

MINAS ARGENTINAS S.A.

**EVALUACION DETERMINISTICA
PELIGRO SISMICO
PROYECTO GUALCAMAYO
DEPARTAMENTO JACHAL
PROVINCIA DE SAN JUAN
REPUBLICA ARGENTINA**

SANTIAGO, CHILE, JUNIO 2007

MINAS ARGENTINAS S.A.

**EVALUACION DETERMINISTICA
PELIGRO SISMICO
PROYECTO GUALCAMAYO
DEPARTAMENTO JACHAL
PROVINCIA DE SAN JUAN
REPUBLICA ARGENTINA**

Proyecto : SS-07048
Informe : SS-07048-01e
Rev. : 0
Fecha : 06/Junio/2007
Desarrolló: Rodolfo Saragoni
Aprobó : Rodolfo Saragoni



1. INTRODUCCION.

Se presenta una evaluación determinística del peligro sísmico para la evaluación de la estabilidad sísmica de los taludes de las pilas de lixiviación del proyecto minero de oro Gualcamayo.

El peligro sísmico se estima en forma determinística considerando las fallas activas sísmicamente capaces con una distancia máxima de las trazas de las fallas al emplazamiento del proyecto de 40 Km. Las fallas activas consideradas son las identificadas en el informe Golder Associates Inc. (2006) y las respuestas de Golder Associates Argentina S.A. (2007) a las observaciones de INPRES al informe de Golder.

El peligro sísmico está evaluado en términos de aceleración horizontal máxima esperado, espectros de respuesta de aceleración absoluta y acelerogramas artificiales de diseño.

A partir de la aceleración máxima horizontal esperada se recomiendan coeficientes sísmicos horizontales y verticales para el diseño pseudoestático.

2. UBICACIÓN DEL PROYECTO.

El proyecto Gualcamayo se ubica en las cercanías del río Gualcamayo, al norte del Departamento de Jáchal de la Provincia de San Juan y cerca del límite de la Provincia de Rioja. Dista aproximadamente 220 Km en dirección norte de la unidad de San Juan y a 8Km de la Ruta Nacional N°40, siendo sus coordenadas geográficas 29,68°S y 68,66°W.

3. LOCALIZACION DE FALLAS ACTIVAS SISMICAMENTE CAPACES.

Para la evaluación del peligro sísmico del proyecto, se consideran las fallas sísmicamente capaces ubicadas a una distancia más próxima, desde la traza al proyecto, de 40Km.

Una de las falla sísmicamente activas mas relevante al proyecto corresponde a la falla AR-16 [1], El Tigre, que se estima puede ser dextral/normal, con un movimiento sísmico inferior a 15.000 años y con una tasa de desplazamiento de 1 a 5 mm/año. Esta falla produjo el terremoto del 27 de Noviembre de 1894, de $M_s = 7.8$, el más grande de la historia de la República Argentina (Castano, 1996). Ver Fig.1. Esta falla ha sido clasificada como tipo A (Frau, Saragoni y otros, 2006) de acuerdo al Uniform Building Code (UBC) de 1997.

Como se puede apreciar en la Fig. 1 este sismo habría alcanzado un intensidad Mercalli modificada de IX en el lugar de emplazamiento del proyecto.

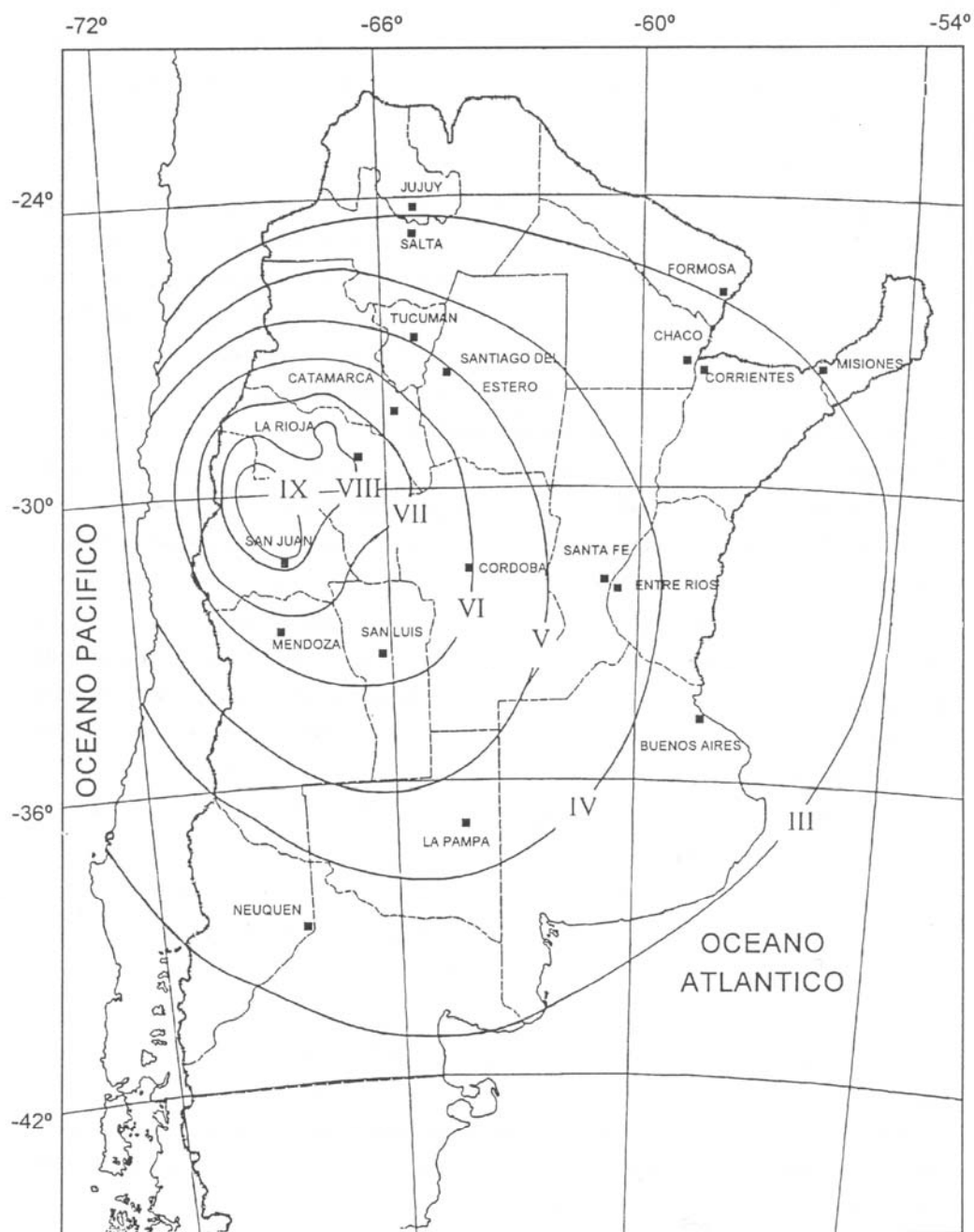


FIGURA 12: Distribución de intensidades para el terremoto del 27 de octubre de 1894.
(Castano J.C. 1993)

Figura 1



La falla que originó este terremoto es una materia discutible en atención a su carácter histórico, pues se desconoce la descripción de un escarpe con ruptura superficial durante el terremoto.

Por este motivo Castano y Araujo (1993) emplazaron el terremoto de 1894 aproximadamente a los $29,75^{\circ}\text{S}$ y $69,0^{\circ}\text{W}$, asignando una magnitud M_s de aproximadamente 7.8 a este evento. Este emplazamiento tiende a ubicar el sismo sobre la Falla de Punilla, AR-14 según lo cartografiado por Costa et al. (2000), a unos de 25 Km del proyecto.

En la consulta de INPRES, punto 2 de “Observaciones a los Aspectos Sismotectónicos del Proyecto Gualcamayo”, se solicita considerar dicho epicentro.

En este informe se considerará esa situación, no obstante que la longitud de la traza es de sólo de 28 Km (Costa et al. (2000)) y no tendría la capacidad de producir dicho sismo, como se menciona en la respuesta de Golder Associates Argentina (2007) a las consultas del INPRES.

Adicionalmente se considerará una tercera falla inversa de longitud de 40 Km de capacidad de producir un terremoto $M_s = 7.2$, con una distancia de la traza al emplazamiento del proyecto de 5 Km. Esta falla corresponde a la Falla del Frente Norte (Niquivil a Guandacol).

Esta consideración se hace no obstante la reducida tasa de desplazamiento de 0.05 a 0.23 mm/año hecha por Golder Associates (2006).

4. FUENTES SISMICAS DETERMINISTICAS DE CAMPO CERCANO.

En consecuencia, para la evaluación determinística del peligro sísmico del proyecto Gualcamayo se consideran tres fuentes sísmicas:

- Falla el Tigre (AR-16), con una magnitud $M_s = 7.8$ a 40 Km del emplazamiento del proyecto, que correspondería al origen del terremoto de 1894.
- Falla Punilla (AR-14), con una magnitud $M_s = 7.8$ a 25 Km del emplazamiento del proyecto.
- Falla del Frente Norte (Niquivil a Guandacol) con magnitud $M_s = 7.2$ a 5 Km del emplazamiento del proyecto.



5. ESTIMACION DE LAS ACELERACIONES HORIZONTALES MAXIMAS ESPERADAS.

Para la estimación de las aceleraciones máximas esperadas se consideran las fórmulas de atenuación propuestas por Abrahamson y Silva (1997) suponiendo ambos terremotos con mecanismo de falla inversa y con la ubicación del proyecto en el bloque ascendente.

	Falla	Terremoto Magnitud M_w	Distancia mas Cercana Falla [Km]	Tipo de Suelo	Aceleración Máxima Horizontal g
1	Frente Norte (Niquivil a Guandacol	7.2	5	Roca Suelo	1.13 0.72
2	Punilla	7.8	25	Roca Suelo	0.228 0.165
3	El Tigre	7.8	40	Roca Suelo	0.20 0.13

6. ESTIMACION DE LOS COEFICIENTES DE DISEÑO.

Considerando que los acelerogramas de los sismos argentinos se caracterizan por tener una intensidad de cruces por cero del orden de 10 a 15 cruces por segundo, comparado con los 6 a 7 del terremoto de Northridge California, 1994, (Ruiz y Saragoni, 2004) es posible considerar, para el cálculo de los coeficientes sísmicos a partir de la aceleración horizontal máxima las siguientes expresiones (Saragoni, 1993):

$$K_h = \begin{cases} 0.30 \frac{a_{\max}}{g} & a_{\max} \leq 660 \text{ gal} \\ 0.22 \sqrt[3]{\frac{a_{\max}}{g}} & a_{\max} > 660 \text{ gal} \end{cases}, \quad (6.1)$$

Dado que la mayor aceleración obtenida en el análisis de los terremotos de diseño considerados, corresponde a la asociada al sismo de $M_s = 7.2$ asociado a la falla del Frente Norte a 5 Km de la ubicación del proyecto, en roca, $a_{\max} = 1.13g = 1107 \text{ gal}$, se obtiene un coeficiente horizontal de diseño:

$$K_h = 0.23$$



El correspondiente coeficiente sísmico vertical de diseño puede establecerse como:

$$K_v = \frac{2}{3} K_h = \frac{2}{3} 0.23 = 0.15.$$

7. ESTIMACION DEL ESPECTRO DE RESPUESTA

A continuación se estima el espectro de respuesta de aceleración horizontal absoluta para 5% de amortiguamiento, correspondiente a la fuente sísmica extrema, esto es la falla del Frente Norte. (Niquivil a Guadacol), para un terremoto $M_w = 7.2$ a 5 Km del emplazamiento del proyecto.

Para la evaluación del espectro se han considerado las formulas de atenuación propuestas por Abrahamson y Silva (1997), suponiendo terremoto con mecanismo de falla inversa y con la ubicación del proyecto en el bloque ascendente.

En la Fig.2 se muestra los espectros de respuestas horizontales correspondientes al terremoto $M_w = 7.2$ para fundación del proyecto en roca y en suelo.



PROYECTO GUALCAMAYO
CINEMATICA DE LOS TERREMOTOS
ESPECTRO DE ACELERACION HORIZONTAL, 5%
RELACION DE ABRAHAMSON-SILVA, 1997
Drup=5km; falla inversa, bloque ascendente
PROMEDIO GEOMETRICO DE COMPONENTES HORIZONTALES

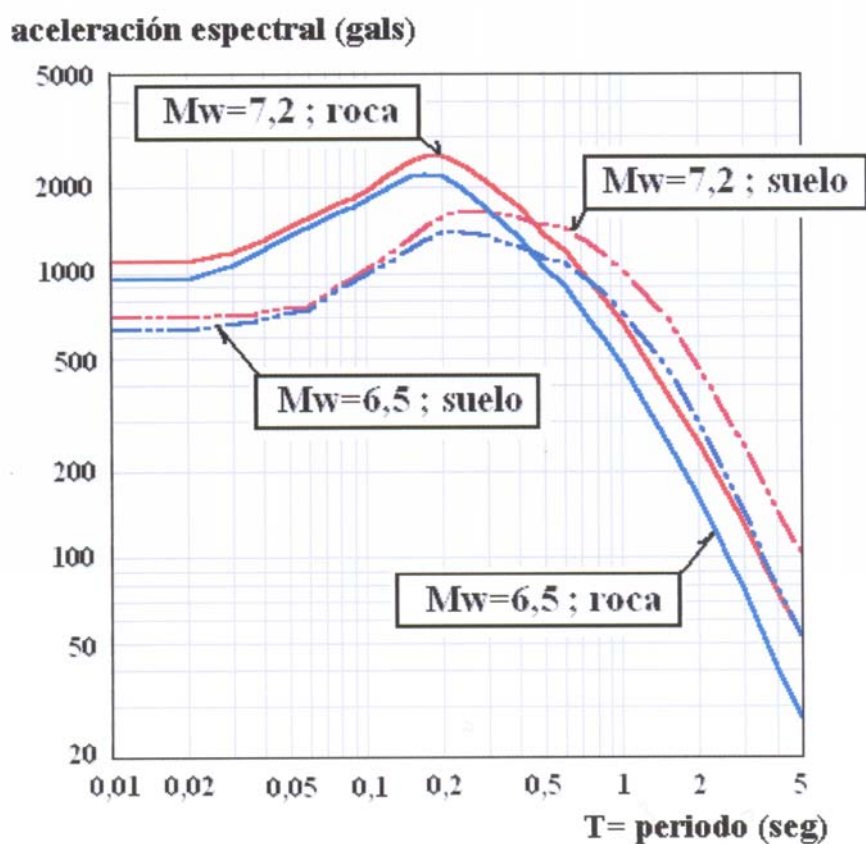


Fig.2

En esa figura se muestra además un terremoto de servicio (OBE) de $M_w = 6.2$ asociado a la misma falla y para ambos tipos de suelo de fundación.

En general los valores espectrales para un periodo natural $T_n = 1.0$ seg son inferiores a la correspondiente aceleración horizontal máxima del suelo del terremoto.

Además en la Fig.3 se presentan los espectros de respuesta de aceleración vertical absoluta para ambos tipos de terremotos y tipos de fundación.



PROYECTO GUALCAMAYO
CINEMATICA DE LOS TERREMOTOS
ESPECTRO DE ACELERACION VERTICAL ,5%
RELACION DE ABRAHAMSON-SILVA, 1997
Drup=5km; falla inversa, bloque ascendente

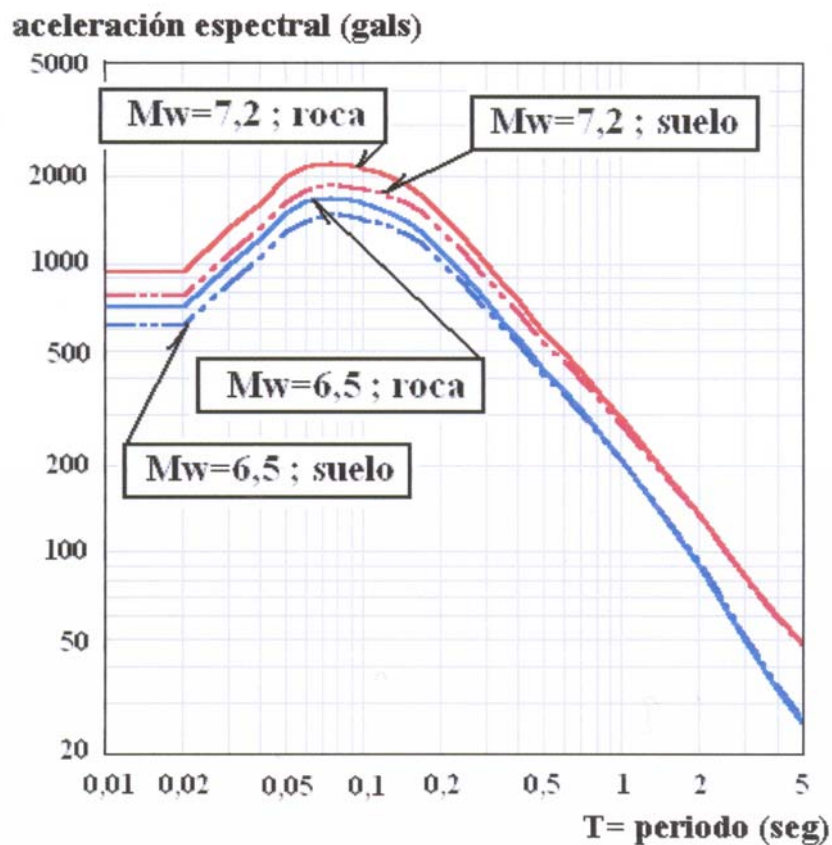


Fig. 3



8. CARACTERIZACIÓN PROBABILÍSTICA DE ACELEROGRAMAS DE MOVIMIENTO FUERTE

La caracterización de los acelerogramas se realiza en términos probabilísticos empleando el método $\alpha \beta \gamma$ propuesto por Saragoni y Hart (1974). En este capítulo, se describe el método y se definen sus parámetros relevantes.

En particular, se estima la aceleración máxima probable inducida en el sitio de interés, la duración de movimiento fuerte, la evolución de las amplitudes con el tiempo y el contenido de frecuencia de los registros.

8.1. Método $\alpha \beta \gamma$ de caracterización de movimientos sísmicos

Considerando los registros de aceleraciones de un terremoto como muestras de un proceso estocástico no-estacionario, puede demostrarse que la función cuadrática de aceleraciones del proceso tiende a una función chicuadrado del tipo (Saragoni y Hart, 1974; Saragoni, 1976):

$$E\{a^2(t)\} = \beta \cdot e^{-\alpha t} \cdot t^\gamma \quad (8.1)$$

donde:

$E\{\}$	=	valor esperado
$a(t)$	=	aceleración del suelo
t	=	tiempo
β	=	parámetro de intensidad
α, γ	=	parámetros de forma.

La función chicuadrado de la Ecuación (8.1) se caracteriza por tener dos puntos de inflexión que ocurren en los tiempos:

$$t_1^* = \frac{\gamma - \sqrt{\gamma}}{\alpha} ; \gamma \geq 1, \quad (8.2)$$

$$t_2^* = \frac{\gamma + \sqrt{\gamma}}{\alpha}. \quad (8.3)$$

El intervalo que media entre estos dos puntos de inflexión corresponde aproximadamente a la duración de movimiento fuerte Δt_s del terremoto,



$$\Delta t_s = \frac{2\sqrt{\gamma}}{\alpha} ; \gamma \geq 1. \quad (8.4)$$

Se define como "energía total" a la expresión:

$$W(t_0) = \int_0^{t_0} a^2(t) dt, \quad (8.5)$$

donde t_0 es la duración total del movimiento.

La energía total y la intensidad de Arias I_A están relacionadas a través del factor estructural $\pi/2g$ (Arias, 1967):

$$I_A = \frac{\pi}{2g} W(t_0) \quad (8.6)$$

8.2. Fórmulas de atenuación de los movimientos sísmicos registrados en suelos duros

Para la estimación de los parámetros de forma α y γ de los sismos registrados en suelos duros, se pueden emplear las siguientes fórmulas de atenuación para la duración de movimiento fuerte expresada en segundos Saragoni (1977):

$$\Delta t_s = \begin{cases} 1.26 \times 10^{-4} e^{1.51M} + 0.044MD & , D \leq 30Km \\ \frac{e^{0.80M}}{D^{0.86}} & , D \geq 30KM \end{cases} \quad (8.7)$$

donde R denota distancia epicentral en km y M_s es la magnitud de Richter.



La fórmula para la duración de movimiento fuerte (Ecuación (8.7) y valores observados en sismos pasados, junto a la suposición de $t_1^* = 3.5$ seg, permiten estimar los parámetros de forma α y γ :

$$\alpha = \frac{14}{\Delta t s^2} + \frac{2}{\Delta t s}, \quad (8.8)$$

$$\gamma = \left(\frac{7.0}{\Delta t s} + 1 \right)^2. \quad (8.9)$$

Para la estimación del parámetro de intensidad β , se pueden emplear la siguiente expresión de atenuación para la energía esperada de acelerogramas de sismos californianos, registrados en roca y suelos duros (Saragoni, (1977)).

$$E\{W_a(t_o)\} = \frac{8.71 \times 10^{-6} e^{2.77M}}{D^{0.25M}}, \quad (8.10)$$

en que M es la magnitud en la escala de Richter, D la distancia epicentral en Km, $\Delta t s$ en seg., $E\{W_a(t_o)\}$ en 10-2g2seg, α en seg-1, y γ sin dimensiones.

Así, para una magnitud y una distancia epicentral de diseño, se pueden obtener directamente los valores de los parámetros α , β y γ mediante el uso de las ecuaciones anteriores y la siguiente:

$$\beta = \frac{E\{W(t_o)\} \cdot \alpha^{(\gamma+1)}}{\Gamma(\gamma+1)}, \quad (8.11)$$

$\Gamma(x)$ es la función gama.

8.3 Función de densidad espectral y estimación del contenido de frecuencias

Para caracterizar el comportamiento del terremoto en el dominio de la frecuencia se usará un espectro de potencia $\Gamma_{ss}(\omega)$ del tipo Saragoni y Hart (1974):



$$\Gamma_{ss}(\omega) = S_o \cdot e^{-Q \cdot \omega} \cdot \omega^P, \quad \omega \geq 0, \quad (8.12)$$

donde ω es la frecuencia y los parámetros P y Q son constantes.

Las constantes P y Q pueden estimarse a partir de las siguientes ecuaciones (Rice, 1954, 1994), para las intensidades de cruces por cero por segundo, ν_o , y de máximos por segundo, ν_m :

$$\nu_o = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\int_0^\infty w^2 \Gamma_{ss}(w) dw}{\int_0^\infty \Gamma_{ss}(w) dw}}, \quad (8.13)$$

$$\nu_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\int_0^\infty w^4 \Gamma_{ss}(w) dw}{\int_0^\infty w^2 \Gamma_{ss}(w) dw}}, \quad (8.14)$$

considerando que:

$$\int_0^\infty \Gamma_{ss}(w) dw = 1, \quad (8.15)$$

se puede establecer que:

$$\nu_o = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{(P+1) \cdot (P+2)}{Q^2}}, \quad (8.16)$$

$$\nu_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{(P+3) \cdot (P+4)}{Q^2}}, \quad (8.17)$$

luego:

$$\left(\frac{\nu_o}{\nu_m} \right)^2 = 4 \cdot \frac{(P+1) \cdot (P+2)}{(P+3) \cdot (P+4)}. \quad (8.18)$$



Se ha observado que el cuociente entre el número de cruces por cero por segundo, ν_o , y el número de máximos por segundo, ν_m , depende del tipo de sismo y de la distancia epicentral. Este cuociente, en los registros de aceleraciones, varía entre 1.0 y 2.0, donde el valor 2.0 corresponde al análisis de una función sinusoidal:

$$\frac{\nu_o}{\nu_m} = 2.0. \quad (8.19)$$

8.4 Estimación de los parámetros de forma: α , β y γ

Considerando el terreno de magnitud $M_s = 7.2$ y $D = 5.0$ Km se obtiene:

$$\Delta t_s = 8.22$$

$$\alpha = 0.4505 \text{ seg}^{-1}$$

$$\gamma = 3.42$$

$$E \{ W_a(t_0) \} = 220.52 \cdot 10^{-2} g^{2\text{seg}}$$

8.5 Estimación de los parámetros espectrales: ν_o , ν_m , P y Q

Los parámetros espectrales ν_o , ν_m , P y Q caracterizan el contenido de frecuencia de las series de tiempo o registros de aceleraciones. Esta descripción considera implícitamente las características de la fuente sísmica, su distancia al sitio de emplazamiento y el efecto del suelo característico del lugar.

Una estimación de los valores de la intensidad de cruces por cero, para sismos de tipo cortical en suelo tipo roca y suelo duro, puede establecerse considerando $\nu_o = 12$ cruces/seg.

Los valores de la intensidad de cruces por cero y la estimación del cuociente ν_o/ν_m permiten establecer el valor de ν_m .

Los valores de ν_o y ν_m , reemplazados en las relaciones (8.16) y (8.17), permiten obtener los parámetros espectrales P y Q para cada sitio. La Ecuación (8.18) puede utilizarse para comprobar los cálculos.



8.6 Estimación del proceso estocástico de aceleraciones horizontales y verticales

Para la simulación de las componentes verticales se supondrá que los acelerogramas verticales pertenecen a un proceso que tiene una función cuadrática de aceleraciones promedio con coeficientes de forma iguales a las componentes horizontales, vale decir:

$$\alpha_{ver} = \alpha_{hor} \quad (8.20)$$

$$\gamma_{ver} = \gamma_{hor} \quad (8.21)$$

Para calcular la aceleración horizontal máxima, que se espera se obtengan de los registros artificiales generados, se utiliza la siguiente expresión (Saragoni, 1976):

$$E\{a_{hor\ máx}(t)\} = \left(\lambda + \frac{0.5772}{\lambda} \right) \cdot \sigma_o, \quad (8.22)$$

donde:

$$\lambda = \sqrt{2 \cdot \ln \left(\frac{\nu_o \cdot \Delta t_s}{2} \right)} \quad (8.23)$$

y

$$\sigma_o = \sqrt{\beta} \cdot \left(\frac{\gamma}{\alpha} \right)^{\gamma/2} \cdot e^{-\gamma/2}. \quad (8.24)$$

Suponiendo que, para los terremotos se cumple que la razón entre la aceleración vertical máxima y la horizontal máxima para las componentes de un terremoto real es aproximadamente:

$$\frac{a_{ver}}{a_{hor}} = 0.66, \quad (8.25)$$

y como los valores de ν_o , α y γ son los mismos (Ecuaciones (8.13), (8.8) y (8.9)), tanto para las componentes horizontales como las verticales, se obtiene:



$$\frac{E\{a_{ver}\}}{E\{a_{hor}\}} = \sqrt{\frac{\beta_{ver}}{\beta_{hor}}} = 0.66, \quad (8.26)$$

luego:

$$\beta_{ver} = 0.436\beta_{hor}. \quad (8.27)$$

9. ACELEROGRAMAS ARTIFICIALES

En la Fig. 4 se muestra una muestra de acelerograma artificial, para ser empleado en el diseño del proyecto.



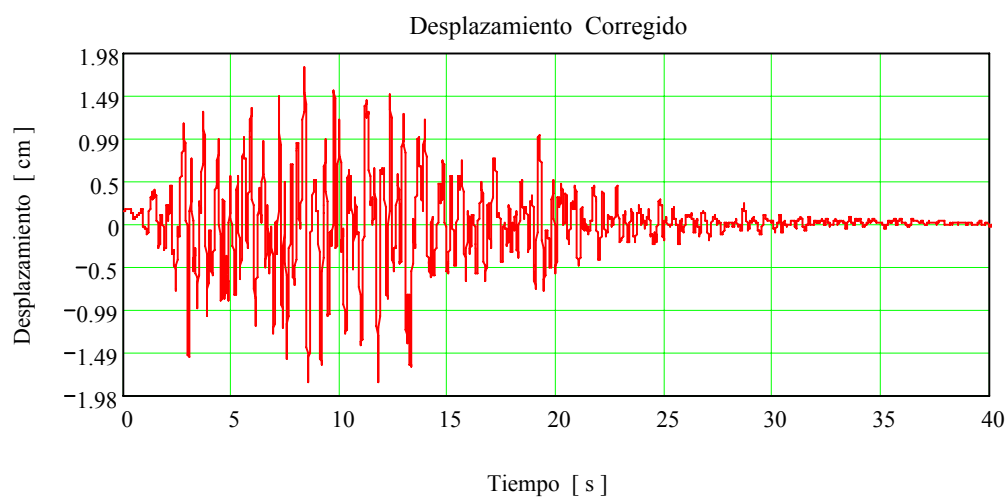
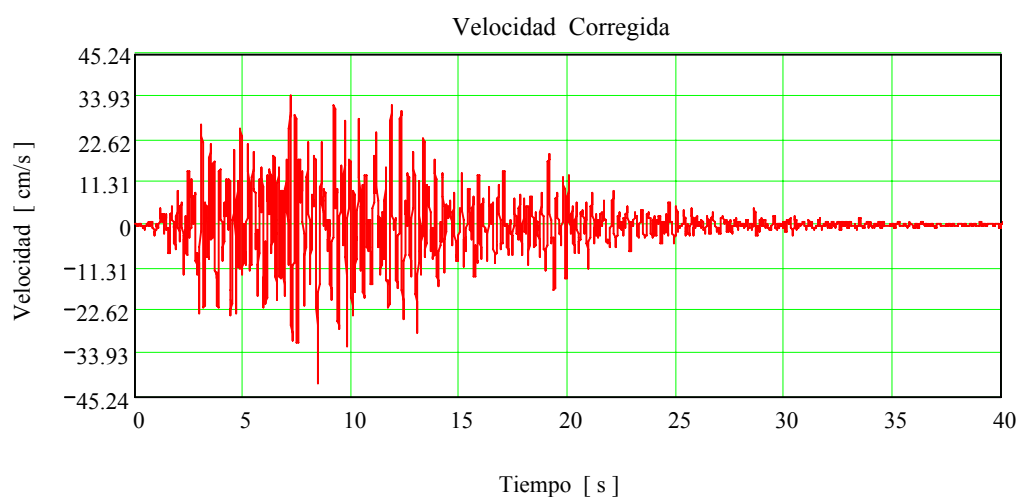
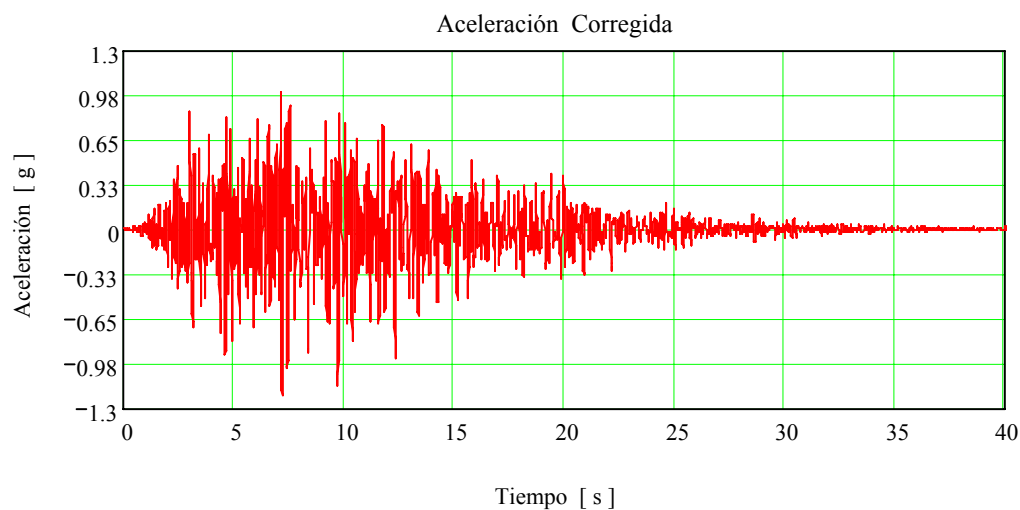
S y S Ingenieros Consultores Ltda.

Nueva de Lyon 072 of. 1801. Providencia. Código Postal 751-0078 Stgo. Chile.

Fono: 56-2-2318406. Fax: 56-2-3347194 e-mail: info@sysingen.cl

Rodolfo Saragoni H.

Mauricio Sarrazin A.





REFERENCIAS

1. Abrahamson, N.A. and W. J. Silva, "Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes", Seismological Research Letters, Vol. 68. N.1, pp. 94-127, Jan/Feb.1997.
2. Arias, A.(1967). "A Measure of Earthquake Intensity". Massachusetts Institute of Technology. Cambridge.
3. Costa, C., M.N. Machette, R.L. Dart, H.E. Bastias, J.D. Paredes, L. P. Perucca, G.E. Tello and K.M. Haller, "Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Argentina, Open File Report 00-0108, U.S. Geological Survey, 2000.
4. Castano, V., "Evaluación del impacto Socio-Económico que produciría en la Provincia de San Juan, un terremoto de características similares al del 27 de Octubre de 1894". Trabajo Final de Licenciatura, Depto. Geofísica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, 1996.
5. Castano, J.C. and Araujo, M.A., "Seismogenic Sources and Regional Tectonic Stresses in the Subandean Torne of Major Seismic Hazard of Argentina: Second ISAG, Oxford, U.K. September 21, 23, 1993. p. 63-66.
6. Frau, C.D., R. Saragoni, L. Torres, C. Contreras, A. Figueroa y E. Brandolin, "Regiones Cercanas a Fallas Activas para la Zona Sísmica 4 de la República Argentina", Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería, EsIDI 2006, Mendoza, Argentina, 2006.
7. Golder Associates Inc. "Earthquake Ground Motions for Seismic Design. Gualcamayo Mine Project. San Juan, Argentina. V61-A13003, August 2006.
8. Golder Associates Argentina S.A. "Respuesta a los Comentarios Efectuados por integrantes de INPRES, Relacionados con las "observaciones sobre Aspectos Sismotectónicos del Proyecto Gualcamayo" y "observaciones sobre la Metodología Empleada para la Evaluación de la Peligrosidad Sísmica en el Proyecto Gualcamayo", Mayo 2007.
9. Rice, S.O. 1954. "Mathematical Analysis of Random Noise". Bull System Technical Journal. J.23. 282-334.
10. Rice, S.O. 1994. "Mathematical Analysis of Random Noise". Selected Papers on Noise and Stochastic Processes, edit by N. Wax, pp. 133-204, Dover Publications, Inc., New York.
11. Saragoni, G.R. and G.C. Hart. 1974. "Simulation of Artificial Earthquakes". Earthquakes Engineering and Structural Dynamics, Vol.2, N°3, pp. 249-267.
12. Saragoni, G.R. 1976. "El Método $\alpha \beta \gamma$ para la caracterización de los Movimientos Sísmicos", 2das Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Julio 1976, Santiago, Chile.
13. Saragoni, G.R. 1977. "The $\alpha \beta \gamma$ Method for the Characterization of Earthquake Accelerogram". 6th World Conference on Earthquake Engineering, New Delhi, India, January 1977.
14. Saragoni, G.R. "Análisis del Riesgo Sísmico para la Reconstrucción del Puerto de Valparaíso", 6tas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Vol II, pp. 165-178, Santiago, Chile, 1993.



S y S Ingenieros Consultores Ltda.

Nueva de Lyon 072 of. 1801. Providencia. Código Postal 751-0078 Stgo. Chile. Rodolfo Saragoni H.
Fono: 56-2-2318406. Fax: 56-2-3347194 e-mail: info@sysingen.cl Mauricio Sarrazin A.

15. Ruiz, S. y G.R. Saragoni. “Caracterización de los Accelerograms y Terremotos Sudamericanos”, XXXI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Mendoza, Argentina, Mayo 2004.