

**INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS PRELIMINARES DE DAÑOS A LAS CASAS**

**en**

**las Aldeas de**

**Agel, El Salitre, San José Ixcán, y San José Nueva Esperanza**

**Municipios San Miguel Ixtahuacán y Sipacapa**  
**Departamento de San Marcos**  
**Guatemala**

1 noviembre 2009

**Comisión Pastoral Paz y Ecología**  
Diócesis de San Marcos  
Casa Diocesana, Oficina 21  
10 Avenida, 6-28 Zona 4, San Marcos  
San Marcos, Guatemala  
[www.resistance-mining.org](http://www.resistance-mining.org)

**Unitarian Universalist Service Committee**  
689 Massachusetts Ave.  
Cambridge, MA 02139-3302  
United States of America  
[www.uusc.org](http://www.uusc.org)

## COLABORADORES

### **Comisión Pastoral Paz y Ecología**

#### Ingenieros

Fausto Valiente

#### Técnicos

Edgar Aguilar

Oscar Bámaca

Fernando Martinez Sanchez

#### Traductores

H. Alejandro Alfaro Santiz

Sander Otten

Johanna Van Strein

#### Coordinadores del Proyecto

Marco Vinicio López

Roberto Marani

### **Unitarian Universalist Service Committee**

#### Ingenieros

Steve Laudeman

James E. Montgomery

Nicholas R. Remington

Robert H. Robinson

#### Reductura

Molly Butler

#### Traductores

Chip Gehle

Nils Mikkelsen

Timothy R. Robinson

#### Mapas

Lars Bromley (GISCorps)

Richard Harris

#### Coordinadora del Proyecto

Patricia Jones

## **RESUMEN**

**Antecedentes:** Las casas en las comunidades alrededor de la mina Marlin, en el oeste de Guatemala muestran graves rajaduras en las paredes y los pisos. Los habitantes creen que el daño es causado por vibraciones de los explosivos de voladura en la mina y el tráfico de camiones pesados a través de sus aldeas. Ellos dicen que sus casas no tenían los problemas de las rajaduras antes de la minería.

La evaluación de impacto ambiental y los informes de monitoreo anuales de la empresa minera no dan ninguna indicación de que los anteproyectos de evaluación estructural de las casas fueron realizados antes de la construcción de la mina, ni tampoco que se haya realizado un monitoreo por parte de la empresa de las vibraciones de la tierra y los daños a las casas.

**Objetivo:** El objetivo de este estudio fue identificar las posibles causas de los daños estructurales y evaluar la probabilidad de cada posible causa.

**Métodos:** Varias casas en las aldeas justo alrededor de la mina, y en dos aldeas de control más alejadas de la mina, fuera de su área de impacto fueron observadas por los ingenieros del equipo de estudio. Las rajaduras en las casas fueron medidas, marcadas, y fotografiadas en visitas periódicas. Se tomaron las muestras de suelo adyacente a las estructuras y fueron probadas en un laboratorio certificado en los Estados Unidos. El equipo de ingeniería ejecutó un monitoreo de las vibraciones del tráfico de camiones pesados y la voladura de la mina. También observó el terreno del lugar para identificar cualquier muestra de inestabilidad del suelo. Se observaron los métodos de construcción de casas del lugar y los propietarios fueron entrevistados acerca de los daños. El equipo también revisó los registros públicos científicos de geología, actividad sísmica, y tipos de suelos de la región.

**Resultados:** Entre los más significativos se encontró que las casas en las aldeas alrededor de la mina tienen muchas más rajaduras que las casas en las aldeas control. La inestabilidad de las tierras, la actividad sísmica, los daños debidos a los tipos de suelos subyacentes, y a los defectos de construcción se han eliminado como causas probables de las rajaduras estructurales. El tipo y el modelo de la mayoría de las rajaduras se determina que fueron causadas por las vibraciones. Los resultados del monitoreo de vibraciones no fueron concluyentes en cuanto a que los daños están siendo causados por las vibraciones de la tierra, pero no fue identificada otra causa posible.

**Conclusiones:** Por proceso de eliminación, la causa más probable del daño a las casas son las vibraciones de la tierra. No hay fuentes de las vibraciones en el área, salvo las derivadas de explosiones de la mina y el tráfico de camiones pesados; por lo tanto, es muy probable que los daños en las aldeas del lugar sean causados por la actividad minera y el tráfico de camiones asociado.

**Recomendaciones:** El equipo de ingeniería recomienda fuertemente el monitoreo adicional, en particular porque la empresa minera ha comenzado la explotación minera en un nuevo tajo a cielo abierta que se encuentra mucho más cercano a partes de las aldeas afectadas.

## INDICE DE CONTENIDO

	<u>Página</u>
Resumen	
Introducción	1
Métodos	6
Ambiente Social	9
Métodos de Construcción Locales	10
Daño Estructural	12
Inventario del Daño	12
Análisis de Rajaduras	16
Tipos de Rajaduras	18
Desplazamiento de Rajaduras	23
Comparación con Aldeas de Control	27
Escupija	27
Chininguitz	29
Geología	31
Estabilidad de la Tierra	34
Suelos	35
Informes Relacionados	35
Muestreo y Prueba del Suelo	36
Propiedades del Suelo	39
Correlación de Propiedades del Suelo con el Daño Estructural	42
Monitoreo de Vibraciones	43
Tráfico Vehicular	44
Voladura	49
Conclusiones	52
Recomendaciones	54
Referencias	55

### Anexos

- A. Resúmenes Biográficos del Equipo de Ingeniería
- B. Comunicaciones con Goldcorp, Inc. y las Entidades Gubernativas
- C. Galería de Fotos de Métodos de Construcción Local de Adobe
- D. Inventario de los Daños Estructurales
- E. Testimonios de los Habitantes Locales
- F. Análisis del Suelo
- G. Monitoreo de Vibraciones

## Figuras

1. Daño Estructural Típico	2
2. Mapa de Localidad	4
3. Mapa de las Casas Dañadas en Las Aldeas de Agel, San José Ixcaniche, y San José Nueva Esperanza	14
4. Situación de Rajaduras con Relación a Fuente de Vibración	17
5. Tipos de Rajaduras	19
6. Métodos de Medida de las Rajaduras	24
7. Mapa de las Casas Observadas en Escupija	28
8. Mapa de las Casas Observadas en Chininguitz	30
9. Inestabilidad de la Tierra en Chininguitz	32
10. Ubicaciones de Muestras del Suelo	37
11. Prueba de Campo de la Densidad del Suelo	40
12. Monitoreo de Vibraciones del Tráfico Vehicular	45

## Cuadros

1. Daños de las Casas Observadas por Aldea	15
2. Desplazamiento de Rajaduras	26
3. Resumen de Propiedades del Suelo	39
4. Correlación de Propiedades del Suelo con Daño Estructural	39
5. Criterio de Vibraciones para Estructuras de Mampostería de Varios Países	44
6. Velocidad Máxima de Partículas de un Volquete de 3 Ejes Descargado y Cargado	47

## Acrónimos

CONRED - Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres  
COPAE - Comisión Pastoral Paz y Ecología  
EIA&S – Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental y Social  
MARN – Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales  
MEG - Montana Exploradora de Guatemala, S.A.  
MEM - Ministerio de Energía y Minas  
UUSC - Unitarian Universalist Service Committee

## **INTRODUCCIÓN**

Un equipo nacional e internacional de expertos en ingeniería observó daños estructurales anormales en pisos y paredes de casas, iglesias, y tiendas en las comunidades alrededor de la mina Marlin. En la Figura 1 se presenta una galería de fotos de rajaduras típicas. La mina Marlin se encuentra ubicada en los municipios de San Miguel Ixtahuacán y Sipacapa, del Departamento de San Marcos, Guatemala. La Figura 2 muestra los sitios de la mina y las aldeas cercanas. El propietario y operador de Marlin es Montana Exploradora de Guatemala, S.A. (MEG), subsidiario de Goldcorp, Inc., que tiene su oficina principal en Vancouver, British Columbia, Canadá.

Habitantes del lugar, solicitaron que se realizara un estudio de las causas de las rajaduras existentes en más de cien casas en varias aldeas alrededor de la mina Marlin.

La localización de las aldeas con daños estructurales incluye las siguientes:

Agel	15° 14.04' N 91° 42.85' O
El Salitre	15° 15.64' N 91° 41.17' O
San José Ixcaniche	15° 15.09' N 91° 40.99' O
San José Nueva Esperanza	15° 13.99' N 91° 41.84' O

Los habitantes informaron que las rajaduras empezaron a aparecer con la construcción y operaciones de la mina. Creen que el daño es un resultado de las explosiones mineras y el aumento de tráfico de vehículos pesados en sus aldeas, porque la minería es la única actividad a gran escala en el área y no tenían esta problema en el pasado (COPAE y Valiente, 2007). La actividad sísmica después del inicio de la minería ha sido mínima, por lo tanto no es una posible causa de los daños en el lugar. Se han reportado temblores según el INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología); sin embargo, estos han sido distantes y han tenido una magnitud poco probable para ocasionar los daños estructurales.

La Comisión Pastoral Paz y Ecología (COPAE) e ingenieros profesionales voluntarios del Comité de Servicio Unitario Universal (UUSC) realizaron el estudio de ingeniería. El Anexo A contiene los resúmenes biográficos de los participantes principales en el estudio. COPAE y UUSC prepararon una propuesta para el estudio de ingeniería en octubre del 2007. Un estudio del



**Figura 1a Rajaduras Verticales en Pared en Adobe**



**Figura 1b Rajaduras Verticales en Pared en Adobe**

**Figura 1 Daño Estructural Tipico**



**Figura 1c Rajadura Inclinada en Adobe**



**Figura 1d Rajaduras en Lechada en Bloques de Concreto**

**Figura 1 Daño Estructural Típico**

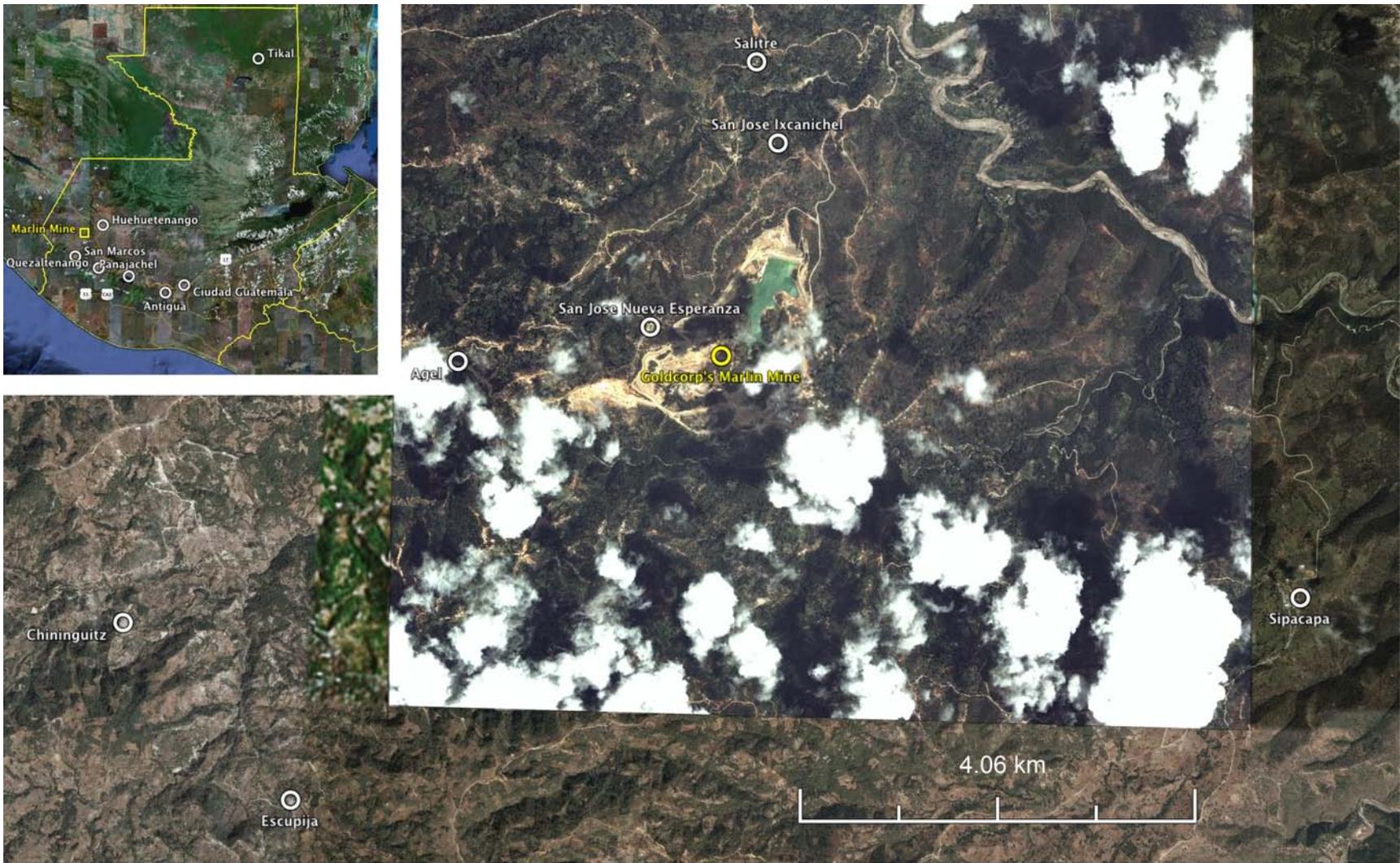


Figura 2. Mapa de Localidad. © Google Earth and Digital Globe. Recuadro © Europa Technologies, INEGI, Terran and LeadDog Consulting.

daño estructural previo fue realizado la primera semana de mayo del 2008. Además, el equipo de ingenieros empezó a realizar un monitoreo sobre el desplazamiento de 13 rajaduras en varias casas de las aldeas. Dos expediciones de campo adicionales fueron tomadas al área en noviembre del 2008 y marzo del 2009 para observar los daños y recolectar información.

El estudio consistió en: entrevistas con los propietarios de las casas y habitantes del lugar; una revisión de información técnica aplicable y disponible; y una observación en el sitio sobre el daño estructural y los posibles orígenes de movimiento de la tierra incluyendo los peligros geológicos como la inestabilidad de la tierra, la actividad sísmica, y los suelos hinchados, y otras posibles causas como métodos de construcción, la voladura de la mina y el tráfico de vehículos pesados. Más importante aun, el equipo también observó casas en dos aldeas de control, Escupija y Chininguitz, lejos de la mina Marlin, para determinar si los daños estructurales cercanos a la mina son típicos de los métodos de construcción local. Las aldeas de control se encuentran ubicadas en un área similar en geografía a las aldeas cercanas a la mina. Están a más de cinco kilómetros de la mina. Ver Figura 2.

El señor Tim Miller, vicepresidente de las Operaciones Centroamericanas de Goldcorp, se reunió con algunos miembros del equipo de ingeniería el 14 noviembre del 2008. El equipo explicó su misión y pidió información específica (como la línea de base) acerca de la mina Marlin, como se puede leer en su carta del 8 octubre 2008, ver Apéndice B. El tipo de información solicitada es generalmente accesible al público en otros países. El señor Miller declaró que él sí estaría dispuesto a brindar alguna información si el estudio es acreditado, objetivo, independiente, y transparente. El 24 de noviembre, el señor Miller envió al equipo información geológica de la ubicación de la mina Marlin, el tratamiento del mineral y un estudio de voladura en la mina realizado por el autor Ligorria, 2008. El señor Miller no envió toda la información solicitada en la carta del equipo.

El equipo de ingeniería contacto además al señor Miller en relación a otros dos temas importantes. En primer lugar, la evaluación del impacto ambiental de la mina Marlin (MEG, 2003) tiene dos omisiones importantes. No hubo ninguna inspección de la condición estructural de las casas alrededor de la mina por parte de la empresa antes del inicio de construcción y operaciones de la mina. El registro de rajaduras existentes inmediatamente antes de la construcción y el inicio de operaciones de una mina, y de rajaduras nuevas después de estas actividades, es esencial para identificar rajaduras relacionadas con la construcción y operación minera. Además, ningunos inclinómetros, hitos precisos de la inspección, o los niveles de agua subterránea del fondo fueron establecidos para monitorear el hundimiento de la tierra. Tal monitoreo se requiere en muchos países para proporcionar evidencia sobre los impactos de las actividades de la explotación minera. (Konya y Walter, 1991, Pág. 283; Colorado Division of Minerals and Geology, 1980, sección 4.08.2). En segundo

lugar, MEG hizo por lo menos dos declaraciones engañosas con respecto al daño estructural. Habitantes del área dieron al equipo de ingeniería un informe de una página lo cual se atribuyó a MEG (ver Anexo B), que concluía que el hinchamiento de la arcilla era la causa de los daños estructurales. Este informe no identifica ninguna fuente, y se basa en generalidades impropias, como se discutirá más en la sección de este informe sobre los suelos. Además, MEG escribió una carta de notificación con fecha del 26 de julio del 2006 al Señor Valentín Melecio Juárez (incluida en el Anexo B) que explicaba sus prácticas de voladura, y que éstas no podrían causar daño a las casas aledañas porque se diseñan las prácticas para minimizar las vibraciones y las casas están arriba de la mina. De hecho, las vibraciones ocasionadas por la voladura son más probables de persistir en direcciones hacia arriba y que se concentran en colinas tales como en las que se encuentran las aldeas alrededor de la mina. La respuesta del Señor Miller a estas temas fue enviar al equipo un registro de un año, del monitoreo reciente de vibraciones de voladura (ver Anexo B). No respondió a la pregunta si está de MEG el documento sobre las arcillas hinchantos. El registro de voladura es incompleto, mientras que el equipo de ingeniería vio voladuras los cuales no se encuentran en el registro, y el registro solamente trata de un corto período mucho después de las quejas de daños comenzaron.

Se llevaron a cabo varios intentos para incluir a las entidades gubernamentales de Guatemala. Una agencia respondió: la Doctora Eugenia Castro, del Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales (MARN), se reunió con el equipo el 2 de mayo de 2008 para una presentación sobre el objetivo del estudio. Posteriormente el MARN informó que no tenía responsabilidad en cuanto a regular el daño estructural a las casas. En noviembre del 2008, el equipo intentó reunirse otra vez con el MARN, con el Ministerio de Energía y Minas (MEM) y la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED). Personal de CONRED declaró que no estaban disponibles para una reunión. No hubo respuesta del MARN y la carta al MEM fue devuelta regresada. Se realizarán más intentos para contactar estas entidades.

Documentación de los contactos con MEG y las entidades gubernamentales se incluyen en el Anexo B.

## **MÉTODOS**

Las rajaduras en las casas pueden ocurrir a causa de movimientos de la tierra, presión del aire extrema por la voladura, y prácticas de construcción. El daño ocasionado por la presión extrema del aire de la voladura en minería es raro, ya que la casa debe estar muy cerca la voladura. Este estudio consiste en descubrir los posibles orígenes de cualquier movimiento de la tierra y evaluar los defectos en la construcción de las casas, si existen. Las posibles causas de movimiento de la tierra incluyen derrumbes, hundimiento, hinchamiento de

suelos arcillosos; y vibraciones de la tierra por actividad sísmica, tráfico vehicular y voladuras. La construcción defectuosa es resultado de una preparación inadecuada de la base, materiales defectuosos, y una mala mano de obra.

El estudio se realizó en cuatro etapas: (1) inventario y monitoreo de casas dañadas, (2) revisión de literatura, (3) observación de campo de las posibles causas del daño estructural y comparación con las aldeas de control, y (4) análisis de la información recolectada.

El inventario y el monitoreo de los daños estructurales anormales se inició en junio del 2007 (Valiente, 2007), y continúa con la revisión periódica documentando cualquier cambio visto. Más casas rajadas se agregan continuamente a la lista cada vez que el equipo se entera por medio de los habitantes. Se informó al equipo que algunos habitantes no informan de los daños por preocupaciones debido a conflictos con MEG. El monitoreo de desplazamiento y rajaduras en un subgrupo de casas comenzó en mayo del 2008, y continúa periódicamente. El monitoreo del desplazamiento de las rajaduras determina si el daño es continuo. La documentación del daño incluye: sitio de la casa; sitio de las rajaduras dentro la casa así como el largo y ancho de rajaduras; tipo de construcción de la casa; fecha de construcción de la casa, y para un subgrupo de rajaduras, el desplazamiento. Solamente se documentan rajaduras que se extienden a través de una pared o el suelo. Rajaduras superficiales en el repello de las casas no son documentadas. La información recolectada también incluye los relatos de los propietarios de las casas sobre el daño.

Se ha entrevistado a los propietarios de las casas rajadas para documentar la historia sobre el daño estructural anormal y sus opiniones sobre las causas del daño. Además, se les solicitó a los habitantes del área que mencionaran la diferencia entre el daño reciente y cualquier daño previo a causa de la actividad sísmica. Relatos típicos se presentan en el Anexo E.

La literatura revisada incluye varios documentos de MEG (2003, 2006, y Ligorria 2008), e informes acerca de la geología local, suelos, e historia sísmica. Ver la lista de referencias.

El equipo de ingenieros realizó tres expediciones de campo para recoger datos geotécnicos y estructurales. El primer viaje ocurrió del 1 al 5 de mayo del 2008, el segundo del 8 al 15 de noviembre del 2008, y el tercero del 18 al 23 de marzo del 2009. La primera visita le dio al equipo la oportunidad de ver la escala y alcance del daño estructural, y proveyó información para planear el segundo viaje, que consistió en una recopilación de datos más amplia. Este primer viaje descartó la posibilidad de que los movimientos masivos de tierra como eran la causa del daño, porque no se observó evidencia de movimientos masivos recientes del suelo, fracturas, hundimiento, o derrumbes en el área. Catorce

casas dañadas entre cuatro aldeas fueron observadas y el inventario del daño estructural se puso al día.

En el segundo y tercer viaje, el equipo de ingeniería visitó nuevamente algunas casas en las aldeas cercanas a la mina, y observó casas en las aldeas de control, Escupija y Chininguitz. Recolecto datos sobre suelos, la compactación de la sub-base, el desplazamiento y la caracterización estructural de las rajaduras, y realizó el monitoreo de vibraciones del suelo provocado por el tráfico de vehículos pesados y un evento de voladura en la mina.

Las casas en las aldeas de control, Escupija y Chininguitz, proporcionan una forma de comparación con la que se puede comparar las casas dañadas en las aldeas cercanas a la mina Marlin. Las aldeas de control están fuera de la zona de impacto de la mina, porque se encuentran a más de cinco kilómetros de distancia y en el lado opuesto del valle del río Tzalá. La distancia y la profundidad del valle interpuesto, las aíslan contra vibraciones de voladura. En cuanto al tráfico de vehículos pesados, las aldeas no se encuentran en una ruta común de acceso a la mina. La geología y los suelos (Simons et al, 1959) de las aldeas son similares a las aldeas cercanas a la mina, y las casas también son similares. Los sitios de construcción de las casas están generalmente ubicados en puntos arriba de una montaña, o al lado de un lugar de corte y relleno; los materiales de construcción son usualmente block y adobe, y los techos son de armazones y puntales de madera, cubiertos con láminas de metal corrugado, tejas de barro, o a veces paja.

La recolección de datos fue planificada para determinar las posibles causas del movimiento de suelo subyacente a las casas rajadas, incluyendo desplazamiento por suelos hinchados, desplazamiento del suelo durante la época de lluvia, desplazamiento a causa de compactación inadecuada de la sub-base, y desplazamiento a causa de vibraciones de la tierra. Se tomaron muestras de suelo y fueron analizadas por un laboratorio acreditado. Las ubicaciones y el desplazamiento de las rajaduras fueron interpretadas por la literatura geotécnica forense, y el conocimiento y experiencia del equipo de ingeniería. (Ver lista de referencias y resúmenes biográficos de los ingenieros en el Anexo A.) El análisis cualitativo de la compactación de suelo fue realizado con una prueba de campo estándar. La recolección de datos de vibraciones de la tierra incluye registros de la actividad sísmica local, monitoreo de vibraciones provocadas por vehículos y un evento de voladura en la mina con un sismógrafo certificado, y un informe realizado por Ligorría en el 2008.

MEG no realizó una inspección del estado de las casas del área antes de la construcción y operación de la mina Marlin, tampoco se instalaron instrumentos para medir los movimientos de la tierra o las vibraciones causadas por la voladura minera y el aumento del tráfico vehicular. Este tipo de inspección y monitoreo generalmente se exige por ley en otros países. (Konya and Walter, 1991, p. 283; Colorado Division of Minerals and Geology, 1980, section 4.08.2.)

Por no contar con este tipo de información previa el equipo de ingenieros tuvo que basarse en las narraciones de testigos y la recopilación de datos post-evento para determinar las causas más probables del daño estructural. Los datos recolectados fueron analizados con prácticas de ingeniería normal, y fueron comparados con varios criterios de fallo y normas reguladoras de otros países.

Las imágenes de satélite provistas en este informe fueron compiladas por Google Earth y Digital Globe. GISCorps recortó la imagen y lo convirtió a una forma compatible con Google Earth. La imagen de la mina y su cercanías es por satélite el 9 agosto 2007 y la precisión es de aproximadamente 25 metros (Harris, 2009).

## **AMBIENTE SOCIAL**

Antes de la construcción y la operación de la mina Marlin, San Miguel Ixtahuacán era un municipio tranquilo y relativamente aislado porque la mayoría de la gente eran pequeños agricultores tradicionales. La población Mam y Sipakapense estaban acostumbradas a decidir sobre situaciones que afectan a sus comunidades a través de la discusión y consulta con todos los miembros. Este proceso de consenso se dirigió por los ancianos en base a sus experiencias y conocimiento.

MEG adquirió el permiso minero en la zona del gobierno nacional sin consultar a las comunidades locales. MEG no incluyó a las comunidades locales en el proceso de decisión sobre la explotación de la mina y la gente no tuvo la oportunidad para llegar a un consenso sobre la mina, las condiciones y proceso de la explotación y las operaciones de la mina. Esta exigencia de participar en el proceso de toma de decisiones no es irrazonable o única. En los países industrializados, las empresas mineras y los organismos gubernamentales están obligados a consultar con las comunidades locales, y estas comunidades tienen la autoridad en algunas decisiones. Mucha gente en San Miguel Ixtahuacán continúa enojada por la falta de consultas durante la explotación inicial de la mina así como en la actualidad. Las manifestaciones en contra de la mina son comunes. A menudo los habitantes cuentan con información incorrecta o no cuentan con información. Existen conflictos entre los trabajadores de la mina y los demás habitantes, entre y dentro de las comunidades e incluso dentro de las familias. Los líderes de aldeas e iglesias están en desacuerdo. Un ambiente de desconfianza ha provocado el deterioro del proceso tradicional de consulta con respecto a todos los problemas de la comunidad.

Desde la llegada de MEG, aproximadamente 600 familias han sido desalojadas de sus hogares. Las tierras de las familias que quedan se han devaluado por la amenaza de nuevos desplazamientos, diversas amenazas ambientales, y el daño estructural observado en esta investigación.

A pesar de que algunos de los habitantes reclaman sus derecho a la tierra, a un papel en la toma de decisiones, y a un medio ambiente sano, nadie les ha escuchado; ni los gobierno nacional y local, ni la empresa minera, aunque las personas son los legítimos propietarios de la tierra y tienen derecho a un lugar seguro para vivir y darle sustento a sus familias.

La situación actual está empeorando. Las manifestaciones en contra de la mina se hacen más grandes y frecuentes. Los conflictos entre los trabajadores de la mina y otros habitantes están en aumento. Hay personas que están saliendo de la zona en un número cada vez mayor, algunas dicen que ya no pueden vivir en esta situación de conflicto. El equipo de ingenieros también sufrió de este malestar. Un miembro del equipo fue atacado y herido por los trabajadores de la mina durante el viaje de noviembre del 2008. Una denuncia se presentó ante las autoridades locales.

El desarrollo económico todavía no ha llegado a las familias del municipio. La gran mayoría de los beneficios son exportados fuera del país en vez de ser invertidos a nivel local. En general, el nivel de vida de la gente es el mismo o peor que antes.

## **MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN LOCAL**

El área de la mina Marlin es montañosa, y las casas se construyen en las cumbres, laderas, y en los valles. En los sitios en la ladera, la mitad del sitio es recortado por una excavadora y el material extraído se rellena en la parte exterior para crear una superficie plana de construcción. La parte rellena se compacta con la excavadora pasándola de un punto al otro varias veces. Este método de construcción se llama "corte y relleno". Los sitios en las cumbres y en los valles no requieren el corte y relleno tanto como en las laderas, pero usualmente requieren de alguna nivelación.

Debido a que la mayoría de las casas se encuentran en las pendientes, generalmente el drenaje no es un problema. Además, la mayoría de las casas tienen las zanjas para dirigir el agua fuera de la casa. En algunos casos, la tierra húmeda se observó cerca de una casa, pero usualmente no fue más que pequeñas manchas de humedad de la superficie.

Todas las casas observadas son de sólo un piso.

Adobe y block son los dos tipos básicos de construcción de las paredes. Una descripción más detallada se presenta en Anexo C. El yeso cubre la mayoría de las paredes de ambos tipos; su espesor es de 0,5 a 1,5 centímetros. En ocasiones el equipo de ingenieros observó las paredes hecho de tablas de madera clavadas a postes verticales. La madera tiene alta resistencia a la

tracción, y no es dañada por las fuerzas estructurales que aparecen en las aldeas cercanas a la mina Marlin.

Las casas tienen bases de zanjas. De las casas de block, las zanjas están llenas de grandes piedras colocadas en concreto. De adobe, las zanjas se llenan de adobe. Los propietarios de las casas dijeron que las bases tienen una profundidad de aproximadamente medio metro.

Todas las casas de block y muchas de adobe tienen pisos de losas de concreto reforzado y una terraza fuera de la puerta. En general, las losas son de 10 a 20 centímetros de espesor, mientras otras son más gruesas. Algunas de las casas de adobe tienen pisos de suelo compactado.

La mayoría de los techos están sostenidos por vigas de madera colocadas sobre las paredes y atadas con puntales. Las vigas de madera son de 5 por 15 centímetros en la sección transversal. Usualmente, pero no siempre, se coloca una placa superior de madera sobre las paredes de adobe como una superficie sostenida por las vigas. La mayoría de los techos tienen los gabletes, en dos o cuatro lados. La mayoría tienen una inclinación de 1 vertical por 20 – 50 horizontal. Algunos techos son hechos de palos de madera. El material para techos es de metal corrugado, de tejas de barro, o, de vez en cuando, de paja. El material se coloca en capas de tal manera que no penetra el agua en la casa. Paneles de aluminio se colocan donde el material no se puede colocar en capas.

No hay un peso significativo sobre el techo de estas casas. No hay problemas de encharcamiento de agua debido a las pendientes del techo y el material de los techos. No nieva en el área. Podría ocurrir carga pesada del viento por huracanes. La carga sísmica es más propensa a dañar las paredes que los techos, porque el material de los techos tiene una alta resistencia a la tracción.

La mayoría de las paredes de las casas son de 2 a 2,5 metros en altura. Las aberturas de las puertas son típicamente de 1,8 a 2 metros de altura. Las ventanas son típicamente de 0,75 a 1 metro cuadrado. La parte superior de las ventanas es usualmente un poco inferior a la parte superior de las puertas. Generalmente ambos tipos de aberturas se encuentran en el tercio medio de la longitud de la pared.

En las casas de adobe, las ventanas y las puertas típicamente tienen una placa de madera para apoyar el adobe por encima de la apertura, y también una placa de asiento debajo de la apertura de una ventana. Estas placas superior e inferior se extienden lateralmente en ambos lados en las paredes de adobe. Las placas de apoyo o de asiento no son necesarias en las casas de blocks de concreto.

De vez en cuando, se construyen nuevos anexos al lado de una casa más vieja. No se adoptan medidas especiales para unirse el nuevo anexo con la casa vieja.

Las casas de adobe y block son particularmente vulnerables a las vibraciones porque estos materiales de construcción tienen relativamente poca resistencia a la tracción en comparación con otros materiales de construcción como la madera y el concreto reforzado. Sin embargo, la construcción tradicional ha sido suficiente hasta la llegada de la mina cercana. La Figura 22 en el Anexo C es de una casa de adobe de 60 años en la municipalidad de Sipacapa que muestra el impacto de tiempo y del clima, pero no daños de rajaduras.

Los métodos de construcción y materiales locales concuerdan con el código de construcción de Guatemala (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica - AGIES, 2001).

## **DAÑO ESTRUCTURAL**

### Inventario del Daño

El equipo de ingenieros observó las casas por daño estructural, principalmente por las rajaduras que extienden a través de las paredes y suelos; y en particular las que presentan desplazamiento. Las rajaduras que son obviamente superficiales y de contracción en el repello, la mezcla, y los adobes, que son típicas en esos materiales de construcción no fueron registradas. Además, las rajaduras unión de construcción no fueron registradas. Se registró una rajadura como impactante en la estructura si (1) se extiende a través de la pared y se puede observar por ambos lados de la pared, y/o (2) si se encuentra en el repello y es bastante ancha para ver la pared detrás para confirmar visualmente que existe la rajadura dentro de la pared.

El equipo observó el sitio de excavación de la casa, nivelación, drenaje, suelos de base y compactación, y materiales de construcción. Se consultó a los propietarios la fecha de construcción y la fecha aproximadamente de cuando apareció por primera vez el daño estructural. Un subgrupo de las rajaduras estructurales típicas fue marcado y fotografiado, y se midió el ancho inicial de cada rajadura seleccionada. Además, se instalaron calibradores de rajaduras sobre algunas de las mismas. El monitoreo de las casas se realizó periódicamente para re examinar y registrar cambios en los anchos de las rajaduras, el desplazamiento y cualquier daño nuevo.

El inventario sobre el daño estructural incluye la siguiente documentación:

- Ubicación geográfica de la casa dañada,
- Numeración de las rajaduras como registro,

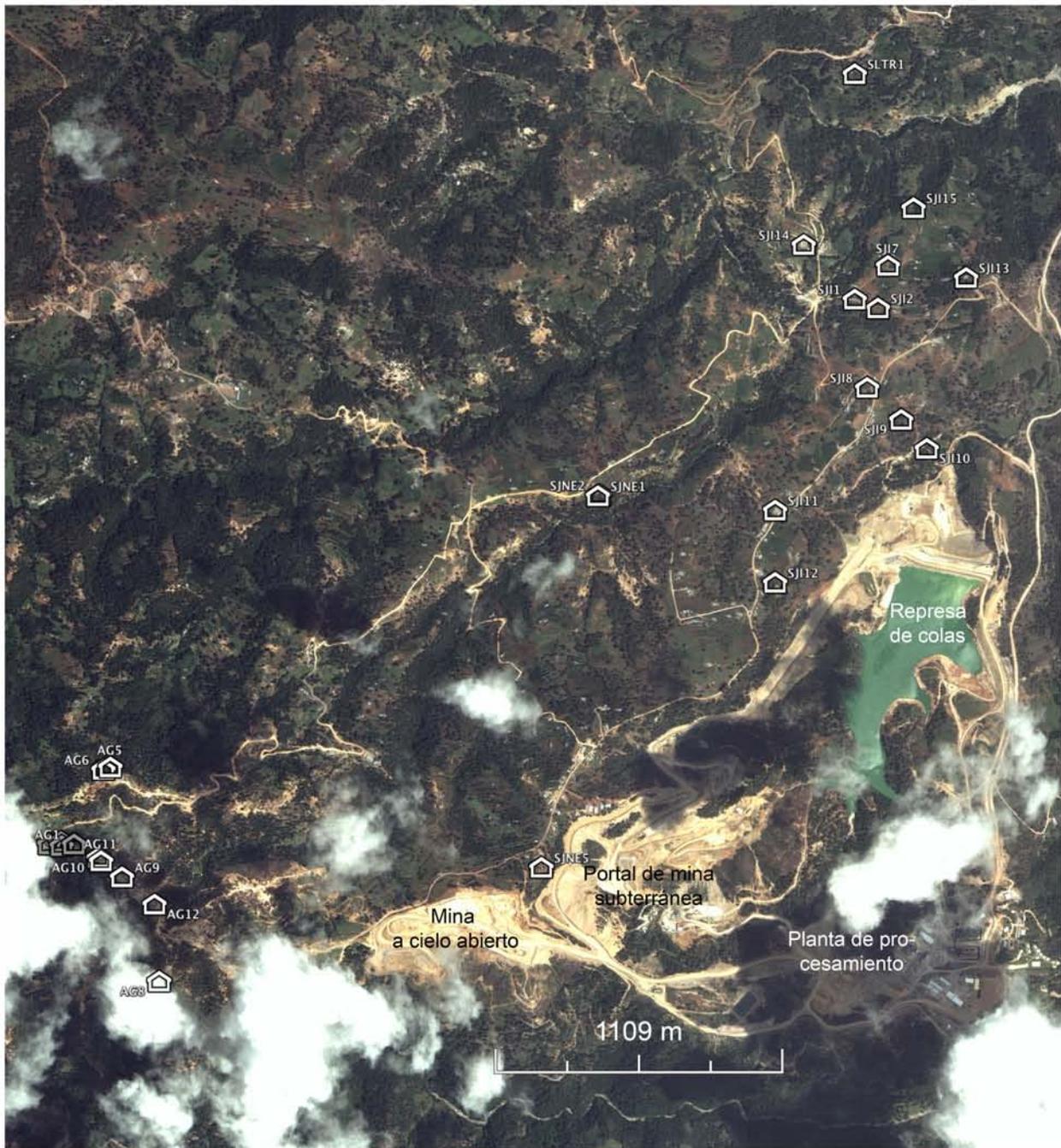
- Registro de ubicaciones de las rajaduras y medidas de ancho y largo inicial de rajaduras seleccionadas,
- Fotografías,
- Método y fecha de construcción de la casa,
- Adecuación del drenaje alrededor de la casa,
- Distancia al camino y casa mas cercanos,
- Plano de la casa que muestra los lugares de las rajaduras y ubicación de lugares donde se tomaron muestras del suelo

El Anexo D resume los datos del inventario colectados en este estudio. Los mapas de las ubicaciones de las casas dañadas se dan a conocer en la Figura 3. Documentación preliminar del daño estructural se informó por COPAE (2007) y Valiente de León (2007).

El equipo de ingenieros hizo una evaluación subjetiva de los daños, que se presenta en negritas inmediatamente abajo del nombre del propietario de la casa. La evaluación de daños se indica por un grado de 0 a 10; 0 indica que no hay daño, y 10 indica que hay fallo estructural. Los grados de daño fueron asignados así:

- 0 fue reservado para casas sin rajaduras.
- 1 - 3 fueron asignados a las casas con rajaduras con desplazamiento mínimo; el grado es asignado en la base de número de rajaduras.
- 4 - 6 fueron asignados a las casas con por lo menos una rajadura que presenta desplazamiento obvio pero no se puede observar la luz a través de las rajaduras. Estas casas son inseguras.
- 7 - 9 fueron asignados a las casas en que se puede observar la luz a través de por lo menos una rajadura, y/o hay desplazamiento del techo, las paredes, y/o el cimiento. Estas casas son inseguras
- 10 indica una casa desplomada.

Se observaron 33 casas dañadas en las aldeas alrededor de la mina Marlin. Generalmente, el daño variaba en severidad entre las casas con una o más rajaduras pero sin desplazamiento, a las casas con rajaduras desplazadas bastante que se puede observar la luz a través de una o más de las rajaduras. Una casa en la aldea de El Salitre es gravemente dañada. El Cuadro 1 resume los daños por aldea, y presenta la distancia de la aldea a la mina y la variación de distancias de las casas dañadas al camino más cercano. Las últimas dos columnas suman el número de casas dañadas por grado. No todas las casas fueron evaluadas por daño, y el número que no se evaluó se suma en la última fila por cada aldea.



**Figura 3. Mapa de Casas Dañadas en Las Aldeas de Agel, El Salitre, San José Ixcaniche, y San José Nueva Esperanza. © Google Earth and Digital Globe.**

**Cuadro 1 Daño Observado en Casas por Aldea**

Aldea	Número de Casas Rajadas	Distancia Aproximada a la Mina Marlin (km)	Distancia de Casas al Camino Más Cercano (m)	Daño de Rajaduras	
				Grado de Daño	Número de Casas
Agel	12	1	1-300	1	1
				3	3
				5	2
				7	1
				Sin eval.	5
El Salitre	1	4	25	10	1
San José Ixcaniche	15	2.5	5-130	1	1
				2	1
				4	1
				5	2
				6	2
				Sin eval.	8
San José Nueva Esperanza	5	1	3-120	4	1
				Sin eval.	4
<b>Total</b>	<b>33</b>	<b>1-4</b>	<b>1-300</b>	<b>1-10</b>	

Sin eval. = Daño no evaluado.

De las casas evaluadas por daño, aproximadamente la mitad tienen daños graves (un grado de 5 o más) lo cual hace a las casas inseguras. El daño observado en estas aldeas contrasta mucho con el poco daño que se presenta en la aldea de control, Escupija, como se discute abajo.

De vez en cuando, uno o dos armazones en el techo de una casa de adobe se observaron girados afuera de la vertical en sus puntos de soporte. Esta rotación pareció ser dentro de la tolerancia de construcción, y no ha ocurrido por resultado de peso inusitado después de terminar la construcción. Todas estas casas parecieron ser construidas como tal, porque la mezcla de adobe revistió la viga por ambos lados en vez de ser aplastadas.

Testimonios comunes de habitantes locales sobre las casas dañadas se presentan en el Anexo E. Generalmente, los habitantes informan que las rajaduras coinciden con la construcción y operación de la mina; específicamente, ellos culpan a la voladura y al aumento de tráfico de camiones pesados a través de sus aldeas. Además, mencionan el punto importante que las rajaduras no ocurrieron antes de la existencia de la mina, aun y cuando las aldeas se encuentran ubicadas en un área de actividad sísmica. Los habitantes informan

que un representante del MEM, Julio Ávila, examinó las casas dañadas. Quizás el informe sin identificación, descrito en la Introducción e incluido en el Anexo B, es el informe de Ávila. El MEM no ha respondido a las peticiones de información ni de una reunión con el equipo de ingeniería.

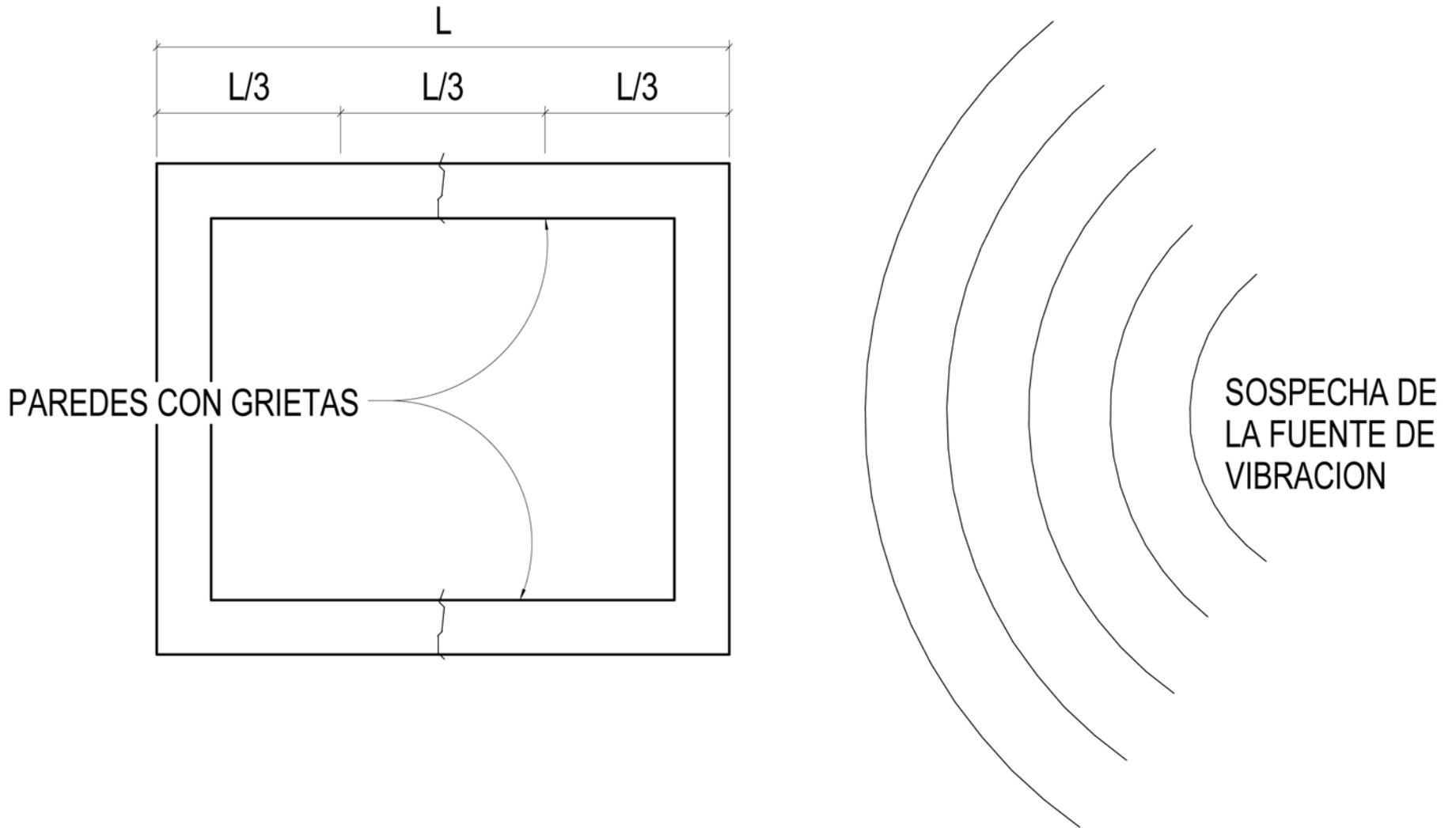
### Análisis de Rajaduras

Un patrón particular de rajaduras es evidente en las paredes de las casas dañadas, y este patrón es una clave para sus causas. Las rajaduras son más o menos verticales, y usualmente están situadas en el tercio parte en medio de la longitud de la pared. Además, las paredes con rajaduras más frecuentes son aquellas cuyos extremos apuntan hacia el camino adyacente y/o la mina. La Figura 4 ilustra esta orientación. Este patrón lleva a la sospecha de que la fuente de daño son las vibraciones del tráfico de vehículos pesados y/o voladuras en la mina. Esta sospecha se ve reforzada en las siguientes secciones de este informe, que elimina otras fuentes del daño estructural.

Las paredes son de lo más rígidas en su dimensión de largo, en el plano de la pared, y tienen alguna flexibilidad en su dimensión más corta, afuera del plano de la pared. La dimensión de largo de las paredes de las casas dañadas en general se encuentra en línea con la fuente de las vibraciones. Esta dimensión es la más rígida de la pared. La rigidez de la pared resiste las vibraciones más allá de la fuerza del material de construcción (la lechada entre los bloques o el adobe), por lo tanto se raja el material. Las paredes perpendiculares a la fuente de las vibraciones no suelen ser dañadas, o tienen menos rajaduras que las paredes en línea, porque el lado de las paredes con más flexibilidad se enfrenta a la fuente de las vibraciones. Estas paredes flexionan en reacción a las vibraciones, se quedan dentro de la zona de fallo del material de construcción, y no muestran las rajaduras. Sin embargo, el equipo de ingeniería de vez en cuando observó las paredes que fallaron a causa de la flexión excesiva; Ver Tipo de Rajadura 4 en la siguiente subsección.

En las paredes observadas, en el tercio medio de las paredes está la ubicación más frecuente de las rajaduras, especialmente si existe una ventana o una puerta cercana. Una pared es de lo más débil donde hay aperturas, y las paredes son de lo más débil en su tercio medio, porque las paredes adyacentes dan apoyo a los extremos. La ubicación de rajaduras también puede estar relacionada a una línea de corte-y-relleno bajo de la losa o el cimiento de la casa. Cuando existen vibraciones, la parte de relleno puede asentarse más que la parte de corte, porque las dos partes no pueden ser compactadas a la misma densidad. Incluso con el uso de modernas máquinas compactadoras, es poco probable que las dos partes se asienten en el mismo grado cuando ocurre presión sobre las mismas.

Algunas casas están muy lejos del camino y presentan daños. Es más probable que no son dañadas por el tráfico en el camino. En general, los peores daños



**Figura 4 Situación de Rajaduras con Relación a Fuente de Vibración**

en estas casas se encuentran en las paredes perpendiculares a la voladura en la mina.

En general, las rajaduras causadas por las vibraciones no continúan abriéndose o cambian a pesar de que la fuente de vibraciones todavía existe. Luego que las rajaduras ocurren, mientras las fuente de vibración permanezca consistente en fuerza y localización, movimientos adicionales de las rajaduras o formación de rajaduras nuevas no ocurrirán.

### Tipos de Rajaduras

Las rajaduras más comunes encontradas en las casas dañadas se presentan de diferentes formas que indican su origen, tal y como se describe abajo y se exhibe en la Figura 5. (Day, 1998; Dowding, 1985, pág.134; Friedman, 2008.)

Tipo 1: Una rajadura más o menos vertical en la pared que comienza (del extremo más ancho) en la parte de alta de una pared, entre las vigas del techo, o en la base de una pared; y en el caso de las paredes de block, se extiende arriba y al lado a través de la mezcla. No hay rajadura contigua en la losa del piso.

Este tipo de rajadura generalmente no se origina del movimiento diferencial de la losa del piso, o habría una rajadura en la losa, y no se origina por presión excesiva de asiento de las vigas del techo. Este tipo de rajadura probablemente se origina por las vibraciones de la tierra, particularmente cuando se ocurre cerca del centro de la pared.

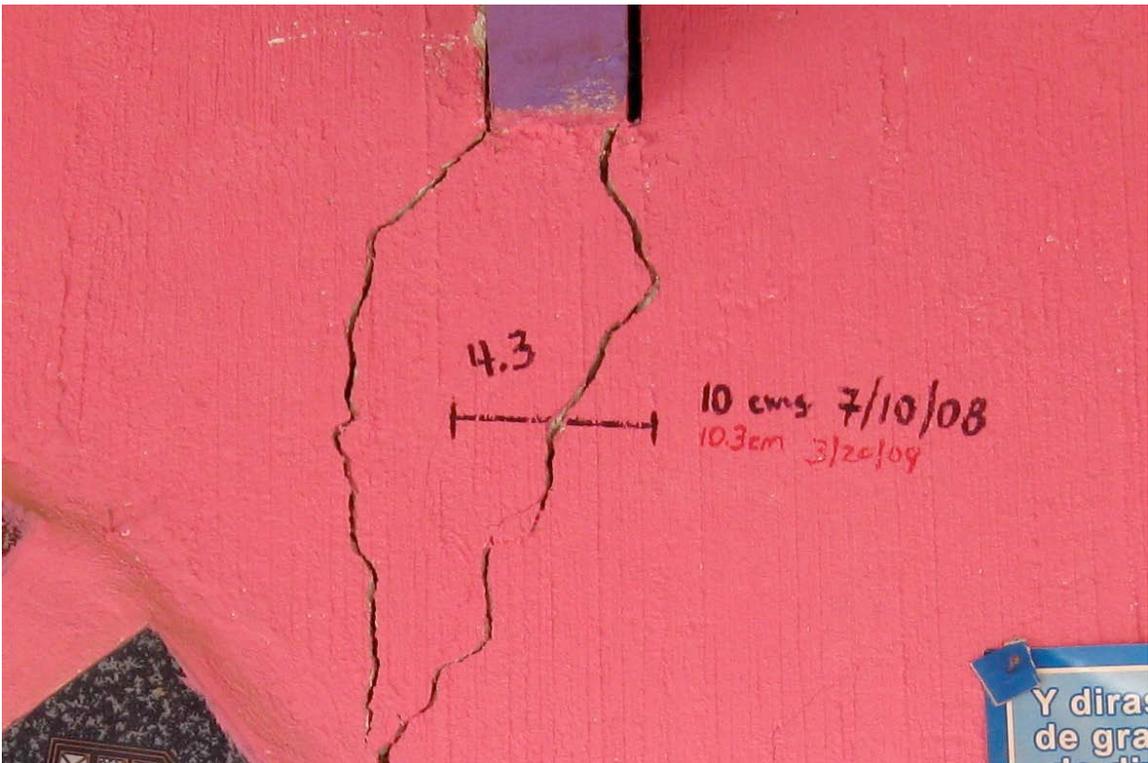
Tipo 2: La rajadura empieza (del extremo más ancho) de una puerta o una ventana, generalmente desde una de las esquinas, y se extiende arriba y hacia un lado a través de la mezcla entre los blocks o en varias orientaciones a través del adobe.

Las concentraciones de tensión ocurren en las esquinas de las puertas y las ventanas. Las vibraciones de la tierra pueden aumentar la magnitud de estas concentraciones de tensión y causan las rajaduras. Es probable que este tipo de rajaduras sea causado por las vibraciones de la tierra si yace entre los puntos de carga de las vigas del techo.

Tipo 3: Una rajadura compuesta, que incluye una rajadura en la losa del piso y una rajadura en la pared que se origina (del extremo más ancho) en la intersección de la rajadura del piso con la pared y se extiende hacia arriba en la pared, generalmente en una orientación diagonal. En este caso, el piso se ha desplazado horizontalmente, en vez de asentarse hacia abajo, y la causa más probable son vibraciones de la tierra.



**Figura 5a Tipo 1 Rajaduras en Pared (3 Cubiertos con Yeso), No Rajaduras en Losa**



**Figura 5b Tipo 2 Rajadura de Ventana o Puerta hasta Viga de Techo**

**Figura 5 Tipos de Rajaduras**



**Figura 5c Tipo 3 Rajadura en Pared y Losa**



**Figura 5d Tipo 4 Rajadura Horizontal**

**Figura 5 Tipos de Rajaduras**



**Figura 5e Tipo 5 Rajadura en Pared Debajo de Viga de Techo**

Otras rajaduras del piso con desplazamiento significativo que se extienden en las paredes adyacentes, son causadas generalmente por el asiento diferencial de la sub-base, que es el resultado de uno o más de las siguientes explicaciones: mala compactación de base, hinchamiento de arcillas, los movimientos de la tierra, licuación, humedad excesiva del suelo, o vibraciones en la tierra. En estos casos, la rajadura de la pared es más ancha en la parte superior que en la parte inferior.

Tipo 4: Una rajadura horizontal que se encuentra generalmente en el medio de la pared de adobe o en la mezcla entre los blocks.

Este tipo de rajadura es causado por la flexión excesiva de la pared como resultado de las vibraciones.

Tipo 5: En las casas de adobe solamente, la rajadura comienza (del extremo más ancho) en la parte superior de la pared abajo de una viga del techo y se extiende hacia abajo.

Este tipo de rajadura puede ocurrir si existe una superficie de soporte inadecuada para las vigas del techo sobre las paredes que les soportan, o si las vibraciones de la tierra aumentan la tensión sobre el material debajo de la viga, más allá que la fuerza del material. En las casas observadas por el equipo de ingenieros, las vigas del techo generalmente tienen una superficie de soporte adecuada, al igual que las casas en las aldeas de control. Por lo tanto, estas rajaduras son probablemente debido a las vibraciones de la tierra y no por las superficies inadecuadas para las vigas del techo.

Las rajaduras de tipos 1, 2, 4 y 5 son causadas probablemente por las vibraciones de la tierra, y las vibraciones de la tierra son una de varias posibles causas de las rajaduras de tipo 3.

La ausencia de ciertos tipos de rajaduras apoya el análisis razonado sobre las posibles causas de las rajaduras existentes. Las rajaduras observadas raramente o no vistas en las casas dañadas incluyen las siguientes formas:

- Las rajaduras típicamente relacionadas con las prácticas de la construcción incluyen las rajaduras de expansión-contracción por cambios de temperatura, rajaduras de contracción por curado del concreto o adobe, fallas por la carga en las ventanas y puertas, y rajaduras donde se juntan las paredes.

Las rajaduras de expansión y contracción son comunes en concreto o adobe; sin embargo, son generalmente superficiales y no resultan en problemas estructurales. En el adobe, estas rajaduras raramente se extienden más de un ladrillo o una capa de mezcla. No ocurren en blocks y rara vez en la mezcla entre blocks. Las rajaduras en los pisos de

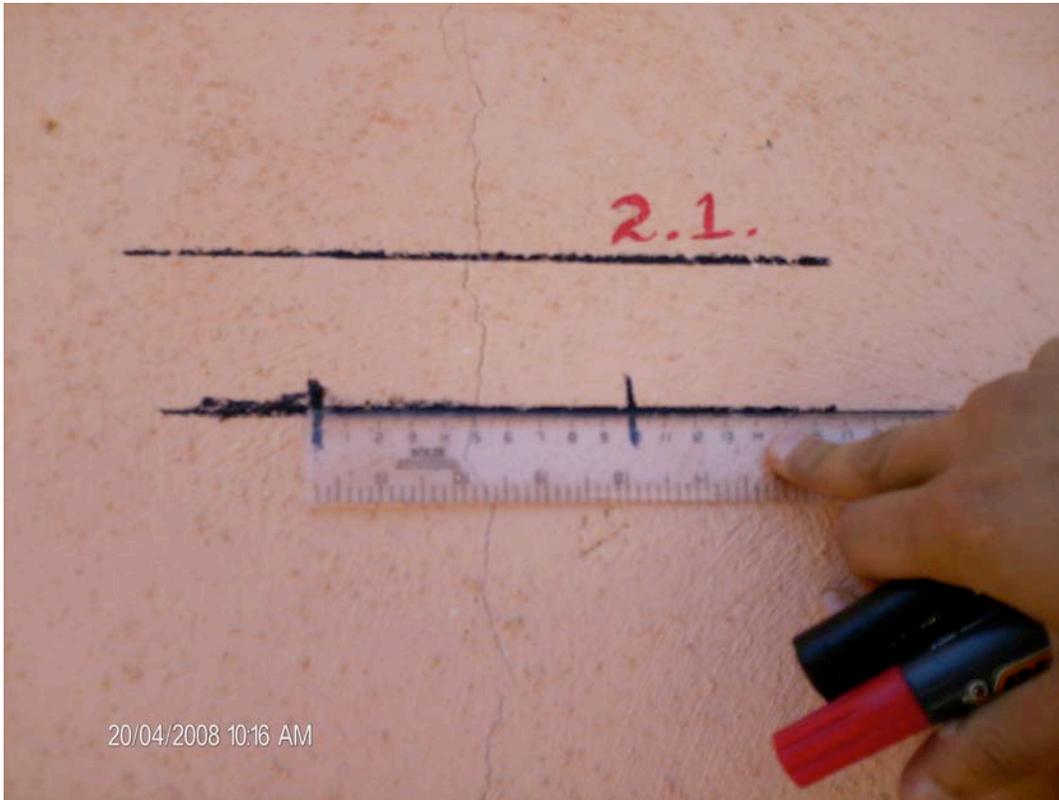
concreto con poco o ningún desplazamiento no son raras debido a la contracción en concreto durante el curado, y las fluctuaciones de temperatura diaria y anual. Aparecen apenas de manera perceptible al azar, intermitentes, múltiples y serpenteado en el concreto, formando las rajaduras discontinuas.

- Donde los suelos hinchados están presentes, generalmente la losa del piso tiene rajaduras extensas. Las paredes también tendrán las rajaduras si hay mucho hinchamiento. Las rajaduras en el piso generalmente están paralelas a las paredes, diagonal a través de las esquinas, o a través de la dimensión estrecha del piso. En casos extremos, el piso se eleva. Ver Figura 9.
- Donde las rajaduras se originan por movimiento masivo de la tierra, hay muchas fracturas en la tierra, pequeñas protuberancias, escarpe, y otras alteraciones alrededor, abajo, y mucho más allá de los cimientos de las casas.

Algunas rajaduras de construcción tales como las descritas anteriormente, fueron observadas en las aldeas alrededor de la mina Marlin y las aldeas de control. No se observó ninguna elevación de las losas de los pisos menos en un área de inestabilidad de tierra vista en Chininguitz. Con respecto a la humedad excesiva en el suelo, no se observaron manchas de agua en ninguna losa de los pisos o en las paredes, tampoco se observaron áreas de agua estancada alrededor de las casas, y los suelos de las bases de las casas tuvieron un contenido de humedad típico de otros suelos similares (4,2 a 42,3 por ciento, Ver Cuadro 3).

### Desplazamiento de Rajaduras

Los anchos y el desplazamiento de las rajaduras de un subgrupo de las rajaduras registradas en el Cuadro 1 fueron monitoreados por un período de tiempo. Este monitoreo determinó si las rajaduras eran cada vez más grandes y si hubo cambios durante el ciclo de estaciones seca y lluviosa. Generalmente la temporada de lluvias es de mayo a finales de octubre. Tres métodos se utilizaron como se muestra en la Figura 6. El primer método era simplemente tomar la medida del ancho de la rajadura con una regla en un lugar determinado. El segundo era marcar una línea perpendicular a la rajadura, hacer marcas sobre la línea, y medir la distancia entre marcas. Subgrupos diferentes del equipo de ingeniería utilizaron estos dos métodos. El tercer método consistió en pegar un calibrador para medir las rajaduras a través de la rajadura. Este último método muestra los desplazamientos transversales y laterales de la rajadura. Estos calibradores son caros, y se utiliza con menos frecuencia que los otros métodos.



**Figura 6a Medida de Ancho de Rajadura sobre Linea Superior y Medida de Ancho de Marcas sobre Linea Inferior**



**Figura 6b Calibrador de Rajadura**

**Figura 6 Métodos de Medición de Rajaduras**

Los resultados de las medidas se muestran en el Cuadro 2.

- La primera columna registra la identificación de la rajadura y las fechas de medida.
- Las próximas cuatro columnas registran el ancho de la rajadura o marca, y el cambio acumulativo de ancho desde que se toma la primera medida.
- La última columna registra las indicaciones de los calibradores de rajaduras. Estos calibradores presentan una indicación de cero cuando se instalan; las indicaciones subsiguientes muestran el cambio desde la indicación inicial de cero.

Se instaló un calibrador de rajaduras sobre la rajadura SJNE 3.1 además de los otros métodos de medida; sin embargo, fue destrozado.

Trece rajaduras fueron monitoreadas para el desplazamiento. Los desplazamientos máximos fueron pequeños, de 5 a 7 milímetros. La mayoría de las rajaduras no tuvieron cambios de ancho o cambios triviales. Estos resultados indican que en general no hay movimientos masivos de la tierra, hundimiento o hinchamiento del suelo subyacente de las casas, y no hay impactos debido a los cambios en la humedad del suelo producidos por el ciclo de las estaciones seca y lluviosa. La única excepción podría ser la rajadura AG 7.1, que se mantuvo estable desde el inicio hasta el fin de la temporada de lluvias, se redujo 7 milímetros al final de la temporada de lluvias, y luego se amplió 7 milímetros en la temporada seca. Sin embargo, podría ser un error de la indicación de 63 milímetros de 11 noviembre 2008, como todas las otras indicaciones fueron consistentes a 70 milímetros. Esta rajadura podría ser monitoreada durante las estaciones de 2009 y 2010 para decidir si el movimiento se relaciona a las causas estacionales.

**Cuadro 2. Desplazamiento de las Rajaduras**

<b>Rajadura - Fecha</b>	<b>Ancho de Rajadura (mm)</b>	<b>Cambio (mm)</b>	<b>Ancho de Marca (mm)</b>	<b>Cambio (mm)</b>	<b>Calibradora (mm)</b>
AG 1.1- 20.04.08	6		100		
07.10.08	6	0	100	0	
19.03.09	7	+1	101	+1	
AG 1.2- 20.04.08	4				b
07.10.08	4	0			0
19.03.09	4	0			T-0.1 L+0.1
AG 2.1- 02.05.08	1	b			
07.10.08	1	0			
19.03.09	1	0			
AG 2.2- 02.05.08	1	b			
07.10.08	1	0			
19.03.09	1	0			
AG 7.1- 02.05.08			70		
07.10.08			70	0	
11.11.08			63	-7	
19.03.09			70	0	
AG 7.2- 02.05.08					0
11.11.08					T-0 L-4
19.03.09					T-0 L-5
AG 8.1- 02.05.08					b
10.11.08					T+0.5 L+4
19.03.09					T+0.5 L+4
AG 10.1- 04.05.08			90	b	
10.11.08			91	+1	
19.03.09			91	+1	
SJI 2.1- 02.05.08			100		
07.10.08			100	0	

Rajadura - Fecha	Ancho de Rajadura (mm)	Cambio (mm)	Ancho de Marca (mm)	Cambio (mm)	Calibradora (mm)
20.03.09			100	0	
SJI 10.1-02.05.08			96	b	
07.10.08			97	+1	
11.11.08			97	+1	
20.03.09			97	+1	
SJI 13.1-03.05.08			88		
07.10.08			91	+3	
20.03.09			94	+6	
SJI 13.3-07.10.08			100		
20.03.09			103	+3	
SJNE 3.1-02.05.08	5				
07.10.08	8	+3	105		
20.03.09	10	+5	107	+2	

SJI = San José Ixcaniche

AG = Agel

SJNE = San José Nueva Esperanza

b = medida de base

T = medida transversal

L = medida lateral

## **COMPARACIÓN CON LAS ALDEAS DE CONTROL**

El equipo de ingenieros seleccionó dos aldeas control para comparar cualquier daño estructural con el daño en las aldeas cercanas a la mina Marlin. Las dos aldeas y sus ubicaciones son:

Escupija	15° 11.61' N
	91° 43.81' O
Chininguitz	15° 12.54' N
	91° 44.74' O

Las aldeas están ubicadas aproximadamente a 5.5 kilómetros de la mina y al otro lado del Río Tzalá, como se muestra en la Figura 2.

### Escupija

El equipo de ingenieros hizo dos viajes a Escupija para observar las casas en la aldea, el 12 de noviembre del 2008 y el 21 de marzo del 2009. Además, un



**Figura 7. Mapa de Casas Observada en Escupija. © Google Earth and Digital Globe.**

ingeniero y un técnico visitaron la aldea el 29 de enero del 2009 para observar más casas.

Un total de 52 casas fueron observadas por rajaduras y otros daños, como se presenta en el Anexo D. Las ubicaciones de las casas se dan a conocer en la Figura 7. La documentación de las casas observadas incluye fotos. Del total de 52 casas observadas, 38 no tenían rajaduras, y las otras 14 no tenían más de una o dos rajaduras. Ninguna de estas casas tenía daños por rajaduras que clasificaran más de 2 en la subsección del Inventario del Daño mencionada anteriormente. En las aldeas de Agel, San José Ixcaniche, y San José Nueva Esperanza, cercanas a la mina Marlin, todas las casas observadas tienen por lo menos una y usualmente múltiples rajaduras.

Las observaciones en Escupija indican diferencias notables entre el grado y tipo de daños en esa aldea y el grado y tipo de daños en las aldeas cercanas a la mina Marlin, como se documentan en la sección anterior.

- La diferencia no está en las prácticas de construcción ni en los materiales locales, porque estos son similares en toda la región.
- La diferencia no está en la presencia dañina del agua. Hubo más evidencia de suelos húmedos en Escupija que en las aldeas alrededor de la mina.
- La diferencia no está en la geología y tipos de suelos.
- La diferencia no parece estar basada en los años de construcción de las casas, porque en la aldea de Escupija hay poco daño sin tomar en cuenta las fechas de construcción; mientras que en las aldeas alrededor de la mina, los daños debido a las rajaduras ocurren en las casas de diferentes años de construcción, VER el Anexo D.
- La historia sísmica es la misma.

La gran y obvia nueva diferencia entre Escupija y las aldeas alrededor de la mina Marlin es la mina, que incluye el aumento de tráfico de vehículos pesados, las voladuras, y otras actividades mineras.

### Chininguitz

El equipo de ingenieros hizo dos viajes a Chininguitz, el 11 de noviembre del 2008 y el 20 de marzo del 2009. Además, un ingeniero y un técnico documentaron daños estructurales en la aldea el 17 de diciembre del 2008, Ver el Anexo D.

Hay considerable daño a las casas en Chininguitz, pero la mayoría de este daño se localiza en un valle pequeño como se muestra en la Figura 8. El daño en Chininguitz es diferente del daño observado en las aldeas alrededor de la mina Marlin. Es el resultado de movimientos masivos de la tierra. En la Figura 8, el área blanca es un escarpe de derrumbe, y el área ancha del suelo, de color más



**Figura 8. Mapa de Casas Observadas en Chinguitz. © Google Earth and Digital Globe.**

claro que se hace más grande desde la izquierda inferior hasta la derecha superior, es tierra inestable y movediza. Existen extensas fracturas en la zona que se extienden cientos de metros, incluyendo una un poco a la izquierda de la casa CH6 y otra en la esquina al derecho inferior de la imagen.

La casa en la Figura 9 demuestra el daño provocado por los derrumbes. Observe la brecha grande en la pared (los escombros han sido removidos), y la rajadura grande al lado izquierdo. Dentro de la casa hay extensas rajaduras, levantamiento, y hundimiento del piso. Este hundimiento cubre una fractura de suelo (indicado por las flechas) y la humedad se extiende unos 50 metros en una cancha de fútbol adyacente. En el pequeño valle circundante, el equipo de ingeniería observó numerosas fracturas similares. Esta fracturación es típica de los movimientos masivos de tierra. Además, el equipo observó otra evidencia extensa de movimientos masivos de tierra incluyendo una fractura de 400 metros de largo donde el fondo semicircular del valle se junta con el lado de la colina, numerosos deslizamientos de la tierra recientes, y escarpe de los lados de las colinas (Figura 9), que también son visibles en la Figura 8.

Los habitantes locales informaron al equipo de que el área fue evacuada temporalmente durante un período especialmente lluvioso en 2008 debido al riesgo de derrumbes.

Se tomó una muestra del suelo y se analizó, con resultados indicados en el Cuadro 3. La muestra indica que las arcillas hinchadas no están presentes.

Las aldeas control de Escupija y Chininguitz demuestran un buen contraste con las aldeas alrededor de la mina Marlin. Escupija muestra poco daño, y Chininguitz muestra contraste en daños causados por movimientos masivos de tierra versus los daños causados por vibraciones.

## **GEOLOGÍA**

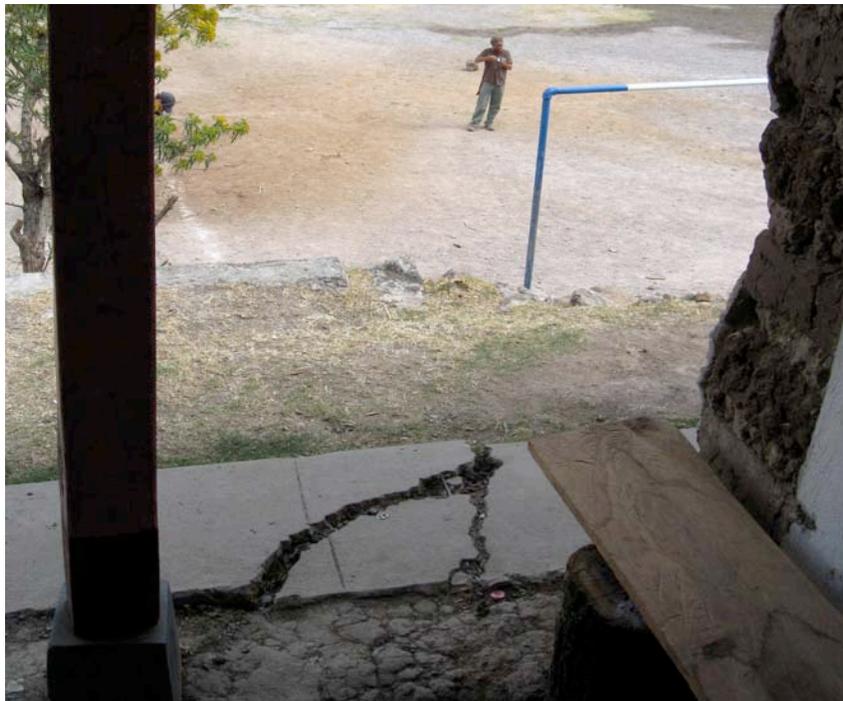
El siguiente resumen geológico (en cursiva) es tomado de MEG (2003, sec. 4.0). Por observar, el equipo de ingeniería considera que la descripción geológica de MEG es adecuada para este informe.

*El movimiento de las placas continentales ha afectado extensamente el área regional alrededor de la mina Marlin. El desplazamiento de estas placas ha desarrollado grandes fallas que corren del este al oeste, un poco al norte de la mina y una multitud de fallas de menor escala a través de la zona de la mina. La mina se encuentra dentro de la zona montañosa central de Guatemala con una cadena de montañas volcánicas en el oeste. Las montañas centrales consisten principalmente de rocas metamórficas del Paleozoico.*

*Según el registro histórico de los últimos 19 años, en la región alrededor de la*

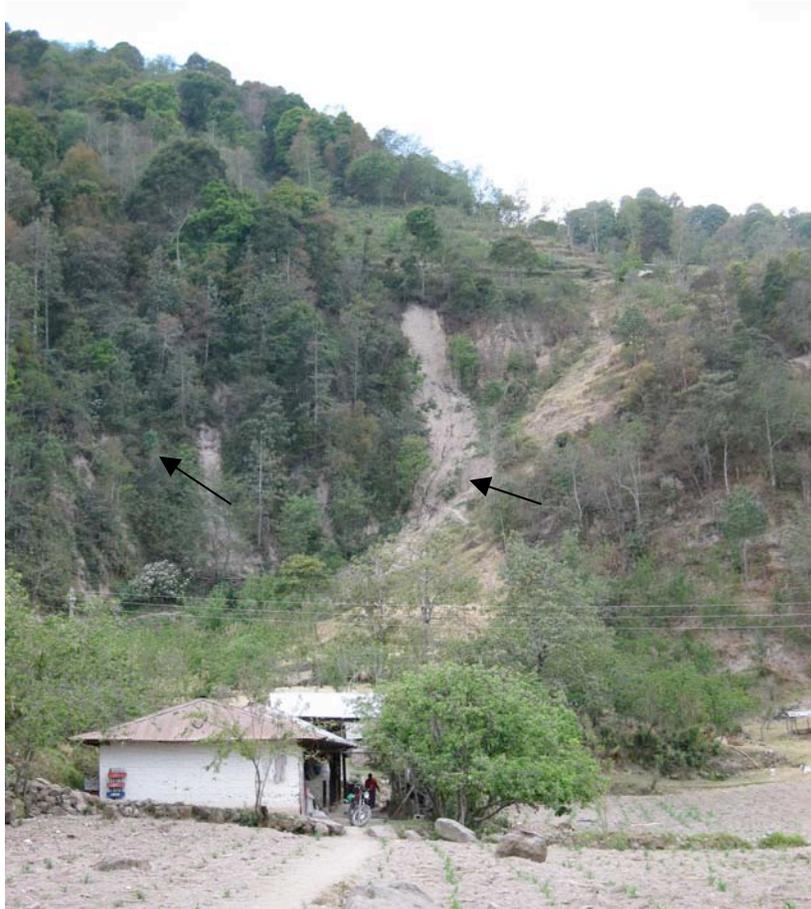


**Figura 9a Casa Dañada (vea agujero en pared, flecha a la izquierda apunta hacia rajadura de pared, flecha al derecho apunta hacia fractura que se extiende en frente)**



**Figura 9b Vista de Casa en Figura 9a (Fractura en frente es la misma mostrada en Figura 9a y extiende hasta persona. Fractura es difícil ver ya que está llena parcialmente con suelo)**

### **Figura 9 Inestabilidad de la Tierra en Chininuguitz**



**Figura 9c Escarpe (flecha a la izquierda) y Derrumbe Reciente (Flecha al deracho)**



**Figura 9d Flechas Indican Parte de una Fractura de 400 Metros**

**Figura 9 Inestabilidad de la Tierra en Chininuguitz**

*mina Marlin, sólo han habido cuatro terremotos de magnitud 5 o mayor grados en la escala Richter, con una profundidad media de 33,5 kilómetros. Estos terremotos no han ocasionado daños visibles en el área. Terremotos de 7.1 o mayor grados en la escala Richter en los últimos 35 años fueron a una distancia de mayor de 120 kilómetros. [En el 2007, después de la fecha de la EIA&S, un terremoto de magnitud 6,7 grados en la escala Richter se produjo 202 kilómetros de distancia.] Habitantes locales de edad avanzada informan de que los terremotos anteriores no han causado daños significativos.*

## **ESTABILIDAD DE LA TIERRA**

La alteración de tierra a gran escala más reciente, alrededor de la mina Marlin es por supuesto la mina misma. Sin embargo, la mina a cielo abierto aún no es bastante grande para desestabilizar y socavar la tierra de las aldeas cercanas. La mina subterránea es demasiado profunda y pequeña para desestabilizar la tierra.

La mina a cielo abierto y subterránea están bajando probablemente el nivel de aguas subterráneas. Los habitantes locales informan que algunas de sus fuentes de agua se están secando, particularmente en la aldea Agel. El agotamiento del agua por la mina y la disminución del nivel del agua subterránea que resulta, posiblemente, podrían causar alguno hundimiento de un área extensa alrededor de la mina o de las áreas localizadas en la misma. Sin embargo, el equipo de ingeniería no observó ninguna fractura de tensión, que sea evidencia de hundimiento.

La práctica estándar de ingeniería para medir el hundimiento es instalar estaciones de levantamiento exactas y monitorear los niveles de agua subterránea alrededor de la mina con un punto de control lejos de la misma. El EIA&S (MEG, 2003) no divulgó la instalación de inclinómetros, de puntos de referencia de levantamiento precisos, o de niveles de agua subterráneas del fondo antes de la explotación minera. Además, los informes anuales de monitoreo (AMRs) de MEG (2004, 2005, 2006, 2007) no publicaron los niveles de agua subterránea en los pozos de monitoreo alrededor de la mina a excepción de los que se encuentran muy cercanos al dique de colas.

MEG declara que hay un riesgo muy bajo de derrumbes debido al hecho que la superficie es en su mayoría volcánica y no hay capas de arcillo. El área ha demostrado su resistencia a los terremotos de la magnitud 7,5 en la escala Richter y hasta la humedad del suelo de 38 por ciento (2003, sección 4.4.3). Sin embargo, el equipo de ingeniería también buscó evidencia sobre las fallas naturales de las pendientes o de los derrumbamientos. En las aldeas que tienen daño estructural, no se observó evidencia alguna sobre inestabilidad reciente de la tierra, como las que se presentan a continuación:

- Zonas de cizalla y fallas, ya sea falla surficial de pendientes a lo largo de superficies de resbalamiento o zonas de fallas profundas.
- Corriente de barro de cantos gruesos, o suelo con agua y aire atrapados.
- Reptación, generalmente vista en movimiento hacia abajo y exterior, que forma en morones grandes.
- Diseños de superficies anómalos como fracturas abiertas, escarpes, protuberancias, o topografía embarullada.

La presencia de agua es a menudo una causa de la inestabilidad de la tierra. Los únicos peligros locales significativos observados, referentes al agua son fuentes naturales de agua y la temporada lluviosa anual. Los habitantes del lugar informan que las fuentes de agua no se usan como sitios de construcción porque son un origen primario de agua. Las casas observadas generalmente tenían un buen drenaje para desviar el agua superficial alrededor de las mismas, y los suelos de base tenían generalmente un drenaje libre (Ver la sección sobre Suelos). De vez en cuando, el equipo de ingenieros observó áreas húmedas alrededor de algunas casas. Estas fueron anotadas. Porque había muy pocas casas con áreas húmedas, este peligro fue descartado como causa del daño estructural extenso.

## **SUELOS**

El objetivo del muestreo y de la prueba era decidir si las propiedades del suelo pudieron haber causado el daño a las casas observado en las aldeas alrededor de la mina Marlin. El comportamiento de los suelos, en particular los suelos hinchados, ha demostrado tener un efecto directo sobre la función estructural de las casas.

### **Informes Relacionados**

Tres informes sobre los suelos locales fueron revisados para información pertinente al daño a las casas, como sigue:

Dos informes, (Ministerio de Agricultura, pág. 203-231 y MEG, sec. 5.6.11.2 y 5.6.11. 2003), clasifican y describen los suelos desde una perspectiva de la agricultura y la reclamación. Sus descripciones de los suelos generalmente coinciden con los suelos muestreados por el equipo de ingenieros. Los informes no mencionan la presencia de los suelos hinchados u otras características de los suelos que podrían causar los daños a las casas. Sin embargo, MEG (2003, Cuadro 5.6-21) proporciona datos sobre el contenido de la arcilla en los suelos locales, los que van desde 14,7 a 54,6 por ciento. Los suelos con un contenido menos de 50 por ciento son menos susceptibles de causar daños significativos a las casas por hinchamiento (Nelson and Miller, 1992).

El tercer documento titulado «Informe de Causas Generales de Rajaduras en Construcciones, en Guatemala: Comportamiento de Estructuras en Suelos Arcillosos» (Anexo B) fue proporcionado al equipo de ingeniería por representantes de la comunidad, que declararon que recibieron el documento de MEG. La copia proporcionada al equipo no da a conocer ni una fecha ni un autor. Este documento incluye algunas generalidades engañosas que no se aplican al área alrededor de la mina Marlin, como sigue:

- La primera oración de este documento indica «La arcilla es un material que cuando gana agua aumenta su volumen, cuando pierde la misma lo disminuye». Esta declaración es verdad solamente para algunas arcillas. Las arcillas de montmorillita son muy propensas a los cambios de volumen con cambios en el contenido de humedad, mientras que las arcillas de caolinita relativamente no son afectadas por los cambios en el contenido de humedad (Holtz and Kovacs, Sección 4.2, 1981). De hecho, como está discutido abajo, los resultados de muestras demuestran que algunos de los suelos en el área alrededor de la mina Marlin son afectados por los cambios en el contenido de humedad y otros no.
- El documento describe los «asentamientos diferenciales» causados por arcillas hinchadas como la causa del daño a las casas construidas sobre los suelos arcillosos. Esta declaración es terminantemente incorrecta. El término «asentamiento diferencial» se aplica más frecuentemente a las diferencias del asentamiento a partir de una porción de una estructura a otra. Tal asentamiento diferencial es causado más a menudo por los suelos con diversas características portadoras, que están subyacentes de diversas partes del cimiento. Al discutir el daño debido a los suelos hinchados, el término «hinchamiento diferencial» es el más apropiado.
- Este informe concluye con la declaración: «Todas las viviendas que están construidas en suelos arcillosos sin losa de cimentación, tienen al menos una rajadura debido a asentamiento diferencial; las viviendas edificadas alrededor de la mina Marlin están sobre suelos arcillosos.» Esta declaración es excesivamente amplia y engañosa. Los resultados abajo demuestran claramente que no todas las casas alrededor de la mina están construidas sobre suelos arcillosos, y que algunas casas construidas sobre suelos arcillosos demuestran relativamente poco daño, mientras otras demuestran daño significativo.

### Muestreo y Prueba del Suelo

Siete muestras de suelo fueron recolectadas en las aldeas alrededor de la mina Marlin en las ubicaciones señaladas en la Figura 10. Las muestras fueron recolectadas a una profundidad de aproximadamente 15 centímetros. Seis

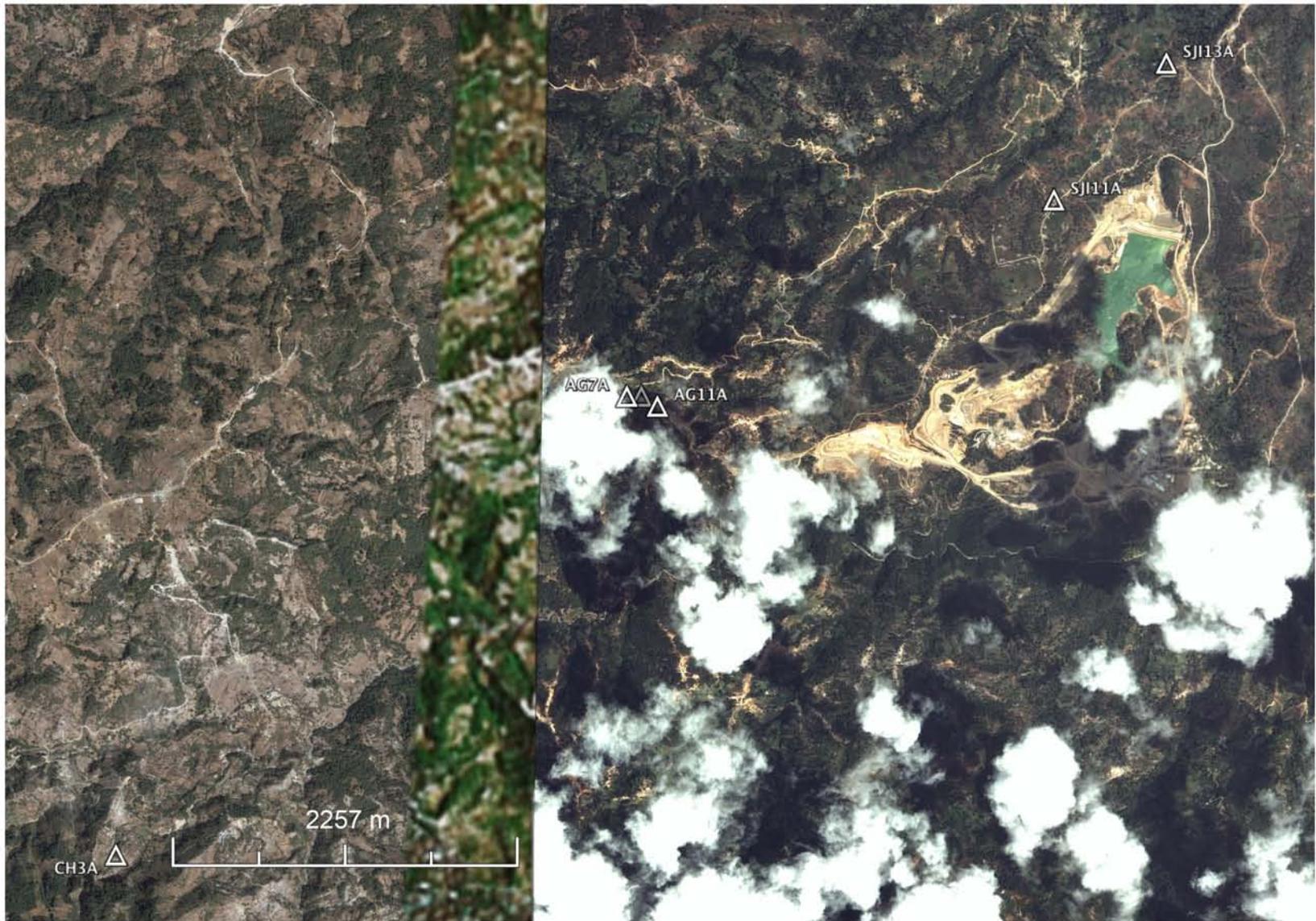


Figura 10. Ubicaciones de Muestras del Suelo. © Google Earth, Digital Globe, TerraMetrics, and GeoEye.

muestras fueron recolectadas en los sitios de construcción de las casas dañadas en las aldeas de Agel, San José Ixcaniche, y San José Nueva Esperanza. Para la comparación, una muestra fue recolectada en la aldea control Chininguitz. Se recolectó una segunda muestra en Chininguitz, pero esta muestra no contenía el volumen suficiente del suelo para las pruebas requeridas, por lo tanto no fue sometida a pruebas de laboratorio. Inmediatamente después de la recolección de la muestras, fueron selladas en bolsas herméticas y cada bolsa fue etiquetada con un número de muestra y con la fecha del muestreo. Las muestras fueron almacenadas a una temperatura ambiente hasta la entrega al laboratorio de prueba, tres días después.

Las muestras del suelo fueron analizadas por CTL Thompson, Inc., situado en Denver, Colorado, EEUU. CTL Thompson es un laboratorio geotécnico comercial acreditado por el Programa de Acreditación de la Asociación Americana de las Organizaciones de la Carretera y del Transporte de Estado (AASHTO). Para cada muestra, la prueba de laboratorio determinó el contenido de humedad natural, la distribución de granulometría, la plasticidad, y la clasificación de suelo. Además, una muestra de suelo arcilloso y una de suelo granular se seleccionaron para la prueba de hinchamiento potencial. Los resultados de la prueba se resumen en el Cuadro 3. Las hojas de datos del laboratorio y los resúmenes de los datos son incluidos en el Anexo G.

Además de la prueba de laboratorio, una prueba simplificada de densidad de campo determinó la densidad relativa del suelo. La prueba consistió en enterrar una barra de hierro de 10 milímetros de diámetro en el suelo, golpeándola con un martillo de 2.5 kilogramos. Ver Figura 11. El número de golpes requeridos para penetrar a una profundidad dada fue registrado, Ver la última columna del Cuadro 4. La prueba no da los resultados cuantitativos, pero indica generalmente la densidad relativa del suelo en las varias ubicaciones.

**Cuadro 3. Resumen de las Propiedades del Suelo**

Número de Muestra	Localización de Muestra	Clasificación de Suelo (USCS) <sup>1</sup>	Contenido de Humedad Natural (%)	Fracción Pasando 200 (0,074 mm.) (%)	Límite Plástico (%)	Límite Líquido (%)	Índice de Plasticidad (%)	Hinchamiento (%)
AG 1A	Agel	CL	17.2	66.3	23	49	26	1.2
AG 7A	Agel	CH	25.1	78.6	27	71	44	
AG 10A	Agel	CH	9.8	88.5	23	62	39	
AG 11A	Agel	CH	42.3	86.1	35	85	50	9.0
SJI 13A	San José Ixcaniche	ML	24.4	50.4	NP	NP	--	
SJNE 3A	San José Nva. Esp.	GC	4.2	41.5	14	31	17	
CH 3A	Chininguitz	SM	8.9	48.9	25	32	7	

1. USCS = Sistema de Clasificación de Suelos Unificados

CL – arcillas de baja plasticidad, Límite Líquido menor de 50 por ciento

CH – arcillas muy plásticas, Límite Líquido más de 50 por ciento

ML – sutil limos

GC – gravas arcillosas (gravas con más de 12 por ciento arcilla)

SM – arenas limosas (arenas con más de 12 por ciento limo)

**Cuadro 4. Correlación de Propiedades del Suelo con Daño Estructural**

Número de Muestra	Localización de Muestra	Resultados de Prueba de Densidad (Número de golpes/densidad del suelo)	Potencial de Hinchamiento de Suelo	Grado de Daño <sup>1</sup>
AG 1A	Agel	10 por 8 cm/ muy denso	Bajo	2
AG 7A	Agel	no prueba	Alto	7
AG 10A	Agel	no prueba	Moderado	3
AG 11A	Agel	no prueba	Alto	1
SJI 13A	San José Ixcaniche	12 por 13 cm/ denso	Bajo	3
SJNE 3A	San José Nva. Esp.	12 por 8 cm/ muy denso	Bajo	1
CH 3A	Chininguitz	12 por 5 cm/ muy denso	Bajo	3

1. El grado de daño es del Anexo D con la excepción de Chininguitz.

### Propiedades del Suelo

Los resultados de la prueba del suelo, como se resumen en el Cuadro 3, indican que las propiedades del suelo varían extensamente dentro del área de estudio. La columna 3 describe los suelos. Los tipos de suelos incluyen la grava, la arena, el limo, y la arcilla. Los suelos más gruesos tienen diversos contenidos de arcilla y limo. Esta variabilidad explica la variación en los contenidos de



**Figura 11 Prueba de Campo de Densidad del Suelo**

humedad natural. Para tipos diferentes de suelos expuestos a las condiciones naturales similares de humedad y de temperatura, los suelos de grano grueso tienden a conservar menos agua que los suelos más finos.

La prueba de «fracción que pasa por el tamiz No. 200» - también llamada prueba de «Tamiz No. 200 fracción» es la mejor forma de medir la cantidad de material de tamaño de arcilla en el suelo. Los valores del resultado de la prueba de « Tamiz No. 200 fracción» variaron a partir de 41,5 a 88,5 por ciento. Los suelos con un valor menor al 50 por ciento de la «Tamiz No. 200 fracción» son raras veces suelos hinchados. Los suelos con un valor de más de 50 por ciento pueden ser suelos hinchados, dependiendo de las propiedades restantes.

Dos pruebas de plasticidad fueron realizadas: el Límite Plástico y el Límite Líquido. Estos límites son el contenido de humedad del suelo cuando el suelo se hace plástico y líquido con adición gradual de agua. El Índice de Plasticidad es la diferencia aritmética entre el Límite Plástico y el Límite Líquido. Los tres valores indican el comportamiento de la fracción de arcilla de un suelo en función del contenido de humedad. En general, los valores mayores del Límite Líquido y del Índice de Plasticidad indican las arcillas que tienen mayor propensión a cambios de volumen con variaciones en el contenido de humedad. Los suelos que no exhiben ninguna plasticidad se designan como “No Plástico”. Estos suelos no contienen minerales cuyo comportamiento varía con los cambios en el contenido de humedad. Los valores en las pruebas de plasticidad variaron de No Plástico para la muestra SJI 13A hasta los valores de Límite Líquido y Índice de Plasticidad de 85 y 50, respectivamente, para la muestra AG 11A.

La prueba de potencial de hinchamiento consiste en colocar una muestra de suelo debajo de una carga e inundarlo con agua. El cambio en altura de la muestra como función de carga e inundación de agua se traza en un gráfico. Los gráficos para las dos pruebas realizadas están incluidos en el Anexo G. Los resultados son reportados como el porcentaje de hinchamiento en inundación con agua debajo una carga de 48 kiloPascal. Los resultados para las dos muestras fueron de 1,2 por ciento y 9,0 por ciento. Los resultados por hinchamiento menor de dos por ciento indican suelos que no hinchan bastante como para causar daños a las casas.

Las pruebas de los suelos muestran que, de las siete muestras recolectadas, sólo dos tienen alguna indicación que las arcillas hinchadas pueden estar contribuyendo al daño a las casas. Los resultados para la muestra AG 11A muestran las características combinadas del alto contenido de humedad natural, alto Límite Líquido, alto Índice de Plasticidad, y alta menos 200 fracción, las cuales son indicadores del alto potencial de hinchamiento. De las muestras probados, a excepción de la AG 11A, solamente la muestra AG 7A presenta una combinación similar de alta humedad natural, alta plasticidad, y alta menos 200 fracción. Aunque la muestra AG 7A no fue analizada para potencial de

hinchamiento, se espera que este suelo mostraría un potencial de hinchamiento similar a la muestra AG 11A.

Basado en el contenido de humedad natural, plasticidad, y menos 200 fracción, las muestras restantes demuestran poco potencial de hinchamiento, similar a los resultados de la muestra AG 1A.

La muestra SJI 13A es No Plástica. Este resultado indica que la fracción del tamiz No. 200 no contiene cantidades significativas de minerales arcillosos; la fracción fina es probablemente compuesta primeramente de limo. El limo es generalmente similar en tamaño a la arcilla, pero se compone de los minerales que no exhiben un cambio en volumen con variaciones en el contenido de humedad. De acuerdo con estos resultados, lo más probable es que la muestra SJI 13A tendría un potencial de hinchamiento de cero.

Los resultados de la prueba de campo de densidad, en el Cuadro 4, variaron grandemente; los suelos más densos presentaron resultados de 12 golpes para insertar 5 centímetros la barra de hierro, mientras que en los suelos más sueltos se necesitaron 2 golpes para introducir a 30 centímetros la misma barra. Los resultados indican que hay mucha variación en el grado de compactación de los suelos de base subyacentes a las casas. Esta variación en penetración no se correlaciona con el daño a las casas, por lo tanto la compactación inadecuada no es probable ser la causa del daño.

#### Correlación de las Propiedades del Suelo con Daño Estructural

En los casos en que los suelos hinchados pueden contribuir al daño a las casas, el grado real del hinchamiento y el daño subsecuente a las casas, depende de otros factores además del potencial de hinchamiento del suelo. El hinchamiento ocurre solamente cuando hay presente ciertos minerales arcillosos, y hay suficiente cambio en el contenido de humedad y la temperatura del suelo. Dependiendo de los minerales arcillosos presentes, los cambios en el contenido de humedad a veces no producen cambios en el volumen del suelo. Los cambios en el contenido de humedad a menudo son el resultado de la migración de humedad debajo de la casa debido a las diferencias en la temperatura entre el suelo debajo de la casa y el suelo alrededor de la casa (Nelson and Miller, 1992). Tales diferencias de temperatura son causadas por la combinación de variaciones estacionales extremas de la temperatura y cualquier sistema de calefacción y enfriamiento de las casas. Debido a las temperaturas moderadas de las montañas occidentales de Guatemala, las temperaturas ambientes no varían dramáticamente, y no se necesitan tales sistemas. Por lo tanto, las variaciones en la temperatura del suelo, y las diferencias relacionadas en el contenido de humedad del suelo, serían mínimas en los suelos debajo de y alrededor de las casas en el área. Además, muchas de las casas observadas tenían pisos de suelo. En estos casos, porque los suelos interiores están

abiertos a la atmósfera como los del exterior, es todavía menos probable de que ocurran las variaciones significativas en humedad en el suelo.

Las ubicaciones de la tomas de muestra de suelo y el grado del daño en cada casa donde una muestra fue colectada se dan a conocer en el Cuadro 4. Como se puede observar, no hay una correlación entre las características del suelo y el grado del daño. Por ejemplo, las casas representadas por las muestras AG 7A y AG 11A están situadas en la aldea Agel, a una distancia de 500 metros una de otra. Las muestras del suelo para ambas casas indican un alto potencial de hinchamiento. Sin embargo, la casa AG 11 tiene solamente daño moderado mientras la casa AG 7 tiene daño grave. Los resultados son similares al comparar la prueba de campo de densidad con el grado de daño estructural en las casas respectivas, según lo que está presentado en el Cuadro 4. Otra vez, no hay relación evidente entre los resultados de la prueba de la densidad y el grado del daño.

Si las rajaduras fueran resultado de los suelos hinchados, las rajaduras se expandirían durante la temporada lluviosa, y cuando se secan los suelos, las paredes regresarían a sus posiciones y se cerrarían las rajaduras. El equipo de ingenieros visitó al área inmediatamente antes y después de la temporada lluviosa, y cerca del final de la temporada seca. Los datos y fotos de las rajaduras no demuestran estos cambios en comportamiento, como se muestran en el Cuadro 2; por el contrario, las rajaduras han mostrado pocos cambios. Este comportamiento de las rajaduras no es típico de los suelos hinchados; es más típico de frecuentes eventos de vibraciones de la tierra.

## **MONITOREO DE VIBRACIONES**

Pueden ocurrir rajaduras en las paredes de las casas, son causadas por tráfico vehicular, voladuras de explosivos, actividades de construcción, y otras fuentes de vibraciones de la tierra. (Aimone-Martin, 2003; Dowding, 1985, 1996; Hanson, 2006.) Las rajaduras se realizan cuando las vibraciones se transmiten a través de la tierra hasta la casa, y las vibraciones son bastante fuertes que exceden la fuerza de los materiales que forman las paredes de la casa. Las vibraciones repetitivas de una intensidad baja durante un tiempo prolongado también pueden degradar los materiales de construcción hasta que el material falla y aparezcan las rajaduras.

Algunos estándares máximos de vibración típicos, requeridos o recomendados por varias agencias estatales, se enumeran en el Cuadro 5. Estos estándares se desarrollaron en los países en los cuales las prácticas de construcción son muy diferentes de los del Guatemala rural. Los valores de estos estándares tendrían que ser más bajos para proteger el concreto no reforzado y el adobe, porque estos materiales no tienen la resistencia a la tracción de otros materiales.

**Cuadro 5. Criterios de Vibración para las Casas de Albañilería en Varios Países**

<b>Estándar</b>	<b>Fuente</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Velocidad Máxima (mm/seg)</b>
US Federal Transit Administration <sup>1</sup>	Tráfico	No especificada	5.1
US Bureau of Mines and US Office of Surface Mining <sup>2</sup>	Voladura	< 40 > 40	19.1 50.8
Alemania DIN 4150 <sup>3</sup>	No Especificada	< 10 10 - 50 50 - 100	5 5 - 15 15 - 20
Suiza <sup>1,3</sup>	Tráfico  Voladura	10 - 30 30 - 60  10 - 60 60 - 90	5 5 - 8  12 12 - 18

<sup>1</sup>Hanson, 2006

<sup>2</sup>Siskind, 1980 y Aimone-Martin, 2003.

<sup>3</sup>Georgia Institute of Technology, 2002.

MEG (2003, Pág. 5-115) y su consultor J. P. Ligorria A. (2008) describen las vibraciones en unidades de gravedad. Esta unidad de medida es inusual porque la mayoría de las agencias reguladoras utilizan “velocidad de partícula máxima” («peak particle velocity» o «ppv»); Ver Cuadro 5 y sus referencias. De hecho, la referencia primaria de Ligorria (Kramer, 1996, pág. 68) también recomienda velocidad de partícula máxima como la medida más aplicable para predecir el daño por las vibraciones.

El monitoreo inicial de vibraciones de la tierra fue realizado como parte de este estudio el 11 de noviembre del 2008, sobre el tráfico de vehículos y un evento de la voladura explosiva de la mina a cielo abierto Marlin. Las pruebas de las vibraciones de vehículos se repitieron el 19 de marzo del 2009. La primera prueba de vehículos fue realizada en el centro de la aldea Agel, y la segunda en el extremo oeste de Agel debido a que el camino a través de Agel estaba siendo reconstruido. El instrumento de medición de la vibración fue un sismógrafo, Blastmate III, manufacturado por Instantel. Los certificados de la calibración del Blastmate III se adjuntan en el Anexo H.

### Tráfico Vehicular

Las vibraciones de vehículos fueron monitoreadas usando un camión de volcar de tres ejes marca Ford, modelo Aeromax L9000, el mismo se monitoreó sin carga y con carga; los resultados se muestran en la Figura 12. El peso del



**Figura 12a Blastmate III (Sensor a la Izquierda, Registrador al Derecho)**



**Figura 12b Monitoreo de Vibraciones de Vehiculos**

**Figura 12 Monitoreo de Vibraciones**



**Figura 12c Monitoreo de Voladura**

camión descargado es de 13,600 kilogramos, y la capacidad máxima del camión cargado es aproximadamente de 27,300 kilogramos. Este camión es más pequeño que los camiones más grandes que fueron observados en el camino, que fueron los camiones de cisterna de combustibles. El camión pasó el Blastmate III a varias velocidades de hasta 50 kilómetros por hora.

Las velocidades de partícula máxima para estas pruebas se resumen en el Cuadro 6, y los resultados detallados del Blastmate III se incluyen en el Anexo H. En las pruebas del camión descargado conducido a velocidades de 10 a 30 kilómetros por hora, la velocidad de partícula máxima se queda dentro del alcance de 0,238 a 0,349 milímetros por segundo. La velocidad de partícula máxima aumenta a 0,476 milímetros por segundo a una velocidad de 40 kilómetros por hora; dicha velocidad se duplica alcanzando los 1,16 milímetros por segundo, a los 50 kilómetros por hora. El camión cargado a 30 kilómetros por hora produjo el resultado de una velocidad de partícula máxima de 0,540 milímetros por hora. El camión cargado aumenta las vibraciones en 55 por ciento más que el camión descargado. El trabajo de construcción en Agel impidió pruebas adicionales del camión cargado.

**Cuadro 6. Velocidad de Partícula Máxima de un Camión de Volcar de 3 Ejes Descargado y Cargado**

<b>Velocidad del Camión (k/h)</b>	<b>Camión Descargado Velocidad de Partícula Máxima (mm/seg)</b>	<b>Camión Cargado Velocidad de Partícula Máxima (mm/seg)</b>
10	0.349	
20	0.238	
30	0.349	0.540
40	0.476	
50	1.16	

Las velocidades de partícula máxima no llegaron al estándar típico para las vibraciones de 5 milímetros por segundo que se muestra en el Cuadro 5. Sin embargo, cuando aumentó la velocidad del camión y la carga, la velocidad de partícula máxima se acercó a la norma. Es notable que la velocidad de partícula máxima del camión descargada se aumente geoméricamente de 30 a 50 kilómetros por hora, y podría haber seguido aumentando geoméricamente con el camión cargado también.

Dowding (1996, pág. 249) informa que los camiones de los mismos tamaños como el mencionado anteriormente pueden producir las vibraciones que exceden los criterios del tráfico presentado en el Cuadro 5, bajo las siguientes condiciones:

- Tamaño del carro - 22000 kilogramos
- Velocidad – 50 kilómetros por hora
- Montículos - 100 milímetros

Estas circunstancias producen velocidades de partícula máxima de 0.5 a 10 milímetros por segundo en distancias de 10 a 100 metros del camión. El extremo superior de este alcance excede los criterios de 5 milímetros por segundo, y la distancia de la fuente se encuentra dentro de las distancias desde las casas a los caminos en el área alrededor de la mina Marlin.

Los caminos en las aldeas afectadas generalmente son rústicos y yacen directamente sobre el suelo o roca firme. No hay un curso de base u otros mejoramientos del camino para disociar las vibraciones del tráfico del suelo. Los caminos se mantienen en mal estado, tienen baches y montículos. Estas condiciones causan impactos de los vehículos sobre la superficie de la tierra, que aumenta las vibraciones de la tierra. También, cualquier vehículo con la suspensión pobre aumentará aún más las vibraciones de la tierra. Además, las casas de adobe y bloque son particularmente susceptibles a las vibraciones ya que estos materiales de construcción tienen una baja resistencia a la tracción en comparación a la madera o acero.

El camino a través de las aldeas alrededor de la mina Marlin se estaba mejorando en marzo del 2009, como se señaló anteriormente. Si está bien mantenido, este camino mejorado probablemente reducirá el riesgo del daño por vibraciones de vehículos a las casas adyacentes.

MEG monitoreó las vibraciones debido al tráfico de vehículos en varias aldeas alrededor de la mina Marlin antes de la construcción y las operaciones de la mina (MEG, 2003, pág. 5-115), e informó de sus resultados en unidades de la gravedad en vez de la medida más común de la velocidad de partícula máxima. MEG informó de una aceleración máxima de la gravedad 0.020 aproximadamente (2003, Figura 5.6-21). Sin embargo, MEG no informa del tamaño de los vehículos monitoreados. Porque el monitoreo era previo a la construcción y a las operaciones mineras, no es probable que los vehículos monitoreados fueron los camiones grandes utilizados típicamente para la entrega de equipo grande de construcción y procesamiento, y provisiones para la mina. La vibración máxima del vehículo registrado para este estudio actual fue de una velocidad de partícula máxima de 1.16 milímetros por segundo, que es equivalente a una aceleración de 0.028 de gravedad aproximadamente, dado las formas de onda típicas de las vibraciones (Ver la prueba de los 50 kilómetros

por hora en el Anexo H.) Esta vibración excede significativamente la gravedad máxima de 0.020 informada por MEG. Respecto al monitoreo de MEG y el monitoreo llevado a cabo para este informe, hay dos posibles circunstancias que podrían dar resultados falsos, como se menciona a continuación:

- MEG monitoreó el tráfico de vehículos antes que la mina entrara en operaciones, cuando el tráfico de vehículos fue relativamente ligero.
- Los camiones de mucho mayor tamaño (seis y más ejes) usados para proveer las minas no fueron monitoreados. Los más grandes camiones causan vibraciones de baja frecuencia y altas amplitudes que probablemente resulten en daño estructural.

Así las vibraciones reales experimentadas por las casas en las aldeas alrededor de la mina Marlin eran casi ciertamente mayores que las mostradas en cualquier monitoreo de vibración llevado a cabo hasta la fecha. Pues la vibración monitoreada de 1.16 milímetros por segundo está dentro de una orden de magnitud de los criterios de la vibración de 5 milímetros por segundo, es probable que el tráfico de vehículo podría haber causado el daño estructural.

Los criterios de la vibración enumerados en el Cuadro 5 son para las naciones industrializadas en donde la construcción se regula con estándares por estructuras. Las aldeas alrededor de la mina Marlin son construidas con técnicas tradicionales, adecuadas para las necesidades locales; sin embargo, no son adecuados para la intrusión de una gran actividad industrial con impactos tales como el tráfico de camiones pesados y voladuras de mina.

### La Voladura

Una voladura de la mina a cielo abierto de Marlin fue monitoreada por el equipo el 11 noviembre del 2008. Ver el Anexo H para los resultados. Las vibraciones máximas fueron bajas en comparación con los estándares para la voladura que se presentan en el Cuadro 5, mostrando una velocidad de partícula máxima de 0.524 milímetros por segundo a una frecuencia dominante de 9.5 Hertz. Estos resultados son consistentes con las buenas prácticas de la voladura como las aseveradas en la carta de MEG con fecha del 26 de julio del 2006 dirigida al Sr. Valentín Melecio Juárez y un registro de monitoreo de voladuras que trata del período de enero a agosto 2009 (Anexo B). Este registro de monitoreo muestra las frecuencias de vibraciones bajas. Mientras que el registro incluye las coordenadas de las ubicaciones de monitoreo, la sistema de coordenadas es propietaria a la mina y la información no es adecuada para decidir si las ubicaciones de monitoreo son pertinentes al daño en las aldeas alrededor de la mina Marlin.

El equipo de ingenieros fue a la Iglesia Católica no usada en San José Nueva Esperanza el 20 de marzo del 2009 cuando dos explosiones en la mina fueron

detonadas a 12:45 de la tarde aproximadamente. A pesar de la carta y el registro de voladuras de MEG mencionadas anteriormente, estas explosiones sacudieron la iglesia con un valor de intensidad V en la Escala Modificada de Mercalli. Un valor de intensidad VI es bastante para causar daño estructural, así las explosiones en la mina en ese día mismo estuvieron cerca de lo que sería suficiente para dañar las casas.

En nombre de MEG, Ligorria (2008) realizó un monitoreo extenso de la voladura en la mina. (Ver Anexo B.) Monitoreó las vibraciones de 64 explosiones en la mina a cielo abierto y de 28 explosiones en la mina subterránea. Los sitios del monitoreo variaron en distancia y la dirección de la explosión, e incluyeron sitios de monitoreo en Agel y San José de Nueva Esperanza. Los resultados generalmente demuestran las vibraciones bajas comparado a los criterios de voladura de la vibración mencionados en el Cuadro 5. Sin embargo, cuando Ligorria realiza un análisis espacial de los datos sísmicos, se presentan dos áreas de riesgo elevado: en las aldeas de San José Nueva Esperanza (Ligorria, Cuadro 10 a.) y Agel (Ligorria, Cuadro 11 b.). Ligorria desecha el riesgo elevado en estas áreas en el último párrafo de sus conclusiones, como sigue:

- En cuanto a San José Nueva Esperanza, Ligorria indica que el riesgo elevado se debe posiblemente a la refracción de ondas sísmicas en la gran veta de cuarzo-calcita. Esta veta toma un rumbo al norte a través de la mina y pasa por la aldea.

Respuesta: La veta de cuarzo-calcita no se va, como resultado el riesgo continúa. Las vibraciones fuertes en la Iglesia Católica, mencionada anteriormente, se encontraron en la zona de alto riesgo.

- En el caso de Agel, Ligorria desecha el análisis espacial, diciendo que sus resultados se deben a la disposición de datos y el proceso de normalización, y no son un indicador de vibraciones de la voladura cercana.

Respuesta: Es de suponer de que Ligorria utilizó tecnología de punta para el análisis (no se da ninguna referencia para el método analítico), por lo que es impropio descartar los resultados. Si la tecnología no es fidedigna, el análisis debe ser modificado.

En el último párrafo de las conclusiones y en otras partes, Ligorria hace un número de negaciones además de las dos negaciones específicas anteriores. Estas negaciones incluyen preguntas sobre: el proceso de la normalización, la interpretación como una simplificación de un sistema complejo, de variables numerosas, y de una dispersión en los resultados, y la correlación estadística pobre. Las negaciones dan la impresión que Ligorria tiene poca confianza en los resultados de su trabajo.

La carta de MEG al Sr. Juárez, mencionada anteriormente, tiene una inexactitud con respecto a la transmisión de las vibraciones de la tierra. Indica que las áreas más arriba en elevación de una voladura son menos propensas a las vibraciones de la tierra. De hecho, el caso es al contrario, pues hay menos interferencia de vibraciones reflejadas por la superficie, y particularmente si la tierra más alta está en una ubicación de loma. Mientras que las vibraciones de la tierra se levantan hacia una cresta de loma, la energía total se conserva en la masa terrestre angosta, dando por resultado la amplificación de la aceleración de partículas (Kramer, 1996, pág. 319). Muchas de las aldeas alrededor de la mina Marlin corresponden a esta circunstancia. Las vibraciones de la tierra que viajan hacia la cresta de una loma pueden más que doblar sus aceleraciones máximas desde sus aceleraciones bases (Kramer, 1996, pág. 320).

Los resultados informados por Ligorria (2008) se basan en promedios de un número de acontecimientos, y prácticas de voladura recientes. Sin embargo, se necesita solamente un solo error u omisión durante las voladuras para causar las vibraciones de la tierra de órdenes de magnitud mayores que las deseadas. Los habitantes del lugar indican que las vibraciones y el ruido de la voladura eran mucho más fuertes en el pasado, lo que implica que las prácticas de voladura del pasado no eran iguales a las del presente. Es probable que hubiera voladuras más grandes y con mayores impactos en el pasado. Típicamente en las minas de cielo abierto, la explotación minera inicial es la eliminación de la roca estéril o la sobrecarga que requiere la voladura menos selectiva que la voladura del mineral, y el volumen de roca volado en cualquier momento podría ser mucho más grande que en la voladura actual. Además, es posible que MEG no pudiera haber utilizado siempre las prácticas de voladura descritas en su carta, y las técnicas de voladuras ineficaces o no apropiadas pudieron haber sido utilizadas. Por ejemplo, los retardos del milisegundo no se pudieron utilizar para efectuar el lanzamiento de la energía, o pudieran haber sido los errores en iniciar los retardos o los malfuncionamientos en los retardos. Otros errores que pueden ocurrir en la voladura incluyen: cantidades incorrectas de explosivos colocados en los agujeros de voladura, práctica incorrecta del tapado de agujeros de voladura, y espaciamiento incorrecto de los agujeros de voladura. Una voladura ineficaz causa el uso de menos energía en la fracturación de la roca y más energía en vibraciones de la tierra, el sonido, y la roca que sale de la mina durante una explosión.

Por lo tanto, hay circunstancias en las que la voladura en la mina Marlin pudiera haber provocado las vibraciones superiores a las monitoreadas. Estas circunstancias incluyen las voladuras de gran escala utilizadas al inicio de las operaciones en el tajo a cielo abierto y las prácticas de voladura ineficaces o no apropiadas. Para empeorar la situación, las vibraciones de la tierra son amplificadas en las lomas alrededor de la mina donde el daño estructural ya ha sido documentado.

Una nueva preocupación es que MEG comenzó recientemente operaciones mineras en un tajo a cielo abierto nuevo, que se encuentra más cercano a las aldeas de Agel. La distancia desde la voladura en este tajo nuevo a Agel es aproximadamente la mitad de la distancia desde la voladura en el tajo original.

## **CONCLUSIONES**

Las diferencias anómalas entre las casas en las aldeas alrededor de la mina Marlin y las en las aldeas de control son evidencia convincente de que la mina está dañando las casas cercanas a la mina. En cada casa a la que el equipo de ingeniería entro, en las aldeas alrededor de la mina se encontró algún daño estructural. En contraste, muy pocas casas en las aldeas de control tenían daño, salvo en el área de movimientos masivos de tierra en Chinguitz.

El equipo de ingeniería no estaba presente antes del inicio de operaciones de la mina y no puede determinar la causa del daño estructural con una certeza absoluta. Desafortunadamente, los EIA&S de MEG son insuficientes en el establecimiento de las condiciones de base precedente de la mina, como deberían de haber sido realizados. Por lo tanto, el proceso de resolver la causa del daño a las casas más probable es eliminar los factores que obviamente no son la causa, y luego reducir las restantes posibles causas a la causa más probable, utilizando cualquier evidencia y datos después del daño que puede ser descubierto.

El daño a casas puede ser el resultado de causas naturales tales como el clima, los terremotos, los suelos pobres, y los movimientos masivos de tierra. Causas humanas del daño estructural incluyen las vibraciones de la tierra provocadas por el tráfico vehicular o la voladura, y las prácticas inadecuadas de construcción. La probabilidad de que estas varias causas sean responsables del daño en las aldeas cercanas a la mina Marlin se resume a continuación, de acuerdo de las secciones anteriores del presente informe.

Dado el clima templado y la historia sísmica del área, se puede concluir con confianza de que las rajaduras en las casas no se deben a la congelación y descongelación, y/o los eventos sísmicos. Si fuera así, habría más evidencia de estas causas en las casas dañadas. Las aldeas de control apoyan a esta conclusión ya que han experimentado el clima y eventos sísmicos similares, pero no han incurrido el tipo de daño que se encuentran en las aldeas cercanas a la mina Marlin.

El hundimiento del suelo debido a la humedad y los suelos hinchados no es probable, ya que la mayoría de las casas no se encuentran en los suelos hinchados, el drenaje del agua alrededor del perímetro de las casas es suficiente, y las losas de los pisos a menudo no tienen rajaduras. Adicionalmente, el monitoreo de los anchos de las rajaduras muestra que los

anchos no cambian con las estaciones lluviosas y secas, lo que sería el caso si los suelos estuvieran hinchados durante la estación lluviosa y contraídos durante la estación seca. Una vez más, las aldeas de control apoyan a esta conclusión ya que tienen la construcción de casas y los suelos similares pero no muestran el tipo de daño que se observan en las aldeas alrededor de la mina.

El tipo de daño estructural en las aldeas alrededor de la mina Marlin es inconsistente con los movimientos masivos de tierra, y no hubo evidencia en estas aldeas de movimientos masivos de tierra. De hecho, muchas de las casas en estas aldeas se encuentran cerca de la cresta de una loma sobre una capa fina de suelo o sobre roca firme, por lo tanto no existe el desmoronamiento hacia abajo de los masivos espesores de suelo. Chininguitz demuestra la diferencia entre los daños causados por los movimientos masivos de tierra y por otras causas. Un pequeño valle en esta aldea tiene el movimiento masivo de tierra que ha dañado muchas casas. El movimiento masivo de tierra incluye las fracturas de la tierra muy largas, el suelo en forma de morones, escarpes, y derrumbes, los cuales no se miran en las aldeas alrededor de la mina.

El daño estructural en las aldeas alrededor de la mina Marlin no resulta de las prácticas de construcción, porque estas aldeas y las aldeas de control utilizan las mismas prácticas. La compactación de la base debajo de las casas no es el problema, como una prueba de campo no se correlacionaron con el daño.

La mayoría del daño se presenta como rajaduras en la lechada de las paredes de block y en las paredes de adobe, del típico tipo de daño causado por las vibraciones de la tierra. Es decir – las rajaduras en las paredes pero no en los pisos, rajaduras en el medio de la pared, y rajaduras que se encuentran con la mayor frecuencia en las paredes orientadas hacia los frentes de vibraciones provocadas por el tráfico vehicular y/o la voladura de la mina. Dado los datos recolectados, la causa más fuertemente apoyada del daño estructural en las aldeas alrededor de la mina Marlin es la voladura de la mina Marlin y el aumento de tráfico vehicular de camiones pesados con insumos para la mina.

En comparación con las aldeas control, las aldeas inmediatamente alrededor de la mina Marlin muestran daño estructural fuera del envejecimiento normal y los ocasionales problemas de construcción. Utilizando los métodos, el monitoreo, y las pruebas de estándares de ingeniería, el equipo de ingeniería eliminó todas las posibles causas realistas del daño de las casas menos una. Las causas eliminadas incluyen los movimientos masivos de tierra, la actividad sísmica, los suelos pobres, y las prácticas de construcción. El equipo concluyó que la causa más probable son las vibraciones de la tierra provocadas por la voladura en la mina y el aumento del tráfico de vehículos pesados. Los materiales locales de construcción, bloque de concreto y adobe, son susceptibles al daño por las vibraciones, ya que estos materiales tienen una resistencia a la tracción baja en comparación con, por ejemplo, la madera y el concreto reforzado con acero. Antes de la construcción de la mina, el block y adobe sirvieron bien las

comunidades del lugar; no fue necesario incurrir en costos adicionales de construcción más substancial, y no había conocimiento de que podría ser necesario.

## **RECOMENDACIONES**

El monitoreo adicional del daño a las casas y las vibraciones de la tierra es necesario para proporcionar información sobre los impactos de las actividades mineras en la mina Marlin y para proporcionar información para tomar decisiones. Un plan de monitoreo debe ser desarrollado como una colaboración entre las aldeas que sufren los impactos, la empresa minera, y las entidades gubernativas. Las partes deben estar de acuerdo sobre los fines y el alcance del monitoreo. El plan de monitoreo debe incluir una completa inspección fundamental de las condiciones en todas las casas dentro de un área geográfica, acordada por las partes, alrededor de la mina. (Como se menciona anteriormente, un estudio de línea de base antes iniciar la explotación minera hubiera sido preferible, pero no fue realizado.)

El plan de monitoreo debe incluir las visitas regulares y periódicas a cada casa o a una muestra representativa para documentar cualquier cambio en las condiciones. Los resultados de estas inspecciones deben ser facilitados a los dueños de las casas y los representantes de las aldeas en una manera oportuna. Los habitantes de cualquier casa que muestran daño extenso deben ser notificados y se les debe proporcionar viviendas alternativas que sean seguras, hasta que haya un acuerdo de resolución a la situación.

Para el monitoreo de las vibraciones de la tierra, estaciones de registro sismográficas permanentes deben ser instaladas en varios puntos en todas las aldeas alrededor de la mina. La ubicación de las mismas debe ser acordada por las partes. Las estaciones deben realizar el monitoreo en tiempo completo, y los resultados deben estar disponibles al público en una manera oportuna. Cualquier evento que muestre altos niveles de vibraciones de la tierra debe ser analizado por el posible daño a las casas.

Estas recomendaciones son aún más importantes ahora porque MEG ha comenzado la explotación minera en un nuevo tajo a cielo abierto que se encuentra mucho más cercano a partes de las aldeas afectadas.

## **REFERENCIAS**

Aimone-Martin, C. T., M. A. Martell, L. M. McKenna, D. E. Siskind, C. H. Dowding, 2003. *Comparative study of structure response to coal mine blasting*. Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement, Appalachian Regional Coordinating Center, Pittsburgh, Pennsylvania, Contract No. CTO-12103, March 2003, 205 p.

Colorado Division of Minerals and Geology, 1980. *Regulations of the Colorado Mined Land Reclamation Board for Coal Mining*. Colorado Division of Minerals and Geology, 1313 Sherman Street, Room 215, Denver, Colorado 80203, (303) 866-3, 2 CCR 407-2, 451 p., rev. Mar. 21, 2001.

Comisión Pastoral Paz y Ecología (COPAE), 2007. *Consolidado de información recolectada de casas rajadas en la aldea Agel del municipio de San Miguel Ixtahuacan*, Diócesis de San Marcos, Casa Diocesana, Oficina 21, 10 Avenida, 6-28 Zone 4, San Marcos, San Marcos, Guatemala, 24 Julio 2007.

Day, R.W., 1998. Forensic geotechnical and foundation engineering. McGraw-Hill, New York City, USA, ISBN 0-07-016444-4, 460 p.

Dowding, C.H., 1985. Blast vibration monitoring and control. Northwestern University, Chicago, Ill., USA, ISBN 0-9644313-0-0, 295 p.

Dowding, C.H., 1996. Construction vibrations. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ 07458, USA, ISBN 0-13-299108-X, 610 p.

Friedman, D., 2008. *Building & environmental inspection, testing, diagnosis, repair, & problem prevention advice*. <http://www.inspect-ny.com/structure/FoundationCracks.htm>

Georgia Institute of Technology, 2002. *Civil engineering vibrations*.

Hanson C.E., D.A. Towers, L.D. Meister. *Transit noise and vibration impact assessment*. U.S. Department of Transportation, Federal Transit Administration, Office of Planning and Environment, 1200 New Jersey Avenue, S.E., Washington, DC 20590, FTA-VA-90-1003-06; available from the National Technical Information Service, Springfield VA 22161. Phone: 1-888-584-8332 or 703-605-6050, web site: [www.ntis.gov](http://www.ntis.gov).

Harris, R. E., 2009. Comunicación personal. Richard E. Harris, 2645 Briarwood Drive, Boulder, CO 80305 USA, (303) 499-1551.

Holtz, R. D., W. D. Kovacs, 1981. An introduction to geotechnical engineering. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series, 1981.

Konya, C. J., E. J. Walter, 1991. *Rock blasting and overbreak control*. US. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-HI-92-001, 6300 Georgetown Pike. McLean, Virginia 22101, Dec. 1991, 430 p.

Kramer, S.L., 1996. Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, USA, 653 p.

Ligorria A., J.P., 2008. *Estudio de intensidad sísmica entorno a la mina, Mina Marlin – Montana Exploradora de Guatemala, S.A.* 20 Calle 24-60 Zona 10, Ofibodegas Pradera Oficina #20, Ciudad de Guatemala, Guatemala, 29 p.

Ministerio de Agricultura, fecha desconocido. Clasificación de los Suelos de Guatemala. Ministerio de Agricultura, SCIDA - IAN, fecha desconocido, pp. 203-231.

Montana Exploradora de Guatemala, S.A., 2003. *Estudio de evaluación de impacto ambiental y social, proyecto minero Marlin*. 20 Calle 24-60 Zona 10, Ofibodegas Pradera Oficina #20, Ciudad de Guatemala, Guatemala.

Montana Exploradora de Guatemala, S.A., 2006. *Carta a Señor Melecio Juarez*, 20 Calle 24-60 Zona 10, Ofibodegas Pradera Oficina #20, Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2 p.

Montana Exploradora de Guatemala, S.A., varios fechas. *Environmental and social performance annual monitoring reports (AMR) reporting periods: 2004, 2005, 2006, 2007*. 20 Calle 24-60 Zona 10, Ofibodegas Pradera Oficina #20, Ciudad de Guatemala, Guatemala.

Nelson, J. D., D. J. Miller, 1992. Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering. J. Wiley, New York, 1992.

Noon, R., 1992. Introduction to forensic engineering. CRC Press, Boca Raton, LA, USA, ISBN 0849381029, 9780849381027, 1992, 205 p.

Santana, G. 1996. *Normas estructurales de diseño y construcción recomendadas para la República de Guatemala*. Ministry of Communications, Transportation and Public Works of the Government of the Republic of Guatemala, 1996.

Simons, C., J.M. Tarano and J.H. Pinto. 1959. Clasificación de reconocimiento de los suelos de la República de Guatemala. De. José de Pineda Ibarra. 1000 p.

Siskind, D.E., M. S. Stagg, J. W. Kopp, and C. H. Dowding, 1980. U.S. Bureau of Mines RI 8507.

Valiente de León, Fausto R., 2007. *Informe de monitoreo de casas rajadas en San Miguel Ixtahuacan*, Comisión Pastoral Paz y Ecología, Diócesis de San Marcos, Casa Diocesana, Oficina 21, 10 Avenida, 6-28 Zone 4, San Marcos, San Marcos, Guatemala, 05 Junio 2007.

