



# REPORTE ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO ESPECÍFICO DE SITIO

Proyecto Cerro Quema

Provincia Los Santos, Panamá

**Emitido a:** Pershimco Resources Inc.  
11, Perreault Street East  
Rouyn-Noranda, Quebec  
Canada J9X 3C1

**Emitido Por:** Golder Associates Inc.  
230 Commerce, Suite 200  
Irvine, CA 92602  
United States of America

Noviembre, 2014

Project No. 1400908  
CQ04.GAI-001-R-V4





## RESUMEN EJECUTIVO

Golder ha realizado un análisis probabilístico de peligro sísmico (APPS) específico de sitio, un análisis determinístico de peligro sísmico (ADPS) y una evaluación de peligro de ruptura superficial por falla sísmica para el sitio del Proyecto Cerro Quema en la Península de Azuero, Los Santos, Panamá (latitud 7.549°N y longitud 80.527°W).

El modelo de peligro sísmico contiene 15 fuentes sísmicas contribuyentes al movimiento sísmico de terreno en el sitio del Proyecto Cerro Quema. Las fuentes sísmicas incluyen cinco (5) fuentes de fallas de corteza, dos (2) fuentes de subducción de interface y ocho (8) fuentes areales regionales para representar sismos asociados a fallas sísmicas o modelos de subducción conocidos.

Los resultados del APPS específico de sitio para algunas aceleraciones espectrales y períodos de retorno se muestran en la Tabla ES-1. Los valores  $S_S$  y  $S_1$  son para ser aplicados en los estándares del ASCE 7-05 con un periodo largo de transición ( $T_L$ ) de 16 segundos en un suelo rígido o roca meteorizada (ASCE 7-05 suelo Clase B). Estas aceleraciones espectrales indican un nivel de peligro sísmico moderado en el sitio del Proyecto Cerro Quema para un periodo de retorno de 2,475 años.

**Tabla ES-1: Aceleraciones Espectrales con 5% de Amortiguamiento para el Sitio del Proyecto Cerro Quema**

Periodo Estructural (s)	Aceleración Espectral (g) para Suelo Rígido/Roca Meteorizada (Vs30 = 760 m/s) <sup>1</sup>		
	Periodo Retorno Promedio 475 años	Periodo Retorno Promedio 2,475 años	84% Percentil Determinístico
$A_{max}^2$	0.238	0.422	0.383
0.2	0.566	1.041 ( $S_S$ ) <sup>3</sup>	1.009
1	0.174	0.309 ( $S_1$ ) <sup>3</sup>	0.363

<sup>1</sup> s – segundo; g – aceleración de la gravedad 980 m/s<sup>2</sup>; m/s – metros per segundo;

<sup>2</sup> Amax – Aceleración horizontal máxima del terreno.

<sup>3</sup>  $S_S$  y  $S_1$  de acuerdo al ASCE 7-05 para el Sismo Máximo Considerado - the site-specific Maximum Considered Earthquake (MConE)

Los resultados de desagregación del peligro sísmico indican que la mayor contribución a las  $A_{max}$  y aceleración espectral de 0.2 segundos para períodos de retorno de 475 y 2,475 años es debida a sismos con  $M \leq 7$  dentro de los 40 km del sitio del proyecto. La mayor contribución para las aceleraciones espectrales de 1.0 segundo para períodos de retorno de 475 y 2,475 años son grandes sismos ( $M$  7.5 a  $M$  7.7) que ocurren en la Falla de Panamá del Sur, alrededor de 57 km al sur del sitio del Proyecto Cerro Quema.

Los resultados del análisis determinístico indican que el 84% percentil para la Amax es de 0.383 g para un sitio Clase B. Los movimientos sísmicos asociados a períodos espectrales cortos (0.5 segundos o menores) son generados por el sismo máximo creíble (SMC) de  $M$  6.9 con una distancia de alrededor de 12 km del sitio del Proyecto Cerro Quema. La fuente que contribuye a los períodos espectrales largos (0.75 segundos o mayores) es la falla Azuero-Soná ubicada a una distancia de alrededor de 18 km desde el sitio del proyecto con SMC de  $M$  8.0.



Los trabajos de campo en la falla Rio Joaquín y otras fallas menores mapeadas en los alrededores del sitio del proyecto indican que muchas de estas fallas probablemente se desarrollaron hace más de 40 millones de años en un régimen tectónico no relacionado al actual. De acuerdo a esto, la Falla Rio Joaquín no cumple el criterio generalmente aceptado en la comunidad científica para ser categorizada como falla activa. La opinión de Golder es que las fallas superficiales mapeadas en el sitio del proyecto no presentan un peligro de ruptura de falla superficial de importancia ingenieril.



## Tabla de Contenido

1.0	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Antecedentes del Proyecto .....	1
1.2	Estudios Sísmicos Previos .....	1
1.3	Alcances del Estudio .....	2
1.4	Estructura del Reporte .....	3
1.5	Limitaciones .....	3
2.0	MARCO TECTÓNICO Y GEOLOGÍA REGIONAL .....	5
2.1	Marco Tectónico .....	5
2.2	Geología Regional .....	6
2.2.1	Estratigrafía Regional .....	6
2.3	Sismos Históricos .....	7
3.0	MODELO SISMOTECTONICO ESPECIFICO DE SITIO .....	8
3.1	Desarrollo del Catálogo Sísmico del Proyecto .....	8
3.1.1	Compilación del Catálogo Sísmico de Golder .....	8
3.1.2	Procesamiento de Datos Sísmicos .....	9
3.1.3	Depuración del Catálogo Sísmico del Proyecto .....	9
3.2	Descripción de las Fuentes Sísmicas .....	10
3.2.1	Fallas Superficiales de Corteza .....	10
3.2.2	Fuentes Areales de Corteza .....	10
3.2.3	Fuentes de Subducción .....	10
3.3	Recurrencia Sísmica .....	11
3.3.1	Estimación de Parámetros de Recurrencia Sísmica .....	11
3.3.2	Magnitud Máxima .....	12
3.3.3	Magnitud Mínima .....	12
3.3.4	Profundidad del Foco Sísmico .....	12
4.0	ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO ESPECIFICO DE SITIO .....	14
4.1	Métodos de Análisis de Peligro Sísmico .....	14
4.1.1	Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico (APPS) .....	14
4.1.2	Análisis Determinístico de Peligro Sísmico (ADPS) .....	14
4.2	Relaciones de Predicción del Movimiento Sísmico .....	14
4.3	Ánálisis de Arboles Lógicos .....	15
5.0	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO .....	17
5.1	Curvas de Peligro Sísmico Promedio .....	17
5.2	Espectro de Aceleraciones Espectrales con 5% de Amortiguamiento .....	17
5.3	Desagregación del Peligro Sísmico por Magnitud, Distancia y Épsilon .....	17
5.4	Contribución al Peligro Sísmico por Fuentes Sísmicas .....	18
5.5	Resultados Análisis Determinístico Peligro Sísmico .....	18



5.6	Espectro Sísmico de Diseño según ASCE 7-05 .....	19
5.6.1	Periodo de Transición a Periodos Largos.....	20
5.7	Discusión.....	20
5.7.1	Comparación entre Sismicidad Observada y Predecida .....	20
5.7.2	Comparación con el Estudio Regional del 2012.....	20
6.0	RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	22
7.0	IMPORTANT INFORMATION AND LIMITATIONS OF THIS REPORT.....	23
8.0	CIERRE.....	24
9.0	REFERENCIAS.....	25

## **Lista de Tablas**

Tabla ES-1	Aceleraciones Espectrales con 5% de Amortiguamiento para el Sitio del Proyecto Cerro Quema
Tabla 1	Epicentros de los Principales Sismos Históricos ( $M \geq 6.0$ ) Identificados dentro de los 300 km del Sitio del Cerro Quema, Panamá
Tabla 2	Fallas Sísmicas, Cerro Quema, Panamá
Tabla 3	Parámetros de Entrada Fuentes de Corteza, Cerro Quema, Panamá
Tabla 4	Parámetros Entrada Fuentes Areeales y de Subducción, Cerro Quema, Panamá
Tabla 5	Arboles Lógicos para Fuentes Areeales, Cerro Quema, Panamá
Tabla 6	Ecuaciones de Predicción del Movimiento Sísmico (GMPEs) para Fallas y Fuentes Areeales y de Subducción, Cerro Quema, Panamá
Tabla 7	Espectro de Peligro Sísmico Uniforme con 5% de Amortiguamiento para Algunos Periodos Estructurales para Sitio Clase B/C ( $V_{s30} = 760$ m/s) para Cerro Quema, Panamá
Tabla 8	Resultados de Desagregación para $A_{max}$ , y Aceleraciones Espectrales 0.2 segundos y 1 segundo Sitio Clase B/C ( $V_{s30} = 760$ m/s) Cerro Quema, Panamá
Tabla 9	Espectro Sísmico Determinístico 5% de Amortiguamiento para Sitio Clase B/C ( $V_{s30} = 760$ m/s) Cerro Quema, Panamá
Tabla 10	Comparación con el Estudio Sísmico Regional 2012, Cerro Quema, Panamá
Tabla 11	Espectro Sísmico para Diseño de Estructuras Estándares Sitio Clase B <sup>1</sup> Cerro Quema, Panamá

## **Lista de Figuras**

Figura 1	Principales Estructuras Geológicas y Sismos Históricos
Figura 2	Distribución en Tiempo y Tamaño de Sismos Históricos (Radio 500 km)
Figura 3	Densidad de Sismos Históricos – Catálogo Completo y Depurado
Figura 4	Fuentes Sísmicas Específicas de Sitio
Figura 5	Distribución de la Profundidad de Eventos en Fuentes Sísmicas
Figura 6	Número Acumulativo de Sismos en Función del Tiempo – Fuente SPDB
Figura 7	Recurrencia Sísmica – Fuente SPDB
Figura 8	Principales Tareas Peligro Sísmico Específico de Sitio
Figura 9	Árbol Lógico para Caracterización de Fuentes Sísmicas
Figura 10	Curvas Peligro Sísmico Promedio para $A_{max}$ , 0.2s, 1.0s 5% Amortiguamiento ( $V_{s30} = 760$ m/s)
Figura 11	Espectro Peligro Uniforme 5% Amortiguamiento ( $V_{s30} = 760$ m/s)
Figura 12	Desagregación Peligro Sísmico Magnitud y Distancia ( $V_{s30} = 760$ m/s)
Figura 13	Desagregación del Peligro Sísmico por Épsilon ( $V_{s30} = 760$ m/s)



Noviembre, 2014

ES-1

Project No. 1400908  
CQ04 GAI-001-R-V4

- Figura 14      Contribución al Peligro Sísmico por Fuentes Sísmicas ( $V_{s30} = 760 \text{ m/s}$ )  
Figura 15      Comparación entre Sismicidad Observada y Predecida

## **Lista de Apéndices**

- Apéndice A      Memorándum Técnico: Investigación Fallas Sísmicas Proyecto Cerro Quema



## 1.0 INTRODUCCIÓN

Este reporte presenta los resultados de un análisis de peligro sísmico específico de sitio en el sitio del Proyecto Cerro Quema en la Península de Azuero, provincia Los Santos en el centro de Panamá (latitud 7.549°N y longitud 80.527°W). Los parámetros sísmicos presentados en este reporte pueden ser usados en los estudios de línea base para las Evaluaciones de Impacto Social y Ambiental (ESIA, por sus siglas en inglés) y en los análisis sísmicos a nivel de factibilidad y de diseño ingenieril para el proyecto.

### 1.1 Antecedentes del Proyecto

Pershimco Resources Inc. (Pershimco) contrató a Golder Associates Inc. (Golder) para el desarrollo del estudio de pre-factibilidad (43-101) para el Proyecto Cerro Quema que incluye el diseño de las instalaciones asociadas a la pila de lixiviación y depósito de desmontes mineros, el estudio de alcance ambiental; así como los estudios de impacto social y ambiental (ESIA). Durante el trabajo, Golder identificó varios otros estudios requeridos para el desarrollo del ESIA e ingeniería de prefactibilidad del proyecto.

Pershimco identificó que los estudios de peligro sísmico y evaluación de peligro de ruptura superficial de falla eran necesarios para avanzar los permisos y diseños del proyecto. Los criterios de diseño sísmico son requeridos para los análisis y diseños de la futura pila de lixiviación Maricela, los depósitos de desmonte minero (waste rock dumps) Quema Sur y Chontal Superior; así como otras estructuras ingenieriles dentro de las instalaciones de la mina.

### 1.2 Estudios Sísmicos Previos

Durante los anteriores estudios de prefactibilidad para el sitio del proyecto, Knight Piésold (2005) desarrolló un análisis simplificado de peligro sísmico probabilístico y determinístico. Golder (2014) hizo una revisión del estudio de peligro sísmico en base a un trabajo de gabinete que consistió en revisar la información sísmica disponible. La revisión incluyó la identificación de fallas regionales activas Cuaternarias, la evaluación de las estimaciones de movimiento sísmico de terreno de estudios regionales pasados y la identificación y mapeo inicial de la Falla Río Joaquín ubicada en el sitio de la pila de lixiviación Maricela.

El estudio sísmico de Golder recomendó que se deba considerar el desarrollo de análisis adicionales para la determinación de los movimientos sísmicos de terreno para los diseños a nivel de factibilidad. Los estudios adicionales recomendados incluyen una evaluación de:

- Registros históricos de la ocurrencia de grandes sismos en la región del proyecto;
- Ubicación de las fallas más importantes dentro de los 60 km del sitio del proyecto;
- Estudios de peligro sísmico probabilístico y determinístico;
- Diferencias entre el estudio de peligro sísmico específico de sitio y aquellos especificados por el Código de Diseño Estructural de Panamá; y
- Potencial de ruptura superficial de la Falla Río Joaquín.



Según estas recomendaciones, Golder propuso un estudio de peligro sísmico específico de sitio con un trabajo de reconocimiento aéreo y de terreno para el sitio del Proyecto Cerro Quema. Este reporte se origina de estos estudios propuestos.

### 1.3 Alcances del Estudio

Los alcances del trabajo desarrollados para este estudio tienen como objetivo cuantificar el peligro sísmico en el sitio Cerro Quema a través de un análisis probabilístico de peligro sísmico (APPS) específico de sitio. Así mismo, se desarrolló un análisis determinístico de peligro sísmico (ADPS) para cuantificar movimientos sísmicos de terreno producidos por grandes sismos en fallas potencialmente activas cercanas al sitio del proyecto. El alcance del estudio incluye las siguientes tres fases resumidas a continuación.

- **Fase 1:** Revisión y evaluación de la tectónica regional, sismicidad y fuentes sismogénicas que utilizan la información del trabajo completado por Knight Piésold (2005) y Golder (2014).
- **Fase 1a:** Reconocimiento de campo y evaluación de fallas activas conocidas dentro de los 20 km del sitio del proyecto usando reconocimiento aéreo y curvas topográficas.
- **Fase 2:** Análisis determinísticos y probabilísticos de peligro sísmico. Tareas específicas de esta fase incluyen:
  - Revisión y procesamiento de catálogos sísmicos para evaluar si estos están completos.
  - Eliminación de eventos duplicados, premonidores y réplicas de los catálogos y uniformización a una sola escala de magnitud.
  - Identificación y caracterización de fuentes sísmicas, incluyendo fallas de corteza, fuentes areales y fuentes de subducción en un radio de 500 km del sitio del Proyecto Cerro Quema.
  - Evaluación y ponderación de relaciones de predicción del movimiento sísmico apropiadas para el sitio del Proyecto Cerro Quema.
  - Ingreso de las fuentes sísmicas específicas para el proyecto en el software EZ-FRISK 7.62 (Risk Engineering, Inc. 2011) para calcular curvas de peligro sísmico promedio y espectros de peligro uniforme con 5% de amortiguamiento en el sitio del Proyecto en un suelo rígido o roca meteorizada (velocidad promedio de ondas de corte en los primeros 30 m ( $V_{s30}$ ) = 760 m/s).
  - Desagregación de los movimientos sísmicos de terreno para algunos períodos de retorno y valores de aceleraciones espectrales para determinar escenarios sísmicos que controlan el peligro sísmico en el sitio del proyecto.



- ADPS en fallas sísmicas para calcular el 84% percentil (media + 1 desviación standard) del espectro de respuesta de aceleraciones.
- Determinación del espectro de respuesta de aceleraciones horizontal con 5% de amortiguamiento para el desarrollo de los movimientos sísmicos de diseño.
- **Fase 3:** Preparación y revisión del reporte final y de borrador que incluye una descripción de los modelos utilizados; así como tablas y figuras. Los comentarios hechos por el cliente son incorporados en el reporte final.

Los detalles del alcance de nuestro trabajo se encuentran en la propuesta P1400908 con fecha marzo 27, 2014 y aprobada por Pershimco en Abril 2014.

## 1.4 Estructura del Reporte

Las principales evaluaciones y conclusiones de nuestro trabajo de reconocimiento de campo y estudio de peligro sísmico específico de sitio se presentan en este reporte.

- La Sección 1 provee una introducción al propósito y a los antecedentes de este estudio; así como un resumen del alcance del trabajo desarrollado.
- La Sección 2 presenta el entorno sismotectónico actual y un resumen de la historia geológica regional en las inmediaciones del sitio del Proyecto Cerro Quema.
- La Sección 3 describe el desarrollo y caracterización de las fuentes sísmicas basados en nuestro análisis del entorno tectónico y los registros históricos de sismos.
- Los métodos del análisis de peligro sísmico, relaciones de predicción del movimiento sísmico, así como los arboles lógicos se presentan en la Sección 4.
- La Sección 5 resume los resultados de los análisis de peligro sísmico.
- La Sección 6 resume las principales conclusiones de este estudio.
- La Sección 7 resume las principales restricciones de este estudio.
- La Sección 8 contiene comentarios de cierre y las firmas de los autores del reporte.
- La Sección 9 presenta una lista de los reportes y publicaciones referenciados en este estudio.

## 1.5 Limitaciones

La evaluación de peligro sísmico específico de sitio y la ingeniería geotécnica sísmica, son campos de la investigación y de la ingeniería aplicada con características altamente dinámicas y que sufren una rápida evolución en forma continua y permanente. Consecuentemente, los estándares de práctica en esta área en particular continúan en desarrollo. Por ello, los resultados presentados en este reporte deberán ser



revisados al momento en que nueva información esté disponible o cuando una teoría científica más reciente surja, relacionada con los mecanismos sismogénicos aquí tratados

Golder ha preparado este documento en una manera consistente con el nivel de cuidado y habilidad ejecutada por miembros de asociaciones ingenieriles y científicas practicando actualmente bajo condiciones similares en la jurisdicción en la que los servicios son proveídos, sujeto a los límites de tiempo y restricciones físicas aplicables a la preparación de este documento.

Este reporte deberá ser leído en conjunto con “**Información Importante y Limitaciones de este Estudio**” (Sección 7). Se llama en especial la atención del lector a esta información debido a que es esencial para el uso e interpretación apropiada de este reporte.



## 2.0 MARCO TECTÓNICO Y GEOLOGÍA REGIONAL

Esta sección resume la ubicación, razón de actividad e importancia de los principales elementos, a escala continental, que son la fuente de sismos que pueden generar movimientos sísmicos severos y de importancia para las estructuras de interés en el sitio del Proyecto Cerro Quema. Además, se incluye una breve descripción de los sismos históricos en el sur de América Central y el noroeste de América del Sur (Colombia occidental), y la identificación y análisis de las fuentes sismogénicas conocidas en un radio de 300 km del sitio del proyecto.

### 2.1 Marco Tectónico

El Cerro Quema propiedad de Pershimco se ubica en la Península Azuero, Panamá. En términos geológicos, la propiedad se encuentra dentro de un antiguo arco volcánico magmático del Cretáceo Paleogénico desarrollado hace alrededor de 75 millones a 40 millones de años atrás. Panamá es actualmente considerada parte de una microplaca tectónica que ocupa la unión de las Placas del Caribe, América del Sur, Cocos y Nazca (Figura 1). Esta microplaca es generalmente considerada un bloque rígido que alguna vez fue parte de la Placa del Caribe, pero que ahora se distingue de la Placa del Caribe adyacente por su vector de velocidad diferente (Trenkamp et al. 2002). El margen suroccidental de la microplaca Panamá está marcado por la subducción oblicua de la Placa de Nazca y la Placa oceánica de Cocos debajo de la parte oeste de la microplaca Panamá. En su lado más oriental, el margen de la microplaca Panamá y la Placa de Nazca está marcado por el cinturón deformado del Sur de Panamá – un margen de transformación predominante que acomoda el movimiento relativo de la Placa de Nazca. Estos movimientos relativos resultan en la subducción de la Placa de Nazca debajo de América del Sur a lo largo de la fosa Ecuatoriana-Colombiana. Al norte, el margen de la microplaca Panamá comprende el cinturón deformado Panamá del Norte donde la Placa del Caribe es empujada oblicuamente debajo del norte de Panamá. Los bordes occidentales y orientales de la microplaca Panamá no están bien definidos (Figura 1), a pesar de que Montero (2001) argumenta que muchas de las fallas y las altas razones de sismicidad dentro del cinturón deformado Costa Rica marcan el límite occidental de la Placa del Caribe y la microplaca Panamá.

Rockwell et al. (2010a), sin embargo, argumenta que la microplaca Panamá no es un bloque rígido. Ellos sugieren que la microplaca está en continua deformación interna como lo evidencia la presencia de fallas sísmicamente activas con importantes altas razones de desplazamiento ( $> 5 \text{ mm/año}$ ), como las fallas Limón y Pedro Miguel cerca al Canal de Panamá Rockwell et al. (2010b). Rockwell et al. (2010b) proponen un modelo de bloque para Panamá con importantes fallas que limitan el bloque que acomodan la contracción este-oeste y la deflexión con dirección norte del arco de Panamá. Recientemente pruebas para este modelo usando el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, siglas en inglés) desarrolladas por Bennett et al. (2014) fallaron en reproducir las altas razones de desplazamiento estimadas en estudios paleosísmicos de Rockwell et al. (2010a).

En general, sin embargo, las actuales velocidades de placa interpretadas de mediciones de GPS y datos paleosísmicos muestran una convergencia consistente con dirección al este de Panamá hacia América del Sur (e.g. Trenkamp et al 2002). Las velocidades se incrementan hacia el este de razones de alrededor de 10 a 15 mm/año en Nicaragua, a 30 mm/año en el centro de Panamá, la costa de Colombia y Panamá. La cantidad de flexión, deformación interna y actividad de las fallas en la microplaca de Panamá se mantiene en controversia.



## 2.2 Geología Regional

La Península de Azuero es una característica topográfica prominente en la costa suroccidental del Pacífico de Panamá. El basamento rocoso de la Península comprende rocas basálticas masivas que son actualmente interpretadas como representaciones de rocas emergentes del margen occidental de la Placa del Caribe (Corral et al. 2011). Siguiendo el inicio de la subducción hace aproximadamente 70 millones de años, se desarrolló una secuencia de arco magmático en el basamento rocoso Azuero que son rocas volcánicas complejas. Las rocas del Grupo Azuero consisten en rocas volcánicas que incluyen tuvos volcánicos y rocas volcanoclásticas en un rango de edad aproximado desde 71 a 40 millones de años (periodo del Cretáceo Tardío a Paleogénico).

### 2.2.1 Estratigrafía Regional

Las rocas volcánicas del Cerro Quema de la Península de Azuero consisten en andesitas, dacitas y basaltos. Con ellas y dejado de estas secuencias volcánicas están los sedimentos marinos volcanoclásticos (conglomerados, areniscas, lutitas), calizas y turbiditas. Esta secuencia volcánica sedimentaria es interpretada como un depósito formado en un ambiente de subducción que estudios geológicos iniciales agrupan en la Formación Ocu. Interpretaciones subsiguientes hechas por Corral et al. (2011) argumentan que las rocas del distrito Cerro Quema no son parte de la Formación Ocu y pueden ser todavía subdivididas. De acuerdo a esto, Corral et al. (2011) definieron que la Formación Río Quema que consiste en sedimentos volcánicos y volcanoclásticos depositados con calizas y domos de dacitas submarinas con composiciones de basálticas a andesíticas. La Formación Río Quema es interpretada por Corral et al. (2011) como una secuencia de relleno en una cuenca volcánica adyacente al arco volcánico del Cretáceo Paleogénico. La Formación Cerro Quema contiene la mineralización en el distrito del Cerro Quema (Corral et al. 2011).

La unidad inferior de la Formación Río Quema consiste en rocas de flujo de lava andesítica, areniscas ricas en cristales, y turbiditas interestratificadas con calizas hemipelágicas. Esta secuencia volcánica sedimentaria es interpretada por Corral et al. (2011) como una representación de un ambiente de deposición cercano a la actividad volcánica frontal hace 70 millones de años. Las unidades superiores de la Formación Cerro Quema contienen rocas de erupciones de domos de lavas submarinas que se infiere actuaron como barreras para controlar los patrones de sedimentos marinos y volcanoclásticos.

La Formación del Cretáceo Paleogénico Tardío Río Quema está debajo de la Formación Tonasi. Estudios de Kolarsky y Mann (1995) dividieron la Formación Tonasi en unidades superior e inferior, con la unidad inferior constituida por unidades marinas sedimentarias superficiales; y la unidad superior compuesta de areniscas, limolitas y sedimentos calcáreos depositados en las profundidades del océano. La Formación Tonasi parece haber sido depositada hace 40 a 15 millones de años (Periodo Paleogénico Tardío al Neogénico Intermedio). Kolarsky y Mann (1995) mapearon las rocas horizontales de la Formación Tonasi a lo largo de la costa suroriental de la Península Azuero. Pequeños afloramientos de la Formación Tonasi afloran al sur y dentro del componente del Proyecto Cerro Quema.

Los depósitos del Periodo Cuaternario y Neogénico Tardío (15 millones de años al presente) están generalmente ausentes dentro del área de Cerro Quema. Depósitos aislados de sedimentos aluviales del aparentemente Holoceno están preservados dentro y sobre terrazas que rodean el Río Quema y sus tributarios. Cerca de la costa del Pacífico se observan grandes planicies aluviales que están preservadas y rodeando los canales actuales de los principales ríos. Estos depósitos aluviales están encima de un



aluvial Cuartenario de espesor desconocido. Las terrazas aluviales superiores no están generalmente presentes en los valles de los principales ríos. Las terrazas marinas parecen no preservadas a lo largo de la costa de la Península Azuero, a pesar de que estudios detallados revelarían depósitos marinos del Neógeno sobre los basamentos rocosos volcánicos.

Cerca de la costa del Pacífico, extensas planicies aluviales están preservadas rodeando los actuales canales de la estructura regional.

La principal estructura geológica en la Península Azuero es la falla Azuero-Sona con rumbo noroeste-sureste. Esta falla separa dos diferentes basamentos (Kolarsky y Mann 1995). Rocas en el lado suroccidental de la falla son flujos basálticos masivos y lavas con interestratigrafías de sedimentos volcanoclásticos. Los basamentos rocosos en el noreste de la falla son arcos de isla volcánica basáltica, andesítica y dacítica con interestratigrafías de sedimentos volcanoclásticos. Sedimentos horizontales de la Formación Tonasi se encuentran sobre el basamento rocoso en algunas ubicaciones, en especial al noreste de la falla Azuero-Sona y en la costa sureste de la Península Azuero.

Los afloramientos de falla observados por Kolarsky y Mann (1995) en las partes superior e inferior de la formación Tonasi indican una orientación predominantemente noroccidental-suroriental para los posteriores 20 millones de años de máxima extensión.

### 2.3 Sismos Históricos

Un registro detallado de los sismos históricos en la región de Panamá se encuentra en Golder (2014) que incluye un análisis de los registros sísmicos históricos dentro de los 150 km del sitio del Proyecto Cerro Quema. En Golder (2014) se incluye una tabla resumen con la ubicación de los principales sismos históricos ( $M \geq 6$ ), magnitudes y distancias relativas al sitio del Proyecto Cerro Quema desde inicios del siglo XIX hasta el presente.

Para este estudio, hemos expandido nuestro alcance para incluir sismos dentro de los 300 km del sitio del Proyecto Cerro Quema. La Tabla 1 muestra los registros de 30 sismos con  $M \geq 6$  registrados desde inicios del siglo XVII. Los epicentros sísmicos se muestran en la Figura 1.



### 3.0 MODELO SISMOTECTONICO ESPECIFICO DE SITIO

La caracterización del modelo sismotectónico es muy importante en la evaluación del peligro sísmico. El modelo sismotectónico representa las características sísmicas de las principales regiones tectónicas que contribuyen al peligro sísmico. En el modelo se definen todas las fuentes activas y potencialmente activas que puedan contribuir al movimiento sísmico en el sitio. Fuentes activas son todas aquellas asociadas a áreas de ruptura producidas por eventos históricos importantes. Fuentes potencialmente activas son aquellas en las cuales existe evidencia de movimiento sísmico durante la época del Holoceno (los últimos 11,700 años). El modelo sismotectónico está definido en función de la ubicación, geometría, tipo de falla, máximas magnitudes, probabilidad de existencia, razones de recurrencia sísmica y razones promedio de desplazamiento.

El modelo sísmico desarrollado para el sitio del Proyecto Cerro Quema incluye ocho fuentes areales, cinco fallas superficiales y dos fuentes asociadas a la zona de subducción de interfase. Las fuentes superficiales fueron desarrolladas basadas en un reconocimiento de terreno y fotos áreas; así como de la revisión de los más recientes estudios y mapas geológicos. Las fuentes areales fueron desarrolladas basadas en patrones observados de registros sísmicos y de un entendimiento de la geología y el marco tectónico de la región. Las fuentes de subducción de interfase fueron desarrolladas principalmente basadas en el Global Earthquake Model (GEM) de Berryman et al. (2013). La Figura 4 muestra las fuentes sísmicas usadas en este estudio, incluyendo las fuentes areales, las fallas sísmicas y las fuentes de subducción de interface. Los detalles de la caracterización de estas fuentes sísmicas específicas de sitio se presentan a continuación.

#### 3.1 Desarrollo del Catálogo Sísmico del Proyecto

El desarrollo de un EPPS específico de sitio para el sitio del Proyecto Cerro Quema requiere un entendimiento comprensivo de la distribución espacial y temporal de sismos históricos para los alrededores de la región. Debido a esto se desarrolló un catálogo específico de sitio para evaluar la apropiabilidad e incertidumbre en la razón de ocurrencia de sismos. En esta sección describimos los catálogos sísmicos y los procedimientos de procesamiento de datos usados para desarrollar el catálogo de Golder.

##### 3.1.1 Compilación del Catálogo Sísmico de Golder

Se preparó un catálogo sísmico para el sitio del Proyecto Cerro Quema a partir de catálogos sísmicos globales muy conocidos en la comunidad científica, que incluyen:

- ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009) con sismos moderados a grandes (magnitudes 5.5 y mayores) (<http://www.globalquakemodel.org/what/seismic-hazard/instrumental-catalogue/>);
- ISC Global Historical Earthquake Catalogue (1000-1903) con sismos históricos importantes (magnitudes 7 y mayores) (<http://www.globalquakemodel.org/what/seismic-hazard/historical-catalogue/>); y
- ISC Bulletin desarrollado y mantenido por the International Seismological Centre (ISC) (<http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>). ISC Bulletin contiene datos desde 1904 hasta el día presente.



Los hipocentros sísmicos fueron adquiridos para una región con longitud 90°W a 70°W y para una latitud 17°N a 3°S. El catálogo compilado fue adicionalmente procesado para remover eventos duplicados, réplicas y premonitores como se describe en las siguientes subsecciones:

### **3.1.2 Procesamiento de Datos Sísmicos**

Luego de combinar los registros sísmicos se usaron procedimientos tanto manuales como automáticos para remover y eliminar eventos duplicados en el catálogo combinado. Para eliminar los eventos duplicados, se hizo un ranking de los tres catálogos de tal manera que si se encontraban eventos duplicados, el evento del catálogo con el menor ranking es eliminado. El ranking final para establecer la prioridad en el proceso de eliminación se muestra en la Sección 3.1.1. El catálogo ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue tuvo el más alto rango.

El desarrollo de un catálogo único para el proyecto requiere también que cada sismo sea medido con una única escala de magnitud. La escala magnitud momento (**M**) se eligió como la escala base debido a que es la escala que más se usa en la práctica sismológica actual. Para este estudio, a cada evento sísmico en el catálogo del proyecto se le asignó un valor **M**. El valor de M asignado está directamente reportado en el catálogo usado.

En este informe, el catálogo sísmico resultante sin eventos repetidos y con una sola escala de magnitud se refiere como el catálogo completo de Golder (catálogo del proyecto). El catálogo del proyecto (latitud 17° norte a 3° sur y desde longitud 90° a 70° oeste) contiene 46,093 eventos con **M** mayores o iguales a 3.0. Los registros sísmicos se extienden por alrededor de 475 años desde el 24 de Noviembre, 1539 al 13 de Febrero del 2014.

La Figura 2 muestra las distribuciones de parámetros sísmicos en el catálogo del proyecto por magnitud y año de ocurrencia. Como se muestra, los sismos dentro de los 50 km del Cerro Quema son en su mayoría menores a **M** 5.0. Solo hay tres sismos históricos con magnitudes mayores a **M** 5.0. El sismo más grande es un evento **M** 5.9. Hay un significativo incremento en la ocurrencia de sismos a distancias mayores a 100 km del sitio del proyecto. No se han registrado eventos con **M** 8.0 o mayores dentro de los 500 km del sitio del proyecto. El aparente incremento en la frecuencia de ocurrencia de sismos desde 1960 hasta la actualidad este probablemente asociada a la instalación de instrumentos sísmicos modernos en 1964.

### **3.1.3 Depuración del Catálogo Sísmico del Proyecto**

La metodología para determinar el peligro sísmico está basada en asumir que los eventos sísmicos son independientes y siguen el proceso de Poisson. Debido a esto, el catálogo usado para determinar la futura actividad sísmica debe estar libre de eventos sísmicos que son consecuencia del evento sísmico principal (replicas y premonitores). Con esta finalidad, el catálogo del proyecto fue depurado usando el algoritmo de Gardner and Knopoff (1974) luego de convertir todos los eventos a una sola escala de magnitud. El propósito del proceso de depurado es eliminar todas las réplicas y premonitores del catálogo completo del proyecto.

El catálogo depurado que resultó del proceso de eliminación de réplicas y premonitores contiene 4,585 eventos ( $M \geq 3.0$ ). La Figura 3 muestra la densidad sísmica (número de epicentros por unidad de área)



para el catálogo del proyecto y el catálogo depurado. Como se esperaba, el catálogo depurado parece estar compuesto por nidos sísmicos menos densos, mientras que ambos catálogos (completo y depurado) muestran un patrón de distribución espacial sísmica muy similar. En par con el marco tectónico y geológico, los patrones de distribución espacial observados del catálogo sirvieron para definir las fuentes sísmicas areales.

## 3.2 Descripción de las Fuentes Sísmicas

En esta sección se describe las fuentes sísmicas usadas en este estudio para estimar los movimientos sísmicos de terreno en el sitio del Proyecto Cerro Quema. Tanto la estructura y deformación tectónica durante el Cuaternario, así como la distribución sísmica histórica son los dos elementos principales usados en la caracterización de las fuentes sísmicas.

### 3.2.1 Fallas Superficiales de Corteza

En este estudio se identificaron cinco (5) fallas o segmentos de falla cuyas distancias más cercanas al sitio de Cerro Quema son menores a 60 km. Las principales características de estas fallas se muestran en la Tabla 2. Los parámetros de entrada de las fallas se muestran en la Tabla 3. La identificación y desarrollo de los parámetros de entrada para estas fallas actualizan los presentados en Golder (2014). La falla mapeada del Río Joaquín en el sitio del proyecto no está incluida como una fuente sísmica debido a que esta no satisface los criterios actualmente aceptados para categorizar una falla sísmica como activa (Apéndice A).

### 3.2.2 Fuentes Areales de Corteza

Las fuentes areales de corteza se desarrollaron principalmente basadas en el marco tectónico y geológico regional, así como en los patrones sísmicos observados. Las características de las fuentes areales se muestran en la Tabla 4. El sitio Cerro Quema está ubicado en el Cinturón Deformado del Sur de Panamá y se espera que este sea el principal contribuyente a los movimientos sísmicos de terreno en el sitio del proyecto (Sección 4.2).

### 3.2.3 Fuentes de Subducción

Dos fuentes de subducción se consideraron este estudio. Las fuentes están dentro de los 300 km del sitio del proyecto Cerro Quema y son la fuente de subducción Trinchera Americana Central (MATS) y la Placa de Nazca (NPS). La geometría y los principales parámetros para las fuentes MATS y NPS fueron ajustadas del estudio GEM de Berryman et al. (2013). En este estudio se ha caracterizado las fuentes de subducción a nivel mundial usando un procedimiento consistente para todas ellas. Los principales parámetros se muestran en la Tabla 4.

MATS es una sección de la Trinchera Americana Central donde la Placa de Cocos subduce debajo de la Placa del Caribe en dirección nororiental a una velocidad relativa promedio de 80 mm/año (Placa del Caribe fija) a lo largo de la sección oriental de MATS, y a una velocidad de 71 mm/año a lo largo de la sección occidental. Este movimiento relativo de placas se acomoda a través de grandes sismos a lo largo de la zona de interfase de estas placas desde profundidades que se extienden justo por debajo de la zona de interfase hasta profundidades de 40 km.



Estudios sismológicos indican que la fuente MATS produce sismos de **M** 6-7.5 de manera regular aproximadamente cada década (Berryman et al. 2013). El sismo de subducción más grande en la fuente MATS tuvo una **M** 7.7 y ocurrió en 1950. Modelamientos de mediciones GPS (e.g. LaFemina et al. 2009) indican que el acoplamiento sísmico promedio es de 0.5. Este coeficiente de acoplamiento indica que solo la mitad de la convergencia de placas se acomoda a través de movimientos sísmicos. Por lo tanto, las velocidades relativas entre las placas se reducen en 50% para conducir a las razones de desplazamiento inferido y la razón de generación de sismos en la zona de interfase de las placas.

La fuente NOS se extiende por 1,200 km desde el noroeste Colombiano hasta el suroeste del Ecuador. La Placa de Nazca subduce debajo de la Placa de América del Sur a una velocidad relativa promedio de 53 mm/año (Placa América del Sur fija) a lo largo de la sección norte y 61 mm/año a lo largo de la sección sur. El sismo más grande conocido en este segmento tuvo M 8.8 y ocurrió en 1906. Este sismo produjo una longitud de ruptura de 600 km a lo largo de la interfase de la placa. Berryman et al. (2013) asumieron que la interfase de la Placa de Nazca y América del Sur tiene un coeficiente de acoplamiento alto de 0.8 debido a la alta razón de sismicidad del segmento.

### 3.3 Recurrencia Sísmica

Los parámetros de las fuentes sísmicas requeridos para estimar los movimientos sísmicos de terreno específicos para el sitio del proyecto Cerro Quema incluyen:

- Razones de actividad sísmica basadas en el análisis de registros sísmicos históricos, velocidad de convergencia de placas, razones de desplazamiento de fallas, y/o intervalos de recurrencia sísmica.
- Estimaciones de la magnitud sísmica máxima para cada fuente sísmica basadas en los sismos históricos más grandes y/o relaciones empíricas entre la longitud de falla, desplazamiento máximo o promedio de un evento sísmico y la magnitud sísmica. (e.g. Stirling et al. 2013).
- Modelos de recurrencia sísmica (exponencial, exponencial truncado o característico).
- Distancia de la Fuente o plano de ruptura de la falla al sitio.
- Profundidad del foco sísmico.

Los principales parámetros de las fallas sísmicas, fuentes areales y de subducción usadas en el estudio de peligro sísmico específico de sitio para el Proyecto Cerro Quema se muestran en las Tablas 3 y 5. Las siguientes secciones muestran el proceso usado para estimar estos parámetros:

#### 3.3.1 Estimación de Parámetros de Recurrencia Sísmica

Los registros sísmicos en el catálogo depurado del Proyecto se evaluaron para observar si estos estaban completos. Para esto las magnitudes sísmicas se agruparon en intervalos de diferentes magnitudes. Luego se siguió el proceso recomendado por Mulargia y Tinti (1985). La Figura 6 muestra este proceso para la fuente sísmica SPDB.



Para este estudio se utiliza el modelo de recurrencia truncado de Gutenberg–Richter (modelo G-R) para caracterizar las fuentes areales de corteza superficial y las fuentes de subducción. El modelo G-R se usa para modelar la recurrencia sísmica histórica. Los parámetros para el modelo G-R se estimaron usando el método descrito por Weichert (1980) para la mayoría de fuentes areales. Además, se adoptaron los valores de  $b$  y razones de desplazamiento de fallas del estudio GEM para las fuentes de subducción de interfase.

El valor estimado óptimo de  $b$  y la razón de actividad sísmica para SPDB se muestran en la Figura 7. Además de nuestra mejor estimación del valor de  $b$  y razón de actividad sísmica, las líneas discontinuas en la Figura 7 muestran estimados inferiores y superiores de recurrencia sísmica. Los valores inferiores y superiores del  $b$  representan nuestra mejor estimación más y menos una desviación estándar. La desviación estándar del valor de  $b$  es relativamente corta debido a que existe una cantidad razonable de eventos sísmicos históricos en la fuente SPDB. Las correspondientes razones de actividad sísmica se calcularon al sumar o restar una desviación estándar a la mejor estimación de la razón de actividad sísmica para la magnitud mínima usada en el método de Weichert (1980).

Para caracterizar la recurrencia de eventos sísmicos en las cinco fallas sísmicas se usó el modelo característico. En este modelo, usamos el valor de  $b$  y el promedio de la razón de desplazamiento de fallas para caracterizar el comportamiento de recurrencia sísmica en estas. El valor de  $b$  que se asumió fue de 0.8, valor típico para las fallas de corteza superficial. Las razones de desplazamiento se estimaron basadas en nuestra evaluación de la geología regional (Golder 2014) y en los trabajos de reconocimiento de campo (Apéndice A).

### **3.3.2 Magnitud Máxima**

La magnitud máxima para las fallas sísmicas se estimó a través de las relaciones de escalamiento recomendadas por Stirling et al. (2013). Las estimaciones de magnitud momento ( $M$ ) usadas en nuestro modelo corresponden a nuestras mejores y preferidas estimaciones. Las magnitudes máximas para las fuentes areales se adoptaron usualmente del estudio de Benito et al. (2012). Sin embargo, se hicieron los ajustes necesarios para las fuentes areales donde las magnitudes máximas registradas históricamente fueron mayores a la magnitud máxima establecida por Benito et al. (2012). La magnitud máxima para la fuente SPDB se limitó a  $M$  6.8 para evitar repetir dos veces los eventos grandes.

### **3.3.3 Magnitud Mínima**

La magnitud mínima típica usada en estudios de peligro sísmico similares a este está en rangos de  $M$  4.0 a  $M$  5.0 (e.g. Bozzoni et al. 2011; Brown and Gibson 2004; Petersen et al. 2008; Stucchi et al. 2011). Para este estudio se usó una magnitud  $M$  4.5 como magnitud mínima – similar a Benito et al. (2012). El uso de magnitudes mínimas menores a  $M$  4.5 son consideradas de poca o no importancia ingenieril debido a que estas no desarrollan movimientos sísmicos severos de larga duración.

### **3.3.4 Profundidad del Foco Sísmico**

La distribución de profundidades sismogénicas de los sismos históricos se muestra en la Figura 5. Esta figura muestra que la mayoría de eventos sísmicos en las fuentes areales ocurren a una profundidad de 10 a 33 km. Para este estudio se asumió una profundidad de 10 km para las fuentes areales. El límite del buzamiento de la ruptura sísmica en la fuente de subducción de interfase se asumió en 7.5 km para MATS y 8.0 km para NPS (Berryman et al. 2013). El límite inferior se estableció en 25 km y 50 km,



Noviembre, 2014

ES-1

Project No. 1400908  
CQ04 GAI-001-R-V4

respectivamente. Estos límites fueron recomendados por Berryman et al. (2013). Para las fallas sísmicas se asumió una profundidad sismogénica de 15 km.



## 4.0 ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO ESPECÍFICO DE SITIO

Esta sección presenta el marco teórico de los análisis probabilísticos y determinísticos de peligro sísmico para el sitio del Proyecto Cerro Quema. La Figura 8 es un resumen de los principales pasos usados en este estudio específico de sitio, que incluyen la naturaleza de los modelos de entrada y la metodología usada.

### 4.1 Métodos de Análisis de Peligro Sísmico

#### 4.1.1 Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico (APPS)

El análisis probabilístico de peligro sísmico estima la probabilidad de que algún movimiento sísmico sea excedido en un intervalo de tiempo. Esta probabilidad de excedencia es evaluada basada en intervalos de recurrencia sísmica, distancia del sitio a la fuente, y atenuación del movimiento sísmico con la distancia. El APPS considera tanto la variabilidad aleatoria como la incertidumbre epistémica. La variabilidad aleatoria describe la aleatoriedad natural en un proceso, como la ocurrencia de un sismo, y la incertidumbre epistémica en la incertidumbre científica en los modelos que describen procesos naturales, usualmente debido a las limitaciones en mediciones y datos en un proceso natural. Una de las principales ventajas del APPS es que esta puede incorporar comprensivamente y cuantificar las incertidumbres epistémicas.

#### 4.1.2 Análisis Determinístico de Peligro Sísmico (ADPS)

El ADPS emplea datos geológicos y sísmicos históricos disponibles para generar estimaciones discretas, de valor único, sobre los parámetros sísmicos en el sitio. Generalmente, se especifican uno o más sismos en función de su magnitud y ubicación con respecto al sitio de análisis. El ADPS usa el concepto del sismo máximo creíble (SMC). El SMC es el sismo de mayor magnitud considerado que parece posible a lo largo de la falla reconocida, o dentro de una provincia tectónica definida geográficamente, dentro de un marco tectónico supuesto o conocido (ICOLD 2010). En el ADPS no es relevante la definición del intervalo de recurrencia del sismo máximo asociado a la fuente, el cual puede variar de menos de cien a más de diez mil años, dependiendo del ambiente geológico en consideración.

### 4.2 Relaciones de Predicción del Movimiento Sísmico

Las relaciones de predicción del movimiento sísmico (GMPE, de sus siglas en inglés) son un componente importante en los análisis de peligro sísmico. Las GMPE proveen estimaciones de movimientos sísmicos (como la aceleración máxima de terreno y aceleraciones espectrales) como funciones del estilo de la falla sísmica, la magnitud sísmica, la distancia de la fuente al sitio y/o condiciones de suelo. Las GMPE que se usaron en este estudio se seleccionaron en la base de que las condiciones tectónicas y geológicas del sitio del Proyecto Cerro Quema son similares a las regiones donde los sismos fueron registrados y se desarrollaron las GMPE. La Tabla 6 muestra las GMPE para las fuentes areales, de falla y subducción, así como su respectiva ponderación en el modelo sísmico.

Para la atenuación del movimiento sísmico y aceleraciones espectrales para las fallas y fuentes areales de corteza, se utilizaron cuatro relaciones de atenuación de “Siguiente Generación” (Next Generation Attenuation, NGA) publicadas por el Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) en el 2008. Las relaciones usadas son las desarrolladas por Abrahamson y Silva (2008), Chiou & Youngs



(2008), Boore & Atkinson (2008) y su modificación para eventos pequeños y medianos (Atkinson and Boore 2011), y Campbell & Bozorgnia (2008).

Cada modelo fue usado con ponderaciones similares. Los modelos NGA se desarrollaron para regiones tectónicas activas principalmente basadas en movimientos sísmicos severos registrados en límites de placa activos principalmente en California, USA. Estos modelos fueron desarrollados usando un proceso sistemático con registros de movimiento sísmicos severos de alta calidad, considerando las condiciones de suelo y los efectos de saturación a cortas distancias. Los modelos NGA se han empleado globalmente para modelar la atenuación del movimiento sísmico con la distancia gatilladas por fallas sísmicas tanto en evaluaciones probabilísticas como determinísticas del peligro sísmico.

Para las fuentes de subducción de interfase, se utilizó tres alternativas de GMPE, Abrahamson et al. (2012), Atkinson and Boore (2003) and Zhao et al. (2006). Estas GMPE fueron desarrolladas específicamente para considerar la atenuación de movimientos sísmicos debido a sismos que ocurren en los límites de placas de subducción. Muchas de estas GMPE fueron evaluadas por Beauval et al. (2012) tanto para sismos de interfase como de intraplaca y con magnitudes M 6.0 o mayores. Los resultados de la evaluación muestran que tres GMPE seleccionadas para este estudio predicen adecuadamente bien los movimientos sísmicos registrados en las regiones del Centro y Sur América. Estas GMPE fueron además recomendadas por Stewart et al. (2013) para evaluaciones de peligro sísmico globales debido a que están basadas en una amplia base de datos, consideran atributos apropiados para el escalamiento en la magnitud y distancia y producen diferentes tendencias de atenuación con la distancia, por lo que representan un tratamiento adecuado de la incertidumbre epistémica en las predicciones de movimiento sísmico.

### 4.3 Análisis de Árboles Lógicos

Los análisis de árboles lógicos se usaron para tener en cuenta las incertidumbres epistémicas en términos de ubicación, magnitud y mecanismos de sismos. La incertidumbre epistémica es la incertidumbre científica en el modelo simplificado de un proceso y parametrizada por modelos alternativos (Abrahamson 2006, 2009). Nuestros análisis de sensibilidad muestran que los análisis de peligro sísmico en el sitio del Proyecto Cerro Quema son más sensibles a los parámetros descritos a continuación. Todos estos parámetros se incorporaron en el árbol lógico mostrado en la Figura 9, y en las Tablas 3 y 5.

#### ■ Ecuaciones de Predicción del Movimiento Sísmico (GMPE)

Las cuatro relaciones NGA se usaron con ponderaciones iguales para incorporar la incertidumbre epistémica en la predicción del movimiento sísmico para fuentes areales y fallas sísmicas. Para las GMPE de subducción se usaron tres alternativas. La Tabla 6 muestra el resumen de la GMPE y sus ponderaciones.

#### ■ Parámetros de Recurrencia Sísmica

Los movimientos sísmicos en el sitio del proyecto son sensibles a los parámetros de recurrencia, que incluyen el parámetro  $b$  y la razón de actividad sísmica. Valores de  $b$  alternativos se estimaron e incluyeron al añadir o sustraer una desviación estándar a la mejor estimación usada en el método de Weichert. Se aplicó un peso de 0.6 a los



parámetros de mejor estimación y una ponderación de 0.2 para cada par de recurrencia correspondiente al límite superior e inferior del valor de  $b$ .

#### ■ Razón de Movimiento de Falla

Las mejores estimaciones de las razones de movimiento para las fallas consideradas en este estudio se muestran en la Tabla 3. Se asignó una razón de movimiento superior e inferior con sus asociados parámetros.

#### ■ Magnitud Máxima

Para las fuentes areales y fallas sísmicas se incluyeron valores alternativos de magnitud máxima. Para la mejor estimación se dio una ponderación de 0.6; mientras que para los límites inferiores y superiores se usaron pesos de 0.3 y 0.1, respectivamente.

Debido a que la contribución de las fuentes sísmicas de subducción de interfase al movimiento sísmico en el sitio del Proyecto Cerro Quema es mínima, solo se implementaron las ramas del árbol lógico para los parámetros de recurrencia sísmica y magnitud máxima. Por lo que para las fuentes de subducción de interfase solo se usaron valores asociados a nuestras mejores estimaciones.



## 5.0 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO

Los resultados del análisis de peligro sísmico específico de sitio para el Proyecto Cerro Quema reportados en este trabajo se obtuvieron a través del software EZ-FRISK v 7.62 (Risk Engineering, Inc. 2011). Los resultados son para un sitio con condiciones similares a roca fracturada o suelo rígido (Sitio Clase en el límite entre B/C del International Building Code – 2009 IBC). El Sitio Clase B/C se define como un sitio con velocidades de ondas de corte para los 30 m superiores de una columna de suelo ( $V_{s30}$ ) de alrededor de 760 m/s.

Los resultados del análisis de peligro sísmico específico de sitio se presentan y discuten en esta sección. Los análisis fueron realizados para las aceleraciones horizontales máximas de terreno y aceleraciones espectrales con 5% de amortiguamiento.

### 5.1 Curvas de Peligro Sísmico Promedio

Las curvas de peligro sísmico promedio para la aceleración máxima, y aceleraciones espectrales asociadas a 0.2 y 1 segundo para un Sitio Clase B/C se muestran en la Figura 10. Las curvas de peligro sísmico ilustran la variación de aceleración máxima y aceleraciones espectrales en función de la probabilidad anual de excedencia (su inversa es el periodo de retorno). La Figura 10 muestra el peligro sísmico para períodos de retorno desde 20 a 5,000 años. En particular, los valores de aceleración máxima para un Sitio Clase B/C son 0.238, 0.311 y 0.422g, respectivamente, para períodos de retorno de 475, 975 y 2,475 años.

### 5.2 Espectro de Aceleraciones Espectrales con 5% de Amortiguamiento

El análisis y diseño sísmico de estructuras ingenieriles requiere espectros de peligro sísmico uniforme específicos de sitio (UHRS, de siglas en inglés). El espectro de aceleraciones espectrales se describe como de peligro uniforme (o igual) debido a que cada valor de aceleración espectral del espectro de respuesta tiene el mismo periodo de retorno; es decir, que los movimientos sísmicos tienen la misma probabilidad de excedencia en cualquier periodo estructural (Abrahamson 2006). Estos espectros sísmicos presentan respuesta de aceleraciones para un rango de períodos estructurales de interés ingenieril.

La Figura 11 muestra el espectro sísmico de peligro uniforme con 5% de amortiguamiento con períodos de retorno de 475, 975 y 2,475 años para suelos Sitio Clase B/C; y para la aceleración máxima y para períodos estructurales hasta 10 segundos. En este trabajo la aceleración máxima corresponde a un periodo estructural de 0.01 segundos. La Tabla 7 muestra las aceleraciones espectrales para períodos de retorno de 475, 975 y 2,475 años y para un suelo Sitio Clase B/C.

### 5.3 Desagregación del Peligro Sísmico por Magnitud, Distancia y Épsilon

Además de las curvas de peligro sísmico que muestran el efecto combinado de la magnitud sísmica y la distancia de la fuente sísmica al sitio en la probabilidad de excedencia de algún valor de aceleración, se presentan la desagregación del peligro sísmico por magnitud, distancia y épsilon. La desagregación calcula la contribución fraccionada de combinaciones de magnitud y distancia al peligro total. Los resultados de la desagregación se usan para identificar los sismos que más contribuyen al peligro sísmico estimado probabilísticamente. Los procedimientos de desagregación indican que las magnitudes sísmicas asociadas a estos sismos o fuentes sísmicas que producen el movimiento sísmico



calculado en el sitio (Abrahamson 2006). La Tabla 8 muestra valores promedio de magnitud, distancia y épsilon que contribuyen a movimientos sísmicos de especial interés.

Los resultados de la desagregación se presentan como pares bidimensionales de magnitud y distancia. Estos pares definen el rango sobre el cual la contribución al peligro es calculada. Por ejemplo, el par magnitud-distancia representa la contribución al peligro sísmico de eventos con magnitudes entre **M** 5.0 y **M** 6.0 a distancias entre 0 y 50 km desde el sitio del proyecto.

La variación de los resultados de desagregación para períodos de retorno de 475 y 2,475 años se muestra en la Figura 12 para la aceleración máxima y aceleraciones espectrales de 0.2 y 1 segundo, y para suelo Sitio Clase B/C. Los resultados de desagregación (panel superior) muestran que la mayor contribución a la aceleración máxima asociada a 475 años son eventos sísmicos con **M** < 7.0 dentro de los 40 km del sitio del proyecto.

Sismos grandes en fallas sísmicas contribuyen en mayor proporción a los movimientos sísmicos con grandes períodos de retorno y períodos estructurales largos. Los picos en la Figura 12(a1) a una distancia de alrededor de 20 y 60 km corresponden a la contribución proveniente de las fallas sísmicas. El pico en la Figura 12(a3) con magnitud 7.6 y a una distancia de alrededor de 60 km representa la contribución de sismos grandes (**M** 7.5 a **M** 7.7) provenientes de la Falla del Sur de Panamá. Los resultados de la desagregación para períodos de retorno de 2,475 años (paneles inferiores), en general, muestran tendencias similares a pesar de que el peligro sísmico parece que es dominado por sismos ligeramente grandes con distancias cortas.

La Figura 13 muestra la desagregación por épsilon ( $\epsilon$ , número de desviaciones estándares en espacio logarítmico por las que el logaritmo del movimiento sísmico varía del valor medio) para la aceleración máxima y aceleraciones espectrales asociadas a 0.2 y 1 segundo con períodos de retorno de 475 y 2,475 años para un sitio Clase B/C. Las desagregaciones se efectuaron considerando todas las fuentes sísmicas incluidas en el análisis. Estas figuras muestran que la aceleración máxima, y aceleraciones espectrales con 5% de amortiguamiento para 0.2 y 1.0 segundos son en general mayores al valor medio de los movimientos sísmicos producidos por todas las combinaciones de magnitud y distancia usadas en el análisis ( $\epsilon>0$ ). Los resultados de la desagregación se muestran en la Tabla 8.

## 5.4 Contribución al Peligro Sísmico por Fuentes Sísmicas

La Figura 14 muestra la contribución a la aceleración máxima, aceleraciones espectrales para 0.2 y 1 segundo para todas las fuentes sísmicas y para períodos de 475 y 2,475 años. El principal contribuyente a la aceleración máxima y las aceleraciones espectrales con periodo de 0.2 segundos es la fuente sísmica SPDB (Figura 4) sobre la cual se ubica el sitio del Proyecto Cerro Quema. Las fallas sísmicas son las que más contribuyen a los movimientos sísmicos asociados a las aceleraciones espectrales con 1 segundo.

## 5.5 Resultados Análisis Determinístico Peligro Sísmico

Los espectros sísmicos determinísticos calculados para un sitio Clase B/C para potenciales escenarios del SMC – sismos característicos de fallas conocidas mostrados en la Tabla 3. Para cada falla sísmica se estimaron valores ponderados promedio del 84% percentil (i.e. media + 1 desviación estándar) de las



aceleraciones espectrales provenientes de cuatro relaciones de predicción del movimiento del terreno (cuatro NGA GMPEs). Luego se estimó la envolvente para el espectro determinístico (84% percentil).

La Tabla 9 muestra el espectro sísmico determinístico (envolvente) para distintos períodos estructurales que van desde 0.01 a 10 segundos. El SMC que domina las aceleraciones espectrales asociadas a períodos estructurales de 0.5 segundos o menores es un evento con M 6.9 en la Falla PA-11b a 12 km del sitio del proyecto. El SMC para las aceleraciones espectrales asociadas a períodos estructurales largos (mayores o iguales a 0.75 segundos) es un evento grande de M 8.0 en la Falla PA-11a (Falla Azuero-Soná) a 18 km del sitio del proyecto. La aceleración máxima de terreno estimada para el SMC (84% percentil) es 0.383.

## 5.6 Espectro Sísmico de Diseño según ASCE 7-05

Entendemos que los diseños estructurales en el sitio del Proyecto Cerro Quema seguirán lo estipulado en los códigos 2009 International Building Code (IBC) y el American Society of Civil Engineers (ASCE) 7-05. En estas líneas, se han estimado movimientos sísmicos de terreno siguiendo los procedimientos establecidos en el Capítulo 21 del ASCE 7-05. El procedimiento del ASCE 7-05 define movimientos sísmicos para diseño basados en el espectro sísmico del sismo máximo considerado (MConE, de sus siglas en inglés). El espectro sísmico del MConE se desarrolla a través de aceleraciones espectrales asociadas a 0.2 segundos ( $S_S$ ) y 1.0 segundo ( $S_1$ ) con un 2% de probabilidad de excedencia en 50 años, o un periodo de retorno de 2,475 años. Los valores de  $S_S$  and  $S_1$  se determinan de un análisis de peligro sísmico específico de sitio para un suelo Sitio Clase B/C – Vs30 de 760 m/s. Debido a que el sitio del Proyecto Cerro Quema está encima de una capa delgada de suelo (< 2m) que se apoya en un estrato rocoso moderadamente meteorizado y freso, se estimó que el suelo Sitio Clase B según el ASCE-7 es apropiado para el sitio del proyecto. Por lo tanto, no se necesitan los factores de amplificación de suelo ( $F_a$  and  $F_v$ ) requeridos para definir los valores de  $S_{MS}$  y  $S_{M1}$ . Es posible, sin embargo, que estos factores se necesiten en sitios en los que la profundidad a la roca excede los 2 m. El espectro sísmico del MConE luego se multiplica por 0.66 (dos tercios) para convertir los movimientos sísmicos del MConE a movimientos sísmicos de diseño ( $S_{DS}$  and  $S_{D1}$ ). Luego se determina el espectro sísmico con 5% de amortiguamiento siguiendo los procedimientos del ASCE 7-05 en su Capítulo 11.

Para estudios de peligro sísmico específico de sitio (ASCE 7-05, Capítulo 21) existe además un requerimiento para comparar el espectro del MConE con el espectro del SMC calculado por métodos determinísticos. Este procedimiento requiere un espectro sísmico con 5% de amortiguamiento que es 150% de la media (50% percentil) del espectro obtenido del análisis determinístico (ADPS). Este espectro sísmico es luego comparado con el límite inferior del MConE con un  $S_S$  de 1.5 g y  $S_1$  de 0.6 g como se muestra en el Capítulo 21 del ASCE 7-05. Los mayores de estos valores espectrales se consideran para el espectro sísmico determinístico MConE. Finalmente, el espectro sísmico específico de sitio para diseño se determina como dos tercios del mínimo entre el espectro determinístico MConE y el espectro probabilístico MConE (para cada periodo estructural). El espectro sísmico probabilístico MConE es el espectro sísmico con periodo de retorno de 2,475 años (Sección 5.5).

El espectro sísmico horizontal para diseño es el mayor del espectro sísmico desarrollado según el Capítulo 21 y el 80% del espectro de diseño según los procedimientos del ASCE 7-05 Capítulo 11. Las aceleraciones espectrales de diseño para algunos períodos estructurales se muestran en la Tabla 11.



### 5.6.1 Periodo de Transición a Periodos Largos

El procedimiento del ASCE 7-05 requiere el uso de un periodo de transición a periodos largos ( $T_L$ --en segundos) para el desarrollo del espectro sísmico de diseño. El ASCE 7-05 provee mapas con la distribución de  $T_L$  para los Estados Unidos, cuyos valores de  $T_L$  varían entre 4 y 16. Panamá no posee este tipo de mapas.

Recomendamos un  $T_L$  de 16 segundos para el sitio del Proyecto Cerro Quema. Nuestra recomendación se basa en la revisión de la distribución de periodos de transición para las regiones tectónicas del oeste de los Estados Unidos y Alaska, como se muestra en el ASCE 7-05, Capítulo 22. El peligro sísmico en estas regiones del oeste de los Estados Unidos está dominado por sismos frecuentes y de gran tamaño asociados a la zona de subducción del oeste de Norte América, incluyendo Alaska. Esta situación sismotectónica es muy similar a la del sur de Panamá. Por lo tanto, consideramos que un  $T_L$  de 16 segundos es recomendable para el sitio del Proyecto Cerro Quema.

## 5.7 Discusión

### 5.7.1 Comparación entre Sismicidad Observada y Predecida

La Figura 15 compara la sismicidad observada y predecida dentro de los 100, 300 y 500 km del sitio del Proyecto Cerro Quema. En la Figura 15, los puntos muestran la razón de actividad sísmica anual calculada en base al catálogo depurado; la línea continua representa la razón de actividad sísmica predecida para las fuentes areales o porciones de estas que están en las correspondientes regiones con sus correspondientes modelos de recurrencia; y la línea discontinua muestra la razón de actividad sísmica predecida tanto para las fuentes areales como para las fallas sísmicas. Como se muestra en la Figura 15, las razones de actividad sísmica predecidas son muy parecidas a las observadas debido a la actividad sísmica dentro de los 100 km del sitio del proyecto. Además, las razones de actividad sísmica predecidas son ligeramente mayores a las observadas para eventos sísmicos grandes a distancias mayores a los 100 km del sitio.

Consideramos que las razones de actividad ligeramente mayores para los sismos grandes a distancias mayores a 100 km son aceptables debido a que los resultados de desagregación del peligro sísmico (Sección 5.3 y Figura 12) indican que el peligro sísmico en el sitio del proyecto está controlado por sismos de moderada magnitud ubicados a distancias de 40 km del sitio del Proyecto Cerro Quema. Esta comparación confirma que nuestro modelo sísmico ha modelado apropiadamente y fielmente la ubicación y patrones de ocurrencia sísmica observados en los registros sísmicos históricos.

### 5.7.2 Comparación con el Estudio Regional del 2012

La Tabla 10 compara los valores promedio de aceleraciones máximas horizontales y aceleraciones espectrales con 1 segundo con períodos de retorno de 500 y 2,500 años con los valores obtenidos de un estudio de peligro sísmico para la Región de América Central (Benito et al. 2012). Como se muestra en la Tabla 10, el valor promedio de la aceleración máxima de este estudio es en general menor que el valor promedio reportado en Benito et al. (2012); mientras que el valor promedio de aceleración espectral para 1 segundo es muy similar con los del estudio regional.

Las diferencias en los valores de aceleración máxima probablemente se deban a diferencias en la caracterización del Cinturón Deformado del Sur de Panamá (SPDB en Figura 4) hechas por Benito et al



(2012) y las usadas en este estudio. La subducción oblicua de la Placa de Nazca debajo del Arco de Panamá produce fallamientos de rumbo y transpresionales subparalelos al margen de placa (e.g. Westbrook et al. 1995). Basados en el actual entendimiento del marco tectónico en esta región, consideramos que es conservador modelar la sismicidad intermedia y profunda del SPDB como fuentes sísmicas de interfase e intraplaca. En cambio, hemos modelado la SPDB como una fuente de corteza dominada por fallas reversas y de cabalgamiento.

Además, se espera que diferencias también resulten del uso de diferentes ecuaciones de predicción del movimiento sísmico (GMPE). Las cuatro NGA GMPE usadas en este estudio se consideran parte del actual estándar de la práctica para predecir movimientos sísmicos en regiones con márgenes tectónicos activos como Panamá. Por ejemplo, Frankel et al. (2010; 2011) aplicaron estos NGA GMPE para evaluar el peligro sísmico en Haití a lo largo del límite entre las Placas del Caribe y Norte América, donde el marco tectónico es similar al encontrado en Panamá.



## 6.0 RESUMEN Y CONCLUSIONES

Los registros sísmicos históricos y el marco tectónico regional dentro de los 500 km del sitio del Proyecto Cerro Quema fueron representados por un modelo sísmico específico de sitio que contiene ocho fuentes areales, cinco fuentes sísmicas y dos fuentes de subducción. Todas estas fuentes sísmicas contribuyen al movimiento sísmico de terreno en el sitio del Proyecto Cerro Quema. Las fuentes areales y de corteza fueron desarrolladas basadas en la ubicación de sismos históricos y sus razones de ocurrencia, de la interpretación de modelos geológicos recientes y de resultados del trabajo de reconocimiento de campo de Golder (Apéndice A). El sitio del proyecto Cerro Quema está ubicado dentro de la fuente sísmica areal SPDB, definida en este estudio. Las dos fallas sísmicas mapeadas, la Falla Azuero-Soná y la Falla del Sur de Panamá, están a 18 y 57 km del sitio del Proyecto, respectivamente. Estas dos fallas o sus segmentos son capaces de generar sismos con grandes magnitudes (**M** 7.5 o mayores)

Consideramos que la Falla Rio Joaquín y otras fallas menores mapeadas en los alrededores del sitio del proyecto no representan peligro de ruptura superficial debido a que estas tienen poca o inexistente expresión topográficas, tienen continuidad lateral limitada y probablemente se hallan formado en un régimen tectónico diferente al actual (Apéndice A).

El estudio probabilístico de peligro sísmico se realizó para un suelo rígido/roca fracturada ( $V_{s30} = 760 \text{ m/s}$ ). Los resultados del estudio indican que la aceleración máxima horizontal para un suelo Sitio Clase B es de 0.238 g y 0.422 g para períodos de retorno de 475 y 2,475 años, respectivamente. Las aceleraciones espectrales para 0.2 s y 1.0 s pueden ser usadas como valores  $S_S$  and  $S_1$  para la aplicación del ASCE 7-05 con un periodo de transición ( $T_L$ ) de 16 segundos. Estos valores indican un nivel moderado de peligro sísmico para el periodo de retorno de 2,475 años en el sitio del Proyecto Cerro Quema.

Los análisis de desagregación indican que la aceleración máxima y la aceleración espectral de 0.2 segundos para períodos de retorno de 475 y 2,475 años está controlada por sismos con  $M < 7$  con distancias menores a 40 km del sitio. Los principales contribuyentes para la aceleración espectral de 1.0 segundo para períodos de retorno de 475 y 2,475 años son sismos grandes (**M** 7.5 a 7.7) en la Falla del Sur de Panamá, alrededor de 57 km al sur del sitio del Proyecto Cerro Quema.

Los resultados del análisis determinístico indican que el valor del 84% percentil es de 0.383 g para un sitio con suelo rígido/roca meteorizada. El SMC que domina las aceleraciones espectrales asociadas a períodos estructurales de 0.5 segundos o menores es un evento con **M** 6.9 a 12 km del sitio del proyecto. El SMC para las aceleraciones espectrales asociadas a períodos estructurales largos (mayores o iguales a 0.75 segundos) es un evento grande de **M** 8.0 en la Falla Azuero-Soná a 18 km del sitio del proyecto.

La comparación entre los resultados de este estudio específico de sitio y los que se reportaron en un estudio sísmico regional para América Central desarrollado por Benito et al. (2012) indican valores similares con valores del límite inferior de las aceleraciones espectrales de 1.0 segundo para períodos de retorno de 500 a 2,500 años. Estimaciones para valores de la aceleración máxima son generalmente menores en este estudio que las reportadas por Benito et al. (2012). Atribuimos nuestros menores valores a un modelamiento más realista de la fuente SPDB, que fue modelada como una fuente de corteza y no como una fuente de subducción.



## 7.0 IMPORTANT INFORMATION AND LIMITATIONS OF THIS REPORT

**Standard of Care:** Golder has prepared this report in a manner consistent with that level of care and skill ordinarily exercised by members of the engineering and science professions currently practicing under similar conditions in the jurisdiction in which the services are provided, subject to the time limits and physical constraints applicable to this report. No other warranty, expressed or implied is made.

**Basis and Use of the Report:** This report has been prepared for the specific site, design objective, development and purpose described to Golder by the Client. The factual data, interpretations and recommendations pertain to a specific project as described in this report and are not applicable to any other project or site location. Any change of site conditions, purpose, development plans or if the project is not initiated within eighteen months of the date of the report may alter the validity of the report. Golder cannot be responsible for use of this report, or portions thereof, unless Golder is requested to review and, if necessary, revise the report.

The information, recommendations and opinions expressed in this report are for the sole benefit of the Client. No other party may use or rely on this report or any portion thereof without Golder's express written consent. If the report was prepared to be included for a specific permit application process, then upon the reasonable request of the client, Golder may authorize in writing the use of this report by the regulatory agency as an Approved User for the specific and identified purpose of the applicable permit review process. Any other use of this report by others is prohibited and is without responsibility to Golder. The report, all plans, data, drawings and other documents as well as all electronic media prepared by Golder are considered its professional work product and shall remain the copyright property of Golder, who authorizes only the Client and Approved Users to make copies of the report, but only in such quantities as are reasonably necessary for the use of the report by those parties. The Client and Approved Users may not give, lend, sell, or otherwise make available the report or any portion thereof to any other party without the express written permission of Golder. The Client acknowledges that electronic media is susceptible to unauthorized modification, deterioration and incompatibility and therefore the Client cannot rely upon the electronic media versions of Golder's report or other work products.

The report is of a summary nature and is not intended to stand alone without reference to the instructions given to Golder by the Client, communications between Golder and the Client, and to any other reports prepared by Golder for the Client relative to the specific site described in the report. In order to properly understand the suggestions, recommendations and opinions expressed in this report, reference must be made to the whole of the report. Golder cannot be responsible for use of portions of the report without reference to the entire report.

Unless otherwise stated, the suggestions, recommendations and opinions given in this report are intended only for the guidance of the Client in the design of the specific project. Contractors bidding on, or undertaking the work, should rely on their own investigations as to how subsurface conditions may affect their work, including but not limited to proposed construction techniques, schedule, safety and equipment capabilities.



## 8.0 CIERRE

Golder Associates Inc. provee estos resultados para desarrollar los análisis y diseños sísmicos en el sitio del Proyecto Cerro Quema. Los parámetros sísmicos se desarrollaron específicamente para el sitio Cerro Quema y consideraron el complejo marco tectónico y los registros de sismicidad histórica interpretados de información disponible. Estudios adicionales de terreno y nueva información acerca de la tectónica de la región podría requerir una re-evaluación de estos resultados en el futuro.

### **GOLDER ASSOCIATES INC.**

EH/AH/FL/DL



## 9.0 REFERENCIAS

- Abrahamson, N. 2006. Seismic Hazard Assessment: Problems with Current Practice and Future Developments, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, a joint event of the 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC, Geneva, Switzerland, September.
- Abrahamson, N. 2009. The State of the Practice of Seismic Hazard Analysis: From the Good to the Bad. EERI Distinguished Lecture. EERI Chapter, University of British Columbia.
- Abrahamson, N., N. Gregor, and K. Addo. 2012. BCHydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes. *Earthquake Spectra*.
- Abrahamson, N., and W. Silva. 2008. Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations. *Earthquake Spectra*, 24(1), 67-97.
- Atkinson, G. M., and D. M. Boore. 2003. Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(4), 1703-1729.
- Atkinson, G. M., and D. M. Boore. 2011. Modifications to existing ground-motion prediction equations in light of new data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(3), 1121-1135.
- Beauval, Céline, F. Cotton, N. Abrahamson, N. Theodulidis, E. Delavaud, L. Rodriguez, F. Scherbaum, and A. Haendel. 2012. Regional differences in subduction ground motions. arXiv preprint arXiv: 1212.3287.
- Benito, M. B., C. Lindholm, E. Camacho, Á. Climent, G. Marroquín, E. Molina, W. Rojas et al. 2012. A new evaluation of seismic hazard for the Central America region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2), 504-523.
- Bennett, R., Spinler, J., Compton, K., Rockwell, T., Gath, E., 2014, Global Positioning System constraints on active crustal deformation in Central Panama, *Seismological Research Letters* 85, p. 278-283.
- Berryman K., Wallace L., Hayes G., Bird P., Wang K., Basili R., Lay T., Stein R., Sagiya T., Rubin C., Barreintos S., Kreemer C., Litchfield N., Pagani M., Gledhill K., Haller K., Costa C. 2013. The GEM Faulted Earth Subduction Characterisation Project, Version 1.0, June 2013, GEM Faulted Earth Project], available from <http://www.nexus.globalquakemodel.org/gem-faulted-earth/posts>.
- Boore, D.M., and G.M. Atkinson. 2008. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24(1), 99-138.
- Bozzoni, F., M. Corigliano, C.G. Lai, W. Salazar, L. Scandella, E. Zuccolo, and R. Robertson. 2011. Probabilistic seismic hazard assessment at the eastern Caribbean Islands. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(5), 2499-2521.
- Brown, A., and G. Gibson. 2004. A multi-tiered earthquake hazard model for Australia. *Tectonophysics*, 390(1), 25-43.
- Campbell, K.W., and Y. Bozorgnia. 2008. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra*, 24(1), 139-171.



- Chiou, B.J., and R.R. Youngs. 2008. An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 24(1), 173-215.
- Corral, I., Greiera, A., Gomex-Gras, D., Corbella, M., Canals, A., Pineda-Falconett, M., Cardellach, E., 2011. Geology of the Cerro Quema Au-Cu deposit (Azuero Peninsula, Panama). *Geologica Acta* 9, p. 1-18.
- Cowan, H., Machette, M.N., Haller, K.M. and Dart, R.L., 1998, Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Panama and its Offshore Regions, A project of the International Lithosphere Program Task Group II-2, Major Active Faults of the World, USGS Open-File Report 98-779.
- Cowan, H., 2001, Design Earthquakes for the southeast area of the Canal Basin, Panama, Report No. HC-ACP-01, dated February 2001.
- Frankel, A., Stephen, H., Mueller, C., Calais, E., Haase, J., 2010. Documentation for Initial Seismic Hazard Maps for Haiti. USGS Open-File Report 2010-1067.
- Frankel, A., Harmsen S., Mueller C., Calais E., Haase J., 2011. Seismic Hazard Maps for Haiti. *Earthquake Engineering Research Institute, Earthquake Spectra*, v. 27:pp. S23-S41.
- Gardner, J. and Knopoff, L. 1974. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5), p.1363-1367.
- Gath, E., 2013, Personal communication regarding the Azuero-Soná fault, 11 Nov. 2013.
- Golder Associates Inc., 2014, Cerro Quema Mine Project Site Seismic Hazard Assessment Review, Prepared for Pershimco Resources, Inc., Project Number 1300709, Technical Memorandum dated January 20, 2014.
- Hanks, T.C. and W.H. Bakun. 2008. M-logA Observations for Recent Large Earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(1), 490-494.
- International Code Council (ICC). 2012 International Building Code (IBC).
- International Committee of Large Dams (ICOLD). 2010. Bulletin 72: Selecting seismic parameters for large dams guidelines (2010 Revision). Committee on Seismic Aspects of Dam Design. CIGB-ICOLD.
- Knight Piésold, 2005, Cerro Quema Project, Seismic Hazard Analysis, Prepared for RNC Gold, Inc., Project No. DV20200018.02, dated February 1, 2005.
- Kolarsky, R., Mann, P., 1995, Structure and neotectonics of an oblique-subduction margin, southwestern Panama, *Geological Society of America Special Paper* 295, p. 159-200.
- LaFemina, P., Dixon, T. H., Govers, R., Norabuena, E., Turner, H., Saballos, A., Mattioli, G., Protti, M., and Strauch, W. 2009. Fore-arc motion and Cocos Ridge collision in Central America. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(5).
- Montero, W., 2001, Neotectónica de La Región Central de Costa Rica: Frontera Oeste De La Microplaca De Panamá, *Revista Geológica de América Central*, 24: 29-56.
- Mulargia, F., and S. Tinti. 1985. Seismic sample areas defined from incomplete catalogues: an application to the Italian territory, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 40, 273-300.



Petersen, Mark D., Arthur D. Frankel, Stephen C. Harmsen, Charles S. Mueller, Kathleen M. Haller, Russell L. Wheeler, Robert L. Wesson et al. 2008. Documentation for the 2008 update of the United States national seismic hazard maps. USGS Open-File Report 2008-1128.

Pratt, T.L., Holmes M., Schweig, E.S., Gomberg, J. and Cowan, H.A., 2003, High resolution seismic imaging of faults beneath Limon Bay, northern Panama Canal, Republic of Panama, *Tectonophysics* 368 (2003), pp 211-227.

Reglamento de Diseño Estructural para la República de Panamá (Structural Design Code for the Republic of Panama), REP-2003.

Risk Engineering, Inc. 2011. EZ-FRISK version 7.62, Software for Earthquake Ground Motion Estimation, Denver, Colorado.

Rockwell, T., Bennett, R., Gath, E., Franceschi, P., 2010a, Unhinging an indenter: A new tectonic model for the internal deformation of Panama, *Tectonics* 29, TC4027, doi:10.1029/2009TC002571, 2010

Rockwell, T., Gath, E., Gonzalez, T., Madden, C., Verdugo, D., Lippincott, C., Dawson, T., Owen, L.A., Puchs, M., Cadena, A., Williams, P., Weldon, E. and Franceschi, P., 2010b, Neotectonics and paleoseismology of the Limon and Pedro Miguel Faults in Panama: Earthquake Hazard to the Panama Canal, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 100, No. 6, 34 p.

Stewart, J.P., Douglas, J., Javanbarg, M., Bozorgnia, Y., Abrahamson, N.A., Boore, D.M., Campbell, K.W., Delavaud, E., Erdik, M., and Stafford, P.J. 2013. Selection of Ground Motion Prediction Equations for the Global Earthquake Model. *Earthquake Spectra* In-Press.

Stirling, M.W., Gerstenberger, M.C., Litchfield, N.J., McVerry, G.H., Smith, W.D., Pettinga, J. and Barnes, P, 2008, Seismic hazard of the Canterbury region, New Zealand: New earthquake source model and methodology, *Bull. New Zeal. Natl. Soc. Earthq. Eng.* Vol. 41, pp 51-67.

Stirling, M., T. Goded, K. Berryman, and N. Litchfield. 2013. Selection of Earthquake Scaling Relationships for Seismic-Hazard Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(6), 2993-3011.

Stucchi, M., C. Meletti, V. Montaldo, H. Crowley, G.M. Calvi, and E. Boschi. 2011. Seismic hazard assessment (2003–2009) for the Italian building code. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(4), 1885-1911.

Trenkamp, R., Kellogg, J., Freymueller, J., Mora, H., 2002, Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations, *Journal of South American Earth Sciences*, 15. p.157-171.

Weichert, D.H. 1980. Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(4), 1337-1346.

Wesnousky, S.G., 2008, Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures: Issues and implications for seismic hazard analysis and the process of earthquake rupture, *Bull. Seismological Society of America*. 98, p. 1609-1632.

Westbrook, G. K., Hardy, N. C., and Heath, R. P. 1995. Structure and tectonics of the Panama-Nazca plate boundary. *Geological Society of America Special Paper* 91.



Noviembre, 2014

ES-1

Project No. 1400908  
CQ04 GAI-001-R-V4

Zhao, J.X., J. Zhang, A. Asano, Y. Ohno, T. Oouchi, T. Takahashi, and Y. Fukushima. 2006. Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. Bulletin of the Seismological Society of America, 96, 898-913.

## **TABLAS**

**Tabla 1: Epicentros de los Principales Sismos Históricos ( $M \geq 6.0$ ) Identificados dentro de los 300 km del Sitio del Cerro Quema, Panamá**

Año	Mes	Día	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Magnitud <sup>1</sup> (M)	Profundidad (km) <sup>2</sup>	Distancia desde el Sitio del Proyecto (km) <sup>3</sup>
1621	5	2	8.97	79.55	6.9	0	191
1802	10	25	7.5	80.4	6.7	10	15
1803	12	7	8.5	83	7.1	30	292
1854	8	5	8.5	83	7	33	292
1871	6	27	7.8	82.3	7	30	197
1879	5	29	8	82.9	7	10	266
1929	1	19	10	81.5	6 ( $M_s$ )	35	293
1931	10	12	7.5	82.5	6 ( $M_s$ )	35	218
1934	7	18	7.90	82.49	7.5	30	220
1935	11	30	9.65	79.74	6.4	35	250
1939	10	20	8	83	6 ( $M_s$ )	35	277
1943	5	2	6.83	80.33	6.79	20	83
1951	1	6	7.34	80.99	6.59	54.4	57
1957	10	31	6.64	82.64	6.37	25	254
1960	3	28	7.39	81.88	6.26	25	150
1962	7	26	7.51	82.73	7.18	25	243
1965	12	15	7.65	81.91	6.35	25	153
1974	12	19	7.29	78.48	6.01	11.8	227
1975	10	4	6.40	82.51	6.08	35	253
1976	7	11	7.37	78.11	7.26	17.5	267
1979	6	27	7.15	82.28	6.35	10	198
1983	11	26	7.37	82.278	6.28	17	194
1985	1	5	10.1	80.08	6.11	30	291
1991	4	4	7.02	78.07	6.14	33	277
1992	5	18	7.29	82.32	6.29	13	200
1994	9	27	5.67	79.06	6.15	15	264
1995	2	28	6.79	82.43	6.01	15.1	226
1997	4	1	7.86	82.35	6.07	29.4	204
2003	12	25	8.32	82.79	6.49	34	264
2009	7	4	9.76	79.01	6.05	45	297

Notas:

<sup>1</sup> La escala de magnitud por defecto es la magnitud momento (M). Varios sismos fueron reportados en escala de magnitud de ondas de superficie ( $M_s$ ).

<sup>2</sup> Las profundidades son las reportadas en el catálogo. Las profundidades verdaderas pueden ser muy diferentes.

<sup>3</sup> Las distancias fueron calculadas para el sitio del Proyecto Cerro Quema ubicado en 7.549°N y 80.527°W.

**Tabla 2: Fallas Sísmicas, Cerro Quema, Panamá**

Falla o Zona de Falla (FZ) <sup>1</sup>	Falla ID <sup>1</sup>	Distancia Aprox. Al Sitio (km) <sup>2</sup>	Longitud Total (km) <sup>3</sup>	Falla Rumb o/Buzamiento <sup>4</sup>	Tipo de Movimiento Falla <sup>5</sup>	Desplazamiento Histórico Mas Reciente <sup>6</sup>	Razon de Desplazamiento Promedio (mm/año) <sup>7</sup>	Sismo Maximo Creible (SMC) (M <sub>max</sub> ) <sup>8</sup>
--	PA-11b	12	37	N71W/ NE	Normal, oblicuo-normal	Desconocido. Probablemente Cuaternario (<1.6 Ma)	0.1-0.5 <sup>(d)</sup>	6.9 <sup>c</sup>
--	PA-11b	19	23.8	N71W/ SW	Normal, oblicuo - normal	Desconocido. Probablemente Cuaternario (<1.6 Ma)	0.1-0.5 <sup>(d)</sup>	6.8 <sup>c</sup>
Azuero-Soná	PA-11a	18	197	N61W/ NE	Sinistral	Cuaternario (<1.6 Ma), Probablemente Holoceno (<15 ka)	< 5 <sup>(b)</sup> 1-10 <sup>(d)</sup>	8.0 <sup>b</sup>
Southern Panama	PA-21a	57	275	N88W	Sinistral	Holocene o post-glacial (<15 ka)	> 5 5-15 <sup>(d)</sup>	7.5 <sup>a</sup>
	PA-21b	57	207	N88W	Sinistral	Holocene o post-glacial (<15 ka)	> 5 5-15 <sup>(d)</sup>	7.7 <sup>a</sup>

Notas

<sup>1</sup> Los nombres y ID de fallas y zonas de fallas se obtuvieron de Cowan et al. (1998)

<sup>2</sup> La distancia aproximada desde el Cerro Quema (7.55529°N, 80.529998°W) al trazo de falla basado en un mapa de Google Earth™

<sup>3</sup> Longitud está basada en la longitud total de la falla o segmentos de falla conocidos

<sup>4</sup> El rumbo y buzamiento tomados de Cowan et al. (1998) y Rockwell and Gath et al. (2010)

<sup>5</sup> Tipo de desplazamiento de fallas tomado de Cowan et al. (1998) y Rockwell and Gath et al. (2010)

<sup>6</sup> Edad del desplazamiento histórico mas reciente tomado de Cowan et al. (1998) y Cowan (2001), Pratt et al. (2003), Rockwell y Gath et al. (2010) y comunicación personal con E. Gath (2013). ka = miles de años; Ma = millones de años.

<sup>7</sup> Razón de desplazamiento promedio de Cowan et al. (1998). Datos de Cowan (2001) denominados con <sup>(b)</sup>. Datos de Rockwell y Gath et al. (2010) denominados como <sup>(c)</sup>. Estimaciones de Golder durante este estudio denominados como <sup>(d)</sup>.

<sup>8</sup> Las magnitudes SMC se obtuvieron de las relaciones de ruptura de falla versus magnitudes de a) Hanks y Bakun (2008), b) Stirling et al. (2008), y c) Wesnousky (2008).

**Tabla 3: Parametros de Entrada Fuentes de Corteza, Cerro Quema, Panamá**

Falla o Zona de Falla (FZ) <sup>1</sup>	Falla ID <sup>1</sup>	Buzamiento	Tipo de Movimiento <sup>2</sup>	Profundidad Sismogenica (km)	Razón de Desplazamiento (mm/year)	Magnitud Maxima
--	PA-11b	NE 65	Normal	15	0.1 (20%) 0.5 (60%) 1.0 (20%)	6.6 (30%) 6.9 (60%) 7.2 (10%)
--	PA-11b	SW 65	Normal	15	0.1 (20%) 0.5 (60%) 1.0 (20%)	6.5 (30%) 6.8 (60%) 7.1 (10%)
Azuero-Soná	PA-11a	90	Horizontal	15	2 (20%) 4 (65%) 10 (15%)	7.8 (30%) 8.0 (60%) 8.2 (10%)
Southern Panama	PA-21a	90	Horizontal	15	15 (20%) 20 (50%) 30 (30%)	7.2 (30%) 7.5 (60%) 7.8 (10%)
	PA-21b	90	Horizontal	15	15 (20%) 24 (50%) 30 (30%)	7.4 (30%) 7.7 (60%) 8.0 (10%)

Notas

<sup>1</sup> Los nombres de fallas e IDs tomados de Cowan et al. (1998)

<sup>2</sup> Tipo de movimiento tomado de Cowan et al. (1998) y Rockwell et al. (2010).

**Tabla 4: Parámetros Entrada Fuentes Areeales y de Subducción, Cerro Quema, Panamá**

Fuente Areal o de Subducción	Fuente ID	Distancia Approx. al Sitio (km) <sup>1</sup>	Magnitud Maxima	Valor b	Razón de Actividad <sup>2</sup>	Razón de Desplazamiento (mm/year)	Profundidad (km)	Dirección Preferida de Movimiento de Falls
Subducción Trinchera América Central	MATS	213	8.2	1.00	--	39.6	7.5-25	Interfase
Subducción Placa Nazca	NPS	223	9.14	0.80	--	42.4	8-50	Interfase
Corteza América Central	CAC	237	7.7	0.549	0.753	--	10	Lateral
Cinturón Deformado Norte de Panamá	NPDB	162	7.8	0.778	0.713	--	10	Reverso
Zona Fracturada de Panamá	PFZ	119	7.5	0.453	0.659	--	10	Lateral
Cinturón Deformado Sur de Panamá <sup>3</sup>	SPDB	10	6.8	0.843	0.56	--	10	Reverso
Corteza Panamá Oriental	EPC	141	7.4	0.702	0.531	--	10	Lateral
Placa de Nazca	NP	99	6.8	0.628	0.451	--	10	Lateral
Corteza Colombia Occidental	WCC	380	7.2	0.701	0.343	--	10	Lateral
Corteza Panamá Occidental	WPC	70	6.7	0.628	0.148	--	10	Lateral

Notas

<sup>1</sup> La distancia aproximada desde el Cerro Quema (7.55529°N, 80.529998°W) al trazo de falla basado en un mapa de Google Earth™

<sup>2</sup> la razón de actividad representa el número anual de sismos mayores o iguales a la magnitud mínima de **M** 4.5 dentro de la fuentes areal o de subducción.

<sup>3</sup> El sitio del proyecto está ubicado dentro de la fuente areal Cinturon Deformado del Sur de Panamá (SPDB).

**Tabla 5: Arboles Lógicos para Fuentes Areeales, Cerro Quema, Panamá**

Fuente Areal	Magnitud Máxima		Valor b		Razón de Actividad (eventos/año)	
	Inferior (0.3)	Superior (0.1)	Inferior (0.2)	Superior (0.2)	Inferior (0.2)	Superior (0.2)
Corteza América Central	7.5	7.8	0.595	0.502	0.579	0.959
Cinturón Deformado Norte de Panamá	7.7	8.0	0.855	0.702	0.552	0.924
Zona Fracturada de Panamá	7.4	7.6	0.509	0.397	0.442	0.939
Cinturón Deformado Sur de Panamá	6.6	7.0	0.933	0.754	0.404	0.778
Corteza Panamá Oriental	7.1	7.6	0.768	0.637	0.415	0.735
Placa de Nazca	6.5	7.0	0.754	0.502	0.311	0.706
Corteza Colombia Occidental	7.0	7.5	0.782	0.620	0.242	0.50
Corteza Panamá Occidental	6.5	7.2	0.754	0.502	0.102	0.231

**Tabla 6: Ecuaciones de Predicción del Movimiento Sísmico (GMPEs) para Fallas y Fuentes Areeales y de Subducción, Cerro Quema, Panamá**

Fuente Sísmica	GMPE	Ponderación
Fallas de Corteza y Fuentes Areales	Abrahamson and Silva (2008) NGA	0.25
	Boore and Atkinson (2008) NGA – SMM	0.25
	Campbell and Bozorgnia (2008) NGA	0.25
	Chiou and Youngs (2008) NGA	0.25
Fuentes de Subducción	Abrahamson et al. (2012)	0.33
	Atkinson and Boore (2003) Worldwide	0.33
	Zhao et al. (2006)	0.34

**Tabla 7: Espectro de Peligro Sísmico Uniforme con 5% de Amortiguamiento para Algunos Periodos Estructurales para Sitio Clase B/C ( $V_{s30} = 760 \text{ m/s}$ ) para Cerro Quema, Panamá**

Aceleración Espectral Promedio 5% Amortiguamiento (g)			
Periodo (s)	475 años	975 años	2,475 años <sup>3</sup>
Amax <sup>2</sup>	0.238	0.311	0.422
0.02	0.242	0.316	0.428
0.03	0.262	0.343	0.469
0.05	0.322	0.425	0.582
0.075	0.419	0.553	0.765
0.1	0.497	0.659	0.913
0.15	0.580	0.771	1.067
0.2	0.566	0.751	$S_S = 1.041$
0.25	0.519	0.685	0.946
0.3	0.470	0.615	0.846
0.4	0.389	0.507	0.694
0.5	0.322	0.419	0.569
0.75	0.226	0.295	0.399
1	0.174	0.227	$S_1 = 0.309$
1.5	0.119	0.155	0.214
2	0.099	0.126	0.172
3	0.057	0.075	0.102
4	0.040	0.054	0.074
5	0.032	0.043	0.060
7.5	0.019	0.025	0.037
10	0.012	0.016	0.024

Notas:

<sup>1</sup> Suelo Sitio Clase B/C representa un suelo definido con velocidad de ondas de corte promedio de 760 m/s en los primeros 30 m de una columna de suelo (ASCE 7-05 standard)

<sup>2</sup> Amax: Aceleración horizontal máxima del terreno.

<sup>3</sup>  $S_S$  y  $S_1$  según ASCE 7-05 standard.  $T_L$  es 16 segundos.

**Tabla 8: Resultados de Desagregación para Amax, y Acceleraciones Espectrales 0.2 segundos y 1 segundo Sitio Clase B/C ( $V_{s30} = 760 \text{ m/s}$ ) Cerro Quema, Panamá**

Periodo de Retorno (años)	Periodo Estructural (s)	Magnitud Promedio (M)	Distancia Promedio (km)	Épsilon Promedio
475	Amax	6.16	25.0	1.0
	0.2	6.12	25.2	1.1
	1	7.34	93.3	1.2
2,475	Amax	6.12	18.4	1.5
	0.2	6.11	18.5	1.5
	1	7.39	68.8	1.6

**Tabla 9: Espectro Sísmico Determinístico 5% de Amortiguamiento para Sitio Clase B/C (Vs30 = 760 m/s) Cerro Quema, Panama<sup>1</sup>**

Periodo (s)	Aceleración Espectral <sup>2</sup> (g)		Fuente Contribuyente
	Media	84% Percentil	
Amax <sup>3</sup>	0.222	0.383	PA-11b ( <b>M</b> 6.9)
0.02	0.227	0.392	
0.03	0.244	0.425	
0.05	0.292	0.516	
0.075	0.371	0.665	
0.1	0.446	0.805	
0.15	0.539	0.978	
0.2	0.554	1.009	
0.25	0.507	0.924	
0.3	0.458	0.839	
0.4	0.389	0.712	
0.5	0.322	0.595	
0.75	0.238	0.448	
1	0.191	0.363	
1.5	0.135	0.260	
2	0.102	0.198	
3	0.069	0.135	
4	0.050	0.098	
5	0.038	0.077	
7.5	0.025	0.053	PA-11a ( <b>M</b> 8.0)
10	0.016	0.036	

Notas:

<sup>1</sup> Suelo Sitio Clase B/C representa un suelo definido con velocidad de ondas de corte promedio de 760 m/s en los primeros 30 m de una columna de suelo - 2012 International Building Code – 2012 IBC.

<sup>2</sup> Las aceleraciones espectrales son ponderaciones promedio de cuatro NGA GMPE.

<sup>3</sup> Amax: Aceleración horizontal máxima del terreno.

**Tabla 10: Comparación con el Estudio Sísmico Regional 2012, Cerro Quema, Panamá**

Periodo Espectral	Periodo Retorno (año)	Aceleración Espectral (g)	
		Estudio de Benito et al. 2012	Este Estudio
Amax	500	0.30-0.40	0.25
	1,000	0.40-0.53	0.32
	2,500	0.50-0.65	0.43
1 segundo	500	0.18-0.25	0.18
	1,000	0.20-0.30	0.23
	2,500	0.33-0.45	0.32

**Tabla 11: Espectro Sísmico para Diseño de Estructuras Estándares Sitio Clase B<sup>1</sup> Cerro Quema, Panamá**

Periodo (s)	Aceleración Espectral <sup>2</sup> (g)
Amax <sup>3</sup>	0.281
0.02	0.334
0.03	0.390
0.05	0.503
0.075	0.555
0.1	0.609
0.15	0.711
0.2	0.694
0.25	0.631
0.3	0.564
0.4	0.463
0.5	0.379
0.75	0.266
1	0.206
1.5	0.143
2	0.115
3	0.068
4	0.049
5	0.040
7.5	0.025
10	0.016

Notas:

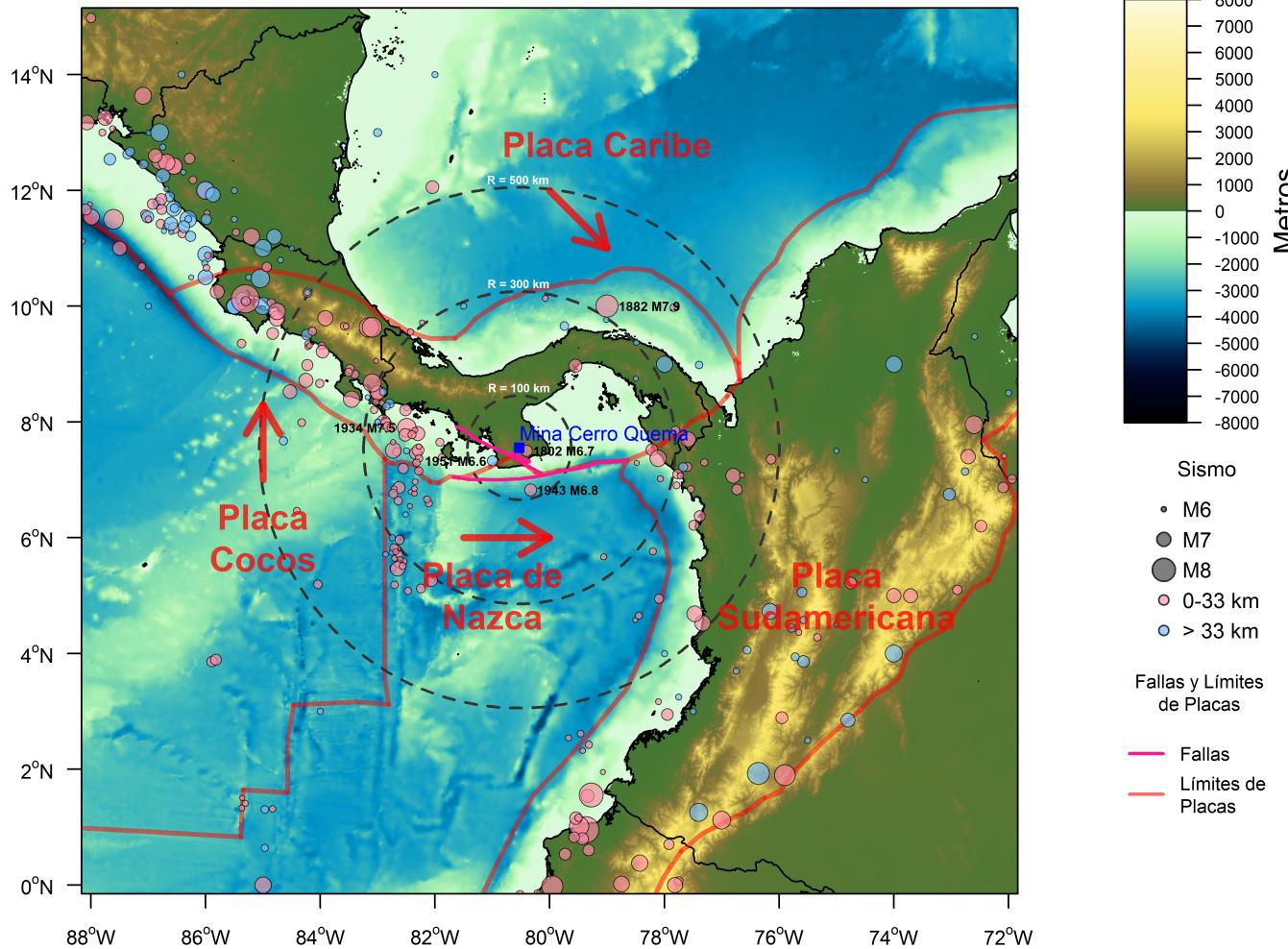
<sup>1</sup> Suelo Sitio Clase B/C representa un suelo definido con velocidad de ondas de corte promedio de 760 m/s en los primeros 30 m de una columna de suelo (ASCE 7-05 standard)

<sup>2</sup> Las aceleraciones espectrales fueron calculadas siguiendo los procedimientos del ASCE 7-05 standard.

<sup>3</sup> Amax: Aceleración horizontal máxima del terreno.

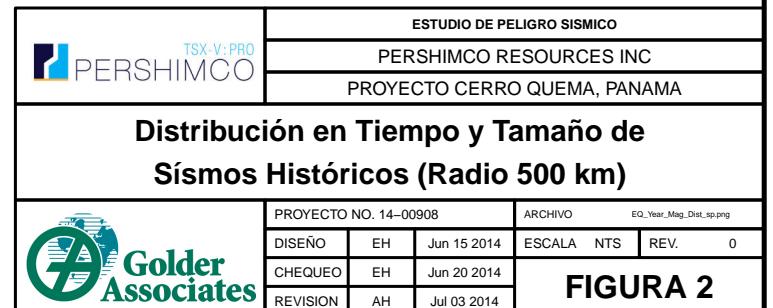
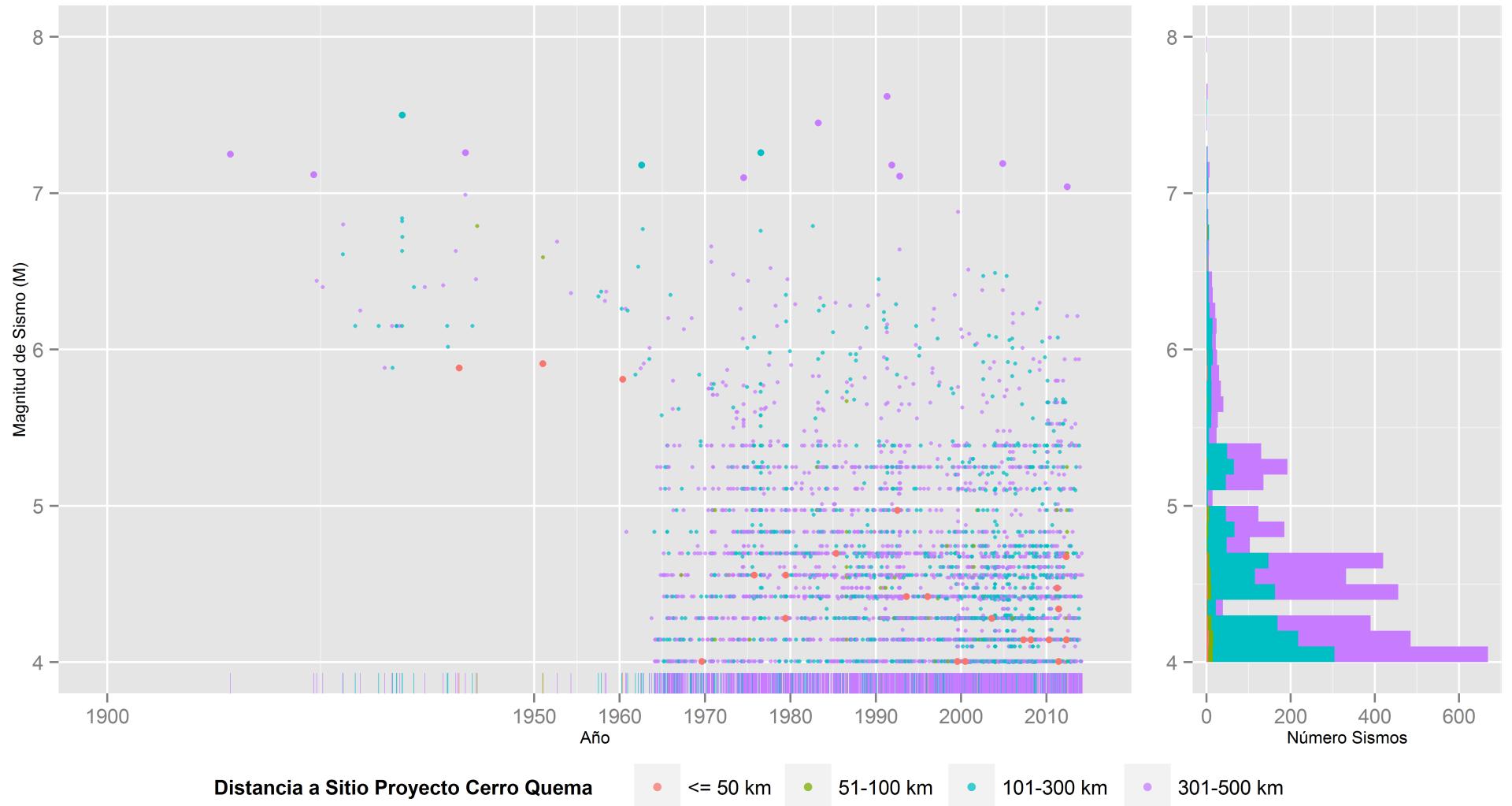
## **FIGURAS**

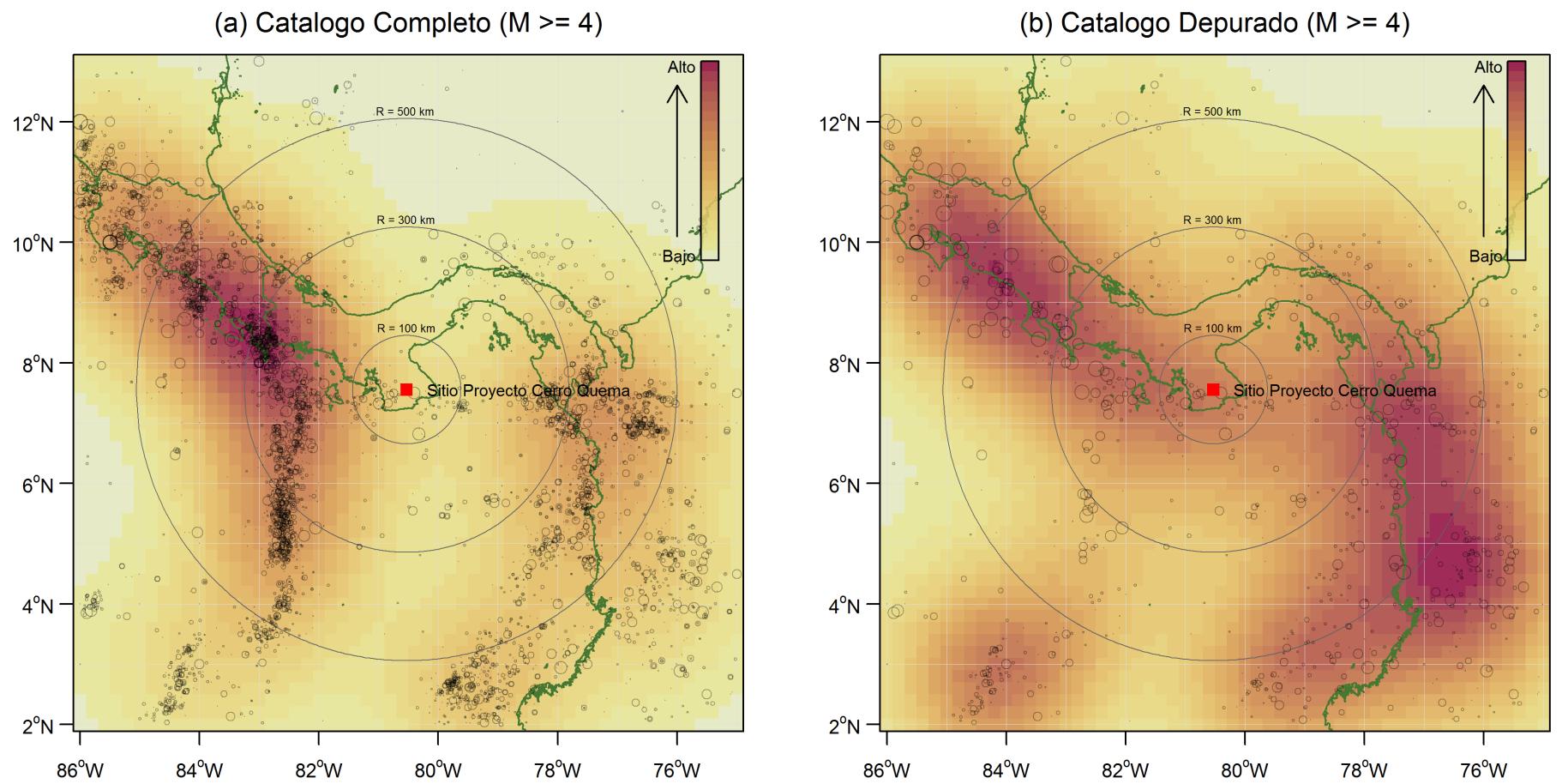
## Epicentros de Sismos ( $M \geq 6$ ) - Catalogo Completo



 TSX-V:PRO <b>PERSHIMCO</b> RESOURCES INC PROYECTO CERRO QUEMA, PANAMA	ESTUDIO DE PELIGRO SISMICO			
	PERSHIMCO RESOURCES INC			
	PROYECTO CERRO QUEMA, PANAMA			
<b>Principales Estructuras Geológicas y Sismos Históricos</b>				
 <b>Golder Associates</b>	PROYECTO NO. 14-00908	ARCHIVO	EarthquakeEpicenters_SignificantEQ_sp.png	
DISEÑO	EH	Jun 15 2014	ESCALA	NTS
CHEQUEO	EH	Jun 20 2014	REV.	0
REVISIÓN	AH	Jul 03 2014		

**FIGURA 1**





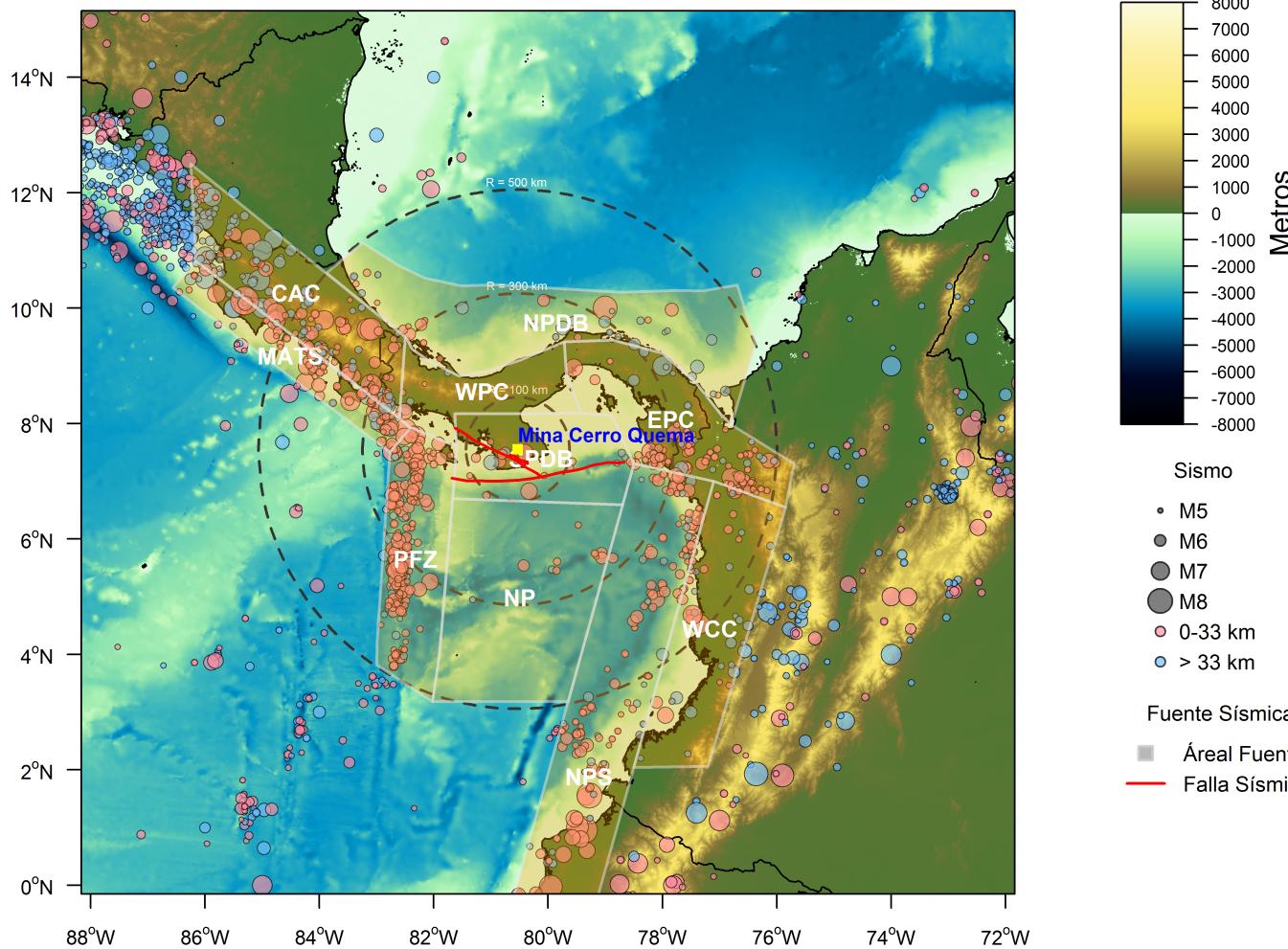
### Densidad de Sísmos Históricos – Catálogo Completo y Depurado



PROYECTO NO. 14-00908			ARCHIVO	MapDensity_sp.png
DISEÑO	EH	Jun 15 2014	ESCALA	NTS
CHEQUEO	EH	Jun 20 2014	REV.	0
REVISIÓN	AH	Jul 03 2014		

**FIGURA 3**

## Epicentros de Sismos ( $M \geq 5$ ) - Catalogo Completo

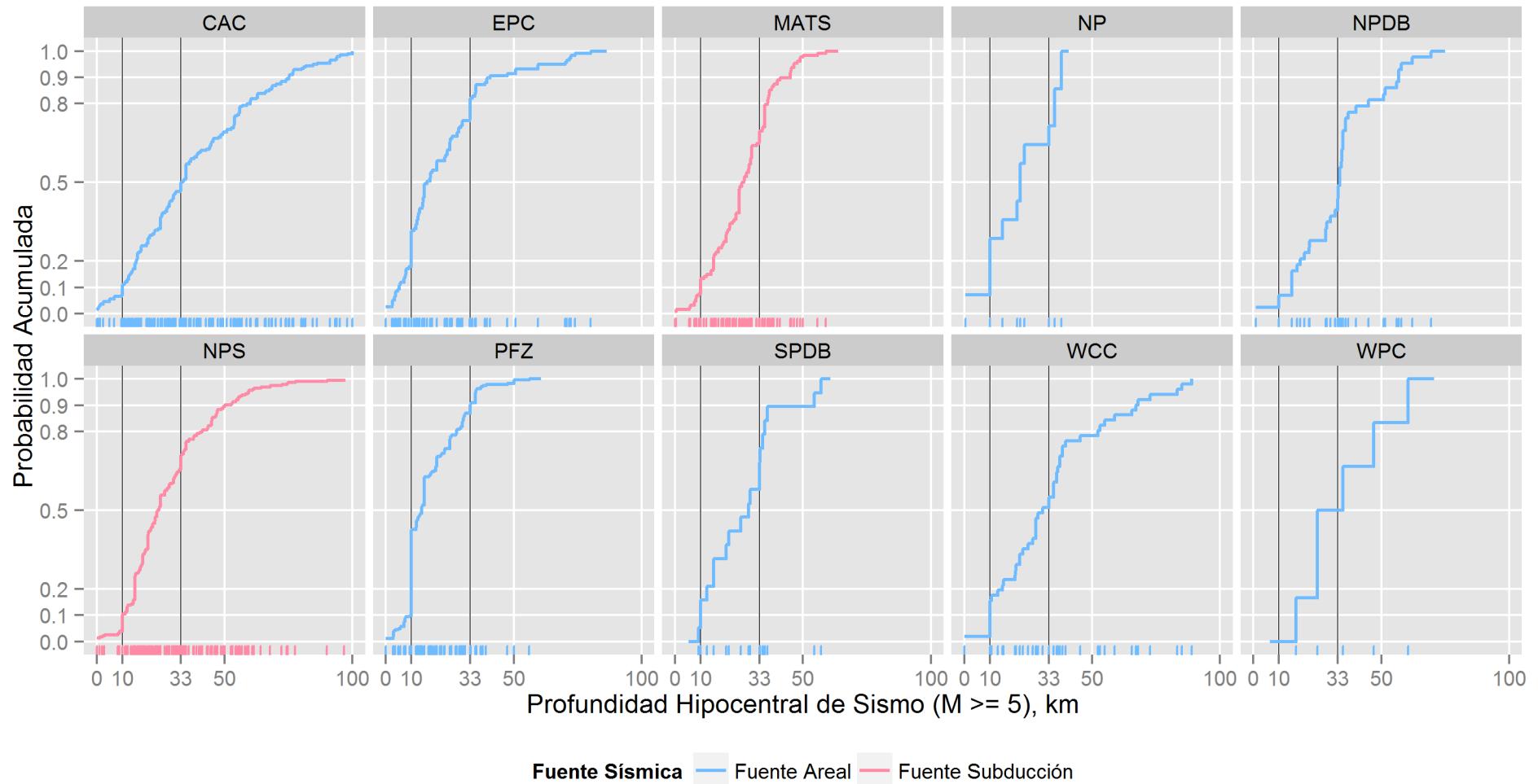


 <b>TSX-V:PRO</b> <b>PERSHIMCO</b> <b>RESOURCES INC</b>	ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO		
	PROYECTO CERRO QUEMA, PANAMA		

### Fuentes Sísmicas Específicas de Sitio

 <b>Golder</b> <b>Associates</b>	PROYECTO NO. 14-00908			ARCHIVO		
	DISEÑO	EH	Jun 15 2014	ESCALA	NTS	REV.
	CHEQUEO	EH	Jun 20 2014	REVISION	AH	Jul 03 2014

**FIGURA 4**



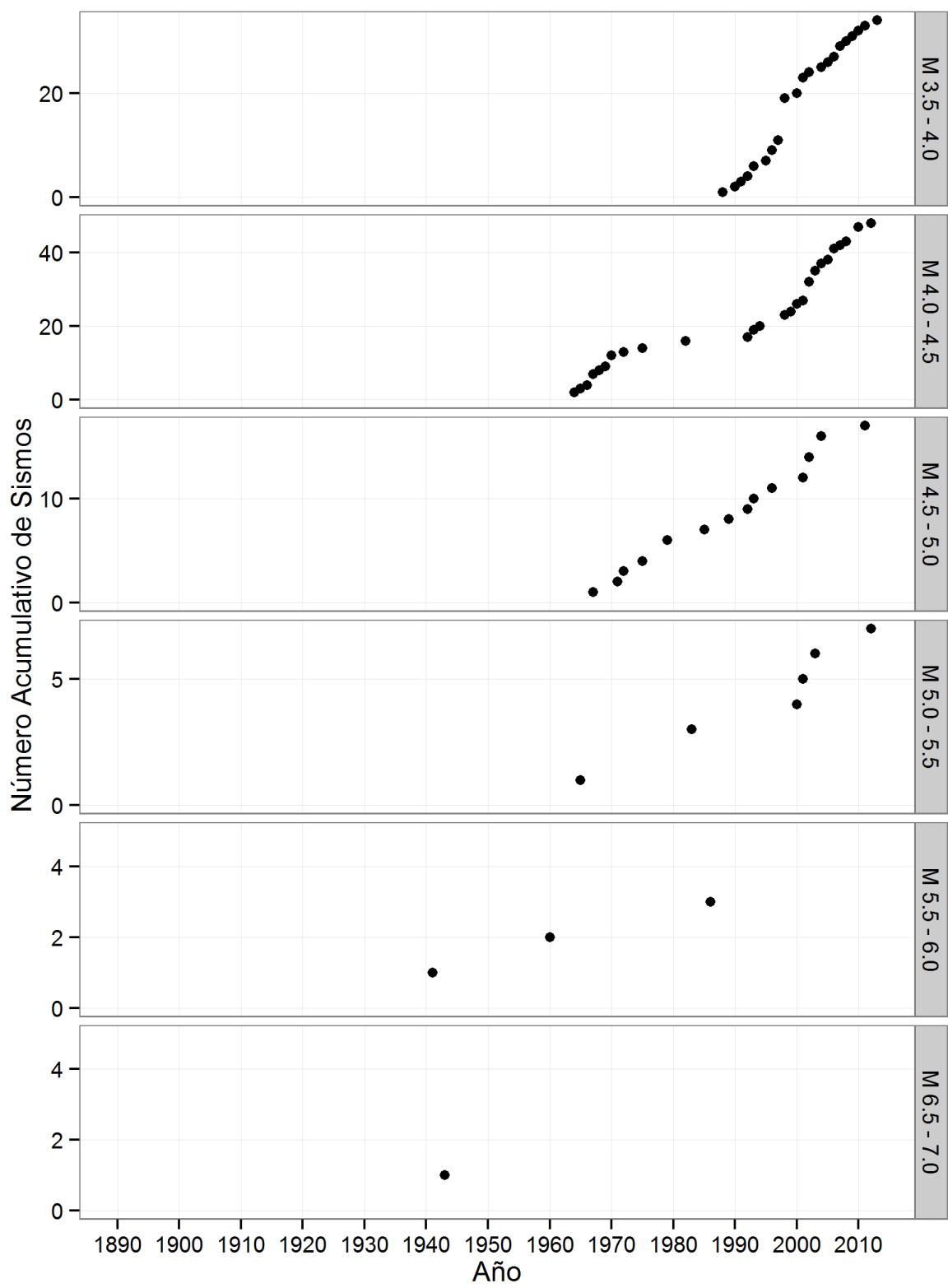
ESTUDIO DE PELIGRO SISMICO  
TSX-V:PRO  
PERSHIMCO RESOURCES INC  
PROYECTO CERRO QUEMA, PANAMA

**Distribución de la Profundidad de Eventos en Fuentes Sísmicas**

PROYECTO NO. 14-00908			ARCHIVO EarthquakeDepthDistribution_sp.png		
DISEÑO	EH	Jun 15 2014	ESCALA	NTS	REV. 0
CHEQUEO	EH	Jun 20 2014			
REVISION	AH	Jul 03 2014			

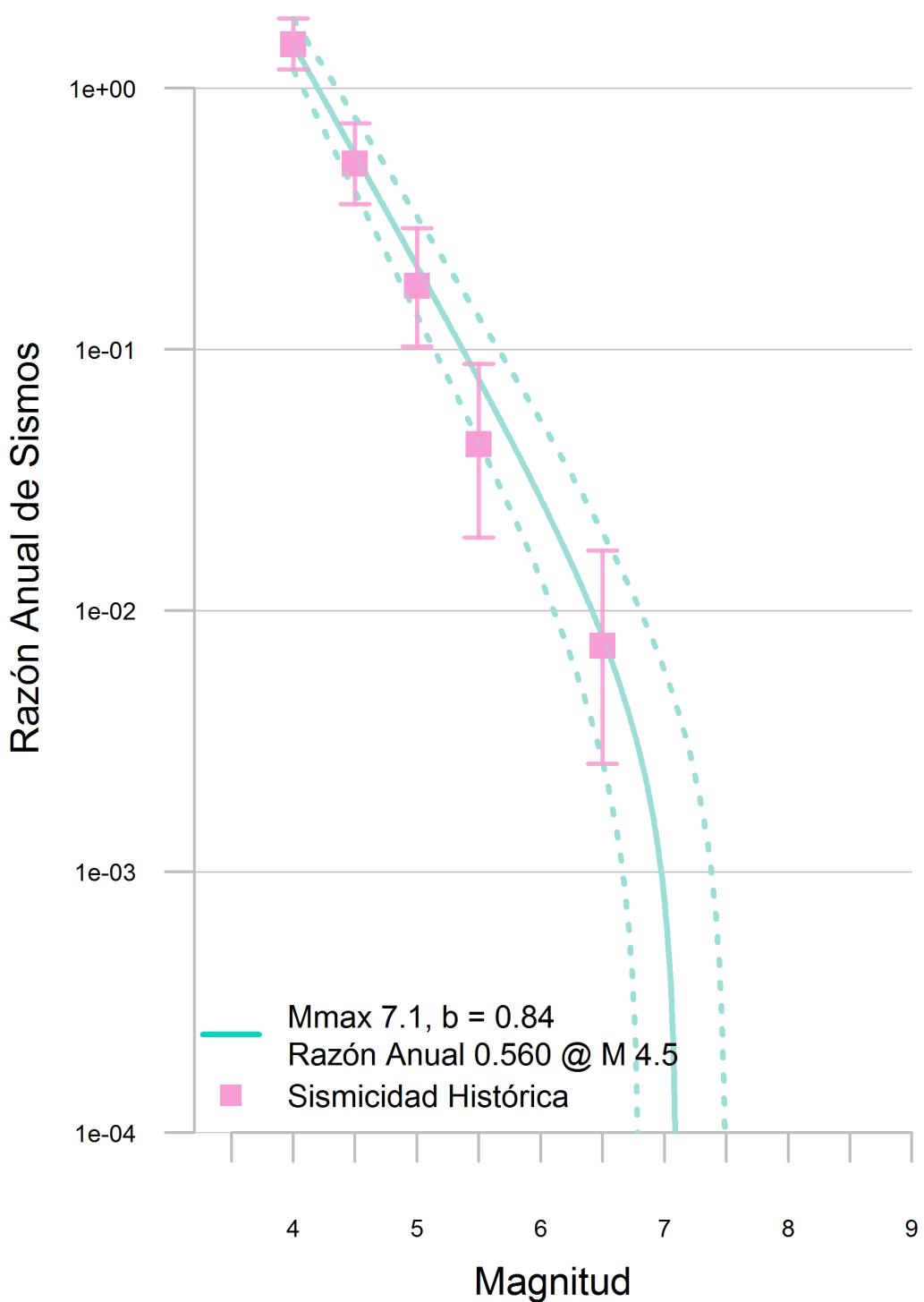
**Golder Associates**

**FIGURA 5**



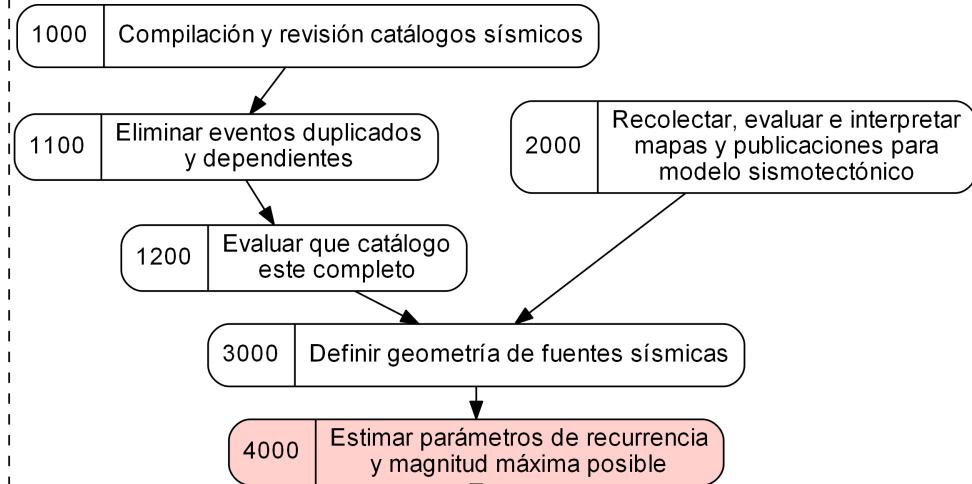
 <b>PERSHIMCO</b> <small>TSX-V: PRO PERSHIMCO RESOURCES INC PROYECTO CERRO QUEMA, PANAMA</small>	ESTUDIO DE PELIGRO SISMICO					
	PERSHIMCO RESOURCES INC					
	PROYECTO CERRO QUEMA, PANAMA					
<b>Número Acumulativo de Sismos en Función del Tiempo – Fuente SPDB</b>						
 <b>Golder Associates</b>	PROYECTO NO. 14-00908			ARCHIVOCompleteness_CUVI_GK74_DeclusteredCatalog_SPDB.png		
	DISEÑO	FL	Jun 15 2014	ESCALA	NTS	REV.
	CHEQUEO	EH	Jun 20 2014			0
	REVISION	AH	Jul 03 2014			
<b>FIGURA 6</b>						

# SPDB

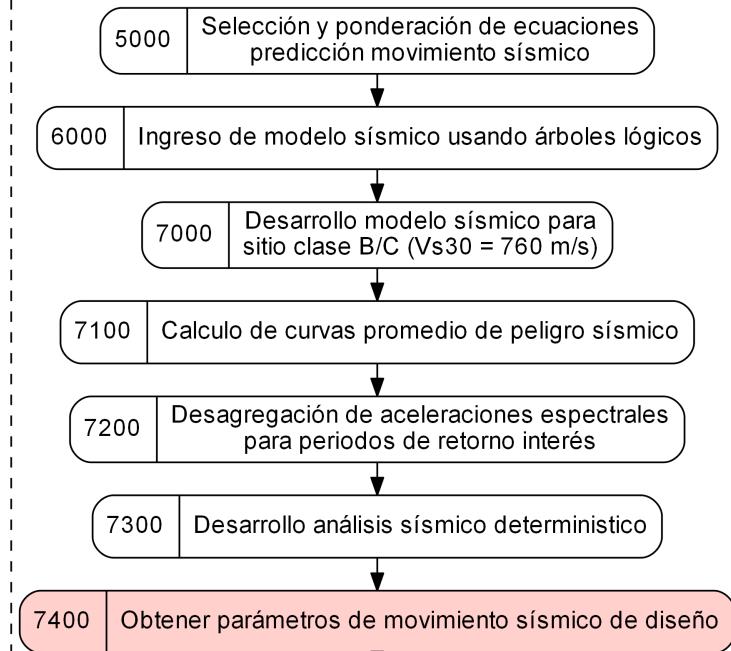


PERSHIMCO	ESTUDIO DE PELIGRO SISMICO					
	PERSHIMCO RESOURCES INC					
	PROYECTO CERRO QUEMA, PANAMA					
<b>Recurrencia Sísmica – Fuente SPDB</b>						
Golder Associates						
PROYECTO NO. 14-00908		ARCHIVO	Rparams_SPDB_sp.png			
DISEÑO	FL	Jun 15 2014	ESCALA NTS REV. 0			
CHEQUEO	EH	Jun 20 2014				
REVISION	AH	Jul 03 2014				
<b>FIGURA 7</b>						

## Fase #1: Desarrollo Modelo Sismotectónico



## Fase #2: Análisis de Peligro Sísmico



## Fase #3: Preparación Reporte

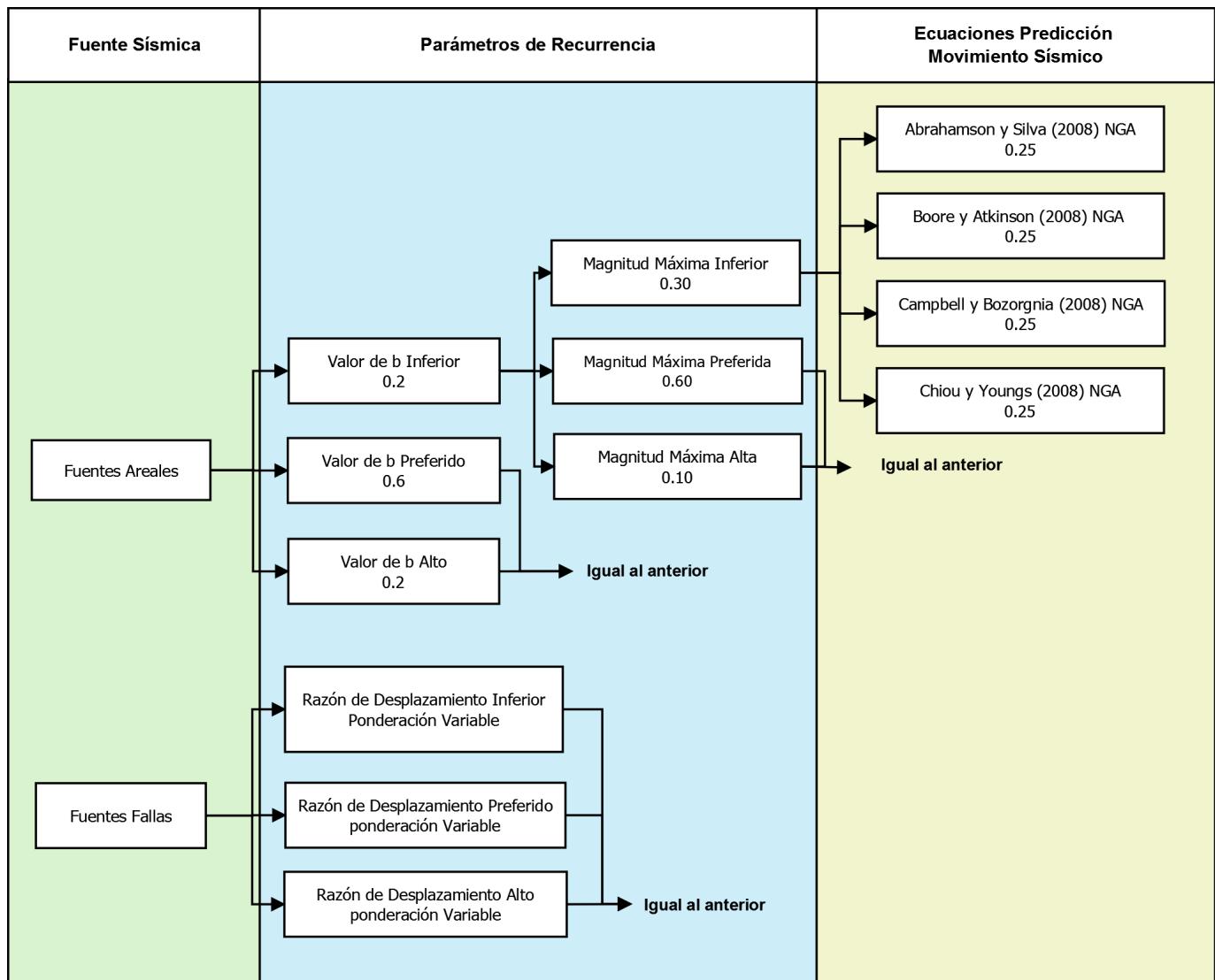


### Principales Tareas Peligro Sísmico Específico de Sitio



PROYECTO NO. 14-00908			ARCHIVO Panama-flowchart_spanish.png		
DISEÑO	FL	Jun 15 2014	ESCALA	NTS	REV. 0
CHEQUEO	EH	Jun 20 2014			
REVISIÓN	AH	Jul 03 2014			

FIGURA 8



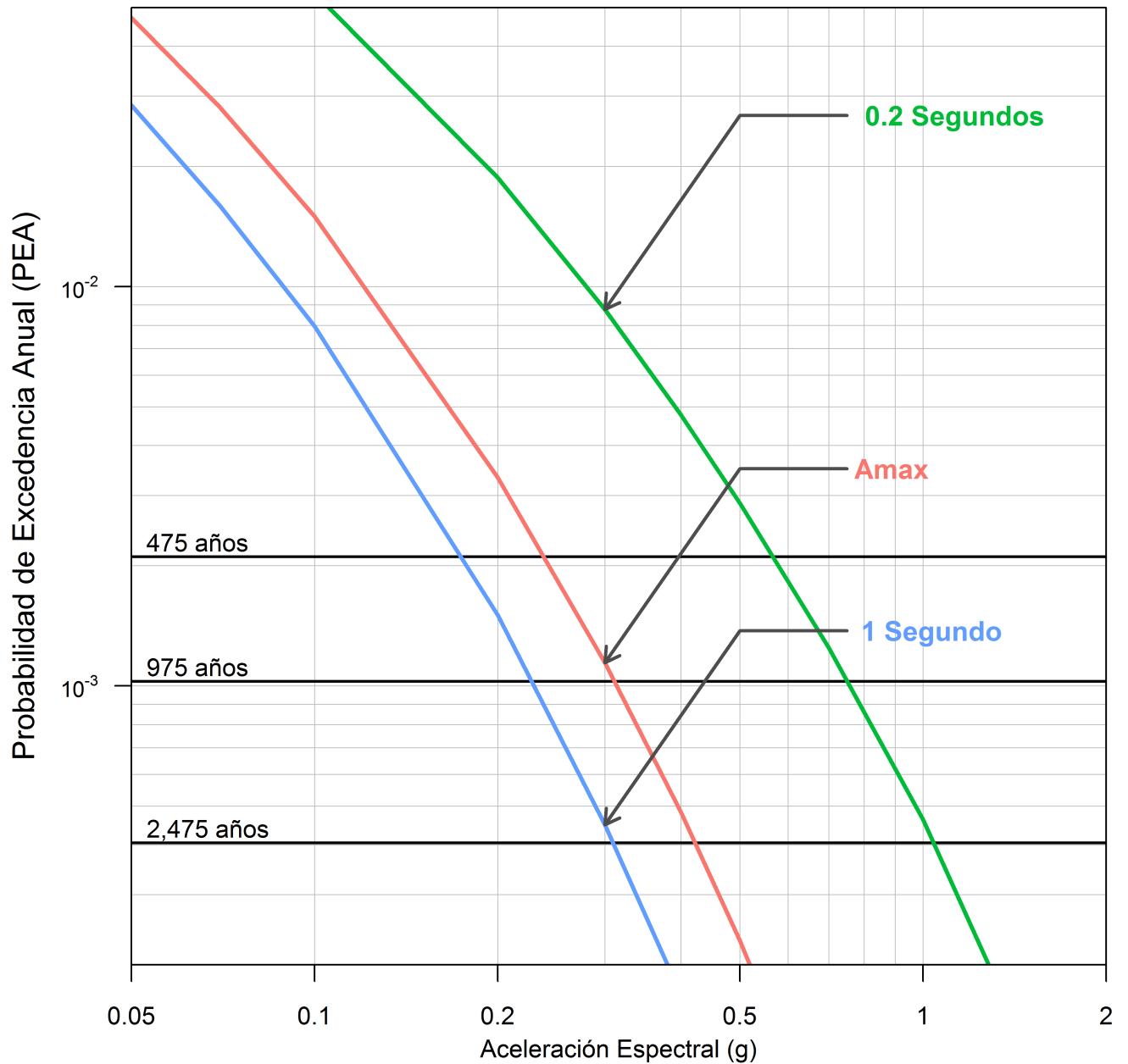
**Árbol Lógico para Caracterización de Fuentes Sísmicas**



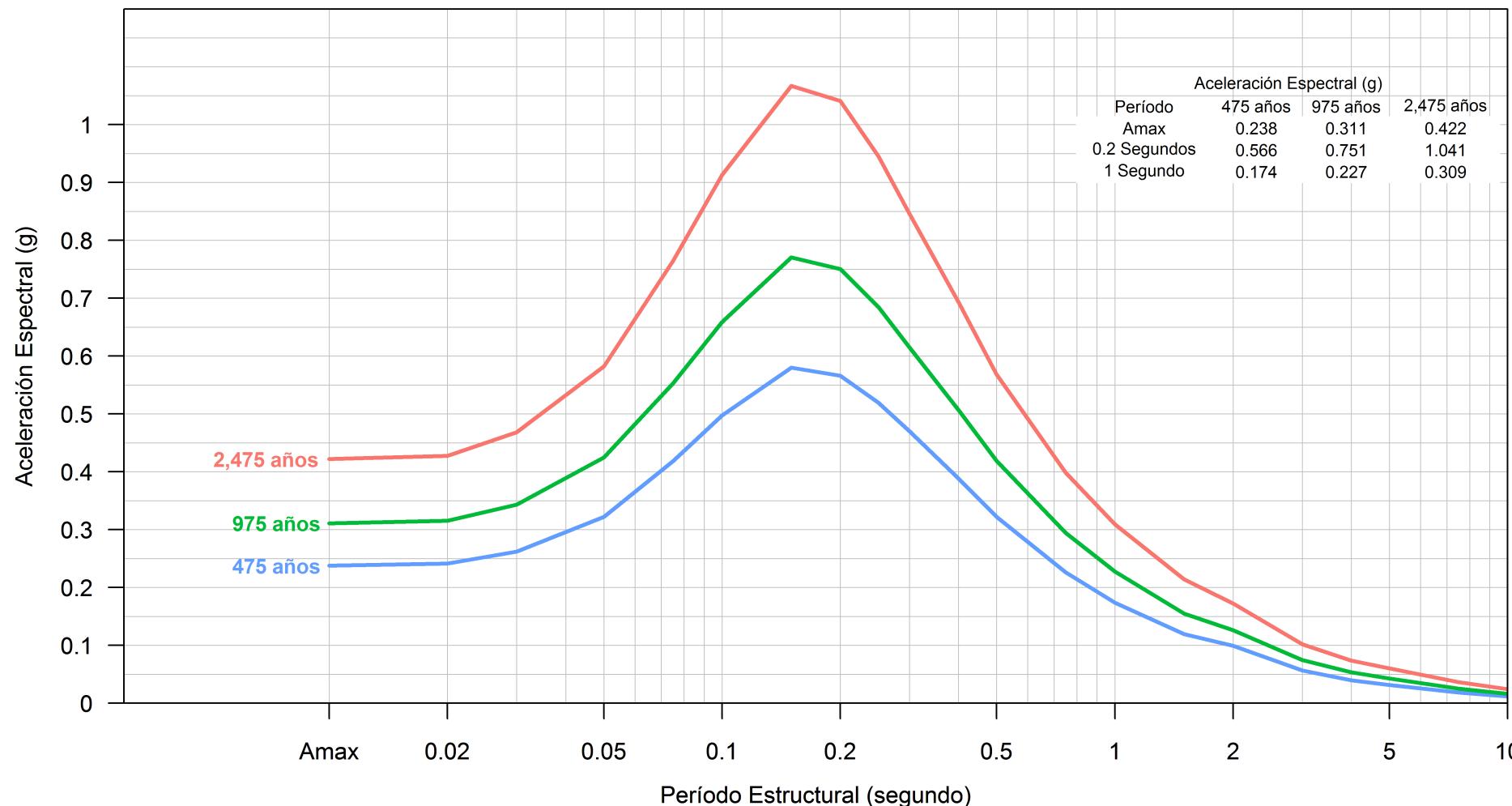
**PERSHIMCO**  
RESOURCES INC  
PROYECTO CERRO QUEMA, PANAMA

PROYECTO NO. 14-00908	ARCHIVO					
DISEÑO	FL	Jun 15 2014	ESCALA	NTS	REV.	0
CHEQUEO	EH	Jun 20 2014				
REVISION	AH	Jul 03 2014				

**FIGURA 9**



 TSX-V: PRO PERSHIMCO RESOURCES INC PROYECTO CERRO QUEMA, PANAMA	ESTUDIO DE PELIGRO SISMICO		
	P	E	S
	0.00	0.05	0.10
<b>Curvas Peligro Sísmico Promedio para Amax, 0.2s, 1.0s 5%</b>			
 Golder Associates	PROYECTO NO. 14-00908	ARCHIVO	HAZ_Vs30_760_sp.png
	DISEÑO	EH	Jun 15 2014
	CHEQUEO	EH	Jun 20 2014
	REVISION	AH	Jul 03 2014
FIGURA 10			0



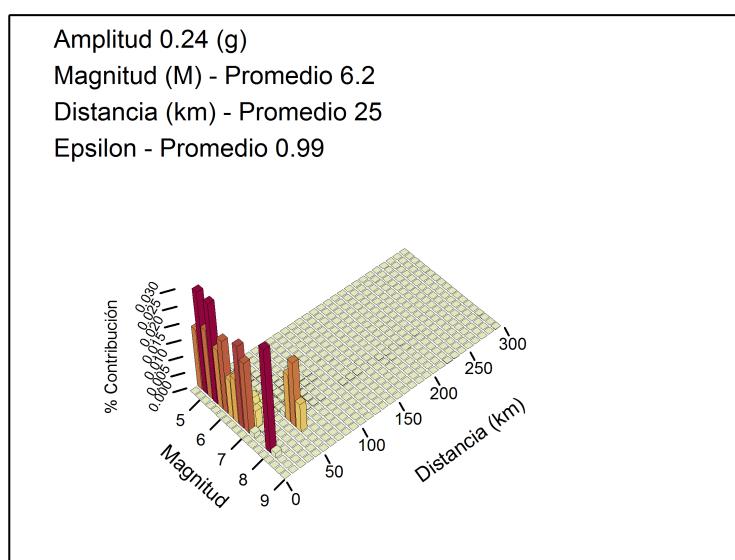
ESTUDIO DE PELIGRO SISMICO  
TSX-V:PRO  
PERSHIMCO RESOURCES INC  
PROYECTO CERRO QUEMA, PANAMA

**Espectro de Peligro Uniforme 5%**  
**Amortiguamiento ( $V_s30 = 760 \text{ m/s}$ )**

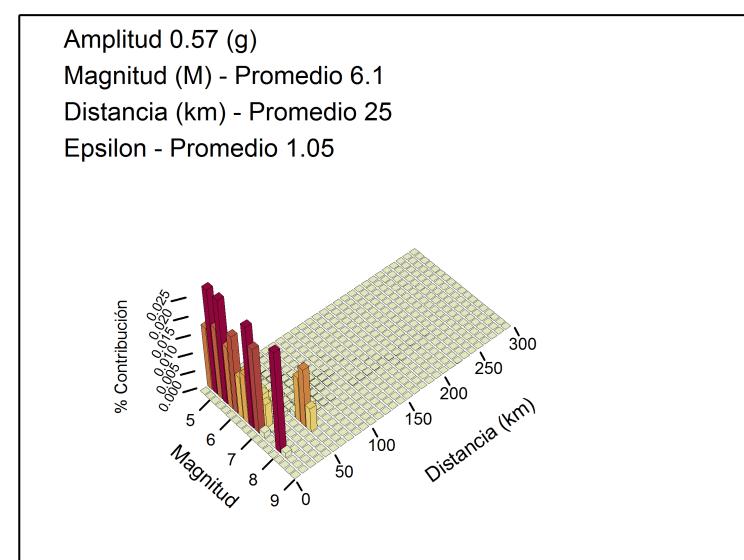
	PROYECTO NO. 14-00908			ARCHIVO	uHS_Vs30_760_sp.png
	DISEÑO	EH	Jun 15 2014	ESCALA	NTS
	CHEQUEO	EH	Jun 20 2014	REV.	0
	REVISION	AH	Jul 03 2014		

**FIGURA 11**

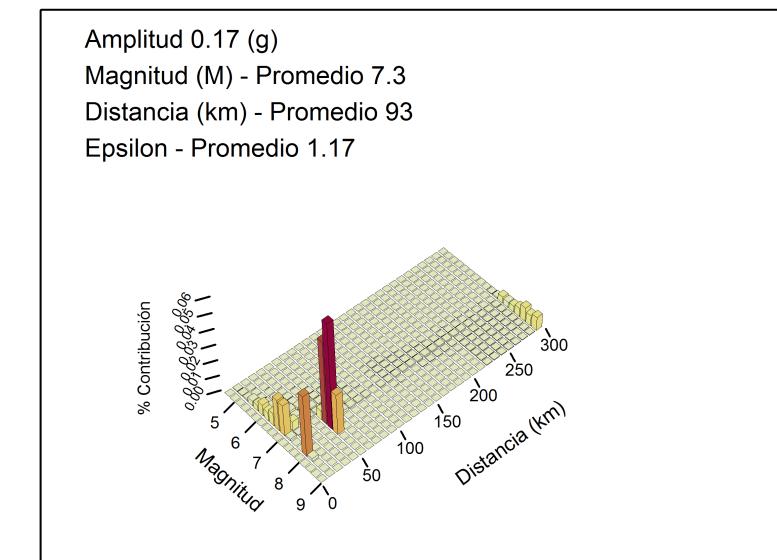
**(a1) Amax - 475 Años**



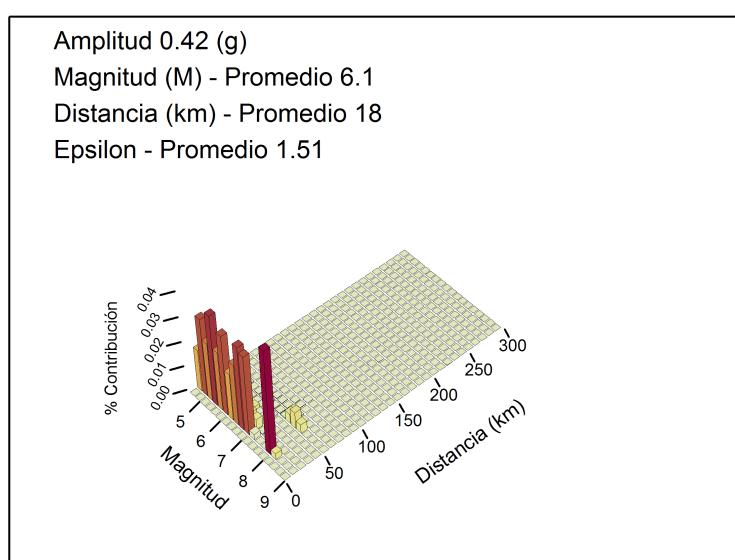
**(a2) 0.2 Segundos - 475 Años**



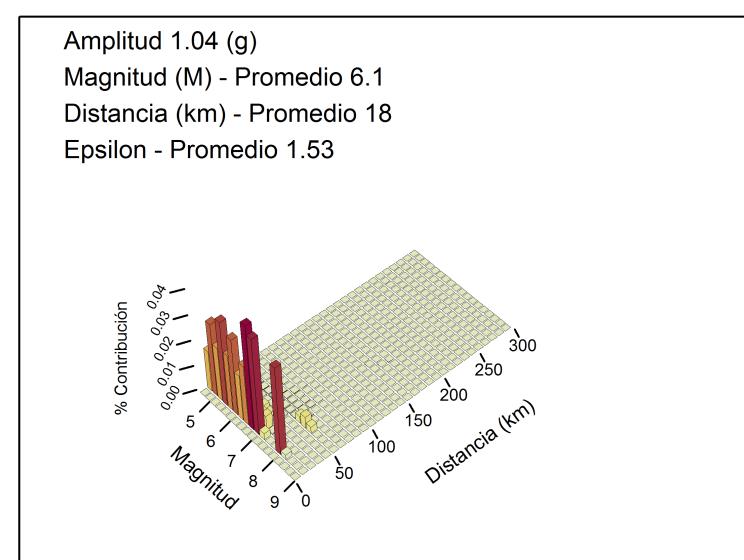
**(a3) 1 Segundo - 475 Años**



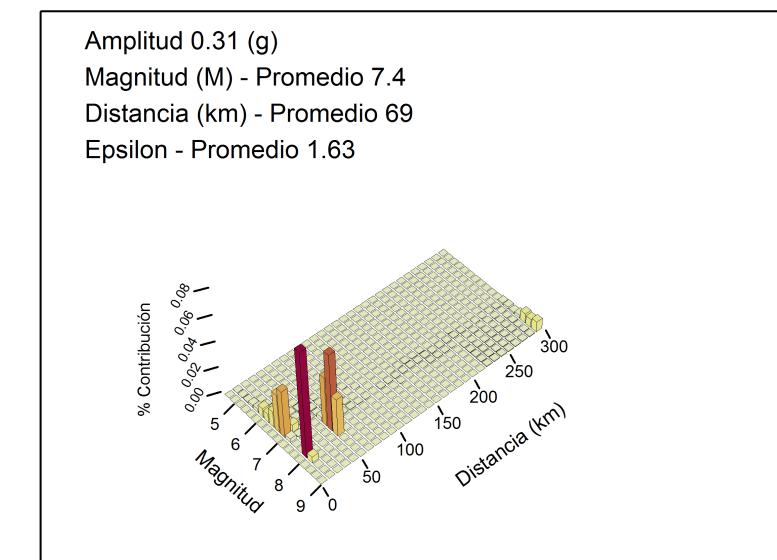
**(b1) Amax - 2475 Años**

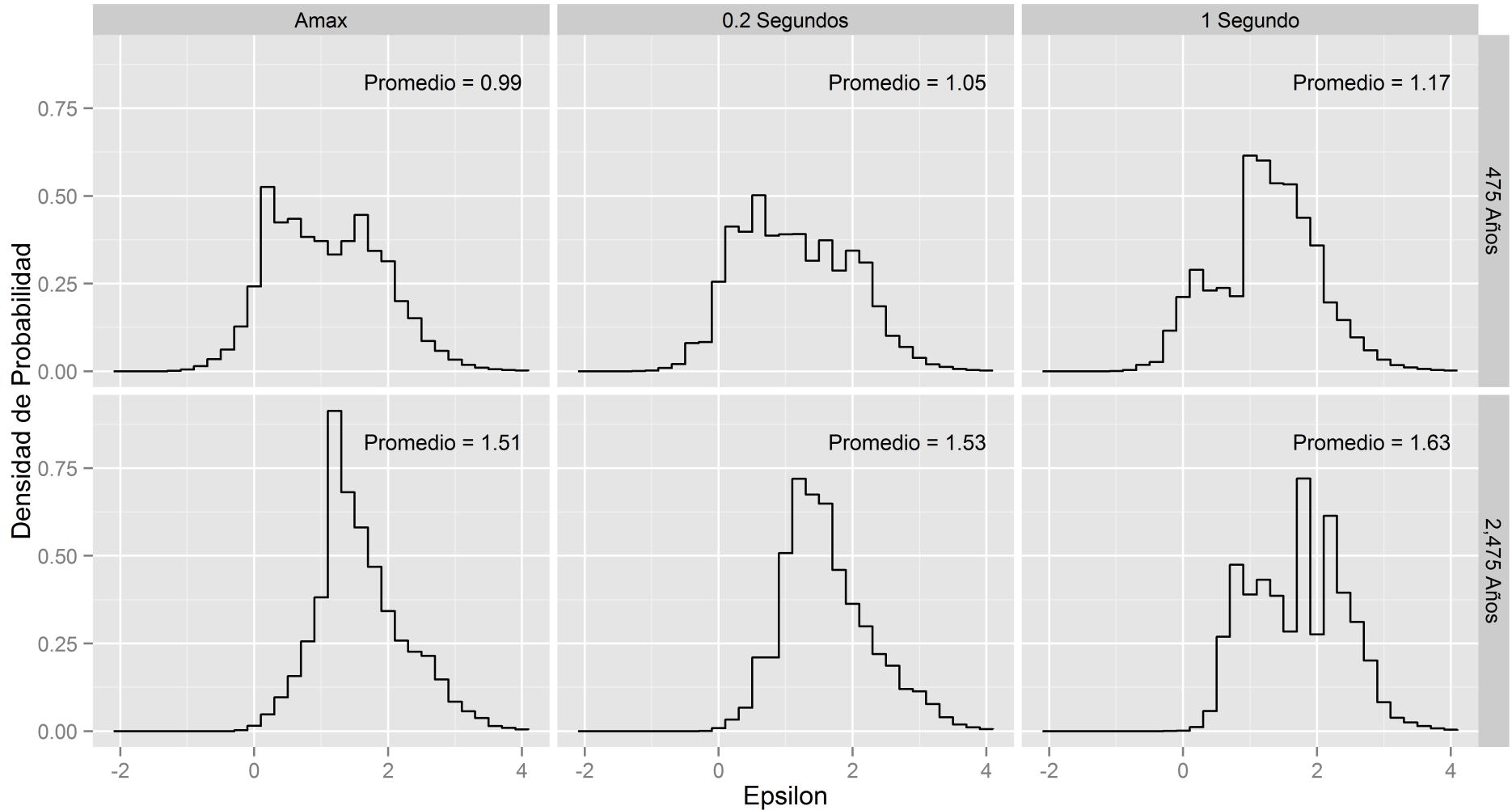


**(b2) 0.2 Segundos - 2475 Años**



**(b3) 1 Segundo - 2475 Años**





ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO

TSX-V:PRO

PERSHIMCO RESOURCES INC

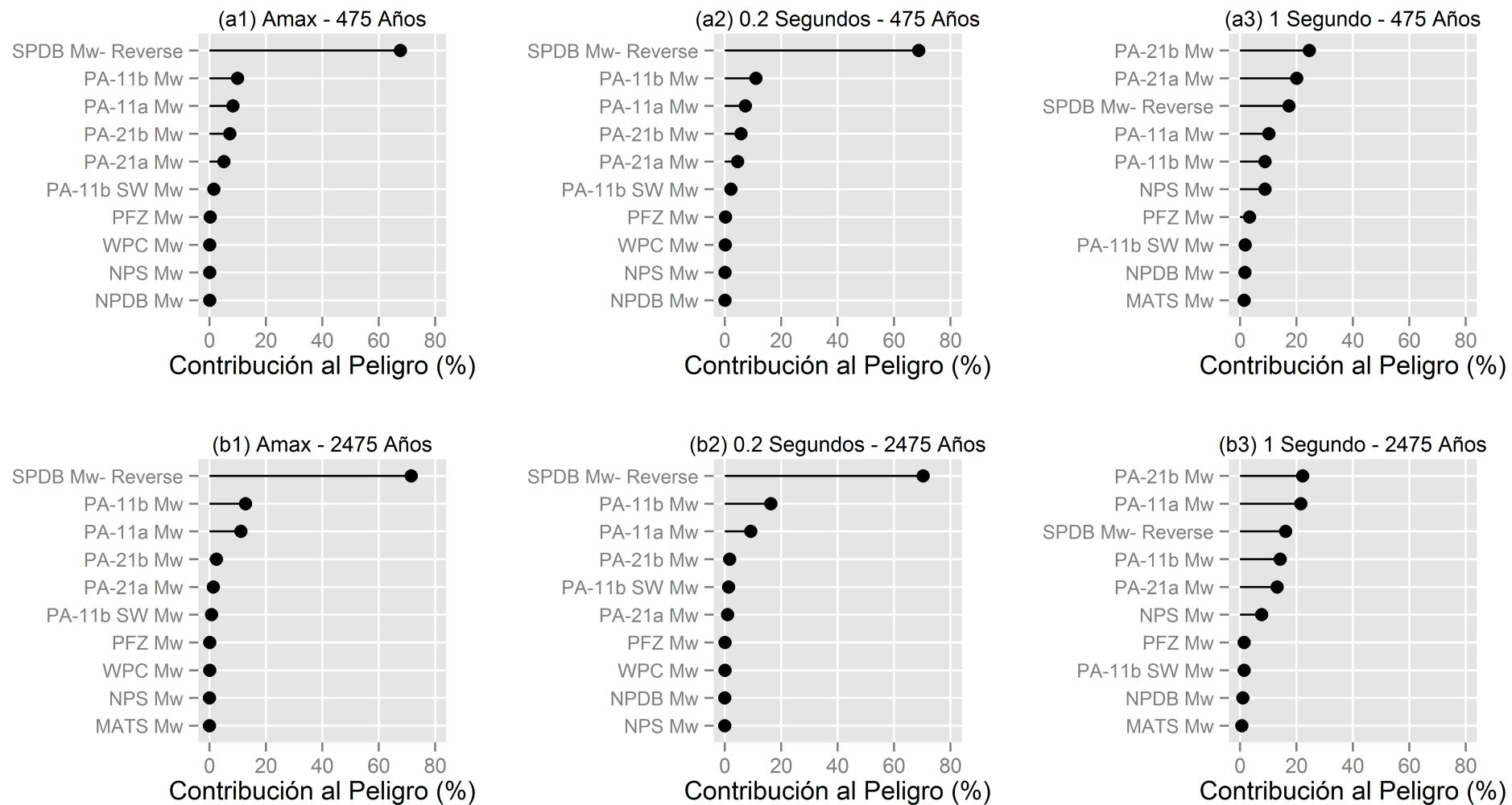
PROYECTO CERRO QUEMA, PANAMA

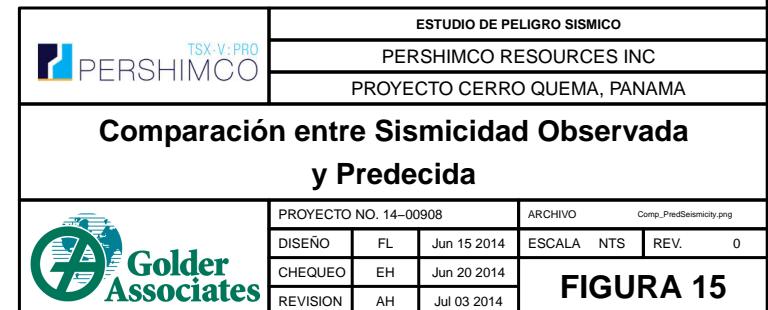
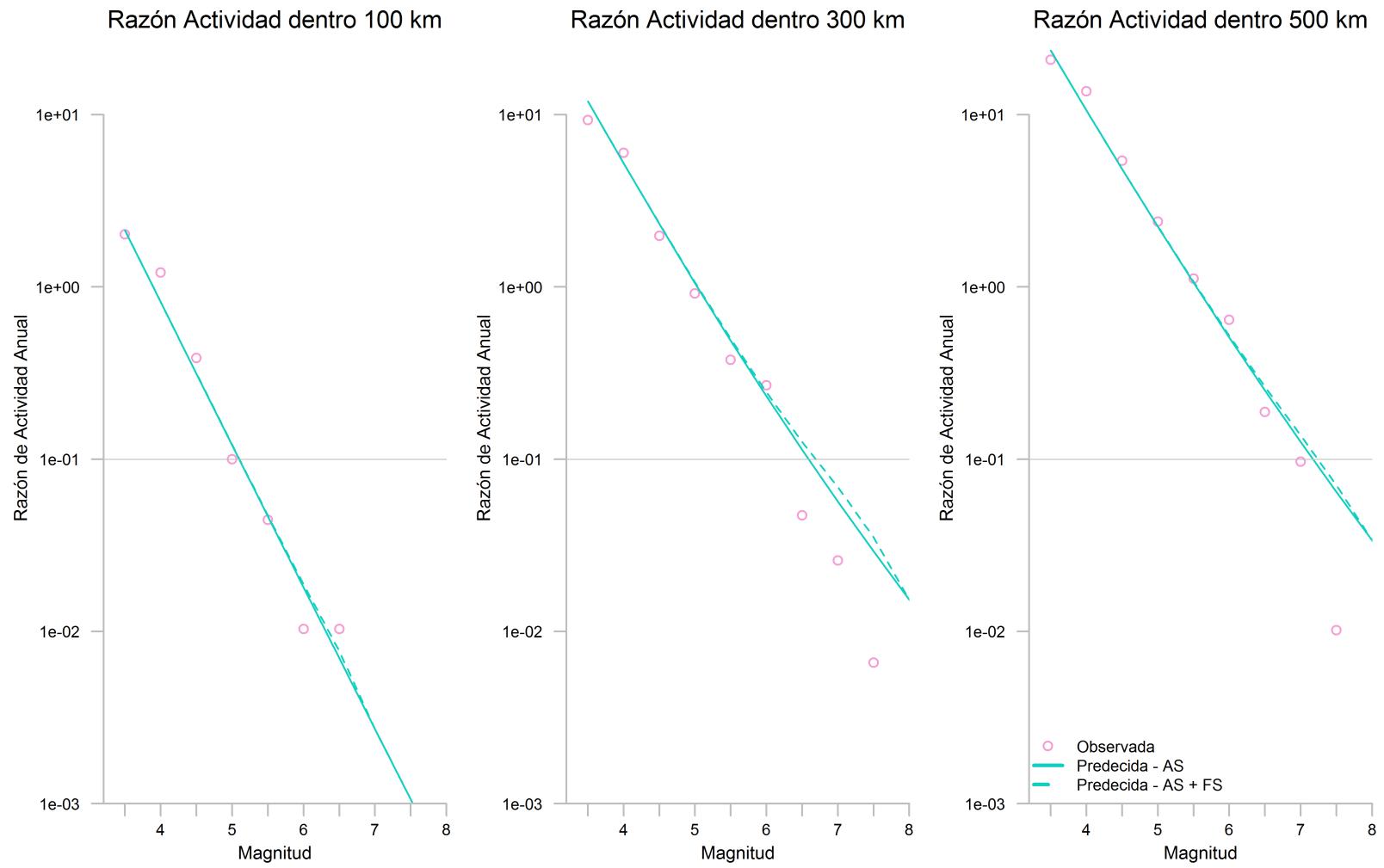
**Desagregación Peligro Sísmico por  
Epsilon (Vs30 = 760 m/s)**

PROYECTO NO. 14-00908			ARCHIVO		
DISEÑO	EH	Jun 15 2014	ESCALA	NTS	REV.
CHEQUEO	EH	Jun 20 2014	DAG_Vs30_760_Epsilon_sp.png		0
REVISIÓN	AH	Jul 03 2014			

**Golder Associates**

**FIGURA 13**





**APÉNDICE A**

**Memorándum Técnico Investigación Fallas Sísmicas**

**Proyecto Cerro Quema**

**Date:** Noviembre 24, 2014

**Project No.:** 1400908.001

**To:** Gene Tortelli

CQ04 GAI-002-TM V4 - spanish

**From:** Alan Hull

**Company:** Golder Associates Inc.

**cc:**

**Email:** ahull@golder.com

**RE: INVESTIGACIÓN FALLAS SÍSMICAS PROYECTO CERRO QUEMA**

Este memorándum técnico presenta los resultados de nuestra evaluación de peligro de ruptura superficial por falla sísmica basada en trabajos de campo para el sitio del Proyecto Cerro Quema, en la Península de Azuero, Panamá.

### 1.0 INTRODUCCIÓN

Golder está bajo contrato para realizar estudios de ingeniería a nivel de pre-factibilidad que cumpla con el requerimiento 43-101 en el sitio del Proyecto Cerro Quema. Golder además está apoyando el estudio de Impacto Social y Ambiental (Environmental and Social Impact Assessment, ESIA) con el desarrollo de un estudio de peligro sísmico específico de sitio, así como estudios de línea base geoquímica e hidrogeológica. Como parte de los estudios ESIA se requiere el desarrollo de análisis sísmicos específicos de sitio y parámetros de diseño para análisis sísmicos a nivel de pre-factibilidad. Estos estudios incluyen la identificación y caracterización de las principales fuentes sísmicas regionales; así como un evaluación de campo del potencial de ruptura superficial de la Falla Rio Joaquín ubicada debajo de la pila de lixiviación propuesta Maricela (Maricela heap leach facility, HLF).

Pershimco identificó que esta evaluación del potencial de ruptura superficial por falla sísmica era necesaria para avanzar en los procesos de permiso y diseño, en particular para el HLF Maricela y para los botaderos Chontal Superior (Upper Chontal waste rock dump, WRD). Este memorándum técnico presenta los resultados de nuestra evaluación de campo realizada entre el 7 al 11 de Abril 2014. El reconocimiento aéreo en helicóptero (proporcionado por Pershimco) se realizó el 10 de Abril 2014.

### 1.1 Alcance del Trabajo

El alcance del trabajo de Golder para Pershimco se estableció en nuestra propuesta P1400908 con fecha 27 de Marzo 2014. La propuesta contiene el alcance del trabajo para los estudios sísmicos que incluyen una fase de estudios de campo para la evaluación de fallas sísmicas activas conocidas dentro de los 20 km del sitio del proyecto. Las actividades del trabajo de campo incluyen:



- Revisión de la estratigrafía y estructura de las unidades geológicas dentro y en los alrededores del sitio del Proyecto Cerro Quema.
- Mapeo en campo de la Falla Rio Joaquín dentro y en los alrededores del sitio del sitio de la pila de lixiviación.
- Reconocimiento aéreo de las fallas dentro y en los alrededores del sitio de las principales instalaciones (pila de lixiviación, botaderos, tajos y principales instalaciones) en el sitio del Proyecto Cerro Quema
- Reconocimiento aéreo de las fallas regionales al sureste y suroeste del sitio del proyecto.
- Revisión de la ubicación y razones de desplazamiento de cualquier falla Cuaternaria (últimos 2.6 millones de años) para la región dentro de los 100 km del sitio del proyecto.
- Preparación de un registro fotográfico de las principales características examinadas en el terreno.
- Preparación de una actualización de los parámetros de falla reportados en Golder (2014) para ser usados en el análisis de peligro sísmico para el sitio del Proyecto Cerro Quema.

Los criterios de diseño sísmico se requieren para los análisis de pre-factibilidad y diseños para la pila de lixiviación Maricela, los botaderos Quema Sur y Chontal Superior, así como estructuras ingenieriles adicionales.

## 1.2 Peligro de Ruptura Superficial por Falla Sísmica

Una falla es una fractura plana en la Tierra a lo largo de la cual ocurre desplazamiento en respuesta a los esfuerzos acumulados en la corteza de las rocas. Las fallas pueden tener desplazamientos tanto horizontales como verticales, aunque generalmente predomina un solo tipo de desplazamiento. Las rocas antiguas generalmente muestran varias generaciones de fallas y diferentes direcciones de desplazamiento que se desarrollaron en diferentes períodos durante su evolución geológica. La cantidad de movimiento total en cualquier falla depende de su área (longitud y profundidad) y la cantidad total de deformación que se acumula en las rocas adyacentes a la falla. Por ejemplo, fallas con desplazamientos totales pequeños (< 10 m) son generalmente de longitud y profundidad corta (menores a 100 m). Fallas con desplazamientos totales mayores (100s de metros) se han movido repetidamente a lo largo del mismo plano. Las fallas más largas han acumulado desplazamientos totales verticales y horizontales de 1000s de metros a 100s de kilómetros, respectivamente. Estos movimientos repetidos o cíclicos en la falla en tiempos geológicos resultan en largos escarpamientos lineales y el desarrollo de montañas, cuencas y regiones con relieve topográfico empinado.

Para identificar el potencial de ruptura superficial por falla sísmica, las fallas importantes son aquellas que están acumulando deformaciones en el campo de deformaciones del actual régimen tectónico. Estudios empíricos indican que solamente las fallas más largas generan desplazamientos en la superficie del terreno, y son estas fallas las que presentan un peligro significativo a las estructuras ingenieriles. Por ejemplo, muchas de las rupturas superficiales ocurren en áreas geológicamente activas, tienen desplazamientos superficiales individuales horizontales y/o verticales que van desde los 100 mm a 10 m,

y están asociados con sismos moderados a grandes (magnitud momento  $M \geq 6$ ). Además, estas rupturas superficiales usualmente muestran desplazamientos repetidos en la misma ubicación por miles a millones de años.

### **1.2.1 Clasificación de la Actividad en la Falla**

Las evaluaciones de peligro por sismo para infraestructura minera generalmente se centran en la identificación y caracterización de fallas sísmicas debido a que son estas fallas las que tiene la mayor posibilidad de generar desplazamientos superficiales futuros así como sismos moderados a grandes en el sitio de interés. Por lo tanto, si las fallas mapeadas en el Cerro Quema presentan un peligro de ruptura superficial, entonces son fallas sismogénicas – fallas asociadas a sismos con repetidas rupturas superficiales durante el periodo Cuaternario (últimos 2.6 millones de años).

La Comisión Internacional para Grandes Presas (International Commission on Large Dams, ICOLD 2010) define una falla activa como:

*Una falla, que es razonablemente ubicada e identificada, que se conoce ha producido sismos históricos o ha mostrado evidencia de movimientos en el Holoceno (últimos 11,000 años), fallas largas que se han movido en el Pleistoceno Tardío (entre 11,000 y 35,000 años) y fallas importantes<sup>1</sup> que se han movido repetidamente en el Cuaternario (1.8 millones de años<sup>2</sup>).*

Aunque las guías ICOLD (2010) han sido desarrolladas para el diseño de presas de agua, estas guías son comúnmente aplicadas para presas de relaves y otras instalaciones mineras. Debido a que la definición de falla sísmica activa dada por ICOLD (2010) ha sido desarrollada para un uso global, consideramos que esta es apropiada y práctica para su aplicación en el sitio del Cerro Quema, en particular porque está ubicada cerca de un margen tectónico caracterizado por la alta frecuencia de ocurrencia de sismos con fallas conocidas con una razón de desplazamiento alto ( $\geq 1$  mm/año).

Este estudio evalúa si es que la Falla Rio Joaquín puede clasificarse como activa basada en la definición del ICOLD (2010). Además, si esta es activa, evaluar cuál es su potencial de ruptura superficial dentro de la pila de lixiviación Maricela.

## **2.0 MARCO GEOLÓGICO DEL SITIO DEL PROYECTO CERRO QUEMA**

### **2.1 Marco Tectónico**

El sitio del Proyecto Cerro Quema está ubicado en la región Los Santos en el suroeste de Panamá, alrededor de 200 km al sur-suroeste de la ciudad de Panamá (latitud 7.54547°N, longitud 80.53857°W), como se muestra en la Figura 1. La República de Panamá está ubicada en la Microplaca Panamá – un

<sup>1</sup> Nótese que ICOLD no proporciona criterios para definir las características de fallas “largas” o “importantes”.

<sup>2</sup> Estudios geológicos recientes indican que el Periodo Cuaternario se extiende hasta 2.6 millones de años atrás.

bloque rígido de corteza continental un la unión de las Placas del Caribe, América del Sur, Cocos y Nazca (Kellogg y Vega 1995). La Microplaca Panamá está sobre las placas de subducción Cocos y del Caribe; y una falla de desplazamiento sinistral que se desarrolló entre la Microplaca Panamá y la Placa de Nazca.

Las actuales velocidades de placa interpretadas de mediciones GPS (Trenkamp et al 2002; Bennett et al. 2014) y datos paleosísmicos (Rockwell et al. 2010a) muestran una convergencia consistente hacia el este de Panamá hacia la Placa de América del Sur con velocidades de 10 a 15 mm/año en Nicaragua a 30 mm/año en Panamá central, la costa Colombiana y el Ecuador. Estos desplazamientos relativos de placa son acomodados principalmente en el Cinturón Deformado del Sur de Panamá (SPDB, Figura 1).

### **2.1.1 *Estratigrafía General del Sitio***

Corral et al (2011) presentaron un modelo estratigráfico, así como un mapa geológico y secciones transversales de la geología en el área del Cerro Quema. El modelo estratigráfico se reproduce en la Figura 2. Nuestras observaciones de campo indican que el modelo estratigráfico puede en general ser aplicado al distrito del Cerro Quema, sin embargo, los detalles de las estructuras y afloramientos individuales pueden ser diferentes a los mostrados en los planos geológicos y secciones transversales dadas por Corral et al. (2011).

La unidad inferior de la Formación Rio Quema consiste en rocas de flujo de lava andesítica, areniscas ricas en cristales, y turbiditas interestratificadas con calizas hemipelágicas (Foto 1). Esta secuencia volcánica sedimentaria es interpretada por Corral et al. (2011) como una representación de un ambiente de deposición cercano a la actividad volcánica frontal hace 70 millones de años. Las unidades de caliza representan periodos de cuando la razón de actividad volcánica fue mucho menor y ocurrió la deposición marítima no volcánica. Las unidades superiores de la Formación Cerro Quema contienen rocas de erupciones de domos de lavas submarinas (Foto 2) que se infieren actuaron como barreras para controlar los patrones de sedimentos marinos y volcanoclásticos. Por ejemplo, los taludes del sur de los domos dacíticos tienen una proporción más alta de sedimentos distales que incluyen unidades volcanoclásticas, turbiditas, limolitas y flujos menores de lava andesítica (Foto 3). Al norte de los domos dacíticos, las unidades comprenden rocas volcánicas masivas, diques, y solo unidades menores volcanoclásticas y de caliza (Foto 4). Esta secuencia sedimentaria sugiere una deposición cercana a un arco volcánico en contraste con el lado sur donde las unidades estratigráficas son sedimentos depositados lejos del arco volcánico. La unidad superior de la Formación Rio Quema esta penetrada por cuarzos dioríticos relaciones con el arco volcánico y diques granodioríticos.

La Formación del Rio Quema del Cretáceo-Paleogénico Tardío está debajo de la Formación Tonosi. Estudios de Kolarsky y Mann (1995) dividen la Formación Tonosi en unidades superiores e inferiores, con la unidad inferior constituida por unidades marítimas superficiales y terrestres; y la unidad superior constituida por areniscas interestratificadas con limolitas y sedimentos calcáreos depositados en el fondo

del océano. La Formación Tonasi parece haber sido depositada hace 40 a 15 millones de años (Periodo Paleogenico Tardio al Neogenico Medio). Kolarsky y Mann (1995) mapearon las rocas horizontales de la Formación Tonasi a lo largo de la costa suroriental de la Península Azuero (Foto 5). Pequeños afloramientos de la Formación Tonasi afloran al sur y dentro del componente del Proyecto Cerro Quema.

Los depósitos del Periodo Cuaternario y Neogénico Tardío (15 millones de años al presente) están generalmente ausentes dentro del área de Cerro Quema. Depósitos aislados de sedimentos aluviales del aparentemente Holoceno (últimos 11,700 años) están preservados dentro y sobre terrazas que rodean el Rio Quema y sus tributarios (Foto 6). Cerca de la costa del Pacifico se observan grandes planicies aluviales que están preservadas y rodeando los canales actuales de los principales ríos (Foto 7). Estos depósitos aluviales están encima de un aluvial Cuaternario de espesor desconocido.

### **3.0 EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE LA FALLA**

En esta sección se describe los resultados de nuestras investigaciones de campo y oficina del potencial de ruptura superficial por falla sísmica en el sitio del Proyecto Cerro Quema. Esta sección se centra principalmente en la ubicación y actividad de la falla del Rio Joaquín debido a que esta es una estructura geológica importante y su mapeamiento indica que se extiende debajo del sitio de la pila de lixiviación Maricela.

#### **3.1 Falla Rio Joaquín**

La Falla Rio Joaquín fue inicialmente mapeada y nombrada por Buchs (2008) basada en un mapeo de campo regional e interpretación de imágenes de satélite con escala reducida. Una definición más detallada de la Falla Rio Joaquín fue luego completada por Corral et al. (2011), quienes mapearon la Falla Rio Joaquín con rumbo este-oeste dentro y adyacente al sitio del Proyecto Cerro Quema. Corral et al. (2011) reportaron que la falla es del tipo reversa con un buzamiento empinado con un desfase vertical mínimo de 300 a 400 m (el lado norte encima) basados en criterios estratigráficos. Ellos notaron que la falla está marcada por brechas de falla y tajos tensionales subparalelos.

La interpretación del sondeo geofísico realizado por Geotech (2012) indica un marcado gradiente en la tendencia magnética este-oeste en el campo de intensidad magnético total reducido al polo en el área del Proyecto Cerro Quema (Figura 2). Este gradiente magnético tiene la misma ubicación general que el trazo superficial de la Falla Rio Joaquín mapeada por Corral et al (2011), y se asume que es la firma magnética del desplazamiento de la falla.

#### **3.2 Observaciones de Campo**

El trazo de la Falla Rio Joaquín en el sitio del Proyecto Cerro Quema es un lineamiento este-oeste en la base de las rocas dioríticas y cuerpos mineralizados debajo del sitio del tajo La Pava en el oeste (Foto 8) y paralela a la Quebrada de Quema en el este (Foto 9). Para este estudio, se observó en detalle la

naturaleza de la Falla Rio Joaquín a lo largo de cerca de 3 km del trazo de la falla expuesta en Quebradas de Quema Dolores, Maricela y Seca.

La falla varía considerablemente en carácter como se evidencia en las rocas volcanoclasticas en los canales secos de estas quebradas y adyacentes a áreas de corte de los caminos. La falla, o más correctamente zona de falla, comprende una serie de rumbos este-oeste y noroeste-sur, buzando profundamente ( $> 50^\circ$ ) planos de fallas (Fotos 10 y 11) con asociadas zonas apretadas. Estas fallas expuestas ocurren sobre una zona de más de 500 m en la Quebrada Maricela y la Quebrada de Quema. Las fallas son generalmente encontradas en las rocas volcanoclasticas al sur del contacto con las lavas dioríticas, a pesar de que se observaron algunas zonas de corte en las dioritas.

El carácter de la zona de falla expuesta en Quebrada Seca (Foto 12) es diferente a las observadas en otros sitios. En Quebrada Seca, la falla tiene un ancho de zona de hasta 5 m con gubia y cataclasitas desarrolladas en rocas volcanoclasticas cercanas al contacto inferido entre las rocas sedimentarias e ígneas con la Unidad Superior de la Formación Rio Quema. Una terraza joven aluvial esta sobre esta zona de falla, pero no está desplazada por esta (Foto 13).

Observaciones a lo largo de la sección de 3 km de la Falla Rio Joaquín, así como observaciones adicionales del staff geológico de Pershimco sugiere que esta falla es posiblemente no importante y no es una estructura intrusiva con cantidad de desplazamiento significativo. Ciertamente, a excepción de Quebrada Seca, todas las fallas comprenden una zona ancha de fallas subparallelas, relativamente menores. Solo la zona de falla más ancha expuesta en Quebrada Seca (Foto 14) sugiere una falla que ha acumulado desplazamiento significativo. Mapeos adicionales desarrollados por geólogos de Pershimco debiera revelar una imagen más completa de la naturaleza de la Falla Rio Joaquín, sin embargo, basados en las observaciones durante este estudio la Falla Rio Joaquín no puede ser considerada una característica tectónica importante.

### **3.3 Evaluación de Actividad de la Falla**

Según la guía ICOLD (2010), una falla active incluye fallas principales que muestran evidencia de movimientos repetidos en el Periodo Cuaternario. Además, están incluidas fallas largas que han demostrado movimiento en los últimos 35,000 años. Asados en los 3 km de la Falla del Rio Joaquín examinados en este estudio, concluimos que la Falla Rio Joaquín no es ni una falla principal ni una falla larga. Además, no se encontró evidencia tectónica geomorfológica como desfases en ríos, lineamientos principales (Sección 4) para indicar que la Falla Rio Joaquín se ha movido en el Periodo Cuaternario. Debido a esto, es la opinión de Golder que basados en la falta de continuidad a lo largo de su rumbo, así como ninguna evidencia de desplazamiento superficial reciente, la Falla Rio Joaquín no está activa en términos de la definición de ICOLD (2010) para fallas activas.

El trazo de la Falla Rio Joaquín intersecta el sitio del propuesto botadero Upper Chontal (Foto 15 y 17) y el sitio de la propuesta pila de lixiviación Maricela. No consideramos que la Falla Rio Joaquín presente un peligro de ruptura superficial a estas dos instalaciones. Además se han evaluado las ubicaciones de los propuestos botaderos Chontal Superior para peligro de ruptura superficial por falla sísmica. No se encontró evidencia de que fallas principales o largas pasen a través de sus huellas, o que una falla activa del Holoceno este ubicada en el sitio del propuesto botadero Chontal.

## 4.0 OTRAS FALLAS

En esta sección se describe tres fallas principales mapeadas por Cowan et al. (1998) y observadas durante el reconocimiento aéreo realizado en este estudio.

### 4.1 Zona de Falla Azuero-Soná

La estructura geológica a macro escala más prominente en la Península Azuero es la falla Azuero-Soná con rumbo noroeste-sureste (Figura 1). Esta zona de falla está localizada a 15 km del suroeste del sitio propuesto para la pila de lixiviación Maricela, a su distancia más cercana. Geológicamente, la falla separa dos diferentes basamentos volcánicos (e.g. Kolarsky y Mann 1995). Rocas en el lado suroccidental de la falla son flujos de basamento masivo y lavas interestratificadas con sedimentos volcanoclásticos. Los basamentos rocosos al noreste de la falla son arcos volcánicos de isla con basalto, andesitas y dacitas interestratificadas con sedimentos.

La Falla Azuero-Soná tiene en muchos lugares un trazo de superficie prominente con la topografía del suroeste de la Península Azuero (e.g. Cowan et al. 1998; Rockwell et al., 2010a). Cerca de la costa (Foto 7) la falla está marcada por una escarpa de 200 a 300 m de altura a lo largo del lado suroccidental del Valle del Rio Guanico (Foto 18). Rockwell et al. (2010a; Figura 2) nota la marcada expresión topográfica y desfases laterales sinestrales. La Foto 19 es una vista del trazo de falla cerca de la confluencia del rio Noneca y el Rio Quebro como la mostrada también por Rockwell (2010a). En general, la falla Azuero-Soná puede ser identificada a lo largo de sus 68 km de trazo en el terreno en el suroeste de la Península Azuero. Tanto las escarpas empinadas (Foto 20), la topografía disturbada con obvios desfases laterales (Foto 21), como los angostos valles con rumbo noroeste (Foto 22) y escarpamientos topográficos (Foto 23) testifican la reciente ruptura superficial a lo largo de la falla. Estas características tectónicas geomorfológicas indican que el sentido del desplazamiento envuelve tanto desplazamientos verticales como laterales sinestrales.

La razón de desplazamiento y el potencial sísmico de esta falla principal, sin embargo, son desconocidos. Cowan et al. (1998) clasifica la razón de desplazamiento como “desconocida”, y con un tiempo al más reciente movimiento probablemente de menos de 1.6 millones de años. Rockwell et al. (2010a) están confiados que la falla sea activa, sin embargo, ellos tampoco poseían información acerca de su razón de desplazamiento promedio. Eldon Gath (comunicación personal) sugiere que la Falla

Azuero-Soná puede tener un desplazamiento promedio tan alto como 10 mm/año basado en el modelo de Rockwell et al. (2010) para la deformación interna de la Microplaca Panamá. Desafortunadamente, estudios existentes, incluyendo este estudio, no proporcionan nuevas evidencias para limitar la razón de desplazamiento de la Falla Azuero-Soná. Aunque la expresión geomorfológica tectónica de la falla indica probablemente múltiples superficies de ruptura inferidas del desfase topográfico, se requieren estudios de campo completos para proveer una evaluación cuantitativa de la razón de desplazamiento promedio de la falla.

#### **4.1.1 Falla Bucaro**

Cowan et al. (1998) mapearon a una falla con expresión pobre y discontinua (PA-11b) que se extiende desde el Golfo de Panamá por unos 40 km al noroeste a lo largo del margen suroccidental del Valle Tonasi. Ellos describen esta falla sin nombre como una falla normal con buzamiento nororiental paralela a la Falla Azuero-Soná. Esta falla ha sido informalmente denominada Falla Bucaro en referencia al pueblo costero donde la falla ocurre.

A su extremo sur, la Falla Bucaro forma el margen suroccidental del Valle del Río Tonasi (Foto 24). La máxima separación topográfica vertical es de 300 m entre el piso del valle y las montañas detrás de Bucaro, pero la separación vertical total es mucho mayor debajo del espesor desconocido de material aluvial en el Valle Tonasi. Al noroeste de Bucaro (Foto 25), el escarpamiento tiene un mínimo de 450 a 500 m. La expresión geomórfica de la falla es generalmente subducida y mostrada como un frente empinado, con espolones y un derrame escalonado en un abanico antiguo aluvial. No se observa un escarpamiento claro con el amplio valle de tendencia norte-sur al noroeste de Bucaro. Mientras que el drenaje con el valle es en dirección norte, la falla Bucaro no está bien desarrollada a través del valle Holocénico inferido. La falta de un escarpamiento y muchas otros escarpamientos "frescos" a lo largo de la longitud de falla sugieren que a pesar de que la falla sea Cuaternaria (últimos 2.6 millones de años), hay poca evidencia de ruptura superficial reciente. De acuerdo a esto, esta falla es ya sea inactiva o tiene una razón de desplazamiento actual muy baja.

#### **4.1.2 Zona de Falla Río Flores**

El lado final nororiental del Río Flores está ubicado a 30 km del suroeste de la Mina Cerro Quema. La mayoría de la falla ha sido mapeada fuera de la costa (Cowan et al. 1988). Solo 20 km de la parte nororiental de la falla se extiende 20 km dentro de la costa (Foto 26) al Río Pavo (Foto 27) a lo largo del margen sur del Valle del Río Cacao en el suroeste de la Península Azuero.

La expresión superficial de la Falla Río Flores es similar a la de la Falla Bucaro. Hay aparentemente 200 m de separación vertical de las montañas costeras y hasta 1000 m de relieve topográfico al lado oriental del lado final de la falla. Sin embargo, no es claro, si todo el relieve topográfico tiene un origen asociado a desplazamiento de falla y si puede haber sido causado por erosión diferencial. El trazo de

falla no está muy bien definido más allá de las pendientes empinadas en las cabezas de los principales abanicos aluviales disectados (Foto 27). Nuestro reconocimiento aéreo no identificó alguna ubicación donde los escarpamientos de fallas estén bien preservados y/o indiquen ruptura superficial reciente. Aunque la falla pueda tener desplazamientos en el Periodo Cuaternario (últimos 2.6 millones de años), no existe evidencia conocida de desplazamientos en la Época del Holoceno (últimos 11,700 años). De acuerdo a esto, esta falla es inactiva o presenta una razón de desplazamiento promedio actual muy bajo.

## 5.0 CONCLUSIONES

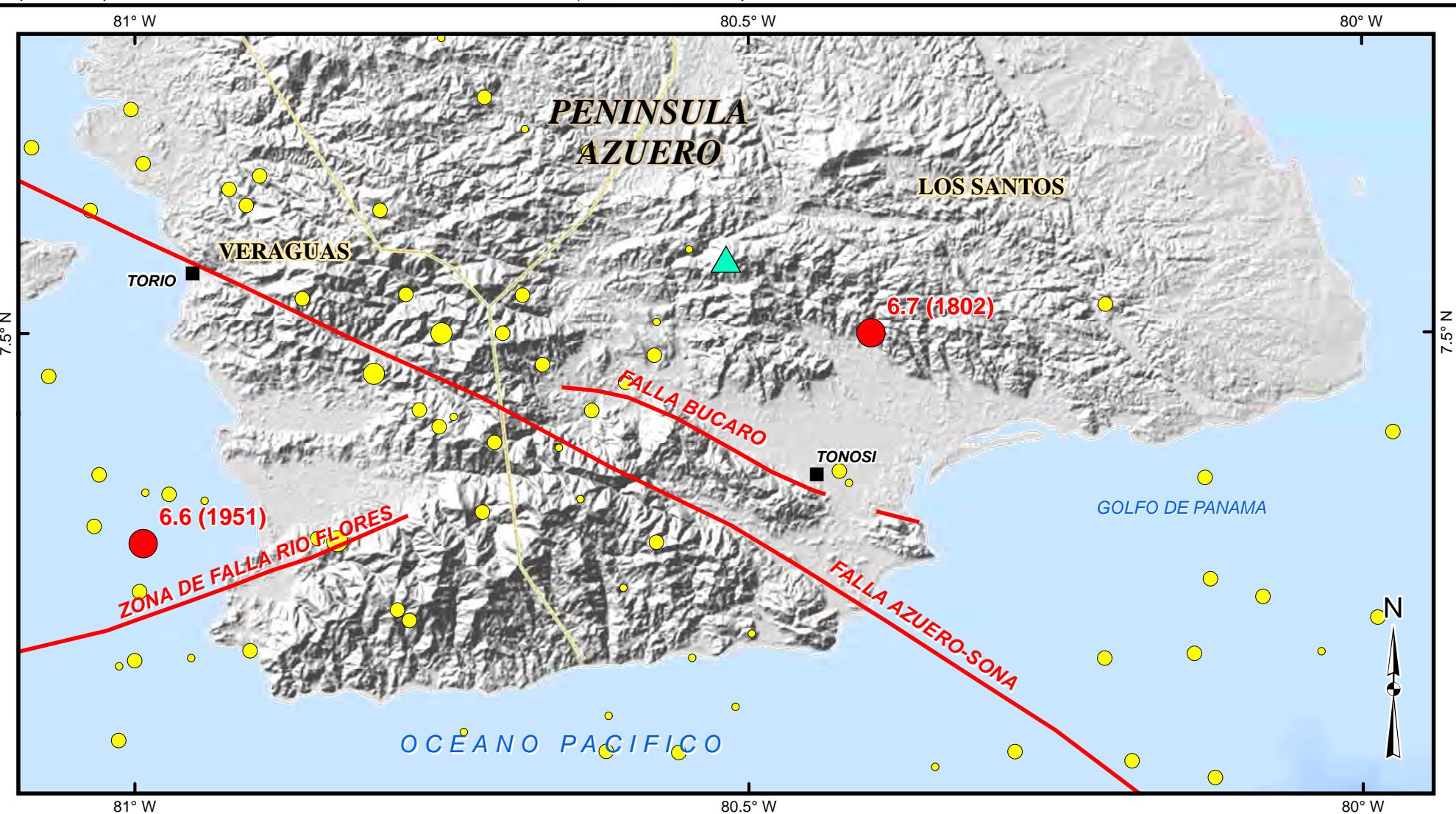
- La zona de Falla Rio Joaquín tiene un rumbo este-oeste en el sitio del Proyecto Cerro Quema. La falla usualmente (pero no siempre) marca el contacto entre los sedimentos volcanoclásticos y lavas dacíticas en la Unidad Superior de la Formación del Rio Quema de Corral et al. (2011).
- Las fallas dentro de la zona de falla tienen buzamientos empinados con rumbo noreste y oeste noroeste con gubia y zonas de cataclasitas menores a 1 m de ancho.
- Solo la Quebrada Seca tiene una zona ancha (alrededor de 5 m) de gubia y cataclasitas que indican la presencia de una falla importante. La falta de continuidad de esta ancha zona a lo largo de su rumbo, sugiere que la falla Rio Joaquín no es ni larga ni una falla principal en términos del ICOLD (2010).
- No se identificó ninguna evidencia de estratigrafía tectónica geomórfica que indique que la Falla Rio Joaquín ha tenido ruptura superficial en la Época del Holoceno (últimos 11,700 años).
- Golder considera que la Falla Rio Joaquín no es una falla activa en términos de lo definido en ICOLD (2010). En este contexto, Golder considera que no existe peligro de ruptura superficial por falla sísmica en el sitio del botadero propuesto Chontal Superior and el sitio de la propuesta pila de lixiviación Maricela.
- La Falla Azuero-Soná está ubicada a 18 km del sitio del proyecto. Observaciones del reconocimiento aéreo de escarpados “frescos”, desfases sinestrales y topografía perturbada, y valles alineados evidencian que la falla Azuero-Soná está activa. La razón de desplazamiento se desconoce debido a que los estudios existentes no han sido llevados con suficiente detalle para definir una razón de desplazamiento promedio.
- Las Fallas Bucaro y Rio Flores están ubicadas aproximadamente a 10 y 30 km del sitio del Proyecto, respectivamente. Ambas fallas tienen marcados desfases verticales de 100s de metros y evidencias de escarpados empinados a lo largo de partes de su trazo

superficial. Hemos encontrado, sin embargo, que no existe clara evidencia de ruptura superficial por fallas en el Holoceno. Ambas de estas fallas principales han tenido probablemente alguna actividad durante el Cuaternario y se clasifican como activas en términos de las guías ICOLD (2010). La falta de geomorfológica tectónica muy reciente y desfases de superficies aluviales jóvenes sugieren que ambas fallas tienen una razón de desplazamiento promedio muy bajo.

## 6.0 REFERENCIAS

- Bennett, R., Spinler, J., Compton, K., Rockwell, T., Gath, E., 2014, Global Positioning System constraints on active crustal deformation in Central Panama, *Seismological Research Letters* 85, p. 278-283.
- Corral, I., Greiera, A., Gomex-Gras, D., Corbella, M., Canals, A., Pineda-Falconett, M., Cardellach, E., 2011. Geology of the Cerro Quema Au-Cu deposit (Azuero Peninsula, Panama). *Geologica Acta* 9, p. 1-18.
- Cowan, H., Machette, M.N., Haller, K.M. and Dart, R.L., 1998, Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Panama and its Offshore Regions, A project of the International Lithosphere Program Task Group II-2, Major Active Faults of the World, USGS OFR 98-779.
- Geotech, 2012, Report On A Helicopter-Borne Versatile Time Domain Electromagnetic (Vtem), Gamma-Ray Spectromerty and Aeromagnetic Geophysical Survey, Cerro Quema Project, 21pp.
- International Committee of Large Dams (ICOLD). 2010. Bulletin 72: Selecting seismic parameters for large dams guidelines (2010 Revision). Committee on Seismic Aspects of Dam Design. CIGB-ICOLD.
- Kellogg, J.N. and Vega, V., 1995, Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from global positioning system geodetic studies and gravity, *Geological Society of America Special Paper* 295.
- Kolarsky, R., Mann, P., 1995, Structure and neotectonics of an oblique-subduction margin, southwestern Panama, *Geological Society of America Special Paper* 295, p. 159-200.
- Pershimco Resources Inc., 2013. Fact Sheet available at <http://www.pershimco.ca/s/FactSheet.asp> dated July 2013.
- Montero, W., 2001, Neotectónica de La Región Central de Costa Rica: Frontera Oeste De La Microplaca De Panamá, *Revista Geológica de América Central*, 24: 29-56
- P & E Consultants, 2012. Technical Report and Mineral Resource Estimate on the Cerro Quema Project, Los Santos Province, Panama, Report N°251 prepared for PERSHIMCO Resources Inc., dated November 2, 2012.
- Rockwell, T., Bennett, R., Gath, E., Franceschi, P., 2010a, Unhinging an indenter: A new tectonic model for the internal deformation of Panama, *Tectonics* 29, TC4027, doi:10.1029/2009TC002571, 2010
- Rockwell, T., Gath, E., Gonzalez, T., Madden, C., Verdugo, D., Lippincott, C., Dawson, T., Owen, L.A., Puchs, M., Cadena, A., Williams, P., Weldon, E. and Franceschi, P., 2010b, Neotectonics and paleoseismology of the Limón and Pedro Miguel Faults in Panama: Earthquake Hazard to the Panama Canal, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 100, No. 6, 34 p.
- Trenkamp, R., Kellog, J., Freymueller, J., Mora, H., 2002, Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations, *Journal of South American Earth Sciences*, 15. p.157-171.

## FIGURAS



#### LEYENDA

- ▲ SITIO PROYECTO CERRO QUEMA
  - CIUDAD
  - FALLAS CUATERNARIAS ACTIVAS
- EPICENTEROS**
- MAGNITUD**
- < 4.0
  - 4.0 - 4.9
  - 5.0 - 5.9
  - > 6.0 MAGNITUD (AÑO DE SISMO)
- 6.3 (1960)**

8.5      0      8.5  
KILOMETROS

#### REFERENCIAS

1. SISTEMA DE COORDENADAS: WGS 1984 UTM Zone 17N
2. INTERNATIONAL SEISMOLOGICAL CENTER GLOBAL EARTHQUAKE MODEL CATALOG (ISC-GCM)
3. MODIFICADO DE MAPA USGS Y BASE DE DATOS DE FALLAS CUATERNARIAS EN PANAMA Y REGIONES FUERA DE COSTA (COWAN ET AL, 1998)

PROYECTO  
**CERRO QUEMA - ESTUDIO PREFACTIBILIDAD**  
PERSHIMCO RESOURCES INC.  
LOS SANTOS, PANAMA

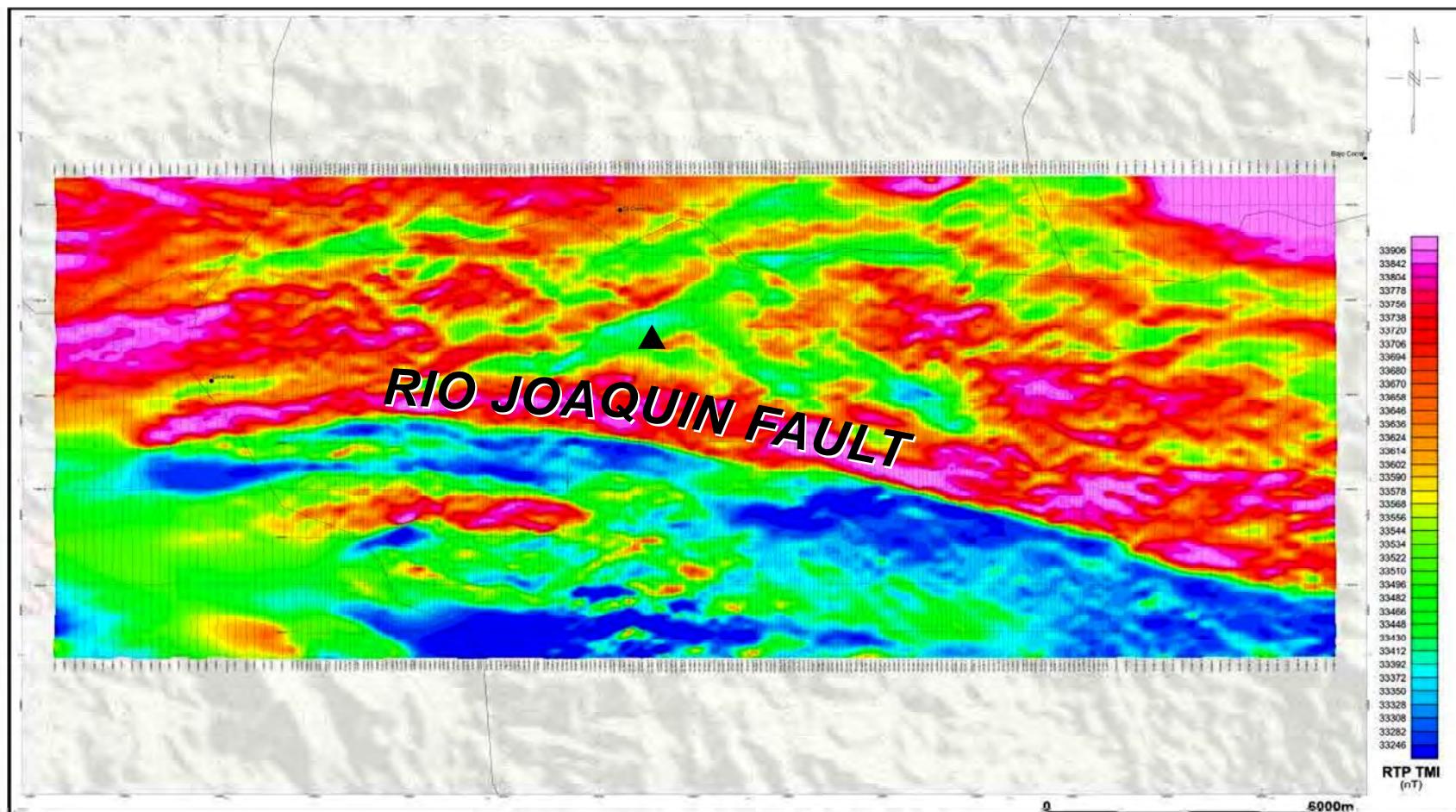
TITULO

#### FALLAS CUATERNARIAS Y SISMOS HISTORICOS



PROJECT NO. 013-00709			FILE No. 01300709-03_FaultMap.mxd	
DESIGN	DL	11/8/2013	SCALE:	REV. 0
GIS	KJK	11/25/2014		
CHECK	CV	11/8/2013		
REVIEW	DL	11/8/2013		

**FIGURA 1**



ORIGEN: GEOTECH (2012).

Reduced to Pole (RTP) of TMI

#### LEYENDA

▲ SITIO PROYECTO CERRO QUEMA

PROYECTO  
**CERRO QUEMA - ESTUDIO PREFACTIBILIDAD**  
PERSHIMCO RESOURCES INC.  
LOS SANTOS, PANAMA

TITULO

#### MAPA MAGNETICO



PROJECT NO. 013-00709		FILE No. 01300709-04_GeoSurvey.mxd
DESIGN	DL	11/8/2013
GIS	KJK	11/25/2014
CHECK	CV	11/8/2013
REVIEW	DL	11/8/2013

FIGURA 2

## FOTOS

**Título Proyecto:** INVESTIGACIÓN FALLAS SÍSMICAS PROYECTO CERRO QUEMA**FOTO 1**

Afloramiento de capa de la Formación Rio Quema caliza en el canal Quebrada Seca

**FOTO 2**

Afloramiento masivo de diorita aproximadamente 300 m al suroeste del área "Staging Platform".



**Título Proyecto:** INVESTIGACIÓN FALLAS SÍSMICAS PROYECTO CERRO QUEMA**FOTO 3**

Afloramiento de la Formación Rio Quema caliza y sedimentos de matriz fina aproximadamente 1 km al norte de "Staging Area".

**FOTO 4**

Rocas sedimentarias volcanoclásticas de la Formación Rio Quema expuestas en el canal de la Quebrada Maricela.



**Título Proyecto:** INVESTIGACIÓN FALLAS SÍSMICAS PROYECTO CERRO QUEMA**FOTO 5**

Formación Tonosi expuesta en la plataforma costera y terrenos costeros a lo largo de la costa suroriental de la Península Azuero.

**FOTO 6**

Terraza aluvial preservada encima de la Quebrada Dolores aproximadamente 3.3 km al sureste de "Staging Platform".



**Título Proyecto:** INVESTIGACIÓN FALLAS SÍSMICAS PROYECTO CERRO QUEMA**FOTO 7**

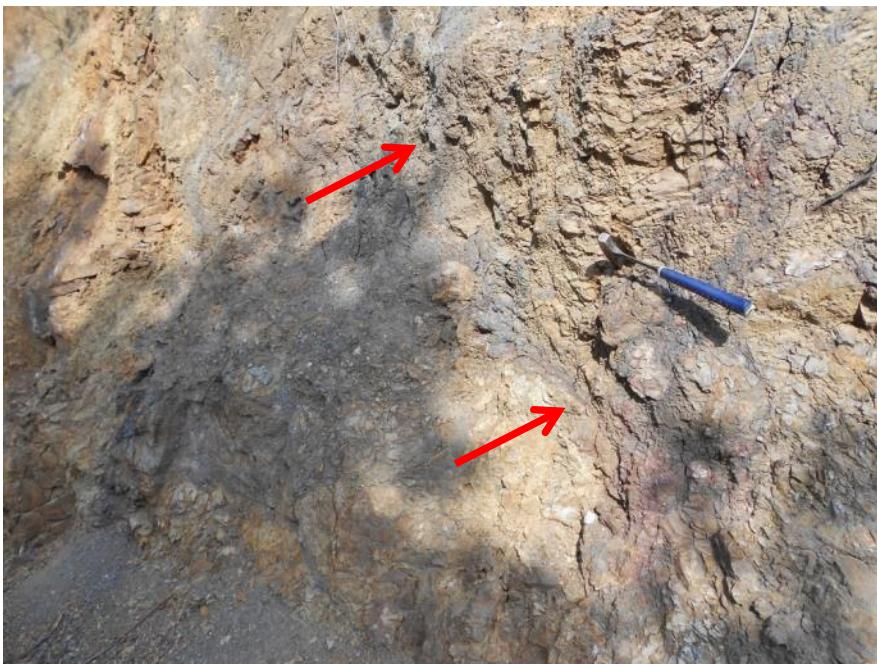
Vista suroccidental sobre la desembocadura del Río Guanico hacia Punta Cieba en la costa sureste de la Península Azuero. El llano aluvial es típico de las amplias, llanos aluviales bajos que rodean los principales ríos que drenan la Península Azuero.

**FOTO 8**

Vista este a lo largo del alineamiento de la Falla Río Joaquín (flechas) desde cerca al tajo Pava y Cerro Quema (el pico más alto en el lado superior izquierdo)



**Título Proyecto:** INVESTIGACIÓN FALLAS SÍSMICAS PROYECTO CERRO QUEMA

<b>FOTO 9</b> Vista occidental a lo largo de la Quebrada Quema a lo largo de Falla Rio Joaquin (flechas)	
<b>FOTO 10</b> Plano de falla con buzamiento empinado con rocas volcanoclasticas meteorizadas expuestas en un corte de camino en un risco entre Quebrada Seca y Quebrada Maricela.	

**Título Proyecto:** INVESTIGACIÓN FALLAS SÍSMICAS PROYECTO CERRO QUEMA**FOTO 11**

Falla subvertical expuesta (flechas) dentro de rocas volcanoclasticas en el Quebrada de Quema cerca de su confluencia con la Quebrada Dolores.

**FOTO 12**

Afloramiento de falla y gubia y cataclasita (color azul grisáceo) que marca la ubicación de la Falla Rio Joaquín expuesta en la Quebrada Seca.



**Título Proyecto:** INVESTIGACIÓN FALLAS SÍSMICAS PROYECTO CERRO QUEMA**FOTO 13**

Vista al oeste de algunos afloramientos mostrados en la Foto 12 (flechas). Las rocas separadas y rotas con la gubia que marcan que la falla no ha penetrado en o a desplazado las graveas aluviales (Holoceno) de encima.

**FOTO 14**

Vista al norte sobre la propuesta pila de lixiviación Maricela y la Falla Rio Joaquín expuesta (flecha) en la Quebrada Seca. El canal al este (derecha) es la Quebrada Maricela.



**Título Proyecto: INVESTIGACIÓN FALLAS SÍSMICAS PROYECTO CERRO QUEMA****FOTO 15**

Vista nororiental al lado sur del tajo Pava al sitio propuesto del botadero Chontal Superior – lado mirando al sur.

**FOTO 16**

Vista norte al Rio Quema sobre la sección noroccidental del sitio del botadero propuesto Chontal Superior.



**Título Proyecto:** INVESTIGACIÓN FALLAS SÍSMICAS PROYECTO CERRO QUEMA**FOTO 17**

Vista norte al tajo La Pava y "Staging Area" (flecha amarilla) sobre el sitio de la propuesta pila de lixiviación Maricela y falla Río Joaquín (flecha roja).

**FOTO 18**

Vista oeste sobre el trazo de la Falla Azuero-Soná (flechas) aproximadamente 2 km del pueblo de Ave María.



**Título Proyecto:** INVESTIGACIÓN FALLAS SÍSMICAS PROYECTO CERRO QUEMA**FOTO 19**

Vista oeste al trazo de la Falla Azuero-Soná (entre flechas) en la confluencia del Río Noneca y Río Quebro aproximadamente 2 km al sur este del pueblo de Las Bocas.

**FOTO 20**

Vista oeste hacia el trazo de la Falla Azuero-Soná (entre flechas) aproximadamente 3 km noroeste de Jobero.



**Título Proyecto:** INVESTIGACIÓN FALLAS SÍSMICAS PROYECTO CERRO QUEMA**FOTO 21**

Vista suroccidental hacia el trazo de la Falla Azuero-Soná (entre flechas) cerca del pueblo de Guanico Arriba. La deflexión de los canales indica movimiento lateral a lo largo de la falla.

**FOTO 22**

Vista occidental sobre el bien desarrollado trazo lineal de la Falla Azuero-Soná (entre flechas).



**Título Proyecto:** INVESTIGACIÓN FALLAS SÍSMICAS PROYECTO CERRO QUEMA**FOTO 23**

Vista suroriental a lo largo del lado final noroccidental de la Falla Azuero-Soná (entre flechas) sobre la desembocadura del Río Torio en el pueblo El Torio.

**FOTO 24**

Vista occidental sobre la Falla Bucaro (flechas) al suroeste de Tonosi. La falla se indica por el empinado frente de la montaña hacia el norte.



**Título Proyecto:** INVESTIGACIÓN FALLAS SÍSMICAS PROYECTO CERRO QUEMA**FOTO 25**

Vista al sur a través del escarpado de la Falla Bucaro cerca de La Corotua.

**FOTO 26**

Vista nororiental a lo largo de la extensión fuera del mar de la zona de Falla Rio Flores (flechas)



**Título Proyecto:** INVESTIGACIÓN FALLAS SÍSMICAS PROYECTO CERRO QUEMA**FOTO 27**

Vista al sur sobre las cabeceras de Cuenca y el abanico del Rio Pavo y parte del lado oriental de la zona de falla Rio Flores (flechas).



Established in 1960, Golder Associates is a global, employee-owned organization that helps clients find sustainable solutions to the challenges of finite resources, energy and water supply and management, waste management, urbanization, and climate change. We provide a wide range of independent consulting, design, and construction services in our specialist areas of earth, environment, and energy. By building strong relationships and meeting the needs of clients, our people have created one of the most trusted professional services organizations in the world.

Africa	+ 27 11 254 4800
Asia	+ 852 2562 3658
Australasia	+ 61 3 8862 3500
Europe	+ 356 21 42 30 20
North America	+ 1 800 275 3281
South America	+ 56 2 2616 2000

[solutions@golder.com](mailto:solutions@golder.com)  
[www.golder.com](http://www.golder.com)

**Golder Associates Inc.  
230 Commerce, Suite 200  
Irvine, CA 92602  
Tel: 714-508-4400  
Fax: 714-508-4401**

**Golder Associates Inc.  
595 Double Eagle Ct., Suite 1000  
Reno, NV 89521  
Tel: 775-828-9604  
Fax: 775-828-9645**