

LA SECUENCIA VOLCÁNICA TERCIARIA DEL CERRO LA VIRGEN Y LOS PROCESOS GEOMORFOLÓGICOS QUE GENERAN RIESGO EN LA ZONA CONURBADA ZACATECAS-GUADALUPE

Escalona-Alcázar, F.J.¹, Suárez-Plascencia, C.², Pérez-Román, A.M.³, Ortiz-Acevedo, O.⁴ y Bañuelos-Álvarez, C.⁵

¹ Depto. de Ordenamiento Ecológico, Instituto de Ecología y Medio Ambiente de Zacatecas, GODEZAC

Correo Electrónico: fescalona@hotmail.com

² Depto. de Geografía y Ordenación Territorial, CUCSH, Universidad de Guadalajara

³ Consejo Estatal de Seguridad Pública, GODEZAC

⁴ Unidad Académica de Agronomía, UAZ

⁵ Dirección de Informática, ITESM, Campus Zacatecas

RESUMEN

En este trabajo se presentan la secuencia estratigráfica del Cerro La Virgen y los sitios vulnerables a ser afectados por peligros derivados de procesos geológico-geomorfológicos activos en la zona urbana de Zacatecas-Guadalupe. De la base a la cima, las unidades litológicas son: Microdiorita Zacatecas, Conglomerado Rojo de Zacatecas, Tobas de pómez y líticos, Tobas cristalinas, Tobas líticas, Derrames riolíticos, Tobas de lapilli, Tobas brechadas y Domos. Esta secuencia está cortada por fallas y fracturas de rumbo preferente NW-SE, paralelas a la deformación observada en la Sierra de Zacatecas. Geomorfológicamente, la zona está formada por cuatro unidades bien definidas, que son: 1) Zonas semiplanas con pendientes de 0 a 12°, 2) laderas de pendientes moderadas de 12° a 30°, 3) Rampas con pendientes de 30° a 45° y 4) Escarpes con pendientes mayores a 45°. Todas estas unidades están disectadas por una red fluvial dendrítica capturada por el Arroyo de la Plata. Gran parte de las cuatro unidades muestran una cubierta vegetal degradada. Los peligros identificados se deben a depósitos de talud, caída de bloques, formación de cárcavas y reptación del suelo, procesos que han sido acelerados de diferente forma por el crecimiento urbano anárquico desarrollado durante la última década a lo largo de las laderas del Cerro La Virgen y la ladera sur de la Veta de la Cantero. Este crecimiento desordenado ha deforestado la escasa vegetación existente y alterado la red fluvial. Lo anterior ha promovido el desprendimiento de bloques y facilitado el proceso de erosión fluvial, sobre todo en los planos de falla, fractura o foliación presentes, tanto en el Cerro La Virgen, como en el sur de la Veta de la Cantero. La forma actual de crecimiento urbano podrá incrementar el riesgo si no se toman las medidas adecuadas en su ordenamiento.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Zacatecas debe su fundación a las ricas vetas polimetálicas (Ag, Pb, Zn, Cu y Au) que existían en la parte norte. Su crecimiento refleja el origen relacionado con el trazo de los antiguos campamentos mineros. Dicho crecimiento, aunado ala topografía abrupta de la zona, no permitió hacer una distribución regular de sus calles (Enciso-de la Vega, 1994).

La geología de la ciudad y sus alrededores está pobremente descrita. Si bien la actividad minera dio origen y fue el principal motor de desarrollo desde 1548, son escasos los trabajos que describen con detalle la secuencia estratigráfica, principalmente de las rocas del Terciario.

Los trabajos geológicos están enfocados a la descripción y el origen de los yacimientos minerales. En este sentido, el primer mapa geológico de la región fue editado por el Consejo de Recursos Minerales a mediados del siglo pasado (Pérez-Martínez, 1961). La descripción de la secuencia estratigráfica trata principalmente de las rocas volcánicas del Mesozoico, que es donde se encuentran los

yacimientos minerales del distrito minero de Zacatecas. En contraste, la secuencia volcánica del Terciario y su deformación, cuyo origen se ha asociado con la evolución de una estructura de caldera que habría provocado la mineralización de la parte sur del distrito minero de Zacatecas (Ponce y Clark, 1988), ha sido pobremente descrita y definida; la única evidencia acerca de la existencia de esta caldera es su rasgo topográfico semicircular. Los trabajos que tratan sobre la geología de la zona no son lo suficientemente detallados para soportar la hipótesis de la caldera de Zacatecas.

La falta de definición de las rocas volcánicas del Terciario ha provocado confusión en la definición de unidades litológicas formales. En la tabla estratigráfica de la Figura 1 se muestran las unidades nombradas por diferentes autores, donde se puede notar que la correlación entre unidades litológicas es difícil debido en parte a la diferencia en los nombres de las unidades y la litología misma.

Los trabajos realizados en la zona proporcionan un conocimiento general de la geología; sin embargo, las características geológicas y geomorfológicas del área urbana y alrededores de las ciudades de Zacatecas y Guadalupe están pobremente documentadas. El análisis de los procesos geomorfológicos y su morfometría

REFERENCIAS				
EDAD	Ponce y Clark, 1988	Consejo de Recursos Minerales, 1991	Enciso-de la Vega, 1994	Este trabajo
Oligoceno	Formación Capilla Formación La Virgen 36.8 Ma, sanidino	Tobas riolíticas con intercalaciones de derrames de composición riolítica	Formación La Bufa Riolita los Alamitos Brecha Zacatecas Formación Lago la Encantada	Tobas brechadas Tobas de lapilli Derrames riolíticos Tobas líticas Tobas cristalinas Tobas de pómez y líticas
Eoceno	Piroclastos y Volcaniclastos los Alamitos 46.8 Ma, biotita K-Ar Formación Guadalupe			
Paleoceno	Conglomerado Rojo de Zacatecas	Conglomerado Rojo	Conglomerado Polimítico	Conglomerado Rojo de Zacatecas
Cretácico	Microdiorita Zacatecas 74.3 Ma, K-Ar	Formación Chilitos	Diorita	Microdiorita Zacatecas

Figura 1. Tabla de correlación de la secuencia estratigráfica del Cerro La Virgen. La línea ondulada indica que no se tiene definido el límite de la unidad litológica; la línea continua indica que el límite está bien definido. Aunque algunos límites se muestran como bien definidos existe incertidumbre en la ubicación de las muestras fechadas. Las áreas en gris claro indican posibles discordancias.

permite utilizar los resultados como herramienta dentro de la planeación urbana, ya que identifica en una región el tipo, extensión y tiempo de ocurrencia de los eventos, así como sus causas y su modelado. Al respecto, el Sistema Estatal de Protección Civil considera que sólo la actividad sísmica y la inestabilidad de terrenos son los fenómenos que pueden afectar al Estado de Zacatecas (Sistema Estatal de Protección Civil, 2002).

En el Atlas Estatal de Riesgos se establece la necesidad de identificar las zonas de riesgo geológico, así como la detección de posibles fallas activas que atraviesen la zona urbana (Sistema Estatal de Protección Civil, 2002). De acuerdo con lo anterior, los objetivos de este trabajo son:

- 1) Describir la secuencia volcánica del Cenozoico de las ciudades de Zacatecas, Guadalupe y sus alrededores.
- 2) Realizar el análisis de las estructuras cartografiadas.
- 3) Identificar los procesos geomorfológicos que ocurren en la zona de estudio.
- 4) Cartografiar los sitios donde se identifiquen procesos geomorfológicos activos e identificar la influencia del crecimiento urbano en su desarrollo.

METODOLOGÍA

En la zona conurbada Zacatecas-Guadalupe se realizó la cartografía de unidades litológicas, fallas, fracturas, depósitos de talud, zonas de cárcavas y de los sitios donde hay bloques caídos de rocas volcánicas de altura mayor que 3 m. Para ello se utilizó un mapa topográfico a escala 1:10,000, un geoposicionador GARMIN y fotografías aéreas a escala aproximada 1:40,000. La información obtenida en campo se digitalizó en AutoCAD 2000. Para el análisis geomorfológico se utilizaron los modelos vectoriales del INEGI claves F13B58 y F13B68, escala 1:50,000 con curvas de nivel cada 10 m. La información digital se utilizó en el software IDRISI 32 y se generó el modelo digital del terreno del que derivó el mapa de pendientes, así como la morfometría y el cálculo del área urbana al año 2000.

Se cartografiaron los bordes de los depósitos de talud y, cuando fue posible, se cubrió la zona de la cual presumiblemente derivaron. Respecto a las cárcavas, sólo se cartografiaron aquellas que desarrollan canales cuya profundidad es mayor de 30 centímetros, pues existen numerosos sitios donde su desarrollo es incipiente. Los bloques caídos corresponden a fragmentos de rocas volcánicas mayores de 3 m. Para darle claridad al mapa geológico las zonas de reptación del suelo no se muestran.

Se les asignaron nombres informales a las unidades litológicas cartografiadas, cuya clasificación se basó en el análisis de muestras de mano. El análisis geométrico de las fallas y fracturas cartografiadas se hizo usando una cuadrícula de 40x40 m como base pues las estructuras más pequeñas son de 40 m de longitud. Esta cuadrícula también se utilizó para medir la orientación de las fallas y fracturas reportadas por Ponce y Clark (1988) y Enciso-de la Vega (1994). Los datos se separaron respecto a su posición para diferenciar la deformación dentro y fuera de la estructura considerada como caldera.

MARCO GEOLÓGICO DEL ÁREA

La descripción de la secuencia estratigráfica varía de un autor a otro, lo que ha provocado que la misma unidad litológica tenga diferentes nombres (Figura 1). En la descripción de la secuencia estratigráfica se identifican tres grandes unidades litológicas que, de la base a la cima son: Formación La Pimienta (Burckhardt, 1906; Gutiérrez-Amador, 1908; McGehee, 1976; Ransom *et al.*, 1982), Metasedimentos La Pimienta (Ponce y Clark, 1988) o Metasedimentos Zacatecas (Enciso-de la Vega, 1994) del Triásico Superior (Cárnico). Aunque esta formación no aflora en el área de estudio, posiblemente constituye el basamento. La Formación La Pimienta está formada por esquistos, filitas y pizarras, ocasionalmente con fósiles de pelecípodos y gasterópodos, además de escasos horizontes de rocas volcánicas. Este basamento está cubierto por la Microdiorita Zacatecas (Ponce y Clark, 1988), Formación Chilitos (Consejo de Recursos Minerales, 1991) o Diorita (Enciso-de la Vega, 1994) del Cretácico Superior (Figuras 1 y 2), que está formada por lavas andesíticas almohadilladas fuertemente foliadas

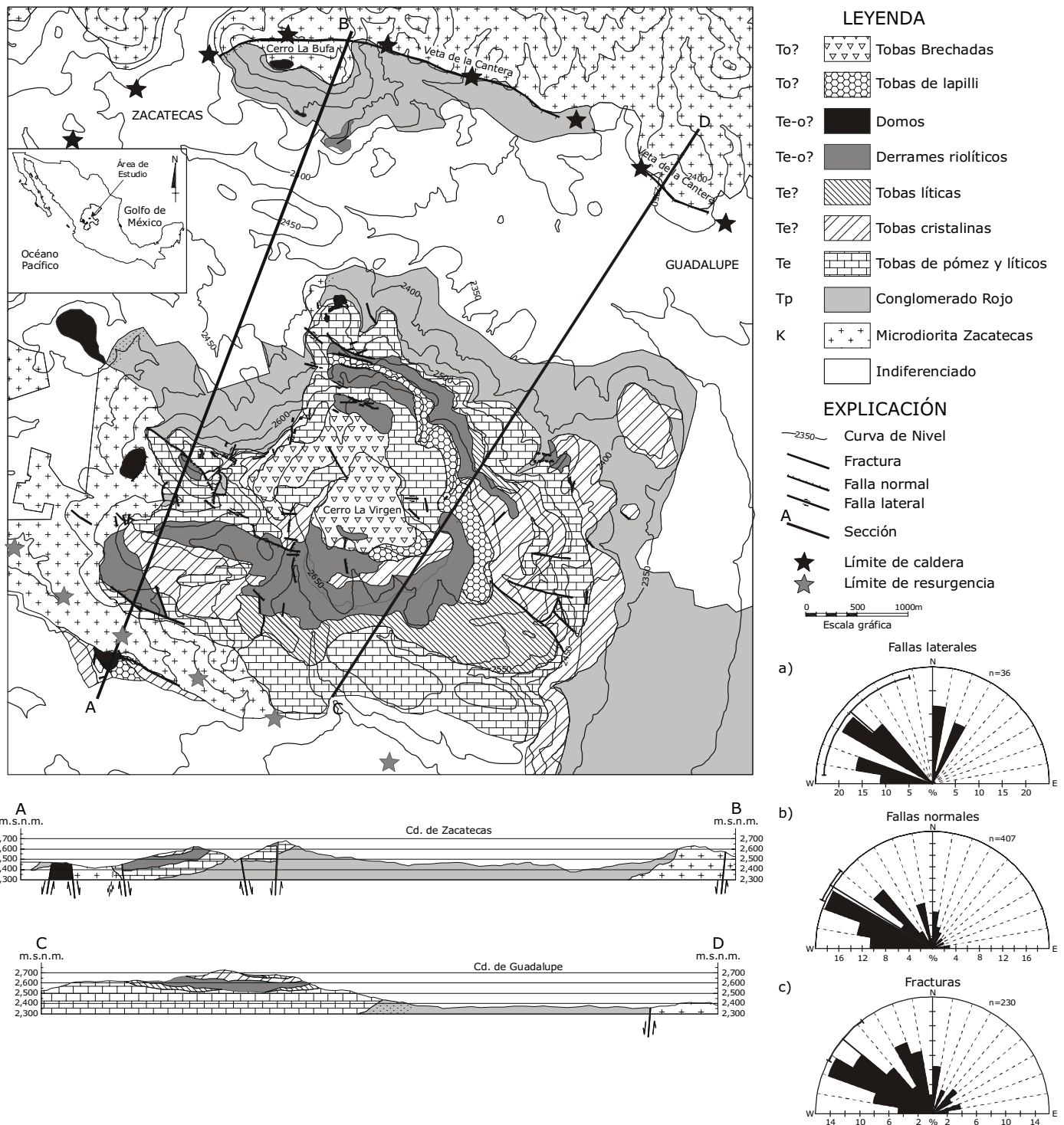


Figura 2. Mapa geológico de las ciudades de Zacatecas, Guadalupe y sus alrededores. El recuadro de la parte superior izquierda muestra la ubicación geográfica del Estado de Zacatecas. Se muestran un par de secciones estructurales para darle claridad a la interpretación de la distribución de las unidades litológicas cartografiadas. En las rosas de orientación de las estructuras cartografiadas: n = número de datos: a) fallas laterales, b) fallas normales y c) fracturas. El área sin achure en la parte centro-norte del mapa corresponde a la zona urbana; mientras que en la zona sur corresponde a unidades litológicas indiferenciadas. Los límites de la caldera fueron tomados de Ponce y Clark (1988).

con espilitización intensa. Estas lavas, en algunos lugares, están interestratificadas con capas de lutitas de color gris claro. Al conjunto anterior le sobryace en discordancia el Conglomerado Rojo de Zacatecas (Pérez-Martínez, 1961; Ponce y Clark, 1988; Conse-

jo de recursos Minerales, 1991; Enciso-de la Vega, 1994) de edad Paleoceno, consistente en un conglomerado polymítico constituido por clastos subangulares a subredondeados de microdiorita, esquistos, cuarcita y granitoides. Cubre al conglomerado una secuen-

cia volcánica pobremente descrita (Enciso-de la Vega, 1994; Ponce y Clark, 1988) formada por intercalaciones de tobas, derrames riolíticos, domos, brechas y depósitos epiclásticos cuyo origen ha sido asociado a una caldera por Ponce y Clark (1988). Esta secuencia presenta un contenido de sílice que varía de alto a moderado y un contenido de potasio alto (Consejo de Recursos Minerales, 1991). En la cartografía de detalle de la secuencia volcánica del Cerro La Virgen se han propuesto descripciones alternas para las unidades previamente definidas (Escalona-Alcázar *et al.*, 2000, 2001 y 2002).

Se ha interpretado que los rasgos estructurales del Distrito Minero de Zacatecas son del Cenozoico y están asociados a dos eventos de deformación: el primero por la evolución de la caldera entre 46.8 y 36.8 Ma (Ponce y Clark, 1988; Consejo de Recursos Minerales, 1991) y el segundo provocado durante el periodo extensional del *Basin and Range*, aunque no se indica la edad de este evento en la región (Ponce y Clark, 1988; Consejo de Recursos Minerales, 1991). Sin embargo, es probable que sea correlacionable con el fallamiento normal (σ_3 orientado de ENE a NE) del intervalo entre 32 y 27 Ma identificado en la porción meridional de la Mesa Central por Aranda-Gómez *et al.* (2000). Otros periodos de extensión y magmatismo ocurrieron en los periodos 24-20, 13-10 y < 5 Ma (Aranda, Gómez *et al.*, 2000; Nieto-Samaniego *et al.*, 1997). No hay información suficiente para definir la edad de la deformación del *Basin and Range* en la porción meridional de la mesa central (Aranda-Gómez *et al.*, 2000), pero es probable que la deformación principal haya ocurrido durante el Oligoceno Tardío y que las estructuras formadas en este periodo hayan sido reactivadas durante posteriores etapas de deformación (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997).

RESULTADOS

LITOLOGÍA

En esta sección se hará la descripción, en orden estratigráfico ascendente, de las unidades de rocas volcánicas del Terciario.

TOBAS DE PÓMEZ Y LÍTICOS

En la base de la secuencia volcánica terciaria del Cerro La Virgen afloran las *Tobas de pómez y líticos* (Figuras 1 y 2). Esta unidad está formada por estratos de color que varían de amarillo claro a diversas tonalidades de café. El espesor de los estratos varía de 1 cm a 20 m, sin que muestren un arreglo preferente. Esta unidad está formada por depósitos piroclásticos de caída y de flujo, con cantidades variables de pómez y de fragmentos líticos; ocasionalmente muestra brechamiento. La distribución de pómez y líticos en los estratos es heterogénea. En la base de la unidad se encuentra un depósito de nube rasante cubierto por un flujo piroclástico rico en fragmentos líticos. Las tobas más abundantes son pumicíticas y ocupan la parte central de la unidad; su espesor máximo es de aproximadamente 70 m que disminuye hacia el N y NW. Cubren y subyacen a esta unidad depósitos con cantidades variables de pómez y fragmentos líticos, así como delgados depósitos de tobas de ceniza. La textura dominante de esta unidad es vitroclástica, aunque están presentes las texturas fragmental, brechada y en menor proporción

porfídica. La mineralogía está compuesta por fragmentos de cristales de cuarzo y feldespato, con biotita en cantidades variables y sanidino escaso. Los fragmentos de pómez son de forma subredondeada, con bordes bien definidos, cuyo tamaño varía de aproximadamente 2 milímetros hasta 40 cm; son comunes los de 2 a 5 cm. En los estratos ricos en pómez la abundancia de este material varía entre 10 y 30%. Esta unidad ocasionalmente presenta alteración argílica intensa, y es común la argilitación selectiva de la pómez y la matriz.

En las secciones A-B y C-D (Figura 2) se observa que esta unidad descansa, en la parte norte del Cerro La Virgen, sobre el Conglomerado Rojo de Zacatecas. En la parte sur del área de estudio no aflora la base de la unidad pero se sospecha que descansa sobre la Microdiorita Zacatecas. En la parte sur de la sección A-B (Figura 2) hay un pequeño afloramiento de conglomerado que cubre a algunas rocas volcánicas del Terciario (Tobas Cristalinas y Tobas de Lapilli, descritas más adelante), pero que es más joven que el Conglomerado Rojo de Zacatecas.

TOBAS CRISTALINAS

Esta unidad piroclástica cubre a las *Tobas de pómez y líticos* (Figuras 1 y 2). Son de color que varía de rosa a rosa claro, ocasionalmente café claro. El espesor de los depósitos varía de 1 cm a 2 m y son comunes los estratos menores a 20 cm. La unidad no muestra estructuras que permitan determinar el modo de emplazamiento y es común que se encuentren adyacentes o estratigráficamente abajo de los Derrames Riolíticos (descritos más adelante). La litología de esta unidad es similar en todo su espesor de aproximadamente 80 m. La roca es compacta y la textura dominante en muestra de mano es la porfídica, la fragmental es ocasional y rara vez es eutáxita. La mineralogía está formada por fragmentos de cristales de plagioclasa, cuarzo y cantidades variables de biotita en una matriz microcristalina. Contiene escasa pómez, cuyo tamaño promedio es de 2 mm, esporádicamente en forma de fiammes de menos de 5 mm de longitud y 1 mm de ancho, con bordes bien definidos. La pómez puede mostrar argilitación. Los fragmentos líticos, cuya composición es riolítica y están generalmente oxidados, son ligeramente más abundantes que la pómez y su tamaño promedio es de 1 mm. Esta unidad presenta vetillas rellenas con cuarzo.

En las secciones A-B y C-D (Figura 2) se observa que las *Tobas cristalinas* cubren a los Derrames Riolíticos. Por tener características mineralógicas y texturales bastante homogéneas, es posible que esta unidad sea correlacionable con los derrames riolíticos y las tobas cristalinas, aunque no se tienen evidencias de campo o análisis químicos para afirmarlo.

TOBAS LÍTICAS

En la parte oriental y meridional del Cerro La Virgen la unidad de *Tobas líticas* cubre a las Tobas de pómez y líticos (Figura 2). En la porción centro-oriental de este cerro hay un cambio lateral de facies de las *Tobas líticas*, por lo que en la margen centro-oriental del cerro disminuye el contenido de fragmentos líticos y se incrementa el contenido de ceniza. El color de las *Tobas líticas* varía en diversas tonalidades de café, ocasionalmente rosado. El espesor de los es-

tratos varía de 1 a 20 cm, con estratos alternados de poco más de 2 m de espesor. El espesor de esta unidad es de aproximadamente 100 m, en la parte suroriental y disminuye hacia el norte y occidente. La textura dominante es la fragmental; sin embargo, es posible encontrar estratos con texturas vitroclástica y porfídica. La mineralogía está formada por fragmentos de cristales de plagioclasa y cantidades variables de biotita y cuarzo, en una matriz afanítica moderadamente silicificada. Los fragmentos líticos son de riolita, pueden mostrar oxidación o argilitización y su tamaño varía de 2 a 20 cm, sin que muestren una distribución preferente en sentido vertical y horizontal en los depósitos. En los estratos que contienen pómez los fragmentos líticos muestran una gradación normal, mientras que los fragmentos de pómez no tienen arreglo gradacional; en estos estratos el diámetro de la pómez y los líticos varía de 0.5 a 1.5 cm.

Como se observa en la sección C-D (Figura 2), las *Tobas líticas* afloran en la parte oriental del Cerro La Virgen, cubriendo a las Tobas de pómez y líticos y subyaciendo a los Derrames riolíticos.

DERRAMES RIOLÍTICOS

Los *Derrames riolíticos* cubren parcialmente a las Tobas líticas, Tobas cristalinas y a las Tobas de pómez y líticos. Los derrames son, junto con las Tobas de pómez y líticos, las unidades volcánicas del Cenozoico de más amplia distribución en el Cerro La Virgen (Figura 2). El color de los *Derrames riolíticos* varía en diferentes tonalidades de rosa. El espesor máximo de los derrames es de aproximadamente 100 m. Las texturas dominantes son la porfídica, esferulítica y brechada, en ese orden de abundancia, con una estructura bandeada. Las bandas muestran pliegues de flujo viscoso; no obstante son comunes el bandeamiento paralelo y los intervalos masivos. En el interior del depósito se observan fragmentos embebidos del mismo derrame, con bordes bien definidos, lo que sugiere autobrechamiento. La mineralogía está constituida por fragmentos de cristales de plagioclasa, biotita y escaso cuarzo. Los horizontes con fragmentos líticos y pómez son raros, mientras que las esferulitas son abundantes, con tamaño promedio de 5 mm. Es posible que los *Derrames riolíticos* sean una facies correlacionable temporalmente a las *Tobas cristalinas*.

En las secciones A-B y C-D (Figura 2) se muestra la distribución de los derrames riolíticos, principalmente en la parte centro-sur del Cerro La Virgen.

DOMOS

En el área de estudio las estructuras dómicas están espacialmente relacionadas con fallas normales (sección A-B, Figura 2). Los *Domos* son presumiblemente de composición riolítica; su color varía de rosa a negro verdoso, posiblemente por cambios composicionales. Los *Domos* tienen textura porfídica (unidades rosas) o hialofídica (unidad negro verdoso), perlítica y ocasionalmente esferulítica. La mineralogía se debe a fenocristales de plagioclasa y escasos de cuarzo y biotita, en una matriz que varía de vítrea a afanítica. Los *Domos* muestran una gradación de color de rosado a negro verdoso conforme se aleja de la fuente, lo que sugiere que la parte más externa del domo, de más rápido enfriamiento, formó una

cubierta de obsidiana que ha sufrido perlitización. Los *Domos* sólo se presentan en la parte central y occidental del área de estudio y, por su poca abundancia, no muestran un patrón de distribución preferente como el que se observa en las fallas y fracturas.

Ponce y Clark (1988) indican que las estructuras dómicas e intrusivos subvolcánicos del área de estudio están asociados a un patrón de deformación concéntrico y radial a los límites de la caldera; sin embargo, en el trabajo que aquí se presenta los *Domos* están asociados con fallas, pero éstas, hasta el momento, no han podido asociarse a algún patrón radial o concéntrico.

TOBAS DE LAPILLI

La unidad de *Tobas de lapilli* cubre parcialmente a las unidades de *Derrames riolíticos*, *Tobas cristalinas*, *Domos* y *Tobas líticas*. Afloran ampliamente en la parte oriental del Cerro La Virgen (Figura 2). El color de las tobas es café claro, tienen un espesor máximo de aproximadamente 30 m y están dispuestas en capas que varían de 10 cm a 1 m de espesor. La textura es fragmental y vitroclástica. La mineralogía está formada por fragmentos de cristales de plagioclasa, cuarzo y escasa biotita con bordes oxidados. Los fragmentos de pómez tienen sus bordes bien definidos, no muestran ningún tipo de gradación y su tamaño es de lapilli. Los fragmentos líticos son riolíticos, muestran gradación normal y ocasionalmente están oxidados. La concentración de fragmentos de pómez y líticos es variable, por lo que las texturas varían.

En la sección C-D (Figura 2) esta unidad se encuentra en la porción nororiental del Cerro La Virgen.

TOBAS BRECHADAS

Esta unidad cubre parcialmente a las *Tobas de pómez y líticos*, *Derrames riolíticos*, *Tobas cristalinas* y *Tobas de lapilli* (Figura 2). La toba aflora solamente en la parte superior del Cerro La Virgen y su color varía de rosa a café claro. El espesor de esta unidad, cuya textura es brechada, es de aproximadamente 50 m y no muestra estratificación. La mineralogía está formada por escasos fragmentos de cristales de plagioclasa y cuarzo en una matriz microcristalina moderadamente silicificada. Los fragmentos brechados son de rocas volcánicas riolíticas cuyo diámetro máximo es de cuatro metros. Es el depósito de un flujo piroclástico posiblemente viscoso debido a que algunos fragmentos líticos de mayor diámetro muestran fracturas rellenas con matriz y cristales.

ANÁLISIS GEOMÉTRICO

Se efectuó un análisis geométrico de las fallas y fracturas cartografiadas en la secuencia volcánica del Terciario. Para diferenciar los eventos de deformación el análisis inicial se basó de acuerdo a la posición estratigráfica de las unidades; cuando no hubo variación por unidad litológica los datos fueron separados por el tipo de estructura. En las rosas de orientación de la Figura 2a se observa que las fallas de desplazamiento lateral tienen cuatro orientaciones preferentes, una que varía entre N40-60°W, otra entre N0-10°E, una más entre N70-90°W y la última entre N20-30°E, en ese orden de abundancia, la orientación promedio de las estructuras tie-

ne un azimut de 311° . Las fallas normales (Figura 2b) muestran dos orientaciones preferentes, una entre $N60-90^\circ W$ y la otra entre $N40-50^\circ W$, en ese orden de abundancia. El azimut promedio del conjunto de datos de fallas normales es de 302° . En las fracturas, la población se concentra en dos orientaciones, la más abundante entre $N40-80^\circ W$ y la otra entre $N10-30^\circ W$, con un azimut promedio de 310° (Figura 2c).

En la Figura 3 se muestran las rosas de orientación de fracturas y fallas obtenidas de las cartografías presentadas por Ponce y Clark (1988) y Enciso-de la Vega (1994). Las Figuras 3a y 3b muestran la orientación preferente de las estructuras que afloran al norte de la Veta de la Cantera y que estarían ubicadas al norte del límite de la "Caldera de Zacatecas"; se observa que las estructuras tienen una orientación preferente que varía entre $N60-70^\circ W$, $N40-50^\circ W$ y $N80-90^\circ W$ (Figura 3a) y $N40-70^\circ W$ (Figura 3b). Además, se observa una pequeña componente que varía de $N10^\circ W$ a $N10^\circ E$. La tendencia de las estructuras al norte de la Veta de la Cantera (Figuras 3a y 3b, no mostradas en la Figura 2 por estar fuera del área de estudio pero mencionadas para fines comparativos) es paralela a la que se observa en el centro de la hipotética caldera (Figuras 3c, 3d y 3e); en la Figura 3c las estructuras están orientadas hacia $N50-60^\circ W$, $N20-30^\circ W$ y $N80-90^\circ W$, en ese orden de abundancia; mien-

tras que en la Figura 3d la tendencia es entre $N30-60^\circ W$ y en la Figura 3e varía entre $N70-90^\circ W$ y $N40-50^\circ W$. También se observa una pequeña componente hacia el norte (Figuras 3c y 3d). En la parte sur de la caldera (Figura 3f) se observa una amplia dispersión en la distribución de las estructuras que varían de $N30-40^\circ E$, $N50-60^\circ W$, $N80-90^\circ W$ y $N0-10^\circ W$, en ese orden de abundancia.

Como se puede observar en las rosetas de orientación de la Figura 2, las estructuras tienen una orientación preferente promedio hacia 310° ($N50^\circ W$). Esta tendencia es paralela a la que muestran las estructuras de los principales sistemas de vetas mineralizadas que existían al norte de la ciudad de Zacatecas (p. ej. sistemas Mala Noche, la Cantera y Vetagrande; Pérez-Martínez, 1961) (Figuras 3a y 3b). Ponce y Clark (1988) plantearon la hipótesis de que la Veta de la Cantera (Figura 2) pudiera ser el límite septentrional de una caldera y en la parte sur del área de estudio (Figura 2) estaría uno de los límites de la resurgencia.

Los rasgos estructurales dominantes del área de estudio son del Terciario (Ponce y Clark, 1988) similares a los de la parte meridional de la Mesa Central (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997). Las fallas normales y fracturas asociadas con la evolución de la caldera

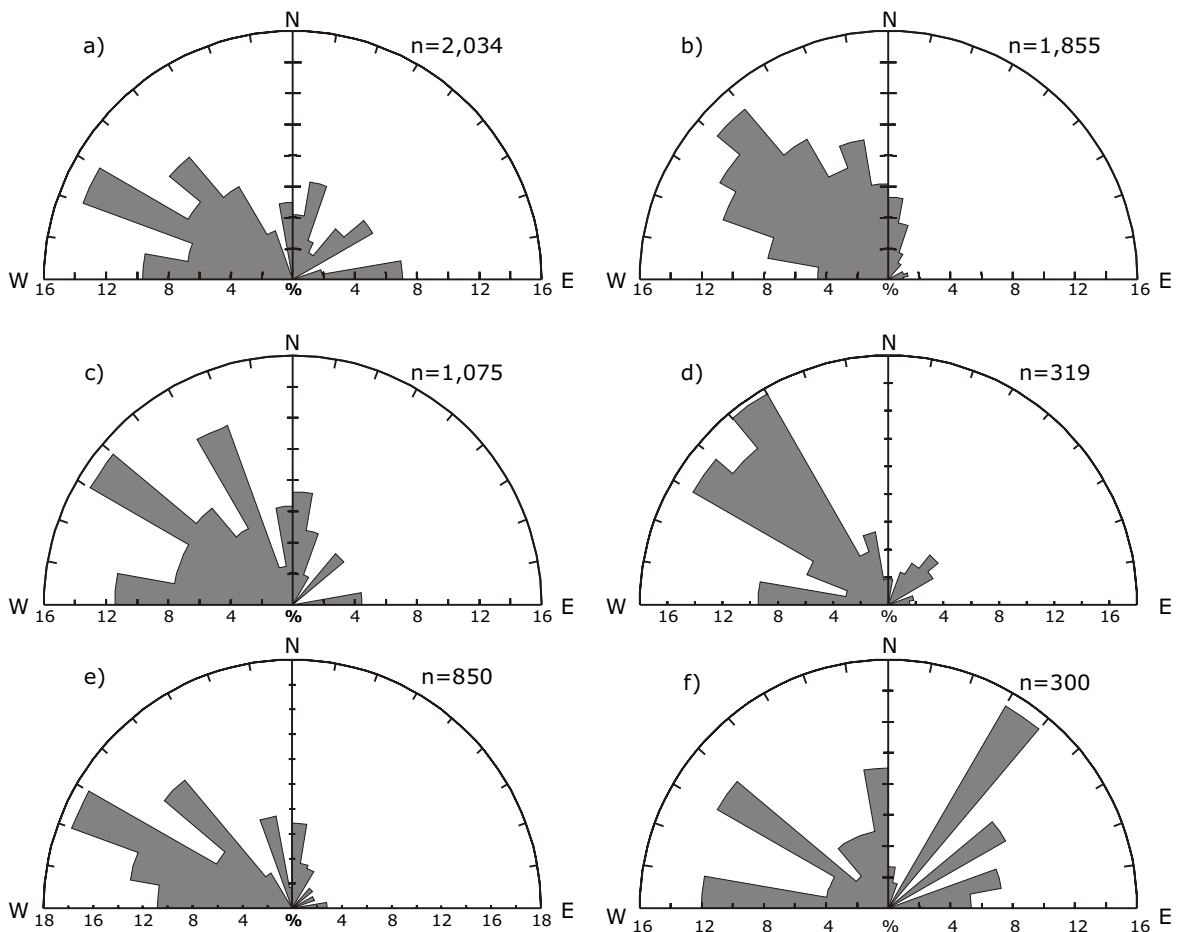


Figura 3. Rosas de orientación de las fallas y fracturas del área de estudio. a) y b) son estructuras al norte de la Veta de la Cantera; cartografía tomada de Ponce y Clark (1988) y Enciso-de la Vega (1994), respectivamente; c), d) y e) son estructuras que están localizadas en el interior de la caldera; cartografía de Ponce y Clark (1988), Enciso-de la Vega (1994) y este trabajo, respectivamente. La figura f) muestra las estructuras localizadas al sur del límite propuesto de la caldera (Ponce y Clark, 1988).

habrían formado tres sistemas de fracturamiento, uno aproximadamente concéntrico, otro radial y uno sin orientación preferente (Ponce y Clark, 1988). Las estructuras concéntricas afloran al norte de la Veta de la Cantera y tendrían un azimut que varía de N45-85°W (Ponce y Clark, 1988). Las estructuras radiales solamente se encontrarían hacia el occidente del área de estudio (no incluidas en la Figura 2) y tienen un azimut que varía de N0-20°W; las estructuras sin orientación preferente son escasas (Ponce y Clark, 1988). Con base en las edades más jóvenes obtenidas en las rocas volcánicas del Cerro La Virgen, la edad de la deformación en el área de estudio parece ser más joven que 36.8 Ma, debido a que la deformación estaría asociada con la evolución de la caldera (Ponce y Clark, 1988). Esta edad de deformación corresponde con la de Oligoceno Tardío, tiempo en que se habrían formado las estructuras principales en la porción meridional de la Mesa Central, tal y como lo indican Nieto-Samaniego *et al.* (1997).

La orientación de los principales grupos de estructuras en el área de estudio (Figuras 2a, 2b y 2c) es paralela a la concentración de rumbo NW-SE de los sistemas de vetas al norte de la Veta de la Cantera (Figuras 3a y 3b) y similar al de otras partes de la Mesa Central. Lo anterior sugiere que podrían no estar relacionadas con la evolución de una caldera, como lo proponen Ponce y Clark (1988),

sino que las estructuras posiblemente sigan el patrón regional de deformación formado durante el Oligoceno Tardío (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997).

GEOMORFOLOGÍA

Geomorfológicamente la zona está formada por cuatro unidades bien definidas, que son: 1) Zonas semiplanas con pendientes de 0 a 12°; 2) Laderas de pendientes moderadas de 12° a 30°; 3) Rampas con pendientes de 30° a 45° y 4) Escarpes mayores a 45° (Figura 4).

Zonas semiplanas con pendientes del 0° a 12°. Se localizan en las cimas de los cerros La Virgen y La Bufa, así como en la cuenca del Arroyo de la Plata. En esta zona se ha urbanizado casi en su totalidad el Arroyo de la Plata, por lo que se ha alterado y obturado en su desembocadura la red fluvial proveniente de la ladera norte del Cerro de la Virgen y de la ladera sur de la Veta de la Cantera (Figura 4).

Laderas con pendientes moderadas de 12° a 30°. Se localizan en el Cerro La Virgen y en la Veta de la Cantera; muestran una red fluvial dendrítica (Figura 5), con una disección que va de 0.50 m hasta 18 m de profundidad, en cuyos talwegs presenta nu-

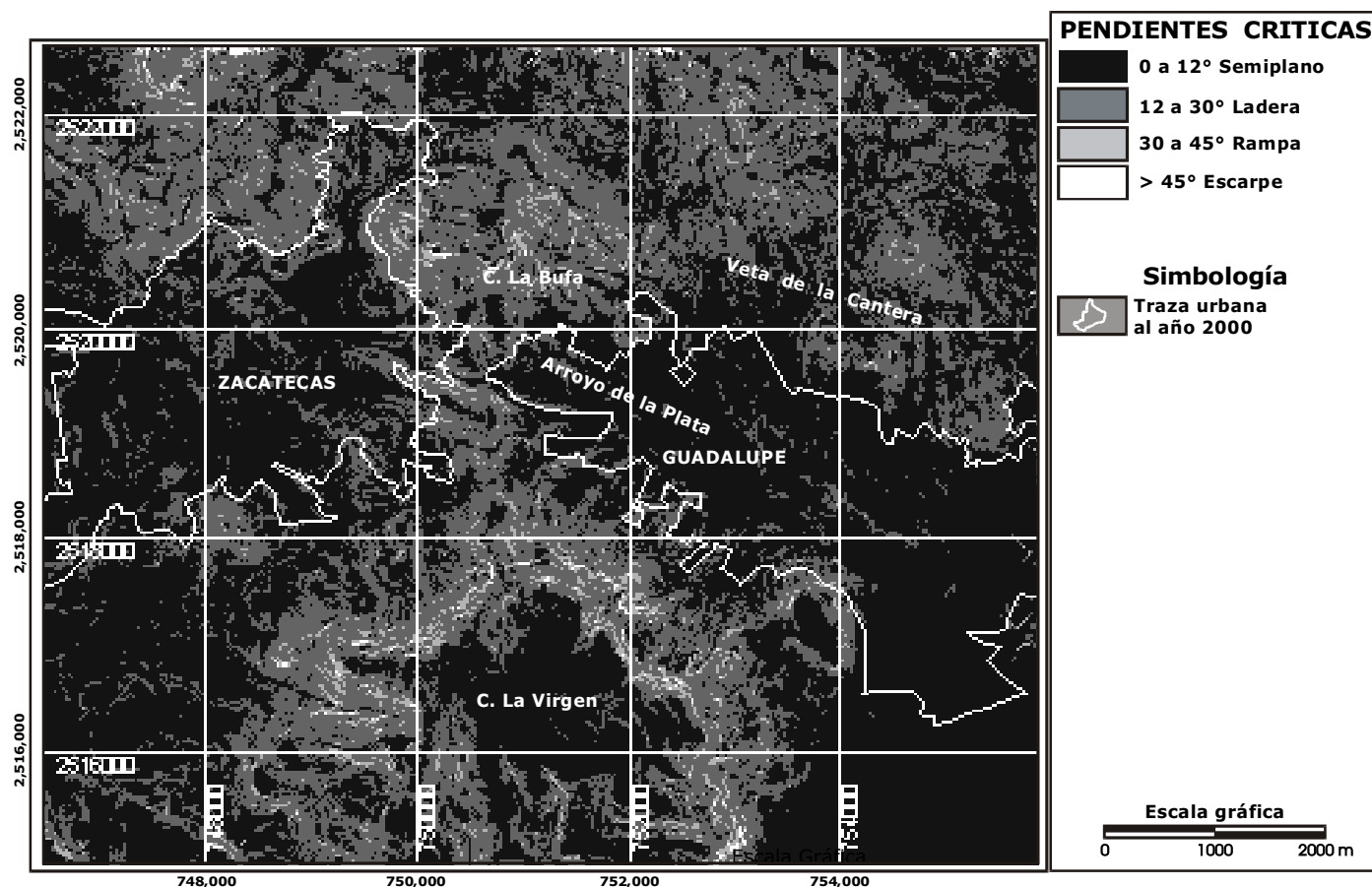


Figura 4. Modelo digital de pendientes críticas realizado con IDRISI. Los grupos 3 y 4 muestran las áreas susceptibles de generar procesos de remoción y deslizamientos de materiales sobre la traza urbana (mostrada en línea blanca).

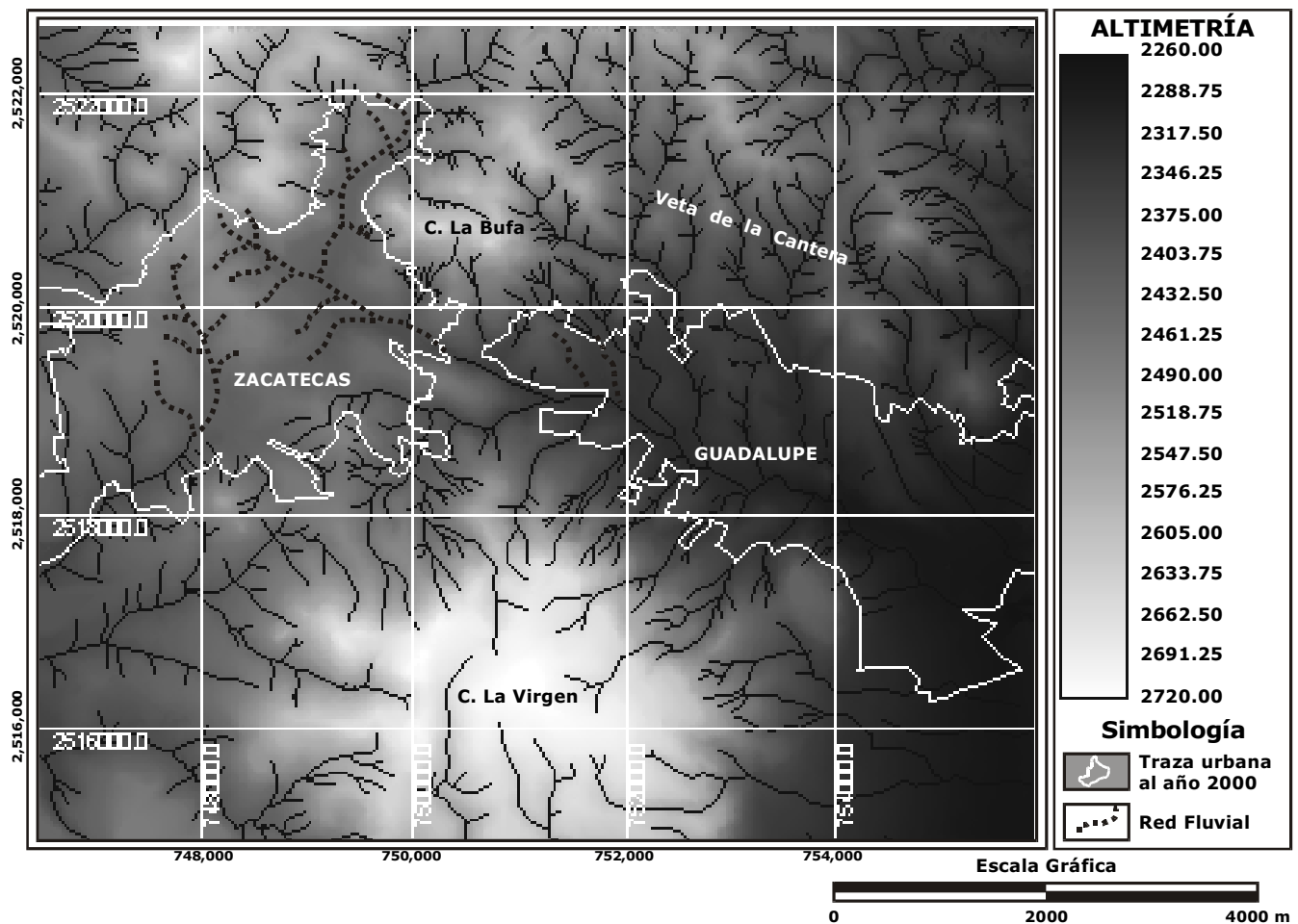


Figura 5. Modelo digital de elevación del área de estudio realizado con IDRISI; se muestran la red hidrográfica y la traza urbana del 2000 (INEGI, 2000). Las líneas punteadas en el interior de la traza urbana indican cauces que desaparecieron por completo debido al proceso urbano desde la Colonia hasta 1971.

merosos bloques de tamaño heterogéneo, que fueron arrancados de las secciones superiores de las microcuencas. Su transporte indica importantes periodos pluviales en la región.

Rampas con pendientes de 30 a 45°. En la Figura 4 las rampas aparecen como franjas en las laderas superiores de los cerros La Virgen y La Bufo; litológicamente la sección inferior de esta unidad se forma por el Conglomerado Rojo de Zacatecas y las unidades de Derrames riolíticos, Tobas cristalinas y Tobas de pómez y líticos, en ese orden de abundancia. Actualmente en las rampas del Cerro La Virgen predominan procesos de desarrollo de cárcavas cuya densidad aumenta en las áreas que han sido desforestadas con fines de urbanización. El material intemperizado y transportado se canaliza por los talweges de la red fluvial tapando parcialmente con arenas y gravas las alcantarillas de paso fluvial del libramiento de tránsito pesado y del ferrocarril. Los materiales finos alcanzan el cauce del Arroyo de la Plata ubicado a un máximo de 1,250 m de distancia de estos puntos.

Escarpes mayores de 45°. Estas pendientes se encuentran en la sección superior del Cerro La Virgen y en menor medida en el Cerro La Bufo (Figura 4). En esta unidad geomorfológica se ubica la

mayor parte de las cabeceras de los arroyos que drenan el área. En esta unidad se identificaron bloques inestables y caídos de las unidades de Derrames riolíticos y Tobas cristalinas, principalmente.

Drenaje. La mayor parte de la actual traza de la conurbación Zacatecas y Guadalupe que contó para el año 2000 con una superficie de 974 y 1,048 hectáreas, respectivamente, se asienta sobre la unidad semi plana y en menor proporción sobre la unidad de laderas (Figura 4). Esta urbanización ha alterado 70.3 km del conjunto de la red fluvial existente en la conurbación (Figura 5).

PROCESOS GEOMORFOLÓGICOS

En la periferia de la zona conurbada Zacatecas-Guadalupe se identificaron procesos geomorfológicos que afectan a las rocas y los suelos y que, en un momento dado, pueden afectar a las construcciones y la población que vive sobre o alrededor de donde se desarrollan. Los procesos geomorfológicos identificados son la reptación del suelo (Figura 6a), depósitos de talud (Figura 6b), caída de bloques (Figura 6c) y formación de cárcavas (Figura 6d). A



Figura 6. Proceso geomorfológicos que actúan en los alrededores de la zona conurbada Zacatecas-Guadalupe, a) Reptación del suelo en la margen norte del Cerro la Virgen. Los escalones están bien definidos y se observan pequeños escarpes entre cada escalón; b) Depósito de talud en la margen norte del Cerro la Virgen. El depósito descansa sobre el Conglomerado Rojo de Zacatecas y se observa la intercalación de estratos con material grueso y fino; c) Bloque derivado de un derrame riolítico. El bloque se encuentra sobre el Conglomerado Rojo de Zacatecas y adyacente a un depósito de talud y d) Formación de cárcavas en la margen norte del Cerro la Virgen; en este sitio se realizan obras para la construcción de viviendas.

continuación se presenta una descripción de cada uno de estos procesos y la forma en la que podrían afectar a los asentamientos urbanos.

REPTACIÓN DEL SUELO

De los procesos geomorfológicos identificados, la reptación del suelo es, tal vez, el que tiene menor potencial de provocar daños a las obras civiles y a la población. En la Figura 7 se muestra la reptación del suelo en diferentes condiciones de pendiente y vegetación. Cuando la pendiente tiene alrededor de 30° , su vegetación es escasa y el suelo está formado por derrubios que forman escalones cortos y pobremente definidos (Figura 7a). La reptación que se desarrolla bajo esas condiciones se da en suelos cuyo espesor es menor de 50 cm, formados principalmente por derrubios.

En la Figura 7b se muestra el proceso de reptación en una pendiente de aproximadamente 20° con abundante vegetación de pasto y arbustos; en este lugar los escalones están claramente definidos y el suelo está formado por arenas y en menor proporción por derrubios.

En la Figura 7c se muestra la reptación en una pendiente de aproximadamente 10° con vegetación de arbustos. Los escalones son amplios y bien definidos. El suelo está formado por derrubios cuya porosidad y permeabilidad son altas.

La reptación del suelo es un proceso que opera en todos los cerros que rodean a las ciudades de Zacatecas y Guadalupe y ocurre en sitios en donde la precipitación pluvial es escasa, por eso es solamente gravitatorio. En los sitios de abundante precipitación pluvial la presión de poro en el suelo es alta y provoca que haya separación de partículas que promueven el flujo, por lo que, en lugar de un proceso de reptación se produce solifluxión. El clima de las ciudades de Zacatecas y Guadalupe es semiseco con lluvias en verano; la precipitación es escasa y se ha registrado que en unas horas pueden caer más de 50 mm de precipitación.

DEPÓSITOS DE TALUD

En la Figura 8 se muestra la distribución de los depósitos de talud entre las ciudades de Zacatecas y Guadalupe. No fue posible realizar la distribución de los mismos en la cuenca del Arroyo de la Plata (en donde tiene su destino final) ya que está cubierta por la traza urbana. En la Figura 8 se observa que la localización de los

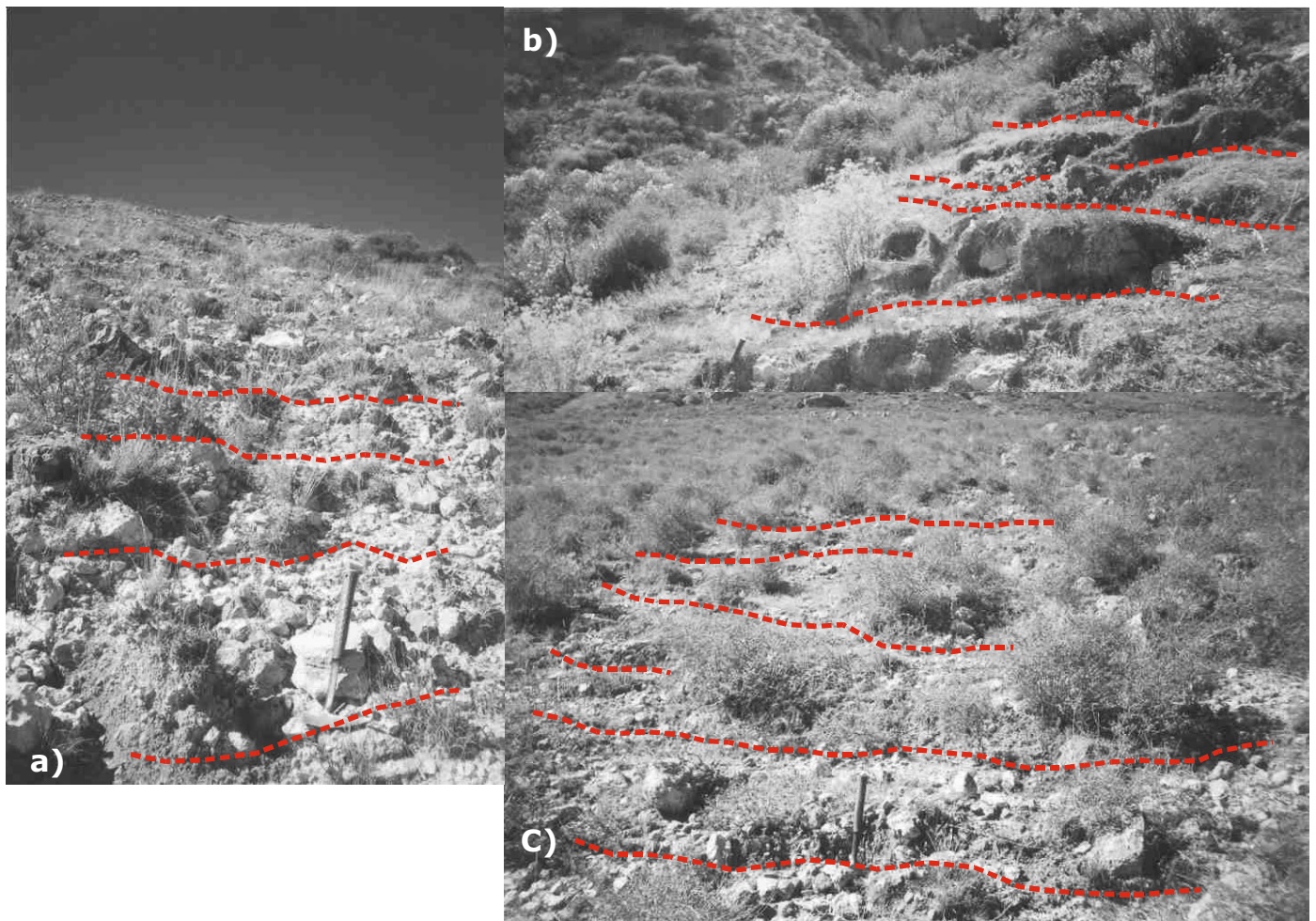


Figura 7. Reptación del suelo en diferentes condiciones de pendiente y vegetación. Las líneas punteadas indican la ubicación de la base de los escalones: a) Con pendiente fuerte y vegetación escasa los escalones están pobremente definidos; b) con pendiente moderada y vegetación de pastos y arbustos los escalones están bien definidos; y c) con pendiente suave y vegetación arbustiva los escalones están bien definidos.

depósitos es normalmente en la margen norte del Cerro La Virgen y en menor proporción en el límite sur del Cerro La Bufo. En la Figura 9 se muestran algunos depósitos de talud del área de estudio. En la Figura 9a el tamaño de los clastos puede alcanzar hasta 30 centímetros de diámetro y no hay estratificación. En la Figura 9b se muestra una cuenca de depósito de la margen norte del Cerro La Virgen. En la Figura 9c se muestra un depósito de talud que fue activado por las lluvias; las dimensiones del depósito, de aproximadamente 3 m de ancho por 1.5 de fondo, indican que la erosión es activa.

En una primera aproximación para tratar de establecer la edad de los depósitos, en la Figura 10 se muestran el registro histórico de la precipitación pluvial en el área de estudio y sus alrededores. En la Figura 8 se muestra la localización de las estaciones meteorológicas, mientras que en la Figura 10 se muestran sus registros. Se puede observar que aunque las estaciones están relativamente cercanas, de 1956 a 1969 la precipitación de la estación La Bufo muestra los valores más bajos de precipitación, mientras que para el periodo entre 1983 a 1987 presenta los valores de precipitación más altos de la región. A partir de 1990 los valores de precipitación son similares en las cuatro estaciones meteorológicas consideradas. La

estación meteorológica de Trancoso presenta el valor de precipitación más alto registrado en la zona de 1318 mm en 1958 (Figura 10), mientras que para el mismo periodo en las estaciones La Bufo y Zacatecas la precipitación media anual fue de 389 y 682 mm respectivamente. Esta última apenas la mitad de la precipitación de Trancoso.

Las variaciones en la distribución de la precipitación a escala local pueden ser importantes en la evolución de los procesos geomorfológicos, específicamente en la formación de los depósitos de talud y la reptación del suelo. Una precipitación como la de 1958 (Figura 10) podría activar los procesos de soliflujión en las laderas.

Los detritos que componen los depósitos en la margen norte del Cerro La Virgen están formados principalmente por clastos de los Derrames riolíticos, Tobas cristalinas y Tobas brechadas; las otras unidades tobáceas de la Figura 2 no son constituyentes importantes de los depósitos, posiblemente por ser materiales más fácilmente deleznable. Las estructuras, la litología y la pendiente parecen ser los factores determinantes en la formación de los depósitos de talud; esto se observa en la margen occidental del Cerro La Virgen, en donde hay abundantes estructuras y abundantes depósitos de

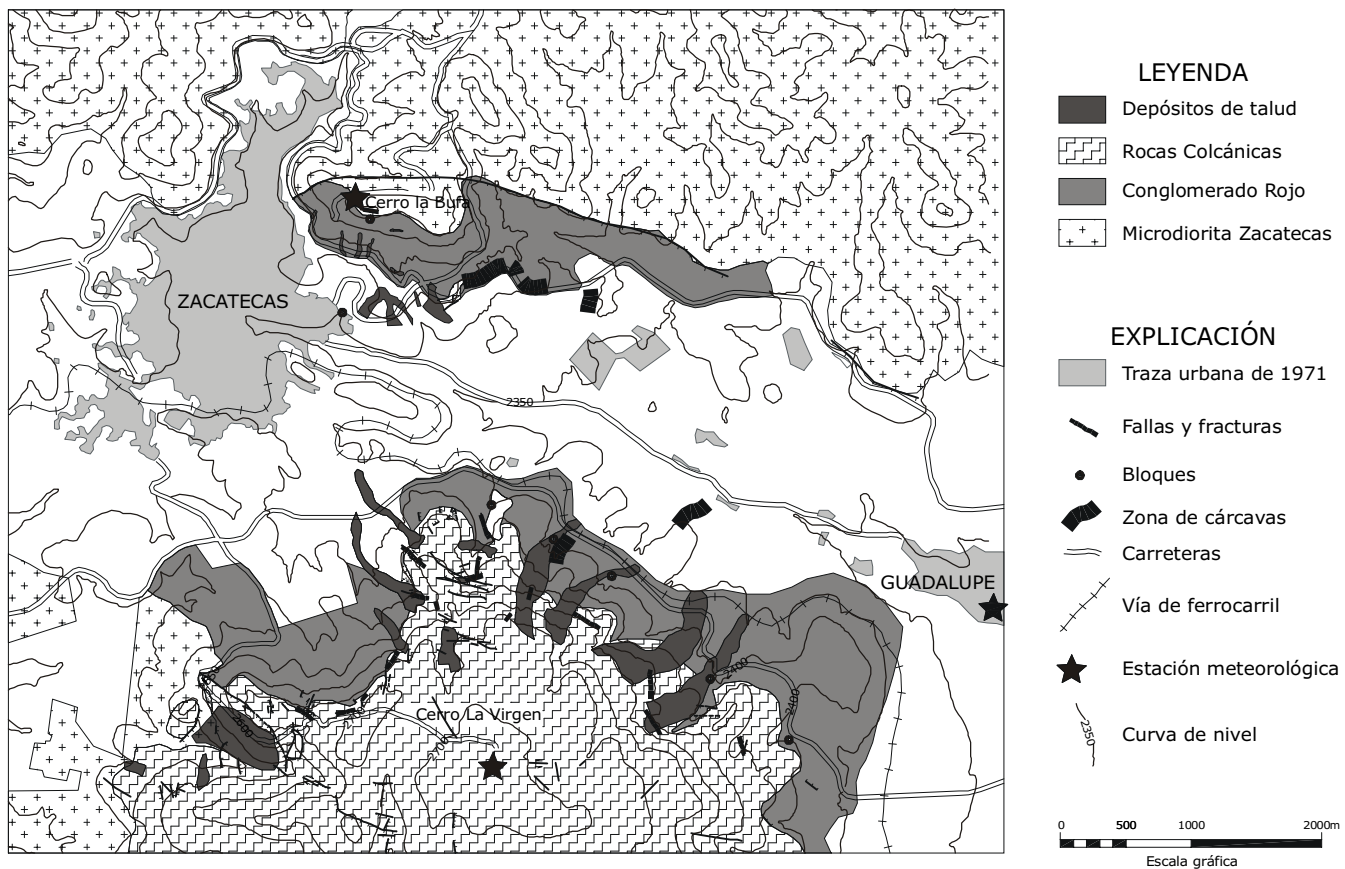


Figura 8. Mapa geológico simplificado de las zonas de las ciudades de Zacatecas y Guadalupe; se muestran los sitios donde los procesos geomorfológicos son activos. Los puntos negros marcados en el mapa indican bloques caídos mayores de 3 m de altura. En el mapa solo se muestran las fallas y fracturas de mayor longitud. Los depósitos de talud muestran espesor variable, además de un tamaño disímil en sus clastos. El límite de la traza urbana de 1971 fue tomado del INEGI (1971); los límites occidental de la Microdiorita Zacatecas y noroccidental de la traza urbana son aproximados. El área sin achure corresponde a la zona urbana actual.

talud (Figuras 2 y 8); en la parte central y oriental del mismo cerro la densidad de estructuras disminuye, no así la pendiente ni el número de depósitos de talud.

CAÍDA DE BLOQUES

La caída de bloques es un fenómeno que está asociado con fracturas, fallas y foliación. La secuencia volcánica del Terciario presenta abundantes planos de fracturas y fallas, así como de estratificación, mientras que la del Cretácico, además, presenta foliación. Estos son planos de debilidad que representan sitios favorables para que en el futuro haya caída de bloques, como ha ocurrido en el pasado. Los bloques mostrados en la Figura 11 corresponden a fragmentos de roca de más de 3 m de altura encontrados en las inmediaciones de la traza urbana. Hacia la cima de los cerros La Virgen y La Bufa se encuentran bloques de tamaño similar o menor y pueden seguirse hasta los sitios de fracturamiento en la margen de los cerros. En la Figura 11a se muestra un bloque de riolita que deriva del Cerro La Bufa, que es un domo de esa composición con abundantes fracturas verticales y, como se observa en la Figura 11b, también hay bloques cerca de la base del domo. En la Figura 11c se muestra un bloque del Derrame riolítico derivado de la secuencia volcánica

del Cerro La Virgen. En la Figura 11d se observan bloques caídos de diferente tamaño que están asociados con el borde norte del Cerro la Virgen.

CÁRCAVAS

En la Figura 8 se muestra la ubicación de varias zonas en donde se desarrollan cárcavas. Su formación es común en materiales con moderada a poca consolidación. Por la cantidad de sitios con formación de cárcavas y para hacer más clara la Figura 12, solamente se muestran aquellas zonas en donde el proceso se presenta cerca de una vía de comunicación.

En la Figura 12 se muestran algunos ejemplos de formación de cárcavas en un corte de carretera hecho en un conglomerado moderadamente consolidado (Figura 12a), en un depósito de talud (Figura 12b) y en un depósito artificial de materiales (Figura 12c). La formación de cárcavas es un proceso que únicamente ocurre en la temporada de lluvias; aunque a la fecha solamente han ocurrido depósitos similares al mostrado en la Figura 12b y, como el proceso continuo, es favorable para el debilitamiento de los taludes, especialmente aquellos que son verticales.

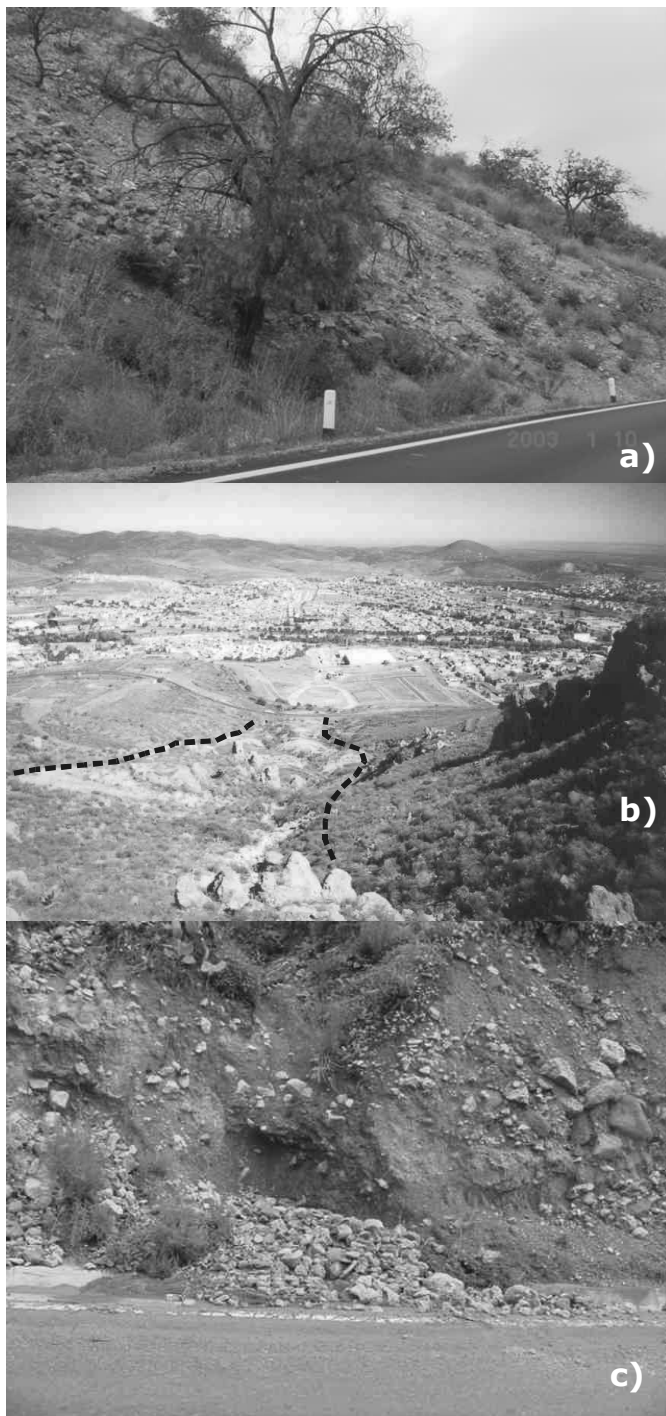


Figura 9. Características de los depósitos de talud: a) depósito en la margen oriental del Cerro La Bufa; b) cuenca de depósito en la margen norte del Cerro La Virgen, las líneas punteadas indican la ubicación aproximada de la cuenca, aunque el depósito parece estable, es una importante fuente de sedimentos hacia las colonias ubicadas aguas abajo; y c) depósitos recientes provocados por la abundancia de lluvias en el año 2002.

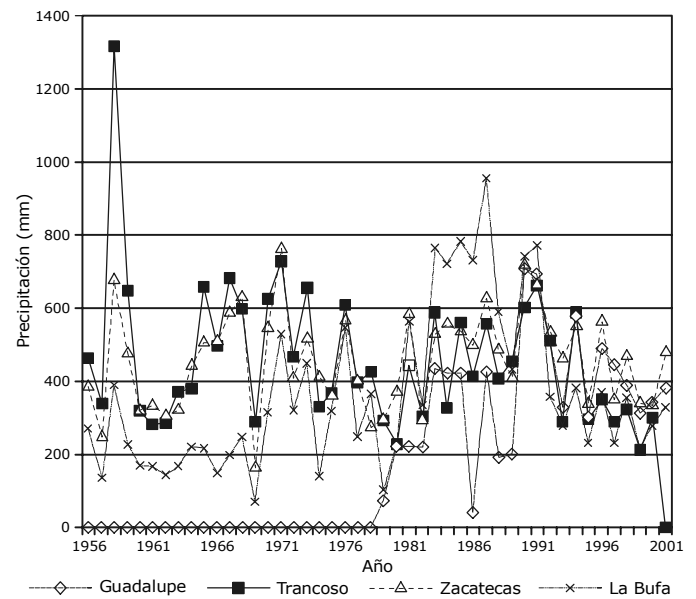


Figura 10. Gráfica que muestra la precipitación promedio anual en las ciudades de Zacatecas, Guadalupe y su entorno. En la figura 8 se muestra la localización de tres de las cuatro estaciones meteorológicas indicadas en la gráfica. La estación de Trancoso está localizada a 15 km al oriente de Guadalupe. Los datos fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua, Delegación Zacatecas.

CONCLUSIONES

En la planeación del crecimiento de las ciudades de Zacatecas y Guadalupe se han subestimado o no se han tomado en cuenta los peligros naturales potenciales a que están expuestas. Esta falta de conocimiento en parte se debe al escaso conocimiento geológico y geomorfológico de la zona que puede servir como herramienta de planeación para identificar las zonas susceptibles de riesgo por procesos geomorfológicos.

En este trabajo se identificaron cuatro fenómenos geomorfológicos que son potencialmente peligrosos para las obras civiles: la reptación del suelo, depósitos de talud, caída de bloques y formación de cárcavas.

Se definieron siete unidades volcánicas informales que afloran en el Cerro La Virgen y que informalmente se nombraron como Tobas de pómez y líticos, Tobas cristalinas, Tobas líticas, Derrames riolíticos, Tobas de lapilli, Tobas brechadas y Domos. Los fragmentos de estas unidades que se encuentran en los productos derivados de los procesos geomorfológicos son los Derrames riolíticos, Tobas cristalinas y Tobas brechadas; la contribución de los domos se observa únicamente en sus alrededores. El resto de las unidades litológicas contribuyen escasamente en los procesos geomorfológicos, posiblemente por ser materiales fácilmente deleznable.

Las fallas y fracturas de las cabeceras de los arroyos, donde la pendiente es mayor que 45°, son sitios en donde se desprenden bloques de roca o donde inician depósitos de talud.

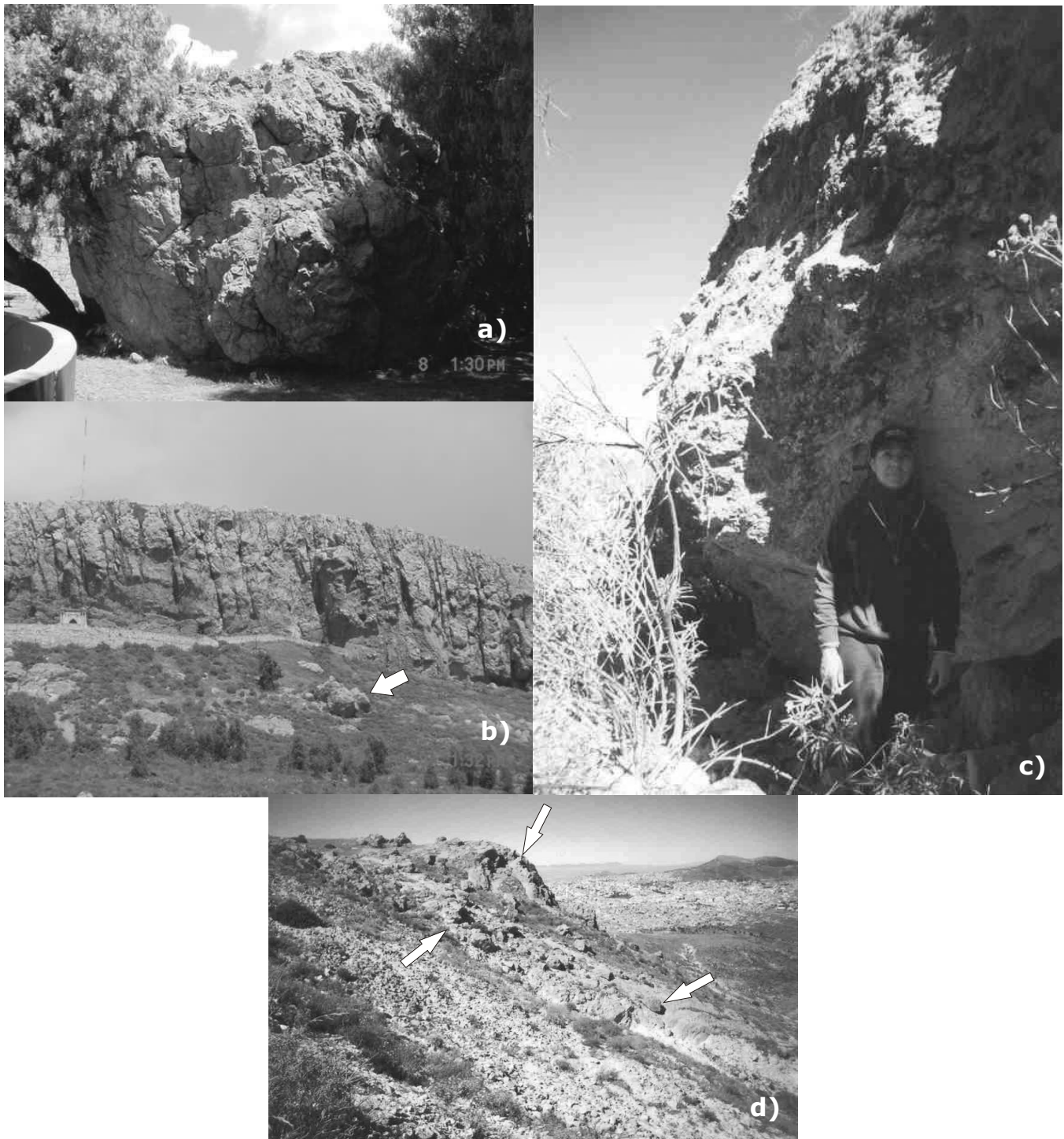


Figura 11. Bloques en o cercanos a la traza urbana: a) bloque de riolítico asociado con el fracturamiento del Cerro La Bufa; b) fracturamiento en el Cerro la Bufa, la flecha señala la ubicación de bloques caídos; c) bloque riolítico asociado con fracturamiento en el Cerro La Virgen; y d) fracturamiento en el Cerro la Virgen, las flechas indican la ubicación de algunos bloques y fracturas.

La orientación de las fallas y fracturas del Cerro la Virgen es hacia el NW y escasas hacia el N, paralelas a la tendencia observada al norte de la Veta de la Cantera; no hay evidencias de fracturamiento concéntrico ni radial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los comentarios y sugerencias hechos por Norma Angélica Andrade Haro, María del Socorro Guerrero del Río, Irma González de la Rosa, Ernesto Núñez Peña. Los comentarios y correcciones editoriales de dos árbitros anónimos se agradecen enormemente.

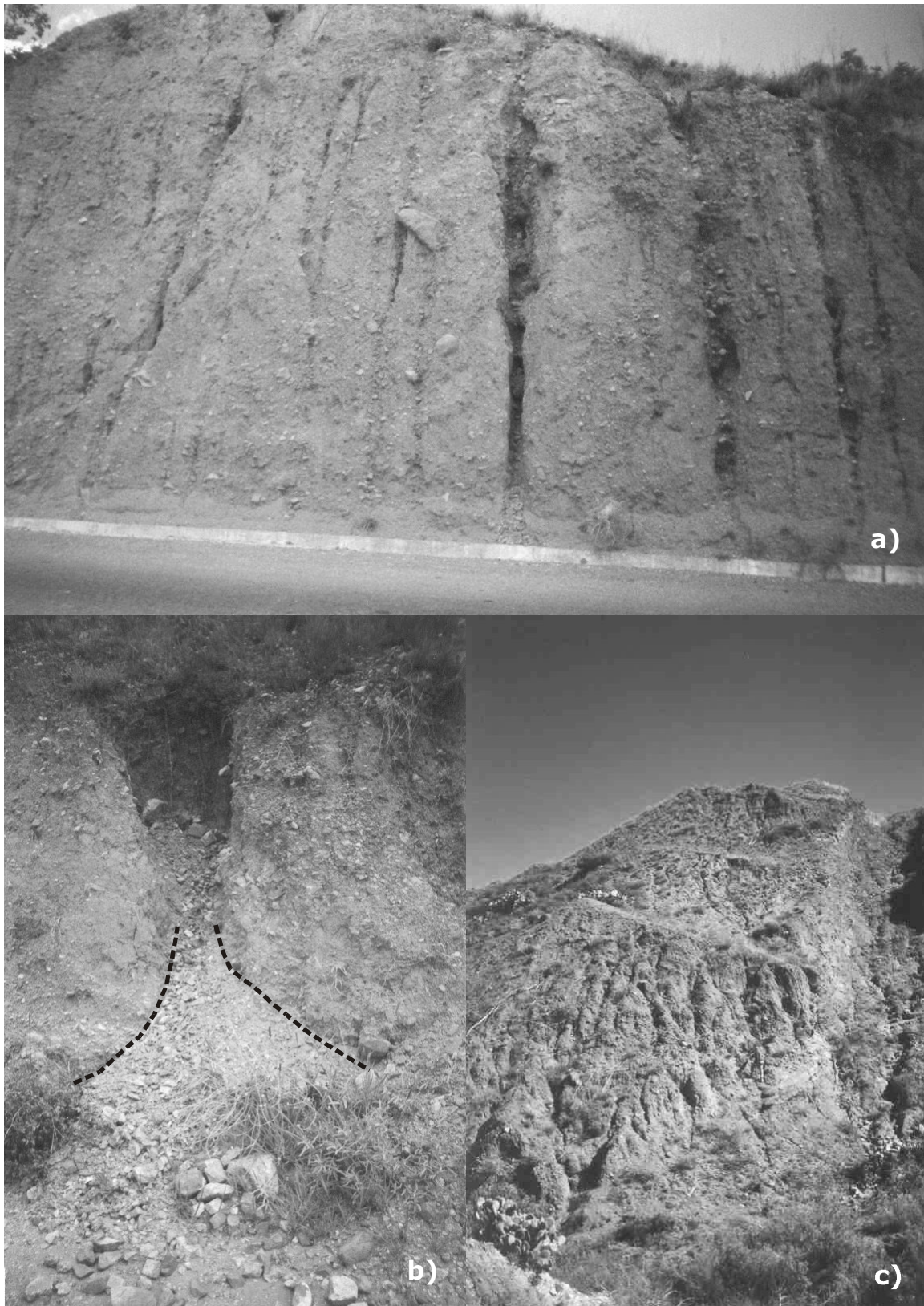


Figura 12. Formación de cárcavas, a) conglomerado moderadamente consolidado en la margen norte de la traza urbana, la pendiente y la consolidación favorecen la formación de las cárcavas; b) formación de una cárcava en un depósito de talud, se observa el pequeño abanico que se forma en la base de la cárcava (líneas punteadas); y c) formación de cárcavas en un depósito artificial en la margen norte del Cerro La Virgen.

REFERENCIAS

- Aranda-Gómez, J.J., Henry, C.D. and Luhr, J., 2000. Evolución tectonomagmática post-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras, México, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. LIII, p. 59-71.
- Burckhardt, C., 1906. Sobre el descubrimiento del Triásico marino en Zacatecas, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo II, p. 43-45.
- Consejo de Recursos Minerales, 1991. Monografía geológico minera del Estado de Zacatecas, Secretaría de Energía, Minas e Industria paraestatal, Subsecretaría de Minas e Industria Básica, 154 pp.
- Enciso-de la Vega, S., 1994. Crecimiento urbano de la Ciudad de Zacatecas y sus asentamientos humanos en zonas mineralizadas polimetálicas, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 11 (1), p. 106-112.
- Escalona-Alcázar, E.J., Suárez-Plascencia, C., Pérez-Román, A.M., Ortiz-Acevedo, O., Bañuelos-Álvarez, C., Nava de la Riva, J.C. y Bañuelos-Quezada, V., 2002. Early Tertiary Volcanism in la Virgen Hill, Zacatecas, México, does it reflect the evolution of a caldera? GEOS, Vol. 22 (2), p. 397
- Escalona-Alcázar, E.J., Nájera-Garza, J., Pérez-Román, A.M. y Nava de la Riva, J.C., 2001. Los Piroclastos y Volcaniclastos Los Alamitos, una descripción alterna, Cerro la Virgen, Zacatecas, GEOS, Vol. 21 (3), p. 319
- Escalona-Alcázar, E.J., Núñez-Peña, E.P., Robles-Berumen, H y Márquez-Tejada, M., 2000. La secuencia volcánica de la margen noroccidental del Cerro la Virgen, una aproximación, GEOS, Vol. 20 (3), p. 305
- Gobierno del Estado de Zacatecas, 1989. Ley Estatal del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Diario Oficial, 43 pp.
- Gutiérrez-Amador, M., 1908. Las capas Cárnicas de Zacatecas, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo IV, p. 29-35.
- Instituto Nacional de Estadísticas Geografía e Informática, 1998. Carta topográfica F13B68, Guadalupe, escala 1:50,000.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 1998. Carta topográfica F13B58, Zacatecas, escala 1:50,000.
- McGehee, R.V., 1976. Las rocas metamórficas del Arroyo La Pimienta, Zacatecas, Zac., Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo XXXVII (1), p. 1-10.
- Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A. y Labarthe-Hernández, G., 1997. La deformación cenozoica postlaramídica en la parte meridional de la Mesa Central, México, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 14 (1), p. 13-25.
- Pérez-Martínez, J.J., 1961. Bosquejo geológico del distrito minero de Zacatecas, Consejo de Recursos Naturales no Renovables, Boletín 52, 37 pp.
- Ponce, B.E. and Clark, K.F. 1988. The Zacatecas Mining District: A Tertiary Caldera Complex Associated with Precious and base Metal Mineralization, Economic Geology, Vol. 83, 1668-1682 p.
- Ransom, W.A., Fernández, L.A., Simmons, Jr., W.B. and Enciso de la Vega, S., 1982. Petrology of the metamorphic rocks of Zacatecas, Zac., Mexico, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo XLIII (1), p. 37-59.
- Sistema Estatal de Protección Civil, 2002. Atlas estatal de riesgos, Gobierno del Estado de Zacatecas, Secretaría General de Gobierno, 22 pp.