

# RASGOS GEOLÓGICOS Y MORFOLÓGICOS ASOCIADOS CON PELIGROS NATURALES EN LOS FRACCIONAMIENTOS EL VALLE Y HACIENDA ACUEDUCTO, TIJUANA, BAJA CALIFORNIA

Luis A. Delgado Argote, Gemma Gómez Castillo, Tomás A. Peña Alonso, Xóchitl G. Torres Carrillo y Porfirio Avilez Serrano

Departamento de Geología  
División de Ciencias de la Tierra, CICESE  
E-mail: ldelgado@cicese.mx, gomezc@cicese.mx, alepena@cicese.mx, xtorres@cicese.mx y pavilez@cicese.mx

## RESUMEN

Los fraccionamientos El Valle y Hacienda Acueducto, en Tijuana, Baja California, se encuentran en una región caracterizada por pliegues suaves y fallas normales, ambos orientados NE-SW, casi perpendiculares a las fallas regionales de rumbo. Localmente, las fallas de desplazamiento lateral se orientan N-S y E-W. Dichas estructuras se desarrollan principalmente en areniscas marinas y fluviales pobremente consolidadas, posiblemente miocénicas. En algunos sitios se observan deslizamientos rotacionales a partir de esas zonas de falla, promovidos por cortes en las laderas y construcción de viviendas. En la zona cartografiada, los echados de la secuencia sedimentaria buzan preferentemente en dirección contraria a la pendiente del cerro principal sobre el que se asientan las construcciones, lo que le da cierta estabilidad al terreno. La inestabilidad, promovida principalmente por la acción del agua, se asocia a la reactivación de estructuras de falla y a las pendientes pronunciadas, por lo que se recomienda un monitoreo permanente o sistemático del drenaje pluvial y de las obras de ingeniería civil. Es importante considerar también que la zona es sísmicamente activa y que esta actividad es también un factor que dispara los deslizamientos de ladera en zonas inestables.

Palabras clave: Deslizamientos; inestabilidad de talud; Tijuana, Baja California.

## INTRODUCCIÓN

Este estudio tuvo como objetivo determinar las condiciones geológicas, geomorfológicas y estructurales del terreno en el que asientan los fraccionamientos Privada Acantilado, Hacienda Acueducto y El Valle, en la ciudad de Tijuana, Baja California, mediante un reconocimiento geológico, mapeo estructural en afloramientos y mapeo de daños en las casas de los fraccionamientos. El estudio se realizó a solicitud de la Asociación de Colonos Privada Hacienda Santa Claudia, A.C., debido a que un gran número de viviendas de esos fraccionamientos presentan daños y agrietamientos recurrentes.

La zona de estudio se localiza en la parte centro-sur de la ciudad de Tijuana, Baja California (Fig.1).

Los fraccionamientos Privada Acantilado, Hacienda Acueducto y El Valle están asentados en la parte central de un cerro que en este trabajo llamaremos Cerro El Valle, que y está limitado al noroeste por la Avenida Emperadores y, al sur, por las avenidas Art. 53 y Ejército Trigarante.

Este cerro tiene una geometría irregular (Fig. 2); la extensión de su eje norte-sur es de aproximadamente 1200 metros y la de su eje este-oeste, es de aproximadamente 900 metros. La altura máxima del cerro es de 233 m, en un lugar ubicado en el límite sur del Fraccionamiento Hacienda Acueducto, a partir del cual el terreno donde se desarrollan los fraccionamientos tiene una pendiente relativamente suave hacia el norte y oeste, y abrupta hacia el este y sur.

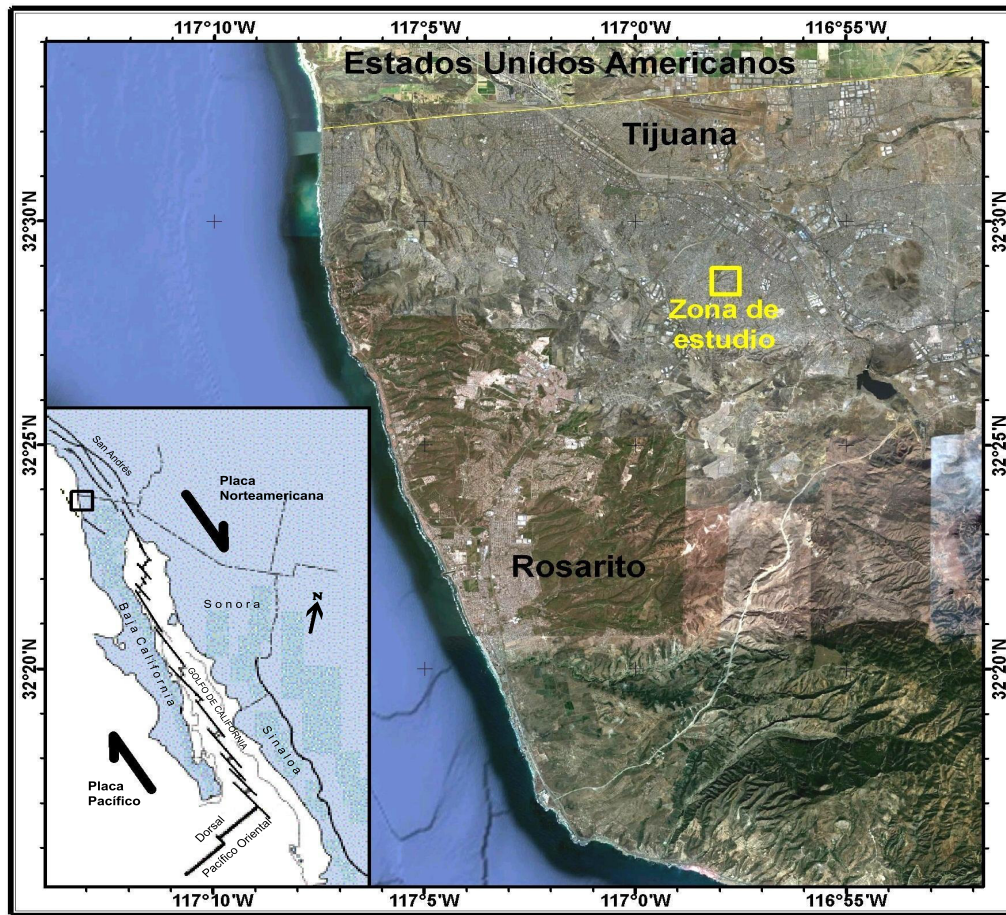


Fig. 1. Imagen satelital de la ciudad de Tijuana obtenida y modificada de Google Earth. El símbolo amarillo en la parte central de la imagen indica la localización del área de estudio. Las líneas amarillas interrumpidas son las principales vialidades de la ciudad.

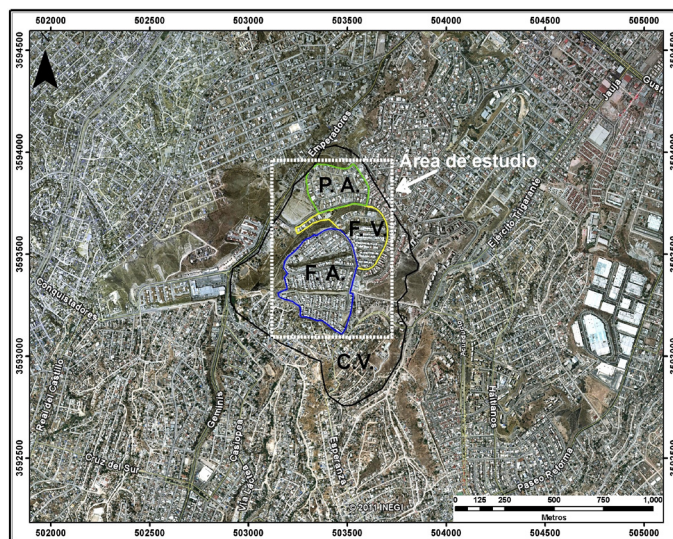


Fig. 2. Imagen satelital obtenida y modificada de Google Earth donde se indica el cerro urbanizado (área externa) en el que se localizan los fraccionamientos Privada Acantilado, Hacienda Acueducto y El Valle (área interna). Las líneas gruesas y continuas son las principales vialidades de la ciudad.

## Ambiente tectónico

La península de Baja California es un fragmento de corteza desprendida del macizo continental de México que se desplaza hacia el NW junto con la placa Pacífico. En el oriente, en la cuenca marginal del Golfo de California, se desarrolla un sistema de fallas escalonadas que definen al sistema transforme San Andrés-Golfo de California, activo desde hace aproximadamente 5 Ma. La región del norte de la península y sur de California se caracteriza por la presencia de fallas regionales activas orientadas NWSE. Legg y colaboradores (1991) definieron a este bloque como la Zona de Cizalla del Sur de California (Southern California Shear Zone). Sus límites están marcados por el sistema de fallas San Andrés en el oriente, el sistema San Clemente en el occidente (en ambiente marino), las Sierras Transversas en el norte, cerca de Los Ángeles, California, y el sistema de fallas Agua Blanca, al sur de Ensenada.

Dentro de este marco tectónico, en el norte de la península se desarrolla un complejo arreglo de fallas sísmicamente activas orientadas NW y una sismicidad cuyos epicentros se alinean NE, perpendicularmente a las fallas regionales. Entre Tijuana y aproximadamente 75 km al sur de Ensenada, el borde de la península muestra evidencias de importantes levantamientos (Rockwell et al., 1989). Se ha documentado por medio de sísmica de reflexión que las fallas cercanas a la costa afectan a sedimentos cuaternarios (Legg, 1991; Legg et al., 1991).

## Litología regional

En la parte noroccidental de la península, el basamento está formado por rocas graníticas y una secuencia metamorfizada de rocas volcánicas y volcanosedimentarias de arco de la Fm. Alisitos del Cretácico, que aflora ampliamente en el extremo oriental de Tijuana. El basamento está cubierto discordantemente por depósitos sedimentarios pobremente consolidados de la Fm. Rosario del Cretácico tardío (Fig. 3).

A las unidades cretácicas del basamento les sobreyace la Fm. Rosarito Beach, la cual está bien expuesta desde Tijuana hasta Ensenada.

Esta unidad del Mioceno está constituida por derrames basálticos, brechas y arenas con matriz de lodo, tobas, areniscas tobáceas, calizas y conglomerados característicos de ambientes fluviales, lacustres y de plataforma marina somera (Ashby, 1989). Durante el Plio-Pleistoceno, en los alrededores de Tijuana, se depositó la Fm. San Diego sobre tobas de la Fm. Rosarito Beach, la cual está constituida por arenas finas en la base y arenas y conglomerados en la cima, todo depositado en cuencas estructurales de tipo transtensional (Minch et al., 1984).

Sobreyace discordantemente la Fm. Lindavista del Pleistoceno-Reciente (Gastil et al., 1975) formada por areniscas y conglomerados que, en el sur de Tijuana, corona los cerros y mesas. La ciudad de Tijuana está edificada principalmente sobre estas dos últimas formaciones.

## Rasgos estructurales mayores y sismicidad

La deformación general del NW de Baja California está gobernada por el sistema San Andrés-Golfo de California. En el borde continental, los sismos son escasos pero los epicentros se alinean con las fallas (Legg et al., 1991). Todas las fallas en esta región son de tipo lateral derecho de las que se estiman velocidades de desplazamiento desde 1 mm hasta 6 cm por año (Rockwell et al., 1987; Legg et al., 1991; Legg, 1991; Suárez et al., 1991; Suárez, 1993). La presencia de estas fallas hace que el peligro geológico por sismicidad sea alto. Los mecanismos focales son consistentes con el sentido de desplazamiento inferido y los epicentros son paralelos a las trazas de las fallas (Legg et al., 1991). Una excepción importante es el sistema de fallas Vallecitos-Calabazas, el cual es considerado activo y su traza termina pocos kilómetros al SE de Tijuana. Cartografía reciente apoyada con estudios paleomagnéticos en el basamento (Böhnell et al., 2002) no indican actividad reciente en esta falla. Desde el punto de vista sísmico, mapas de distribución de energía sísmica en la región indican notables alineamientos de epicentros en dirección NE (Frez y Frías-Camacho, 1998) que pueden correlacionarse con las fallas cartografiadas por Gastil et al. (1975) en la región de Tijuana (Fig. 3).



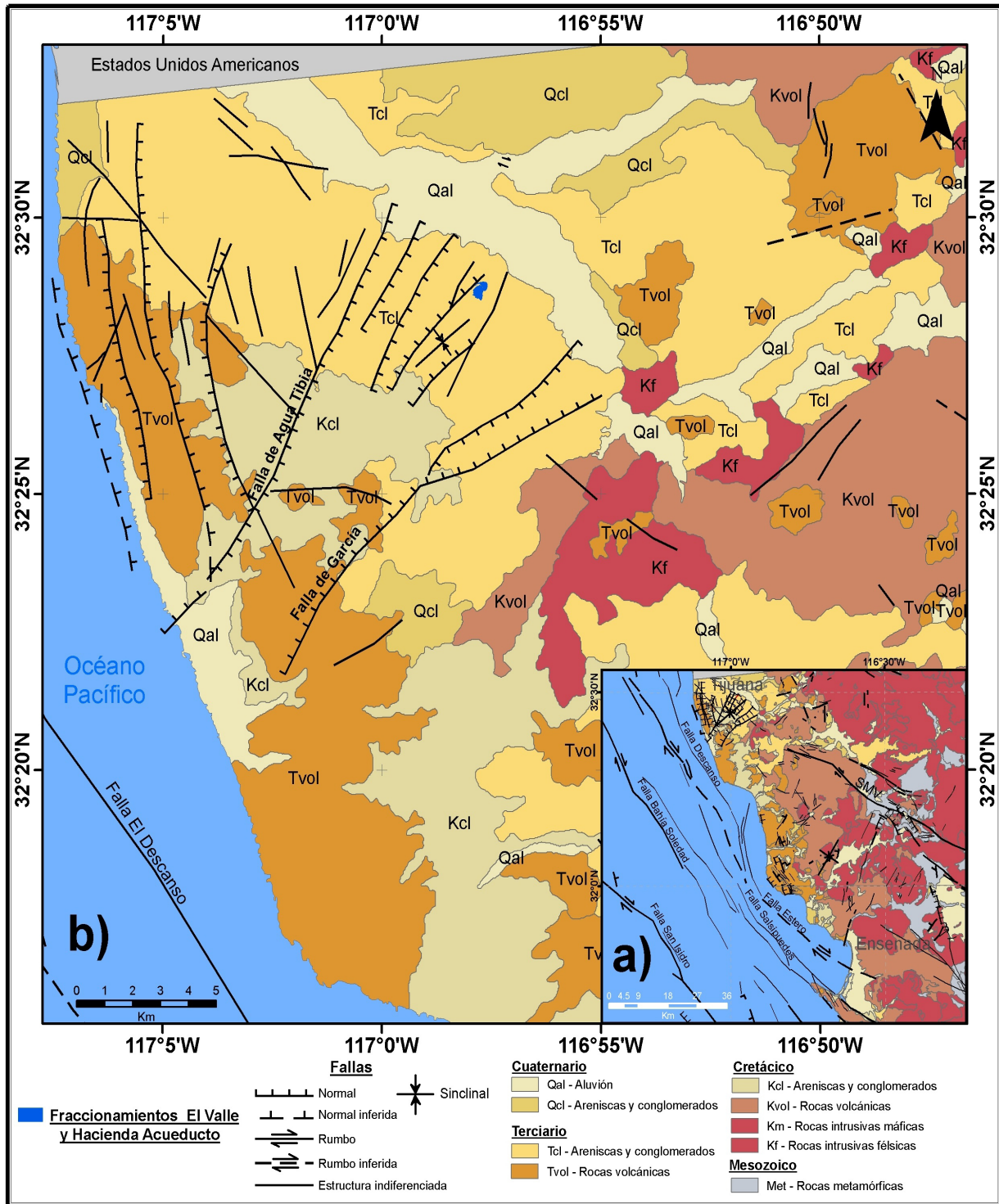


Fig. 3 a) Mapa geológico del NW de Baja California, donde se muestran las principales unidades litológicas y rasgos estructurales (Gastil *et al.*, 1975); b) Acercamiento a la región de Tijuana del mismo mapa (a) indicando en el cuadro rojo la ubicación de la zona de estudio. Litológicamente la zona se encuentra en rocas del Mioceno y Plioceno de origen marino y fluvial. Los principales rasgos estructurales son las fallas normales orientadas hacia el NE que indican el origen estructural de algunas cuencas de depósito y la presencia de pliegues con la misma orientación. Las fallas con orientación NW (San Miguel Vallecitos) son regionales de desplazamiento lateral derecho y las orientadas NNW cercanas a la costa son, en buena medida, producidas por levantamiento regional.



De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (2003), la zona de estudio se encuentra a 7 km al NW de la falla normal Agua Tibia que se orienta hacia el NNE-SSW con echado hacia el oeste, y a 10 km al noroeste del sistema de fallas San Miguel-Vallecitos (Fig. 3). Aunque este sistema de fallas es relativamente lejano, su carácter regional y potencial sísmico es importante. Dicho sistema está conformado por una serie de fallas de transcurrencia derecha, escalonadas y orientadas NW-SE. Aunque la actividad sísmica en el área de estudio es de baja magnitud, no deja de ser importante debido a la inestabilidad propia del terreno por las pendientes pronunciadas en algunas zonas así como a la poca competencia de las rocas.

En la Fig. 4 se muestran los epicentros de los sismos reportados por la Red Sismológica del Noroeste de México (RESNOM) durante las tres últimas décadas cuya magnitud es mayor de 2.5. Debe destacarse: a) la correlación entre el alineamiento de los epicentros con respecto a la traza de algunas fallas del mapa geológico de la Fig. 3, principalmente en el sistema San Miguel-Vallecitos; b) la alineación de epicentros en segmentos más pequeños, aunque menos evidentes, con orientación NE-SW; y c) la cercanía a la zona de este estudio de sismos de magnitud 2.7 y 2.8 en 1989 y, hasta de 3.9 en 2003 y 2005, en otras partes de la zona urbana de Tijuana.

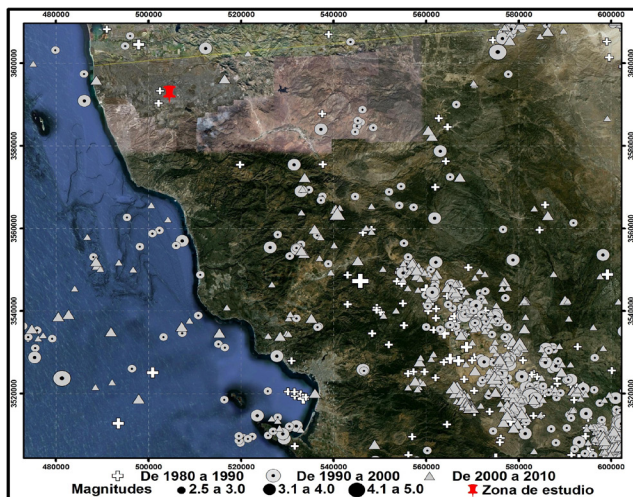


Fig. 4. Epicentros de sismos de magnitud mayor de 2.5 reportados por el CICESE (RESNOM) para las décadas 1980-1990, 1990-2000 y 2000-2010. El icono amarillo representa la zona de estudio.

## Antecedentes de deslizamientos en Tijuana

De acuerdo con Delgado-Argote et al. (1996), el riesgo geológico en Tijuana se debe a la conjunción de tres factores principales: presencia de fallas o fracturas, pendiente del terreno mayor o igual a 18% (10°) y una litología incompetente. De la evaluación regional de zonas de peligro, efectuada por los autores citados, se observa que éstas se localizan en los taludes o están cercanas a los rompimientos de pendiente en sitios donde la litología está dominada por las formaciones San Diego y Lindavista. La geometría dominante es de deslizamientos rotacionales. Deben considerarse como factores disparadores de los deslizamientos el grado de saturación de agua en los sedimentos, la respuesta sísmica del terreno y los cortes inducidos por la actividad del hombre.

## MÉTODOS

El trabajo de campo lo realizaron dos brigadas durante cinco días. Los datos estructurales se obtuvieron utilizando brújulas Brunton Geo en afloramientos de roca natural. La parte del estudio estructural se enfocó hacia la búsqueda y medición de estructuras geológicas tales como estratificación, fallas y fracturas en los terrenos con obras civiles. En estas formaciones incompetentes, los planos de estratificación pueden estar modificados por agentes erosivos. Otros fenómenos que contribuyen en la modificación del relieve son los asociados a las fallas y las fracturas, debido a que, cuando el material se comporta de manera rígida bajo un régimen de esfuerzos (gravitacionales o tectónicos), está sujeto a deformación por ruptura. Con los datos estructurales se construyeron dos perfiles para facilitar la visualización estructural del área de estudio.

Durante el reconocimiento del daño presente en las casas afectadas, el criterio usado para la medición de las grietas incluidas en este estudio, fue que: a) tuvieran una geometría clara e identificable; b) fueran penetrativas y claramente distintas a las debidas por defectos en la construcción; y c) su orientación y estilo se repitiera en el mismo inmueble. Se hicieron mediciones de agrietamientos que sugirieran movimiento en las viviendas a las que se tuvo acceso en la zona de estudio.

Estos datos se clasificaron en tres diferentes tipos:

a) plano de grietas con movimiento horizontal, b) plano de grietas con movimiento vertical y c) grietas en donde la dirección de movimiento se deduce a partir de series de fracturas, indicadas como plano inferido. Debido a que la gravedad es la fuerza principal de los deslizamientos, también se consideró la inclinación o pendiente del terreno en grados y la orientación azimutal de las pendientes, las cuales se midieron con brújula y se estimó visualmente la altura de los taludes donde se efectuaron las observaciones geológicas y de ruptura de obras civiles. Para correlacionar la orientación e inclinación de los taludes con respecto a las áreas de mayor daño, se cartografiaron direcciones estimadas de taludes.

Las estimaciones de orientación de taludes se efectuaron porque el mapa topográfico con el que se cuenta es de 1999 y muchos de los rasgos morfológicos actuales no aparecen. Es claro que en un mapa topográfico actualizado, los vectores de las pendientes deben ser perpendiculares a las curvas de nivel y, en este caso, los vectores se obtuvieron del promedio de por lo menos cinco mediciones de la dirección de la pendiente, comúnmente modificada por las obras de construcción.

Durante el trabajo de gabinete, la edición de las imágenes presentadas en este estudio se realizó por medio de la paquetería AutoCAD y Adobe Illustrator; la edición de las fotografías se llevó a cabo con la paquetería Corel Photopaint. Los datos obtenidos en este estudio fueron compilados en la paquetería Microsoft Excel y los mapas desarrollados a partir de la información de campo fueron generados en Arc Map 9.3.

La topografía se obtuvo de los datos vectoriales de la carta I11D71 (La Presa; INEGI, 1999). Las curvas de nivel con equidistancia de 20 metros fueron procesadas posteriormente en el programa ArcMap 9.3 para obtener curvas de nivel interpoladas con equidistancia de 5 m. A partir de estas curvas de nivel, con ayuda de las herramientas Spatial Analyst de ArcMap, se elaboró un modelo digital de elevación y la hidrología superficial del área de estudio.

## RESULTADOS

La litología de la zona de estudio consiste en horizontes de tobas, ocasionalmente con cristales de cuarzo y/o líticos de pómez hasta de pocos centímetros, de arenas tobáceas intercaladas con horizontes de varios centímetros de espesor de areniscas, similares a las de la Formación Rosarito Beach del Mioceno. Las areniscas están cubiertas, en contacto discontinuo, por depósitos de conglomerados polimícticos subangulosos y subredondeados de 20 a 0.5 mm, mal graduados, en una matriz de arenisca tobácea. También se observaron areniscas ligeramente cementadas de grano fino a medio, cuya relación estratigráfica con los depósitos anteriores se desconoce. En diferentes sectores se observó material de relleno para fines de obra civil, por ejemplo, en el terraplén donde se localiza el acueducto.

En la Fig. 5 se muestran los 18 sitios de donde se obtuvieron los datos con los que se elaboró el mapa estructural. La información está distribuida en los alrededores y dentro de los fraccionamientos Hacienda Acueducto, Privada Acantilado y El Valle. Con fines descriptivos, el área de estudio se dividió en cuatro cuadrantes: NW (noroeste), NE (noreste), SE (sureste) y SW (suroeste), según se indica en la Fig. 5.

En el cuadrante NW del área de estudio se identificó un conjunto de cizallas laterales izquierdas con componente normal con echado menor de 30°, lo que hace suponer que pueden estar asociadas con frentes de algún deslizamiento rotacional, toda vez que se localizan en las partes topográficamente más bajas, como hacia el sur de mercado Soriana y flanco NE del cañón que ocupa la avenida Emperadores. Las fallas normales son las más comunes. El rasgo más sobresaliente en estas estructuras es que todas, con excepción de una que se encuentra al NE del mercado Soriana y que es E-W con bloque caído hacia el sur, se orientan hacia el NE con caída dominante hacia el SW, en dirección de la pendiente. La orientación de las estructuras tiende a ser, en consecuencia, paralela a las curvas topográficas.

Se observa del histograma de pétalos de la Fig. 5 a del cuadrante NW y del estereograma 5 b del mismo cuadrante, que la dirección dominante de los planos de cizalla normales es  $N42^{\circ}E$ , con buzamiento promedio de  $80^{\circ}SE$ . La orientación de los planos de cizalla es paralela al gradiente topográfico de la zona de estudio.

En el cuadrante NE sólo se cartografió un plano de cizalla de desplazamiento lateral derecho con bloque caído hacia el W a lo largo de plano buzante  $60^{\circ}$ . A unas decenas de metros hacia el norte de este cuadrante, con centro en las coordenadas 503566-3594040 UTM, cerca del fraccionamiento Acantilado, se encuentra un área con colapso de casas que obedece a la reactivación de una falla que seguramente pertenece a la descrita, la cual se desarrolla en areniscas con material tobáceo y que se rellenó con material fluvial posiblemente durante el Cuaternario (Fig. 6 a).

La falla se orienta  $N10^{\circ}W$  con echado vertical y bloque caído hacia el W, similar al plano de cizalla cartografiado.

En la parte topográfica y estratigráficamente más alta del cuadrante SE, en el fraccionamiento Hacienda Acueducto, se cartografiaron planos que corresponden a fallas de desplazamiento normal o de gravedad, como la que se muestra en la Fig. 6 b. Es común que en estos sitios se observen estrías que indican, tanto movimientos verticales, como horizontales, por lo que se interpreta que el movimiento puede estar asociado con deformación transtensiva (transcurrencia y extensión) o antiguos deslizamientos rotacionales en donde hay, tanto fallas normales, como fallas de desplazamiento lateral (Fig. 6 b). Es muy probable que el plano de cizalla lateral localizado al oriente del acueducto tenga conexión con la falla lateral del cuadrante NE, definiendo una falla continua de desplazamiento lateral derecho que atraviesa toda la zona de estudio. Aunque son pocos datos, se observa en el histograma de pétalos y en el estereograma de planos de cizalla del cuadrante SE de la Fig. 5 a-b, que la tendencia NNW y NNE corresponden a las fallas de desplazamiento lateral cartografiadas en los cuadrantes NE y SE,

mientras que los pétalos menores con direcciones NE-SW estarían asociadas al movimiento de bloques por fallas normales. Esta interpretación es consistente con el origen estructural por fallas del relieve de la zona de estudio.

En el cuadrante SW también se cartografiaron planos de cizalla laterales pero, a diferencia de los cuadrantes orientales, los planos de cizalla indican movimiento con tendencia E-W, similar a las medidas en el cuadrante NW que está arriba. Los planos de falla normal, como en los casos anteriores, se orientan principalmente hacia el NE, siguiendo el estilo regional. El cambio de estilo de deformación lateral en este cuadrante puede interpretarse que se debe a la existencia de un bloque estructural distinto, como lo sugiere también la falta de regularidad en los echados de los horizontes estratigráficos.

Es común que los sitios donde se cartografiaron planos de cizalla, también tengan fracturas con arreglo paralelo al rumbo de los planos de falla, lo que indicaría que las fracturas fueron ocasionadas por el movimiento relativo de bloques.

Los estratos muestran una dispersión aparente al graficarlos en un estereograma (Fig. 7 a), sin embargo, en el histograma de pétalos de planos de estratificación de la Fig. 7 b, se observa que los planos se orientan preferentemente hacia el N y NE, de manera similar a la tendencia estructural. Lo anterior indica que los estratos se inclinan siguiendo el patrón de fallas regional y local, en un estilo de bloques hundidos y levantados que, por ser de origen tectónico, pueden estar asociados con fallas de varios kilómetros de profundidad.

Con respecto a los perfiles estructurales, se buscó que la orientación de éstos cortara de la manera más perpendicular posible a las estructuras geológicas dominantes, en las zonas donde existe mayor densidad de datos medidos. Los perfiles se presentan en la Fig. 8 a y b, donde se visualiza la dirección de la inclinación de los estratos y la separación en bloques estructurales debida a fallas de tipo normal y de desplazamiento lateral.



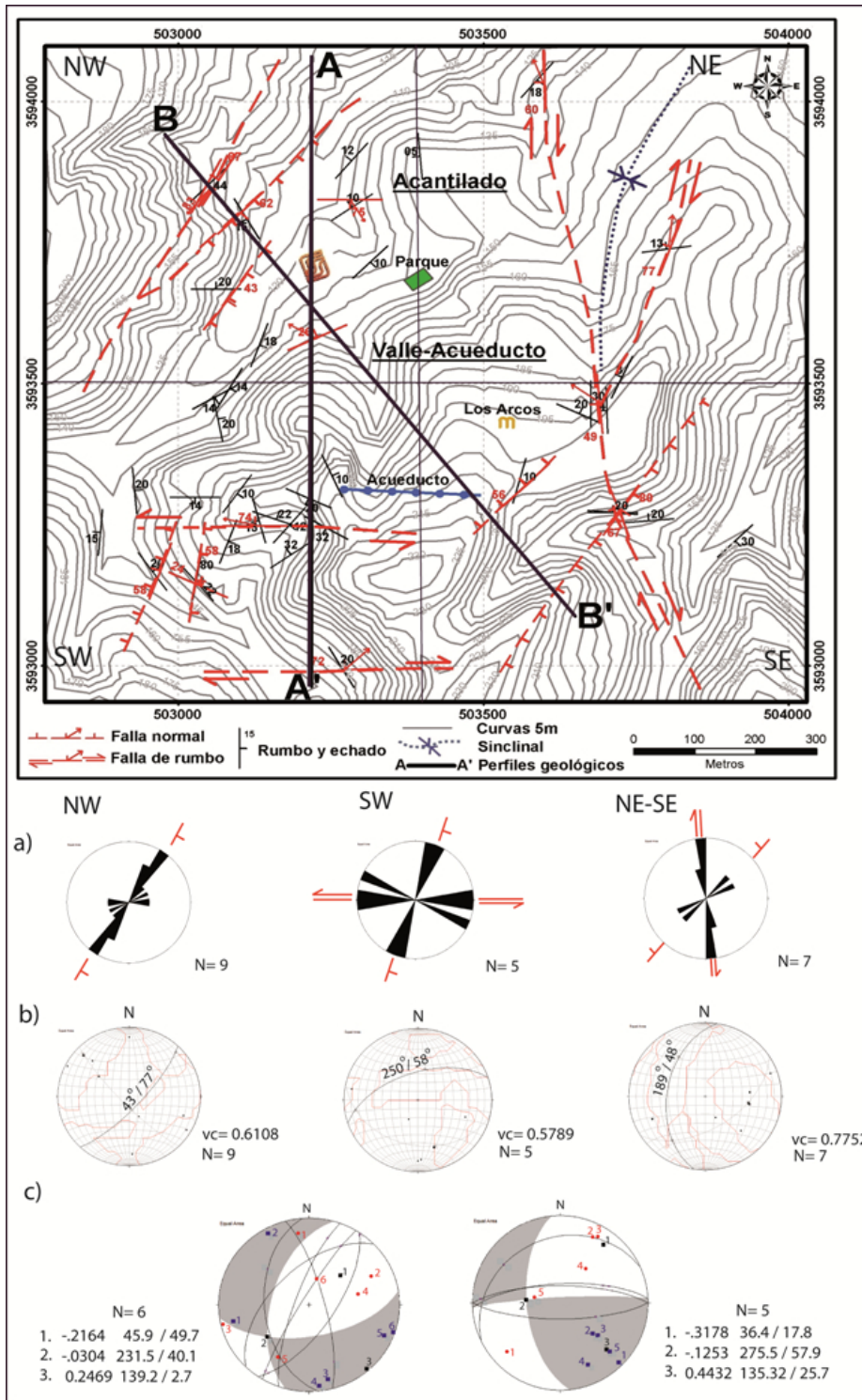


Fig. 5. Mapa de sitios con medición de planos de cizalla y de estratificación en el área de estudio. A partir de las mediciones y otras observaciones, por ejemplo de relieve y grietas, así como de correlación con estructuras adyacentes, se infiere con línea discontinua la extensión de las fallas. a) Histogramas que muestran la dirección de las fallas indicando con los símbolos su naturaleza; b) Proyección estereográfica de los planos de falla de los histogramas, indicando con el círculo máximo el rumbo e inclinación promedio; c) Análisis cinemático de los indicadores de movimiento de las fallas, donde se muestran los vectores de los esfuerzos máximo (1) y mínimo (3), que definen fallas normales (por gravedad) con componente de desplazamiento lateral en la solución de la izquierda y de movimiento lateral en la solución de la derecha.



Fig.6. a) Zona de colapso de una casa por reactivación de una falla normal con movimiento hacia el W, localizada hacia el NE del fraccionamiento Acantilado; la corona del deslizamiento es mayor a los 50 m. b) Falla normal con movimiento lateral derecho, indicando con la flecha el movimiento del bloque donde se encuentra el observador. Se infiere la existencia de una familia de fallas conjugadas desarrolladas en material compuesto por arenas pobremente consolidadas.

Con respecto al sentido del echado, se puede observar que éste no aumenta la inestabilidad del terreno pues está en dirección opuesta a la pendiente, salvo en el extremo derecho, que se encuentran fuera del perímetro de los fraccionamientos para los que se hizo este estudio. En el mismo extremo derecho, el bloque estructural indicado con fallas normales en sus costados también tiene movimiento lateral: hacia el observador en A-A' y hacia el interior de la imagen en la sección B-B'. Se observa también en ambas secciones que las fallas dominantes son de tipo normal y que, en combinación con los movimientos laterales definen a la zona como sujeta a deformación transtensional (movimiento lateral y por gravedad). Al mismo resultado se llega del análisis cinemático que está en la Fig. 5 c, donde se obtienen dos soluciones a partir de los datos de toda la región los cuales, se infiere que deben ser casi contemporáneos en tiempo geológico, esto es: en la solución de la izquierda, el vector del esfuerzo principal máximo (1) está cerca del centro del círculo, corresponde a la gravedad y forma fallas normales. Por su parte, en la solución de la derecha, el esfuerzo principal máximo (1) está cerca de la periferia del círculo, indica que es casi horizontal y dirigido hacia el SW, y produce fallas de desplazamiento lateral.

Para evaluar el daño estructural en los inmuebles se hicieron 48 mediciones de agrietamientos que sugieren movimiento en las viviendas a las que se tuvo acceso en la zona de estudio. Se identificaron siete sitios con grietas que indican movimiento horizontal, cinco de ellos localizados en el sector norte del área de estudio, en los límites de los cuadrantes NW y NE, y dos en la zona SE, cerca del límite con el cuadrante SW, donde se encuentra el acueducto.

En los sitios del cuadrante SE, donde hay movimiento horizontal, se observaron grietas en una barda de contención de la parte sur del acueducto y en una vivienda de la privada Hacienda del Bosque. Esta última había sido ampliada a principios de 2010. En esta zona, las grietas indican movimiento casi en dirección de la pendiente, la cual ha sido modificada por obras civiles, lo que hace difícil distinguir si el movimiento se debe a fallas de tipo geológico (como las observadas principalmente en los cuadrantes del norte) o a deslizamiento promovido por la pendiente modificada. Los sitios con movimiento vertical fueron 27. Se trató de muestrear todas las privadas del área de estudio; sin embargo, debido a que se tuvo más acceso a la zona cercana al acueducto y de las construcciones ubicadas próximas a la calle Paseo de los Parques, la densidad de datos es mayor en esos lugares (Fig. 9).

En la Privada Santa Claudia, que se encuentra en una cresta cuyo origen es geológicamente estructural, el movimiento vertical en las obras civiles muestra un comportamiento asociado, tanto a las pendientes, como a la existencia de fallas (ver falla lateral vertical en 800 del eje horizontal de la sección estructural A-A' de la Fig. 8). En un área de algunos cientos de metros cuadrados se observó movimiento vertical en sentidos opuestos; esto es, las grietas del lado Este, en barda y pavimento indican movimiento hacia el SSW, mientras que las encontradas en el Oeste, en bardas y paredes de casa, se mueven hacia el N.

El conjunto de grietas que definen planos inferidos con movimiento vertical fueron 14. En una vivienda se pudo observar que la base de una construcción se separa del resto de la casa, y este estilo se observó en seis casas del fraccionamiento Hacienda Acueducto. La caída en la mayoría de los casos es hacia el Norte, por lo que guarda una estrecha relación con la dirección de pendiente de los taludes.

Se cartografiaron 34 direcciones estimadas de taludes y se puede apreciar en el mapa de la Fig. 9, que la mayoría de los planos con movimiento vertical tienden a orientar su caída siguiendo la pendiente de los taludes. Se encontraron varias evidencias de la relación entre la deformación por ruptura de las estructuras de las casas con respecto a la cercanía con los taludes de las plataformas.

## DISCUSIÓN

El agrietamiento en las unidades habitacionales cercanas a los taludes puede ser la respuesta a la desestabilización de terraplenes por cortes al pie de talud, por las pendientes altas en terrenos con litología pobremente consolidada y por el aumento considerable de peso en las construcciones originalmente diseñadas debido a ampliaciones o remodelaciones, lo cual puede hacer que se pierda el equilibrio de esfuerzos en el interior de las masas sobre las que se asientan las edificaciones.

Se identificó que la dirección de movimiento en la mayor parte de las zonas afectadas concuerda con las orientaciones de los taludes indicados en la Fig. 9. Un ejemplo notable es la zona localizada en el extremo occidental del acueducto indicado como Santa Claudia en la misma Fig. 9, en donde las direcciones de movimiento tienden a ser hacia el norte y sur debido a que las viviendas se localizan en una cresta, además de que, por lo menos en el costado sur de dicha cresta, existen fallas geológicas de tipo normal y de desplazamiento lateral.

La información recabada indica movimiento del terreno en diferentes direcciones. De acuerdo con las características del terreno y las manifestaciones de movimiento, el área de estudio se puede dividir en tres sectores principales: fraccionamientos del Valle y Hacienda Acueducto, Fraccionamiento Acantilado y el coto Santa Claudia.

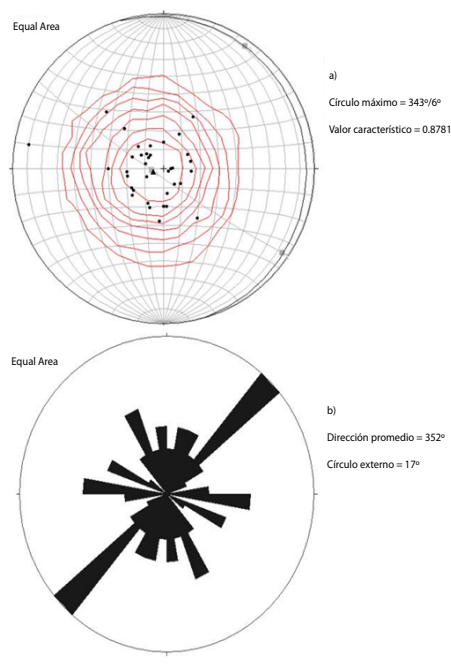


Fig.7. Estereograma de polos (a) e histograma de rosa (b) de los rumbos y echados de 41 estratos en la zona de estudio. a) El círculo máximo que mejor contiene a los polos es 344/6; b) el círculo externo corresponde al 17% de los datos; la dirección promedio se orienta 352°.



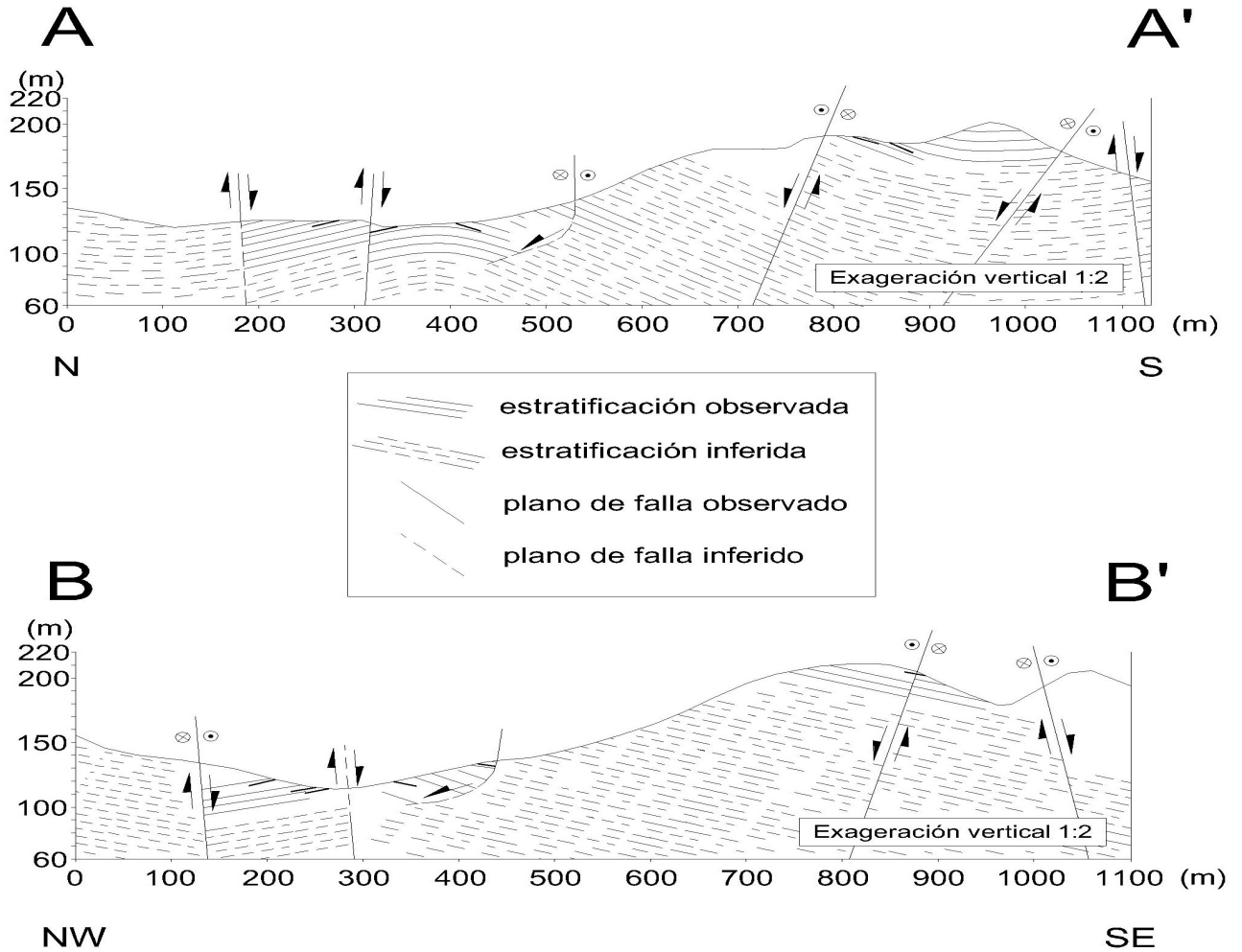


Fig. 8. Perfiles estructurales del cerro El Valle, donde se asientan los fraccionamientos Privada Acantilado, Hacienda Acueducto y El Valle. En el perfil A-A' se observa que en la parte topográficamente más baja, existe una estructura de tipo anticlinal cuyo origen puede ser el movimiento de bloques por fallas predominantemente normales. El círculo con cruz entre fallas normales indica que hay movimiento lateral del bloque interior hacia "enfrente" o hacia el oriente según el mapa de la Fig. 7; la parte topográficamente baja al sur de esa sección corresponde al coto Santa Claudia. En el perfil B-B', en el extremo SE, se observa que la estructura dominante es la de un bloque levantado, aunque el bajo topográfico en forma de silla en la parte interna puede indicar la presencia de fallas o fracturas que no se observan por estar cubiertas por las obras civiles.

## Descripción por sectores

Como se muestra en la Fig. 9, en la zona de los fraccionamientos donde se efectuó el estudio geológico se observan movimientos orientados principalmente hacia el N-NW. Con excepción de los movimientos más orientales, localizados topográficamente debajo de la cresta definida por el parteaguas de la Fig. 9, la dirección de los movimientos correlaciona con la de los taludes.

**Sector Acantilado.**-En la zona de la privada Acantilado se identificó el mayor número de sitios con evidencias de movimiento horizontal, asociados a la existencia de fallas laterales con componentes normales que posiblemente resultan de la rotación de bloques debida a deslizamientos rotacionales. Se observa también que los movimientos en los inmuebles guardan correlación con la dirección de los taludes y con la topografía de la zona. Una explicación alternativa a las evidencias de movimiento horizontal es asociar este movimiento a razones más gravitacionales que estructurales; esto es, una geometría relacionada con deslizamiento traslacional en donde segmentos discretos de la masa de la parte inferior están separados entre sí por fallas de desplazamiento lateral. Bajo este esquema, el sector Valle-Acueducto estaría en la parte alta de la masa en movimiento.

**Sector Valle-Acueducto.**- Estructuralmente, la parte central del sector se caracteriza por la ausencia de estructuras de falla importantes, debido presumiblemente a la escasez de afloramientos. Las estructuras de falla más importantes se encuentran en el extremo oriental del sector, donde se cartografió la falla de desplazamiento lateral derecha que atraviesa la zona de estudio en dirección N-S.

En contraste, la parte central tiene los gradientes topográficos más pronunciados hacia el norte que el resto de la zona de estudio, caracterizándose también porque el echado de las capas es opuesto a la pendiente general.

Como se puede observar en los perfiles estructurales de la Fig. 8, las fallas con movimiento normal están inclinadas en dirección de la

pendiente, por lo que se interpreta que parte del sector tiene un origen estructural, y es de esperar que en el interior de los bloques existan fallas o fracturas menores pero paralelas a las principales. Al combinar estructuras geológicas de ruptura (fallas y fracturas) en terrenos cuya litología sedimentaria está pobremente consolidada, y la construcción densa de viviendas de concreto, se promueve el desarrollo de deslizamientos rotacionales. La importancia de estas inferencias radica en que ahora es necesario confrontar las explicaciones que atribuyen los movimientos en las viviendas a procesos de asentamiento local (escala de pocos lotes; García-Ramírez, 1999) con respecto a aquellas de tipo eológico y de alcance más regional (escala del cerro El Valle completo).

En la zona topográficamente más alta de este sector se observó que en las viviendas cercanas al muro de contención que se extiende paralelo al acueducto, el movimiento registrado en los inmuebles es predominantemente hacia el Norte, lo cual sugiere que se debe principalmente a la inestabilidad del terreno causada por las pendientes pronunciadas, además de la posible existencia de fallas geológicas orientadas N-S, paralelas al cañón que corta en ángulo recto al acueducto; este último resalta claramente en la Fig. 10 y en la actualidad se localiza en la zona de la Privada Hacienda del Río. Debe mencionarse que en esta zona de escurrimiento antiguo (que incluso puede explicar la ruptura del acueducto), de acuerdo con la opinión de Díaz-García (2010), se interpreta la presencia de una estructura lineal también de dirección casi N-S.

**Subsector Santa Claudia.**- En la zona de la privada Santa Claudia se observaron dos direcciones principales de movimiento: uno hacia el Norte que sigue, tanto la dirección de fallas regionales importantes, como la tendencia principal del movimiento de los fraccionamientos El Valle y Hacienda Acueducto, y otro en el extremo Sur de este coto, donde se registró una caída hacia el SW. Esta última dirección es la misma que tiene el talud en esta zona. Es importante señalar que en el escarpe orientado E-W que separa al fraccionamiento Hacienda Acueducto de la Colonia Anexa Sánchez Taboada se midió una falla de desplazamiento lateral paralela al

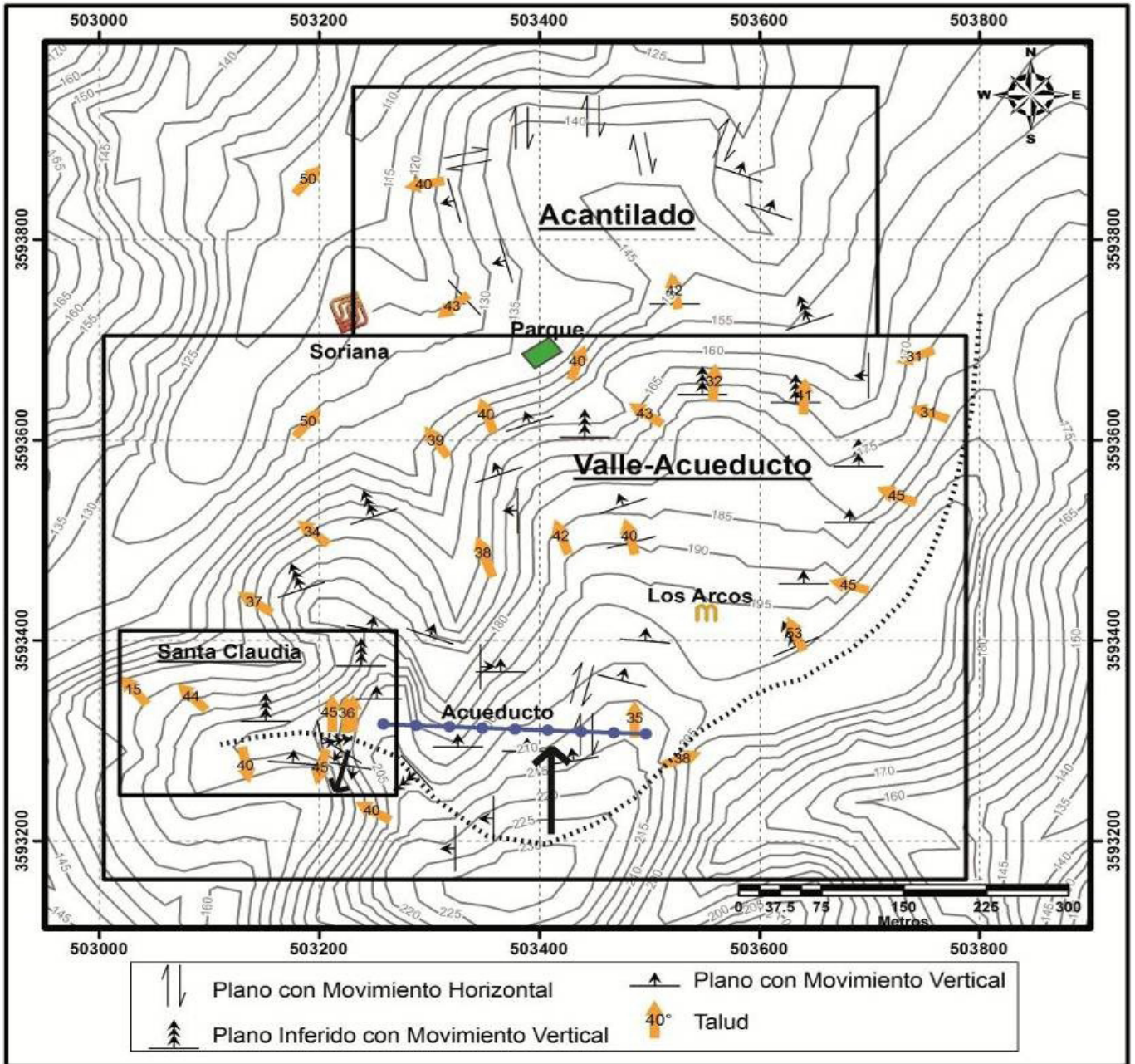


Fig. 9. Cartografía de fracturas observadas en los inmuebles del área de estudio, clasificadas de acuerdo con el movimiento observado o inferido a partir de rasgos de movimiento. Se muestra la dirección de los movimientos verticales, orientación de taludes actuales y, en recuadros, las tres zonas en las que se dividió el área, según sus características de deformación. La línea punteada marca el parteaguas topográfico en la zona. Las flechas gruesas apuntan hacia la dirección del movimiento predominantemente: hacia el Norte en los fraccionamientos El Valle y Hacienda Acueducto, y hacia el SSW en los límites de Santa Claudia con Valle-Acueducto.



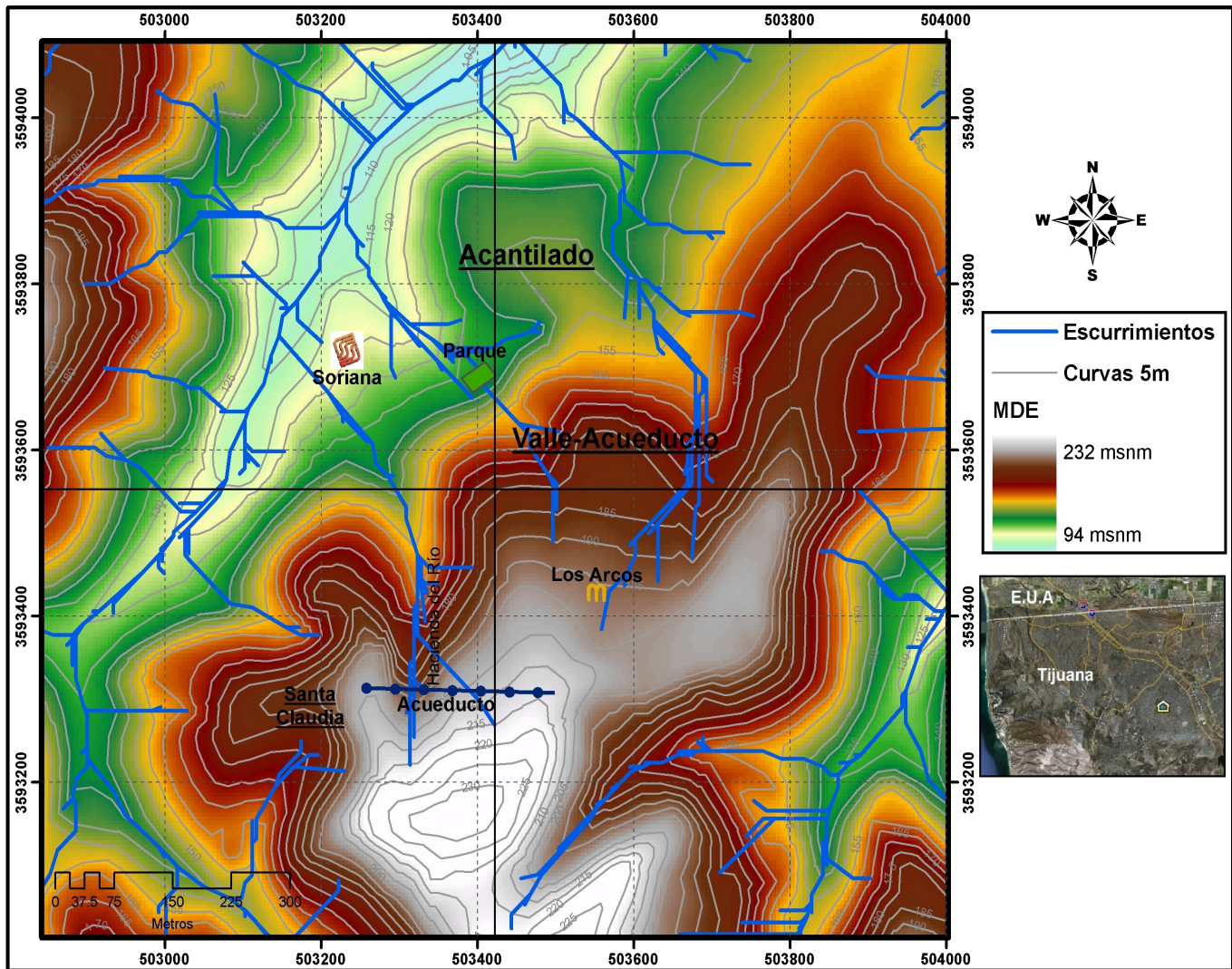


Fig. 10. Mapa de escurrimientos obtenidos a partir de la topografía de 1999. Se observa que tanto los drenajes principales, como el cerro El Valle, se orientan hacia el NE, al igual que las fallas y pliegues regionales mostrados en el mapa geológico. Los escurrimientos tienen un patrón predominantemente rectilíneo que sigue la orientación de las fallas cartografiadas en la zona de estudio: N-S, NW y E-W. Este patrón, de origen estructural, es distinto al que se esperaría en una zona estable dominada por sedimentos pobremente consolidados en donde se desarrollaría un drenaje integrado de tipo dendrítico. Es particularmente importante observar los escurrimientos orientados N-S en Valle-Acueducto y Acantilado, donde se midieron fallas en esa dirección, y en Hacienda del Río que corta al acueducto, donde se infiere la existencia de una falla o fractura; el pequeño rasgo al sur de Santa Claudia que se orienta E-W es paralelo a la falla de desplazamiento lateral medida y puede ser la expresión de una estructura mayor que continúa hacia el oriente.

escarpe que indica que la zona ha estado sujeta a deformación reciente. Además, es importante resaltar que el límite sur de este coto tiene una pendiente que en algunos lugares es incluso superior a 60.

## CONCLUSIONES

Tomando en cuenta la información estructural recabada en este estudio, el resultado de las direcciones en los movimientos verticales en las viviendas dañadas y en las pendientes del cerro El Valle, así como de la inferencia de fallas de posible carácter regional, ambas interpretadas a partir de imágenes satelitales, los autores del presente trabajo no identifican la existencia de cabeceras de deslizamiento. En su lugar, aquí se reporta que los movimientos en la zona se correlacionan de manera más directa con las direcciones de las pendientes en los taludes de los terraplenes, y que el movimiento principal en la zona es hacia el NNW, además de identificar que el cerro El Valle es de origen estructural y su geometría coincide con los rasgos estructurales regionales e incluso con los que se desprenden de la sismicidad regional.

Se recomienda a los habitantes de estos fraccionamientos:

1. Mantener un monitoreo permanente en las zonas donde se han medido e inferido fallas geológicas pues cada una de estas estructuras es una discontinuidad susceptible de moverse por efectos naturales como los sismos o peso adicional al natural del terreno debido a las construcciones. Debe tomarse en cuenta que un agente disparador o promotor de movimiento es el agua, por lo que deberá hacerse una revisión cuidadosa del drenaje pluvial y vigilar permanentemente la fuga de tuberías.

2. Instalar estaciones de monitoreo topográfico de detalle para detectar posibles movimientos de masas asociados a deslizamientos traslacionales, los cuales son muy lentos pero pueden producir deformaciones por ruptura en obras civiles al cabo del tiempo.

3. Evitar las ampliaciones o modificaciones a los inmuebles para no aumentar la carga al terreno.

4. Monitorear el desarrollo de las fracturas en las casas midiéndolas en periodos mensuales o trimestrales, dependiendo de los antecedentes de la zona, y evitar cubrirlas para observar su desarrollo.

## AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a los miembros de la asociación de colonos Privada Hacienda Santa Claudia, A.C. y a los habitantes de los fraccionamientos Privada Acantilado, Hacienda Acueducto y El Valle por su amabilidad y confianza. Los autores agradecen el agudo arbitraje efectuado por Felipe Escalona, gracias al cual este manuscrito mejoró enormemente.

## REFERENCIAS

- Ashby, J.R., 1989. A resume of the Miocene stratigraphic history of the Rosarito Beach Basin, northwestern Baja California, Mexico. En: Patrick L. Abbott, editor, Geologic studies in Baja California, Book 63, p. 37-45.
- Böhnel, H., Delgado-Argote, L.A. and Kimbrough, D., 2002. Discordant paleomagnetic data for Middle-Cretaceous intrusive rocks from northern Baja California: Latitude displacement, tilt, or vertical axis rotation? *Tectonics*, V. 21-5. p. 1029-1043.
- Delgado-Argote, L.A., Hinojosa-Corona, A., Aragón-Arreola, M., y Frías-Camacho, V., 1996. Estudio de riesgo geológico en Tijuana, Baja California, con base en rasgos estructurales y la respuesta del terreno, *GEOS*, vol. 16, no.2, p. 57-89.
- Díaz-García, J., 2010. Estudio de fotointerpretación en el área de la Privada Hacienda Santa Claudia en el Fraccionamiento Acueducto en Tijuana, B.C., 3GEO Servicios Profesionales de Geología, Geofísica y Geotecnia, 15 pp.

- Frez, J. y Frías-Camacho, V.M., 1998. Distribución de energía sísmica en la region fronteriza de ambas Californias, GEOS, 18-3, p. 189-196.
- García-Ramírez, R.R., 1999. Proyecto "El Valle Fase II, Colonia Sánchez Taboada, Tijuana, Baja California: Estudio Geotécnico, GEOCON Inc., 21 pp y anexos.
- Gastil, R.G., Phillips, R. and Allison, E., 1975. Reconnaissance geology of the State of Baja California, Geological Society of America Memoir 140, 170 pp.
- INEGI, 1999. Conjunto de datos vectoriales de la carta topográfica I11D71 La Presa, escala 1:50,000.
- Legg, M.R., 1991. Sea beam evidence of recent tectonics activity in the California Continental Borderland. En: Paul Dauphin and Bernard Simoneit, Editors, The gulf and peninsular province of the Californias, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, p. 179-196.
- Legg, M.R., Wong, V. and Suárez, F., 1991. Geologic structure and tectonics of the inner Continental Borderland of northern Baja California. En: Paul Dauphin and Bernard Simoneit, Editors, The gulf and peninsular province of the Californias, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, p. 145-177.
- Minch, A. J., Ashby, J., Deméré, T. and Kuper, T., 1984. Correlation and depositional environments of the Middle Miocene Rosarito Beach Formation of northwestern Baja California, Mexico. En: J.A. Minch and J.R. Ashby, Editors, Miocene and Cretaceous depositional environments, northwestern Baja California, Mexico: Pacific Section, American Association of Petroleum Geologists, V. 54, p. 33-46.
- Rockwell, K.T., Hatch, E.M. and Shug, L.D., 1987. Late Quaternary rates Agua Blanca and borderland faults: Final Technical Report USGS, contract No. 14-08-0001-22012, 122 pp.
- Rockwell, K.T., Muhs, D., Kennedy, G., Hatch, M., Wilson, S. and Klinger, R., 1989. Uraniumseries ages, faunal correlations and tectonic deformation of marine terraces within the Agua Blanca fault zone at Punta Banda, northern Baja California, México. En: Patrick Abbott, editor, Geologic Studies in Baja California, The Pacific Section Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Los Angeles, California U.S.A., p. 1-16.
- Servicio Geológico Mexicano (2003), Carta Geológica-Minera Tijuana I11-11, escala 1:250,000.
- Suárez-Vidal, F., Armijo, R., Morgan, G., Bodin, P. and Gastil, G., 1991. Framework of recent and active faulting in northern Baja California. En: Paul Dauphin and Bernard Simoneit, Editors, The Gulf and Peninsular Province of the Californias. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, p. 285-300.
- Suárez-Vidal, F., 1993. Marco estructural de la Falla Agua Blanca, Baja California, México. En: Delgado-Argote, L. A. y Martín-Barajas, A., Editores, Contribuciones a la Tectónica del Occidente de México, Unión Geofísica Mexicana, Monografía No. 1, p. 24-39.

Manuscrito recibido: 15 de marzo, 2011

Recepción del manuscrito corregido: 25 de junio, 2011

Manuscrito aceptado: 5 de julio, 2011