65 Ciencia Nicolaita

Rompimiento y desborde de presas de jales: el caso de estudio de Tlalpujahua (27 de mayo de 1937)

[1]J. M. Sánchez-Núñez, [2]J.L. Macías, [3]P. Corona-Chávez, [4,5]M. Martínez-Medina, [3]V.H. Garduño-Monroy, [6]L. Capra, [1]F. García-Tenorio y [2]G. Cisneros-Máximo

[1]Instituto Politécnico Nacional-CIIEMAD. México D.F. (sanchez0120@gmail.com); [2]Instituto de Geofísica, UNAM, Campus-Morelia; [3]Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, UMSNH; [4]Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio, UMSNH; [5]Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, C.I. Michoacán; [6]Centro de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla.

Resumen

La extracción de recursos minerales implica la producción simultánea de grandes volúmenes de material de desecho como los jales. Estos jales son una mezcla de líquidos y limos producidos por los procesos de molienda de la roca y mineral. El volumen de residuos generalmente está muy por encima de los minerales obtenidos, por lo que a menudo estos son depositados en las cuencas de los ríos, cambiando su morfología y edifican laderas inestables. Por esta razón, las presas de jales con frecuencia fallan, liberando enormes cantidades de residuos en las cuencas de los ríos, generando efectos adversos en el medio ambiente y representan una seria amenaza para la salud humana y el ecosistema.

Este documento reúne la información disponible sobre colapsos históricos de presas de jales con el propósito de establecer correlaciones con el caso de estudio ocurrido el 27 de mayo de 1937, en el distrito minero en Tlalpujahua y El Oro, estados de Michoacán y México. Después de varios días con lluvia atípica, se precipitó la ruptura del embalse que contenía los jales de la presa Los Cedros, con la consecuente liberación de ~16 millones de toneladas de materiales de desecho.

La enorme inundación de material lodoso se movió a una velocidad estimada de 20 a 25 m/s, se canalizó a lo largo de los ríos Dos Estrellas y Tlalpujahua y devastó los barrios aledaños, causando la muerte de al menos 300 personas y destruyó parcialmente la iglesia de El Carmen, cubriendo con 2 m de jales el piso del atrio.

Se concluye que resulta indispensable realizar el análisis cuidadoso de los desastres ocurridos en presas de jales, para reducir los riesgos futuros de eventos peligrosos que pueden amenazar las vidas humanas y el medio ambiente.

Palabras clave: Presa Los Cedros, jales mineros, desastre, Tlalpujahua, México.

Abstract

The mineral resources extraction implies the simultaneous production of huge volumes of waste material known as *tailing* or *jales*. Generally, these tailings are constituted of a mixture slimes produced by the processes of grinding rock and mineral. The volume of tailings is usually far above obtained economic minerals, so often these are deposited in the basins of the rivers, changing landform and build unstable hillsides. Consequently, tailings dams frequently fail, releasing huge amount of waste in the basins of the rivers, creating adverse effects on the environment and, become a serious threat to human health and the ecosystem.

We present a review of the available information on historical collapse of dams of tailings in order to establish correlations with the case study occurred on May 27, 1937, at the mining district of Tlalpujahua and El Oro, Michoacan and Mexico States. After several days, unusual rain triggered Los Cedros tailings dam breakdown, with the consequent release of ~ 16 million tonnes of waste materials. The enormous flood of silty material was moved at an estimated rate of 20 to 25 m/s, was channeled along the Dos Estrellas and El Carmen rivers and devastated the neighborhoods surrounding, causing the death of at least 300 people and partially destroyed the church of El Carmen, covering with 2 m of tailings the floor of the atrium.

We conclude that it is essential to carry out the careful analysis of the disasters in tailing dams, in order to reduce future risks of dangerous events that can threaten human lives and the environment.

Keywords: Los Cedros dam, mine tailings, disaster, Tlalpujahua, Mexico.

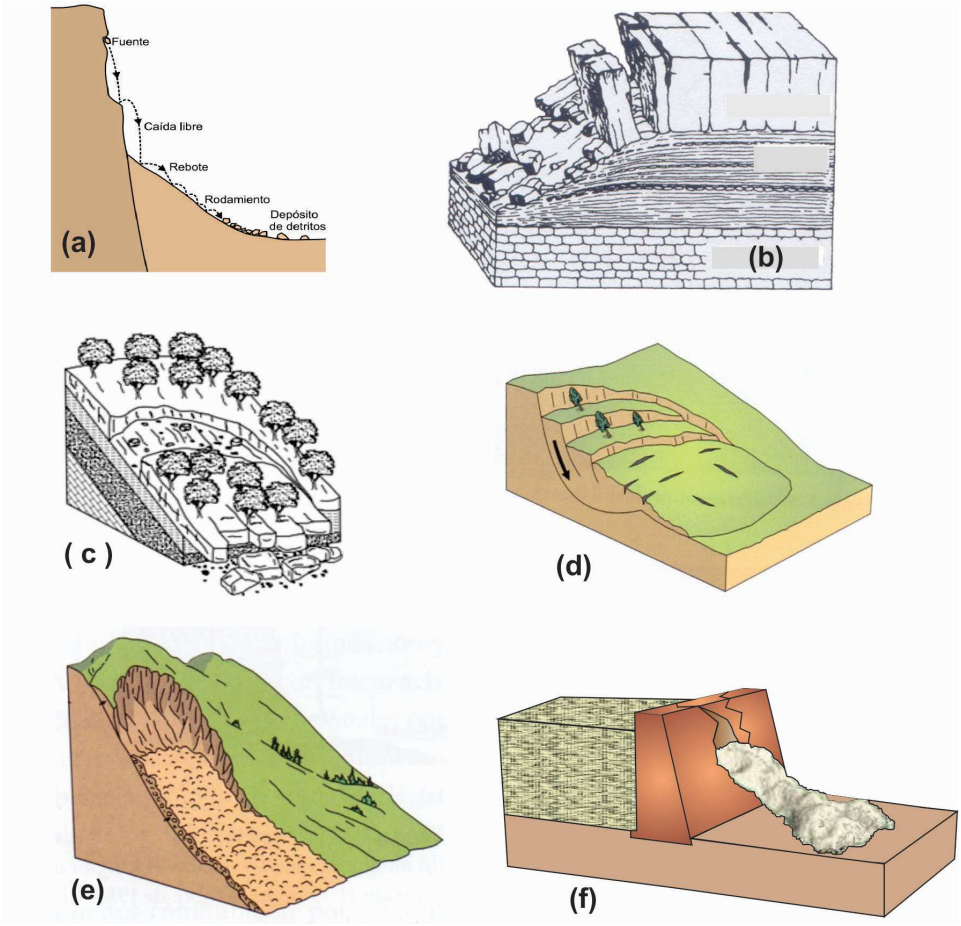

Figura 1. Tipología general de los procesos de remoción en masa, se muestran los más representativos: (a) Caída o desprendimiento de materiales (SNGM, 2007), (b) Vuelco o desplome de materiales en roca (Modificado de Dikau, et al. 1996), (c) Deslizamiento traslacional (tomado de Inestabilidad.wordpress.com), (d) Deslizamiento rotacional, (e) Flujo de escombros no canalizado (Fuente: d y e ; SNGM, 2007); (f) Flujo de Jales mineros por rompimiento de dique (este trabajo).

Introducción

El movimiento de materiales en las laderas es un fenómeno que ha ocurrido siempre y con relativa frecuencia en todo el mundo, afectando zonas pobladas y generando cambios drásticos al paisaje y al medio ambiente.

Los procesos de ladera son conceptualizados como el resultado de la acción de la gravedad, siendo este elemento el factor generador más importante del movimiento. Sin embargo, la estabilidad de una ladera o el inicio de estos movimientos pueden ser detonados o precipitados por factores condicionantes como: i) características y pendiente del terreno y ii) factores concurrentes como deforestación, sismos y/o lluvias intensas. La caracterización de un movimiento de materiales (depósitos) se basa en la descripción de su forma, tamaño, materiales involucrados, velocidad y por los daños que generan (Dikau et al., 1996). Con base en la descripción de numerosos casos de estudio naturales, la tipología o clasificación de los deslizamientos de masa se basa en el mecanismo de movimiento, por lo que de manera general pueden ser de: caída, vuelcos, deslizamientos, expansiones laterales y flujos (EPOCH, 1993; Figura 1).

La principal razón de estudio físico y dinámico de los deslizamientos de masa se basa en la preocupación por las enormes afectaciones que provocan los movimientos del terreno. Este hecho fue cobrando importancia en todo el mundo, lo que se reflejó en la Asamblea General de las Naciones Unidas al designar el Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres de 1990 a 1999; cuyo objetivo principal fue la reducción de pérdidas humanas y de bienes en los lugares afectados por fenómenos naturales o por actividades antrópicas (Lavell, 1997). Otras iniciativas con el mismo propósito fueron el Programa de la Ocurrencia Temporal y Pronóstico de Deslizamientos de la Comunidad Europea (EPOCH en 1993) y la creación en 1985 del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) en México.

Los depósitos o presas de residuos mineros que se han acumulado en el paisaje de zonas mineras históricas en todo el mundo, representan hoy en día una nueva tipología antropogénica de un proceso análogo de inestabilidad de ladera (Figura 1 f). Desafortunadamente, el conocimiento y normatividad de los procesos de remoción en masa de residuos mineros, se llevan a cabo a partir de experiencias del pasado, las cuales han tenido consecuencias trágicas y de grandes pérdidas. Tal es el caso del desastre ocurrido hace 78 años, cuando una presa de jales se desbordó y sepultó a la mayor parte de una población del noreste de Michoacán. Esta tragedia se conoce popularmente como “Las Lamas de Tlalpujahua” y desde ese año (1937), esta población se conoce como “el pueblo que no se dejó morir” (Cambio de Michoacán, 2009).

El desastre ocurrido en Tlalpujahua resulta un hecho lamentable, pero también representa una oportunidad para estudiar con detalle las causas que lo originaron, el tipo de proceso de remoción en masa y el impacto socioeconómico y ambiental.

Con base en testimonios orales del desastre, información en reportes impresos, recopilación de fotografías del pasado y presente, el reconocimiento detallado del área de estudio y los análisis granulométricos se determinó la tipología del proceso de remoción en masa de "Las Lamas de Tlalpujahua". Se discuten sus características, con la finalidad de determinar los factores que tenderían a reducir los riesgos futuros de eventos peligrosos que pueden amenazar las vidas humanas y el medio ambiente.

El potencial desborde de las presas de jales en el mundo

Los residuos mineros finos o jales (o lamas) son una mezcla de líquidos y limos producidos por los procesos de molienda de la roca y mineral durante el proceso de extracción y beneficio de una mina. El volumen de residuos generalmente está muy por encima de los minerales obtenidos, por lo que a menudo estos son depositados en las partes altas de los valles fluviales y en todos los casos, son generalmente retenidos mediante un dique de madera (Klohn, 1972, Bligh, 1997, Sammarco, 2004, Blight y Fourie, 2003). La inestabilidad del talud y la debilidad de la estructura dependerá del diseño de los diques y en caso de desborde, el material exhibe un amplio rango de comportamientos, que van desde un flujo de escombros hasta un flujo de lodo (Rico et al., 2008a). En consecuencia, representan una fuerte amenaza de impacto social, económico y ambiental Blight y Fourie (2003).

En el siglo pasado y en muchos lugares del mundo se han reportado estudios relevantes sobre el rompimiento de diques en Sud África (Blight et al., 1981, Niekerk y Vlijoen, 2005), España (Ayala-Carcedo, 2004, Gens y Alonso, 2006), Italia (Genevois y Tecca, 1993, Chander y Tosatti, 1995, Berti et al, 1997) y en Chile (Dobry y Alvarez, 1967). Blight y Fourie (2003) documentaron 184 casos de rompimiento de diques en presas de jales mineros y presas municipales (US Comité Nacional sobre Grandes Presas, 1994), en un periodo de 72 años (1928 a 2000) que cobraron 1,400 víctimas.

Sammarco (2004) agrupa el peligro de las presas de jales en dos categorías: (1) erosión hídrica de los jales y acumulación aguas abajo y (2) licuefacción de los jales y potencial ruptura del dique. Rico et al. (2008) con base en la documentación de 147 casos en el mundo, resume diferentes factores detonantes: operaciones de

manejo, licuefacción sísmica, elevación del nivel freático, remoción de masas por inestabilidad de laderas, socavado fluvial, inadecuado o insuficiente borde de retención, fugas en tuberías, desbordamientos/derrames de los jales, rompimiento del dique, deshielos, inadecuada construcción de tuberías, precipitación pluvial extrema, filtrado insuficiente del drenaje, subsidencia de la mina y falla estructural. Sin embargo, concluye que la causa más frecuente se refiere a la precipitación extraordinaria de lluvia o nieve.

Por otro lado, por medio de una base de datos en que se relacionan el volumen de salida del fluido contra la distancia de su recorrido, Rico et al. (2008) clasifican estos fluidos en dos categorías: (1) flujos de desechos mineros con alta viscosidad y (2) flujos con un gran volumen de agua como los jales (70-85%), relacionados con lluvias extraordinarias y desbordamiento de presas.

A pesar de toda esta información aún existe un enorme vacío en estudios de colapsos de presas de jales a nivel mundial, agudizándose en los países latinoamericanos (Proyecto Multinacional Andino; SNGM, 2007), donde la mayoría de los desastres son reportados en ambientes naturales aparentemente con baja densidad de población, o en muchos casos donde aún no se ha depurado la normatividad para prevenir los desastres por la actividad minera.

El Distrito Minero de El Oro y Tlalpujhaua

El Distrito Minero El Oro-Tlalpujahua (DMOT) se localiza entre los estados de Michoacán y México, en la región hidrológica número 12 denominada como “Lerma Santiago” (CNA, 2013). En términos geológicos, el DMOT se encuentra en la parte media del Eje Volcánico Transversal de México de edad Mioceno-Plioceno (Gómez-Tuena et al., 2007).

Desde el punto de vista geomorfológico, el DMOT se emplazó en un área montañosa, con promedio de 2600 a 3000 metros sobre el nivel del mar (msnm), presentando moderados escalonamientos y pendientes que varían de 16° a 35°. La morfología del DMOT termina abruptamente hacia el norte, debido al sistema de fallas del Graben Morelia-Acambay. Hacia el este, el DMOT colinda con la región de El Oro, Estado de México, donde coexiste con conos monogenéticos de cenizas y escoria. El DMOT tiene un clima templado húmedo, con lluvias en verano con un promedio de precipitación de 900 mm por año (CNA, 2013).

El registro del sustrato geológico que aloja los depósitos minerales del DMOT data del Jurásico-Cretácico temprano que pertenece al basamento (Silva-Ortiz y Salgado-Soto, 1988, De La Teja Segura, 2000, Centeno-García et al., 2003). Este distrito se conoce como un productor de oro, no obstante, forma parte de una extensa provincia metalogenética de plata (Ostroumov y Corona Chávez, 1999, Albinson et al., 2001) (Figura 2). Las estructuras mineralizadas presentan una orientación NO-SE en un sistema hidrotermal de vetas en forma tabular, de aproximadamente 3.5 km de longitud y un espesor que varía de 0.5 a 33 m. El Oro y Plata presentes en las vetas son fluídos hipogénicos y sulfosales, asociados con calcita y cuarzo como minerales de ganga (Flores, 1920, Reiniery, 1955).

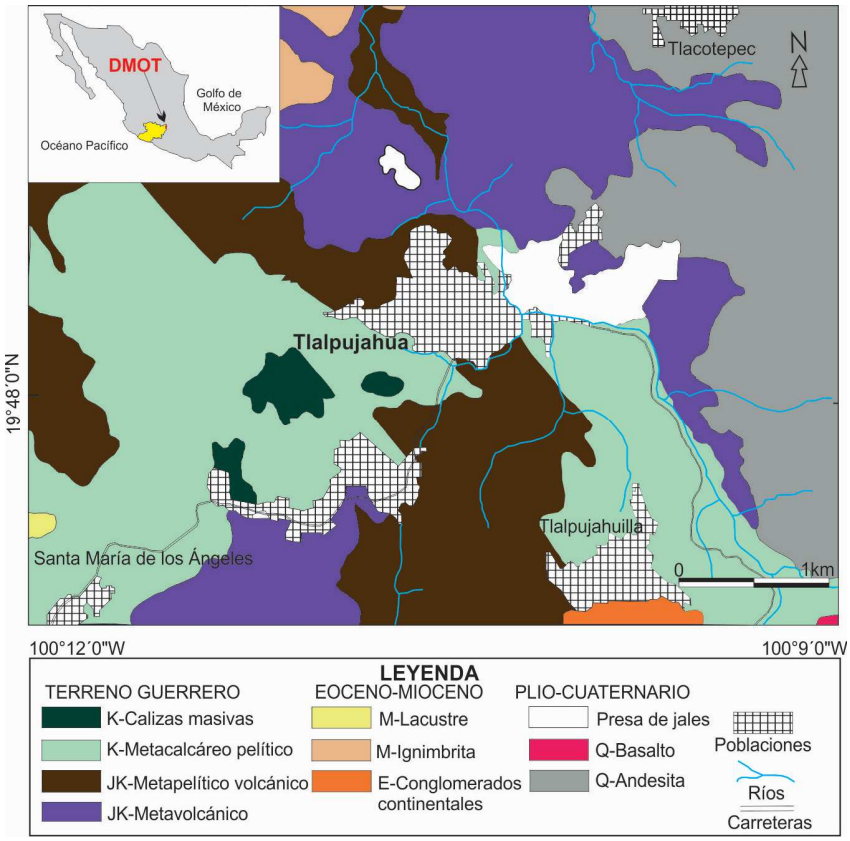

Figura 2. Localización del Distrito Minero El Oro-Tlalpujahua (DMOT), se muestran las presas de jales y las unidades litológicas principales que constituyen el Mapa Geológico. Modificado de: Corona Chávez et al. (2010).

El Crecimiento económico del Distrito Minero El Oro yTlalpujahua

La industria minera en México inició en la época Colonial, durante la cual el DMOT se conocía como el "Real de Minas de Tlalpujahua". Durante este periodo, varias vetas expuestas en las ciudades de El Oro y Tlalpujahua fueron explotadas. Durante los siglos XVI y XX, los trabajos de minería fueron continuos, empresas de gran tamaño, medianas y pequeñas contribuyeron a crear una amplia cultura ligada a la extracción y procesamiento de minerales, en especial del oro y la plata.

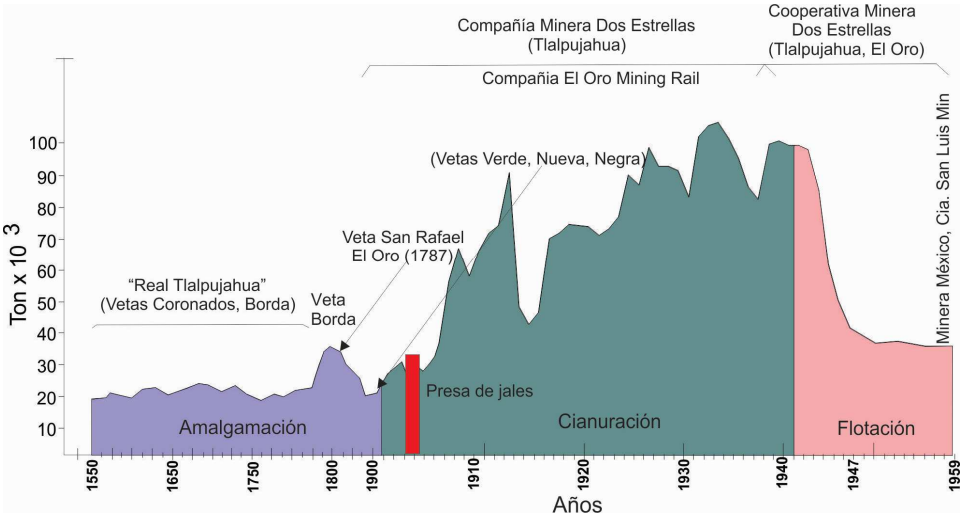

Figura 3. Registro histórico de las cantidades de material procesado por las diferentes empresas mineras que participaron el DMOT desde 1898 hasta 1959 (Después de Corona-Chávez et al., 2010).

El periodo más intensivo de producción minera fue a principios del siglo XIX, a partir del cual se logran identificar tres etapas (Figura 3): la primera (1820-1870), la compañía británica El Oro invirtió capital y tecnología en la rehabilitación de minas que fueron destruidas o abandonadas durante la guerra de Independencia de México; la segunda (1898-1938), las vetas más ricas en concentración de oro fueron descubiertas en la base del Cerro Somera que se explotaron intensivamente y la tercera (1939-1959), cuando la Cooperativa Minera "Las Dos Estrellas" en El Oro y Tlalpujahua y la Comisión de Desarrollo Minero iniciaron operaciones (Uribe Salas, 2008).

Las ciudades de Tlalpujahua y El Oro lograron un crecimiento social y económico con la construcción de las plantas de separación y fundido de metales, además se construyeron accesos, tiros y galerías para acceder a los depósitos minerales. Sin

embargo, también se incrementó la acumulación y vertido de residuos sólidos del proceso de beneficio de los materiales, conocido como jales mineros generando ≥40 millones de toneladas dispersas en el medio ambiente del distrito (Uribe Salas, 2008; Corona-Chávez et al., 2010).

La Presa de jales "Los Cedros"

Debido al próspero desarrollo de la minería en la región de Tlalpujahua, el 14 de diciembre de 1907, la Secretaría de Fomento Minero autorizó a la compañía minera "Las Dos Estrellas" la construcción de una presa de jales y el 25 de enero de 1908, la minera sometió a la Secretaría un proyecto que comprendía un área de 133,546 m^2 dentro de su propiedad, lugar donde se construyó la base del dique de la presa de jales hacia el arroyo de la Sangría, a una altitud aproximada de 2850 msnm y a un costado de la planta metalúrgica de Los Cedros. La presa se ubicó aproximadamente a 500 ms aguas arriba de las inmediaciones de la ciudad de Tlalpujahua.

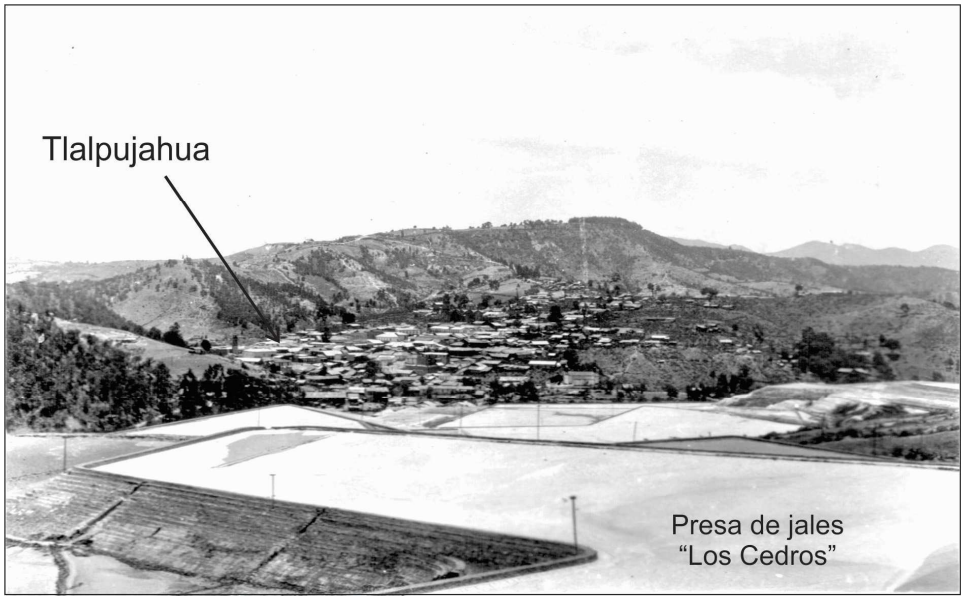

Figura 4. Vista panorámica de la presa de jales "Los Cedros" antes del rompimiento. Se observa una topografía plana, provocando modificaciones en la morfología original. En segundo plano, se observa el poblado de Tlalpujahua localizado al sureste.

El embalse inició con la construcción de un dique de madera como muro de contención y por más de tres décadas, los desperdicios de la mina "Las Dos

Estrellas" fueron depositados después de haber sido triturados, molidos, cianurados y procesados para su concentración. Esta presa de jales se conocía como "Lamas Los Cedros" debido a su cercanía con la planta metalúrgica Los Cedros. Debido a que los jales fueron depositados inicialmente en las partes altas del cauce de las barrancas, éstos modificaron significativamente la morfología de los ríos Sangría y Dos Estrellas, así como los alrededores de la ciudad de Tlalpujahua.

El espesor de los jales se incrementó rápidamente (cerca de 35 m) hasta una elevación aproximada de 2875 msnm, adquiriendo una forma de plataforma (Figura 4). Desde 1908 a 1936, el dique contenía aproximadamente 14.7 millones de toneladas (t) de desperdicio minero (Uribe Salas, 2009, Corona Chávez et al., 2010). En 1934, la mina registró su más grandiosa producción; 820,603 t, aproximadamente 2 mil t por día de material procesado. Para 1935 la compañía minera proyectó la construcción de un nuevo dique, argumentando que el dique Los Cedros estaba cerca de su capacidad de almacenaje. Sin embargo, este nuevo proyecto nunca se materializó.

La tragedia de las Lamas del 27 de mayo de 1937

> *A las 5.20 de la mañana se precipitó el alud con impulso y rapidez de tromba, y veinte minutos después había arrasado con su lodo infecto casas y tiendas, animales y gentes, dejando todo sepultado bajo 30 metros en el cauce del río(Juárez Bobadilla, 2007).*

Previo al desastre del 27 de mayo de 1937, el personal encargado de vigilar el buen estado del dique de la presa Los Cedros, reportaron fracturas y reblandecimiento del embalse, pero aparentemente, estos reportes fueron considerados de bajo peligro (Bernal Navarro, 2012). Este autor llegó a la conclusión que la base del embalse tenía un fuerte reblandecimiento debido a las persistentes lluvias y una fuga permanente en su base. De hecho, el 26 de mayo de 1937 a las 5:30 p.m., un enorme bloque (entre 6 y 8 toneladas) de jales se desprendió de la base de la presa, dejando un orificio de 30 m de ancho.

Después de este desprendimiento, los vigilantes alertaron a los pobladores río abajo para abandonar sus hogares debido a que un gran deslave podría ocurrir. Desafortunadamente, solo pocos pobladores atendieron a esta advertencia y en ese

mismo día, alrededor de las 11:20 p.m., un segundo y enorme flujo, también se desplazó río abajo, golpeando primero la planta metalúrgica Los Cedros y después el cerro Trigueros. Los testigos de estos hechos describieron a la masa de desechos mineros como un fluido lodoso y fétido que rápidamente se canalizó y desbordó el arroyo; además mencionaron que sintieron que el suelo vibraba a consecuencia del movimiento del flujo.

Debido a que el flujo golpeó contra el cerro Trigueros, una parte de éste, se desvió hacia el este río arriba, golpeando la planta metalúrgica Los Cedros y otra parte se movió al oeste río abajo, transformándose en una catastrófica ola de aproximadamente 30 m de altura que azotó la ciudad de Tlalpujahua y el cerro de San Jesús del Monte que tiene en su cima una parroquia con el mismo nombre. Entre la planta metalúrgica Los Cedros y el cerro de San Jesús del Monte al menos ocho barrios fueron completamente destruidos, entre los más importantes fueron La Cuadrilla, Chinches Bravas, El Dos y Las Cabecillas. Durante el desarrollo de la presente investigación (2013 y 2014) no fue posible encontrar un censo detallado de los poblados existentes en aquella época.

La enorme inundación provocada por el flujo de jales, arrastró personas y animales, destruyó todo lo que estuvo en su trayectoria, casas, árboles y postes eléctricos. La distribución del cableado eléctrico generó cortos circuitos, produciendo gases y explosiones que quemaron árboles en todas direcciones. Algunos testigos mencionan haber observado techos, troncos, muebles y plantas flotando. Durante este caos, algunas personas escalaron los cerros de Trigueros y San Jesús del Monte para salvar sus vidas. Los sobrevivientes que lograron ascender a los cerros, o que vivían en elevaciones, describen que el flujo tenía la apariencia de un lago de lodo fétido moviéndose río abajo.

La gigantesca masa de lodo se desplazó rodeando el cerro de San Jesús del Monte a lo largo del río Tlalpujahua, parte del flujo se depositó en las inmediaciones de Tlalpujahua y después de avanzar un kilómetro, el flujo alcanzó el poblado de El Carmen, inundando la parroquia con al menos 2.5 m de lodo, destruyendo el cementerio y el caserío localizado en el margen este del cauce del río Tlalpujahua (Figura 5). Una de las paredes de la parroquia permaneció intacta, protegiendo la pintura de la “Virgen del Carmen” – hecho que fue considerado como un milagro por los habitantes sobrevivientes. “Las Lamas”, nombre con que se conocen los depósitos de color blanco y gris, dejó una cifra lamentable de 300 muertos. El flujo lodoso no perdió fuerza durante su desplazamiento por el cauce del río Tlalpujahua y continuó río abajo por varios kilómetros, pero sin afectar ningún otro asentamiento

Figura 5. (a) Vista panorámica de la parroquia de San Jesús del Monte, previa al desastre, (b) Destrucción total de las viviendas localizadas al pie del cerro que corona la Parroquia después del paso del flujo de las Lamas; (c) Se aprecia la destrucción casi total de la iglesia de El Carmen, observándose el depósito de las Lamas conteniendo restos de las construcciones arrasadas.

humano. Días después del desastre, rescataron intacta la pintura de la virgen del Carmen y en una procesión religiosa fue trasladada a la Catedral de la ciudad de Tlalpujahua.

Caracterización del Depósito del Flujo de Lamas (DFL),

Forma y distribución de los flujos

Los afloramientos del depósito de jales actualmente se presentan dispersos a lo largo de los arroyos Dos Estrellas y El Carmen. Se identifican con facilidad debido a su color blanco o gris claro que contrasta con el color rojo del basamento de roca y el amarillo o café de los depósitos aluviales. Se distingue también de los paleosuelos y suelos recientes que por lo general son de color café.

"Las Lamas" se encuentran alrededor del cerro de San Jesús del Monte, en cuya cima se localiza la parroquia, la cual resistió la peor parte del desastre de 1937. Hoy en día este cerro y parroquia, localizados en los límites de la ciudad de Tlalpujahua presentan los afloramientos de la fase proximal del flujo a una altura de 2500 y 2540 msnm. Desde este lugar, se puede seguir el trazo del depósito corriente abajo a lo largo del río Tlalpujahua. El depósito aparece como terrazas de 1 a 2 m de espesor, o como una capa de 20 a 40 cm de espesor que sobreyace a antiguos depósitos aluviales, al basamento rocoso local de andesitas y calizas y ocasionalmente a paleosuelos.

Los depósitos de la fase distal aparecen aproximadamente a 9 km del cerro de San Jesús del Monte (estación de muestreo TL23 con altitud de 2350 msnm), donde presenta un espesor de 45 cm. En este lugar, un testigo describió que el flujo viajó más de 1 km desde esta localidad, presentando un metro de espesor, sin afectar ningún asentamiento humano, pero sí alterando la morfología del cauce del río Tlalpujahua. Los afloramientos más distales se localizan hacia el norte, a lo largo del valle de Venta de Bravo y cerca de la autopista Federal número 15, donde conecta con las ciudades de Maravatío y Atlacomulco.

Considerando una extensión mínima del depósito de Lamas de 11 km, evidenciado por los afloramientos presentes, se estima que el flujo cubrió un área de aproximadamente 982 000 m². Si suponemos un espesor promedio de 1 m para el depósito, se puede estimar que el depósito tiene un volumen mínimo de 982 000 m³ de material (0.00098 km³). Otra forma de corroborar este supuesto, fue utilizando las curvas de nivel y el espesor con la herramienta de Análisis Espacial del ArcGIS,

obteniendo un volumen de 1´492,000 m³ (0.00149 km³). Como se describe en el apartado siguiente, el flujo se movilizó con concentraciones de agua-sedimento de ~50%, por lo tanto, si se asume esta condición al momento de ocurrir el flujo, este debió tener un volumen mínimo de entre 0.0019 y 0.0029 km³ cuando ocurrió.

Tamaño de las partículas

Para el análisis del tamaño de las partículas se levantaron veintidós secciones estratigráficas de los remanentes del Depósito del Flujo de Lamas (DFL), éstas se realizaron a lo largo de la trayectoria del flujo y se analizaron con detalle 14 muestras de sedimentos tomadas de las diez secciones estratigráficas más representativas. Se tomó la escala logarítmica phi (Φ) como referencia de los tamaños de partícula, desde -8Φ a +12Φ (Tabla 1).

TABLA 1
Tamaños de partículas que constituyen el flujo de jales.

Muestra	Grava	Arena	Limo	Arcilla
	(-8ϕ a -2ϕ)	(-1ϕ a 4ϕ)	(5ϕ a 8ϕ)	(≥ 4ϕ)
TL-1A	4.2	64.41	27.93	3.46
TL-1B	39.67	56.54	2.26	1.53
TL-1C	7.06	66.14	23.71	3.09
TL-13D1	3.39	94.22	2	0.39
TL-13D2	0	98.96	0.84	0.20
TL-14D	0	96.35	2.98	0.67
TL-14C	0	97.41	2.08	0.51
TL-14B	0	97.7	2.01	0.29
TL-18	0	89.04	9.26	1.70
TL-19	0	89.3	8.98	1.72
TL-20	0	93.3	5.87	0.83
TL-21	8.27	80.67	5.9	5.16
TL-22	1.97	88.9	6.67	2.46
TL-23	11.16	88.74	0.05	0.05

La correlación de estas secciones sugirió que el depósito principal consistió de un depósito masivo. Sin embargo, en la columna estratigráfica con clave TL1 se registraron 3 horizontes (también llamados pulsos de depósito) y en las columnas TL8 y TL14 se identificaron dos horizontes. Entre las localidades de San Jesús del Monte y la parroquia de El Carmen el depósito posee una consistencia suave, pero en las cercanías de la parroquia, el depósito se endurece, presentando pequeños huecos que indican el escape de agua del interior del depósito.

En general, el DFL muestra un color que varía de gris claro a blanco, presenta un contacto inferior de tipo plano y un contacto superior de tipo erosivo que gradualmente se transforma en el suelo actual. Generalmente, el DFL sobreyace a un paleosuelo de color café o naranja desarrollado hasta el año 1937, que puede

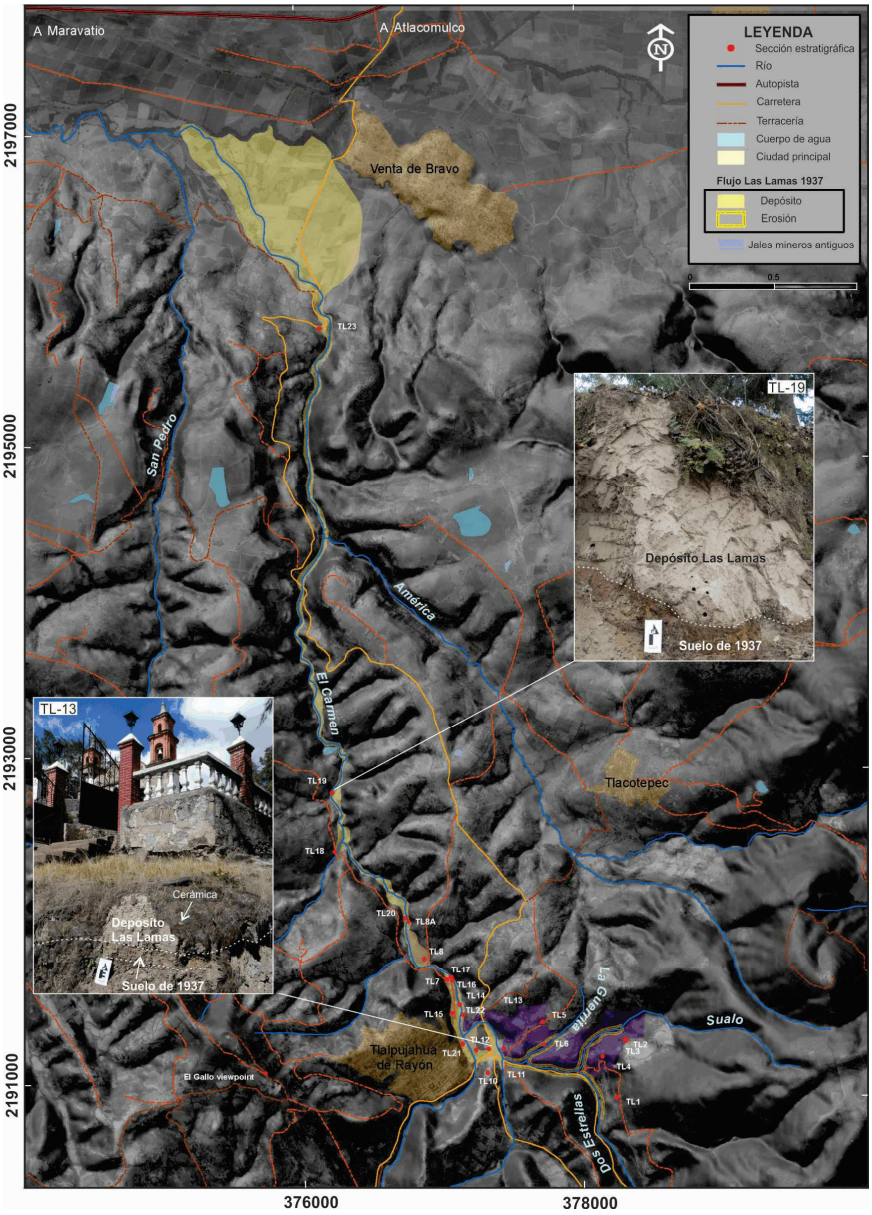

Figura 6. Modelo digital sombreado del área de estudio muestra la extensión total del flujo de las Lamas, iniciando en Tlalpujahua y extendiéndose hasta la población de Venta de Bravo. Se muestran todos los puntos de muestreo, donde se levantaron las columnas estratigráficas correspondientes. Se resaltan dos imágenes que dan idea del espesor que alcanzó el enorme flujo de jales.

contener fragmentos de cerámica u otros objetos (sitio TL13) y también se encuentra sobreyaciendo al esquisto verde que constituye el basamento de la zona (sitio TL-18). En la sección TL14, el DFL sobreyace a los siguientes horizontes: a) un suelo formado en 1937, b) un flujo hiperconcentrado de color café, c) un depósito de flujo de escombros con clastos que van de forma redondeada a angulosa (con fragmentos de vidrio) envueltos en una matriz de arena gruesa y d) al basamento de esquisto (Figura 6).

A todo lo largo del DFL se presentan espesores variables, por ejemplo, en la sección TL13 (parroquia de San Jesús del Monte) tiene alrededor de 40 cm (Figura 7A), para el sitio TL16 (0.8 km río abajo) 2.8 m, en la sección más lejana (TL-23) tiene 40 cm. En general, se puede decir que el depósito es masivo, donde los clastos mayores están soportados por una matriz mayor al 56% y compuesta de fragmentos que van del tamaño de la arena a partículas finas como las arcillas. Estas características indican que el depósito tiene una distribución granulométrica unimodal con la moda principal desde 1Φ a 4Φ y una buena selección (0.55-1.35 σΦ). La estructura, textura, y el tamaño de las partículas sugieren que el DFL tiene características de un flujo hiperconcentrado.

En la sección TL13 levantada en la parroquia de San Jesús del Monte, el DFL presenta diferentes espesores que van de 80 cm a 40 cm. Por un lado, sobreyace a una capa con abundantes restos de cerámica, alfarería y otros remanentes de origen antropogénico, también el depósito se encuentra sobre antiguos flujos de escombros y de un esquisto de color verde.

En la sección TL1 (depósito en la parroquia de El Carmen) el DFL exhibe una excelente secuencia, formada por tres horizontes diferentes (A-B-C) separadas por contactos erosivos. El horizonte B que contiene bloques de gran tamaño y algunos fragmentos de la parroquia, se puede correlacionar con la mayoría de depósitos de las otras secciones (Figura 7B). Estos horizontes son de colores café claro, masivos, parcialmente endurecidas y contienen huecos. La parte más baja de la capa A descansa directamente sobre el piso del atrio de la parroquia El Carmen, éste tiene 40 cm de espesor y contiene escasos clastos menores a 3 cm envueltos en una matriz de sedimentos del tamaño de las arcillas (~95%).

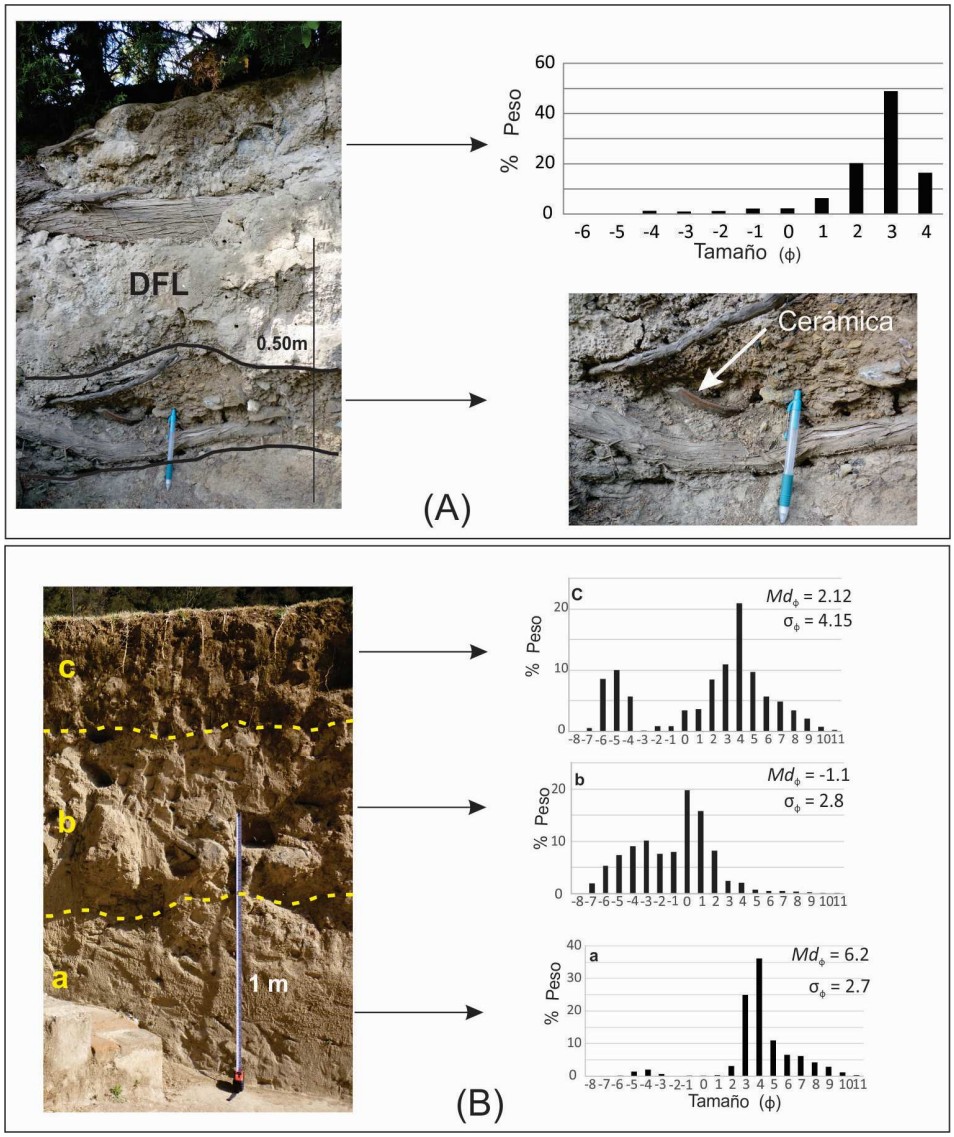

Figura 7. Detalles de los depósitos del Flujo de Lamas (DFL). Se aprecia su forma de emplazamiento, sus espesores y las características granulométricas de cada uno de estos. (a) Sitio TL-13, localizado en el cerro de la parroquia de San Jesús del Monte, en la base aparece un esquisto, seguido de un flujo de escombros que contiene fragmentos de cerámica y en la cima aparecen las Lamas. (b) Sitio TL-01 ubicado en la iglesia de El Carmen, la columna muestra tres estratos bien definidos, corroborando que el flujo de Lamas consistió de al menos tres pulsos.

El horizonte B (≤ 0.85 cm de espesor) contiene clastos de forma angular y subangular de 30 a 84 cm de longitud soportados en una matriz de sedimento arcilloso (80%). Este horizonte contiene fragmentos de la parroquia, vidrio, alfarería, trozos de madera y carbón. El horizonte C (≤60 cm de espesor) es heterolitológico, con clastos de ignimbrita y fragmentos subangulares de roca metamórfica en un rango de tamaño de 1.5 a 6 cm de longitud. Los clastos están dispersos en la parte media del horizonte y están soportados por una matriz de arena y limo (con 70 a 75% en peso). La parte superior del horizonte C está gradando al suelo moderno.

Discusión

Como consecuencia de la extracción minera realizada por la "Compañía Las Dos Estrellas", se acumularon en la presa de jales "Los Cedros más de 21 millones de toneladas de residuos mineros con un alto potencial de removilización". La intensa actividad minera trajo como consecuencia un cambio morfológico e hidrológico en la región, las laderas formadas por los jales eran muy inestables y sujetas a ser afectadas por algún proceso de remoción en masa que podía desplazar los jales en forma catastrófica.

Para analizar el desastre ocurrido en Tlalpujahua, se deben considerar tres aspectos importantes: 1) que el embalse de la presa "Los Cedros" se construyó aguas arriba del cauce del río Sangría, modificando drásticamente el paisaje; 2) que fueron ignoradas las advertencias de los vigilantes de la presa y los indicios de su posible rompimiento (Bernal Navarro, 2012) y 3) que los responsables de la mina y las autoridades no consideraron la evacuación, ni tomaron alguna medida preventiva al momento de reportar la infiltración de agua en la base de la presa. Todo esto contribuyó, como en otros casos del mundo a que el rompimiento de la presa adquiriera dimensiones de catástrofe (Gipson, 2003).

Colapso de la presa de jales y comportamiento del flujo

El fenómeno natural que funcionó como *factor detonante* del desastre de Tlalpujahua fue la precipitación pluvial extrema en la región, desafortunadamente no existen datos climáticos de ese tiempo, pero gracias a los avances tecnológicos y de métodos estadísticos, Martínez-Medina et al., 2012 utilizaron las bases de datos, con registros de 1972 a 2002, de la estación meteorológica 15183 cercana a Tlalpujahua y realizando escenarios regresivos, concluyeron que el DMOT mostraba una precipitación de 900 mm por año (904 mm de moda y una media de 34 mm). Estos resultados son muy parecidos a las condiciones de lluvia a nivel

regional. Por lo tanto, es importante señalar que los escenarios obtenidos durante este periodo de tiempo, al menos dos años se registraron lluvias extremas (excediendo los 1200 mm). La primera lluvia extrema está relacionada con el desastre de 1937 y el segundo, ocurrido en 1986, cuando la precipitación pluvial excedió los 2000 mm.

Por otro lado, existen evidencias de que periodos de lluvia extrema han provocado al menos dos grandes flujos de escombros catastróficos a lo largo de los arroyos de Tlalpujahua-Américas. Estos flujos son más antiguos que el ocurrido en 1937 y fueron observados en el registro estratigráfico del sitio TL-14. Uno de estos tiene una granulometría con fragmentos gruesos, muy parecida al flujo de 1937, además contiene fragmentos de vidrio y bloques de un antiguo puente destruido por este flujo de escombros; lo anterior sugiere que eventos previos de grandes magnitudes han sucedido a lo largo de estos arroyos.

Por otro lado, el testimonio de algunos sobrevivientes, fotografías históricas y el trabajo de campo realizado en esta investigación, ayudó a comprender el comportamiento dinámico del enorme flujo de jales. Ahora se expone con certeza que el flujo inició en la parte alta de la barranca de la Sangría, la masa inicial estaba compuesta por los materiales finos de los jales (limos y arenas) y cianuro mezclado con agua que rápidamente se desplazó hacia el fondo de la barranca. A escasos 700 m de la fuente, el flujo golpeó contra la planta metalúrgica de Los Cedros e impactó contra el área norte de la colina de Trigueros destruyendo cerca de 30 m de bosque.

La velocidad del flujo fue estimada mediante el trepado de obstáculos situados en forma perpendicular al movimiento, utilizando una relación simple de $v = \sqrt{2gh}$ en la cual h es el incremento de altura y g es la aceleración de la gravedad (Sheridan et al., 2005). La altura de marcas de lodo observadas en fotografías fue aproximadamente de 30 m, sugiriendo una velocidad de flujo de 25 m/s, de igual modo, las marcas de agua en otras estructuras indican que los materiales se movieron como un flujo hiperconcentrado, es decir, que la masa contenía aproximadamente el 50% de sedimentos y 50% de agua. Como ha sido enfatizado por Sheridan et al. (2005) estas estimaciones son consideradas como mínimos de velocidades porque esta ecuación no considera la fricción del flujo con la superficie de desplazamiento.

El flujo de jales alcanzó espesores hasta de 20 m y una velocidad estimada de 20 m/s (60 km/h) en el área de la parroquia de Jesús del Monte localizada a 1.4 km

desde la fuente del flujo. Testigos del desastre comentan que durante el movimiento del flujo estuvo golpeando las paredes frontales de la iglesia al grado de inclinarlas. Después del cerro de Jesús del Monte el flujo continuó a través de la barranca del río Tlalpujahua, destruyó a su paso varios vecindarios, incluyendo el poblado de El Carmen.

El flujo también afectó al poblado de El Carmen, localizado a 2.4 km desde la fuente del flujo, a una velocidad de 7 m/s (25 km/h) golpeando y tirando las paredes del lado Oeste de la parroquia, en tanto que la entrada y el altar resistieron el impacto. El flujo sepultó la parroquia con 2.5 m de escombros y lodo. Hoy en día, se logran observar las marcas de agua de la inundación, elevándose 5 m por encima del depósito actual de lodo, corroborando que toda la masa de materiales se movió como un flujo hiperconcentrado.

También se observó que el flujo fue capaz de arrancar y mantener en suspensión trozos de las paredes de la parroquia hasta de 30 cm de longitud, transportarlos y depositarlos hasta 8 km de distancia corriente abajo. En todos los afloramientos que se identificaron, los depósitos del flujo de jales aparecen como una masa uniforme de flujo hiperconcentrado, sin indicios de una dilución en la carga de sedimentos.

Consideraciones finales

La combinación de una lluvia extrema de al menos cinco días motivó el reblandecimiento y rompimiento del dique, provocando el colapso de la presa de jales Los Cedros y con ello el mayor de los desastres de origen minero en Tlalpujahua.

Con base en el reconocimiento de campo y los resultados de los análisis sedimentológicos de las muestras colectadas a lo largo de los arroyos de Sangría, Dos Estrellas y sobre el río Tlalpujahua, podemos asegurar que se produjeron al menos tres depósitos (pulsos) de flujos de escombros o hiperconcentrados, asociados a la catástrofe de 1937. Además, existen evidencias de que periodos de lluvia extrema han provocado por lo menos dos grandes flujos de escombros catastróficos a lo largo de los arroyos de Tlalpujahua-Américas previos al evento de mayo de 1937.

Los resultados de esta investigación proveen información útil sobre el tema de los colapsos de presas de jales que suceden a nivel mundial, ya que por lo general

éstos son el resultado de la combinación de fenómenos naturales y fallas en la construcción de los diques de contención de los jales mineros.

Esta experiencia en el poblado de Tlalpujahua y otros casos mundiales, indican que se debe tener un seguimiento muy detallado de las presas de jales activas e inactivas del mundo y tratar de implementar la normatividad necesaria para prevenir y minimizar los riesgos futuros a las poblaciones que habitan en las cercanías de estas obras mineras.

Hoy en día, la legislación mexicana no contempla los impactos ambientales por un posible colapso de las presas de jales y a pesar de los recientes avances en la investigación sobre el colapso de diques en estas presas. Sin embargo, como en México, los desastres continúan ocurriendo en todo el mundo (East, 2000; Azam y Li, 2010). Por ejemplo, el 4 de Octubre de 2010 el rompimiento de un dique en Hungría generó 700,000 m³ de jales con fatales consecuencias, poniendo en evidencia la importancia de comprender, prevenir y mitigar los efectos de un colapso de presa. Un estudio con estos propósitos fue posteriormente realizado por Neves Correia et al. (2011), quienes propusieron una metodología denominada: análisis de los modos y efectos por falla de presas de jales (por sus siglas en inglés FMEA) en los jales de Cerro de Lobo, Portugal.

En suma, es indispensable agregar datos técnicos y científicos específicos a las normas mexicanas que permitan prevenir desastres relacionados a los colapsos de presas de jales.

Agradecimientos

Agradecemos al Museo Tecnológico y Minero del Siglo XIX "Dos Estrellas" por la valiosa información proporcionada, las entrevistas y sobre todo por permitir el acceso al archivo fotográfico del desastre. También agradecemos a Remedios Cisneros del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por los análisis de las partículas finas de las muestras mediante la técnica laser.

Literatura citada

Albinson, T., Norman, D.I., Cole, D., y Chomiak, B.A. 2001. Controls on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: constraints from fluid inclusion and stable isotope data. Society of Economic Geologists Special Publication Series 8, 1-32.

Ayala-Carcedo, F.J. 2004. La rotura de la balsa de residuos mineros de Aznalcóllar (España) de 1998 y el desastre ecológico consecuente del rio Guadiamar: causas, efectos y lecciones. Boletín Geológico y Minero, 115, 711–738.

Azam, S. y Li, Q. 2010. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. Geotechnical News, December, 50-53.

Bernal-Navarro, G. (2012). Notas y apuntes para la historia de la Mina Las Dos Estrellas. APE Editorial 80p.

Berti, M., Genevois, R. y Tecca, P.R. 1997. The 1985 flow slide and debris flow at Stava (Italy), in Chen, C-L. (ed.) Debris-Flow Hazards Mitigation. American Society of Civil Engineers, New York, 309–321.

Blight, G.E. 1997. Destructive mudflows as a consequence of tailings dyke failures. Proc. Inst. Civ. Eng. 125, 9–18.

Blight, G.E. y Fourie, A.B. 2003. A review of catastrophic flow failures of deposits of mine waste and municipal refuse, Introductory report of the International Workshop on Occurrence and mechanisms of flows in natural slopes and earthfills, IW-FLOWS2003, Sorrento, Italy, 14–16 May 2003, Associazione Geotecnica Italiana (AGI), (http://www.unina2.it/flows2003/flows2003 /articoli/articoli.htm).

Blight, G.E., Robinson, M.J. y Diering, J.A. 1981. The flow of slurry from a breached tailing dam, Journal of South African Inst. Mining and Metallurgy, January, 1–8

Cambio de Michoacán 2009. Tlalpujahua, escenario idóneo para una historia de terror. Escenarios, Diario El Cambio de Michoacán, viernes 7 de Agosto. Disponible en: www.cambiodemichoacan.com.mx

Centeno-García, E., Corona-Chávez, P., Talavera-Mendoza, O. y Iriondo, A. 2003. Geology and tectonic evolution of the western guerrero terrane: a transect from Puerto Vallarta to Zihuatanejo: In: Geologic Transects Across Cordilleran Mexico, Guidebook for the fieldtrips of the 99th Geological Society of America Cordilleran Section Meeting April 1-3, 2003 & Publicacion Especial del Instituto de Geología y Centro de Geociencias UNAM, 201-228.

Chandler, R.J. y Tosatti, G. 1995. The Stava tailings dam failure, Italy, July 1985. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering, 113, 67–79.

CNA 2013. Comisión Nacional del Agua. Disponible en: http://www.conagua. gob.mx Consultado en junio de 2014.

Corona-Chávez, P., Uribe-Salas, J.A. Razo-Pérez, N., Martínez-Medina, M., Maldonado Villanueva, R., Ramos Arroyo Y.R. y Robles Camacho J. 2010. The impact of mining in the regional ecosystem: the mining district of El Oro and Tlalpujahua, Mexico. De Re Metallica, ISSN: 1577-903315, 2010 pp. 1-15

De la Teja, S.G. Carta Geológico-Minera de Tlalpujahua. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 2000. Chart and internal report 65p.

Dikau, R., Brundsden, D., Schorott, L. y Ibsen, M.L. 1996. Landslide recognition. Identification, movement and courses, Report No. 1 of the European Commission Environment programme. John Wiley & Sons, 251 pp

Dobry, R. y Alvarez, L. 1967. Seismic failures of Chilean tailings dams. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers, 94, 237–260.

East, D.R. 2000. Tailings dam failures — why do they continue to occur? Mining Engineering, 2, December, 57–60.

EPOCH 1993. (European Community Programme). Temporal occurrence and forecasting of landslide in the European Community. Flageollet, J. C. (ed), 3 volumes, Contract no. 90 0025. En: Ochoa-Tejeda, V. (2009).Control estructural de la inestabilidad de laderas: modelación tridimensional de los rasgos geológicos estructurales. Aplicación al estudio de los procesos de remoción en masa de La Soledad, Sierra Norte de Puebla. Facultad de Filosofía y Letras, División de Estudios de Posgrado, Tesis doctoral, UNAM.

Flores, T. 1920. "Estudio geológico-minero de los distritos de El Oro y Tlalpujahua", Boletín del Instituto Geológico de México, Núm. 37, México.

Genevois, R. y Tecca, P.R. 1993. The tailings dams of Stava (northern Italy): An analysis of the disaster. In Chowdhury, R. and Sivakumar, M. (eds) Environmental Management. Geo–Water and Engineering Aspects. A.A. Balkema, Rotterdam, 23–38.

Gens, A. y Alonso, E.E. 2006. Aznalcóllar dam failure. Part 2: Stability conditions and failure mechanism. Géotechnique, 56, 185–201.

Gipson, A.H. 2003. Tailings dam failures — the human factor. In: Tailings and Mine Waste 03. Balkema Publishers, Lisse, A.A. 451–456.

Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T., y Ferrari, L. 2007. Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt, en Alaníz-Álvarez, S.A., en Nieto-Samaniego, Á.F., eds., Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México: Geological Society of America Special Paper 422, p. 129–181.

Juárez Bobadilla J.A. 2007. Las Lamas. 27 de mayo 1937. El Despertador Tlalpujahuense, http://tlalpujahua.blogspot.mx/2007/06/las-lamas-27-de-mayo -1937.html. Consulta: 23-Abril-2014.

Klohn, W. 1972. Hidrografía de las zonas desérticas de Chile. Contribución Proyecto CHI-35. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 188 p.

Lavell, A. 1997. Viviendo en Riesgo. Comunidades vulnerables y prevención de desastres en América Latina. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. La Red. 27 p

Martínez Medina M., Corona Chávez P, Ramos Arroyo Y., Bocco Verdinelli G. y Martínez Arredondo J.C. 2012. Caracterización hidrográfica del distrito minero el oro y tlalpujahua: implicaciones en los procesos de erosión y de remoción de los residuos mineros. Simposio de la cuenca del lago de Cuitzeo, Morelia Mich. 14 al 16 de noviembre. Memorias p. 35-42.

Neves Correia dos Santos, R., Maria Mello Saraiva Caldeira, L., & Bilé Serra, J.P. 2011. FMEA of a tailings dam, Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, DOI:10.1080/17499518.2011. 615751

Nierkirk, H.J. Van y Viljoen, M.J. 2005. Causes and consequences of the Merriespruit and other tailings-dam failures. Land Degradation and Development 16, 201–212.

Ostroumov, M. y Corona-Chávez, P. 1999. Ensayo metalogenético del estado de Michoacán. En: La Carta Geológica del Estado de Michoacán escala 1: 250 000 en 4 hojas con notas explicativas, 27p.

Ramos-Arroyo, Y.R. y Siebe-Grabach, C.D., 2006, Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 23 (1), 54-74.

Reiniery, E. 1955. Aceituno, Informe geológico de la región auroargentífera de El Oro, México, y Tlalpujahua, Michoacán, México, s/e. Consejo de Recursos Minerales, 56p.

Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A.R., Dıez-Herrero, A., y Pereira, H.G. 2008. A review of the European incidents in the worldwide context Reported tailings dam failures. Journal of Hazardous Materials 152, 846–852.

Rico, M., Benito, G. y Díez-Herrero, A. 2008a. Floods from tailings dam failures. Journal of Hazardous Materials, 154 (1–3) 79–87.

Sammarco, O. 2004. A tragic disaster caused by the failure of tailings dams leads to the formation of the Stava 1985 Foundation. Mine Water and the Environment 23, 91–95.

Sheridan, M. F., Stinton, A. J., Patra, A., Pitman, E. B., Bauer, B., and Nichita, C. C.: Evaluating Titan2D mass-flow model using the 1963 Little Tahoma Peak avalanches, Mount Rainier, 15 Washington, J. Volcanol. Geoth. Res., 139, 89–102, 2005.

Silva Ortiz, I. y Salgado Soto, Z. 1988. Estudio estratigráfico estructural en la región de Tlalpujahua- El Oro, Edos de Mich. Méx. Ed. Instituto Politecnico Nacional. México D.F. pp 74.

SNGM, 2007. Servicio Nacional de Geología y Minería. Movimientos en masa en la región andina. Una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino. Publicación geológica multinacional No. 4. 404 p.

Uribe Salas, José Alfredo 1994. Recuento histórico bibliográfico de la minería en la región central de México. Ed. UMSNH, IIH y Departamento de Historia de México. pp 271.

Uribe Salas, José Alfredo, 2008. Historia de la mineria en Michoacán, volumen II. Ed. UMSNH, Sociedad Mexicana de Mineralogía, Museo Tecnológico del Siglo XIX “Las Dos Estrellas”, 2 vols. Morevallado Editores, Morelia, Michoacán. 227p.

Uribe Salas, J. A. 2009. Historia económica y social de la Compañía Minera “Las Dos Estrellas” en El Oro y Tlalpujahua, 1898-1959. México, Universidad Autónoma Metropolitana, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morevallado Editores, Morelia, Michoacán, 560p.

US National Committee on Tailings Dams 1994. Tailings dam incidents. Denver, Colorado, USA. 182 p.