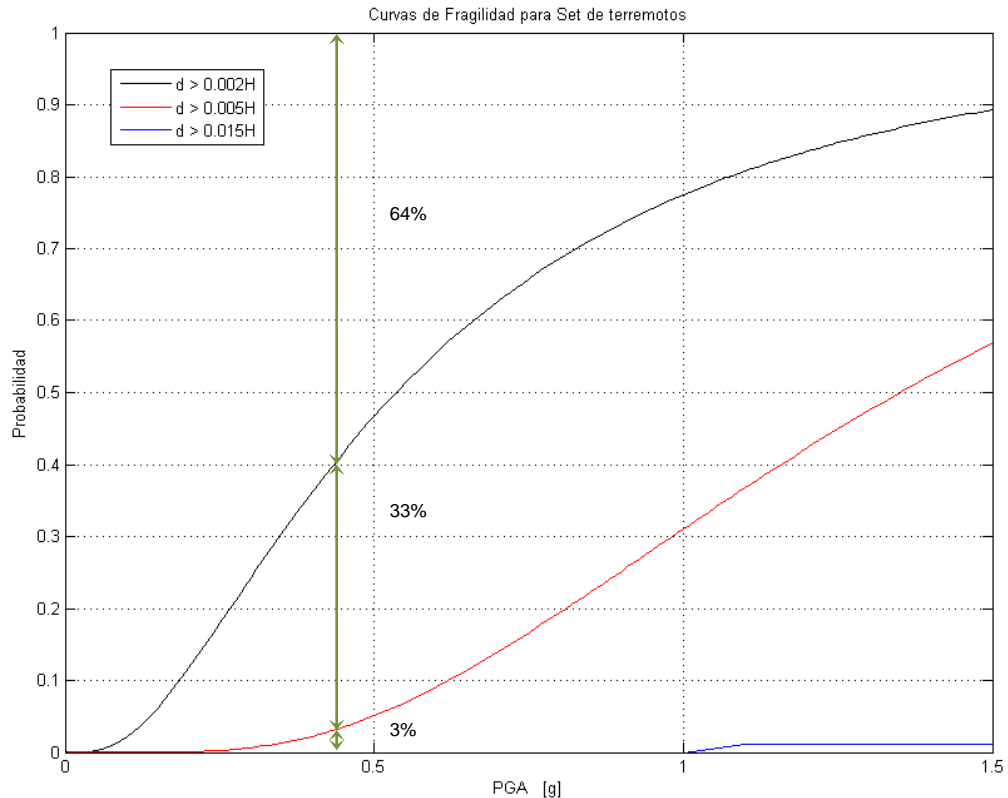
Estos resultados permiten realizar las siguientes conclusiones:

- La figura 49 muestra gráficamente las diferencias entre las curvas obtenidas para el set de terremotos y todo el catálogo. Se observa a simple vista que no existen grandes diferencias hasta aproximadamente un PGA de 1.0g. Sin embargo, al describir en detalle esta diferencia se observa que en ambas curvas obtenidas para el caso límite  $\delta > 0.002H$  (curvas negras), la curva generada por el set de registros está por sobre la curva generada por todo el catálogo. Se presenta esta misma situación para la zona intermedia de curvas para el caso límite  $\delta > 0.05H$  (curvas rojas), siendo las diferencias menos notorias. Por otro lado, en las curvas obtenidas para el caso límite  $\delta > 0.015H$  (curvas azules), la curva generada por el set de registros está bajo la generada por todo el catálogo.

Esto permite concluir que al generar las curvas con todo el catálogo, se subestima el caso para no-daño a medida que se aumenta el PGA. Por otro lado, se sobreestima el caso para daño severo. Esto se deduce considerando que los registros de bajo PGA original presentan una gran dispersión dentro de la distribución del gráfico Potencial Destructivo y PGA, como ya se ha mencionado, lo que significa que al escalarlos se obtienen valores altos de Potencial Destructivo por sobre la tendencia real. Por otro lado, existen otros registros de bajo PGA que al escalarlos generan valores de más bajo Potencial Destructivo que la tendencia real. Por ello, se tienen registros escalados que sobreestiman la energía del terremoto y otros que la subestiman. Esto se ve reflejado en el comportamiento de la estructura, en cuanto a la respuesta y daño, lo que se relaciona directamente con la destructividad del terremoto.

Por ello, se considera que el análisis dinámico incremental se debe realizar con un set de terremotos particulares y no considerar cualquier registro que se tenga, ya que el escalamiento de estos presenta mejores resultados en la medida que se considera que los registros escalados se ajusten a la tendencia real del catálogo.

Al considerar las curvas generadas por el set de terremotos se tiene la siguiente la figura ya presentada, pero que incorpora elementos que permiten realizar los siguientes comentarios y conclusiones:



**Figura 50.** Estados de daño para PGA = 0.4g.

- La figura 50 grafica e identifica los porcentajes que representan el estado de daño para el tipo de estructura considerado en el modelo. Vale decir, para los edificios típicos chilenos de tipo habitacional de 19 pisos y 2 subterráneos. Al considerar un PGA de 0.4g, que fue lo que se tuvo aproximadamente en Santiago, del gráfico se desprende lo siguiente:

Un 64% del conjunto de este tipo de edificios no debió haber experimentado mayores daños, sino más bien daños despreciables, donde todo el contenido y servicios del edificio permanecieron funcionales.

Un 33% del conjunto debió haber experimentado daño ligero. Es decir, el daño fue limitado y no comprometió la seguridad de la edificación. Sin embargo, se requieren reparaciones.

Un 3% debió haber experimentado daño moderado en elementos estructurales, no estructurales y en el contenido de la estructura. Existiendo degradación de la rigidez y la capacidad resistente del sistema. Se debieron realizar reparaciones importantes.

Finalmente, es posible realizar el mismo análisis para cualquier PGA que se requiera.

## REFERENCIAS

ARAYA, R. y SARAGONI, G. R. 1984. Earthquake accelerogram destructiveness potential factor. EERI. Proceedings of the 8th World Conference of Earthquake Engineering. San Francisco, USA. pp. 835 – 842.

ARIAS, A. 1970. A measure of earthquake intensity. HANSEN, R. (Editor). Seismic Design for Nuclear Power Plant. Cambridge, MA, The M.I.T. Press. pp. 438 – 483.

BENITO, B. y CABAÑAS, L. 1997. An approach to the measurement of the Potential Structural Damage of Earthquake Ground Motions. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol. 26. pp. 79 – 92.

BENITO, B. y CABAÑAS, L. 1999. Caracterización del Movimiento del Suelo en Ingeniería Sísmica. Física de la Tierra. Cap. 11. pp. 49 – 79.

BENITO, B. y JIMÉNEZ, M. E. 2005. Peligrosidad Sísmica. E.U.I.T. de Topografía (UPM).

CARDEMIL, S. 2011. Vulnerabilidad sísmica de edificios habitacionales de hormigón armado dañados en el sismo del 27 de febrero de 2010 en la Región Metropolitana. Memoria de Ingeniero Civil. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas

CENTRO SISMOLÓGICO NACIONAL. Universidad de Chile. Sismos Importantes y/o Destructivos (1570 a la fecha). [En línea]. <<http://www.sismologia.cl/>>.

DROGUETT, A. 2008. Análisis comparativo de vulnerabilidad y costo entre edificios de marcos y muros con una misma superficie en planta. Memoria de Ingeniero Civil. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

ELNASHAI, A. S. y DI SARNO, L. 2008. Fundamentals of Earthquake Engineering.

EPRI. 1991. Standardization of the cumulative absolute velocity. EPRI T R-100082 (Tier 2). Electrical Power Research Inst., Palo Alto, USA.

GUENDELMAN, T., GUENDELMAN, M., LINDENBERG, J., LEYTON, F. y A. EISENBERG. 1997. “Desempeño Sísmico Implícito de Edificios Diseñados con la Norma Sísmica Chilena”, VII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, La Serena.



GUTSCHER, M. 2002. Andean subduction styles and their effect on thermal structure and interplate coupling. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. 15, Issue 1. pp. 3 – 10.

HOUSNER, G. W. 1952. Intensity of ground motions during strong earthquakes. Earthquake Research Laboratory. California Institute Of Technology. California, USA.

INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL DE LA REPÚBLICA ARGENTINA. El Terremoto de Chile y sus Consecuencias Geodésicas en Argentina. 2010. [En línea]. <<http://www.ign.gov.ar/AreaServicios/Publicaciones/TerremotoChile>>.

INTERNATIONAL SEISMOLOGICAL CENTRE. ISC Bulletin. [En línea]. <<http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/>>.

KARIM, K. y YAMAZAKI, F. 2001. Correlation of JMA instrumental seismic intensity with strong motion parameters. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 31. pp. 1191 – 1212.

KHAZARADZE, G. y KLOTZ, J. 2003. Short - and long - term effects of GPS measured crustal deformation rates along the south central Andes. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 108.N° B6. pp. 2289 – 2306.

KIOUS, W. J. y TILLING, R. 1996. This Dynamic Earth: The Story of Plate Tectonics. U.S. Geological Survey. Washington, D.C., USA. [En línea]. <<http://pubs.usgs.gov/publications/text/slabs.html>>.

LEYTON, F., RUIZ, S. y SEPÚLVEDA, S. 2010. Reevaluación del Peligro Sísmico Probabilístico en Chile Central. *Andean Geology*, 37 (2). pp. 455 – 472.

LIA Montessus de Ballore (CNRS-INSU and Univ. de Chile) and IPGP tectonics lab (R. Lacassin).

MADARIAGA, R. 1998. Sismicidad de Chile. *Física de la Tierra*. N°10. pp. 221 – 258.

MOSTAGHEL, N. 1999. Analytical Description of pinching, degrading hysteretic systems. *Journal of Engineering Mechanics*. Vol. 125. No.2

NIGAM, N. y JENNINGS, P. 1969. Calculation of Response Spectra from strong-motion earthquake records. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 59.No. 2. pp. 909 – 922.

OROSCO, L. y ALFARO, I. 2007. Potencial Destructivo de Sismos.

PAZ, M. 1996. Dinámica Estructural: Teoría y Cálculo.

POBLETE, J. 2008. Determinación experimental de la Intensidad de Mercalli Modificada para Chile. Memoria de Ingeniero Civil. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

SEAOC.1995. Vision 2000: Performance Based Seismic Engineering of Buildings, San Francisco.

SARAGONI, G. R., HOLMBERG, A y SÁEZ, A. 1989. Potencial destructivo y destructividad del terremoto de Chile de 1985. 5as Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Estructural. Santiago, Chile. vol.1, pp. 369-378.

SILVA, N. 2011. Vulnerabilidad sísmica estructural en viviendas sociales y evaluación preliminar de riesgo sísmico en la región metropolitana. Tesis para optar al grado de magister en ciencias mención Geofísica. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

TRIFUNAC, M. D. y BRADY, A. G. 1975. On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. BSSA, Vol. 65, pp. 139-162

VAMVATSIKOS, D. y CORNELL, C. A. 2002. Incremental Dynamic Analysis. Earthquake Engineering Struct. Dyn.

## ANEXOS

### A.1. BASES DE DATOS

A continuación se anexa en tablas las bases de datos que permitieron elaborar el catálogo descrito en el presente trabajo de título:

**- Estaciones**

ESTACION	REGIÓN	LATITUD	LONGITUD	CANAL1	CANAL2	CANAL3	TIPO SUELO
PUTRE	XV	-18.1949	-69.5592	L	V	T	ROCA DURA
ARICA CHACALLUTA	XV	-18.3148	-70.3141	EW	NS	V	ROCA DURA
POCONCHILE ETNA	XV	-18.4525	-70.0667	EW	NS	V	ROCA DURA
POCONCHILE SMA-1	XV	-18.4525	-70.0667	L	V	T	ROCA DURA
ARICA COSTANERA	XV	-18.4707	-70.3130	L	V	T	ROCA DURA
ARICA CEMENTERIO	XV	-18.4786	-70.3078	L	V	T	ROCA DURA
ARICA	XV	-18.4824	-70.3134	NS	V	EW	ROCA DURA
ARICA CERRO LA CRUZ	XV	-18.4909	-70.3114	EW	NS	V	ROCA DURA
CUYA	XV	-19.1599	-70.1802	L	V	T	SUELO DURO
PISAGUA ETNA	I	-19.5951	-70.2107	EW	NS	V	ROCA DURA
PISAGUA SMA-1	I	-19.5951	-70.2107	L	V	T	ROCA DURA
HUARA	I	-19.9958	-69.7669	L	V	T	ROCA DURA
FUERTE BAQUEDANO	I	-20.1349	-69.7549	T	L	V	ROCA DURA
PB08	I	-20.1411	-69.1534	HLE	HLN	HLZ	ROCA DURA
IQUIQUE PLAZA	I	-20.2132	-70.1493	L	V	T	SUELO DURO
IQUIQUE	I	-20.2141	-70.1377	EW	NS	V	SUELO DURO
IQUIQUE IDIEM	I	-20.2204	-70.1424	L	V	T	SUELO DURO
IQUIQUE ESCUELA CHIPANA	I	-20.2516	-70.1261	EW	NS	V	SUELO DURO
ALTO HOSPICIO	I	-20.2651	-70.1006	T	L	V	ROCA DURA
PICA	I	-20.4921	-69.3302	EW	NS	V	ROCA DURA
PUERTO PATACHE	I	-20.8100	-70.2000	EW	NS	V	SUELO DURO
PB01	I	-21.0432	-69.4874	HLE	HLN	HLZ	ROCA DURA
PB02	I	-21.3197	-69.8960	HLE	HLN	HLZ	ROCA DURA
EL LOA	I	-21.4245	-70.0568	L	V	T	ROCA DURA
PB07	II	-21.7266	-69.8861	HLE	HLN	HLZ	ROCA DURA
PB03	II	-22.0484	-69.7531	HLE	HLN	HLZ	ROCA DURA
TOCOPILLA	II	-22.0902	-70.2013	L	V	T	ROCA DURA
TOCOPILLA PUERTO	II	-22.0941	-70.2092	EW	NS	V	ROCA DURA
PB04	II	-22.3336	-70.1491	HLE	HLN	HLZ	ROCA DURA
CALAMA	II	-22.4587	-68.9302	EW	NS	V	ROCA DURA
PB06	II	-22.7058	-69.5718	HLE	HLN	HLZ	ROCA DURA
MICHILLA	II	-22.7575	-70.2810	EW	NS	V	ROCA DURA

PB05	II	-22.8528	-70.2023	HLE	HLN	HLZ	ROCA DURA
SAN PEDRO DE ATACAMA	II	-22.9105	-68.2001	EW	NS	V	ROCA DURA
MEJILLONES PUERTO	II	-23.0776	-70.3845	EW	NS	V	SUELO DURO
MEJILLONES CENTRAL	II	-23.0800	-70.4100	EW	NS	V	SUELO DURO
MEJILLONES	II	-23.1000	-70.4500	EW	NS	V	SUELO DURO
ANTOFAGASTA UCN	II	-23.6810	-70.4111	EW	NS	V	ROCA DURA
COPIAPO	III	-27.3737	-70.3216	T	L	V	ROCA DURA
VALLENAR	III	-28.5766	-70.7552	T	L	V	ROCA DURA
LA SERENA	IV	-29.9080	-71.2454	L	V	T	SUELO DURO
PUENTE AMOLANAS	IV	-31.1982	-71.6106	NS	V	EW	SUELO DURO
ILLAPEL	IV	-31.6300	-71.1700	L	V	T	SUELO DURO
LOS VILOS 85	IV	-31.9200	-71.5000	EW	NS	V	ROCA DURA
LOS MOLLES	V	-32.2319	-71.5069	X	Y	Z	SUELO DURO
CABILDO	V	-32.4269	-71.0688	L	T	V	SUELO DURO
LA LIGUA	V	-32.5000	-71.2300	N70W	S20W	V	SUELO DURO
PAPUDO	V	-32.5200	-71.4500	L	V	T	SUELO DURO
ZAPALLAR	V	-32.5700	-71.4700	EW	NS	V	SUELO DURO
VENTANAS	V	-32.7300	-71.6200	EW	NS	V	SUELO DURO
SAN FELIPE	V	-32.7500	-70.7300	N80E	S10E	V	SUELO DURO
LLAYLLAY	V	-32.8300	-70.9700	N26W	S10W	V	SUELO DURO
EL ROBLE	RM	-32.9759	-71.0156	HLE	HLN	HLZ	ROCA DURA
OLMUE	V	-32.9939	-71.1729	X	Y	Z	SUELO DURO
VINA DEL MAR CENTRO	V	-33.0249	-71.5529	T	L	V	SUELO DURO
VALPARAISO ALMENDRAL	V	-33.0300	-71.6200	L	V	T	SUELO DURO
VALPARAISO UTFSM	V	-33.0300	-71.6200	L	V	T	ROCA DURA
VINA DEL MAR EL SALTO CERRO QDR	V	-33.0472	-71.5099	T	L	V	SUELO DURO
VINA DEL MAR EL SALTO	V	-33.0472	-71.5099	NS	V	EW	SUELO DURO
VINA DEL MAR EL SALTO CERRO ETNA	V	-33.0472	-71.5099	NS	V	EW	SUELO DURO
LAS TORTOLAS	RM	-33.1000	-70.7500	N10E	N64E	V	ROCA DURA
QUINTAY	V	-33.1700	-71.7000	EW	NS	V	ROCA DURA
CASABLANCA	V	-33.3208	-71.4108	L	V	T	SUELO DURO
SANTIAGO CERRO CALAN	RM	-33.3961	-70.5369	HE	HN	HZ	ROCA DURA
SANTIAGO SANTA LUCIA	RM	-33.4404	-70.6428	NS	V	EW	ROCA DURA
SANTIAGO ENDESA	RM	-33.4500	-70.6700	L	T	V	SUELO DURO
SANTIAGO LAS AMERICAS	RM	-33.4517	-70.5307	EW	NS	V	SUELO DURO
SANTIAGO FCFM	RM	-33.4572	-70.6617	EW	NS	V	SUELO DURO
SANTIAGO CENTRO	RM	-33.4666	-70.6521	L	V	T	SUELO DURO
SANTIAGO PENALOEN	RM	-33.5014	-70.5792	T	L	V	SUELO DURO
SANTIAGO MAIPU	RM	-33.5087	-70.7714	T	L	V	SUELO DURO

SANTIAGO LA FLORIDA	RM	-33.5139	-70.6052	NS	V	EW	SUELO DURO
SANTIAGO ANTUMAPU	RM	-33.5691	-70.6335	HE	HN	HZ	SUELO DURO
SANTIAGO PUENTE ALTO	RM	-33.5780	-70.5810	T	L	V	SUELO DURO
LLOLLEO	V	-33.6200	-71.6000	L	V	T	SUELO DURO
SAN JOSE	RM	-33.6400	-70.3500	EW	NS	V	SUELO DURO
TALAGANTE	RM	-33.6600	-70.9200	T	L	V	SUELO DURO
MELIPILLA	RM	-33.6874	-71.2137	EW	NS	V	SUELO DURO
MATANZAS	VI	-33.9600	-71.8700	L	V	T	SUELO DURO
RAPEL	VI	-34.0200	-71.6700	EW	NS	V	ROCA DURA
PICHILEMU	VI	-34.3800	-72.0200	EW	NS	V	SUELO DURO
SAN FERNANDO	VI	-34.4600	-71.0000	V	EW	NS	SUELO DURO
CONVENTO VIEJO	VI	-34.7676	-71.1156	EW	NS	V	SUELO DURO
ILOCA	VII	-34.9200	-72.2200	EW	NS	V	SUELO DURO
HUALANE 85	VII	-34.9700	-71.8200	NS	V	EW	SUELO DURO
HUALANE	VII	-34.9763	-71.8059	L	V	T	SUELO DURO
CURICO	VII	-34.9905	-71.2367	L	V	T	SUELO DURO
CONSTITUCION 85	VII	-35.3000	-72.3200	EW	NS	V	SUELO DURO
CONSTITUCION	VII	-35.3400	-72.4000	L	V	T	SUELO DURO
TALCA	VII	-35.4300	-71.6300	L	V	T	SUELO DURO
COLBUN	VII	-35.7200	-71.4300	[]	[]	[]	ROCA DURA
CAUQUENES	VII	-36.0000	-72.2200	EW	NS	V	SUELO DURO
CHILLAN	VIII	-36.6000	-72.1000	N10W	N80E	V	SUELO DURO
CONCEPCION	VIII	-36.8283	-73.0482	L	V	T	SUELO DURO
CONCEPCION SAN PEDRO	VIII	-36.8441	-73.1086	EW	NS	V	SUELO DURO
ANGOL	IX	-37.7900	-72.7100	T	L	V	SUELO DURO
VALDIVIA	XIV	-39.8314	-73.2391	T	L	V	SUELO DURO
SAN ISIDRO	[]	NO INFO	NO INFO	L	T	V	SUELO DURO
SANTIAGO DGF	[]	-33.4572	-70.6617	L	T	V	SUELO DURO
LOS VILOS	[]	-31.9200	-71.5000	EW	NS	V	ROCA DURA

**Tabla A-1.1.** Estaciones de Registro.

**- Eventos**

EVENTO	ESTACIÓN	EQUIPO	MUESTREO (Fs)
0604091	ALTO HOSPICIO	673	100
0801221	ALTO HOSPICIO	673	100
0802041	ALTO HOSPICIO	673	100
0803011	ALTO HOSPICIO	673	100
0809101	ALTO HOSPICIO	673	100
0911131	ALTO HOSPICIO	673	100
TOCOPILLA 2007	ALTO HOSPICIO	673	100
MAULE 2010	ANGOL	760	100
TOCOPILLA 2007	ANTOFAGASTA UCN	2803	200
0202261	ARICA	815	200
0510171	ARICA	815	200
0911131	ARICA	815	200
SUR DE PERU 2001	ARICA	815	200

SUR DE PERU 2001	ARICA CEMENTERIO	5015	200
TARAPACA 2005	ARICA CEMENTERIO	5015	200
0202261	ARICA CERRO LA CRUZ	2796	200
0510171	ARICA CERRO LA CRUZ	2796	200
0611201	ARICA CERRO LA CRUZ	2796	200
TARAPACA 2005	ARICA CERRO LA CRUZ	2796	200
0202261	ARICA CHACALLUTA	2797	200
0510171	ARICA CHACALLUTA	2797	200
0611201	ARICA CHACALLUTA	2797	200
SUR DE PERU 2001	ARICA COSTANERA	5004	200
TARAPACA 2005	ARICA COSTANERA	5004	200
MAULE 2010	CABILDO	NO INFO	100
TARAPACA 2005	CALAMA	2804	200
TOCOPILLA 2007	CALAMA	2804	200
MAULE 2010	CASABLANCA	NO INFO	100
8504091	CAUQUENES	SMA-1	200
VALPARAISO 1985	CAUQUENES	SMA-1	200
VALPARAISO 1985	CHILLAN	SMA-1	200
MAULE 2010	COLBUN	NO INFO	100
MAULE 2010	CONCEPCION CENTRO	5003	200
MAULE 2010	CONCEPCION SAN PEDRO	NO INFO	100
8503251	CONSTITUCION	NO INFO	NO INFO
MAULE 2010	CONSTITUCION	4598	200
8504091	CONSTITUCION 85	SMA-1	200
VALPARAISO 1985	CONSTITUCION 85	SMA-1	200
MAULE 2010	CONVENTO VIEJO	NO INFO	100
MAULE 2010	COPIAPO	672	100
TOCOPILLA 2007	COPIAPO	672	100
0408281	CURICO	499	100
1002281	CURICO	499	100
MAULE 2010	CURICO	499	100
0911131	CUYA	4561	200
SUR DE PERU 2001	CUYA	4561	200
TARAPACA 2005	CUYA	4561	200
TARAPACA 2005	EL LOA	4564	200
TOCOPILLA 2007	EL LOA	4564	200
MAULE 2010	EL ROBLE	NO INFO	100
0803241	FUERTE BAQUEDANO	674	100
0809101	FUERTE BAQUEDANO	674	100
TOCOPILLA 2007	FUERTE BAQUEDANO	674	100
MAULE 2010	HUALANE	4564	200
8503032	HUALANE 85	SMA-1	200
VALPARAISO 1985	HUALANE 85	SMA-1	200
0911131	HUARA	6975	200
9710221	ILLAPEL	4565	200
9711031	ILLAPEL	4565	200
PUNITAQUI 1997	ILLAPEL	4565	200
VALPARAISO 1985	ILLAPEL	SMA-1	200
8503032	ILOCA	SMA-1	200
8503041	ILOCA	NO INFO	NO INFO
8503251	ILOCA	NO INFO	NO INFO
8504091	ILOCA	SMA-1	200
VALPARAISO 1985	ILOCA	SMA-1	200
0801221	IQUIQUE	2800	200

0802041	IQUIQUE	2800	200
0803011	IQUIQUE	2800	200
TARAPACA 2005	IQUIQUE	2800	200
TOCOPILLA 2007	IQUIQUE	2800	200
0801221	IQUIQUE ESCUELA CHIPANA	6151	200
0802041	IQUIQUE ESCUELA CHIPANA	6151	200
0803011	IQUIQUE ESCUELA CHIPANA	6151	200
0803241	IQUIQUE ESCUELA CHIPANA	6151	200
0809101	IQUIQUE ESCUELA CHIPANA	6151	200
0911131	IQUIQUE ESCUELA CHIPANA	6151	200
TOCOPILLA 2007	IQUIQUE ESCUELA CHIPANA	6151	200
TARAPACA 2005	IQUIQUE IDIEM	7051	200
TARAPACA 2005	IQUIQUE PLAZA	7050	200
8111111	LA LIGUA	SMA-1	200
VALPARAISO 1985	LA LIGUA	SMA-1	200
0206181	LA SERENA	5016	200
VALPARAISO 1985	LAS TORTOLAS	SMA-1	200
VALPARAISO 1985	LLAYLLAY	SMA-1	200
8503032	LLOLLEO	SMA-1	200
8504091	LLOLLEO	SMA-1	200
9602221	LLOLLEO	4566	200
MAULE 2010	LLOLLEO	4566	200
VALPARAISO 1985	LLOLLEO	SMA-1	200
MAULE 2010	LOS MOLLES	NO INFO	100
MAULE 2010	LOS VILOS	NO INFO	100
VALPARAISO 1985	LOS VILOS 85	SMA-1	200
MAULE 2010	MATANZAS	6736	200
0711152	MEJILLONES	2794	200
0712161	MEJILLONES	2794	200
TARAPACA 2005	MEJILLONES	2794	200
TOCOPILLA 2007	MEJILLONES	2794	200
0712161	MEJILLONES CENTRAL	6154	200
0712161	MEJILLONES PUERTO	6156	200
MAULE 2010	MELADO	NO INFO	100
MAULE 2010	MELIPILLA	NO INFO	100
VALPARAISO 1985	MELIPILLA	SMA-1	200
0712161	MICHILLA	6150	200
MAULE 2010	OLMUE	NO INFO	100
MAULE 2010	PANGUE	NO INFO	100
8111111	PAPUDO	SMA-1	200
9804171	PAPUDO	5014	200
MAULE 2010	PAPUDO	5014	200
PUNITAQUI 1997	PAPUDO	5014	200
VALPARAISO 1985	PAPUDO	SMA-1	200
TOCOPILLA 2007	PB01	MULTIPARAMETRICO	100
0712161	PB02	MULTIPARAMETRICO	100
TOCOPILLA 2007	PB02	MULTIPARAMETRICO	100
0712161	PB03	MULTIPARAMETRICO	100
0712161	PB04	MULTIPARAMETRICO	100
TOCOPILLA 2007	PB04	MULTIPARAMETRICO	100
0712161	PB05	MULTIPARAMETRICO	100
TOCOPILLA 2007	PB05	MULTIPARAMETRICO	100
0712161	PB06	MULTIPARAMETRICO	100
TOCOPILLA 2007	PB06	MULTIPARAMETRICO	100

0712161	PB07	MULTIPARAMETRICO	100
TOCOPILLA 2007	PB07	MULTIPARAMETRICO	100
0712161	PB08	MULTIPARAMETRICO	100
TOCOPILLA 2007	PB08	MULTIPARAMETRICO	100
0503241	PICA	2799	200
0604091	PICA	2799	200
0802041	PICA	2799	200
0803011	PICA	2799	200
0803241	PICA	2799	200
0809101	PICA	2799	200
TARAPACA 2005	PICA	2799	200
TOCOPILLA 2007	PICA	2799	200
MAULE 2010	PICHILEMU	NO INFO	100
VALPARAISO 1985	PICHILEMU	SMA-1	200
0801221	PISAGUA ETNA	2795	200
0807301	PISAGUA ETNA	2795	200
0911131	PISAGUA ETNA	2795	200
TOCOPILLA 2007	PISAGUA ETNA	2795	200
SUR DE PERU 2001	PISAGUA SMA-1	4573	200
TARAPACA 2005	PISAGUA SMA-1	4573	200
0510171	POCONCHILE ETNA	2798	200
0611201	POCONCHILE ETNA	2798	200
TARAPACA 2005	POCONCHILE ETNA	2798	200
TOCOPILLA 2007	POCONCHILE ETNA	2798	200
SUR DE PERU 2001	POCONCHILE SMA-1	6975	200
0206181	PUENTE AMOLANAS	1784	200
0610121	PUENTE AMOLANAS	1784	200
0809101	PUERTO PATACHE	40021	200
TOCOPILLA 2007	PUERTO PATACHE	40021	200
SUR DE PERU 2001	PUTRE	7098	200
TARAPACA 2005	PUTRE	7098	200
8504091	QUINTAY	SMA-1	200
VALPARAISO 1985	QUINTAY	SMA-1	200
8504091	RAPEL	SMA-1	200
MAULE 2010	RAPEL	NO INFO	100
VALPARAISO 1985	RAPEL	SMA-1	200
VALPARAISO 1985	SAN FELIPE	SMA-1	200
8503032	SAN FERNANDO	SMA-1	200
8503041	SAN FERNANDO	NO INFO	NO INFO
8504091	SAN FERNANDO	SMA-1	200
VALPARAISO 1985	SAN FERNANDO	SMA-1	200
VALPARAISO 1985	SAN ISIDRO	SMA-1	200
MAULE 2010	SAN JOSE	NO INFO	100
TOCOPILLA 2007	SAN PEDRO DE ATACAMA	6153	200
MAULE 2010	SANTIAGO ANTUMAPU	NO INFO	50
9602221	SANTIAGO CENTRO	935	200
MAULE 2010	SANTIAGO CENTRO	935	200
PUNITAQUI 1997	SANTIAGO CENTRO	935	200
MAULE 2010	SANTIAGO CERRO CALAN	NO INFO	50
8504091	SANTIAGO DGF	SMA-1	200
8503032	SANTIAGO ENDESA	SMA-1	200
8504091	SANTIAGO ENDESA	SMA-1	200
VALPARAISO 1985	SANTIAGO ENDESA	SMA-1	200
MAULE 2010	SANTIAGO FCFM	NO INFO	200



MAULE 2010	SANTIAGO FSR	NO INFO	50
9908011	SANTIAGO LA FLORIDA	958	200
MAULE 2010	SANTIAGO LA FLORIDA	958	200
MAULE 2010	SANTIAGO LAS AMERICAS	NO INFO	100
MAULE 2010	SANTIAGO MAIPU	663	100
MAULE 2010	SANTIAGO PENALOEN	670	100
MAULE 2010	SANTIAGO PUENTE ALTO	671	100
MAULE 2010	SANTIAGO SANTA LUCIA	NO INFO	100
MAULE 2010	TALCA	4568	200
VALPARAISO 1985	TALCA	SMA-1	200
TOCOPILLA 2007	TOCOPILLA	6736	200
0712161	TOCOPILLA PUERTO	6152	200
TOCOPILLA 2007	TOCOPILLA PUERTO	6152	200
MAULE 2010	VALDIVIA	761	100
0905251	VALLENAR	501	100
0912221	VALLENAR	501	100
MAULE 2010	VALLENAR	NO INFO	100
0712151	VALPARAISO ALMENDRAL	4567	200
MAULE 2010	VALPARAISO ALMENDRAL	4567	200
VALPARAISO 1985	VALPARAISO ALMENDRAL	SMA-1	200
8503032	VALPARAISO UTFSM	SMA-1	200
MAULE 2010	VALPARAISO UTFSM	6976	200
VALPARAISO 1985	VALPARAISO UTFSM	SMA-1	200
8504091	VENTANAS	SMA-1	200
VALPARAISO 1985	VENTANAS	SMA-1	200
0712151	VINA DEL MAR CENTRO	675	100
8503032	VINA DEL MAR CENTRO	SMA-1	200
MAULE 2010	VINA DEL MAR CENTRO	675	100
VALPARAISO 1985	VINA DEL MAR CENTRO	SMA-1	200
0602101	VINA DEL MAR EL SALTO	1215	200
0606191	VINA DEL MAR EL SALTO	1215	200
0712151	VINA DEL MAR EL SALTO	1215	200
1002272	VINA DEL MAR EL SALTO	1215	200
MAULE 2010	VINA DEL MAR EL SALTO	1215	200
0107242	VINA DEL MAR EL SALTO CERRO ETNA	1215	200
0307091	VINA DEL MAR EL SALTO CERRO ETNA	1215	200
0602101	VINA DEL MAR EL SALTO CERRO QDR	754	100
0606191	VINA DEL MAR EL SALTO CERRO QDR	754	100
MAULE 2010	ZAPALLAR	NO INFO	100
VALPARAISO 1985	ZAPALLAR	SMA-1	200

**Tabla A-1.2.** Eventos.

**- Equipos**

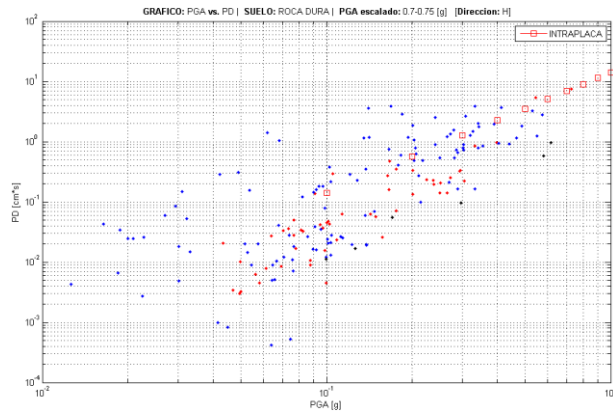
NÚMERO SERIE	MODELO	POLARIDAD
4560	SMA-1	INVERTIDA
4561	SMA-1	INVERTIDA
4564	SMA-1	INVERTIDA
4565	SMA-1	INVERTIDA
4566	SMA-1	INVERTIDA
4567	SMA-1	INVERTIDA
4568	SMA-1	INVERTIDA
4573	SMA-1	INVERTIDA

4598	SMA-1	INVERTIDA
5003	SMA-1	INVERTIDA
5004	SMA-1	INVERTIDA
5014	SMA-1	INVERTIDA
5015	SMA-1	INVERTIDA
5016	SMA-1	INVERTIDA
6736	SMA-1	INVERTIDA
6975	SMA-1	INVERTIDA
6976	SMA-1	INVERTIDA
7050	SMA-1	INVERTIDA
7051	SMA-1	INVERTIDA
7098	SMA-1	INVERTIDA
499	QDR	INVERTIDA
501	QDR	NORMAL
663	QDR	NORMAL
670	QDR	NORMAL
671	QDR	NORMAL
672	QDR	NORMAL
673	QDR	NORMAL
674	QDR	NORMAL
675	QDR	NORMAL
754	QDR	NORMAL
760	QDR	NORMAL
761	QDR	NORMAL
815	ETNA	INVERTIDA
935	SSA-2	INVERTIDA
958	K2	INVERTIDA
1215	ETNA	INVERTIDA
1784	K2	NORMAL
2794	ETNA EPISENSOR	NORMAL
2795	ETNA EPISENSOR	NORMAL
2796	ETNA EPISENSOR	NORMAL
2797	ETNA EPISENSOR	NORMAL
2798	ETNA EPISENSOR	NORMAL
2799	ETNA EPISENSOR	NORMAL
2800	ETNA EPISENSOR	NORMAL
2803	ETNA EPISENSOR	NORMAL
2804	ETNA EPISENSOR	NORMAL
6150	ETNA EPISENSOR	NORMAL
6151	ETNA EPISENSOR	NORMAL
6152	ETNA EPISENSOR	NORMAL
6153	ETNA EPISENSOR	NORMAL
6154	ETNA EPISENSOR	NORMAL
6156	ETNA EPISENSOR	NORMAL
40021	CUSP 3A	NORMAL

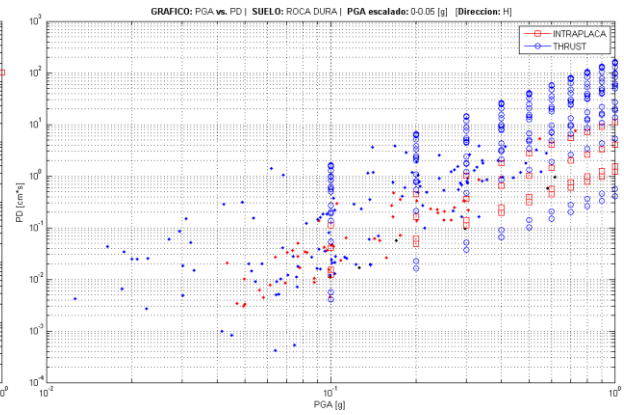
**Tabla A-1-.3. Equipos.**

## A.2. POTENCIAL DESTRUCTIVO DE REGISTROS ESCALADOS EN ROCA DURA

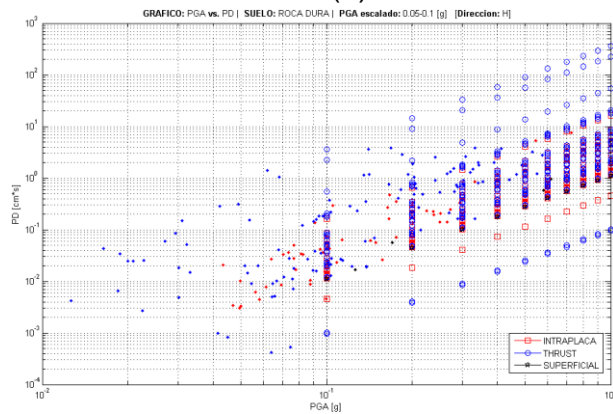
A continuación se presentan los gráficos de Potencial Destructivo de los registros escalados en Roca Dura:



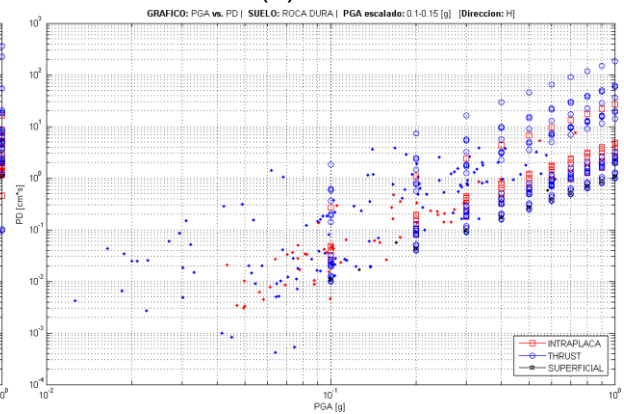
(a)



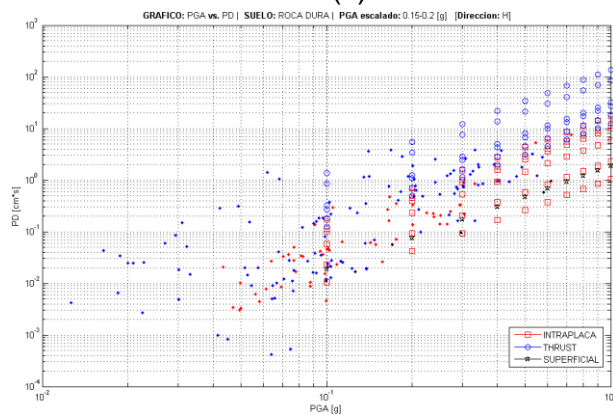
(b)



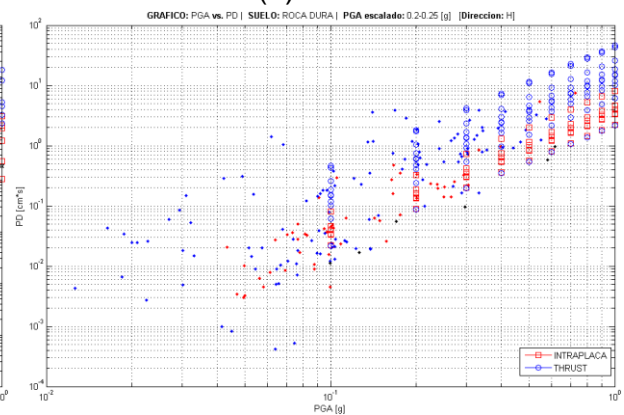
(c)



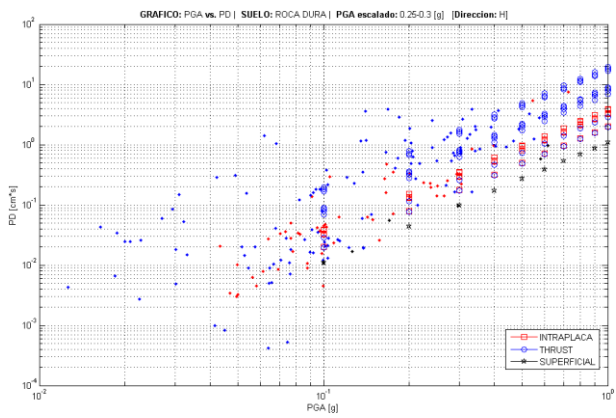
(d)



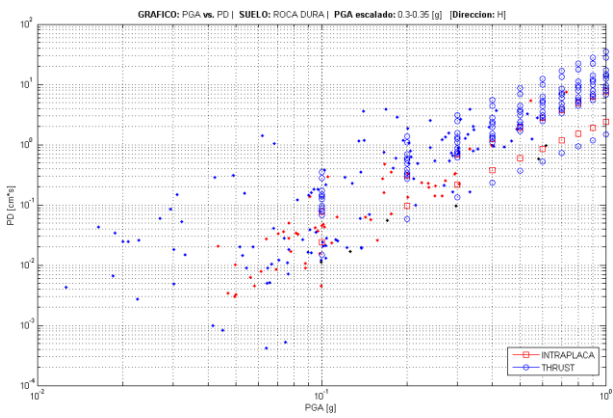
(e)



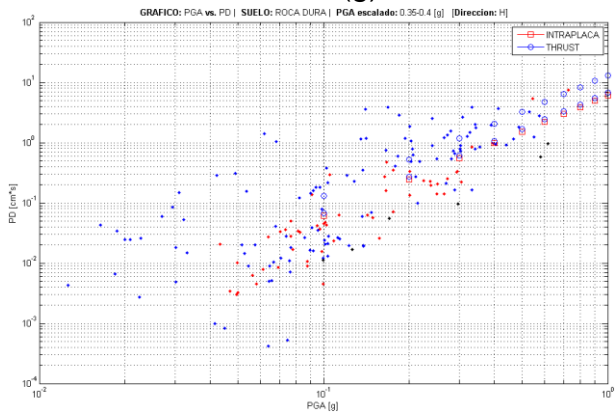
(f)



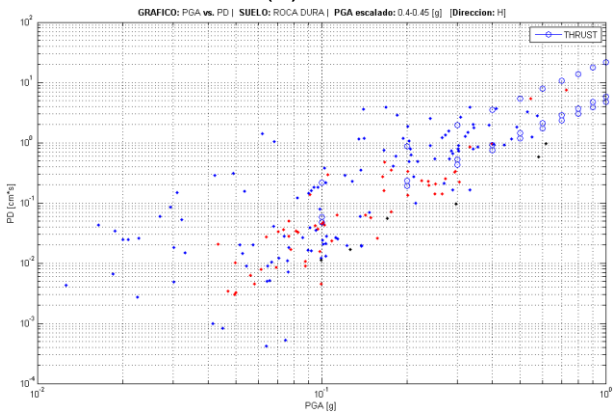
(g)



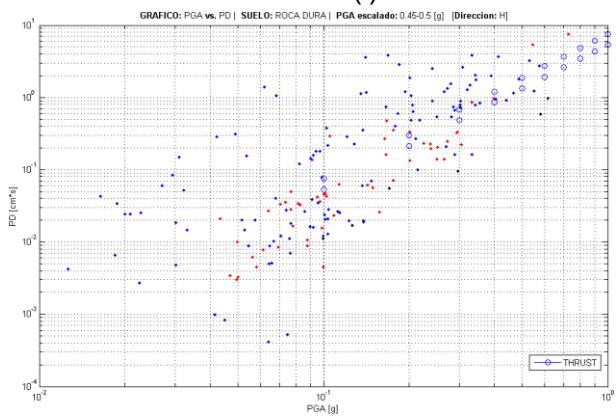
(h)



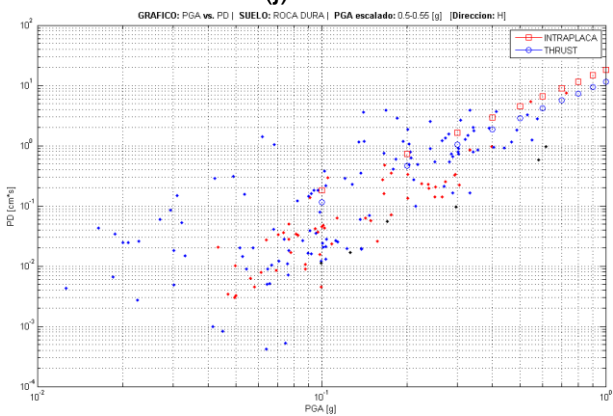
(i)



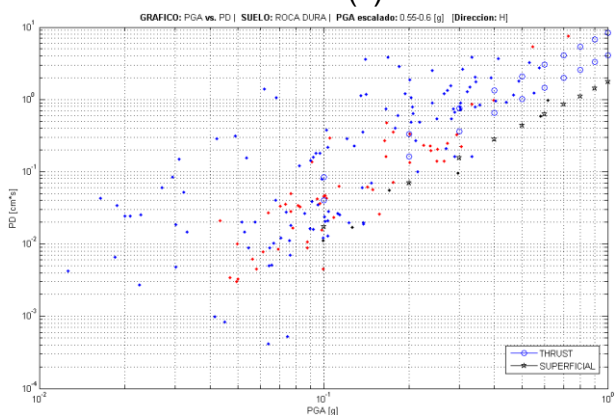
(j)



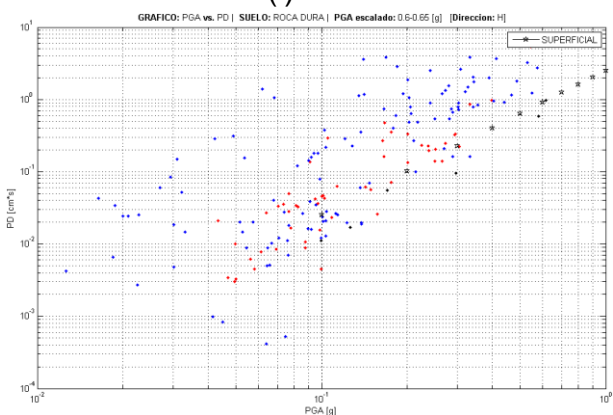
(k)



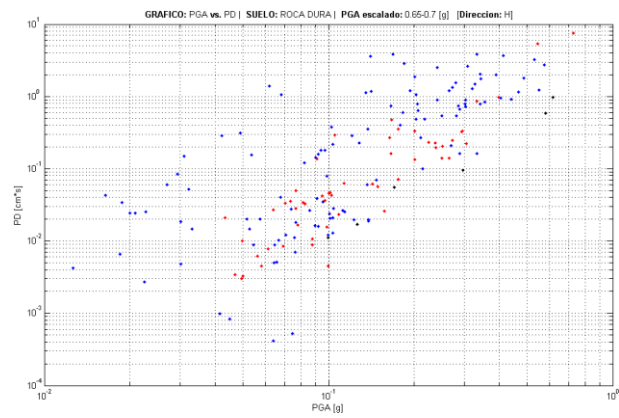
(l)



(m)



(n)



(ñ)

**Figura 51.** Potencial Destructivo de registros escalados para Roca Dura

### A.3. FUNCIONES

A continuación se presentan las funciones principales de Matlab usadas en el presente trabajo de título:

#### - Intensidad de Arias

```
% INTENSIDAD DE ARIAS
% IA=IArias(reg,Fs)
%
% INPUT
% reg: Registro de Aceleraciones [g]
% Fs: Frecuencia de Muestreo [Hz]
%
% OUTPUT
% IA: Intensidad de Arias [cm/s]

function IA=IArias(reg,Fs)
dt=1/Fs;
n=length(reg);
g=981; % Aceleracion de Gravedad en [cm/s2]
reg=reg*g;

suma=0;
for i=2:n-1
    suma=suma+reg(i)^2;
end
IA=pi/(2*g)*(dt/2*(reg(1)^2+2*suma+reg(n)^2));
end
```

#### - Intensidad Espectral de Housner

```
% INTENSIDAD ESPECTRAL DE HOUSNER
% IH=IHousner(reg,Fs,b,DTn)
%
% INPUT
% reg: Registro de Aceleraciones [g]
% Fs: Frecuencia de Muestreo [Hz]
% b: Constante de Amortiguamiento
% Por Definición b=20%
% DTn: Incremento de Períodos [s]
%
% OUTPUT
% IH: Intensidad Espectral de Housner [cm]

function IH=IHousner(reg,Fs,b,DTn)
Tmax=2.5; Tmin=0.1;
[~,Sv,~]=Espectro(reg,Fs,b,DTn,Tmax,Tmin);
n=length(Sv);

suma=0;
for i=2:n-1
```

```

        suma=suma+Sv(i);
end
IH=DTn/2*(Sv(1)+2*suma+Sv(n));
end

```

## - Intensidad de la Agencia Meteorológica de Japón (JMA)

```

% INTENSIDAD AGENCIA METEOROLOGICA DE JAPON (JMA)
% JMA=IJMA(ew,ns,ve,Fs)
%
% INPUT
% ew:   Componente de Registro [g]
% ns:   Componente de Registro [g]
% ve:   Componente de Registro [g]
% Fs:   Frecuencia de Muestreo [Hz]
%
% OUTPUT
% JMA:  Intensidad Agencia Meteorologica de Japon

function JMA=IJMA(ew,ns,ve,Fs)
% Transformada de Fourier
ewTF=(fft(ew*981)); nsTF=(fft(ns*981)); veTF=(fft(ve*981));

% Filtros
dt=1/Fs; n=length(ew); df=Fs/n;
f=(0.0001:df:(n)*df)';

fc=10; fo=0.5; % Frecuencias de Corte
F1=sqrt(1./f);
x=sqrt(f/fc);
F2=1./sqrt(1+0.694*x.^2+0.241*x.^4+0.0557*x.^6+0.009664*x.^8+0.00134*x.^10+0.00155*x.^12);
F3=sqrt(1-exp((-f/fo).^3));

F=F1.*F2.*F3;

% Invertida de Transformada
ewITF=real(ifft(F.*ewTF)); nsITF=real(ifft(F.*nsTF));
veITF=real(ifft(F.*veTF));

% Suma de aceleraciones
a=sqrt(ewITF.^2+nsITF.^2+veITF.^2);

% Registro pequeno
if max(a)<1
    JMA=0;
else

% Funcion tau
ap=linspace(0,floor(max(a)+1),length(a)); k=0; l=0;

for j=1:length(ap)
    for i=1:length(a)
        if a(i)>ap(j)
            k=k+1;
        end
    end
end

```

```

    end
    tau(j)=k*dt;
    if tau(j)<0.3 && l~=1;
        l=1;
        ao=ap(j);
    end
end
k=0;
end
JMA=2*log10(ao)+0.94;
end

end

```

## - Velocidad Absoluta Acumulada (CAV)

```

% VELOCIDAD ABSOLUTA ACUMULADA (CAV)
% VAA=CAV(reg,Fs,au)
%
% INPUT
% reg: Registro de Aceleraciones [g]
% Fs: Frecuencia de Muestreo [Hz]
% au: Aceleración umbral [cm/s2]
% Por Definicion au=0.025g (24.5 [cm/s2])
%
% OUTPUT
% VAA: Velocidad Absoluta Acumulada [cm/s]

function VAA=CAV(reg,Fs,au)
dt=1/Fs;
n=length(reg);
m=floor(n/Fs);
VAA=0;

g=981; % Aceleracion de Gravedad en [cm/s2]
reg=reg*g;

for i=1:m
    ventana=abs(reg(Fs*(i-1)+1:F*s*i)); % Ventana de 1 segundo
    maxV=max(ventana);
    if maxV>=au
        VAA=sum(ventana)*dt+VAA; % Sumatoria de ventanas sobre umbral
    end
end
end
end

```

## - Intensidad de Cruces por cero

```

% INTENSIDAD DE CRUCES POR CERO
% No=CrucesPorCero(reg,Fs,ti,tf)
%
% INPUT
% reg: Registro de Aceleraciones [g]
% Fs: Frecuencia de Muestreo [Hz]
% ti: Tiempo Inicial [s]
% tf: Tiempo Final [s]
%

```



```

% OUTPUT
% No:   Intensidad de Cruces por Cero [1/s]

function No=CrucesPorCero(reg,Fs,ti,tf)
n=length(reg);
t=linspace(0,1/Fs*n,n)';

tc1=0; tc2=0;
for j=1:length(t)
    if t(j)>=ti && tc1~=1
        ki=j; tc1=1;
    end
    if t(j)>=tf && tc2~=1
        kf=j; tc2=1;
    end
end

nu=0;
for i=ki:kf-1
    if reg(i)*reg(i+1)<0
        nu=nu+1;
    end
end
No=nu/(t(kf-1)-t(ki));
end

```

## - Potencial Destructivo

```

% POTENCIAL DESTRUCTIVO
% PD=PDestructivo(reg,Fs,ti,tf)
%
% INPUT
% reg:  Registro de Aceleraciones [g]
% Fs:   Frecuencia de Muestreo [Hz]
% ti:   Tiempo Inicial [s]
% tf:   Tiempo Final [s]
%
% OUTPUT
% PD:   Potencial Destructivo [cm*s]

function PD=PDestructivo(reg,Fs,ti,tf)
nu=CrucesPorCero(reg,Fs,ti,tf);
IA=IArias(reg,Fs);
PD=IA/nu^2;
end

```

## - Espectro de Respuesta

```

% ESPECTROS DE RESPUESTA
% [Sa,Sv,Sd]=Espectro(reg,Fs,b,DTn,Tmax,Tmin)
%
% INPUT
% reg:  Registro de Aceleraciones [g]
% Fs:   Frecuencia de Muestreo [Hz]

```

```

% b:      Constante de Amortiguamiento
% DTn:    Incremento de Períodos [s]
% Tmax:   Período Máximo [s]
% Tmin:   Período Mínimo [s]
%
% OUTPUT
% Sa:     Espectro de respuesta de Aceleraciones [g]
% Sv:     Espectro de respuesta de Velocidades [cm/s]
% Sd:     Espectro de respuesta de Desplazamientos [cm]

function [Sa,Sv,Sd]=Espectro(reg,Fs,b,DTn,Tmax,Tmin)
% Generación de vector T, Períodos
T=linspace(Tmin,Tmax,(Tmax-Tmin)/DTn);

g=981; % Aceleracion de Gravedad en [cm/s2]
Sd=zeros(1,length(T)); Sv=Sd; Sa=Sd;

for i=1:length(T)
    Tn=T(i);
    [a,v,d]=Respuesta(reg,Fs,b,Tn,0,0);
    Sd(i)=max(abs(d))*g;
    Sv(i)=max(abs(v))*g;
    Sa(i)=max(abs(a));
end
end

```

## - Respuesta de un oscilador de 1-grado de libertad

```

% RESPUESTA DE OSCILADOR DE 1 GRADO DE LIBERTAD
% [aa,v,d]=Respuesta(reg,Fs,b,Tn,d0,v0)
%
% Obs: Se resuelve la ecuación de movimiento:  $a+2*b*w*v+w^2*x=-Ug(t)$ 
% mediante el método de Nigam & Jennings en "Calculation of response
% spectra from strong-motion earthquake records", 1969.
%
% INPUT
% reg:    Registro de Aceleraciones [g]
% Fs:     Frecuencia de Muestreo [Hz]
% b:      Fracción de Amortiguamiento Crítico
% Tn:     Período natural [s]
% d0:     Desplazamiento Inicial
% v0:     Velocidad Inicial
%
% OUTPUT
% aa:     Respuesta de Aceleraciones Absolutas
% v:      Respuesta de Velocidades
% d:      Respuesta de Desplazamientos

function [aa,v,d]=Respuesta(reg,Fs,b,Tn,d0,v0)
w=2*pi/Tn;
dt=1/Fs;

% Componentes de Matrices A y B

all=exp(-b*w*dt)*((b/sqrt(1-b^2))*sin(w*sqrt(1-b^2)*dt)+cos(w*sqrt(1-
b^2)*dt));

```

```

a12=exp(-b*w*dt)/(w*sqrt(1-b^2))*sin(w*sqrt(1-b^2)*dt);

a21=-w/sqrt(1-b^2)*exp(-b*w*dt)*sin(w*sqrt(1-b^2)*dt);

a22=exp(-b*w*dt)*(cos(w*sqrt(1-b^2)*dt)-b/sqrt(1-b^2)*sin(w*sqrt(1-b^2)*dt));

b11=exp(-b*w*dt)*(((2*b^2-1)/(w^2*dt)+b/w)*sin(w*sqrt(1-b^2)*dt)/(w*sqrt(1-
b^2)))+(2*b/(w^3*dt)+1/w^2)*cos(w*sqrt(1-b^2)*dt))-2*b/(w^3*dt);

b12=-exp(-b*w*dt)*(((2*b^2-1)/(w^2*dt)*sin(w*sqrt(1-b^2)*dt)/(w*sqrt(1-
b^2)))+2*b/(w^3*dt)*cos(w*sqrt(1-b^2)*dt))-1/w^2+2*b/(w^3*dt);

b21=exp(-b*w*dt)*(((2*b^2-1)/(w^2*dt)+b/w)*(cos(w*sqrt(1-b^2)*dt)-b/sqrt(1-
b^2)*sin(w*sqrt(1-b^2)*dt))-(2*b/(w^3*dt)+1/w^2)*(w*sqrt(1-b^2)*sin(w*sqrt(1-
b^2)*dt)+b*w*cos(w*sqrt(1-b^2)*dt)))+1/(w^2*dt);

b22=-exp(-b*w*dt)*(((2*b^2-1)/(w^2*dt)*(cos(w*sqrt(1-b^2)*dt)-b/sqrt(1-
b^2)*sin(w*sqrt(1-b^2)*dt))-2*b/(w^3*dt)*(w*sqrt(1-b^2)*sin(w*sqrt(1-
b^2)*dt)+b*w*cos(w*sqrt(1-b^2)*dt)))-1/(w^2*dt);

% Matrices A y B
A=[a11,a12;a21,a22];
B=[b11,b12;b21,b22];

% Inicialización de Vectores
n=length(reg);
d=zeros(n,1);           % Desplazamiento
v=zeros(n,1);           % Velocidad
a=zeros(n,1);           % Aceleración
aa=zeros(n,1);          % Aceleración Absoluta

% Condiciones Iniciales
d(1)=d0;
v(1)=v0;
a(1)=- (2*b*w*v(1)+w^2*d(1)+reg(1));
aa(1)=- (2*b*w*v(1)+w^2*d(1));

for i=1:n-1
X=[d(i);v(i)];
U=[reg(i);reg(i+1)];

xx=A*X-B*U;

d(i+1)=xx(1);
v(i+1)=xx(2);
a(i+1)=- (2*b*w*v(i+1)+w^2*d(i+1)+reg(i+1));
aa(i+1)=- (2*b*w*v(i+1)+w^2*d(i+1));
end
end

```

## - Solución no-lineal para un modelo de 1-grado de libertad

```

% SOLUCION DINAMICA NO LINEAL DE UN MODELO DE 1-GDL CON RIGIDEZ BILINEAL
% function [x,v,a,R]=SDOFBi(reg,Fs,ke,alfa,m,c,Rt)
%
% Solucion de la Ecuacion Incremental de Movimiento de un Oscilador de

```

```

% 1-Grado-de-Libertad con Rigidez Elastica 'ke' y Rigidez post-fluencia
'alfa*ke'
% Integracion Paso a Paso mediante Metodo de Aceleracion Lineal
%
% INPUT
% reg: Registro de aceleraciones [g]
% Fs: Frecuencia de Muestreo [Hz]
% ke: Rigidez Elastica [N/m]
% alfa: Ponderador para Rigidez Post-Fluencia [%]
% m: Masa [N*seg2/m]
% c: Coeficiente de amortiguamiento [N*seg/m]
% Rt: Fuerza de fluencia [N]
%
% OUTPUT
% x: Vector de Desplazamiento [m]
% v: Vector de Velocidad [m/s]
% a: Vector de Aceleracion [m/s^2]
% R: Fuerza de Restitucion [N]

function [x,v,a,R]=SDOFBi(reg,Fs,ke,alfa,m,c,Rt)

ag=reg*9.81; % [m/s2]
kp=ke*alfa/100;
dt=1/Fs;
F=-m*ag; Rc=-Rt;

x(1)=0; v(1)=0;
a(1)=F(1)/m;

a1=3/dt; a2=6/dt; a3=dt/2; a4=6/dt^2;
xt=Rt/ke;
xc=Rc/ke;
KEY=0;
DR=Rt-Rc;

for i=1:length(F)-1

if KEY==0 % Elastico
k(i)=ke;
end
if KEY==1 || KEY==-1 % Post-fluencia
k(i)=kp;
end

DF(i)=F(i+1)-F(i);
keff(i)=k(i)+a4*m+a1*c;
DFeff(i)=DF(i)+(a2*m+3*c)*v(i)+(3*m+a3*c)*a(i);

Dx(i)=DFeff(i)/keff(i);
Dv(i)=3*Dx(i)/dt-3*v(i)-dt*a(i)/2;

x(i+1)=x(i)+Dx(i);
v(i+1)=v(i)+Dv(i);

if KEY==0
%Elastico

```

```

    if xc<x(i+1) && x(i+1)<xt
        KEY=0;
    end
    if x(i+1)>=xt
        KEY=1;
    end
    if x(i+1)<=xc
        KEY=-1;
    end
else
    if KEY==1
        %Post-fluencia Tension
        if v(i+1)>0
            KEY=1;
        end
        if v(i+1)<=0
            KEY=0;
            Xmax=x(i+1);
            Rt=R(i); Rc=Rt-DR;
            xt=Xmax;
            xc=Xmax-DR/(ke);
        end
    end
    if KEY==-1
        %Post-fluencia Compresion
        if v(i+1)<0
            KEY=-1;
        end
        if v(i+1)>=0
            KEY=0;
            Xmin=x(i+1);
            Rc=R(i); Rt=Rc+DR;
            xc=Xmin;
            xt=Xmin+DR/(ke);
        end
    end
end
end

if KEY==0
    R(i+1)=Rc-(xc-x(i+1))*ke;
end
if KEY==1
    R(i+1)=Rt+(x(i+1)-xt)*kp;
end
if KEY==-1
    R(i+1)=Rc-(xc-x(i+1))*kp;
end

a(i+1)=(F(i+1)-c*v(i+1)-R(i+1))/m;
end
end

```