

APÉNDICE J – EVALUACIÓN DE RIESGOS SÍSMICO



MEMORANDO TÉCNICO

FECHA September 19, 2018

Proyecto N° 189 415 1133

PARA Miguel Angel Estela Diaz - Minera Yanacocha SRL, Perú
Newmont Mining Corp.

CC Alan Hull, Golder Associates Inc. (GAI-USA)

DE Marcelo Martínez, Golder Associates
Sudamérica

e-mail: mmartinez@golder.com

REGISTROS SÍSMICOS DE ACELERACIÓN PARA LOS DEPÓSITOS DE RELAVES BACKFILL LA QUINUA (LQ) Y FASE NORTE 2; MINA YANACOCCHA, PERÚ.

1.0 INTRODUCCIÓN

El presente documento provee una descripción detallada sobre la metodología empleada y los resultados obtenidos durante el proceso de generación de los registros sísmicos de aceleración (RSA) desarrollados para los depósitos de relaves emplazados en el complejo minero Yanacocha, ubicado en el Dpto. Cajamarca, norte de Perú.

Golder Associates (Golder) entiende que Knight Piésold (KP) se encuentra desarrollando la estabilidad sísmica y los análisis de deformación dinámica para tres Depósitos de Relaves (TSF, del inglés *Tailings Storage Facility*) en el área de la Mina Yanacocha. Mediante reuniones vía teleconferencia mantenidas entre los equipos de Newmont (Yanacocha), Golder y KP (25 de julio, 01 y 08 de agosto, 2018), se evaluaron los resultados del estudio de peligro sísmico específico de sitio y los RSA desarrollados por Golder para el sitio del TSF Pampa Larga (Golder 2018) y como adaptarlos al análisis de estabilidad sísmica bajo desarrollo por parte de KP.

Los parámetros sísmicos y los RSA específicos del sitio preparados para el TSF Pampa Larga (Golder 2018), se emplearon para generar otros dos conjuntos de RSA para los depósitos TSF ubicados en el área de la Mina Yanacocha. Dichos depósitos son:

- TSF Backfill La Quinua (LQ) - emplazado en coordenadas: 6.992° Lat. Norte y 78.529° Long. Oeste; y
- TSF LQ Fase Norte 2 - emplazado en coordenadas: 6.991° Lat. Norte y 78.568° Long. Oeste.

Golder entiende que, además del diseño de los depósitos TSF, el presente documento se requiere como parte del proceso de permisos para analizar las modificaciones del impacto ambiental de las instalaciones TSF Backfill LQ y TSF LQ Fase Norte 2.

Golder (2018) desarrolló un análisis de peligro sísmico específico del sitio probabilístico (PSHA, del inglés, *Probabilistic Seismic Hazard Assesment*) y determinístico (DSHA, del inglés, *Deterministic Seismic Hazard Assesment*) en la zona del depósito TSF Pampa Larga (emplazado en coordenadas geográficas: 6.986° Latitud Norte y 78.504° Longitud Oeste) del sitio de Mina Yanacocha.

A partir del estudio desarrollado, Golder (2018) presentó espectros de respuesta de aceleración horizontal de peligro uniforme (UHRS, del inglés, *Uniform Hazard Response Spectra*) específico del sitio, probabilísticamente

estimados para diferentes periodos de retorno. El estudio también incluyó los espectros de respuesta específicos del sitio del Sismo Máximo Creíble (MCE, del inglés, *Maximum Credible Earthquake*) determinísticamente estimados para el percentil 50 (mediana) y el percentil 84. Los parámetros sísmicos provistos fueron desarrollados para condiciones de sitio con una velocidad promedio de ondas de corte en los 30 m superiores (es decir, $V_{s,30}$) de 525 m/s, conforme los resultados de los estudios geotécnicos desarrollados.

Con base en la ubicación de los nuevos depósitos TSF a evaluar con respecto a la traza de la falla La Quinua, Golder definió también los espectros de respuesta determinísticos de aceleraciones en la zona de los TSF Backfill La Quinua (LQ) y TSF Fase Norte 2, asociados con el MCE para la mediana y el percentil 84. Es de significativa importancia definir con el mayor grado de precisión posible, la ubicación relativa de los depósitos a evaluar respecto del bloque móvil de la falla La Quinua (en inglés, *hanging-wall*) o del bloque de piso (en inglés, *foot-wall*), pues los resultados varían sensiblemente. En el presente memorando técnico, estos espectros de respuesta de aceleraciones horizontales fueron adoptados como espectros “objetivo” (target) para el desarrollo de los RSA para los TSFs Backfill La Quinua (LQ) y Fase Norte 2.

El presente Memorando Técnico complementa los estudios PSHA y DSHA realizado por Golder (2018) para el sitio del depósito TSF Pampa Larga emplazado en la Mina Yanacocha. Asimismo, describe la selección e identificación de acelerogramas base (seed), el desarrollo del espectro objetivo (target) y el desarrollo de los RSA a través del método del ajuste espectral. Los acelerogramas ajustados espectralmente han de ser empleados en el proceso de análisis de deformación dinámica de los depósitos TSF Backfill La Quinua (LQ) y Fase Norte 2.

2.0 RESUMEN EJECUTIVO Y CONCLUSIONES

Conforme lo requerido por Newmont, se requieren desarrollar los análisis de deformación dinámica para dos de los depósitos TSF en la Mina Yanacocha. Los alcances del estudio para la generación de los RSA requeridos como información de entrada en el análisis dinámico, se detallan a continuación:

- **TSF Backfill La Quinua (LQ):** Se requirieron cinco acelerogramas en las dos componentes horizontales (es decir, 10 RSA) ajustados espectralmente respecto del espectro de respuesta de peligro sísmico uniforme (5% de amortiguamiento) para 2 475 años de periodo de retorno, conforme la evaluación probabilística del peligro sísmico específico de sitio desarrollado por Golder (2018).
- **TSF La Quinua Fase Norte 2:** Se requirieron cuatro acelerogramas en las dos componentes horizontales ajustados espectralmente respecto del espectro de respuesta determinístico para el percentil 50 y 84 del MCE (es decir, 16 RSA) asociado con las fuentes sismogénicas de subducción de la intraplaca de Nazca y la fuente sísmica de corteza, asociada con la falla La Quinua (Figuras 1 y 2).

Los 26 acelerogramas arriba descritos se generaron a partir de registros sísmicos de movimiento asociados con los sismos de subducción de contacto interplaca, la fuente de la intraplaca de Nazca, y los sismos por fallas de corteza. Los espectro de aceleraciones finales provenientes del ajuste espectral se encuentran dentro del 90% al 110% del espectro objetivo (target), para el intervalo de periodo de interés en cada sitio de análisis. Los acelerogramas proporcionados se ajustaron espectralmente para una condición de sitio de $V_{s,30} = 525$ m/s.

Las principales características de los acelerogramas ajustados espectralmente son:

2.1. TSF Backfill La Quinoa (LQ)

- Para este sitio, los acelerogramas seleccionados que mejor ajuste espectral presentaban se seleccionaron a partir de los sismos de subducción de contacto interplaca (ej. 2001-**M8.4** Atico, Perú y 2010-**M8.8** Maule, Chile), los sismos de subducción intraplaca (2017-**M8.2** Tehuantepec, México) y los sismos de corteza (1999-**M7.7** Chi Chi, Taiwan y 1992-**M7.3** Landers, EEUU). Los acelerogramas del terremoto de Chi-Chi (1999) se registraron en un sitio cercano a la falla y tienen pulsos de velocidad significativos (efecto de campo cercano);
- Los 10 RSA proporcionados para este sitio se han ajustado espectralmente al rango de periodos de interés de entre 0.01 s (típicamente considerado como la aceleración máxima del terreno [PGA]) hasta los 4.0 s (Figura 3). El ajuste espectral se desarrolló considerando 20 periodos espectrales por cada paso de análisis (intervalo espectral comprendido en un múltiplo de 10, ej. entre 0,01 s y 0,1 s);
- Los espectros de los acelerogramas ajustados espectralmente concuerdan razonablemente bien con el espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 2 475 años dentro del intervalo de periodos de interés. El espectro ajustado varía dentro de $\pm 10\%$ del espectro objetivo (Figura 3), conforme lo requerido por el estándar internacional de práctica aplicado en Perú;
- Los factores de escala varían de 1.3 a 3.4 (Tabla 6);
- Los valores inferiores (percentil 16) y superiores (percentil 84) de la duración de la faz intensa 5%-95%, para un sismo de intraplaca en este sitio, se encuentran entre 26 s y 76 s, respectivamente. Los acelerogramas de los sismos de intraplaca tienen una duración de faz intensa ubicado entre los valores del percentil 16 y la mediana, según lo estimado conforme la ecuación de Abrahamson y Silva (1996) (Tablas 5 y 6);
- Los valores inferiores y superiores para las duraciones significativa 5%-95% del movimiento sísmico de los sismos de contacto interplaca seleccionados se encuentran entre 44 s y 56 s, cercano a los valores de duración del percentil 16, estimados usando la expresión de Abrahamson y Silva (1996) (Tablas 5 y 6);
- Los sismos de contacto interplaca asociados con 2010-**M8.8** Maule (Chile) y 2001-**M8.4** Atico (Perú) presentan las fases intensas más significativas, considerando los límites normalizados inferior y superior del 5%-95% y los valores más altos de Intensidad de Arias (11 m/s a 25 m/s) para este sitio;
- Los desplazamientos máximos estimados varían entre 80 mm a 140 mm para los registros de sismos de contacto interplaca, de aproximadamente 230 mm a 310 mm para los registros de sismos de intraplaca, y de aproximadamente 160 mm a 340 mm para registros de sismos de corteza (Tabla 6); y
- Las características no estacionarias de los RSA asociados con los registros de aceleración, velocidad y desplazamiento de los acelerogramas bases (seed), presentan un adecuado nivel de ajuste y se mantienen razonablemente bien, como se muestra en las Figuras 12 a 21 (Anexo 1).

2.2. TSF Fase Norte 2

- Los acelerogramas para este sitio se seleccionaron a partir de sismos de subducción intraplaca (es decir, 2001-**M7.6** El Salvador y 2005-**M7.8** Tarapaca, Chile), y de los sismos de corteza (1999-**M7.7** Chi Chi, Taiwán, y 2004-**M6.6** Niigata, Japón). Los acelerogramas de Chi-Chi se registraron en un sitio cercano a la falla y presentan pulsos de velocidad, características de los sismos con efecto de campo cercano;
- El ajuste espectral se desarrolló considerando 20 periodos espectrales por cada paso de análisis (intervalo espectral comprendido en un múltiplo de 10, ej. entre 0,01 s y 0,1 s), distribuidos equitativamente en escala logarítmica. Las formas de los espectros de los 16 acelerogramas ajustados espectralmente concuerdan bien con la espectros de respuesta objetivo de sismos de intraplaca y corteza para la mediana y el percentil 84 del MCE, en el rango de periodos espectrales de interés (es decir, 0.1 s a 4.0 s) para el sitio de análisis. La variación de las aceleraciones espectrales ajustadas se encuentran dentro de $\pm 10\%$ de la envolvente máxima que representa el espectro objetivo (Figuras 4 y 5);
- Los factores de escala varían entre 0.6 a 1.5 para el espectro en la mediana y entre 1.1 y 3.2 para el espectro del percentil 84 (Tablas 7 y 8);
- El valor inferior (percentil 16) y superior (percentil 84) de la faz intensa del movimiento dado por el 5%-95% para el MCE dominante es de 24 s y 38 s, respectivamente. Los acelerogramas seleccionados para los sismos de intraplaca mostraron una duración de faz intensa asociado con los valores de percentil 16 y la mediana, conforme la expresión empírica de Abrahamson y Silva (1996) (Tablas 5, 7 y 8);
- Los desplazamientos máximos estimados varían de entre 80 mm a 200 mm, aproximadamente, para los registros ajustados a la mediana del MCE, y de entre 130 a 370 mm para los registros ajustados al percentil 84 del MCE (Tablas 7 y 8);
- Los registros sísmicos del sismo de intraplaca 2005 **M7.8** Tarapaca-Chile presentan las duraciones de faz intensa 5%-95% más largas y los valores de intensidad de Arias más altos (3 m/s a 14 m/s) para ambos espectros de respuesta objetivo, mediana y percentil 84, del MCE; y
- Las características no estacionarias de aceleración, velocidad y desplazamiento de los RSA ajustados espectralmente de los registros de sismos de intraplaca y corteza seleccionados para este sitio, se mantienen adecuadamente respecto de los acelerogramas originales. En las Figuras 16 a 23 (Anexo 1) se presentan las gráficas asociadas con los RSA ajustados espectralmente al espectro para el MCE percentil 84. Las formas espectrales que arrojan los acelerogramas aspcoados con el MCE mediana , son similares a los del MCE percentil 84.

3. REQUERIMIENTOS DE ACELERACIÓN PARA DISEÑO

Las Tablas 1, 2 y 3 y las Figuras 1 y 2, muestran debajo los parámetros sísmicos, aceleraciones espectrales y requerimientos técnicos adicionales necesarios para desarrollar acelerogramas para los dos sitios de los depósitos TSF en estudio. Estos requerimientos se desarrollaron en coordinación con el equipo técnico de KP. El proceso de coordinación se enfocó en el intervalo de periodos de interés para cada TSF y las condiciones de suelo en el sitio de $V_{s,30} = 525$ m/s. Los parámetros adoptados para generar los acelerogramas en el TSF Pampa Larga (Golder 2018) se incluyen también con fines de comparación.

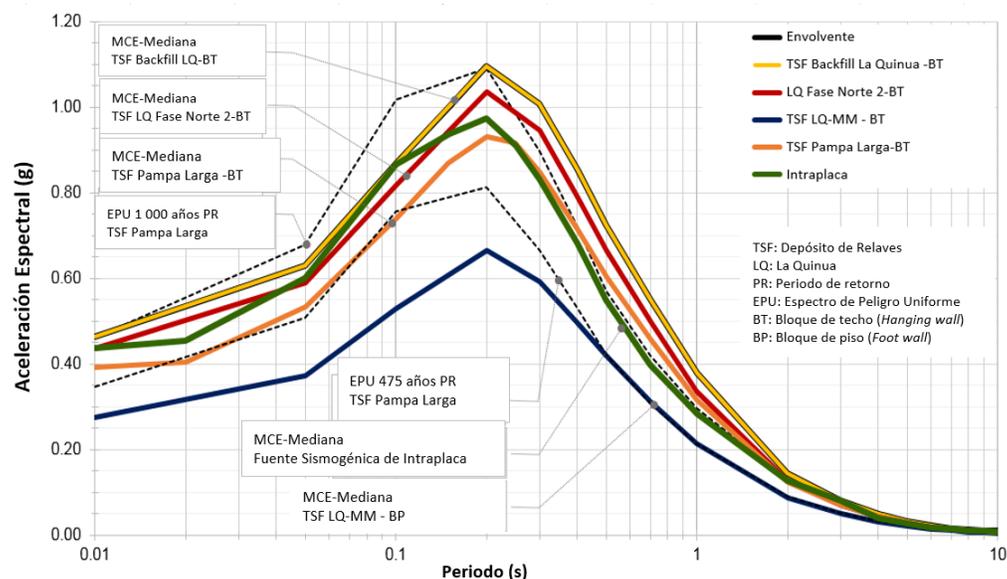


Figura 1: Espectro de respuesta de aceleraciones para la mediana del DSHA-MCE y envolvente máxima para la zona de los TSF en la Mina Yanacocha, para condiciones de sitio de $V_{s,30} = 525$ m/s.

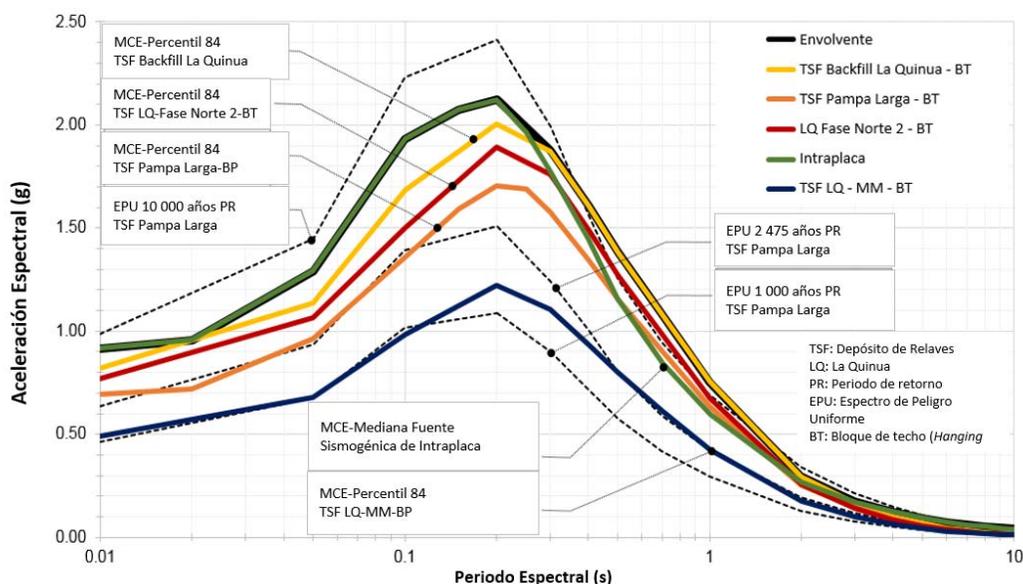


Figura 2: Espectro de respuesta de aceleraciones para el percentil 84 del DSHA-MCE y envolvente máxima para la zona de los TSF en la Mina Yanacocha, para condiciones de sitio de $V_{s,30} = 525$ m/s.

Tabla 1: Parámetros clave para el desarrollo de los acelerogramas sintéticos en los depósitos TSF para la Mina Yanacocha. Cajamarca, Perú.

	Parámetro	TSF Pampa Larga (PL) ⁽¹⁾	TSF Backfill La Quinua (LQ)	TSF Fase Norte 2
	Distancia a la traza de la falla La Quinua ⁽²⁾ (km) =	2.4	0.4	3.6
	Ubicación con respecto a la geometría de la falla de La Quinua =	Bloque de piso de la falla	Bloque móvil de la falla	Bloque móvil de la falla
Mediana	Fuente sismogénica dominante en el espectro MCE (dependiente de T_s) (Figura 1) =	$T_s \leq 0.3$ s: Intraplaca Superior $T_s > 0.3$ s: Falla LQ	Falla LQ para todo el rango de periodos espectrales	$T_s \leq 0.1$ s: Intraplaca Superior $T_s > 0.1$ s: Falla LQ
	Periodo de retorno equivalente (años) del PSHA (Figura 1) =	≈ 500 to 1 000+	≈ 1 000 to 2 500+	≈ 1 000 to 2 500+
Percentil 84	Fuente sismogénica dominante en el espectro MCE (dependiente de T_s) (Figura 2) =	$T_s \leq 0.5$ s Intraplaca Superior $T_s > 0.5$ s Falla LQ	$T_s \leq 0.3$ s Intraplaca Superior $T_s > 0.3$ s Falla LQ	$T_s \leq 0.3$ s Intraplaca Superior $T_s > 0.3$ s Falla LQ
	Periodo de retorno equivalente (años) del PSHA (Figura 2) =	≈ 2 500 to 8 000+	≈ 5 000 to 10 000+	≈ 5 000 to 10 000+

Notas

1. Parámetros sísmicos del estudio de Golder (2018).
2. La magnitud preferente para la falla La Quinua es **M6.5** (Golder 2018).

Acrónimos:

DSHA: Análisis determinístico de peligro sísmico
 LQ: La Quinua.
 MCE: Sismo Máximo Creíble.
 PL: Pampa Larga.
 PSHA: Análisis probabilístico de peligro sísmico.
 T_s : Periodo espectral (s).

Tabla 2: Aceleraciones espectrales del MCE para la mediana y el percentil 84 para la Fuente Sismogénica de Subducción Intraplaca y falla de corteza La Quinua en los TSF Pampa Larga, Backfill La Quinua (LQ) y Fase Norte 2. Condición de sitio $V_{s,30} = 525$ m/s. Golder (2018)

Periodo espectral (s)	Aceleraciones Espectrales, Mediana (g)				Aceleraciones Espectrales, Percentil 84 (g)			
	Fuente Sismogénica Intraplaca ⁽¹⁾	Falla La Quinua			Fuente Sismogénica Intraplaca ⁽¹⁾	Falla La Quinua		
		TSF Pampa Larga ⁽¹⁾	TSF Backfill La Quinua (LQ)	TSF Fase Norte 2		TSF Pampa Larga ⁽¹⁾	TSF Backfill La Quinua (LQ)	TSF Fase Norte 2
PGA	0.44	0.39	0.46	0.44	0.92	0.70	0.82	0.77
0.1	0.87	0.74	0.87	0.82	1.93	1.36	1.69	1.50
0.2	0.97	0.93	1.10	1.04	2.12	1.71	2.01	1.90
0.3	0.83	0.85	1.01	0.94	1.78	1.58	1.87	1.76
0.4	0.68	0.72	0.85	0.79	1.45	1.35	1.61	1.50
0.5	0.55	0.61	0.72	0.66	1.16	1.16	1.38	1.27
0.7	0.40	0.46	0.55	0.50	0.84	0.90	1.08	0.98
1.0	0.28	0.32	0.38	0.34	0.60	0.63	0.75	0.67
2.0	0.13	0.12	0.15	0.13	0.27	0.25	0.29	0.26
3.0	0.08	0.07	0.08	0.07	0.17	0.14	0.17	0.14
4.0	0.06	0.04	0.05	0.04	0.09	0.09	0.10	0.08
5.0	0.05	0.03	0.03	0.03	0.06	0.06	0.07	0.06

Notas:

1. Aceleraciones espectrales del MCE de Golder (2018).

Tabla 3: Requerimientos Técnicos para el Desarrollo de los Acelerogramas en las áreas de los Depósitos de Relave de Yanacocha. Cajamarca, Perú.

Item	TSF Pampa Larga (PL)	TSF Backfill La Quinua (LQ)	TSF Fase Norte 2
1. Requisitos del acelerograma	Ajustado espectralmente al espectro de respuesta del percentil 84 del DSHA-MCE.	Ajustado espectralmente al Espectro de Peligro Uniforme para 2 475 años de periodo de retorno.	Ajustado espectralmente a los espectros objetivo (ver item 3 líneas abajo).
2. Número de acelerogramas requeridos por KP	6 acelerogramas, de 2 componentes horizontales, para un nivel de sismo (percentil 84), esto es, 12 RSA.	3 acelerogramas, de 2 componentes horizontales, para un nivel de sismo, el espectro de peligro uniforme para 2 475 años de periodo de retorno, es decir, 6 RSA en total.	4 acelerogramas, de 2 componentes horizontales, para 2 niveles de sismo (percentil 50 y 84), esto es, 16 RSA.
3. Espectro objetivo	Envolvente máxima del espectro de respuesta del percentil 84 del DSHA-MCE del TSF Pampa Larga (PL) (Golder, 2018).	Espectro de peligro uniforme para 2 475 años de periodo de retorno calculado para el TSF PL.	Espectros de respuesta para la mediana y el percentil 84 del DSHA-MCE del análisis de peligro sísmico en el TSF Fase Norte 2 (intraplaca y corteza).
4. Registros sísmicos base	6 sismos de intraplaca.	1 sismo de interfaz, 1 sismo de intraplaca y 1 sismo de corteza.	2 sismos de intraplaca y 2 sismos de corteza.
5. Rango de periodos espectrales de interés	$PGA \leq T_s \leq 4.0 \text{ s}$	$PGA \leq T_s \leq 4.0 \text{ s}$	$0.1 \text{ s} \leq T_s \leq 4.0 \text{ s}$
6. Condición de sitio	$V_{s,30} = 525 \text{ m/s}$	$V_{s,30} = 525 \text{ m/s}$	$V_{s,30} = 525 \text{ m/s}$
7. Producto Final	Para el percentil 84 del MCE: - 6 acelerogramas ajustados espectralmente desde sismos de intraplaca en dos componentes horizontales (Golder, 2018).	Para el espectro de peligro uniforme de 2 475 años de periodo de retorno (Golder 2018): - 1 acelerograma ajustado espectralmente a partir de un sismo de contacto interplaca en sus dos componentes horizontales (es decir, 2 RSA); - 1 acelerograma ajustado espectralmente a partir de un sismo de intraplaca en sus dos componentes horizontales (es decir, 2 RSA), y - 1 acelerograma ajustado espectralmente a partir de un sismo de corteza en sus dos componentes horizontales (es decir, 2 RSA). (Golder incluyó además 2 conjuntos adicionales de acelerogramas por las características particulares del área en análisis, proporcionando así un total de 10 RSA, Sección 4.3.).	Para la mediana del MCE: - 2 RSA ajustados espectralmente desde un sismo de intraplaca, en las dos componentes horizontales; y - 2 RSA ajustados espectralmente desde sismos de corteza, en las dos componentes horizontales. Para el percentil 84 del MCE: - 2 RSA ajustados espectralmente desde sismos de intraplaca, en dos componentes horizontales, y - 2 RSA ajustados espectralmente desde sismos de corteza, en las dos componentes horizontales.

4. PROCESO DE OBTENCIÓN DE LOS RSA PARA LOS DEPÓSITOS TSF BACKFILL LA QUINUA (LQ) Y TSF FASE NORTE 2

4.1. Ajuste espectral

Esta sección describe el procedimiento general de ajuste espectral y la selección y procesamiento de los registros sísmicos de movimiento base (seed) adoptados para los TSF Backfill La Quinua (LQ) y Fase Norte 2 (Tabla 3). El proceso de modificar el registro de un sismo real hasta que su espectro de respuesta de aceleración coincida lo más fielmente posible con el espectro de respuesta objetivo (target) se conoce como "ajuste espectral". El objetivo del ajuste espectral es reducir quiebres espectrales individuales que arrojan los acelerogramas base (seed), al tiempo que conserven sus características no estacionarias (ej. Abrahamson 1992). El enfoque de ajuste espectral adoptado para este estudio utiliza el método de ajuste en el dominio del tiempo desarrollado por Lilhanand y Tseng (1988); y modificado luego por Abrahamson (1992), Hancock et al. (2006), y Al Atik y Abrahamson (2010).

El ajuste espectral en el dominio del tiempo incorpora artificios matemáticos que se traducen en ajustes ondulatorios (ondículas) definidos en el dominio del tiempo y que permiten mejorar las deficiencias espectrales del acelerograma base. Dichas ondículas introducen menos energía en el acelerograma del espectro objetivo y conservan las características no estacionarias del acelerograma base (Hancock et al. 2006). Para el ajuste espectral de este estudio, se utilizó el programa RSPMatch09 desarrollado por Al Atik y Abrahamson (2010) y publicado por Fouad y Rathje (2012).

4.2. Selección de Acelerogramas Base (Seed)

Los acelerogramas base típicamente se seleccionan para cumplir con los criterios de magnitud-distancia basados en los resultados de desagregación, como los reportados en Golder (2018). Los criterios de selección generalmente incluyen también el tipo de falla, directividad de la ruptura y condiciones de sitio. Bommer y Acevedo (2004) y Abrahamson (2011) sugieren también que al seleccionar los acelerogramas base para el ajuste espectral, los parámetros clave del sismo que afectarán el carácter no estacionario de la forma de las ondas son la magnitud, la distancia de la fuente al sitio y la dirección de ruptura para sitios ubicados cerca de grandes fuentes sismogénicas.

Para la magnitud del sismo, los registros deberían estar idealmente dentro de 0.5 unidades de magnitud respecto del sismo de diseño seleccionado (por ejemplo, la magnitud media de los resultados de la desagregación). Para la selección de la distancia de la fuente al sitio, la proximidad a la fuente sismogénica generalmente es importante, aunque no siempre se cuentan con registros de sismos reales que cumplan con este apartado. Normalmente las distancias se seleccionan para tener un intervalo de características no estacionarias de varios movimientos inducidos por múltiples sismos.

Abrahamson (2011) sostiene además que encontrar un acelerograma con la misma estructura de falla que el sismo de diseño seleccionado no es del todo relevante. De manera similar, la condición del terreno subsuperficial de los acelerogramas base también es menos relevante en el ajuste espectral, debido a que el proceso corrige intrínsecamente las diferencias en el contenido de frecuencias entre las condiciones de sitio de los acelerogramas base y las del espectro de respuesta de aceleración objetivo (Al Atik y Abrahamson, 2010).

Sobre la base de los análisis de desagregación por fuente sismogénica y magnitud-distancia (Golder, 2018), los acelerogramas base para este estudio se seleccionaron a partir fuentes sismogénicas de sismos de subducción de contacto interplaca e intraplaca, los cuales contribuyen más en los análisis de desagregación realizados en la zona de los sitios en análisis.

Sin embargo, la presencia de la falla La Quinua, con potencial sismogénico, dentro de la Mina Yanacocha sugiere que los acelerogramas base de fuentes de corteza también son necesarios en la consideración para este sitio. La Tabla 4 enumera la contribución de cada tipo de fuente sismogénica de sismos de subducción y los sismos por falla de corteza, en los conjuntos de acelerogramas generados para la zona de los TSF Backfill La Quinua (LQ) y TSF Fase Norte 2.

La Tabla 4 muestra la contribución relativa de las fuentes sismogénicas seleccionadas conforme los alcances del trabajo acordados con Newmont (Yanacocha) y KP para este estudio, según lo descrito en la Tabla 3 precedente.

Tabla 4: Contribución Relativa de Acelerogramas según Fuente Sismogénica, para los TSF Mina Yanacocha.

Zona	Nivel de Sismo de Diseño	Número de Registros		
		Subducción de Interfaz	Subducción de Intraplaca	Corteza
TSF Fase Norte 2	Percentil 50 del MCE ⁽¹⁾	---	2	2
	Percentil 84 del MCE ⁽²⁾	---	2	2
TSF Backfill La Quinua (LQ)	Espectro de peligro uniforme para 2 475 años de periodo de retorno ⁽³⁾	2 ⁽⁴⁾	1	2 ⁽⁴⁾

Notas

DSHA: Análisis Determinístico de Peligro Sísmico.

MCE: Sismo Máximo Creíble.

1. Espectros de respuesta de la mediana del MCE para fuentes sismogénicas de corteza y de intraplaca como se muestra en la Figura 1 de este informe.
2. Espectros de respuesta del percentil 84 del MCE para fuentes sismogénicas de corteza y de intraplaca como se muestra en la Figura 2 de este informe.
3. Espectro de Peligro Uniforme para un periodo de retorno de 2 475 años (Figura 9 y Tabla 7; Golder 2018). Cada una de las fuentes sismogénicas contribuye al espectro de peligro uniforme objetivo como se indica en los análisis de desagregación sísmica.
4. Para complementar el análisis, se agregó un sismo de interfaz y un sismo de corteza con pulsos de velocidad, a los requerimientos preliminares (es decir, como se indica en la Tabla 2 para la zona del TSF Backfill La Quinua (LQ). Ver la Sección 4.3 de este documento.

Los acelerogramas base (seed) de cada sismo se obtuvieron a partir de registros de terremotos reales ocurridos y disponibles en agencias locales, regionales y globales, como la Universidad Nacional de Ingeniería de Perú (UNI), la Universidad de Chile, las Redes de Sismógrafos de Movimiento Fuerte de Japón (K-net, KiK-net), la UNAM (Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México), COSMOS-CESMD (Centro de Ingeniería de Datos), y las bases de datos de terremotos del PEER (NGA-West 2, sismos de corteza superficial en regímenes tectónicos activos cercanos a contacto de placas tectónicas). En algunos casos, los registros sísmicos base (seed) debieron ser filtrados y corregidos en la línea de base por parte de los profesionales de Golder para luego ser procesados y ajustados.

Una vez que el conjunto de acelerogramas base (seed) se ajustó espectralmente al espectro objetivo (target) para cada depósito TSF, se evaluaron los RSA obtenidos para obtener el conjunto final de acelerogramas sintéticos (en las dos componentes horizontales) que demostraron un mejor ajuste respecto de los espectros objetivo (target).

Se identificaron y seleccionaron así más de 30 acelerogramas base (seed) para generar los RSA resultantes para la zona de los TSF Backfill La Quinoa (LQ) y TSF Fase Norte 2. Los acelerogramas base fueron seleccionados de:

- Registros sísmicos locales de terremotos provenientes de la subducción de contacto interplaca asociados con el sismo de 2001-**M8.4** Atico (estación Moquegua) y del 2007-**M8.0** en Pisco;
- Registros sísmicos de Chile, para los sismos de interfplaca de 1985-Valparaíso **M8.0**; 2010-Maule **M8.8**; 2014-Iquique **M8.2**, y 2015-Illapel **M8.3**; y sismos de intraplaca como el de 2005-Tarapacá **M7.8**;
- Registros sísmicos obtenidos de base de datos en Latinoamérica, como los sismos de 2001-El Salvador **M7.6**, y 2017-Tehuantepec, México con magnitud **M8.2**;
- Registros de terremotos de contacto interplaca de 2011-Tohoku **M9.0** (Japón); y
- Registros sísmicos de los terremotos de corteza provistos por la base de datos del *Pacific Earthquake Engineering Research Center* (PEER).

De la Tabla 6 a la Tabla 8 se enumeran los parámetros claves de los acelerogramas base para cada nivel sísmico aplicable a los TSF Backfill La Quinoa (LQ) y TSF Fase Norte 2. El conjunto final de acelerogramas base que mejor se ajustó a los espectros objetivo para cada TSF en estudio, se seleccionó de los siguientes terremotos reales:

Para el TSF Fase Norte 2:

- 2005 **M7.8** Tarapacá, Chile. Sismo de subducción de intraplaca.
- 2001 **M7.6** El Salvador. Sismo de subducción de intraplaca.
- 1999 **M7.7** Chi Chi, Taiwan. Sismo de corteza.
- 2004 **M6.6** Niigata. Sismo de corteza.

Para el TSF Backfill La Quinoa (LQ):

- 2010 **M8.8** Maule, Chile. Sismo de subducción de interfplaca.
- 2001 **M8.4** Atico-Moquegua, Perú. Sismo de subducción de interfplaca.
- 2017 **M 8.2** Tehuantepec, México. Sismo de subducción de intraplaca.
- 1999 **M7.7** Chi Chi, Taiwan. Sismo de corteza.
- 1992 **M7.3** Landers, Southern California, US. Sismo de corteza.

4.3. Resultados del Ajuste Espectral

Las Tablas 6 a 8 enumeran los parámetros de los acelerogramas base (seed) seleccionados y los RSA ajustados espectralmente al espectro de peligro uniforme (UHRs) para 2 475 años de periodo de retorno asociado con el TSF Backfill La Quinua (LQ). Además se muestran los niveles del sismo máximo creíble (MCE) para la mediana y el percentil 84 asociado con el TSF Fase Norte 2. Los acelerogramas se ajustaron espectralmente en el intervalo de periodos de interés para los TSF de la Mina Yanacocha y para una condición de sitio de $V_{S,30} = 525$ m/s.

En las Tablas 6 a 8 también se muestran las velocidades y desplazamientos máximos obtenidos, los valores de la intensidad de Arias y la duración significativa 5%-95% (en segundos) para cada RSA ajustado.

La Tabla 3 muestra tres acelerogramas para el TSF Backfill La Quinua, uno para cada una de las tres fuentes sismogénicas (interplaca, intraplaca y falla de corteza) identificadas en el análisis de desagregación (Golder 2018). Cada acelerograma se presenta además en sus dos componentes horizontales y para el espectro de peligro uniforme de 2 475 años de periodo de retorno (es decir, seis RSA en total).

Además de los seis RSA arriba descritos (conforme lo muestra la Tabla 3), este estudio incluyó dos conjuntos adicionales que Golder consideró apropiados por las características del sitio en análisis, proporcionando así un total de 10 acelerogramas. A continuación se presenta un breve resumen de los sismos seleccionados:

- El sismo de subducción de contacto interplaca de Atico del 2001 (**M8.4** Tabla 6). Este registro sísmico fue registrado en estación Moquegua y es comúnmente utilizado por los reguladores y diseñadores locales para validar y verificar el desempeño sísmico de las instalaciones de ingeniería en Perú. Se incluye el sismo de interplaca de Atico del 2001 para complementar el análisis de ingeniería y con fines de procesos de permisos como el requerido por este estudio.

Por otro lado, el registro del sismo de interplaca de Pisco de 2007 (**M8.0**) fue corregido por línea base y luego usado en esta evaluación. Sin embargo, las características no estacionarias de aceleración, velocidad y desplazamiento no se ajustaron conforme y fueron excluidos del presente estudio; y

- Se incluyeron dos sismos de corteza adicionales en este estudio (en lugar de uno, como se indica en la Tabla 3); el sismo de 1999-**M7.7** Chi Chi (Taiwán) y el sismo 1992-**M7.3** Landers (California, USA). Debido a que la distancia más cercana a la superficie de la falla del TSF Backfill La Quinua es de sólo 0.4 km (Tabla 1), la presencia de un pulso sísmico generado por campo cercano podría ser una consideración importante para los análisis de ingeniería de este depósito TSF. El registro sísmico del sismo de Chi Chi (Taiwan) presenta la característica de sismo impulsivo requerido.

Como se muestra en la Tabla 7, el registro del sismo de Landers 1992-**M7.3** no presenta una característica impulsiva, pero tiene una mayor duración de fase intensa 5%-95% (es decir, 25 s) y mayor valor en la Intensidad de Arias.

También se incluyeron los registros de sismos de corteza con y sin pulso para el TSF Fase Norte 2, para los niveles de la mediana y percentil 84 del MCE (Tablas 7 y 8). Estos dos registros se proporcionan como alternativas también para complementar el análisis.

En las Tablas 6 a 8 se enumeran las fases intensas 5-95% de los acelerogramas ajustados al espectro objetivo. Para propósitos de comparación, en la Tabla 5 se enumera las fases intensas 5%-95% esperadas estimadas a partir de la relación empírica de Abrahamson y Silva (1996), que dependen de la magnitud del sismo y la distancia sitio-fuente que más contribuyen al peligro sísmico en el sitio. Las duraciones de fase intensa 5%-95% se calculan para los componentes horizontales. La Tabla 5 enumera la mediana de duraciones de fase intensa de 5%-95% y los percentiles 16 y 84, es decir, la mediana \pm una desviación estándar.

Tabla 5: Estimaciones de la Duración de Fase Intensa utilizando la Relación de Abrahamson y Silva (1996) ⁽¹⁾

Magnitud de Sismo	Distancia (km)	Duración Significativa de 5-95% - Horizontal		
		16 th (s)	Mediana (s)	84 th (s)
M8.0	70	26	42	69
M8.0	100	29	47	76
M9.0	100	57	92	150
M9.0	120	58	95	155

Nota:

1. Magnitudes y distancias adoptadas de la Sección 5.3.3. (Figura 17) y Sección 5.4. (Tabla 9) del PSHA-DSHA específico del sitio para el TSF Pampa Larga en la Mina Yanacocha (Golder 2018).

La Figura 3 (izquierda) muestra la comparación de las aceleraciones espectrales obtenidas de los acelerogramas ajustados espectralmente con el espectro objetivo (target), es decir, el espectro de peligro uniforme para 2 475 años de período de retorno en el TSF Backfill La Quinua (LQ).

Conforme se observa, las aceleraciones ajustadas espectralmente se encuentran dentro del intervalo definido por el 90% al 110% del espectro objetivo (target) para el intervalo de periodos de interés de ≈ 0.10 s (PGA) a 4.0 s (Tabla 3). La Figura 3 (derecha) muestra la comparación entre el espectro de respuesta promedio derivado de los acelerogramas ajustados espectralmente con respecto al espectro objetivo (target), el cual corresponde al espectro de peligro uniforme de 2 475 años de periodo de retorno para el sitio del TSF Backfill La Quinua (LQ).

Las Figuras 4 (izquierda) y 5 (izquierda) muestran los RSA estimados a partir de los acelerogramas ajustados espectralmente en comparación con los límites superior e inferior $\pm 10\%$ del espectro de respuesta para la mediana y percentil 84 del MCE, respectivamente. Como se indica en la Tabla 3, el periodo de interés es de 0.1 s a 4.0 s para el TSF Fase Norte 2.

La Figura 4 (derecha) presenta los espectros de respuesta promedio evaluados a partir de los acelerogramas ajustados espectralmente en comparación con la envolvente máxima objetivo y los límites superior e inferior $\pm 10\%$ para el espectro de la mediana del MCE para el TSF Fase Norte 2. Similar comparación se muestra en la Figura 5 (derecha) para el percentil 84 del MCE correspondiente al TSF Fase Norte 2.

Tabla 6: Parámetros de los Acelerogramas Base (Seed) Horizontales y de los RSA Horizontales Ajustados Espectralmente para el Espectro de Peligro Uniforme de 2 475 años de periodo de retorno, $V_{s,30} = 525$ m/s. Sitio del TSF Backfill La Quinoa (LQ), de la Mina Yanacocha. Cajamarca, Perú.

Sismo (Fecha)	Sismogénesis	Magnitud Momento (M)	Prof. Focal (km)	R_{Epi} (km)	Estación	Tipo de Suelo o $V_{s,30}$ en Estación Registro ⁽¹⁾	Dirección	Tiempo Total (s)	PGA Inicial (g) ⁽²⁾	Factor de Escala	Intensidad de Arias (m/s) – Duración 5-95 (s) ^(3, 4)	Velocidad Máxima (cm/s) ⁽³⁾	Desplaz. Máximo (cm)
Maule, Chile (2010-02-27)	Interplaca	M8.8	35	160	CURICO 20050613	Suelo	EWn	60	0.41	1.4	24.5 – 56	39	8
							NSn	60	0.47	1.3	19.6 – 53	41	10
Atico, Peru (2001-06-23)	Interplaca	M8.4	33	287	MOQ001 Moquegua	Suelo	EW	45	0.30	1.8	11.3 – 44	35	13
							NS	45	0.24	2.6	14.3 – 45	39	14
Tehuantepec, Mexico ⁽⁵⁾ (2017-09-08)	Intraplaca	M8.2	58	220	OXJM Jalapa del Marques	Suelo	N00E	25	0.26	2.3	7.7 – 38	44	23
							N90E	25	0.28	1.8	5.7 – 32	51	31
Chi Chi, Taiwan (1999-09-25)	Falla de Corteza (sismo impulsivo)	M7.7	33	NA	TCU078	443	78Es	12	0.27	2.0	3.5 – 10	48	31
							78Ns	10	0.39	1.6	2.6 – 6	53	20
Landers, California (1992-06-28)	Falla de Corteza (sismo no impulsivo)	M7.3	5	46	BLC Big Bear Lake	$V_{s,30} = 430$ Suelo Tipo C	270	23	0.20	3.4	9.0 – 25	34	16
							360	25	0.17	3.2	8.1 – 25	48	34

Acrónimos y notas

R_{Epi} = distancia epicentral; PGA = aceleración máxima en el terreno; NA = no disponible.

1. Clasificación de sitio según lo indicado en los registros sísmicos o en la norma ASCE 7-10, Tabla 20.3-1, Clasificación del Tipo de Suelo (V_{s30} : velocidad promedio de ondas de corte en los 30 m superiores).
2. Máxima Aceleración Horizontal de Terreno para los acelerogramas base.
3. Parámetros para los acelerogramas ajustados espectralmente.
4. Duración fase intensa definida como el periodo de tiempo desde una intensidad de Arias normalizada de 0.05 a 0.95.
5. Sismo de Tehuantepec, México. Los datos sísmicos son producto del trabajo de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) - Servicio Sismológico Nacional.

Tabla 7: Parámetros de los Acelerogramas Base (Seed) Horizontales y de los RSA Horizontales Ajustados Espectralmente para el Espectro del DSHA-MCE Percentil 50 (mediana), $V_{S,30} = 525$ m/s, TSF Fase Norte 2 de la Mina Yanacocha. Cajamarca, Perú.

Sismo (Fecha)	Sismogénesis	Magnitud Momento (M)	Prof. Focal (km)	R_{Epi} (km)	Estación	Tipo de Suelo o $V_{S,30}$ en Estación Registro ⁽¹⁾	Dirección	Tiempo Total (s)	PGA Inicial (g) ⁽²⁾	Factor de Escala	Intensidad de Arias (m/s) – Duración 5-95 (s) ^(3, 4)	Velocidad Máxima (cm/s) ⁽³⁾	Desplaz. Máximo (cm)
El Salvador (2001-01-13)	Intraplaca	M7.6	60	113	RS 7134 Relaciones Exteriores	Suelo	90s	16	0.30	1.1	2.7 – 24	28	11
							180s	24	0.32	1.2	2.8 – 27	26	8
Tarapacá, Chile (2005-06-13)	Intraplaca	M7.8	117	200	Poconchile	Suelo	EWs	16	0.32	1.0	3.2 – 38	21	9
							NSs	18	0.40	1.0	2.7 – 36	24	8
Chi Chi, Taiwan (1999-09-25)	Corteza (pulso)	M7.7	33	NA	TCU078	443	78Es	12	0.27	1.5	1.6 – 9	26	20
							78Ns	12	0.39	1.4	1.4 – 7	43	12
Niigata, Japan (2004-10-23)	Corteza (sin pulso)	M6.6	13	NA	NIGH01	480	EWs	12	0.67	0.7	2.1 – 9	24	8
							NSs	12	0.84	0.6	2.0 – 7	34	9

Acónimo y notas

R_{Epi} = distancia epicentral; PGA = aceleración máxima en el terreno; NA = no disponible.

1. Clasificación de sitio según lo indicado en los registros sísmicos o en la norma ASCE 7-10, Tabla 20.3-1, Clasificación del Tipo de Suelo (V_{S30} : velocidad promedio de ondas de corte en los 30 m superiores).
2. Máxima Aceleración Horizontal de Terreno para los acelerogramas base.
3. Parámetros para los acelerogramas ajustados espectralmente.
4. Duración de fase intensa definida como el periodo de tiempo desde una intensidad de Arias normalizada de 0.05 a 0.95.

Tabla 8: Parámetros de los Acelerogramas Base (Seed) Horizontales y de los RSA Horizontales Ajustados Espectralmente para el Espectro del DSHA-MCE Percentil 84, $V_{s,30} = 525$ m/s, TSF Fase Norte 2 de la Mina Yanacocha. Cajamarca, Perú.

Sismo (Fecha)	Sismogénesis	Magnitud de Momento (M)	Prof. del Foco (km)	R_{Epi} (km)	Estación	Tipo de Suelo o $V_{s,30}$ en Estación de Registro ⁽¹⁾	Diección	Tiempo Total (s)	PGA Inicial (g) ⁽²⁾	Factor de Escala	Intensidad de Arias (m/s) – Duración 5-95 (s) ^(3, 4)	Velocidad Máxima (cm/s) ⁽³⁾	Desplaz. Máximo (cm)
El Salvador (2001-01-13)	Intraplaca	M7.6	60	113	RS 7134 Relaciones Exteriores	Suelo	90s	16	0.30	2.5	12.8 – 24	64	24
							180s	24	0.32	3.2	12.4 – 26	60	20
Tarapacá, Chile (2005-06-13)	Intraplaca	M7.8	117	200	Poconchile	Suelo	EWs	18	0.32	2.3	14.1 – 38	45	13
							NSs	18	0.40	2.0	12.5 – 35	47	15
Chi Chi, Taiwan (1999-09-25)	Corteza (pulso)	M7.7	33	NA	TCU078	443	78Es	12	0.27	2.8	5.4 – 9	53	37
							78Ns	12	0.39	2.5	4.8 – 6	62	25
Niigata, Japan (2004-10-23)	Corteza (sin pulso)	M6.6	13	NA	NIGH01	480	EWs	15	0.67	1.2	7.8 – 11	49	16
							NSs	14	0.84	1.1	7.3 – 9	59	18

Acónimo y notas

R_{Epi} = distancia epicentral; PGA = aceleración máxima en el terreno; NA = no disponible.

1. Clasificación de sitio según lo indicado en los registros sísmicos o en la norma ASCE 7-10, Tabla 20.3-1, Clasificación del Tipo de Suelo (V_{s30} : velocidad promedio de ondas de corte en los 30 m superiores).
2. Máxima Aceleración en el Terreno para los acelerogramas base.
3. Parámetros para los acelerogramas ajustados espectralmente.
4. Duración de fase intensa definida como el periodo de tiempo desde una intensidad de Arias normalizada de 0.05 a 0.95.

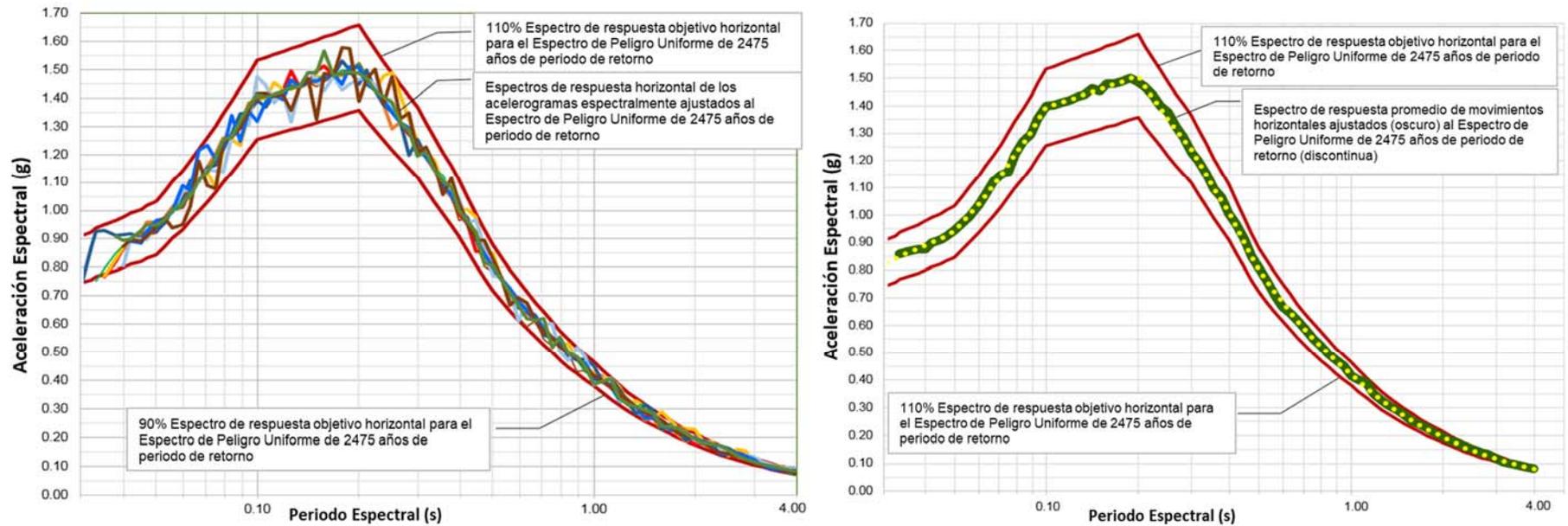


Figura 3: Izquierda: Espectros de respuesta de los RSA Ajustados Espectralmente (Tabla 6) en comparación con los Límites Superior e Inferior en $\pm 10\%$ del Espectro de Peligro Uniforme Objetivo de 2 475 Años de Periodo de Retorno. TSF Backfill La Quinua (LQ) (Condición de sitio $V_{s,30} = 525$ m/s).

Derecha: Espectros de Respuesta Promedio calculados a partir de los RSA Horizontales Ajustados Espectralmente en comparación con el Espectro de Peligro Uniforme objetivo de 2 475 años y los Límites Superior e Inferior en $\pm 10\%$ para la zona del TSF Backfill La Quinua (condición de sitio $V_{s,30} = 525$ m/s).

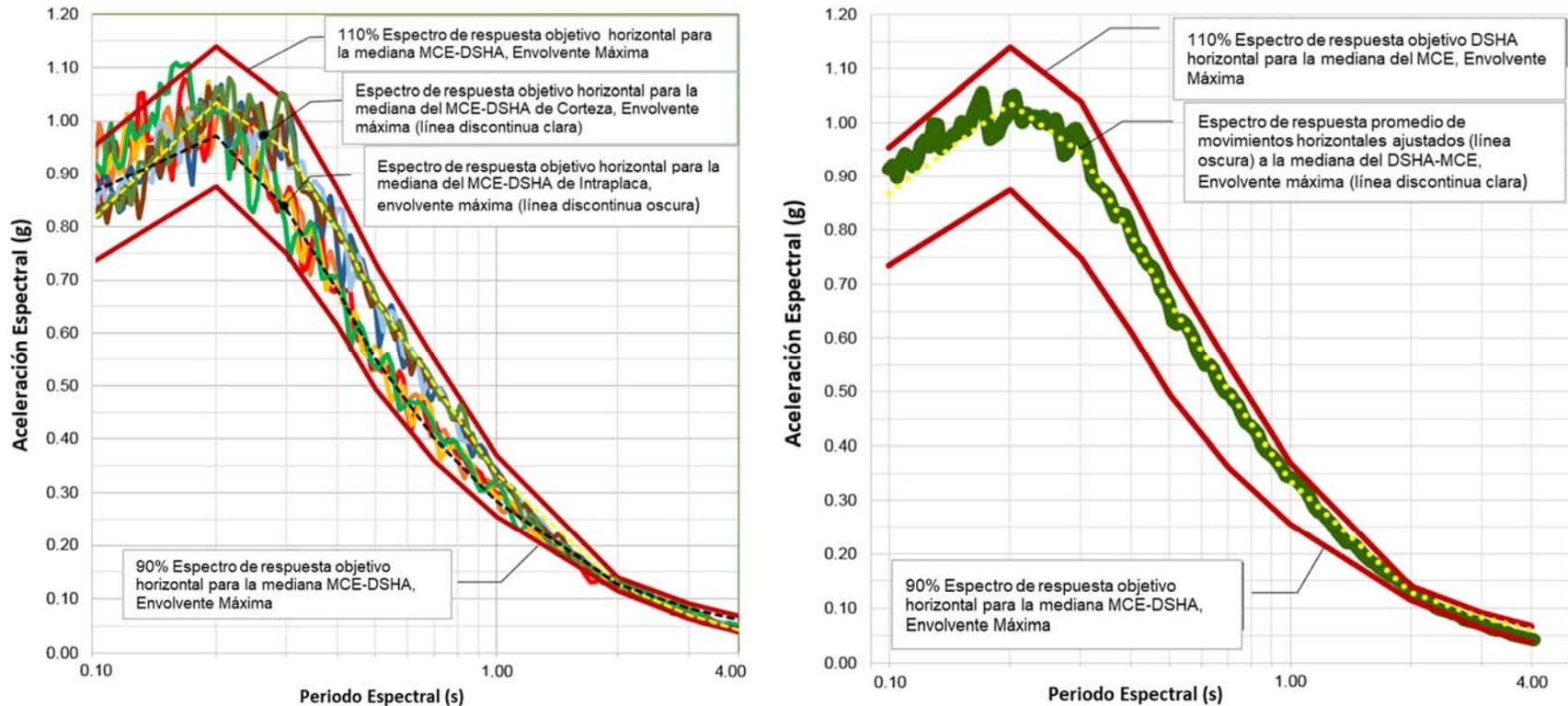


Figura 4: Izquierda: Espectro de Respuesta de los RSA Ajustados Espectralmente (Tabla 7) en comparación con los Límites Superior e Inferior en $\pm 10\%$ del Espectro de Respuesta para el MCE-percentil 50 (mediana) para Sismos Intraplaca y de Corteza. TSF Fase Norte 2 (Condición de sitio $V_{s,30} = 525$ m/s).

Derecha: Espectro de Respuesta Promedio Calculado a partir de los RSA Ajustados Espectralmente en Comparación con la Envolvente Máxima Objetivo y los Límites Superior e Inferior en $\pm 10\%$ del Espectro para el MCE-percentil 50 (mediana), TSF Fase Norte 2 (Condición de Sitio $V_{s,30} = 525$ m/s).

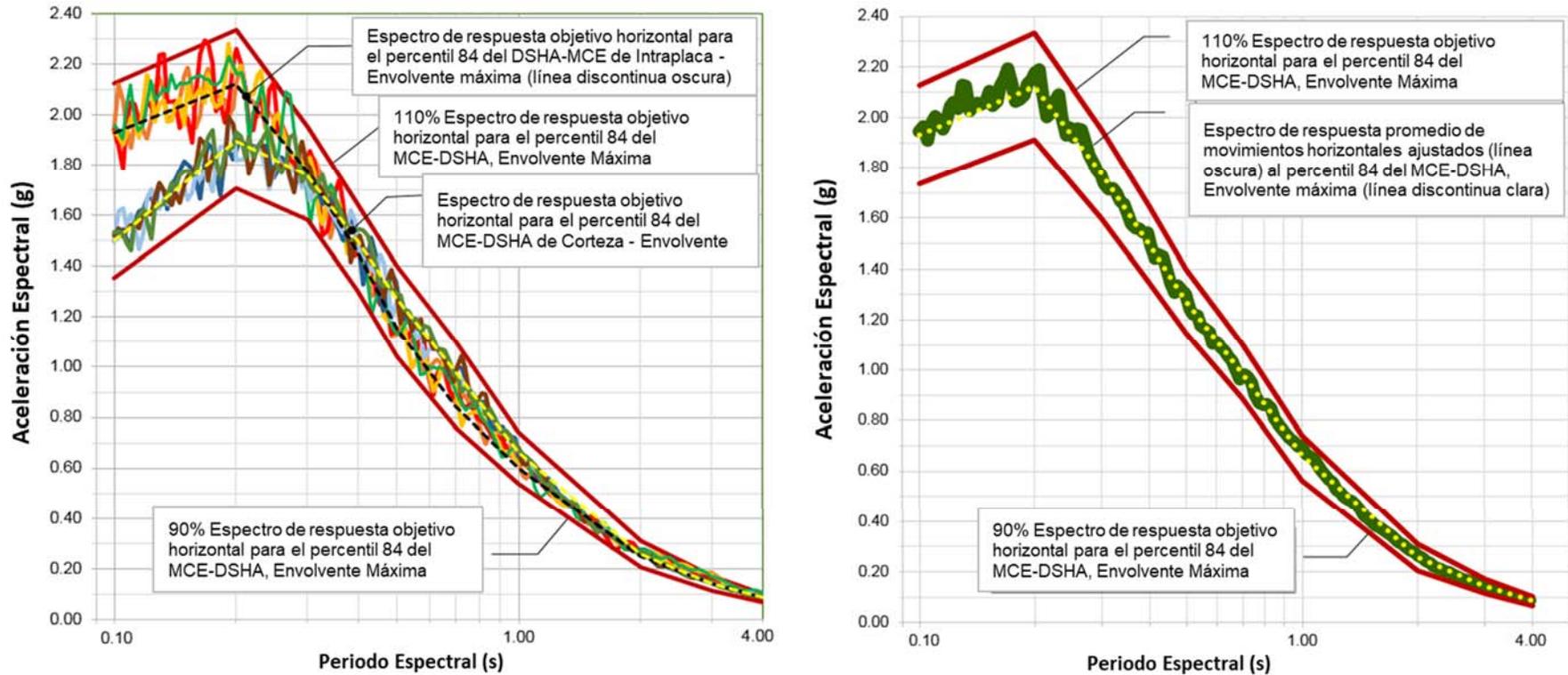


Figura 5: Izquierda: Espectro de Respuesta de los RSA Ajustados Espectralmente (Tabla 8) en comparación con los Límites Superior e Inferior en $\pm 10\%$ del Espectro de Respuesta para el MCE-percentil 84 para Sismos Intraplaca y de Corteza. TSF Fase Norte 2 (Condición de sitio $V_{s,30} = 525$ m/s).

Derecha: Espectro de Respuesta Promedio Calculado a partir de los RSA Ajustados Espectralmente en Comparación con la Envolverte Máxima Objetivo y los Límites Superior e Inferior en $\pm 10\%$ del Espectro para el MCE-percentil 84, TSF Fase Norte 2 (Condición de Sitio $V_{s,30} = 525$ m/s).

4.4. Acelerogramas Horizontales Ajustados Espectralmente

Las Figuras 6 a 23 en el Anexo 1 muestran resultados del ajuste espectral para el espectro de peligro uniforme de 2 475 años de periodo de retorno para el TSF Backfill La Quinua (LQ), y el espectro para el percentil 50 (mediana) y el percentil 84 del MCE para el TSF Fase Norte 2. Las figuras muestran que los espectros de respuesta provenientes de los RSA obtenidos a partir del análisis efectuado presentan un adecuado nivel de ajuste respecto de los espectros objetivo (target) para los depósitos TSF Backfill La Quinua (LQ) y Fase Norte 2.

Las Figuras 6 a 23 en el Anexo 1 muestran los registros de las aceleraciones, velocidad y desplazamientos ajustados espectralmente en comparación con las aceleraciones, velocidades y desplazamientos de los acelerogramas base (seed) de terremotos reales. Estas figuras también muestran los espectros de respuesta de aceleración objetivo (target), inicial y ajustado espectralmente; además del espectro de amplitudes de Fourier y la intensidad de Arias normalizada asociada con los acelerogramas base (seed) y los ajustados espectralmente. El espectro de respuesta de aceleración inicial se ha escalado a los valores de PGA del espectro objetivo (target).

Los registros de aceleración, velocidad y desplazamiento se han revisado para confirmar que las características no estacionarias de los registros iniciales se han mantenido adecuadamente a través del proceso de ajuste espectral. Esta revisión es necesaria porque la solución en el ajuste espectral no es única (es decir, hay un número infinito de movimientos que replicarían el espectro objetivo pero con un ajuste pobre de los parámetros sísmicos). En algunos casos, los acelerogramas ajustados espectralmente se corrigieron para eliminar el desplazamiento residual al final del registro.

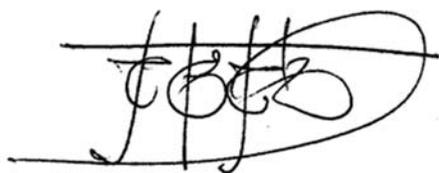
5. REFERENCIAS

- Abrahamson, N. 1992. Non-stationary Spectral Matching, *Seismological Research Letters* 63(1), p. 30.
- Abrahamson NA, Silva WJ (1996) Empirical ground motion models. Tech. rep., report to Brookhaven National Laboratory.
- Abrahamson, N. 2011. Seismic Hazard Analysis and Design Ground Motions, Spring 2011, University of California Berkeley, Design Time Histories Chapter (Class Material).
- Al Atik, L. and N. Abrahamson. 2010. An improved method for nonstationary spectral matching. *Earthquake Spectra* 26(3): 601-617.
- Arias, A. 1970. A Measure of Earthquake intensity, RJ Hansen ed., *Seismic Design of Nuclear Power Plants*. MIT Press, Cambridge MA, pp. 438-483.
- BCHydro. 2012. Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) Model Volume 3: Ground Motion Characterization (GMC) Model, Report No. E658.
- Bommer, J. and A.B. Acevedo. 2004. The use of real accelerograms as input to dynamic analysis. *Journal of Earthquake Engineering* 8 (Special Issue 1): 43-91.
- COSMOS-CESMED (Consortium of Organizations for Strong-Motion Observations Systems). 2018 Strong-motion virtual data center (VDC). <http://strongmotioncenter.org/vdc/scripts/default.plx> (accessed May 2018).
- Fouad, L. and E. Rathje. 2012. RSPMatch09. <http://nees.org/resources/rpsmatch09> (published Sept. 10, 2012).
- Gregor, N., N. Abrahamson, K. Addo, A. Rodriguez-Marek. 2012. Vertical to horizontal (V/H) ratios for large megathrust subduction zone earthquakes. 15 World Conference on Earthquake Engineering. Lisboa.
- Golder Associates. 2018. Site-Specific PSHA and DSHA – Uncertainty and Sensitive Analysis. Yanacocha Project – Cajamarca Mining District, Peru_Rev.B.
- Hancock, J., J. Watson-Lamprey, N. Abrahamson, J. Bommer, A. Markatis, E. McCoy, and R. Mendis. 2006. An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motions using wavelets. *Journal of Earthquake Engineering* 10(Special Issue 1): 67-89.
- Lilhanand, K. and W.S. Tseng. 1988. Development and application of realistic earthquake time histories comparable with multiple damping design spectra. *Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol 2*.
- PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center). 2018. PEER Ground Motion Database. <http://ngawest2.berkeley.edu/site>.
- UNAM. 2018. Institute of Engineering of the National Autonomous University of Mexico-Servicio Sismológico Nacional (<http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/Registro.aspx>).
- UNI. 2018. Universidad Nacional de Ingeniería. Perú. Japan-Peru Center for Earthquake Engineering Research and Disaster Mitigation (CISMID). <http://www.cismid-uni.org>.
- University of Chile. 2017. Earthquakes of Chile. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. <http://terremotos.ing.uchile.cl/2005> (accessed May 2018).

6. CIERRE

Confiamos que la descripción de la metodología empleada y los resultados presentados en este memorando técnico, asociado con el análisis de RSA cumplan con los requerimientos actuales de Newmont-Yanacocha en lo referente a los análisis de estabilidad dinámica de los TSF Backfill La Quinoa (LQ) y Fase Norte 2.

Por favor, comuníquese con los suscritos, si tiene preguntas o necesita aclaraciones sobre el contenido de este memorando técnico.



Marcelo Martínez
Associate-Líder Reg. de Sísmica

MM/AH



Alan Hull, PhD
Principal-Líder Global de Sísmica

Minera Yanacocha S.R.L
Revisión de la Información Existente de
Riesgo Sísmico

Informe Final
(Traducción)

20 de abril de 2005

Preparado para
Minera Yanacocha S.R.L
Av. Camino Real, Torre El Pilar-Piso 10
San Isidro, Lima 27, Perú
Teléfono: (511) 215-2600
Fax: (511) 215-2610

Preparado por
Knight Piésold Consultores S.A.
Av. San Borja Sur 143,
San Borja, Lima 41, Perú
Teléfono: (51 1) 226-0044
Fax: (51 1) 226-0062

Proyecto LI20100119/46

Minera Yanacocha S.R.L
Revisión de la Información Existente
de Riesgo Sísmico

Informe Final

Tabla de Contenido

1.0 Introducción	1
2.0 Evaluación de Informes Específicos del Emplazamiento	3
2.1 Evaluación del Informe de Machare y Rodríguez.....	3
2.2 Evaluación del Informe de Knight Piésold	4
2.3 Evaluación del Informe de Hidroenergía	5
2.4 Evaluación del Informe de Klohn Crippen	6
2.5 Evaluación del Informe de Golder Paste Technology.....	7
3.0 Otros Informes.....	8
3.1 Evaluación de estudios de Castillo y Alva.....	8
3.2 Programa de Evaluación del Riesgo Sísmico Global.....	8
4.0 Recomendaciones.....	10
Referencias	R-1

Minera Yanacocha S.R.L

Revisión de la Información Existente de Riesgo Sísmico

Informe Final

1.0 Introducción

A la fecha, varios investigadores han realizado estudios de riesgo sísmico en el área del proyecto Yanacocha. Este informe presenta una revisión de la información existente con la finalidad de determinar los parámetros de diseño que puedan utilizarse en el diseño de depósitos de relaves en el sector La Quinua. Cuando existen diferencias entre los estudios, se presenta una comparación de los parámetros junto con una explicación sobre la obtención de dichos parámetros. Por último, se presentan valores máximos de la aceleración del suelo recomendados para ser utilizados en evaluaciones sísmicas probabilísticas que se lleven a cabo en el futuro.

En el presente informe se han revisado los siguientes estudios de riesgo sísmico en el área de Yanacocha.

1. Macharé y Rodríguez, 1991, “Evaluación de riesgo sísmico en el Área de Yanacocha,” Informe Privado Preparado para Newmont Peru Ltd.
2. Knight Piesold LLC, 1997, “Minera Yanacocha S.A., Plataforma de Lixiviación Cerro Yanacocha, Expansión de la Etapa 1, Informe de Diseño Final”, Preparado para Bechtel International Inc.
3. Hidroenergía Consultores en Ingeniería SRL, 2002, “Estudio de Peligro Sísmico, Presa Río Rejo”, Preparado para MWH (en español)
4. Klohn Crippen Consultants Ltd, 2003, “Investigación Geotécnica de La Quinua, Informe Final”.
5. Golder Paste Technology Ltd., 2005, “Diseño de Ingeniería Básica del Sistema de Disposición de Relaves de HCT para el Proyecto Gold Mill de Yanacocha”, Mina Yanacocha, Perú, Informe Preliminar 04-1900-018.

La evaluación de riesgo sísmico en cualquier emplazamiento dado es una combinación compleja de actividades basadas en el uso de registros de sismos históricos y aspectos tectónicos locales y regionales. Lo último comprende un conocimiento de las estructuras de

fallas y sus modos de liberación de energía, junto con el uso de relaciones de atenuación para establecer el nivel de aceleración que podría experimentarse en el emplazamiento. Una parte importante de este trabajo es subjetiva, basándose en el criterio ingenieril para interpretar la información y completar el análisis. Por consiguiente, no resulta sorprendente que las diferentes investigaciones hayan producido una variedad de resultados.

2.0 Evaluación de Informes Específicos

2.1 Evaluación del Informe de Macharé y Rodríguez

Macharé y Rodríguez realizan una evaluación cualitativa, semi-cualitativa y cuantitativa. No encontraron fallas activas dentro de una distancia de 100 km del emplazamiento. Macharé y Rodríguez consideraron la sismicidad histórica dentro de un área rectangular limitada entre 5° S a 9° S y 76° O y 81° O, en la cual se centra de manera aproximada el emplazamiento minero de Yanacocha.

La evaluación se basó principalmente en la base de datos compilada por Silgado (1978) para los registros de sismos no instrumentados (1513 a 1974). También se consideró el catálogo sísmico ecuatoriano, al igual que las diferentes fuentes de datos de sismos, incluyendo los catálogos de ISC, NEIC y NEIS para los eventos sísmicos ocurridos entre 1900 y 1990. Macharé y Rodríguez concluyeron que la sismicidad del área de Yanacocha, y de todo el norte del Perú, es menor que la sismicidad de la parte sur del Perú.

Macharé y Rodríguez evaluaron los datos históricos utilizando una modificación del método de los valores extremos de Gumbel, 1958, siguiendo el método de Cornell (1968) utilizando el programa de computadora desarrollado por McGuire (1976). Este programa ha evolucionado a través de los años y ha recibido las denominaciones de SEISRISK y EZ-FRISK. En esencia, es el mismo enfoque que siguieron Hidroenergía y Klohn Crippen, el cual se discute en las secciones subsiguientes de este informe.

Macharé y Rodríguez estimaron las siguientes magnitudes sísmicas para el emplazamiento:

Período de Retorno Años	Magnitud del Sismo
50	7.1
100	7.45
MCE	7.8

Macharé y Rodríguez establecieron parámetros del movimiento del suelo utilizando las fuentes sismogénicas propuestas por Casaverde y Vargas (1980), así como dos zonas adicionales propuestas por Macharé y Rodríguez. Utilizando las relaciones de atenuación sísmica desarrolladas por Casaverde y Vargas (1980), se estimaron los siguientes valores para la aceleración máxima del suelo para el emplazamiento:

Período de Retorno Años	Aceleración Máxima del Suelo % g
50	0.19*
100	0.23*

* Macharé y Rodríguez, en realidad, reportaron valores de 0.21 g y 0.28 g para los eventos que ocurren cada 50 años y cada 100 años, respectivamente; pero se piensa que estos valores son errores tipográficos, debido a que no coinciden ni con su gráfico ni con los valores de las curvas de nivel que aparecen en sus figuras.

2.2 Evaluación del Informe de Knight Piésold

En 1997, Knight Piésold efectuó una ampliación del estudio de Macharé y Rodríguez. El objetivo fue una reevaluación del estudio y suministrar una recomendación de parámetros del diseño sísmico a utilizar en las diferentes instalaciones. Esta reevaluación produjo el establecimiento de un evento de Magnitud 7 como el evento sísmico que ocurre cada 100 años.

Se accedió a la información de varios catálogos sísmicos (NOAA, USGS, PERU, P&S, ABE, GUTE, y SISRA). Se consideraron los eventos ocurridos entre los años 1942 y 1991 para un área situada dentro de un radio de 150 km del emplazamiento, pero muy pocos eventos anteriores a 1964 se identificaron en la búsqueda. Se identificó un total de 49 eventos de Magnitud 3 o más, la mayoría de los cuales tenían una magnitud en el rango entre 4.0 y 4.5 y una sismicidad limitada. Estos datos respaldaron la caracterización previa del emplazamiento.

Se descartó la ocurrencia de un evento de sismo cortical poco profundo de Magnitud 7 que produce una aceleración máxima horizontal del suelo de 0.25 g, debido a que el registro sísmico no parecía respaldar un evento cortical tan grande. Se consideró más probable que ocurriera un evento de Magnitud 7 en la zona de subducción, y que la zona de subducción puede tener una profundidad tan limitada como 70 km en las inmediaciones del emplazamiento. Utilizando relaciones de atenuación de la aceleración no especificadas, se estimó que un evento de Magnitud 7 en la zona de subducción que ocurriera a una profundidad de 70 km inmediatamente debajo del emplazamiento produciría una aceleración horizontal máxima del suelo de 0.12 g en el emplazamiento.

Las recomendaciones que se presentan en este informe varían con respecto a las que se presentan en el informe de Macharé y Rodríguez, debido a la reevaluación de la ubicación del evento sísmico que ocurre cada 100 años, que se basaba en consideraciones del régimen sísmico histórico.

También se incluyeron los parámetros de diseño a utilizar en los análisis de estabilidad. Estas recomendaciones se establecieron en reconocimiento de la propensión de las estructuras en

pendiente para amplificar las aceleraciones del suelo. Se estimó que la aceleración en la cresta del talud fluctuaba en el rango entre 0.25g y 0.35g debido al efecto de amplificación. Para las evaluaciones de la estabilidad del talud que consideran una masa deslizante ubicada a profundidad (es decir, una que tendría un impacto sobre toda la profundidad de una pila), la aceleración se modificó una vez más, debido a que también deben tomarse en consideración la aceleración en la cresta del talud y la aceleración al nivel del suelo. En este caso, se recomendó que la aceleración promedio de la masa deslizante asentada a profundidad fuera entre 0.15g y 0.20g. Posteriormente, otros autores malinterpretaron estos valores, entendiendo que representaban las aceleraciones máximas recomendadas del *terreno*.

2.3 Evaluación del Informe de Hidroenergía

MWH encargó a Hidroenergía que suministrara recomendaciones del diseño sísmico para la Presa de Sedimentos de Río Rejo. Hidroenergía llevó a cabo análisis utilizando el programa de computadora EZ-FRISK, utilizando los catálogos sísmicos desarrollados por SISRA y enmendados con registros de ISC correspondientes al período comprendido entre 1985 y 1992. Las fuentes sismogénicas identificadas por Castillo y Alva (1993) fueron utilizados en el análisis, acopladas con las leyes de atenuación de Casaverde y Vargas para los eventos de la zona de subducción y de McGuire para la atenuación de eventos continentales.

Las fuentes sismogénicas desarrollados por Castillo y Alva son 20, cada una de las cuales tiene asignada una magnitud sísmica mínima y una máxima, parámetros acerca del nivel e intensidad de la sismicidad en cada fuente y la profundidad a la cual ocurre la sismicidad. Hidroenergía adoptó sólo la geometría de las fuentes y sus magnitudes sísmicas máximas y mínimas asociadas asignadas por Castillo y Alva. No suministraron comentarios acerca de las razones que tuvieron para alterar el trabajo de Castillo y Alva.

El informe de Casaverde y Vargas, que Macharé y Rodríguez emplearon para las fuentes sismogénicas, no fue localizado para utilizarlas en esta revisión. Así, no puede hacerse ningún comentario para comparar los dos métodos de zonificación del origen de los sismos.

Los resultados de la evaluación efectuada por Hidroenergía se resumen a continuación:

Período de Retorno Años	Aceleración Máxima del Suelo % g
500	0.20
1,000	0.23
2,000	0.27
5,000	0.33
6,667	0.35
10,000	0.37
15,000	0.40
25,000	0.44

2.4 Evaluación del Informe de Klohn Crippen

Al igual que Hidroenergía, Klohn Crippen empleó las fuentes sismogénicas propuestas por Castillo y Alva. A diferencia de Hidroenergía, Klohn Crippen adoptó la totalidad de la información de las fuentes sismogénicas determinadas por Castillo y Alva. Se utilizaron dos conjuntos de relaciones de atenuación. El primero incluía las relaciones desarrolladas por McGuire (1977) y Casaverde y Vargas (1984). El segundo empleaba las relaciones desarrolladas por Abrahamson y Silva (1997) junto con Young *et ál.* (1977). Los resultados de su evaluación se resumen a continuación:

Período de Retorno, Años	Aceleración Máxima del Suelo, % g	
	Conjunto 1	Conjunto 2
100	0.16	0.09
475	0.23	0.13
1,000	0.28	0.15
2,500	0.34	0.19
10,000	0.45	0.24

Basado en los promedios de los resultados, Klohn Crippen recomendó los siguientes resultados:

Período de Retorno Años	Magnitud M	Aceleración Máxima del Suelo % g
100	5	0.13
500	7	0.18
1,000	8	0.22

Además, Klohn Crippen recomendó el siguiente evento para representar el evento máximo creíble (MCE):

Evento	Magnitud M	Aceleración Máxima del Suelo % g
MCE	8.5	0.38

Klohn Crippen malinterpretó el informe de Knight Piésold al afirmar que la aceleración horizontal máxima de diseño del terreno es 0.20g. Como se indicó líneas arriba, esta aceleración es un valor que se aplicaría a la condición promedio para una masa deslizante ubicada a profundidad. La aceleración horizontal máxima presentada por Knight Piésold fue, en realidad, 0.12 g.

2.5 Evaluación del Informe de Golder Paste Technology

Golder Paste Technology (Golder) no ofreció ningún nuevo análisis en su informe, sino que más bien, contribuyó con algunos comentarios acerca del trabajo presentado por Hidroenergía y Knight Piésold. Al igual que Klohn Crippen, Golder también malinterpretó el informe de Knight Piésold, afirmando que la aceleración horizontal máxima de diseño del suelo de Knight Piésold es 0.20 g en lugar del valor de 0.12 g. Además, Golder afirma, de manera equivocada, que el evento de diseño de Knight Piésold es equivalente al evento que ocurre cada 10,000 años determinado por Hidroenergía. Esta afirmación es incorrecta, debido a que el evento que ocurre cada 10,000 años según Hidroenergía está asociado con una aceleración del suelo de 0.37g. Golder afirma que el evento que ocurre cada 10,000 años corresponde al MCE de Hidroenergía, lo cual es incorrecto debido a que Hidroenergía presenta valores hasta de 25,000 años para el período de retorno.

Golder realizó una comparación del emplazamiento de Yanacocha con el emplazamiento cercano de Minas Conga, que se sitúa aproximadamente 20 km al noreste. Basado en un estudio previo de riesgo sísmico efectuado por Golder para Minas Conga, Golder presentó la siguiente información:

Período de Retorno Años	Aceleración Máxima del Suelo % g
100	0.11
150	0.125
500	0.20
1,000	0.25
10,000	0.42

3.0 Otros Informes

3.1 Evaluación del estudio de Castillo y Alva

Castillo y Alva (1993) presentaron un análisis acerca de la sismicidad del Perú, considerando la zonificación de la manera que se describe en la Sección 2.3, junto con las leyes de atenuación de Casaverde y Vargas (1980) y McGuire (1974) para los eventos de subducción y los eventos corticales, respectivamente. El resultado del estudio fueron las siguientes recomendaciones para el área del proyecto:

Período de Retorno Años	Aceleración Máxima del Suelo % g
500	0.31
1,000	0.37

3.2 Programa de Evaluación de Riesgo Sísmico Global

El International Lithosphere Program (ILP) lanzó en 1992 el Programa de Evaluación de Riesgo Sísmico Global (GSHAP, por sus siglas en inglés), con el apoyo del Consejo Internacional de Uniones Científicas (ICSU, por sus siglas en inglés). Este programa se ratificó como un programa de demostración dentro del marco de la Década Internacional de las Naciones Unidas para la Reducción de Desastres Naturales (UN/IDNDR). El objetivo principal del GSHAP era crear un mapa de riesgo sísmico a nivel global de una manera armonizada y coordinada a nivel regional, basada en métodos avanzados utilizados en las evaluaciones probabilísticas de riesgo sísmico. La estrategia del GSHAP consistía en establecer centros regionales que fueran responsables de la coordinación y realización de los cuatro elementos básicos de las Evaluaciones Probabilísticas de riesgo sísmico (PSHA, por sus siglas en inglés) modernas:

1. Catálogo de sismos
2. Caracterización de zonas sismogénicas o fuentes generadoras de sismos
3. Movimientos sísmicos fuertes del terreno
4. Cálculo de riesgo sísmico

Tres productos que son importantes para esta evaluación son: el informe de Shedlock y Tanner (2005), que suministró un mapa de riesgo sísmico para el hemisferio occidental, el informe de GSHAP de 1998 acerca del riesgo sísmico en el norte de la Región Andina, y el informe de riesgo sísmico de Latinoamérica y el Caribe. El informe acerca del norte de la Región Andina se estableció utilizando las zonas donde se originan sismos recientemente desarrollados, junto con las leyes de atenuación desarrolladas por Quijada y Saragoni para

eventos de las zonas corticales y de subducción, respectivamente. A continuación se resumen sus descubrimientos para el área del proyecto:

Período de Retorno Años	Aceleración Máxima del Suelo % g
500	0.32

El mapa de riesgo sísmico de Shedlock y Tanner se ensambló sin efectuar una zonificación, y utilizó las leyes de atenuación desarrolladas por Joyner y Boore para los eventos corticales y las de Climent *et ál.* Para todos los demás eventos. A continuación se describen los resultados obtenidos con respecto al área del proyecto:

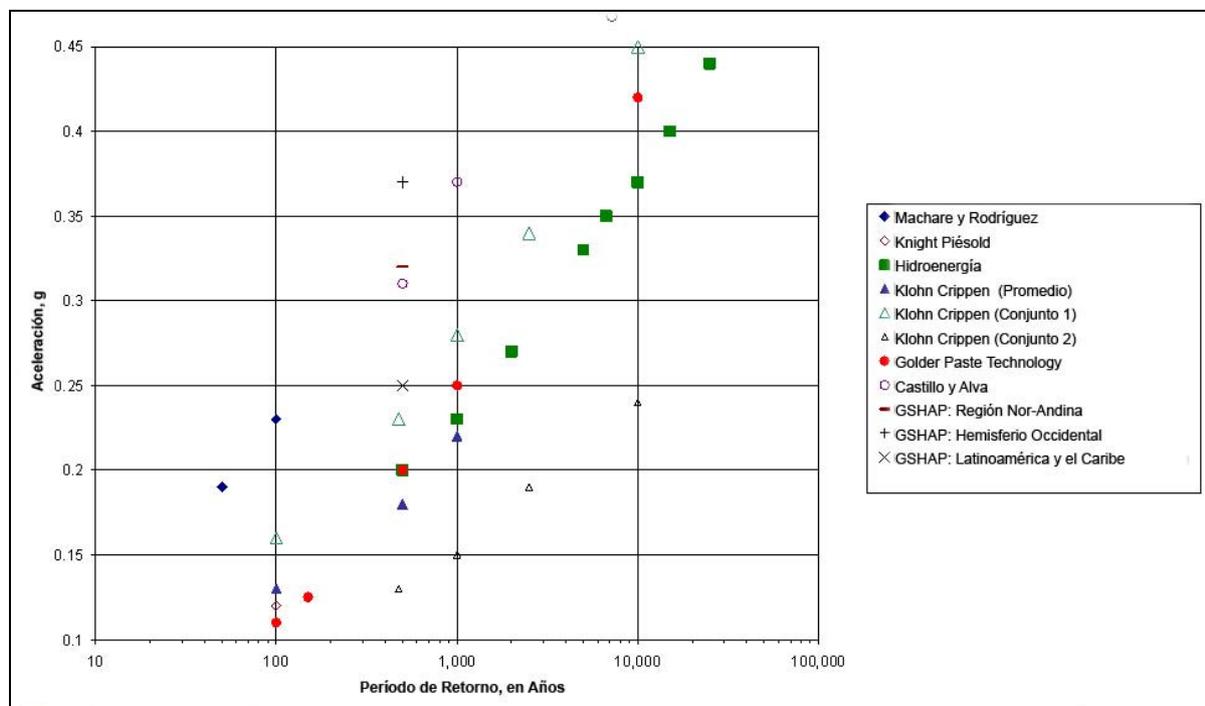
Período de Retorno Años	Aceleración Máxima del Suelo % g
500	0.37

A continuación se presenta un resumen del informe acerca del riesgo sísmico de Latinoamérica y el Caribe, para el área del proyecto:

Período de Retorno Años	Aceleración Máxima del Suelo % g
500	0.25

4.0 Recomendaciones

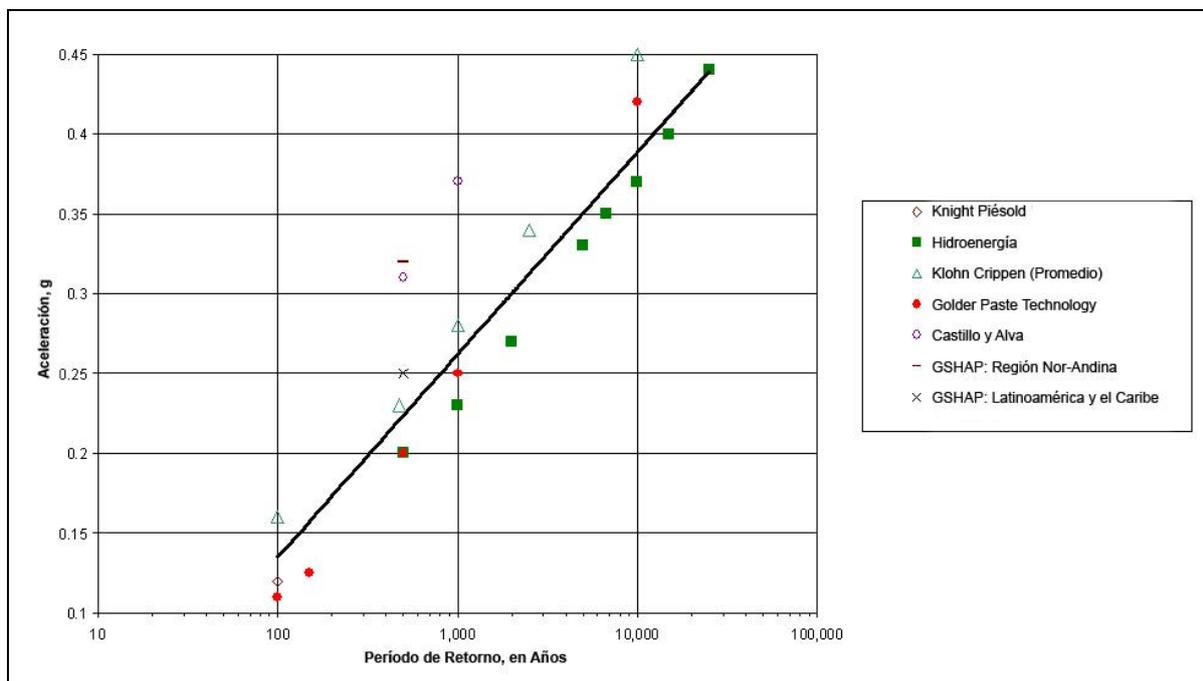
En la siguiente figura se presenta un resumen de los resultados descritos líneas arriba con respecto a las aceleraciones del suelo:



Existe una cantidad significativa de dispersión de los datos graficados. Después de considerar esto y reconocer que los análisis de riesgo sísmico tienen, en cierta forma, una naturaleza subjetiva, no sorprende el hecho de que los diferentes autores hayan producido una variedad de resultados para este emplazamiento. Para poder extraer una conclusión de la mejor estimación a partir de los datos, es importante revisar la información para comprobar que ésta se encuentra dentro de lo razonable.

El trabajo de Macharé y Rodríguez no fue considerado debido a que se considera desactualizado. La cantidad de eventos sísmicos que han ocurrido desde la culminación de este trabajo puede mejorar de manera significativa las predicciones sísmicas. Para propósitos de esta evaluación, el trabajo del GSHAP para el hemisferio occidental no se considera tan exacto como otros estudios, debido a que los estudios de micro-zonificación y específicos para el emplazamiento producirían resultados más exactos. Klohn Crippen suministró dos conjuntos de datos, y se adoptaron los valores promedio para utilizarlos en este estudio de comparación.

La siguiente figura muestra los datos que se conservaron:



La interpretación lineal de los datos, indicada por la línea sólida, está dada por la siguiente expresión:

$$\text{Aceleración} = 0.0551 * \ln(\text{Período de Retorno}) - 0.119$$

$$(R^2 = 0.81)$$

La interpretación produce los siguientes valores:

Período de Retorno Años	Aceleración Máxima del Suelo % g
100	0.13
250	0.19
500	0.22
1,000	0.26
10,000	0.39

Ante la ausencia de datos adicionales para el emplazamiento, se recomienda utilizar estos valores como la aceleración máxima del terreno en las evaluaciones sísmicas probabilísticas que se realicen en el futuro.

A continuación se presenta un resumen de la información existente acerca del período de retorno de los sismos de diferentes magnitudes:

Período de Retorno, en Años	Magnitud del Sismo, M	Referencia
100	5	Klohn Crippen
500	7	
1,000	8	
100	7	Knight Piésold
50	7.1	Macharé y Rodríguez
100	7.45	

A partir de este trabajo, se recomienda adoptar los siguientes valores para los análisis preliminares:

Período de Retorno, en Años	Magnitud del Sismo, M
100	7
500	7.5
1,000	8

La selección del valor de la aceleración para cualquier período de retorno particular para el diseño sísmico de una estructura importante en el emplazamiento debe basarse en el nivel de riesgo de dicha estructura, determinado a partir de una evaluación, y las consecuencias de su falla. Para una instalación importante tal como el depósito de arenas de molienda La Quinua, donde las consecuencias de la falla serían muy altas, se presentan algunas recomendaciones preliminares para los eventos de diseño:

- Sismo de Base Operacional (OBE) – se define como cualquier evento que la instalación debe soportar sin interrupción del servicio. Estos sismos por lo general se encuentran entre el evento que ocurre cada 475 años (10% de probabilidad de excedencia en 50 años) y el evento que ocurre cada 1,000 años. Basado en los resultados anteriores, el rango de valores de la aceleración máxima del terreno es bastante pequeño, fluctuando entre 0.22 y 0.26 g, y por consiguiente, para el planeamiento inicial de la instalación, se sugiere utilizar un valor de 0.25 g.
- Sismo Máximo de Diseño (MDE) - se define como un evento que la instalación debe soportar sin causar una falla estructural que produzca una pérdida de la contención. Este sismo por lo general se encuentra entre el evento que ocurre cada 10,000 años y el Sismo Máximo Creíble (MCE) para el emplazamiento, que se establece de manera

determinística a partir de la información tectónica y de la atenuación de la energía de las ondas a nivel regional. Una estimación preliminar de la aceleración máxima del terreno asociada con el MDE en el emplazamiento de Yanacocha se encontraría en el rango entre 0.37 y 0.45 g, pero se requiere una evaluación más detallada del MCE para fijar el valor de límite superior.

Estos eventos de diseño exceden los requerimientos de los reglamentos peruanos para las instalaciones de relaves, que especifican como mínimo el uso de los eventos que ocurren cada 150 años y cada 500 años para los períodos operacionales y posteriores al cierre, respectivamente. Sin embargo, el enfoque descrito en las viñetas de los párrafos anteriores es consistente con la mejor práctica internacional actual para el diseño de depósitos de relaves importantes, como se establece en el Boletín 98 de la Comisión Internacional sobre Presas Grandes (ICOLD, por sus siglas en inglés), titulado “Presas de Relaves y Sismicidad”, y en las “Pautas para la Seguridad de las Presas” expedidas por la Asociación Canadiense de la Seguridad en las Presas.

Para el diseño sísmico de las plataformas de lixiviación en pilas de Yanacocha, históricamente se ha empleado en el evento que ocurre cada 100 años con una aceleración máxima del suelo de 0.12 g. El evento que ocurre cada 100 años se considera adecuado para las instalaciones de lixiviación en pilas, y por consiguiente, el valor de 0.13 g, establecido por este estudio, se considera aplicable. Este pequeño aumento incremental en la aceleración de diseño tendrá un efecto pequeño sobre las plataformas de lixiviación en pilas existentes, pero se recomienda utilizar el valor más alto de 0.13 g para el diseño de las etapas futuras de la cancha.

Referencias

- Abrahamson y Silva, 1997, (información de referencia no incluida en el informe de Golder).
- Canadian Dam Association, Enero de 1999, “Dam Safety Guidelines”.
- Casaverde, L. y J. Vargas, 1980, Zonificación Sísmica del Perú, II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-Resistente, OEA-PUCP, Lima, Perú.
- Castillo, J. y J. Alva, 1993, Peligro Sísmico en Perú, Proc. VII Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ing. de Cimentaciones, Lima, Perú, pp 409-431.
- Cornell, A, 1968, Engineering Risk Analysis, Boletín de la Seismological Society of America, vol. 58, No. 5, pp 1583-1606.
- Gumbel, E.J., 1958, Statistics of Extremes, Columbia University Press.
- ICOLD Bulletin 98, 1995, “Tailings Dams and Seismicity – Review and Recommendations”.
- McGuire, R., 1976, Fortran Computer Program for Seismic Risk Analysis, USGS Open File Report 76-77.
- Shedlock, K.M. and J.G. Tanner, 2005, Seismic Hazard Map of the Western Hemisphere, GSHAP, www.seismo.ethz.ch/GSHAP.
- Silgado, E., 1978, Histórica de los Sismos más Notables Ocurridos en el Perú (1513-1974), Bol. Inst. Geol. Min., ser. C, 3, 130p.
- Young *et ál.*, 1997 (información de referencia no incluida en el informe de Klohn Crippen).