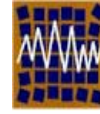




Universidad de Concepción
Departamento de Ingeniería Civil



Asociación Chilena de Sismología e
Ingeniería Antisísmica

A05-02 GENERACIÓN DE SISMOS ARTIFICIALES A PARTIR DE UNA CARACTERIZACIÓN DE UN CONJUNTO DE REGISTROS DE UN SISMO REAL

V.I. Fernández-Dávila¹ y E.F. Cruz¹

*1.- Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 306,
Correo 22, Santiago, Chile.*

e-mail: ifdavila@ing.puc.cl, ecruz@ing.puc.cl

RESUMEN

Dado que existe un número limitado de registros de sismos reales de nivel zona 3 de la zonificación de la norma chilena, se generan registros artificiales que son similares a los reales, en términos de sus dos componentes horizontales. Aunque en la práctica normalmente se evalúa la respuesta sísmica usando sólo una componente horizontal del movimiento del suelo (excitación Uni-Direccional) cuando se requiere evaluar la respuesta de estructuras tridimensionales es necesario considerar el efecto de ambas componentes (excitación Bi-Direccional). Los sismos artificiales se desarrollan a partir de los registros obtenidos en 10 sitios en el terremoto del 3 de Marzo de 1985. Se describen las características de los registros utilizando los conceptos: Intensidad de Arias, Varianza, Covarianza, Coeficiente de Correlación (duración total del registro), Evolución en el tiempo de la Correlación (ventana móvil de 10 segundos), y Direcciones Principales (ejes en que se que obtiene correlación total nula). También se consideró las envolventes de las correlaciones en el tiempo y sus envolventes absolutas (en “ejes principales”). Con estas dos componentes horizontales se construyeron los espectros de pseudo-aceleraciones normalizadas (respuesta elástica, amortiguamiento del 5%) considerando las componentes principales escaladas a una aceleración máxima de 0.4g y se calcularon los espectros promedio. A partir de estos espectros promedio, se generó una familia de sismos artificiales (dos componentes) empleando el procedimiento estándar y aceptando aquellos cuya correlación instantánea esté dentro de las envolventes y que tienen características similares a los registros reales en términos de las demás propiedades usadas en la caracterización.

Palabras Clave: sismos artificiales; sismos reales; intensidad de Arias; Correlación; Ejes principales; Componentes sísmicas horizontales.

1. INTRODUCCION

La mayoría de las investigaciones sobre respuesta dinámica de estructuras sometidas a excitación sísmica, considera sólo la acción de una componente del movimiento sísmico aplicada en una dirección específica de la base. Pero el movimiento sísmico al que esta sometida la estructura en la realidad es de gran complejidad que para evaluar las respuestas de algunos importantes sistemas estructurales tridimensionales tales como “piping”, plantas nucleares, estructuras de puentes, presas de tierra y edificios irregulares o complejos es necesario considerar el efecto de más de una componente. En el presente estudio se considera la acción simultánea de las dos componentes horizontales de aceleración sísmica.

El objetivo principal del presente estudio es desarrollar una metodología que permita caracterizar los movimientos sísmicos en Chile, en base a la información disponible de eventos sísmicos anteriores, con el propósito de generar un conjunto de registros artificiales consistentes con esas características. Para ello se usaron los registros de las dos componentes horizontales medidas en diez estaciones durante el importante terremoto ocurrido en Chile Central el 3 de Marzo de 1985.

2. METODOLOGIA

2.1. Caracterización de los registros de aceleración sísmica

Se describen las características de los registros de aceleraciones sísmicas utilizando diferentes conceptos ya presentados en estudios anteriores [1,2,3], los que se detallan a continuación:

- Intensidad de Arias: Corresponde a la cantidad de energía por unidad de peso disipada por una familia de osciladores de un grado de libertad, cuyas frecuencias propias están comprendidas en el rango $[0, \infty)$, para una aceleración basal terremoto y amortiguamiento dados [4].
- Varianza, covarianza y correlación: Permiten cuantificar la dependencia estadística de las componentes de aceleración del sismo. La covarianza y las varianzas se definen en las ecuaciones siguientes (Ec. 1) en que $a_X(t)$ y $a_Y(t)$ son las aceleraciones en las direcciones X e Y; t_0 , t_f y $t_d = t_f - t_0$ son los tiempos inicial, final y la duración del intervalo de tiempo considerado, y t es la variable tiempo. La correlación ρ_{XY} , se calcula de la Ec. (2). En general, se observa que entre las componentes traslacionales del sismo existe correlación, siendo $\rho_{XY} = 0.16$ un valor promedio reportado en [5].

$$\mu_{XY} = \frac{1}{t_d} \int_{t_0}^{t_f} a_X(t) a_Y(t) dt ; \quad \mu_{XX} = \frac{1}{t_d} \int_{t_0}^{t_f} a_X^2(t) dt \quad \text{y} \quad \mu_{YY} = \frac{1}{t_d} \int_{t_0}^{t_f} a_Y^2(t) dt \quad (1)$$

$$\rho_{XY} = \frac{\mu_{XY}}{\sqrt{\mu_{XX}} \sqrt{\mu_{YY}}} \quad (2)$$

- Direcciones de los ejes principales: Son aquellos que cumplen con la condición de que las varianzas de las aceleraciones del registro proyectadas en la dirección de dichos ejes deben ser respectivamente máxima y mínima mientras que la covarianza es nula. El procedimiento para el cálculo de la

orientación de las direcciones de los “ejes principales” es análogo al empleado para determinar las tensiones principales en un problema de tensiones plano [6], en que las tensiones normales corresponden a las varianzas y las tensiones de corte a la covarianza en los respectivos ejes. Obviando el efecto de la componente vertical, el problema de encontrar las direcciones de los “ejes principales” se reduce a efectuar un proceso de transformación de coordenadas. La correlación de las aceleraciones sísmicas horizontales respecto a un sistema de ejes coordenados rotado resulta:

$$\rho_{X'Y'} = \frac{\frac{1}{2}(-\mu_{XX} + \mu_{YY}) \text{Sen}2\theta + \mu_{XY} \text{Cos}2\theta}{\sqrt{\mu_{XX} \text{Cos}^2\theta + \mu_{XY} \text{Sen}2\theta + \mu_{YY} \text{Sen}^2\theta} \sqrt{\mu_{XX} \text{Sen}^2\theta - \mu_{XY} \text{Sen}2\theta + \mu_{YY} \text{Cos}^2\theta}} \quad (3)$$

Para obtener la condición de correlación nula, basta con hacer cero el numerador de la Ec. (3), con lo cual es posible despejar el valor del ángulo θ_{EP} que determina la orientación de los “ejes principales”.

$$\theta_{EP} = \frac{1}{2} \text{arctg} \left[\frac{2\mu_{XY}}{\mu_{XX} - \mu_{YY}} \right] \quad (4)$$

2.2. Excitación Sísmica

Se estudiaron las dos componentes horizontales de 10 registros de aceleración del terremoto ocurrido en Chile Central en 1985 (Tabla 1), con la finalidad de identificar sus características más relevantes. Para ellos se utilizaron :

- a. Evolución de la Intensidad de Arias. La Fig. 1 muestra las curvas de las intensidades de Arias normalizados por la aceleración de la gravedad (I_A/g) de las componentes principales y secundarias del movimiento horizontal del suelo. Se consideró un intervalo de tiempo de 1 segundo, y una razón de amortiguamiento de 5%. Las aceleraciones medidas en la estación de Llo-Lleo presentan las mayores intensidades de Arias (1.5094g, 0.6824g) y las medidas en la estación de Chillán presentan las menores intensidades de Arias (0.0292g, 0.0230g). Dado que los registros corresponden a instrumentos analógicos se consideró necesario definir un tiempo de inicio común a todos los registros. Para esto se reconocen tres tramos característicos en la forma de las curvas de las cuatro estaciones mas cercanas al epicentro (Tabla 1): dos tramos casi horizontales en los intervalos [0,10] y [60,100] segundos, y un tramo inclinado de pendiente positiva en el intervalo [10,60] segundos. A partir de esto, se fijó un punto común para todas las curvas de intensidad de Arias normalizadas: tiempo =18 segundos y ordenada igual a 1% de la intensidad de Arias normalizada $I_A/I_{A\text{Max}}$. Las curvas de intensidades de Arias normalizados para los otros seis registros, que tienen mucho menores aceleraciones, poseen poca información al principio y al término de la duración del registro. Por esta razón, se modificaron estas curvas de intensidades de Arias normalizadas tomando como base la forma de las curvas del registro de Viña del Mar. La Fig. 2 muestra las intensidades de Arias normalizadas después de las modificaciones y además se incluyen las curvas correspondientes al promedio de todas y al promedio más y menos una desviación estándar.
- b. Duración del movimiento fuerte de la excitación sísmica: Se examinó la curva promedio de intensidad de Arias normalizada $I_A/I_{A\text{Max}}$ obtenida de los diez registros de aceleraciones mostrada en la Fig. 2. Se

observó que en los intervalos de tiempo [0,18] y [80,100] segundos la intensidad de Arias normalizada es prácticamente independiente del tiempo. La tendencia de $I_A/I_{A_{\text{Max}}}$ a ser horizontal en estos intervalos se usa como criterio para determinar el intervalo y la duración relevante de la excitación [7]. Se observó que las intensidades de Arias normalizadas varían entre 1% y 98%, respectivamente en este intervalo.

- c. Correlación total: Se evalúa la correlación entre las dos componentes horizontales para la duración total considerada del registro del sismo. El registro que muestra el mayor valor de correlación y ángulo de orientación de los “ejes principales” es Llo-Lleo ($\rho_{XY} = 0.0887$ y $\theta_{EP}^T = 6.0840^\circ$), y el registro que muestra el menor valor es UTFSM ($\rho_{XY} = 0.0255$ y $\theta_{EP}^T = 3.1386^\circ$). Cada uno de los 10 registros tiene valores de correlación pequeños, evaluados en el intervalo de tiempo de duración del movimiento fuerte, y los valores promedio y su desviación estándar resultan ser 0.0641 y 0.0193, respectivamente, y concuerdan con los valores reportados por algunos autores [8,9].
- d. Correlación instantánea: Se define como correlación instantánea al resultado de evaluar la correlación para un segmento del registro usando una ventana móvil, para observar la variación de esta cantidad durante el desarrollo del sismo. Las varianzas y covarianza se obtuvieron como funciones continuas en el tiempo definiendo cuatro tamaños de ventanas $\Delta\tau = 5, 10, 15$ y 20 segundos. La Fig. 3 muestra las correlaciones instantáneas como función del tiempo para los registros sísmicos rotados a sus “ejes principales” considerando la ventana móvil de $\Delta\tau = 10$ segundos. Se determinaron además los valores promedio y su desviación estándar vs. tiempo agregándose a la Fig. 3 tres curvas adicionales: la correlación instantánea promedio y la correlación instantánea promedio más y menos un vez la desviación estándar. Finalmente, a partir de las curvas envolventes (promedio + y - desviación) se determinaron los valores promedio y la desviación estándar en el tiempo resultando valores de 0.22806 y -0.31346 respectivamente, que se ven en la Fig. 3 como dos rectas horizontales.

3. GENERACIÓN DE EXCITACIONES SÍSMICAS ARTIFICIALES

Con la finalidad de generar una familia de registros artificiales que posean características similares a los registros de los sismos estudiados, se desarrolló una metodología que permitió construirlos.

3.1. Espectros de Respuesta Elásticos Promedio de Pseudo-Aceleraciones Normalizadas

A partir de las componentes horizontales (principal y secundaria) de los registros rotados (direcciones principales) se calcularon los promedios de los espectros de respuesta de pseudo-aceleraciones para respuesta elástica y con razón de amortiguamiento 5%. Se escalaron los registros de aceleraciones de las componentes principales rotadas para obtener una aceleración máxima igual a 0.4g para representar sismos severos en zona sísmica 3 de acuerdo a la zonificación de la norma sísmica vigente [10]. Las componentes secundarias rotadas fueron escaladas de tal manera de que se mantenga la proporcionalidad que originalmente existía entre las aceleraciones máximas de las dos componentes. Los espectros de respuesta fueron definidos sobre un rango de períodos comprendido entre 0.02 segundos (50 Hz) y 81.92

segundos (0.012 Hz), considerando 101 puntos igualmente espaciados en escala logarítmica. En el proceso de integración numérica se usó el método exacto [11] con un intervalo de tiempo de 0.002 segundos.

La Fig. 4 muestra los espectros de respuesta de pseudo-aceleraciones de ambas componentes horizontales a partir de los diez registros sísmicos rotados (comportamiento elástico, $\xi = 5\%$); se agregan tres curvas (líneas segmentadas de trazo grueso) que representan los valores promedio y promedio más y menos una desviación estándar.

3.2. Generación de Sismos Artificiales

A partir de los promedios de los espectros de respuesta de pseudo-aceleraciones de ambas componentes horizontales, se generó una familia de sismos artificiales compatibles con cada uno de ellos. El procedimiento utilizado es estándar [12] y se describe a continuación:

- a. Generación de una señal inicial periódica y aleatoria (Ruido Blanco: superposición de infinitas ondas sinusoidales de diferentes frecuencias entre 0 e ∞). En la generación del registro se utilizó la función Rand [13] con la que se obtuvo una serie de números aleatorios distribuidos uniformemente entre 0 y 1. Una vez obtenido esta serie de números aleatorios, se procedió a formar un total de 4.096 ondas sinusoidales con frecuencias entre 50 y 0.012 Hz. Además, se consideró una duración total del *input* aleatorio igual a 80 segundos discretizado con un intervalo de tiempo de 0.01 segundos.
- b. Para transformar el *input* aleatorio en una función no-estacionaria, se usó una función envolvente con la forma típica de los registros sísmicos chilenos [14]. Los valores de los parámetros requeridos se estimaron de observar la forma que adoptan los registros sísmicos reales y se escogieron los valores de $t_1 = 18$ y $t_2 = 50$ segundos, y el valor del parámetro c se fijó en 0.16 (t_1 depende de la magnitud y la distancia a la fuente; t_2 es la duración del movimiento fuerte, también depende de la intensidad; la exponencial modela el “decaimiento” final).
- c. Filtrado en el dominio de las frecuencias. Se emplea la función de transferencia de Kanai-Tajimi para representar el comportamiento del suelo, siendo ζ_s la razón de amortiguamiento característico del suelo, cuyo valor recomendado es 0.6 para suelo firme tipo II [10]; ω_s es la frecuencia de vibración propia del suelo y fue elegida como el valor para el cual el espectro de respuesta de pseudo aceleraciones normalizado de ambas componentes horizontales es máxima. Luego se define el filtro pasa altas frecuencias, siendo ζ_1 la razón de amortiguamiento; ω_1 fue evaluado como $0.2\omega_s$, siendo ω_s la frecuencia de vibración propia del suelo y fue elegida como el valor para el cual la función de transferencia $H_s(j\omega)$ es máxima. Usando transformada rápida de Fourier se transforma el *input* aleatorio de cada componente horizontal que actúa en la roca basal al respectivo *input* aleatorio que actúa en la superficie del suelo firme.
- d. Corrección por línea base: Las velocidades se obtuvieron por integración de los acelerogramas, previa corrección por línea base. El método de corrección empleado para la integración de los acelerogramas es el propuesto por Berg y Housner [15] y Brady [16]. Este método supone que el registro de aceleraciones corregido $a^*(t)$ se obtiene de restar al registro sin corregir $a(t)$ la función parabólica que define el eje de aceleración nula. Los valores de las constantes C_1 , C_2 y C_3 son tales que hacen mínimo

el valor cuadrático medio de la velocidad del suelo [7]. A este método se ha impuesto la condición física de que la velocidad en la parte final del registro oscile en torno a cero.

- e. Calcular el espectro de respuesta de pseudo-aceleraciones $S_s(T)$ a partir del registro artificial $\ddot{y}_s(t)$ ajustado considerando una razón de amortiguamiento de 5%, tanto para la componente horizontal principal y secundaria. A continuación se debe calcular la discrepancia a través del cálculo de las razones de los factores de corrección (error) tanto para $S_{a_{cp}}(T)$ y para $S_{a_{cs}}(T)$. El ajuste se realiza sobre las amplitudes de Fourier. Como tolerancia se consideró una banda de media desviación estándar sobre los espectros elásticos de respuesta de pseudo-aceleraciones normalizadas promedio obtenido a partir de los diez registros sísmicos rotados. Para conseguir un buen ajuste del espectro de respuesta de pseudo-aceleraciones $S_{a_{cp}}(T)$ y $S_{a_{cs}}(T)$ sobre sus respectivos espectros elásticos de respuesta de pseudo-aceleraciones normalizadas promedio, se realizaron un total de ocho iteraciones.
- f. Correlación instantánea del Registro Artificial: Una vez realizada las ocho iteraciones señaladas en el paso (e), se procede a evaluar la correlación instantánea del registro artificial recién obtenido con la finalidad de compararla con las correlaciones instantáneas límites que fueron determinadas a partir del análisis de los diez pares de registros sísmicos reales rotados (Fig. 3).
- g. Intensidad de Arias Normalizada $I_A/I_{A_{Max}}$: Se evaluaron las intensidades de Arias normalizadas para cada una de las dos componentes sísmicas horizontales con la finalidad de compararlas con las envolventes de las intensidades de Arias normalizadas (Fig. 2).

3.3. Componentes principal y secundaria de las excitaciones sísmicas artificiales

Con la aplicación del procedimiento descrito en el ítem 3.2 fue posible generar una familia de veinte sismos artificiales conformados por dos componentes horizontales de aceleración del suelo obtenidos a partir de diez registros sísmicos reales medidos durante el terremoto ocurrido en Chile Central el 3/3/85. Los sismos artificiales fueron generados a partir de una caracterización de un conjunto de registros pertenecientes a un sismo real. Dicha caracterización se resume de la siguiente manera:

- a. Evaluación de las Intensidad de Arias Normalizada usando los registros sísmicos originales: Para ello se fijó como Criterio General la condición de punto común igual $t = 18$ s e $I_A/I_{A_{Max}} = 1$ %. De esta manera se pudo determinar los tiempos de inicio para cada uno de los registros de aceleración sísmica de las dos componentes horizontales de movimiento del suelo. Finalmente, a partir del análisis de la curvas de intensidad de Arias normalizada promedio y de intensidad de Arias normalizada promedio más y menos una desviación estándar, se determinó la duración del movimiento fuerte de la excitación sísmica la que está comprendida entre 18 y 80 segundos.
- b. Evaluación de la correlación de aceleraciones horizontales: Considerando el intervalo de movimiento fuerte para cada uno de los registros de aceleración de las dos componentes horizontales señalado en (a), se evaluó la correlación total, la correlación instantánea usando los registros sísmicos originales, la correlación instantánea usando los registros sísmicos rotados, y la correlación promedio de los registros sísmicos rotados. Finalmente, a partir del análisis de las correlaciones instantáneas en función del tiempo de los registros sísmicos rotados considerando una ventada móvil $\Delta\tau = 10$ s (Fig. 3), fue posible obtener las envolventes de las correlaciones instantáneas y las envolventes absolutas.

- c. Espectros Elásticos de Respuesta de Seudo-Aceleraciones Normalizadas: A partir de las componentes horizontales (principal y secundaria) de los registros sísmicos chilenos rotados, se construyeron los espectros de respuesta de seudo-aceleraciones normalizadas con razón de amortiguamiento igual a 5%. Para ello se escalaron las componentes principales rotadas a una valor de aceleración igual a 0.4g con la finalidad de representar a sismos severos. A su vez, las componentes secundarias rotadas fueron escaladas de tal manera de que se mantenga la proporcionalidad que originalmente existía entre las aceleraciones máximas de las dos componentes horizontales rotadas. Finalmente, la Fig. 4 muestra los espectros elásticos de respuesta de seudo-aceleraciones normalizadas de ambas componentes y se aprecia, además, tres curvas segmentadas de trazo grueso que representan los espectros de respuesta de seudo-aceleraciones promedio y los espectros de respuesta de seudo-aceleraciones promedio más y menos una desviación estándar.

Como ejemplo de la aplicación del procedimiento de generación de sismos artificiales, se obtuvo las componentes principal y secundaria del sismo artificial identificado como SA1, verificándose que satisfacen las siguientes dos condiciones: a. encontrarse dentro de la banda admisible conformada por los espectros de respuesta elásticos promedio de seudo-aceleraciones normalizadas más y menos media desviación estándar, y b. aproximarse con suficiente exactitud al espectro de respuesta elástico promedio de seudo-aceleraciones normalizada. Además, en la Fig. 5a se compara la correlación instantánea en función del tiempo de ambas componentes horizontales del sismo utilizando una ventana móvil $\Delta\tau = 10$ s, con las respectivas envolventes absolutas de las correlaciones instantáneas superior e inferior y las envolventes absolutas superior e inferior con que fueron caracterizados los sismos chilenos. Finalmente, en la Fig. 5b se compara la intensidad de Arias normalizada de cada componente horizontal del registro artificial con la intensidad de Arias normalizada promedio y la intensidad de Arias normalizada promedio más y menos una desviación estándar. Las Figs. 6 y 7 muestran las componentes principales y secundarias de aceleración sísmica de los diez primeros registros artificiales, indicándose los valores máximos y mínimos y los tiempos en que ocurren.

4. CONCLUSIONES

El método propuesto sirve para generar una familia de sismos artificiales con dos componentes horizontales compatibles con los espectros de respuesta elásticos de seudo aceleraciones promedio para ambas componentes horizontales de los registros reales.

Los registros sísmicos generados de cada una de las dos componentes horizontales son muy parecidas.

5. AGRADECIMIENTOS

La Escuela de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica de Chile y el programa MECESUP del Ministerio de Educación, han proporcionado ayuda financiera para el desarrollo de éste trabajo la que se agradece profundamente.

Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica
IX Jornadas, 16-19 de Noviembre de 2005, Concepción - Chile

Tabla 1: Características de los Registros Sísmicos Originales Chilenos (03/03/85, 22:46:56, M=7.8).

ID	Estación Sismográfica	Nombre Archivo	Orient.	Ubicación Geográfica		Nº Puntos	Tiempo Reg. (s)	A _{Máx} (g)	Tipo Suelo [17]
				Latitud	Longitud				
RCh-1	U. Técnica Federico Santa María	utn70e	N70E	33°01'S	71°38'W	6434	78.106	0.179	I
		uts20e	S20E			6447	79.426	0.164	
RCh-2	Almendral	aln50e	N50E	33°01'S	71°38'W	4941	87.850	0.293	III
		als40e	S40E			5062	87.838	0.163	
RCh-3	Viña del Mar	vis20w	S20W	33°02'S	71°35'W	3005	99.994	0.356	III
		vin70w	N70W			4173	99.978	0.228	
RCh-4	Llo-Lleo	lln10e	N10E	33°41'S	71°36'W	5197	99.972	0.669	II
		lls80e	S80E			4452	99.960	0.426	
RCh-5	Chillán	chin10w	N10W	36°36'S	72°06'W	8622	43.110	0.065	II
		chin80e	N80E			8621	43.105	0.057	
RCh-6	Illapel	illn20w	N20W	31°38'S	71°10'W	11760	58.800	0.120	II
		ills70w	S70W			11768	58.840	0.100	
RCh-7	La Ligua	lign70w	N70W	32°30'S	71°06'W	9733	48.665	0.193	II
		ligs20w	S20W			9729	48.645	0.126	
RCh-8	Llay-Llay	llas10w	S10W	32°50'S	70°58'W	12490	62.450	0.486	III
		llan80w	N80W			12480	62.400	0.335	
RCh-9	San Felipe	sfen80e	N80E	32°45'S	70°44'W	12877	64.385	0.430	II
		sfes10e	S10E			12890	64.450	0.348	
RCh-10	Talca	taln10e	N10E	35°26'S	70°40'W	13839	69.195	0.168	II
		taln80w	N80W			13858	69.290	0.161	

Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica
IX Jornadas, 16-19 de Noviembre de 2005, Concepción - Chile

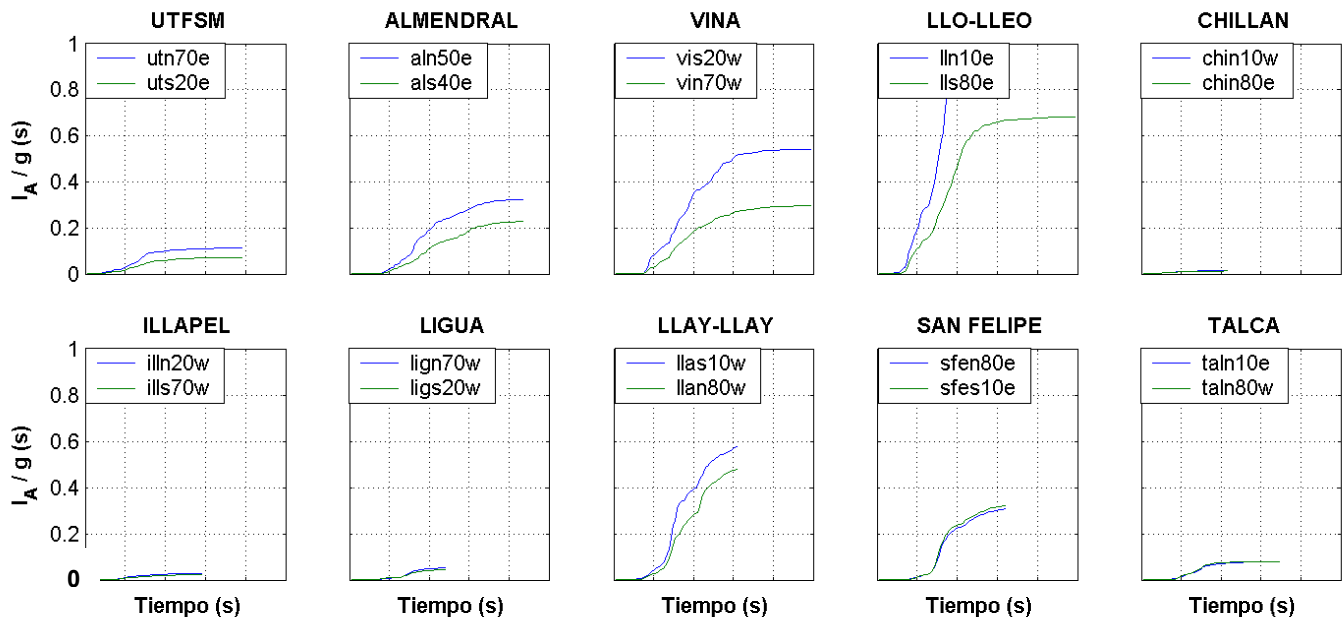
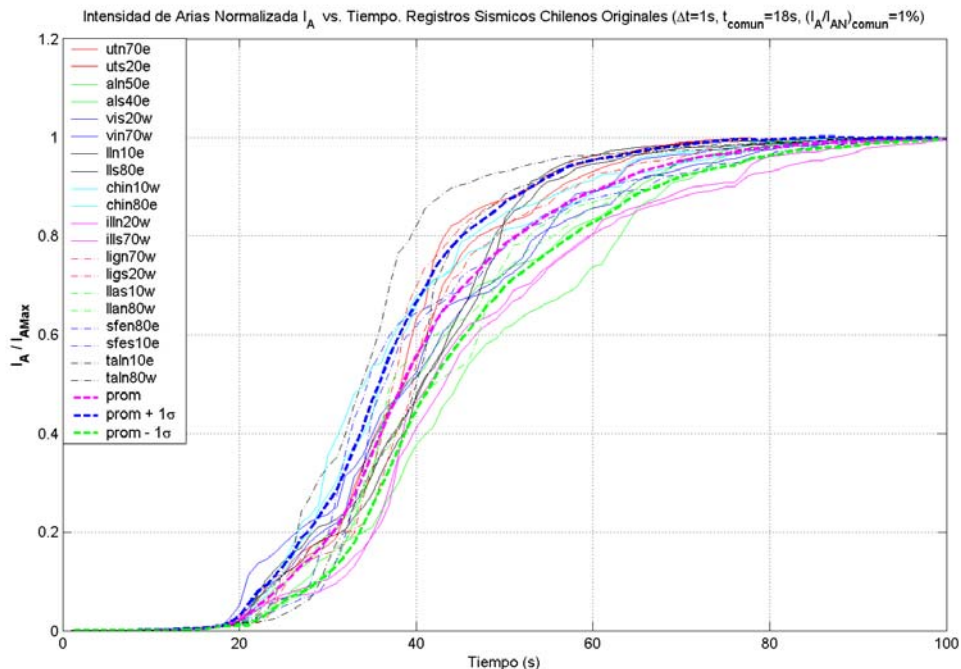


Figura 1: Evolución de las Intensidades de Arias de las Componentes Principales y Secundarias de Aceleración Sísmica Corregida de los Registros Chilenos.



- Condición de $t_{común} = 18s$ y $I_A / I_{A Max} = 1\%$. -

Figura 2: Evolución de las Intensidades de Arias Normalizadas de las Componentes Principales y Secundarias de Aceleración Sísmica de los Registros Chilenos Con la condición del Punto Común.

Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica
IX Jornadas, 16-19 de Noviembre de 2005, Concepción - Chile

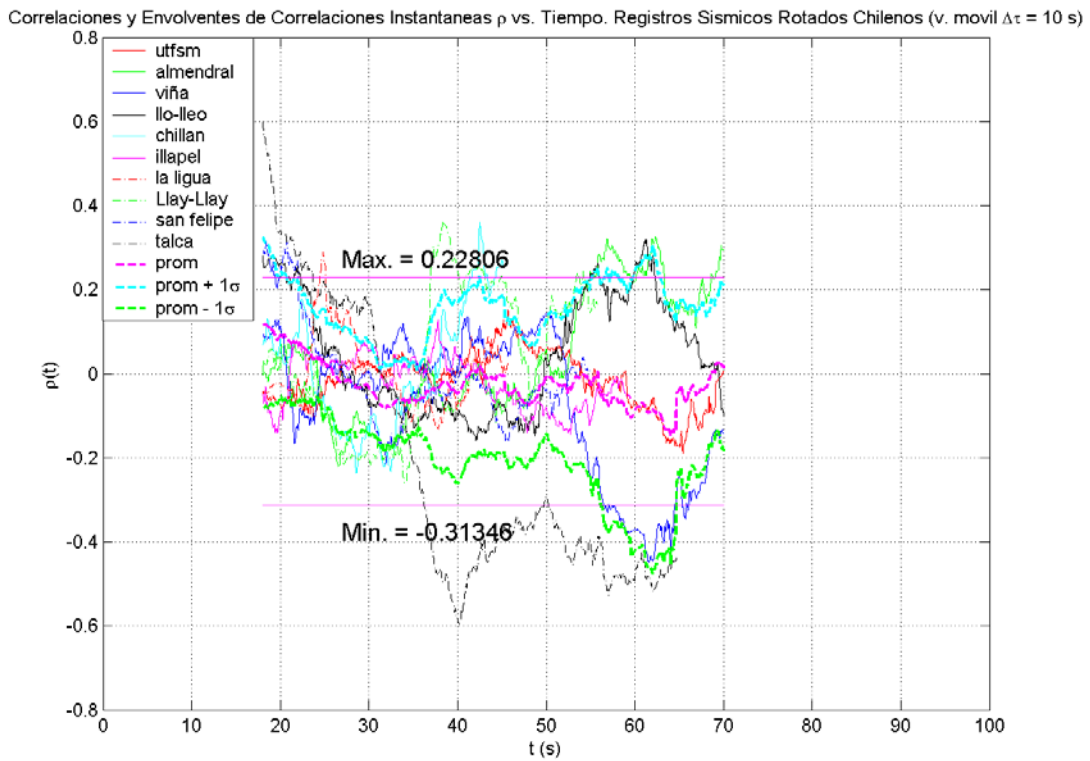
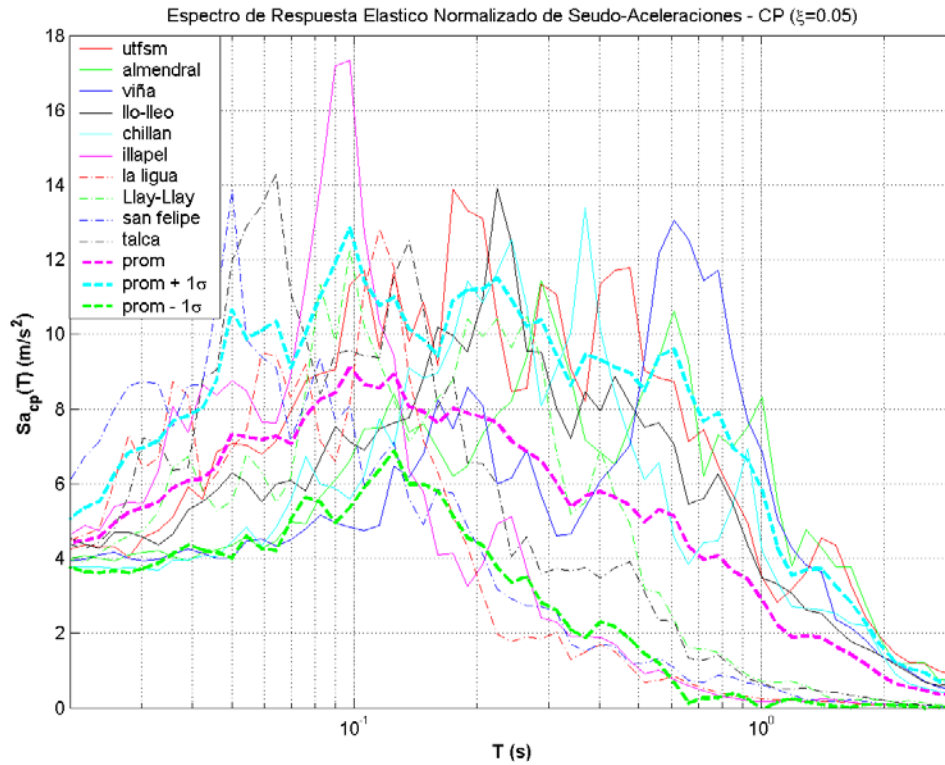
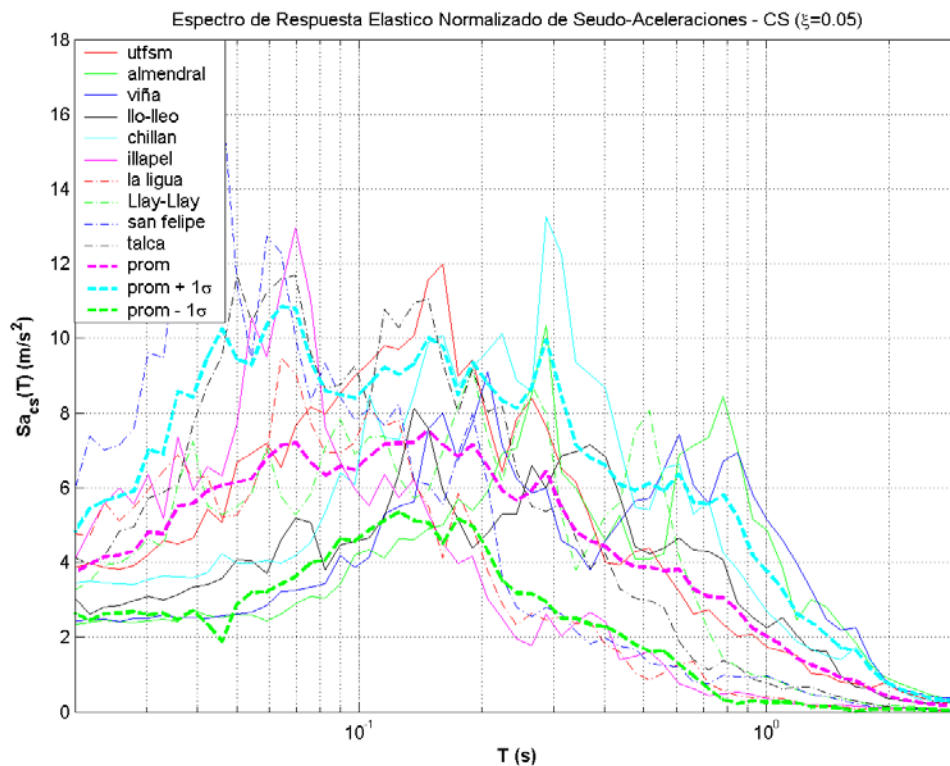


Figura 3: Correlaciones y Envoltentes de Correlaciones Instantáneas vs. Tiempo, y Envoltentes Absolutas. Registros Sísmicos Chilenos Rotados (ventana móvil $\Delta\tau = 10$ s).

Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica
IX Jornadas, 16-19 de Noviembre de 2005, Concepción - Chile



a) Componentes Principales de Aceleración.

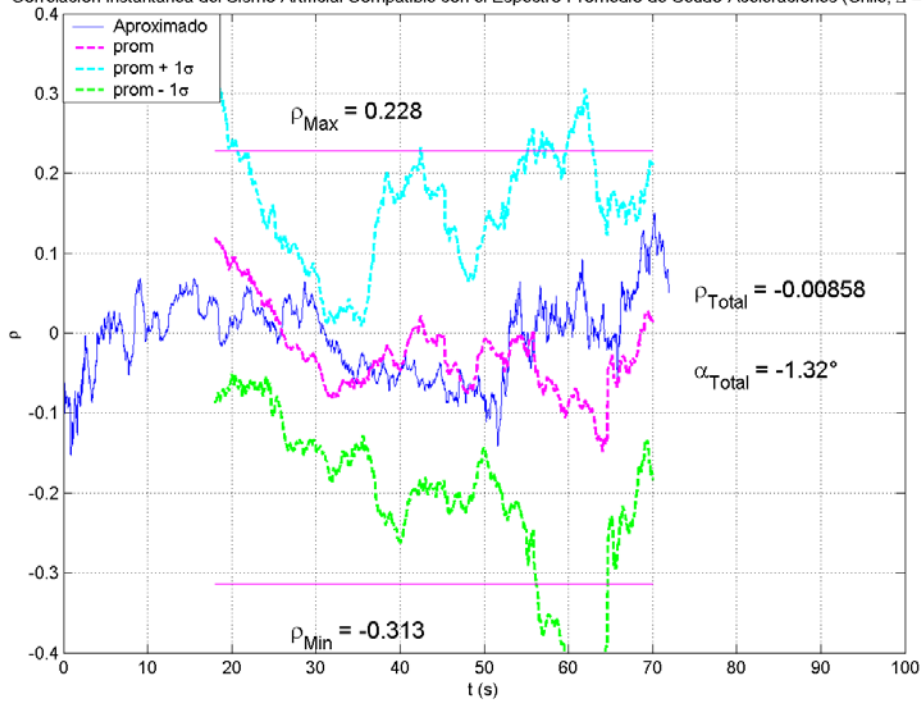


a) Componentes Secundarias de Aceleración.

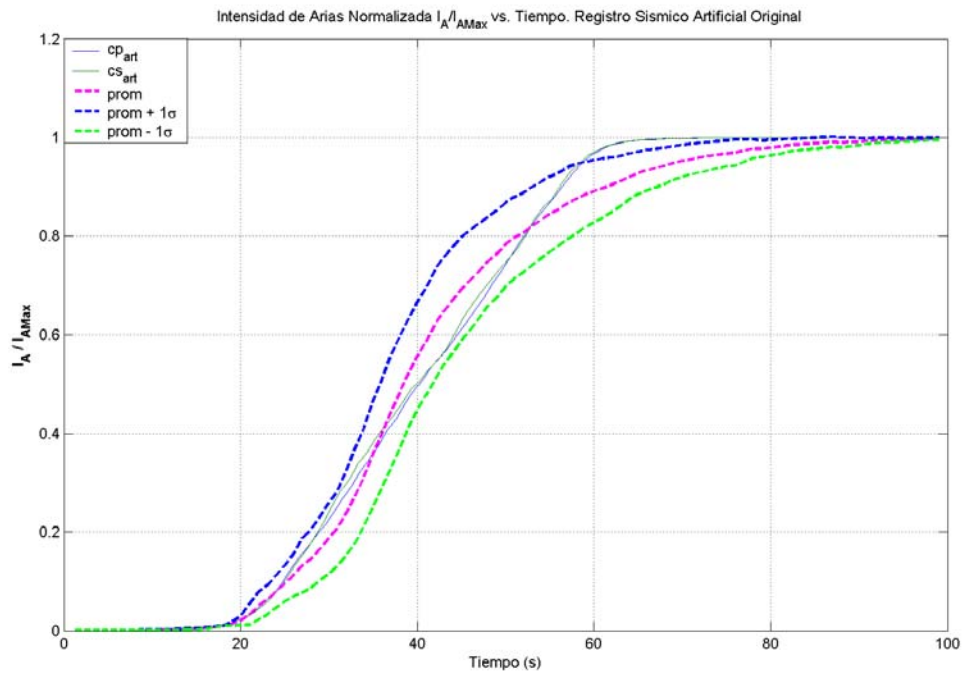
Figura 4: Espectros de Respuesta Elástico Normalizado de Seudo-Aceleraciones confeccionados con los Registros Sísmicos Chilenos Rotados ($\xi = 5\%$).

Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica
IX Jornadas, 16-19 de Noviembre de 2005, Concepción - Chile

Correlación Instantánea del Sismo Artificial Compatible con el Espectro Promedio de Seudo-Aceleraciones (Chile, $\Delta = 10$ s.)



a) Correlación Instantánea vs. Tiempo.



b) Intensidad de Arias Normalizada vs. Tiempo.

Figura 5: Correlación Instantánea e Intensidad de Arias Normalizada del Sismo Artificial SA1 compatible con los Espectros de Respuesta Elástico de Seudo-Aceleraciones Normalizadas.

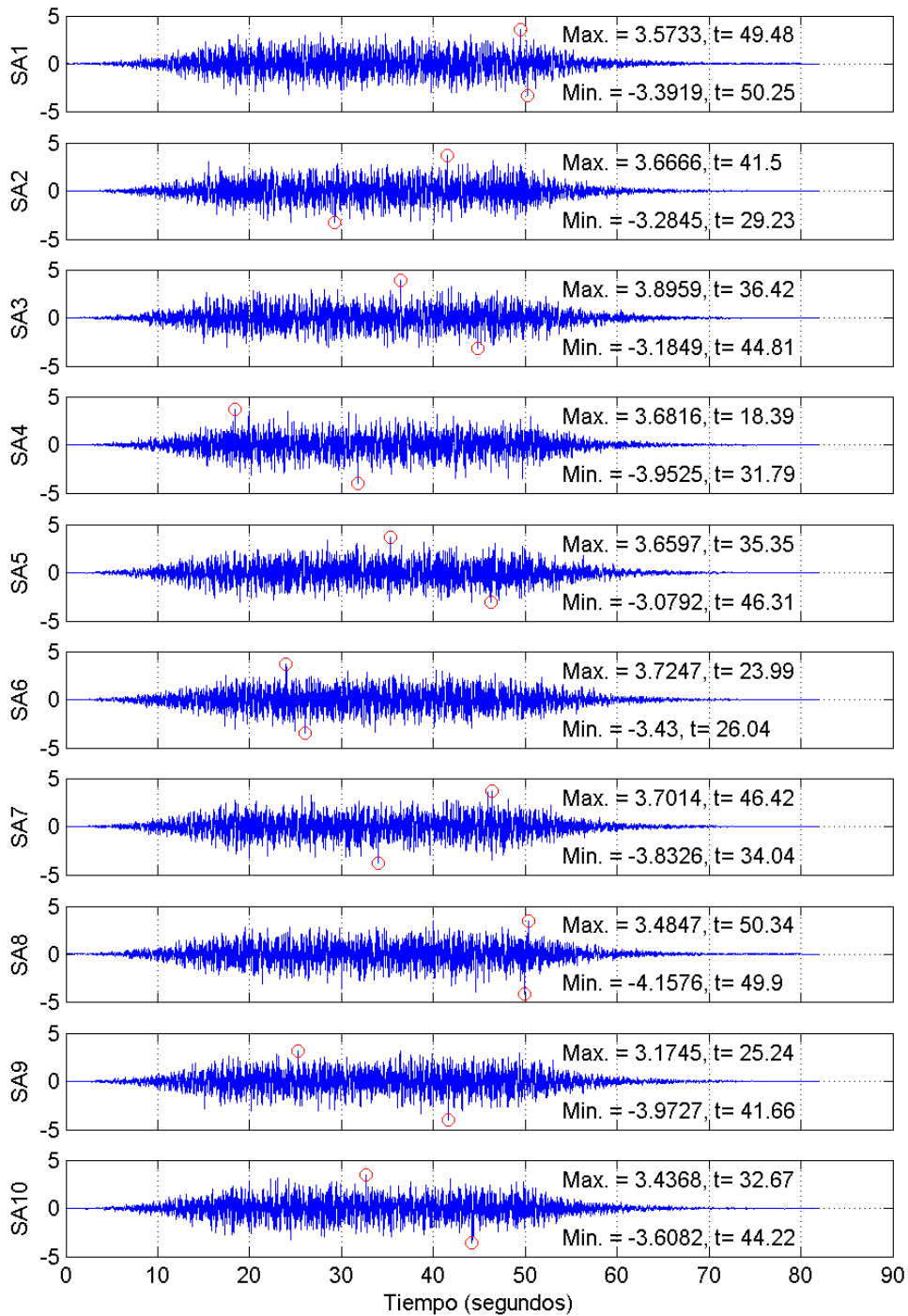


Figura 6: Componentes Principales de Aceleración Sísmica de los 10 primeros Registros Artificiales.

Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica
IX Jornadas, 16-19 de Noviembre de 2005, Concepción - Chile

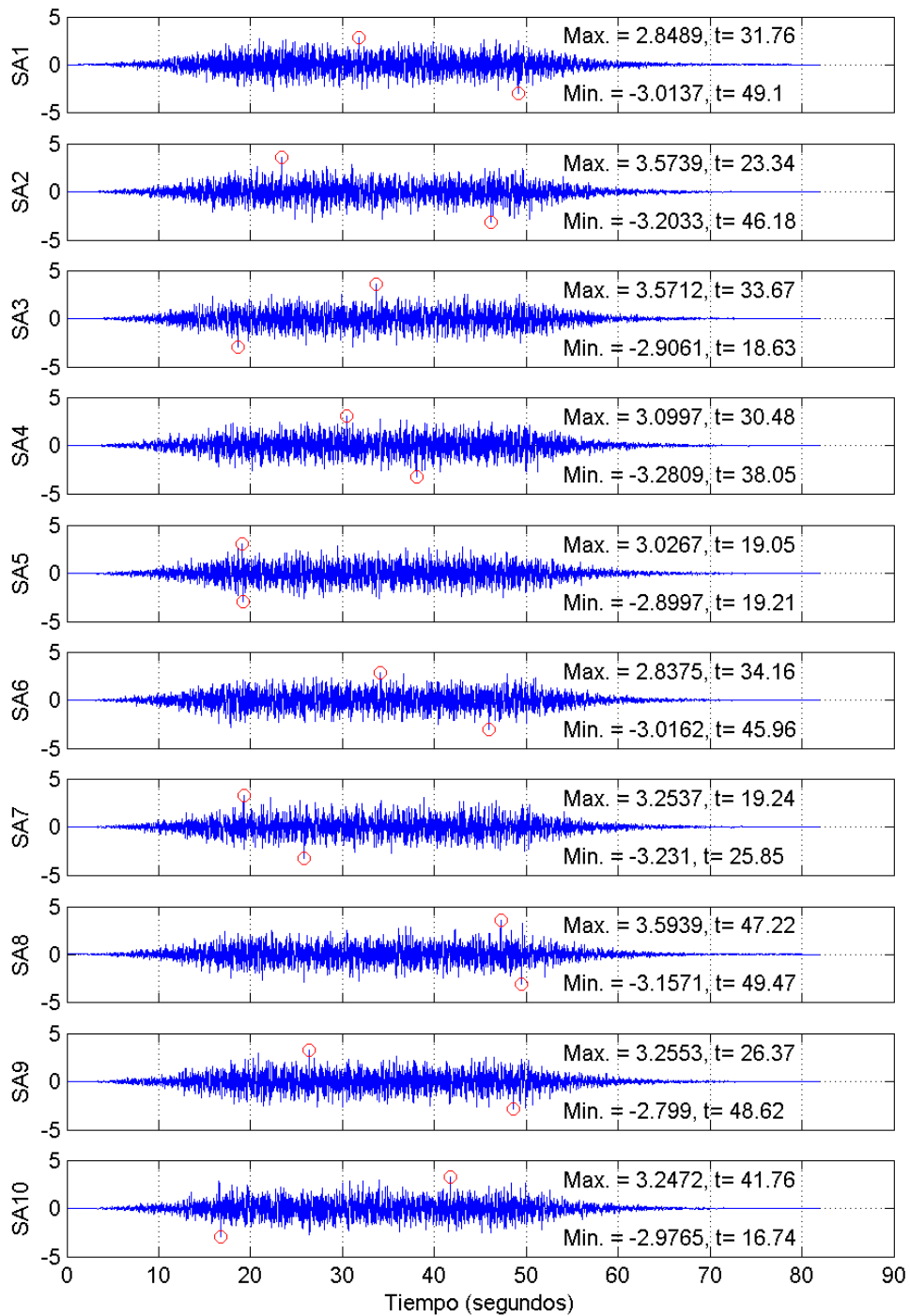


Figura 7: Componentes Secundarias de Aceleración Sísmica de los 10 primeros Registros Artificiales.

REFERENCIAS

1. **Penzien, J., Watabe, M. (1975)** *Characteristics of 3-Dimensional earthquake Ground Motions*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. Vol. 3, pp 365-373.
2. **Kubo, T., Penzien, J. (1979)** *Analysis of three-dimensional strong ground motions along principal axes, San Fernando Earthquake*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. Vol. 7.
3. **Rosenblueth, E. (1973)** *The six components of earthquakes*. Proceedings of the Australian and New Zealand Conference on the Planning and Design of Tall Buildings, Sydney, Australia, August 14-17.
4. **Lange, G. (1968)** *Una medida de la intensidad sísmica*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
5. **Chen, CH. (1977)** *Characteristics of three component spectra compatible time histories*. 6th World Conference on Earthquake Engineering. Vol. I, 947, January 10-14, New Delhi, India.
6. **Kubo, T., Penzien, J. (1976)** *Time and frequency domain analyses of three dimensional ground motions San Fernando earthquake*. Report N° EERC 76-6, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. California. March.
7. **Husid, R. (1970)** *Terremotos: Análisis espectral y características de acelerogramas como base del diseño sísmico*. Ed. Andrés Bello, Santiago, Chile.
8. **Chen, CH. (1975)** *Definition of statistically independent time histories*. Journal of the Structural Division, ASCE. Vol. 101, ST2. February.
9. **Aguayo R., A. P. (1993)** *Respuesta estructural para excitación sísmica bidireccional*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Marzo.
10. **INN (1996)** *NCh433.Of96 Diseño Sísmico de Edificios*. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.
11. **Chopra, A. K. (2000)** *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall. 2nd edition.
12. **Clough, R., Penzien, J. (1994)** *Dynamics of Structures*. Mc Graw-Hill. 2nd edition.
13. **The MathWorks, Inc. (1995)** *System Identification Toolbox for Matlab.*, Natick, MA. 1995.
14. **Jennings, P. C., Housner, G. W., Tsai, N. C. (1968)** *Simulated Earthquake motions*. Earthquake Engineering Research Laboratory. California Institute of Technology. Pasadena, California. April.
15. **Berg, G. V., Housner, G. W. (1961)** *Integrated velocity and displacement of strong earthquake ground motion*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 51, N° 2, 175-189. April.
16. **Brady, A. G. (1966)** *Studies of response to earthquake ground motion*. Earthquake Engineering Research Laboratory. California Institute of Technology. Pasadena, California. January.
17. **Riddell, R., Van Sint Jan, M., Midorikawa, S., Gajardo, J. F. (1992)** *Clasificación geotécnica de los sitios de estaciones acelerográficas en Chile*. Publicación DIE 92-2, Universidad Católica de Chile, Depto. Ingeniería Estructural, Junio.