



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

## PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**EVALUACIÓN DE PELIGRO POR LAHARES EN LA LADERA SW  
DEL VOLCÁN DE COLIMA**

# **T E S I S**

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA

ANAID PÉREZ PÉREZ

JURADO EXAMINADOR

Directora de Tesis DRA. ANA LILLIAN MARTIN DEL POZZO  
DR. SERGIO RODRÍGUEZ ELIZARRARÁS  
DR. DAVID A. NOVELO CASANOVA  
DR. JOSÉ LUIS MACIAS VÁZQUEZ  
DRA. LUCIA CAPRA



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos:

A CONACyT por el apoyo proporcionado durante la Maestría y la realización de esta Tesis. A la Unidad Estatal de Protección Civil Colima, en especial a Melchor Úrsua y a Edgar Figueroa Gutiérrez por el apoyo brindado para realizar el trabajo de campo. A la Universidad de Colima, en especial al M.C. Gabriel Reyes, al Dr. Tonatiuh Domínguez, al Dr. Nick Vardley y al M. Juan Carlos Gavilanes por la información proporcionada y los comentarios para la elaboración de esta Tesis. Al Lic. Adolfo Virgen Schulte, por permitirnos instaurar las estaciones de medición en su propiedad. Al Centro Nacional de Prevención de Desastres por el Modelo Digital de Elevación del Volcán de Colima proporcionado para la realización de las simulaciones.

A la Dra. Ana Lillian Martin Del Pozo por su asesoría para este trabajo de Tesis. A los revisores Dra Lucia Capra, Dr. José Luis Macias, Dr. David Novelo y Dr. Sergio Rodríguez, por sus acertados comentarios. Al Dr. Roberto Bonifaz por su apoyo para el manejo de los Sistemas de Información Geográfica. A Hugo Murcia y a Teo Hernández por su valiosa ayuda para aprender a utilizar TITAN2D.

A mi compañero y amigo Amiel Nieto por todas las enseñanzas en lo personal y académico. Al Choforo por las importantes aportaciones y múltiples explicaciones para mejorar este trabajo. A Rita Fonseca, Fabiola Mendiola y Norma Dávila por sus valiosas recomendaciones. A los Ingenieros Miguel Ángel García, Daniel Rodríguez e Iván Rodríguez por su apoyo y amistad.

---

 ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	2
1.2. TIPOS DE LAHARES Y CARÁCTERÍSTICAS DE LOS DEPÓSITOS....	2
1.3. GEOMORFOLOGÍA DEL ÁREA.....	6
1.4. ANTECEDENTES GEOLÓGICOS.....	8
1.5. LAHARES EN OTROS VOLCANES.....	10
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	14
CAPÍTULO 3. ACTIVIDAD DEL VOLCÁN DE COLIMA Y RECURRENCIA DE LAHARES .....	27
CAPÍTULO 4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS TEMPORAL Y TEXTURAL.....	40
CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LA SIMULACION DE LAHARES.....	50
5.1. LAHARZ.....	50
5.2. TITAN2D.....	53
5.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	61
5.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE TITAN2D Y LAHARZ.....	66
CAPITULO 6. ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS, ESCENARIOS DE PELIGRO Y VULNERABILIDAD.....	70
6.1. ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS.....	70
6.2. ESCENARIOS DE PELIGRO.....	78
6.3. VULNERABILIDAD FÍSICA Y ESTRUCTURAL DE LA LADERA SW .....	81
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	85
REFERENCIAS.....	89

---

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Fig. 1. Localización del Volcán de Colima al oeste de la Faja Volcánica Mexicana.....	1
Fig. 2. Red de Barrancos en el complejo de los volcanes de Colima.....	7
Fig. 3 Mapa de localización de las estaciones de medición instaladas en la ladera SW del Volcán de Colima.....	14
Fig. 4 Perfiles Topográficos de las Barrancas La Lumbre, el Zarco y El Cordobán.....	16
Fig. 5. Secciones trazadas en las estaciones de medición instaladas en la ladera SW del Volcán de Colima.....	17
Fig. 6. Estaciones establecidas en el Río La Lumbre.....	18
Fig. 7. Estaciones establecidas en el Río El Zarco.....	19
Fig. 8 Estaciones establecidas en el Río El Cordobán.....	19
Fig. 9 Mapa de localización de los depósitos iniciales.....	21
Fig. 10 Diagrama de la línea de energía y las dimensiones de un lahar simulado con LAHARZ.....	23
Fig.11. Generación de lahares a partir de flujos piroclásticos.....	29
Fig. 12. Relación de precipitación media mensual estatal con la frecuencia de lahares en el Volcán de Colima.....	37
Fig. 13. Domo del Volcán de Colima 2007.....	38
Fig. 14. Domo del Volcán de Colima 2008.....	38
Fig. 15 Domo del Volcán de Colima 2009.....	39
Fig. 16. Vista del domo sector W 2010.....	39
Fig. 17. Secciones comparativas trazadas en la parte alta, media y baja del Río La Lumbre.....	40
Fig. 18. Cambios identificados durante las campañas en la estación media de la Barranca La Lumbre (BLb).....	41
Fig. 19. Cambios en el primer pilar del puente La Lumbre.....	42
Fig. 20. Cambios en el segundo pilar del puente La Lumbre.....	42
Fig. 21. Cambios en el tercer pilar del puente La Lumbre.....	43

Figura 22. Secciones comparativas trazadas en la parte alta, media y baja del Río El Zarco.....	44
Fig. 23. Cambios identificados en la estación media de la Barranca El Zarco durante los meses de abril, julio y diciembre 2008.....	44
Fig. 24. Secciones comparativas trazadas en la parte alta, media y baja del Río El Cordobán.....	45
Figura 25. Clasificación granulométrica de acuerdo al porcentaje de peso y tamaño de grano.....	49
Fig. 26 Simulación de Lahares Secundarios con un volumen total de $1 \times 10^5 \text{ m}^3$ por las Barrancas La Lumbre, El Zarco y el Cordobán en la ladera SW del volcán de Colima, ocurridos durante la temporada de lluvias de los años 2008 y 2009.....	51
Fig. 27 Simulación de Lahares Secundarios con un volumen de $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ por las Barrancas La Lumbre, El Zarco y el Cordobán en la ladera SW del volcán de Colima, ocurridos durante la temporada de lluvias de los años 2005 y 2006.....	52
Fig. 28. Simulación de Lahares Secundarios con un volumen de $3.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ en las Barrancas La Lumbre, El Zarco y el Cordobán en la ladera SW del volcán de Colima, ocurridos en el año 2000.....	52
Fig. 29 Gráfica de velocidad y Simulaciones Barranca El Cordobán.....	54
Fig. 30 Gráfica de velocidad y Simulaciones Barranca La Lumbre.....	55
Fig. 31 Gráfica de velocidad y Simulaciones Barranca El Zarco.....	56
Fig. 32. Gráficas de velocidad de las simulaciones de lahares Barranca La Lumbre (BL) con ángulo base de $5^\circ$ , Barranca El Cordobán (BC) y Barranca El Zarco (BZ) con ángulo base de $7^\circ$ .....	57
Fig. 33. Simulación de lahares secundarios el la ladera SW del Volcán de Colima utilizando el programa Titan2D.....	59
Fig. 34. Simulación de Lahares secundarios con Titan2D, volumen de $3.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ en las Barrancas La Lumbre, El Zarco y el Cordobán en la ladera SW del volcán de Colima, ocurridos en el año 2000.....	60

Fig. 35 Simulación de Lahares secundarios con Titan2D, volumen de $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ por las Barrancas La Lumbre, El Zarco y el Cordobán en la ladera SW del volcán de Colima, ocurridos durante la temporada de lluvias de los años 2005 y 2006.....	61
Fig. 36 Comparación de resultados de campo y simulaciones de lahares secundarios y sin eruptivos.....	62
Fig. 37. Alcance de los lahares secundarios de la ladera SW del Volcán de Colima. Simulaciones realizadas con los programas Titan2D y LaharZ comparados con los datos de campo. Barranca Cordobán (BC), El Zarco (BZ) y La Lumbre.....	63
Fig. 38. Secciones de inundación en las Barrancas La Lumbre, el Zarco y El Cordobán con un Volumen de $1 \times 10^5 \text{ m}^3$ .....	64
Fig. 39. Secciones de inundación en las Barrancas La Lumbre, el Zarco y El Cordobán con un Volumen de $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ .....	64
Fig. 40. Secciones de inundación en las Barrancas La Lumbre, el Zarco y El Cordobán con un Volumen de $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ .....	65
Fig. 41. Simulación con LaharZ de lahares sineruptivos con un volumen de $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ en la ladera SW y porcolapso $2.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ en el Río Armería.....	66
Fig. 42 Simulación con Titan2D de lahares sineruptivos con un volumen de $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ en la ladera SW y porcolapso $2.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ en el Río Armería.....	66
Fig. 43. a) Hotel Ex hacienda San Antonio, b) Centro Turístico La María.....	72
Fig. 44. Tipo de vivienda en la comunidad La Becerrera.....	74
Fig. 45. a) Telesecundaria Estatal No. 17 b) Centro de Salud rural de la comunidad la Becerrera.....	74
Fig. 46. Vías de comunicación, Camino a La Becerrera cruce del Río El Zarco y Puente del Río La Lumbre.....	75
Fig. 47. Mapa de distribución de infraestructura en la ladera SW del Volcán de Colima..	78
Fig. 48 Escenario de afectación por lahares pequeños en la ladera SW del Volcán de Colima.....	79

Fig. 49 Tipo de vulnerabilidad estructural que presentan las viviendas de la ladera SW, tipificadas de acuerdo al material de construcción que presentan.....83

Fig. 50 Mapa de vulnerabilidad física y estructural de la ladera SW.....84

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los tipos de depósitos de flujo.....4

Tabla 2. Características e Impacto de Lahares en otros Volcanes.....13

Tabla 3. Clasificación de las viviendas de acuerdo a sus características.....26

Tabla 4. Actividad del Volcán de Colima.....28

Tabla 5 Flujos Piroclásticos y Lahares del Volcán de Colima.....35

Tabla 6. Resultados de las estaciones de medición.....46

Tabla 7. Lahares de la ladera SW del Volcán de Colima.....47

Tabla 8. Clasificación granulométrica.....48

Tabla 9. Parámetros de entrada para simulaciones de lahares en con TITAN2D.....58

Tabla 10. Parámetros de entrada para los programas Titan2D y LaharZ.....67

Tabla 11. Ventajas y desventajas de TITAN2D y LAHARZ.....68

Tabla 12. Infraestructura amenazada por lahares en la ladera SW del Volcán de Colima.....77

Tabla. 13 Recurrencia de Lahares.....80

Tabla 14. Características de los lahares en la ladera SW del Volcán de Colima.....81

Tabla. 15 Velocidades y tiempo de llegada de los lahares.....82

## RESUMEN

La actividad de los últimos 50 años del Volcán de Colima ha consistido en extrusión de domos, pequeñas explosiones y derrames de lava, que en algunas ocasiones están acompañados por flujos piroclásticos y lahares. Durante los episodios eruptivos recientes de 1991, 1994, 1998-1999, 2000, 2003, 2004 y 2005 se originaron lahares por removilización de depósitos primarios y por la incorporación de material antiguo en la corriente normal del río durante la temporada de lluvias.

Se realizó un estudio de la distribución de los lahares secundarios que se presentaron en la ladera SW del Volcán durante 2008 y 2009 con el propósito de determinar el peligro volcánico. Se establecieron estaciones de medición, para identificar los niveles de depósito de lahares y se realizaron mediciones antes, durante y después de la temporada de lluvias en las Barrancas El Zarco, El Cordobán y La Lumbre en la ladera SW del Volcán de Colima. Se realizó un análisis comparativo e identificaron los cambios ocasionados por los lahares secundarios. Se modelaron escenarios de afectación utilizando un Modelo Digital de Elevación con los principales elementos antrópicos para determinar los efectos potenciales en la infraestructura de las comunidades, los ranchos y los ejidos y se realizó un análisis de vulnerabilidad física y estructural en la infraestructura de la ladera.

Se realizaron simulaciones con TITAN2D y LAHARZ con tres volúmenes diferentes: 1) el de los lahares de 2008 y 2009 ( $4 \times 10^5 \text{ m}^3$ ), 2) los lahares de 2005 ( $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ ) y 3) el lahar del año 2000 que afectó a la comunidad La Becerrera ( $3.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ ). En el programa Titan2D se ajustaron los parámetros de entrada para la simulación de lahares y comparar los resultados con los obtenidos en campo. Los parámetros de entrada fueron: el ángulo de fricción interno de  $25^\circ$  que corresponde con el ángulo de reposo de arenas húmedas. Basado en la distribución de los depósitos de campo se realizaron simulaciones variando el ángulo de fricción base entre  $3^\circ$  y  $15^\circ$ . Los resultados que mejor reflejan la distribución de campo son con  $4^\circ$  en La Lumbre y  $7^\circ$  en El Zarco y El Cordobán, debido a que con ángulos menores el lahar era muy fluido y con ángulos mayores era muy viscoso. Los parámetros de entrada que se utilizaron con el programa LAHARZ fueron la línea de energía (H/L de 0.35) con los tres volúmenes calculados.

Los resultados de campo muestran que los lahares de 2008 y 2009 llegaron a 12.0, 9.4 y 8.7 km a partir del cráter en las Barrancas La Lumbre, El Zarco y El Cordobán, mientras que con Titan2D llegaron a 13.1, 10.3 y 9.1 km y con LaharZ a 11.6, 10.2 y 9.5 km. Los lahares de 2006 tuvieron un alcance de 10.0 km en campo, de 12.9, 10.5 y 9.3 km con Titan2D y de 14.0, 12.9 y 10.8 km con LaharZ. Los lahares del año 2000 tuvieron un alcance de 15 km en campo, de 18.0, 12.9 y 11.4 km con Titan2D y de 16.4, 16.0 y 11.6 km con LaharZ.

Los lahares de 2008 y 2009, que tuvieron un volumen de  $4 \times 10^5 \text{ m}^3$  no llegaron a la comunidad La Becerrera, sin embargo, si afectaron la infraestructura de un rancho en la Barranca La Lumbre (BLb) y ocasionaron un derrumbe que dejó al descubierto los cimientos de una casa donde se había instalado la estación media durante este trabajo. En la estación media de las barrancas se midieron megabloques de 1 a 3 m de diámetro que pueden afectar la infraestructura existente en el área de estudio debido a que se transportan por flotación en el frente de los lahares. Las simulaciones muestran que un lahar llegaría a La Becerrera por la Barranca La Lumbre entre 12 y 32 minutos, por la Barranca El Zarco

de 9 a 22 minutos y por El Cordobán entre 10 y 18 minutos, al puente La Lumbre entre 7 y 18 minutos y al puente El Cordobán de 10 a 17 minutos y al Rancho Jabalí entre 6 y 10 minutos. Con base en las simulaciones realizadas con Titan2D, se determinó que los lahares que superen una altura de 5 m por la Barranca El Zarco pueden desbordarse y afectar a la comunidad de La Yerbabuena.

En los últimos 50 años de actividad, durante los que se cuenta con un registro mayor, se obtuvo que los lahares ocurren cada 2.7 años; sin embargo, de 2005 a 2010, han ocurrido un promedio de trece lahares por año. Para complementar el estudio se incluyó un ejemplo en el cual se simularon lahares sineruptivos relacionados con actividad pliniana del año 1913 (volumen de  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) y con avalanchas de escombros como la del Río Armería (volumen de  $2.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ). Los resultados muestran que los primeros tuvieron un alcance de 9 a 12 km, hasta el Río Armería (24 km) y los segundos llegaron a Colima, Villa de Álvarez y Coquimatlán (50 km). Los lahares por colapso presentan una recurrencia de alrededor de 2,000 años y los lahares sineruptivos de 100 años.

La infraestructura que puede ser amenazada por lahares pequeños son: La Comunidad La Becerrera (274 Habitantes, 69 viviendas), La Telesecundaria Lic. Luis Donald Colosio M, los puentes que comunican el Estado de Colima con Jalisco, el Rancho Schulte, el Rancho El Jabalí (Reserva Natural) y la Ex Hacienda San Antonio (Hotel de turismo exclusivo con 22 suites y 3 Grand Suites), terrenos ganaderos y de cultivo del Ejido La Yerbabuena (531has. repartidas entre 23 ejidatarios).

## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

La actividad de los últimos 50 años del Volcán de Colima, localizado en la parte oeste de la Faja Volcánica Mexicana ( $19^{\circ} 30' 44''$  N  $103^{\circ} 37' 02''$  W) (Fig. 1), se ha manifestado mediante extrusión de domos, pequeñas explosiones y derrames de lava, algunas veces acompañados por flujos piroclásticos y lahares (Thorpe, et al., 1977; Luhr y Carmichael 1990; Martin Del Pozzo et al., 1987 y 1995; González et al., 1993; Macias y Capra, 2005). Los recientes episodios eruptivos de 1991, 1994, 1999, 2000, 2003, 2004 y 2005 originaron lahares formados en su mayoría, por removilización de depósitos primarios y por la incorporación de material de antiguos lahares en la corriente normal del río, que afectaron algunas comunidades como La Becerrera, Quesería y Montitlan en Colima. El material volcánico de los flujos piroclásticos, al ser material deleznable es removilizado fácilmente por lluvias intensas rellena las barrancas y bloquea la red hidrológica. Debido a su alta densidad y velocidad, los lahares tienen la capacidad de destruir y sepultar lo que encuentren a su paso, como viviendas, carreteras, puentes y terrenos de cultivo.

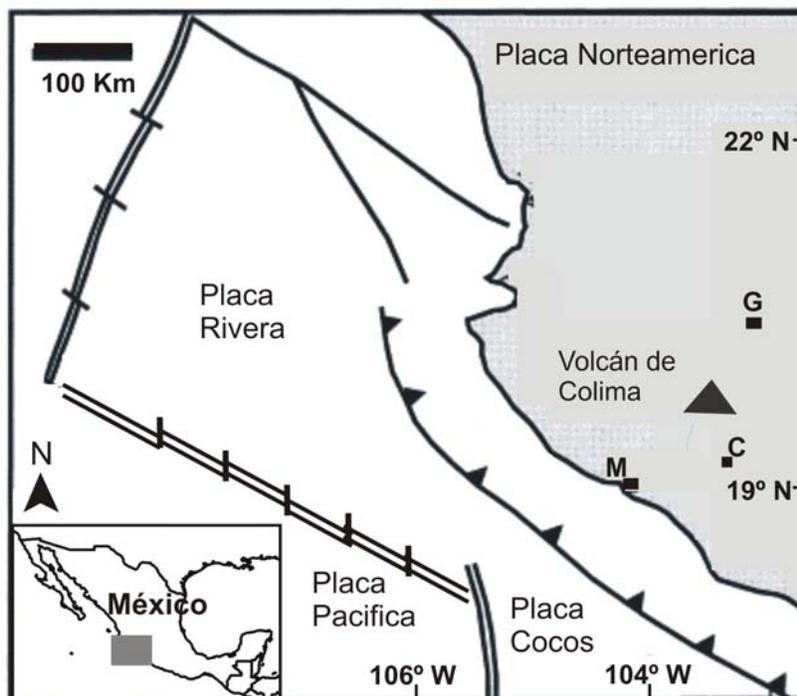


Fig. 1. Localización del Volcán de Colima al oeste de la Faja Volcánica Mexicana. M: Manzanillo; C: Colima; G: Guadalajara (Modificado de Zobin et al., 2002).

En este trabajo de investigación, se realizó un estudio de los lahares secundarios que se presentaron en la ladera SW durante los años 2008 y 2009. Se establecieron estaciones de medición de los depósitos de lahares y se realizaron mediciones antes, durante y después de la temporada de lluvias en las Barrancas El Zarco, El Cordobán y La Lumbre. Posteriormente, se realizaron simulaciones con los programas Titan2D y LaharZ (Geophysical Mass Flow Group, 2007 y Vallance et al, 1997) con el propósito de identificar las zonas de afectación. Esta información se integró con los elementos antrópicos susceptibles a ser afectados, para evaluar el peligro por lahares secundarios en la ladera SW del Volcán de Colima.

## 1.1 OBJETIVOS

Evaluar el peligro por lahares secundarios en la ladera SW del Volcán de Fuego de Colima

Identificar las características de los lahares secundarios ocurridos en las barrancas de la ladera suroeste durante la temporada de lluvias 2008 y 2009.

Determinar los alcances y afectaciones de los lahares en la ladera SW del Volcán de Colima a partir de simulaciones con TITAN2D y LaharZ.

Modelar escenarios de afectación en la ladera SW del VFC plasmados sobre un Modelo Digital de Elevación con los principales elementos antrópicos para determinar los efectos potenciales en la infraestructura de las comunidades, los ranchos y los ejidos.

## 1.2. TIPOS DE LAHARES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS DEPÓSITOS

Los lahares son flujos compuestos de agua y clastos originados en la ladera de un volcán y tienden a fluir pendiente abajo controlados por la gravedad, presentan diferentes fases dependiendo de la concentración de sedimentos los flujos de escombros pueden transformarse gradualmente a flujos hiperconcentrados (Scott, 1998; Capra et al, 2010).

Los lahares pueden ser primarios y secundarios de acuerdo a su origen. Los lahares primarios (sineruptivos) se generan durante la erupción y pueden ser disparados por saturación de agua de lluvias, lagos cráter o derretimiento de glaciación; mientras que los lahares secundarios se generan de forma posterior a la actividad y remobilizan el material depositado en las laderas, son originados por la erosión progresiva de los sedimentos durante eventos de lluvias intensas. En el Volcán de Colima los lahares mas frecuentes están relacionados con la temporada de lluvias. Sin embargo, los episodios eruptivos que se presentan en los meses mas lluviosos han formado lahares primarios, tal es el caso de los episodios de actividad de 1994, 1999 y 2005.

Las propiedades físicas de los lahares están controladas por el tamaño de grano y contenido de agua y de acuerdo a las características de los depósitos, por lo que se clasifican como flujos de escombros y flujos hiperconcentrados. En la Tabla 1 se muestra la clasificación de flujos y lahares de acuerdo a las características de los depósitos.

Tabla 1. Características de los tipos de depósitos de flujo

	Flujo Piroclástico de Bloques y Ceniza	Avalanchas de escombros	Lahares		Corriente fluvial
			Flujo de Escombros	Flujo Hiperconcentrado	
Concentración de sólidos			<sup>a</sup> > 80 % en peso > 60 < 90 % vol	<sup>a, d, e</sup> 40-80 % en peso 20- 60 % vol	<sup>a</sup> < 40 % en peso < 20 % vol
Régimen de Flujo	<sup>g</sup> No turbulento	<sup>b</sup> No Turbulento	<sup>b</sup> Laminar	<sup>c, b</sup> Transición de laminar a turbulento	<sup>c, b</sup> Turbulento
Sistema de transporte sólidos	<sup>g, i</sup> Masivos gradación inversa	fricción y colisión	fricción tracción	Fricción Saltación	<sup>b</sup> colisión tracción, saltación y suspensión
Características del depósito	<sup>g</sup> Monolitológico	Heterolitológico con estructuras en rompecabezas	<sup>i</sup> Monolitológicos a heterolitológico	<sup>i</sup> Heterolitológico	Heterolitológico
Matriz	Arena	Arena – limo - arcilla	Arena - arcilla	<sup>f</sup> Arena gruesa a media	Arenosos
Clastos	Grava de gruesas a finas	Abundantes bloques y mega bloques de cm a metros de diámetro	<sup>c</sup> >50% grava	<sup>c</sup> < 50% grava	<sup>b</sup> Sedimentos finos y cantos rodados en menores cantidades
Forma de los clastos	<sup>g</sup> de angulosos a Subredondeados	Angulosos Subangulosos Estructuras en rompecabezas	<sup>h, i</sup> Angulosos Subangulosos Subredondeados	<sup>h</sup> Subredondeados y redondeados	<sup>b</sup> Redondeados
Estratificación	<sup>g, i</sup> burda alineación de clastos y pomez	<sup>i</sup> Sin estratificación	<sup>i</sup> Sin estratificación	<sup>i</sup> Estratificación plana	<sup>b</sup> Estratificación cruzada y laminación
Granulometría	<sup>g</sup> Bimodal	Polimodal	<sup>h</sup> Bimodal	<sup>h</sup> Unimodal	<sup>b</sup> Unimodal
Clasificación de los clastos	<sup>g, i</sup> Mala clasificación	<sup>b</sup> Mala clasificación	<sup>h</sup> Mala clasificación a extremadamente mala clasificación	Buena clasificación	<sup>b</sup> Buena clasificación
Origen	<sup>i</sup> Colapso de columna eruptiva o destrucción de domo	<sup>b</sup> Colapso de un sector del edificio volcánico (Avalancha de escombros)	<sup>e, f, i</sup> Saturación de depósitos volcánicos por lluvias intensas, derretimiento de glaciares y desbordamiento de lagos cráter	Transformación o dilución de flujos de escombros	<sup>b</sup> Corriente de río
Subdivisión		Facies de matriz y/o bloques	<sup>c</sup> Cohesivos contenido de arcilla mayor de 3-5%	No cohesivos contenido de arcilla menor de 3%	

% en peso: porcentaje en peso, % vol: porcentaje en volumen. a) Pierson y Costa, 1987; b) Smith y Lowe, 1991; c) Vallance y Scott, 1997; d) Beverage y Culbertson, 1964; e) Pierson y Scott, 1985; f) Scott, 1988; g) Sparks, 1976; h) Vallance, 2000; i) Fiher y Schmincke, 1994

Los flujos de escombros son una mezcla de sólidos y agua con una concentración de sedimentos generalmente mayor a 60% en volumen y 80% en peso (Pierson y Costa, 1987). Se considera como un fluido no-Newtoniano (no presentan relación lineal entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación), compuesto por dos fases, uno líquido (agua + finos limo y arcilla) y otro granular (detritos) que conjuntamente controlan su dinámica; se comportan como un fluido pseudo-plástico. El flujo se asemejan a concreto húmedo y el depósito se caracteriza por estar mal clasificado y poco seleccionado. Predominan los fragmentos del tamaño de la arena y grava, con una fracción fina < 25% del volumen total del flujo. Presentan gradación inversa a normal, así como imbricación de clastos en la dirección de flujo (Vallance et al, 1997). Con base en el contenido de arcilla, los flujos de escombros se clasifican en: cohesivos y no cohesivos.

Dentro de los flujos de escombros, los flujos cohesivos tienen un contenido de arcilla mayor al 3-5% del volumen total del depósito debido a que los sedimentos constituyentes han sido sometidos a un alto grado de alteración hidrotermal o a procesos de intemperismo antes de su removilización. Los clastos mas grandes son transportados por las fuerzas de cohesión y flotación de la matriz que está constituida por arcilla, limo y arena. La arcilla funciona como lubricante ya que disminuye la interacción entre granos (Vallance y Scott, 1997; Scott, 1988); mientras que los flujos no cohesivos tienen un contenido de arcilla menor al 5%, generalmente de 1%. El depósito manifiesta mayor interacción entre partículas que los flujos cohesivos, especialmente en los bordes del flujo. (Pierson, 1985; 1995; Pierson y Scott, 1985).

Los flujos hiperconcentrados son flujos no-Newtonianos constituidos por agua y sedimentos controlados por gravedad. La concentración de sedimentos es intermedia entre un flujo de escombros y flujo de agua, de 20% a 60% en volumen y 40% a 80% de peso (Vallance y Scott, 1997; Pierson 2005). Los flujos hiperconcentrados requieren de un evento hidrológico de gran magnitud como lluvias intensas, rompimiento de lagos cratéricos, o fusión de casquetes de hielo durante erupciones y por lo general, se originan por la incorporación de sedimentos en la corriente normal del río al aumentar su contenido de sólidos hasta convertirse en flujos de escombros. Debido a la sedimentación gradual de

material clástico el flujo de escombros se diluye y se transforma nuevamente en un flujo hiperconcentrado que finalmente se desvanecerá en una corriente fluvial (Scott, 1988).

El depósito de los flujos hiperconcentrados presenta soporte de matriz o clasto a clasto, grado de selección de buena a muy buena, distribución granulométrica generalmente unimodal (Scott, 1988). El grado de redondez de los sedimentos depende del sustrato del cual provienen. Los flujos hiperconcentrados están constituidos principalmente de arena gruesa a media y la fracción fina constituye el 4-10% del peso del depósito (Scott, 1988).

Los flujos de agua son fluidos Newtonianos (presentan una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación). La concentración de sedimentos en el flujo es pequeña, representan entre el 1 y 4% en peso y densidad y presenta un régimen de flujo turbulento. El sistema de transporte de la fase sólida es por tracción, saltación y suspensión. Las estructuras sedimentarias presentes son laminación, estratificación cruzada y orientación de los clastos en dirección del flujo (imbricación). El grado de selección del depósito varía de bueno a malo, cuando es malo se forman laminaciones horizontales o inclinadas (Pierson y Scott, 1985; Smith y Lowe, 1991).

### 1.3. GEOMORFOLOGÍA DEL ÁREA

A partir del estudio geomorfológico del Volcán de Colima, Lugo Hubp et al., (1993), se considera que las barrancas son producto de la erosión fluvial y los procesos de remoción en masa; en varias ocasiones fueron rellenadas por depósitos piroclásticos y han sido erosionadas hacia el sur por las corrientes fluviales.

Las formas de relieve que predominan en la ladera SW del Complejo Volcánico de Colima (CVC) son: residuos de depósitos volcánicos de avalancha, hummocks, laderas de lava y flujos piroclásticos de pendiente fuerte, nivel superior con disección vertical intensa y nivel inferior con disección vertical débil.

El mapa de la red de barrancos del CVC (Fig. 2) muestra una distribución radial de los barrancos o valles profundos. En la ladera S y SW se encuentra un alto número de barrancos con una profundidad media de 80 m, como es la parte alta de El Zarco y El Cordobán; depresiones con profundidad media de 20 m y un bajo porcentaje de barrancos con profundidad mayor a 150 m, como es el caso del Río La Lumbre. La red de barrancos se encuentra mas desarrollada hacia el oriente y poniente del cono volcánico, los ríos con órdenes mayores son el Río Armería en el poniente y el Río Tuxpan en el oriente Lugo Hubp et al., (1993).

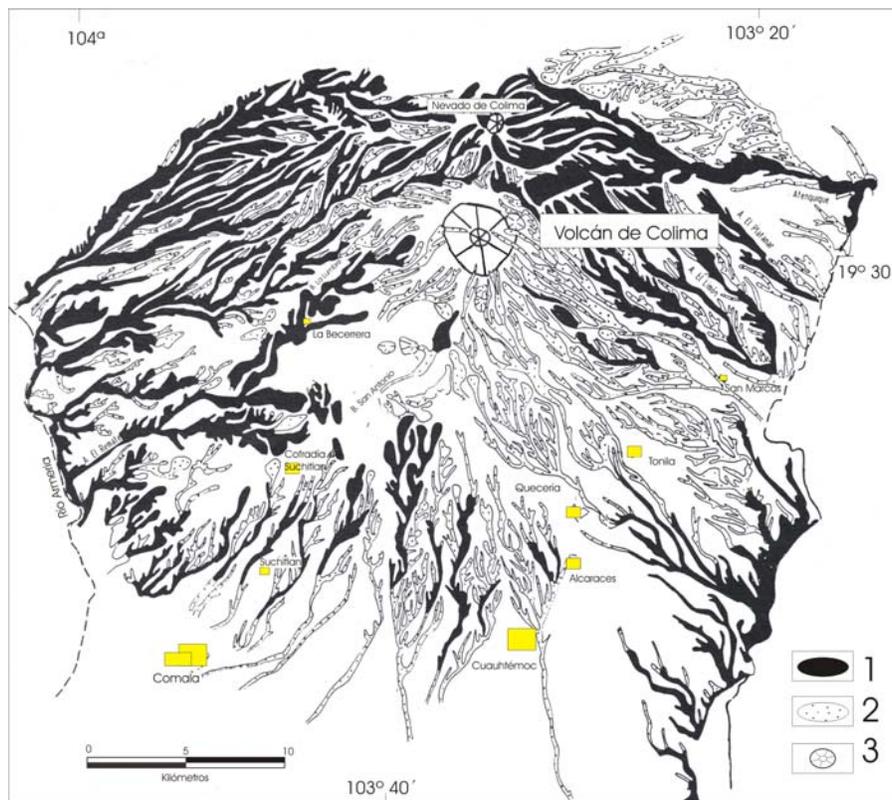


Fig. 2. Red de Barrancos en el complejo de los volcanes de Colima 1) Barrancos de mas de 60 m de profundidad, 2) Barrancos de menos de 60 m de profundidad 3) Volcanes y domos. Modificado de Lugo-Hubp et al, (1993)

El mayor peligro por movimiento de masas y corrientes de lodo o lahares se presenta hacia el oeste, suroeste y sureste del Volcán de Colima. La generación de lahares es favorecida por factores como las pendientes mayores a 35 grados en las laderas superiores del cono, depósitos fácilmente erosionables debido a la recurrente actividad que ha presentado el Volcán y las condiciones meteorológicas que dan lugar a la formación de una red

hidrológica que fluye al sur, este y oeste. Entre las barrancas mas importantes están La Lumbre, El Zarco, El Cordobán, Montegrande, San Antonio, La Arena, Beltrán y Atenquique (Lugo Hubp et al., 1993).

#### 1.4. ANTECEDENTES GEOLÓGICOS

Martín del Pozzo et al., (1995) elaboraron un mapa de peligros para el Volcán de Colima, basado en mapeo y secciones geológicas, análisis geomorfológico, así como documentos históricos y características socio-económicas del área. Estos investigadores obtuvieron que las áreas amenazadas por flujos piroclásticos, lahares secundarios, avalanchas y flujos de lavas se encuentran principalmente hacia el sur, mientras que los materiales se distribuyen gradualmente será hacia el norte y este principalmente.

Navarro et al (2003) elaboraron un mapa de peligros del volcán de Colima, con base en puntos de verificación geológica en el que se representan los alcances máximos que pueden tener las amenazas volcánicas con un índice de explosividad volcánica (VEI) de 0 a 6 como flujos de lava, flujos piroclásticos, flujos de lodo o lahares, lluvia de ceniza y pómez, proyectiles balísticos y avalanchas de escombros.

Cortes et al. (2005) elaboraron una carta geológica del Complejo Volcánico de Colima (CVC). El CVC data de 1.7 Ma y está compuesto por tres centros eruptivos; El Cántaro, El Nevado de Colima y el Volcán de Colima con orientación N-S. Los estratovolcanes del CVC se caracterizan por presentar estructuras de caldera de colapso gravitacional, asociados a depósitos de avalancha de escombros, distribuidos hacia el sur. El Volcán de Colima es el estratovolcán mas reciente dentro del complejo y representa un riesgo para las poblaciones asentadas en sus alrededores, particularmente en el flanco sur.

Gavilanes. (2004) realizó mapas de peligro para depósitos de flujos piroclásticos, avalancha de escombros, lluvia de ceniza y proyectiles balísticos, flujos de lava y flujos de escombros. Obtuvo escenarios de peligro a partir de simulaciones con LAHARZ para lahares y Flow 3D para avalanchas de escombros y flujos piroclásticos; consideró que en caso de presentarse una actividad de tipo Pliniana la zona de afectación alcanzaría comunidades

como La Becerrera, Montitlan, Quesería, Tonila y San Marcos. Por su parte Dávila et al., (2007) presentaron una clasificación espectral de depósitos volcánicos superficiales a partir de imágenes satelitales ASTER y LANDSAT, así como una zonificación del peligro asociado a los lahares utilizando el programa LAHARZ, con una base topográfica LIDAR de 5 m de resolución en las barrancas de la ladera sur del Volcán de Colima.

Capra et al. (2010) describen los mecanismos de disparo de los lahares en el Volcán de Colima y realizan una comparación de la frecuencia de lahares, en relación con la intensidad de precipitación medida. Obtuvieron que la generación de un lahar no depende estrictamente de una precipitación intensa; mas bien, esta en función de varios factores que controlan el escurrimiento de agua. Durante el periodo de estudio definieron que los lahares ocurren con mas frecuencia en el inicio de la temporada de lluvias con baja acumulación de lluvia y disparados por lluvias de baja intensidad, mientras que durante los meses de mayor precipitación como julio y agosto, los lahares son menos frecuentes y se requiere de una precipitación de mayor intensidad.

En el Volcán de Colima se han presentado lahares de gran escala, hasta pequeños depósitos. Hace 18.5 ka se produjo un depósito de avalancha de escombros, en el flanco oriental del Volcán Nevado de Colima. Los depósitos de la avalancha obstruyeron el drenaje del Río Naranja hacia el flanco sureste y formaron un dique y la acumulación de agua, que dio origen a flujos de escombros cohesivos que se extendieron por 120 km hasta la costa del Pacífico (Capra y Macias, 2002).

A partir de la avalancha de escombros de 3600 años A.P. en el sector SW del Volcán de Colima (Cortes et al., 2009), se generó un flujo de escombros en el Río Armería con un volumen de  $2 \times 10^8 \text{ m}^3$  y una superficie de  $6.4 \text{ km}^2$ .

Uno de los lahares con mayores afectaciones en la zona este del Nevado de Colima, ocurrió en octubre de 1955. Después de tres días de intensa precipitación se generó un flujo de escombros en la ladera este del Nevado de Colima, encausado sobre los ríos Arrollo Seco, Los Plátanos y Dos Volcanes que convergen en la cuenca del Río Atenquique. El flujo llegó a la localidad de Atenquique, causó la muerte de más de 23 personas, la destrucción

parcial de la localidad y pérdidas de aproximadamente 13 millones de pesos por la destrucción de una fábrica de papel en Atenquique. El volumen de estos depósitos se calculó en  $3.2 \times 10^6 \text{ m}^3$  (Saucedo et al., 2008).

En el Volcán de Colima, la erupción explosiva de 1913 produjo flujos piroclásticos con alcance de 15 km por el flanco sur y posteriormente dieron lugar a la generación de lahares en los Ríos La Lumbre y El Remate; los depósitos llegaron al Río Armería con un alcance de 20 km a partir del cráter (Saucedo, 1997).

En los años 1998-1999 se presentó un incremento en la actividad, se formaron flujos tipo Merapi y Soufriere formaron flujos de bloques y ceniza y flujos de lava en las Barrancas La Lumbre, Montegrando, El Cordobán y San Antonio. Este material fue removilizado durante el año 2000 en forma de lahares sobre las Barrancas El Zarco, La Lumbre y Montegrando que afectaron dos viviendas en la comunidad La Becerrera y las torres de transmisión eléctrica en la parte baja de Montegrando (Gavilanes, 2004).

En 2004 y 2005 se presentó un episodio eruptivo que produjo flujos de bloques y ceniza. El material depositado en las laderas fue removilizado en forma de lahares sobre las Barrancas Montegrando, La Lumbre, La Arena, San Antonio, El Zarco y El Cordobán principalmente (Universidad de Colima, 2007). A partir de este periodo de actividad se formaron lahares durante la temporada de lluvias, en donde se removilizó el material dispuesto en las Barrancas de la ladera Sur.

## 1.5. LAHARES EN OTROS VOLCANES

En Colombia en 1985, después de una erupción relativamente pequeña con un VEI 3 (Índice de Explosividad Volcánica) que generó material de caída, flujos y oleadas piroclásticas que derritieron una parte del glaciar que cubría al Nevado de Ruiz, formaron lahares que cubrieron la ciudad de Armero y causaron más de 23000 víctimas. El volumen de material emitido por el volcán fue de  $39 \times 10^6 \text{ m}^3$  con un alcance de 104 km a partir del cráter (Thouret et al., 1998; Pierson et al., 1990).

Los lahares han sido recurrentes en algunos volcanes del mundo donde la actividad y las condiciones meteorológicas propician su generación. Los volcanes Pinatubo y Mayon en Filipinas presentan una recurrencia de lahares en la temporada de lluvias, en su mayoría disparados por tifones (Pierson et al., 1996; Rabonza 2006). En 1993, dos años después de las erupciones del Volcán Pinatubo se formaron lahares con alcance de 20 a 25 km a partir del cráter (Janda et al., 1996; Shannon et al., 2001; Pierson et al., 1996). Otros ejemplos de lahares por lluvias torrenciales se presentaron en el Volcán Casita en Nicaragua y los Volcanes Semeru y Merapi en Indonesia (Kerle, 2003; Thouret et al., 2007; Lavigne et al., 2000 ). En algunas ocasiones los lahares son generados por la fusión del glaciar en el momento de la erupción, tal es el caso de los volcanes Cotopaxi, Ecuador en 1877 y Popocatepetl, México en 2001 (Aguilera 2004; Capra et al, 2004; Julio et al., 2005) (Tabla 2).

En el Volcán Ruapehu en Nueva Zelanda se formaron lahares con alcance de 43 km en 1995, los lahares se generaron por una explosión dirigida del lago cráter a partir de la cual se formaron flujos de escombros y con la distancia se transformaron en flujos hiperconcentrados (Cronin, 2004).

En la región este de la Faja Volcánica Mexicana, las lluvias de gran intensidad generaron flujos de agua y detritos en el flanco sur del Volcán Pico de Orizaba durante 2003. Los flujos descendieron por varios cauces que se originan en zonas altas del volcán, removilizaron depósitos piroclásticos y epiclásticos ubicados en las zonas altas e intermedias y ocasionaron afectaciones relacionadas con la ruptura de un poliducto de hidrocarburos (Rodríguez et al., 2007).

Durante el Pleistoceno en la ladera sur del Nevado de Toluca se generó un colapso por actividad tectónica y alteración hidrotermal, lo que ocasionó una avalancha de escombros que se transformó en flujo de escombros cohesivos, denominado como depósito Pilcaya. El flujo de escombros Pilcaya viajó 40 km sobre una depresión tectónica estrecha y se extendió a 55 km de la cima del volcán y formó un depósito de 15 a 40 m de espesor con rocas de hasta 15 m de diámetro. Posteriormente, las fuertes lluvias y el drenaje superficial

contribuyeron a movilizar las porciones superiores del depósito transformándose en lahares secundarios con un alcance de 75 km del volcán (Capra y Macías, 2000).

Tabla 2. Características e Impacto de Lahares en otros Volcanes

Fecha	Volcán	Lahar								Referencia
		origen	dimensiones clastos	% sedimento	matriz	clasificación	velocidad	duración	volumen m3	
19 - 20 marzo 1982	Santa Elena Estados Unidos	avalancha de escombros	30 - 40 mm predominan (16 - 32 mm)	Concentración a 73Km, 43% vol	22% de arena limo y arcilla	FE	3.5 4 m/s		4x10 <sup>6</sup>	Pierson y Scott, 1985
13 noviembre 1985	Nevado de Ruiz Colombia	Fusión del glaciar				FE	17 m/s		9x10 <sup>7</sup>	Pierson et al., 1990
1991	Pinatubo Filipinas	lluvias torrenciales Tifon Yunya	2 - 10 mm 1m diámetro suspensión			FE				Janda et al., 1996 Shannon K, et al., 2001
1993		lluvias torrenciales	16 - 32 mm	20 - 25Km, 30 % vol	34% arena y arcilla	FH	2.6 - 3.1 m/s	2hrs.		Pierson et al., 1996
27 septiembre 1995	Ruapehu Nueva Zelanda	Explosión dirigida del lago cráter	40mm diámetro 10 - 50cm en flotación	23Km, 52% 43Km, 50%	8 - 5 % grava 33-35% arena 10-8% lodo	FE FH	4.9 m/s		8.8x10 <sup>5</sup>	Cronin et al., 1999; Cronin, 2004
29 septiembre 1995				23Km, 50% 43Km, 48%	8-4% grava 30-36% arena 10-8% lodo	FE FH		0.5 hrs	8.3x10 <sup>5</sup>	
6 octubre 1995				23Km, 17% 43Km, 8%	9-2% arena 8 - 6% lodo	FE FH			2.2x10 <sup>5</sup>	
22 enero de 2001	Popocatepetl México	Lluvias y fusión del glaciar	1.5cm - 1.10m 3 - 40cm 0.5 - 2cm		4Km grava 10Km grava arena 17Km lodo				2.1x10 <sup>5</sup> 1.9x10 <sup>5</sup> 9x10 <sup>5</sup> Total 4x10 <sup>5</sup>	Julio M. P. et al., 2005 Capra et al., 2004
30 noviembre 2006	Mayon Filipinas	lluvias torrenciales Tifon Durian	1 cm - 3m predominan ( 8 - 25 cm)	2.7 - 10.8 % vol	proximal grava y arena media grava y arena distal grava y arena	FE FH	3-5 m/s?		Guinobatan 8.7x10 <sup>6</sup> Camalig 7.8x10 <sup>5</sup> Daraga Legaspi 7.8x10 <sup>5</sup> Padang 8.5x10 <sup>5</sup> Lidong 3x10 <sup>5</sup> San Antonio 1.1x10 <sup>6</sup> Total 1.8x10 <sup>7</sup>	Rabonza 2006
20 mayo 1995	Merapi Indonesia	lluvias torrenciales			34% grava 64.2% arena 1.8% lodo	FE FH				Lavigne F. et al., 2000
1877	Cotopaxi Ecuador	Fusión del glaciar			95% arena y grava 5% lodo			1 hr		E. Aguilera 2004
enero 2000	Semeru Indonesia	lluvias torrenciales		38% vol sedimento		FH	4m/s		3.5x10 <sup>6</sup>	Thouret et al., 2007
30 octubre 1998	Casita Nicaragua	lluvias torrenciales Huracan Mitch				Av FE			1.6x10	Kerle, N., 2003

FH Flujo hiperconcentrado, FE flujo de escombros, Av Avalancha de escombros

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

Se identificaron las zonas de recurrencia de lahares en el Volcán de Colima a partir de una revisión de los depósitos en campo, apoyado en el estudio geomorfológico del complejo volcánico de Colima (Lugo et al., 1993), los mapas de peligros (Martín Del Pozzo et al., 1995; Navarro et al., 2003) y artículos publicados sobre los trabajos que se han realizado en la zona (Rodríguez et al., 1991; Capra y Macias, 2002; Gavilanes, 2004; Dávila et al., 2007; Saucedo et al., 2008; Capra et al. 2010). Se delimitó el área de estudio en la ladera SW porque es la zona que podría ser mas afectada por lahares secundarios, debido a que en la región se encuentran comunidades como la Yerbabuena, La Becerrera, ranchos como El Jabalí, la Ex Hacienda San Antonio (Hotel de turismo exclusivo), El Borbollón y algunos caseríos en los límites del cauce de los ríos. Al sur del Volcán se encuentra la Barranca Montegrande aledaña a la zona de estudio que también presentó afectación por lahares (Fig. 3).

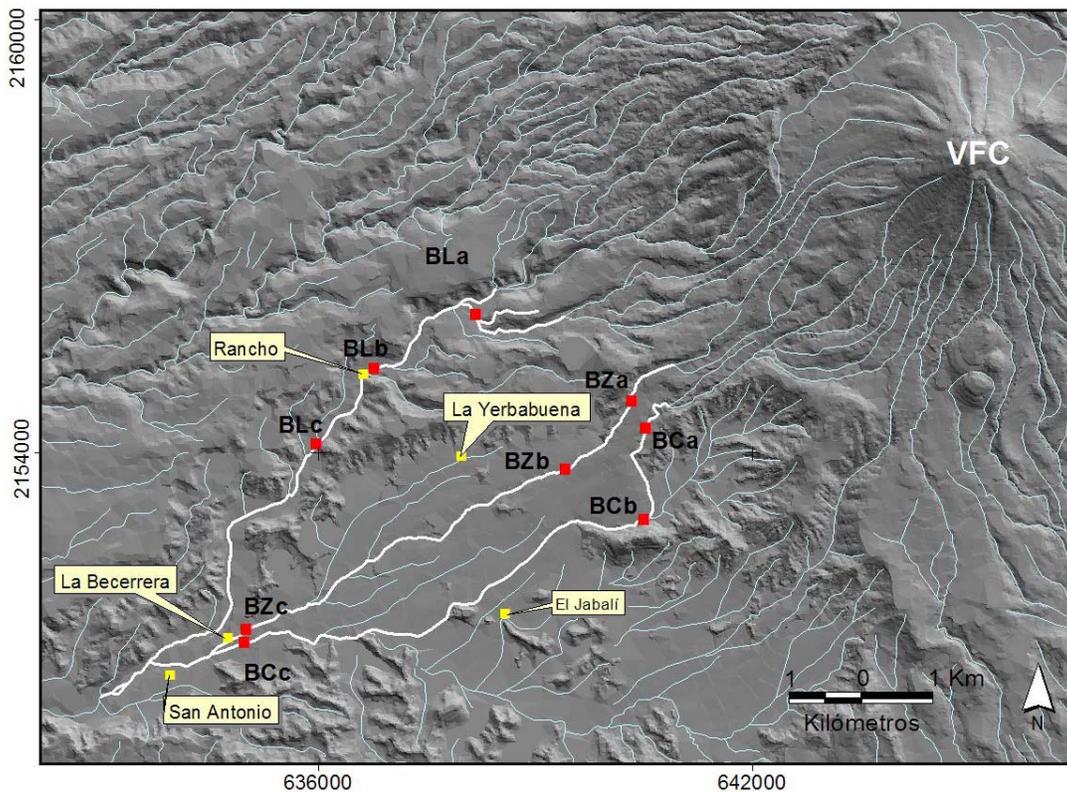


Fig. 3 Mapa de localización de las estaciones de medición instaladas en la ladera SW del Volcán de Colima.

En el Volcán de Colima los lahares secundarios se forman por la incorporación de material poco consolidado en la corriente normal del río, en la fase inicial son flujos hiperconcentrados que con la incorporación de piroclastos se transforman en flujos de escombros y con el depósito gradual cambian nuevamente en flujos hiperconcentrados hasta terminar en la corriente normal del río (Capra et al., 2010).

A partir de los cambios de pendiente se forman zonas de erosión y depósito en el transcurso del cauce, por lo que de acuerdo con las características geomorfológicas de la ladera SW, se identificaron los cambios de pendiente y los depósitos de material sin consolidar en los ríos La Lumbre, El Zarco y El Cordobán.

Durante trabajo de campo se monumentaron nueve estaciones de medición ubicadas en zonas de paso de lahares y que son susceptibles a cambios durante periodos cortos de tiempo, por lo que se establecieron diferentes puntos de referencia para realizar las mediciones correspondientes. Las mediciones consistieron en identificar la diferencia entre la base del río y la marca establecida y se realizaron campañas durante los meses de abril, julio y diciembre de 2008, así como en diciembre de 2009.

La pendiente se calculó en campo y se trazaron perfiles topográficos para cada barranca. Las mediciones en campo se realizaron con brújula y cinta en las estaciones y se complementaron con datos de la base topográfica (DEM con resolución de 5m) Las estaciones de medición se instalaron en tres puntos de las barrancas; el sitio alto fue ubicado en la parte estrecha y de mayor pendiente de acuerdo con la morfología de la barranca (BLa, BCa y BZa). El sitio medio se estableció en la zona donde el cauce se ensancha debido a que disminuye la pendiente y se acumulan los grandes bloques (BLb, BCb y BZb) y el sitio bajo se marcó en la zona de menor pendiente o zona de depósito (BLc, BCc y BZc) (Fig. 4)

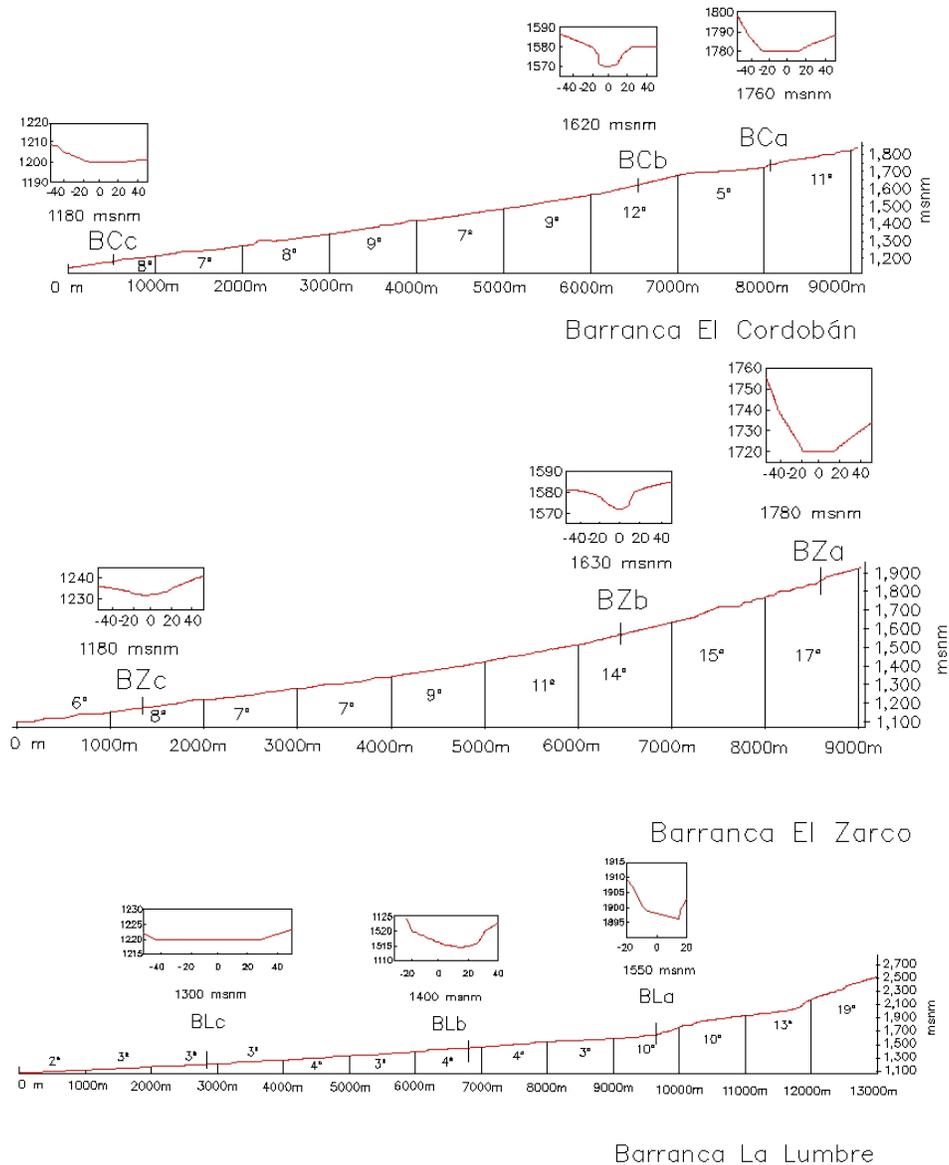


Fig. 4 Perfiles Topográficos de las Barrancas La Lumbre, el Zarco y El Cordobán.

Se realizaron secciones en las diferentes estaciones con el propósito de identificar los cambios morfológicos (Fig. 5). Estas estaciones se midieron en diferentes campañas; antes, durante y después de la temporada de lluvias (abril, julio y diciembre de 2008, así como febrero y noviembre de 2009). Se identificó y midió la erosión y depósito en las diferentes zonas del cauce, en partes alta, media y baja de las tres barrancas.

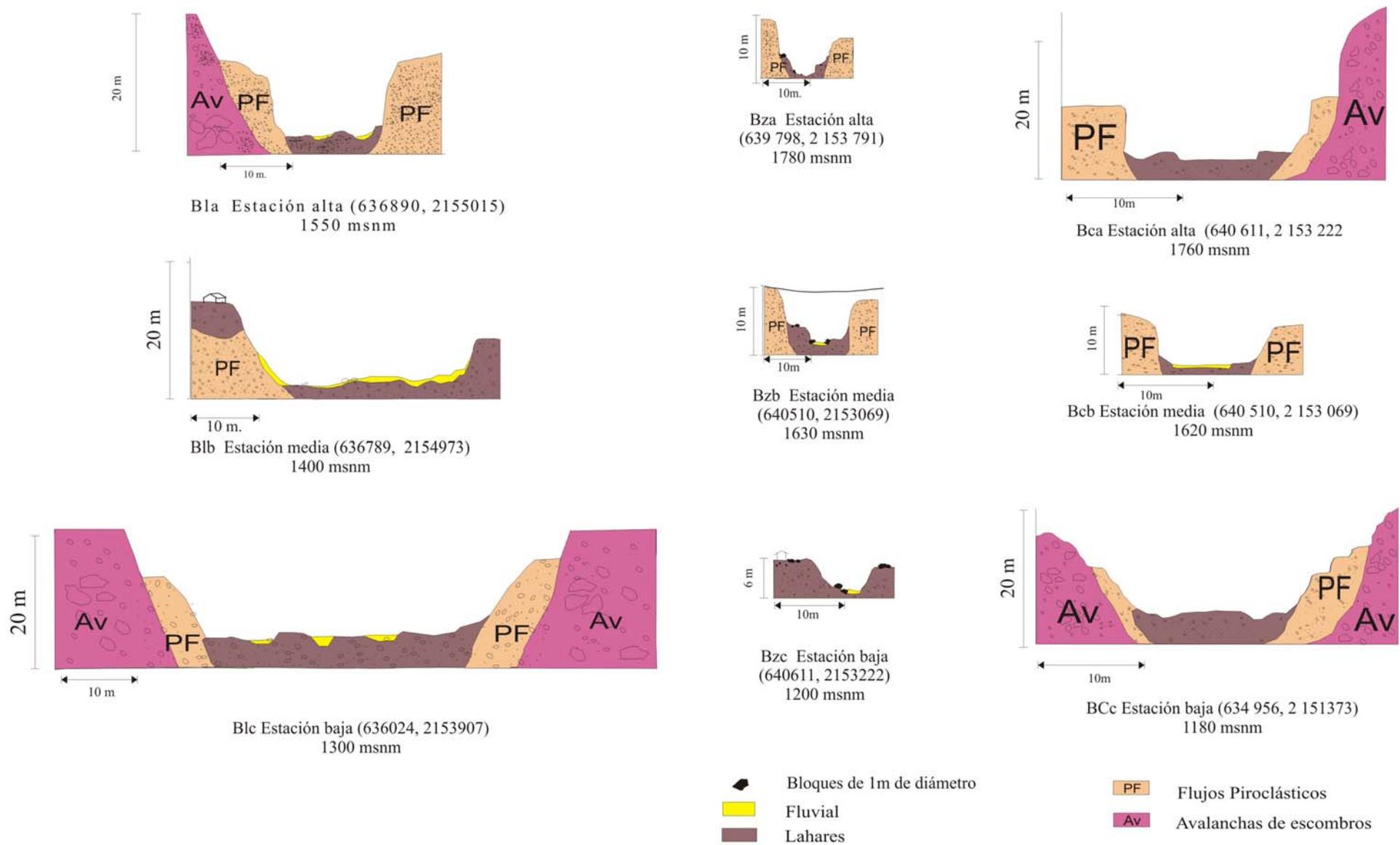


Fig. 5. Secciones trazadas en las estaciones de medición instaladas en la ladera SW del Volcán de Colima.

En el Río La Lumbre la estación alta (BLa) se ubicó a 1550 msnm, donde la pendiente cambia de 3° a 10°. La estación media (BLb) a 1400 msnm con una pendiente de 4° y la estación baja (BLc) a 1300 msnm en la zona de depósito, donde la pendiente es de 2° y 3°. La estación BLa se ubicó en la pared de una artesa para ganado. La estación BLb se ubicó sobre la barda de una casa y la estación BLc se ubicó en los pilares del puente vehicular que comunica a Comala, Colima con San José del Carmen, Jalisco (Fig. 6).

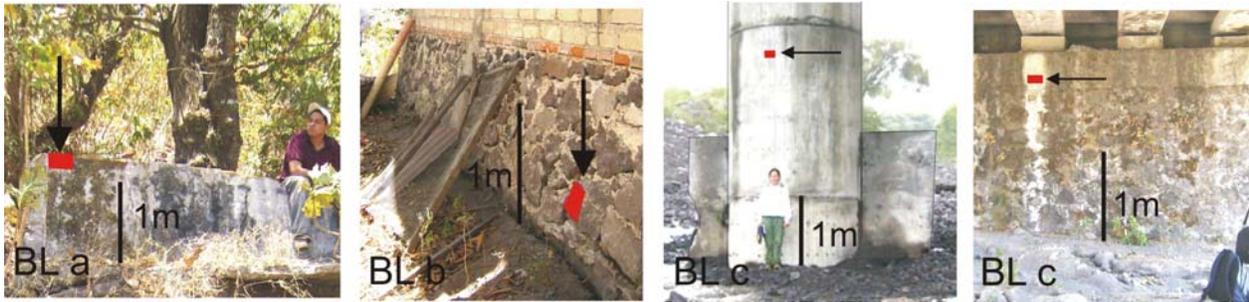


Fig. 6. Estaciones establecidas en el Río La Lumbre, representadas por recuadros de color rojo en diferentes puntos de la Barranca sobre elementos antrópicos. La estación BLa se marcó a 1.18 m de la base de la terraza, la estación BL b se trazó a 30 cm de la base de la terraza y la estación BLc se ubicó en los pilares del puente que comunica a Comala con San José del Carmen a 2.33 m de la base del río. Las marcas se instauraron en lugares de fácil acceso y que no fueran susceptibles a cambios en corto tiempo para realizar las mediciones periódicas.

En el Río El Zarco la estación alta (BZa) a 1780 msnm en la parte estrecha y de mayor pendiente de 17°, la estación media (BZb) a 1630 msnm, donde se acumulan los grandes bloques debido a que disminuye la pendiente 14° y la estación baja (BZc) a 1200 msnm en la zona de depósito, con una pendiente de 8°. La estación BZa se ubicó en los bloques de más de 2m de diámetro depositados a orillas del cauce. En la estación BZb se utilizó como referencia una manguera de agua que cruza la Barranca El Zarco. La estación BZc coincide con el puente vehicular de la comunidad La Becerrera (Fig. 7).

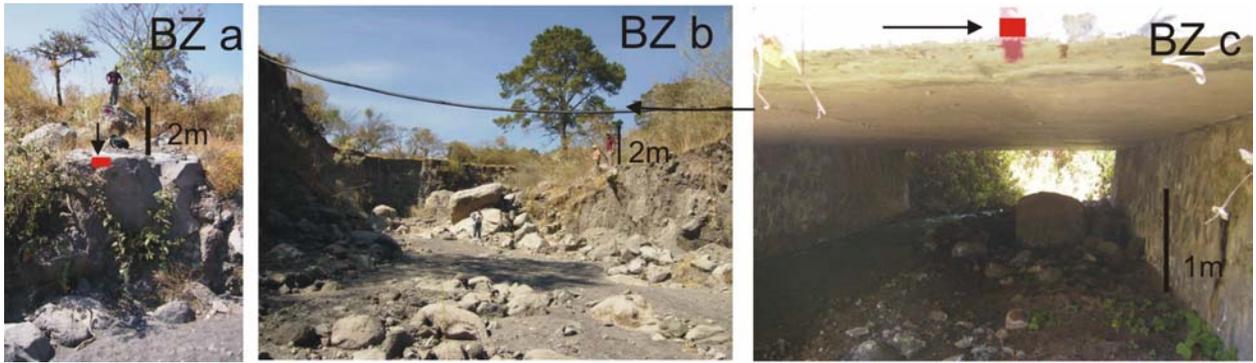


Fig. 7. Estaciones establecidas en el Río El Zarco, representadas por recuadros de color rojo en diferentes puntos de la Barranca y sobre elementos naturales y antrópicos. La estación BZ a se estableció en un megabloque a 3m del nivel de la barranca, la estación BZ b coincide con una manguera que atraviesa la barranca y se midió a 6m de la base del río y la estación BZ c se marcó en el puente de La Becerrera a 1.5 m sobre el cauce del río. Las marcas se instauraron en lugares de fácil acceso y que no fueran susceptibles a cambios en corto tiempo para realizar las mediciones periódicas.

En la Barranca El Cordobán, la estación alta (BCa) a 1760 msnm en la parte estrecha del cauce con una pendiente de  $11^\circ$ , la estación media (BCb) a 1620 msnm en la zona donde se ensancha el cauce con una pendiente de  $12^\circ$ . La estación baja (BCc) a 1180 msnm y coincide con la zona de menor pendiente  $8^\circ$ . La estación BCa se ubicó en un árbol de la orilla del cauce, debido a la falta de elementos antrópicos (una marca a nivel de los depósitos de lahares y otra en la parte alta del árbol). La estación media se estableció en la pared de la Barranca que corresponde a un depósito de avalancha de escombros. La estación BCc coincide con el puente vehicular (Fig. 8).

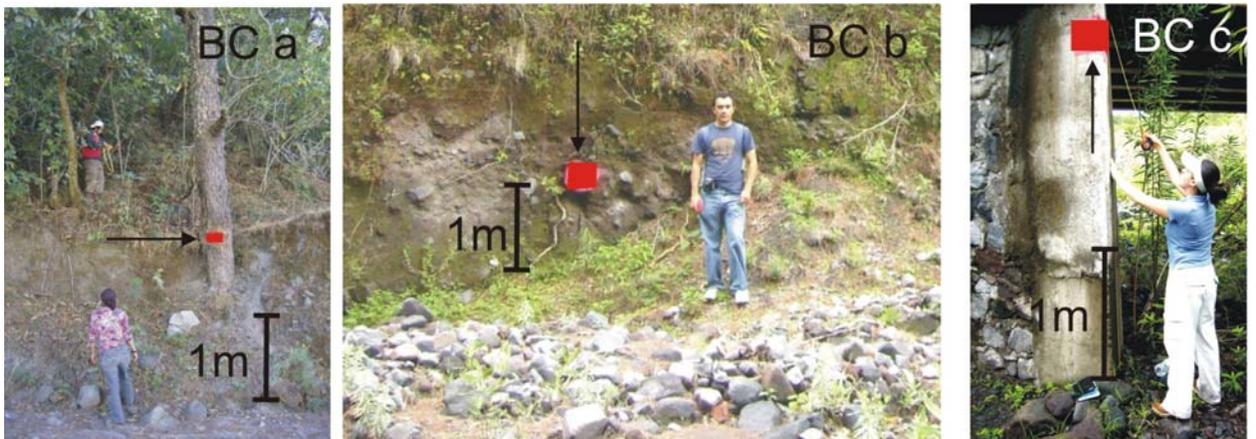


Fig. 8 Estaciones establecidas en el Río El Cordobán representadas por recuadros de color rojo sobre elementos naturales y antrópicos. La estación BCa se marcó en la corteza de un árbol a 2 m de la base del río, la estación BCb se marcó a 70 cm del nivel del río en la pared de la barranca y la estación BC c en el pilar del puente El Cordobán a 2.10 m de la base del río. Las marcas se instauraron en lugares de fácil acceso y que no fueran susceptibles a cambios en corto tiempo.

En el trabajo de campo se identificaron y describieron los depósitos de lahares de la ladera SW dentro de los Ríos La Lumbre, El Zarco y El Cordobán. Se identificaron los procesos de erosión y acumulación a partir de la comparación de las secciones, se midieron los bloques de mayor dimensión y se tomaron muestras de la matriz de los depósitos para una descripción granulométrica.

Mediante el tamizado en seco se midió el porcentaje en peso de la matriz de los diferentes depósitos identificados en campo. Se analizaron un total de 15 muestras con el propósito de identificar las características granulométricas de la matriz de los lahares generados en la ladera SW del volcán durante 2008 y 2009. De acuerdo con el tamaño de grano se clasificó en grava (64-4 mm), arena (2-0.06 mm), limo (0.0625-0.004 mm) y arcilla (<0.004 mm).

Con la finalidad de obtener escenarios de afectación por lahares secundarios en la ladera SW del Volcán de Colima, Se utilizaron los programas TITAN2D y LAHARZ para realizar simulaciones con tres volúmenes diferentes: el calculado para los lahares de 2008 y 2009 ( $4 \times 10^5 \text{ m}^3$  de los cuales,  $2 \times 10^5 \text{ m}^3$  se depositaron en La Lumbre,  $1 \times 10^5 \text{ m}^3$  en el Zarco y  $0.9 \times 10^5 \text{ m}^3$  en el cordobán), el de los lahares de 2005 ( $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ ) y el de 2000 que afecto a la comunidad La Becerrera ( $3.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) (Gavilanes, 2004; Dávila et al., 2007).

El programa TITAN2D fue desarrollado en la Universidad de Búffalo (Geophysical Mass Flow Group, 2007) y es un programa de cómputo creado para simular flujos granulares sobre una base topográfica de un Modelo Digital del Terreno (DEM). El programa esta diseñado para trabajar en un ambiente Linux y permite identificar la trayectoria de un flujo a partir de un deposito inicial, se basa en un incompresible continuo de Coulomb (mecánica de medios continuos para fluidos), las leyes de conservación de la masa y cantidad de movimiento y la profundidad promedio del cauce. Los parámetros requeridos para realizar las simulaciones son: El DEM, las características del depósito a removilizar, el ángulo de fricción interno y de base. El programa reconoce el DEM en formato de GRASS 5.4 (Geographic Resources Analysis Support System). Las características del flujo que se definen son: coordenadas, espesor, diámetro menor y mayor del depósito. El programa calcula el volumen total del material a removilizar a partir de las dimensiones, el ángulo de fricción interna corresponde con el ángulo de reposo del material y el ángulo de fricción base se refiere a la pendiente del terreno en grados. Este programa presenta algunas limitaciones para simular flujos de dos fases como son los lahares; sin embargo, para considerar

la incorporación de agua en la simulación se utilizaron ángulos de fricción base bajos y se adecuaron según la pendiente.

Las simulaciones se realizaron sobre un DEM de 5 m de resolución, que fue elaborado con base en la restitución de imágenes LIDAR, debido a que la resolución de la cartografía de INEGI es de 20 m. La base de datos se adquirió en formato .xyz, la interpolación de los puntos se elaboró en el programa Surfer para obtener el mapa vectorial y con el mismo programa se realizó un recorte de la zona de estudio para facilitar el procesamiento. En el programa ERDAS Imaging, se obtuvo el DEM con encabezado en formato ASCII y se importó a formato GRASS 5.4 para realizar las simulaciones correspondientes en TITAN2D.

Para realizar las simulaciones con el programa Titan2D se requiere de un depósito inicial que corresponde con el punto donde se encuentra el material a removlizar; sin embargo, para los lahares secundarios es difícil definir un punto inicial, debido a que su origen es por la incorporación gradual de sedimentos a través del cauce del río. Para fines de este trabajo las coordenadas del depósito inicial se definieron en la zona donde se encuentran depósitos de piroclastos sin consolidar y cambios de pendiente que propician a que se incorpore en la corriente del río. Los puntos se identificaron con base en el trabajo de campo y fotointerpretación para las Barrancas La Lumbre, El Zarco y El Cordobán (Fig. 9).

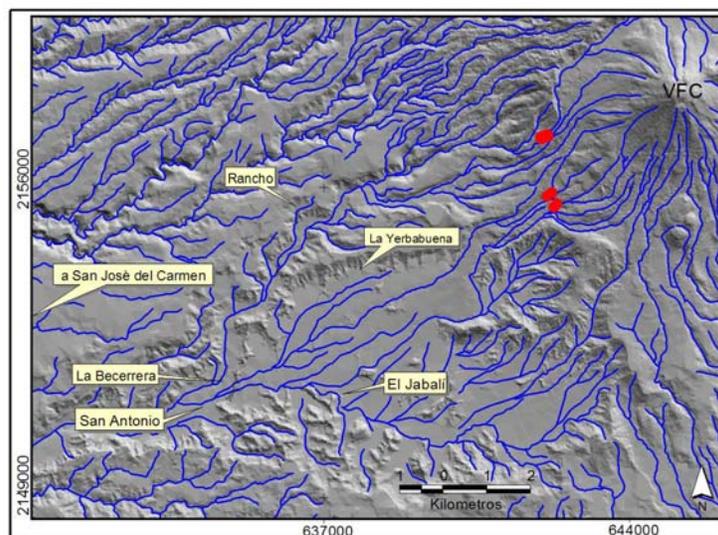


Fig. 9 Mapa de localización de los depósitos iniciales

El programa TITAN2D genera resultados numéricos y gráficos que se guardan en un lapso de tiempo establecido por el usuario. Los resultados numéricos contienen la información del flujo como: velocidad, altura máxima y aceleración interna del flujo, área inundada, volumen real y volumen depositado. Los resultados se generan como imágenes en formato .xmf y contienen una representación dinámica de la distribución de los depósitos y espesores sobre el DEM.

Los resultados numéricos se guardaron en lapsos de 30 segundos, este intervalo de tiempo se considera el más adecuado para no generar archivos repetitivos; debido a que si el flujo tiene una velocidad promedio de 5 m/s en un lapso de 30 segundos el flujo avanza 150 m en el terreno. Los resultados numéricos se organizaron en una hoja de cálculo para graficarlos y realizar el análisis de la velocidad del flujo. Los resultados gráficos se procesaron mediante un visualizador (Para View), sin embargo este visualizador no muestra la topografía a detalle, por lo que fue necesario seleccionar las imágenes más representativas y digitalizarlas en AutoCad Map, para obtener los polígonos de inundación que se sobrepusieron en un modelo digital del terreno con la infraestructura básica de la región en un sistema de información geográfica Arc Gis.

Por otra parte, el programa LAHARZ desarrollado por Iverson et al.,(1998), es un código de simulación empírica destinado a identificar zonas propensas a inundación por lahares. Se ejecuta a partir del modulo ARCINFO GRID, con base en un DEM y consta de 14 archivos AML (ArcInfo Macro Language) y 7 menús.

El LAHARZ simula los límites de inundación en las zonas de depósito y se basa en argumentos geométricos de profundidad y ancho de los cauces, permite obtener una estimación de secciones transversales y áreas planimétricas de inundación en función de los volúmenes de un lahar (Fig. 10). Con base en lo anterior, el área planimétrica o las zonas de inundación aumenta su anchura y longitud a medida que aumenta el volumen del lahar. De esta forma se pueden delimitar las zonas potenciales de inundación a partir de uno o más volúmenes determinados por el usuario.

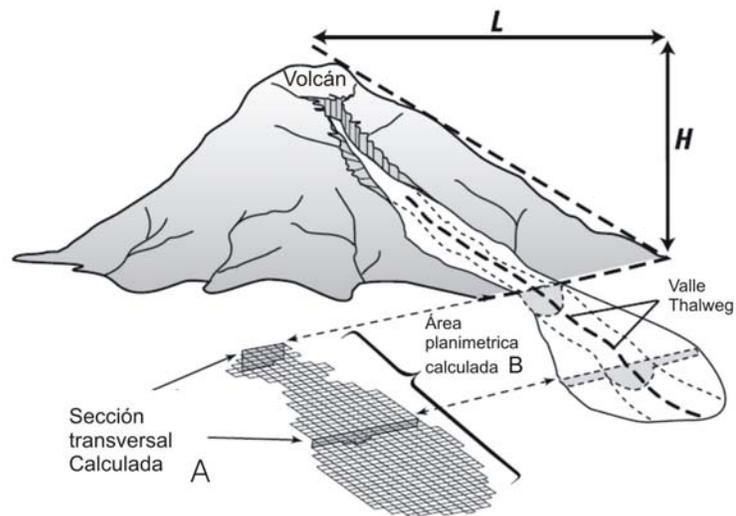


Fig. 10 Diagrama de la línea de energía y las dimensiones de un lahar simulado con LAHARZ; sección transversal calculada (A), área planimétrica (B), proporción de caída vertical (H) y distancia horizontal (L). Modificado de Iverson et al., (1998).

Los parámetros requeridos para la simulación en LAHARZ son: línea de energía, punto inicial del lahar, punto final del flujo y volumen. La Línea de energía se utiliza en vulcanología para describir la distancia recorrida por las avalanchas de escombros, los flujos piroclásticos y los lahares originados en los flancos del volcán. La pendiente regularmente hace referencia a la energía de movilidad y se obtiene al dividir altura entre longitud ( $H/L$ ). En el programa LaharZ, la zona encerrada por la línea de energía se refiere a la región susceptible a procesos de erosión, que en este caso, corresponde con la formación de lahares secundarios.

Para las simulaciones en LaharZ, se generó una capa con la red hidrológica sobre el DEM. Posteriormente se creó el límite de la zona de peligro a partir de la línea de energía; se seleccionaron las corrientes sobre las que se realizaron las simulaciones y finalmente se crearon las zonas de inundación a partir de diferentes volúmenes.

Las simulaciones se realizaron sobre un DEM con resolución de 5 m. Se obtuvieron zonas de inundación que muestran grados de peligro en una forma rápida, objetiva y reproducible; debido a que los polígonos resultantes se pueden trazar con información como la infraestructura, la hidrología y la topografía del volcán para producir mapas de amenaza dentro del programa Arc Gis.

Con la aplicación de los programas TITAN2D y LAHARZ se simularon escenarios de lahares secundarios generados por la removilización de depósitos de flujos piroclásticos. El volumen de los depósitos fue estimado a partir de los depósitos medidos en campo y fotointerpretación.

Se realizaron comparaciones de las simulaciones con los datos obtenidos en campo y se identificaron las ventajas y desventajas del uso y la aplicación de los programas LaharZ y Titan2D para determinar zonas de inundación.

Para identificar los elementos expuestos y obtener los escenarios de afectación, se realizó un inventario de la infraestructura localizada sobre la ladera SW del Volcán de Colima. Se integró información correspondiente a infraestructura pública y privada, las comunidades, los servicios con que cuenta la región, así como la población establecida en las comunidades y ranchos con base en datos de INEGI 2005. La información se georreferenció para sobreponerla en un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el propósito de identificar las posibles afectaciones que se pueden presentar a partir de la generación de lahares.

Se realizó un análisis de vulnerabilidad física y estructural en la ladera SW y se identificó la velocidad de llegada de los lahares en la infraestructura expuesta por las tres barrancas. La vulnerabilidad física se refiere a la localización de predios y asentamientos humanos en zonas amenazadas, también es entendido como el nivel de exposición que presenta la infraestructura ante una amenaza como los lahares. La vulnerabilidad física se consideró a partir de los resultados de las simulaciones, se identificaron los predios que pueden resultar inundados por lahares, se consideraron tres rangos de vulnerabilidad de acuerdo con los volúmenes de lahares similares a los de 2008, 2005 y 2000. Se definió vulnerabilidad muy alta a las zonas de inundación por lahares de  $4 \times 10^5 \text{ m}^3$ , vulnerabilidad alta con  $5 \times 10^5 \text{ m}^3$  y vulnerabilidad media  $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Se localizaron las zonas expuestas a inundación por lahares secundarios, sobre un SIG con la infraestructura identificada y georreferenciada en campo y los polígonos de inundación que se obtuvieron de las simulaciones de este trabajo.

Se calcularon las características con que los lahares pueden impactar la infraestructura de la ladera SW del Volcán de Colima y la presión dinámica con la que puede llegar a golpear un lahar a la infraestructura con base en las formulas propuestas por Rickenmann, (1999) y Toyos et al., (2008).

La tasa máxima de descarga se obtuvo a partir de la ecuación (1) de Rickenmann, (1999)

$$Q_p = 0.1M^{0.833} \quad (1)$$

Donde

$Q_p$  = tasa de descarga del flujo

$M$  = volumen máximo del flujo

La velocidad máxima de descarga ( $V_{max}$ ) se estimó con la ecuación (2) Rickenmann (1999)

$$V_{max} = 2.1 Q_p^{0.33} S^{0.33} \quad (2)$$

Donde:

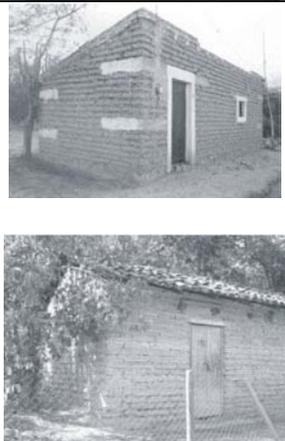
$V_{max}$  = velocidad máxima del flujo

$Q_p$  = tasa de descarga del flujo

$S$  = pendiente de la barranca

Para definir la vulnerabilidad estructural se realizó una caracterización de las viviendas de la ladera SW con base en información de INEGI 2005 y trabajo de campo, para identificar las viviendas en un estado de vulnerabilidad estructural. Las viviendas se clasificaron en tres tipos, de acuerdo al material de construcción, se les asignó un rango de vulnerabilidad de media, alta y muy alta con base en la Tabla 3 modificada de CENAPRED (2004). Para el caso de Lahares, el tipo de material de construcción en techos no es determinante para los rangos de vulnerabilidad y no se considera vulnerabilidad estructural baja, debido a que las viviendas resultan afectadas aun contando con cimentación.

Tabla 3. Clasificación de las viviendas de acuerdo a sus características.

Tipo	Características de la vivienda	Rangos de Vulnerabilidad	Fotografía representativa
1	Muros de mampostería con techo rígido o flexible. La cimentación es construida con una zapata corrida de concreto o de mampostería.	Media	
2	Muros de adobe con techo rígido o flexible. La cimentación, cuando existe, es de mampostería.	Alta	
3	Muros de materiales débiles con techo flexible. Generalmente no cuentan con cimentación.	Muy alta	

Modificada de CENAPRED (2004)

A partir de la información de actividad volcánica histórica recopilada por diversos autores (González et al., 1993; Saucedo, 1997; Navarro et al., 2002; Bretón et al., 2002; Cortes et al., 2009; Saucedo, 2010)., se consideró el periodo de recurrencia de lahares y se clasificaron en tres tipos de acuerdo a su volumen, para representar los escenarios de afectación.

De forma complementaria se realizaron simulaciones para lahares relacionados con actividad pliniana (sineruptivos) como los de 1913 con un volumen de  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$  y lahares relacionados con avalanchas de escombros (por colapso) como la del Río Armería a partir del depósito de avalancha de escombros de 3.6 ka A.P. con un volumen de  $2.8 \times 10^8 \text{ m}^3$  (Cortes et al., 2009).

### CAPÍTULO 3. ACTIVIDAD DEL VOLCÁN DE COLIMA Y RECURRENCIA DE LAHARES

El Volcán de Colima es un estratovolcán considerado el más activo de México con alrededor de 45 erupciones en los últimos 430 años, con un comportamiento cíclico que culmina con erupciones plinianas aproximadamente cada 100 años (Martin Del Pozzo et al., 1995; De la Cruz-Reyna, 1996; Cortés et al., 2005; Fonseca y Martin Del Pozzo, 2010). Está constituido por alternancia de derrames de lava depósitos piroclásticos y depósitos de caída. El cono actual se formó dentro de la caldera del volcán Paleofuego.

Durante las diferentes etapas de crecimiento, el Volcán de Colima generó flujos piroclásticos emplazados hacia el N, S, SE, y SW, los cuales han alcanzado distancias de hasta 15 km. En tiempos históricos se han presentado numerosas erupciones explosivas y efusivas. Las erupciones recientes más explosivas del volcán asociadas a columnas plinianas y subplinianas ocurrieron en 1818 y 1913. Hasta la fecha, la actividad del Volcán de Colima se caracteriza por presentar un comportamiento cíclico con formación de domos cratéricos seguido por actividad efusiva y explosiva que los destruye formando flujos piroclásticos de bloques y cenizas (Luhr y Carmichael 1990; Martin Del Pozzo et al., 1995) (Tabla 4).

Bretón et al. (2002) menciona registros antiguos de lahares secundarios en 1744 que llegaron a la ciudad de Colima sin generar daños (AGI, 1744) Los lahares secundarios están relacionados con los episodios de mayor actividad y la generación de flujos piroclásticos, debido a que grandes volúmenes de piroclastos son depositados en las laderas y son fácilmente erosionables por la corriente del río. (Fig. 11).

**Tabla 4 Actividad del Volcán de Colima**

Año	Domo	Lava	Ceniza	Flujos	Lahar	Características	Referencias
1576			*			Intensa actividad eruptiva	Tello, 1651; Arreola, 1915; Barcena, 1887
1585			*	*		Actividad probablemente Peleana con abundante caída de ceniza	Tello, 1651; Arreola, 1915; Ortiz, 1944
1590			*			Caída de ceniza y probable generacion de flujos piroclasticos	Waitz,1932; Mota Padilla, 1742 en Bretón et al., 2002
1602			*			Actividad fumarolica	AGL, 1602 en Bretón et al., 2002
1606			*	*		Caída de ceniza en Michoacan a mas de 200 km	
						Flujo piroclastico WSW	Tello, 1651; Arreola, 1915; Medina Martinez, 1983
1611-1612			*	*	+	Erupción violenta con piroclastos	Puga, 1890; Arreola, 1915; Waitz 1932
1690			*	*	+	Actividad posiblemente Peleana	Medina, 1983; Luhr y Carmichael, 1990
1744			*	*	*	Flujos de lodo que llegaron a Colima	AGL, 1744 en Bretón et al., 2002
1749 - 1750		*				Erupcion con derrames de lava	Waits, 1932; Martin Del Pozzo y Romero, 1988
1770			*	*		Actividad explosiva	Pérez de León 1789; Barcena, 1887
						Caída de ceniza en Guadalajara y posible generación de flujos Soufriere	Barcena, 1887; Puga, 1889; Arreola, 1915
1771			*				
1789		*				Material incandescente que bajo por el flanco sur	Pérez de León 1789
1794		*				Explosion	Arreola, 1915
1795		*	*			Actividad efusiva, emisión de lavas y escorias	Waitz, 1932
1806			*			Actividad explosiva	Bárcena, 1887 y Arreola 1913
1808-1809		*		*		Actividad efusiva y flujos tipo Merapi	Bárcena, 1887 y Arreola 1913
						Actividad Pliniana, caída de ceniza en Guadalajara, San Luis Potosí, Zacatecas, Queretaro y México	Barcena, 1886; Arreola, 1913; Waitz, 1932; Luhr y Carmichael, 1990; AGN, 1818
1818	DT		*	*	+	Crecimiento del domo	Barcena, 1887
1866	F					Derrames de lava y flujos Merapi con emisión de ceniza de Volcancito	Barcena, 1887; Arreola, 1915; Waitz, 1915
1869	F	*	*	*		Actividad efusiva del Volcancito	Barcena, 1887; Arreola, 1915
1870-1871		*	*	*		Actividad efusiva del Volcancito	Barcena, 1887; Arreola, 1915
1872		*	*	*		Actividad efusiva del Volcancito	Morentin, 1873; Arreola, 1915
1873		*	*	*		Emisiones de ceniza y lava	Ortoll, 1988
1874		*	*	*			
1880-1881		*	*	*		Derrames de lava y flujos Merapi en dirección SW	Arreola, 1915, Waitz 1932; Ortiz, 1944
1885		*	*	*		Derrame de lava y flujos Merapi	Barcena, 1887; Puga, 1890; Arreola, 1915
1886	F	*	*	*		Derrame de lava y flujos Merapi	Barcena, 1887
1889	DP	*	*	*		Explosion moderada	Puga, 1890; Arreola, 1915, Ortoll, 1988
1890		*	*	*		Caída de ceniza en Guanajuato y flujos piroclasticos	Arreola, 1915; De La Cruz Reyna, 1993
1896		*	*	*		Derrame de escorias interpretados como tipo Merapi	Diaz, 1906; Martin Del Pozzo et al 1988
1897		*	*	*		Caída de ceniza en Tonila Jalisco	Martin Del Pozzo et al 1988, 1995
1903	DP	*	*	*		Caída de ceniza y generación de flujos Merapi	Diaz, 1906 ; Arreola, 1903; Starr,1903 Waitz 1932
1904-1905		*	*	*		Derrame de lava	Diaz, 1906
1908		*	*	*		Caída de ceniza y generación de flujos Soufriere	Arreola, 1915; Waitz, 1915; 1932
1909		*	*	*	*	Caída de ceniza Armeria	Arreola, 1915; Waitz, 1915; 1932
						Columna Pliniana y caída de ceniza en Armeria hasta 725 km al NE	Waitz,1932; Arreola, 1913
1913	DT	*	*	*	+	Formacion de un domo	Mooser, 1961
1957		*	*	*		Flujos Merapi a 4.5 km en direccion SE	Thorpe, 1977; Demant, 1977; Mooser 1961
1961-1962	F	*	*	*		Crecimiento de domo	Thorpe, et al., 1977
1970	F	*	*	*		Flujos Merapi 1 km flanco Sur	Thorpe, et al., 1977
1975-1976		*	*	*			Luhr y Charmichael 1991; Vizcaino, 1993; Martin Del Pozzo, et al., 1987
1981-1982	F	*	*	*		Flujos Merapi 2 km flanco Norte	Vizcaino, 1993
1986		*	*	*		Emisiones de ceniza y fragmentos incandescentes	Luhr y Carmichael 1991; Flores, 1987
1987		*	*	*		Explosión	
1988		*	*	*		Alternancia de actividad fumarolica y emisiones de ceniza	Vizcaino, 1993
1989		*	*	*		Flujos piroclasticos interpretados como tipo Merapi	Vizcaino, 1993
						Derrame de lava 2 Km y flujos Merapi 4 Km en direccion SW por destrucción del domo	Rodríguez Elizarrás, 1991; Gonzalez et al., 1993
1991	F - D	*	*	*	*	Flujos Merapi y Soufriere 3.5 Km	Saucedo, 1997
1994	D	*	*	*	*		
						Derrame de lava (3 km), flujos Soufriere (3.3 km) y flujos Merapi (4.5 km) por varios flancos	Saucedo, 2001; Bretón et al., 2002
1998	F	*	*	*	*	Derrame de lava (3 km), flujos Soufriere (3.3 km) , flujos Merapi (4.5 km) por varios flancos	Saucedo, 2001; Bretón, 2002
1999	DP	*	*	*	*	Derrame de lava acompañado de flujos Merapi 2-3 km	Universidad de Colima
2000	F	*	*	*	*	Flujos de bloques y ceniza y caída de ceniza	Universidad de Colima; GVN, 2001
2001	F	*	*	*	*	El domo creció y formo un derrame de lava	Universidad de Colima; Fonseca y Martin Del Pozzo, 2010
2002	F	*	*	*	*	Actividad explosiva y flujos merapi	Universidad de Colima
2003	D	*	*	*	*	Derrame de lava de 1.8 km	Universidad de Colima; Fonseca y Martin Del Pozzo, 2010
2004	F	*	*	*	*	Formación y destrucción de pequeños domos, actividad explosiva, flujos piroclasticos y caída de ceniza	Universidad de Colima, Nieto, 2008
2005	F - D	*	*	*	*	Removilización de depósitos piroclasticos Lahares	Universidad de Colima
2006		*	*	*	*	Crecimiento del domo, actividad fumarólica y pequeñas emisiones de ceniza	Gobierno del Estado de Colima
2007	F	*	*	*	*		Gobierno del Estado de Colima
2008	F	*	*	*	*		Gobierno del Estado de Colima
2009	F	*	*	*	*		Gobierno del Estado de Colima

Domo: F. formacion de domo, D. destrucción de domo, DT. Destrucción total, DP. Destrucción parcial  
 + Es probable que se hayan generado lahares secundarios a partir del material depositado.

## Lahares y Flujos Piroclásticos Recientes

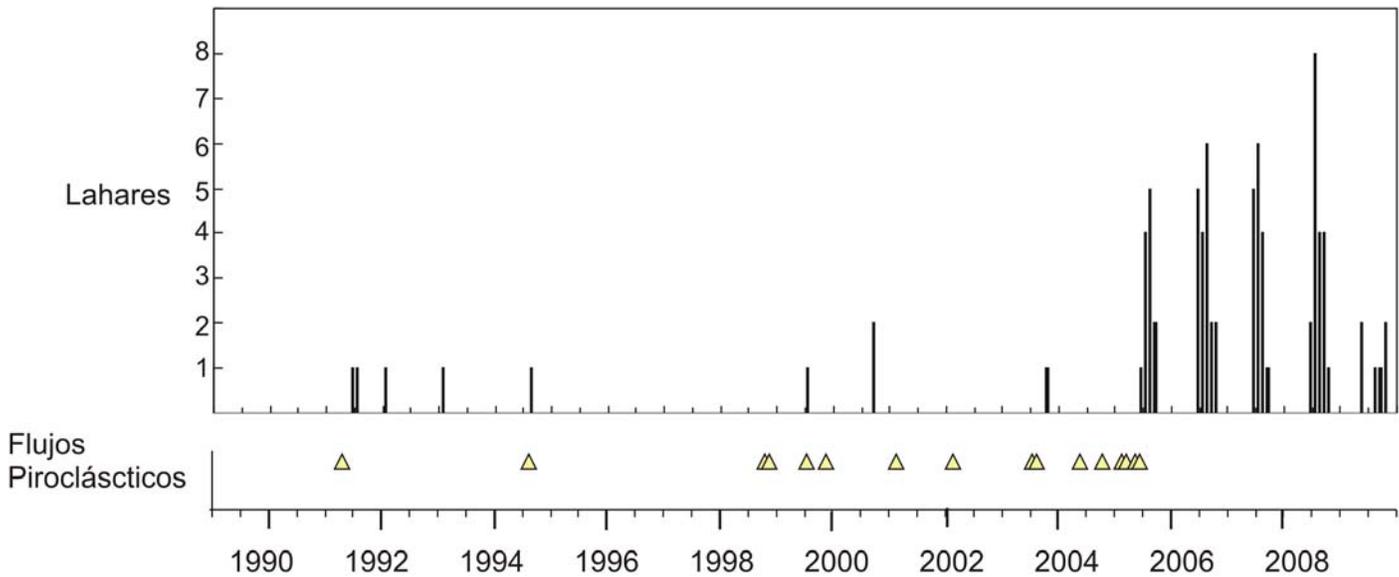


Fig.11. Generación de lahares a partir de flujos piroclásticos

En el Volcán de Colima se han presentado lahares asociados a depósitos de colapso. En el Río Armería se emplazó un flujo de escombros relacionado con la avalancha de escombros de 3.6 ka A.P. que cubrió una superficie de 6.4 km<sup>2</sup> con un volumen de 2x10<sup>8</sup> m<sup>3</sup> (Cortes et al., 2009). Por otra parte, en el sector SE del Nevado de Colima, un flujo de escombros en el Río Naranjo removilizó 10 km<sup>3</sup> de material, a partir de la avalancha de 18.5 ka. que llegó hasta el Océano Pacífico (Stoopes y Sheridan 1992; Capra y Macias, 2002).

La erupción explosiva que presentó el Volcán de Colima en 1913 produjo flujos piroclásticos que avanzaron 15 km por el flanco sur del volcán y dieron lugar a la generación de lahares secundarios a partir de la removilización del material dispuesto en los ríos La Lumbre y El Remate hasta el Río Armería. Durante esta erupción el volumen de material emitido se estimó en 0.9 Km<sup>3</sup>. Este material fue removilizado como lahares originados por lluvias intensas, con alcance mayor a 20 Km hacia San Marcos, Jalisco y hacía la ladera Sur y suroeste (Saucedo, 1997).

También se han presentado lahares sin relación directa con un episodio de actividad eruptiva, un ejemplo es el lahar del 16 de octubre de 1955 que ocurrió después de tres días de intensa precipitación (140 mm aproximadamente). El flujo de escombros se generó en la ladera este del Nevado de Colima y se encauzó sobre los arroyos Seco, Los Plátanos y Dos Volcanes que convergen en la cuenca del río Atenquique y causaron destrucción en el pueblo del mismo nombre. El flujo transportó clastos de tamaño de grava hasta bloques mayores a 1m de diámetro y causó 23 mil víctimas.

Posteriormente, el 27 de octubre de 1959 las lluvias ocasionadas por una tormenta tropical, provocaron inundaciones nuevamente en Atenquique, destrucción de Minatitlan y afectaciones en el rancho Jabalí (Saucedo et al, 2008; 2010).

Durante 1975 y 1976 los depósitos de flujo piroclástico fueron removilizados y formaron lahares en las barrancas La Arena y Beltran (Thorpe et al., 1977). El material depositado fue removilizado en 1988 como lahares secundarios que se produjeron por las lluvias intensas que generó el fenómeno de El Niño. Estos lahares afectaron la vegetación, transportaron árboles, grandes bloques, arena y grava a través del Río El Cordobán donde formaron diversas terrazas de depósito.

En 1991 el ascenso de un nuevo magma perforó la superficie del primer domo y formó un nuevo lóbulo de lava que al alcanzar el borde del cráter, se colapso y produjo un flujo piroclástico tipo Merapi, y después el derrame de lava continuó fluyendo hasta alcanzar 2.6 Km en dirección SE y 4 km por la Barranca El Cordobán en dirección SW (González et al., 1993), El flujo de bloques y ceniza generó un depósito de  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$  y durante la temporada de lluvias se removilizó el 50% en forma de lahares que alcanzaron La Becerrera y San Antonio a 12 km al SW del cráter. El lahar tuvo un volumen de  $0.5 \times 10^6 \text{ m}^3$  y es un depósito masivo, semi-endurecido, no estratificado, sin gradación, con poca clasificación y una matriz soportante, presenta una superficie plana, bloques de lava en suspensión de 1-2 m de diámetro y abundante piedra pómez re trabajada de los depósitos de 1913. (Rodríguez et al., 1991). El 3 de julio el depósito del lahar fue erosionado y formó un nuevo lahar con alcance de 5 km, y 2 m de espesor que afectó El Jabalí. El 25 de junio se registraron dos horas de intensa precipitación en Cofradía de Suchitlán (50 mm) y el día 26 se

formó un lahar en la Barranca El Cordobán que la rellenó, mató 20 cabezas de ganado y arrastró troncos de árboles, de acuerdo con descripciones del agricultor Ramón Aguirre Valencia (GNV,1999).

En 1992 el fenómeno El Niño, produjo precipitaciones extraordinarias durante el mes de enero, el promedio mensual de precipitación se excedió un 700% y se incrementó la saturación de agua en el material depositado en las partes altas del volcán formando lahares secundarios. En enero de 1992, después de 5 días de intensa precipitación se formó un lahar por la Barranca Montegrande, el depósito fue localizado a 7 km de distancia del cráter y 4 km al noroeste de Quesería (7,735 habitantes). El depósito de este lahar tuvo un espesor de 2 a 4 m y estaba constituido por algunos bloques entre 2 y 3 m de diámetro en una matriz de arena. En las partes distales del depósito, se formaron terrazas de 60 a 185 m de ancho. El volumen estimado para el depósito del lahar fue de  $1.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ . Dos propietarios de los terrenos afectados indicaron que el lahar cubrió 2 hectáreas de tierras de pastoreo, árboles frutales y varios colmenares dedicados a la producción de miel (GNV,1999).

En 1993 se presentaron lahares secundarios en las Barrancas La Lumbre, El Cordobán y San Antonio (Saucedo, 1997). En julio de 1994 se generaron flujos de bloques y ceniza por la destrucción parcial de domo. Los flujos de bloques y ceniza formaron un depósito de 4m de espesor y un volumen estimado de  $4.5 \times 10^5 \text{ m}^3$  (Smithsonian Institution, 1999). Las lluvias removilizaron el material y se formó un lahar el 25 de agosto con un alcance de 10 km en la Barranca El Cordobán. El lahar dejó un depósito de 80 cm de espesor a 1650 msnm y de 5 a 12 cm en las cercanías de la comunidad La Becerrera, donde cubrió una parte de la carretera.

En julio de 1994 una explosión destruyó parcialmente el domo que se encontraba en el cráter y produjo caída de ceniza 35 km hacia el oeste, emisión de balísticos con alcance de 2 km y flujos piroclásticos por la Barranca Cordobán; de forma consecutiva, se formó un lahar por la Barranca el Cordobán que bajó 10 km hasta los 1250 msnm (Saucedo, 1997). La formación de lahares continuó durante la temporada de lluvias de 1995. El material emitido en 1994 fue removilizado por lahares que formaron depósitos de 5 -12 cm en las cercanías de la comunidad La Becerrera.

En 1997 un lahar removilizó el material piroclástico y formó un depósito de  $2 \times 10^5 \text{ m}^3$  que tuvo un alcance de 12 km y afectó el Rancho El Jabalí (Gavilanes, 2004). En los años 1998-1999 se

generaron flujos tipo Merapi y Soufriere que dejaron material en las Barrancas La Lumbre, Montegrande, Cordobán y San Antonio, que formaron lahares durante las temporadas de lluvias por las Barrancas El Zarco, La Lumbre y Montegrande.

En 1998 y 1999 un derrame de lava fluyó a partir del domo por el flanco sureste del volcán, estuvo acompañado de flujos de bloques y ceniza tipo Merapi que llegaron a 4.8 km, hacia la ladera SW por la Barranca El Cordobán y 3 km en las Barrancas Montegrande, San Antonio y La Lumbre (Saucedo, 2002; Martin Del Pozzo et al., 2002).

El 17 de julio de 1999 se formó una columna de 12,000 msnc que produjo caída de ceniza en Zapotitlan de Vadillo (21.5 km al W). Se presentaron diversos flujos piroclásticos hacia los flancos S, SW, W, y NW con alcance de 5.5 km; el 18 de julio un colapso en el flanco sur del domo, generó flujos de 2 Km por las Barrancas Montegrande, San Antonio, y El Cordobán. Durante las mismas fechas se presentaron fuertes lluvias que generaron la removilización del material y formaron lahares sineruptivos que alcanzaron 4 km a partir del cráter por las Barrancas Montegrande, San Antonio y El Cordobán.( GNV,1999; Navarro et al., 2002; Bretón et al., 2002).

En junio de 2000 se formaron lahares por las Barrancas El Zarco, El Cordobán y La Lumbre. Las mayores afectaciones se presentaron en la comunidad La Becerrera (12 km del cráter), donde una vivienda y un auto quedaron sepultados por un lahar que bajó por la Barranca El Zarco. En la Barranca Montegrande otro lahar destruyó la torre de conducción eléctrica a 7.8 km del cráter (Gavilanes, 2004).

En febrero de 2002 se formaron derrames de lava por el flanco SW con un alcance de 1.5 km, acompañados de emisiones de ceniza y flujos piroclásticos tipo Merapi que alcanzaron de 1 a 2 km por los flancos S y SW (Universidad de Colima, 2002). La emisión de lava cesó en febrero de 2003 e inició un episodio explosivo; el 17 de julio una columna de 3,000 msnc. dio origen a 5 flujos piroclásticos que avanzaron 2.5 km por las Barrancas El Cordobán, Montegrande, San Antonio y La Lumbre. El 28 de agosto se formó una columna de ceniza que provocó caída de ceniza a 60 km al W y NW y flujos piroclásticos de 2.5 km. Estos flujos bajaron por todos los

flancos del volcán. Durante los meses de septiembre a diciembre continuaron las explosiones y emisiones de ceniza y se formaron lahares secundarios por la removilización del material depositado en las barrancas (Universidad de Colima, 2003).

El 7 de octubre de 2003 se formó un lahar en la Barranca Montegrando que afectó nuevamente las torres de conducción de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) que conducen energía eléctrica de la costa del Pacífico a la ciudad de Guadalajara (Universidad de Colima, 2003). Han resultado afectadas con frecuencia debido a que están instaladas en la zona de depósito de la Barranca Montegrando.

En septiembre de 2004 se formó un derrame de lava a partir del domo sobre los flancos N y W que cerró el camino al Playón. Se generaron flujos piroclásticos por el flanco oeste hacia la Barranca La Lumbre, con un alcance de 5 km (Universidad de Colima, 2004).

Durante el 2005 se presentaron flujos piroclásticos los días 12 de enero, 10 y 13 de marzo, el 10, 15 y 23 de mayo por las Barrancas El Muerto, Montegrando, San Antonio y El Cordobán y con alcance entre 4 y 5 km. Se reportó caída de ceniza en las ciudades de Colima y Villa de Álvarez (Universidad de Colima, 2005; Nieto, 2008). El 5 de junio los flujos piroclásticos desbordaron por todos los flancos el volcán. El 25 de junio de 2005 en la estación sísmica de EZV4 operada por la Red Sismológica de Colima (RESCO) se registró una señal de lahar en la ladera sur del Volcán. Otros lahares se formaron la madrugada del 30 de junio por las Barrancas La Lumbre con alcances de 10 km y en Montegrando con alcance entre 7 y 8 km; se reportaron daños en la protección del puente de La Lumbre que comunica a Colima con Jalisco (Universidad de Colima, 2005).

El 5 de julio que formó una columna superior a los 5,000 msnc, produjo flujos piroclásticos hacia la zona este y el 16 de septiembre la columna eruptiva alcanzó una altura de 4,000 msnc con una dirección W - SW. El 7 de julio de 2005 se presentaron dos señales de lahar en la estación de Montegrando de 15:00 a 15:30 y de 19:30 a 20:10 hrs. sin que se reportaran daños. El 19 de julio, 31 de agosto y 27 de septiembre también se registraron lahares en la estación sísmica Montegrando (Universidad de Colima, 2005).

En el 2006, se generaron lahares secundarios por las Barrancas Montegrande, La Lumbre y San Antonio, los días 4, 5, 21, 25 y 27 de junio; 3, 15 y 29 de julio; así como el 2, 8 y 11 de agosto; el último con un volumen estimado en  $6.8 \times 10^5 \text{ m}^3$  (Smithsonian Institution, 2009). Los lahares continuaron los días 13, 19 y 23 de agosto, 15 y 30 de septiembre y 12 y 15 de octubre. La temporada de ciclones del 2006 finalizó con un total de 19 lahares por las Barrancas de La Lumbre y Montegrande en el estado de Colima, y La Arena en el estado de Jalisco (Universidad de Colima, 2006).

En la Tabla 5 se puede identificar la relación que existe entre la ocurrencia de flujos piroclásticos y lahares, debido a que el volumen de los lahares secundarios está en función del volumen de los flujos piroclásticos y de igual forma, el alcance de los lahares aumentó de acuerdo al alcance de los flujos piroclásticos.

Tabla No. 5 Flujos Piroclásticos y Lahares del Volcán de Colima

Año	Domo	Derrame de lava		Flujos piroclásticos						Lahares			Afectaciones	Referencias				
		Alcance	Flancos	Tipo	Vol m <sup>3</sup>	H/L	Alcance	Flancos		Barranca	Vol. M <sup>3</sup>	Alcance						
1913				Merapi	1.3x10 <sup>5</sup>	0.41	4 Km		Beltran Playón Monte grande Arena Lumbre Cordobán	Lumbre Armeria Remate Cordobán Zarco	5x10 <sup>6</sup> - 1.5x10 <sup>6</sup>	Armeria y Tuxpan 17Km	una victima y cabezas de ganado	Waitz, 1915 y 1935 Arreola, 1915 Mancilla, Saucedo, 1997 Gavilanes, 2004				
				Soufriere	1.9x10 <sup>6</sup>	0.26	9.5 Km											
				Pliniana	1x10 <sup>7</sup>	0.17	15 Km											
1961 1962		1 Km	N											Moser, 1962				
1975 1976	100m diametro 15m altura	5 Km	E - SE Juan Barragan Beltran Tonila	Merapi					SE y N NE	Beltran Cafecito Arena Lumbre	3x10 <sup>6</sup>			Thorpe et al., 1977 Davila et al., 2007				
1981 1982	E del cráter	0.8 Km	S											Smithsonian, 1981 Luhr 2002 Martin Del Pozzo 1987				
1991	130m diametro 50m altura	2 Km	SW Cordobán	Soufriere	8x 10 <sup>5</sup>	0.39	4 Km	SW	Cordobán	(25 junio) Cordobán	5x10 <sup>5</sup>	9.9 Km	cabezas de ganado rancho El Jabalí Rancho Shulte	J.F. Luhr 2002 Gonzalez et al, 1993 Davila N., 2007				
1992										Monte grande	8.3x10 <sup>5</sup>	7Km						
1993										Lumbre Cordobán	1.6x10 <sup>5</sup>		Rancho Shulte					
1994				Soufriere	4.5x10 <sup>5</sup>	0.42	3.5 Km			San Antonio Cordobán	1.6x10 <sup>5</sup>			Saucedo et al., 1995 Gavilanes et al., 1996 Davila N. 2007				
										Cordobán (2 de octubre)	5x10 <sup>5</sup>							
											La Arena	1x10 <sup>5</sup>						
1997									Cordobán	2x10 <sup>5</sup>		Rancho El Jabalí						
1998 1999	50m x 30m diametro 15m alto (3.8x10 <sup>5</sup> m <sup>3</sup> )	2.8 - 3.8	S SW Cordobán Lumbre	Merapi	3.6x10 <sup>5</sup>	0.48	3 Km	SW	Lumbre	Monte grande	6x10 <sup>5</sup>	4 Km		Saucedo et al., 2002 Gavilanes, 2004 Davila et al., 2007				
										Merapi	8x10 <sup>5</sup>	0.4	4.5 Km	SW	Cordobán W			
												Merapi	4.5x10 <sup>5</sup>	0.44	3 Km	SW	Cordobán E	
												Soufriere	7.9x10 <sup>5</sup>	0.45	3.3 Km	S	Monte grande San Antonio	
2000										Zarco Lumbre	1.5x10 <sup>5</sup>	Armeia	una vivienda y un auto					
														Monte grande	9.4x10 <sup>5</sup>		antenas de condcción eléctrica	
2001				Soufriere						Monte grande	2x10 <sup>5</sup>	2 -3 Km		Saucedo et al., 2005 Gavilanes, 2004.				
2003				Soufriere	3x10 <sup>5</sup>	0.42	3 Km			Monte grande San Antonio	4.8x10 <sup>4</sup> 2.7x10 <sup>6</sup>	12.5 Km	antenas de conducción eléctrica	Davila et al., 2007				
2004	N y W		N	Merapi	9x10 <sup>5</sup>	0.39	6Km			Monte grande Zarco Cordoban				Davila et al., 2007				
2005				Soufriere	6x10 <sup>6</sup>		5Km		San Antonio Cordobán		5x10 <sup>5</sup>							

El sistema de drenaje en el Volcán de Colima está mas desarrollado en los flancos sur, sureste y suroeste, lo que propicia que el material depositado en las partes altas de los ríos sea removilizado durante la temporada de lluvias. De acuerdo con el régimen pluviométrico, el 70% de las lluvias se producen durante los meses de verano con un promedio de precipitación anual de 1000 mm (Galindo et al., 1998). Sin embargo, la generación de lahares secundarios no depende estrictamente de una precipitación intensa.

Los lahares secundarios en el Volcán de Colima ocurren con mas frecuencia al inicio de la temporada de lluvias con poca acumulación de lluvia y son disparados por lluvias de baja intensidad, mientras que durante los meses de mayor precipitación como julio y agosto, los lahares son menos frecuentes y se requiere de una precipitación de mayor intensidad (Capra et al., 2010).

El Observatorio Vulcanológico de Colima reportó un total de lluvia acumulada de 1,386.8 mm en la temporada de junio-noviembre de 2006 en la estación meteorológica de la Barranca Montegrande (2,600 msnm). Septiembre fue el mes mas lluvioso con un total de precipitación de 538.6 mm (Universidad de Colima, 2009).

En 2007, 2008 y 2009 continuó la formación de lahares en la ladera sur y suroeste del volcán. Sin embargo, el volumen de material removilizado fue menor que en los años anteriores, debido a que hubo menos material que en los años con presencia de flujos piroclásticos (Fig. 12).



Actualmente la actividad del Volcán de Colima se caracteriza por presentar emisiones de ceniza y vapor de agua, y caída de bloques ocasionados por el crecimiento de un domo en el cráter que inició su formación durante el 2007 con una tasa de emisión de  $0.0045 \text{ m}^3/\text{s}$ ; se incrementó el volumen de  $15,000 \text{ m}^3$  en febrero a  $110,000 \text{ m}^3$  en septiembre (Fig. 13) (Universidad de Colima, 2007; Varley com. per, 2007).

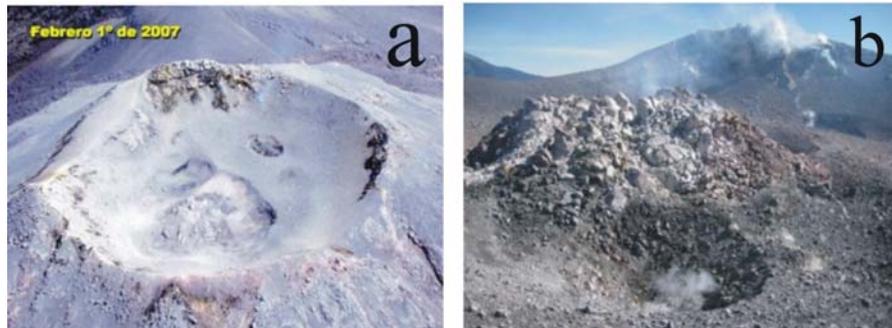


Fig. 13. Domo del Volcán de Colima, a: Vista aérea del cráter, 1 de febrero 2007. Protección Civil Jalisco y Observatorio Vulcanológico, Universidad de Colima, 2008. b: acercamiento del domo dentro del cráter, octubre 2007.

En 2008, el domo continuó creciendo con emisiones de ceniza y actividad sísmica. En marzo se presentaron derrumbes de material incandescente en la ladera SW del volcán y columnas de ceniza de 1 km de alto.

Las observaciones de agosto y noviembre de 2008 mostraron un incremento en el volumen del domo que alcanzó a cubrir el 50% del cráter con un volumen de  $1.2 \times 10^6 \text{ m}^3$  y presentó una tasa de emisión de  $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$  (Fig.14) (Gobierno del Estado de Colima, 2008).

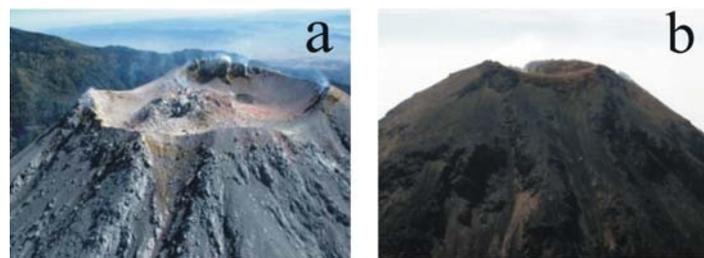


Fig. 14. Domo del Volcán de Colima a: 8 de marzo y b: 21 de noviembre de 2008 Protección Civil Jalisco y Observatorio Vulcanológico de Colima.

El domo continuó creciendo durante 2009, en marzo cubrió 80% del cráter con un volumen de  $1.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ . A finales del 2009 la tasa de emisión fue calculada en  $0.02 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Varley, 2009) y las dimensiones del domo en el mes de noviembre fueron de 260 y 270 m de diámetro y de 45 a 50 m de alto, con un volumen aproximado de  $2 \times 10^6 \text{ m}^3$  (Fig. 15).

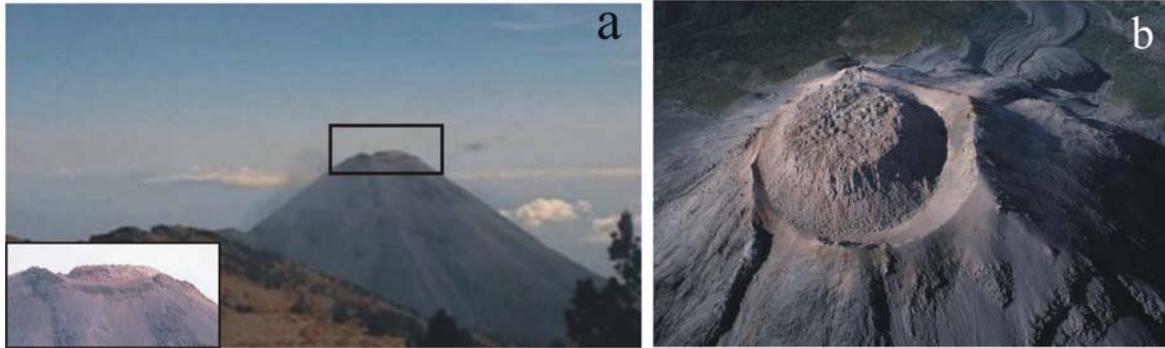


Fig. 15 Domo del Volcán de Colima a: 25 de marzo y b: noviembre de 2009, Observatorio

El crecimiento del domo esta generando caída de mega bloques por el flanco SW (Barranca La Lumbre) lo que representa incremento en el material que puede ser removilizado y transportado para formar lahares y llegar hasta las zonas habitadas (Fig. 16).



Fig. 16. Vista del domo sector W, desprendimiento de bloques hacia la Barranca La Lumbre Fotos comparativas 3 y 10 de diciembre 2010 (Foto donada por José Manuel Álvarez Nieves).

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS TEMPORAL Y TEXTURAL

Se identificaron, mediante la comparación de secciones tipo los cambios originados por procesos de erosión y depósito en las Barrancas de la ladera SW. En la Barranca La Lumbre, la estación alta (BLa) presentó erosión lateral, la estación media (BLb) presentó procesos de erosión de las terrazas de lahares anteriores y depósitos en las orillas del cauce. La estación baja (BLc) presentó erosión, depósito de lahares y modificaciones por obras civiles (Fig. 17).

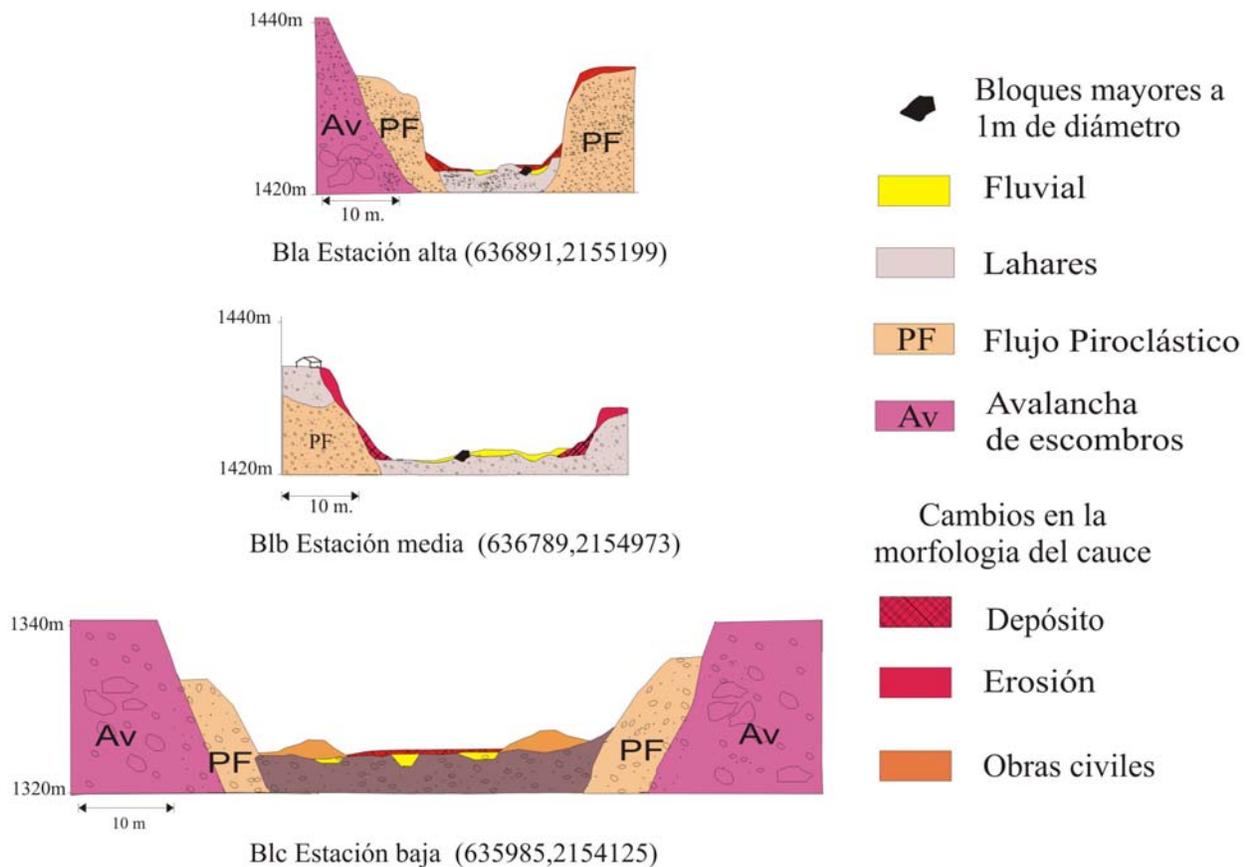


Fig. 17. Secciones comparativas trazadas en la parte alta, media y baja del Río La Lumbre

En la Figura 18 se identificó la erosión lateral que generaron los lahares a su paso, lo cual, debilitó las paredes de la barranca y formó deslizamientos en la estación media de la Barranca La Lumbre (BLb). De abril a diciembre de 2008 el derrumbe dejó al descubierto los cimientos de la casa y en noviembre de 2009 el derrumbe continuó afectando la vivienda.



Fig. 18. Cambios identificados durante las campañas en la estación media de la Barranca La Lumbre (BLb), derrumbe que afectó los cimientos de una vivienda. a: abril 2008 marca de medición en la base de una barda, b: diciembre 2008 afectaciones en la base de la barda, c: febrero 2009 colapso del muro y la marca de medición d: diciembre 2008 deslizamiento visto desde la base del río e: febrero 2009 removilización del material del deslizamiento por lahares, el círculo rojo muestra los escombros de un muro.

En la estación baja del Río La Lumbre (BLc) se identificaron cambios de erosión y depósito en el puente vehicular que comunica a Comala con San José del Carmen. Se identificó un cambio en el nivel base del cauce de un metro aproximadamente, entre 2006 y 2008. En el primer pilar del puente La Lumbre se encontraron bloques mayores a 50 cm de diámetro. Previo a la temporada de lluvias (mayo), las autoridades municipales y estatales realizaron trabajos de remoción de escombros, limpiaron los depósitos del centro del cauce y formaron defensas en las partes laterales; por esta razón durante julio de 2008, los cambios en la morfología del río fueron

mayores y quedó oculta la marca establecida en el primer pilar (2.33m de la base del río). Durante el periodo de lluvias el material compactado que se utilizó como barrera fue erosionado e incorporado en la corriente del río y a los lahares, por lo que dejó al descubierto parte de la estructura del puente (Fig. 19).



Fig. 19. Cambios en el primer pilar del puente La Lumbre a: enero de 2006; b: abril de 2008; c: julio 2008 y d: noviembre 2009.

En el segundo pilar del puente La Lumbre los cambios fueron menores; en el mes de julio se realizaron obras de limpieza en el cauce del río para retirar el material de los lahares; sin embargo, durante la temporada de lluvias los lahares acumularon 60 cm de material en la parte baja del cauce (Fig. 20).

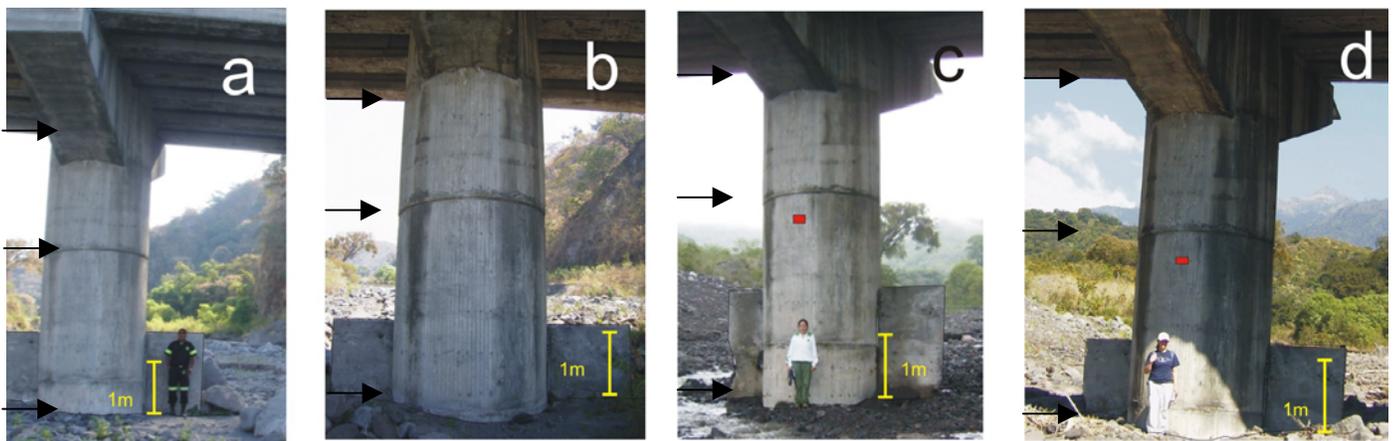


Fig. 20. Cambios en el segundo pilar del puente La Lumbre, a: enero 2006; b: abril de 2008; c: julio de 2008 y d: diciembre de 2008.

El tercer pilar del puente presentó menos cambios de acumulación y depósito durante el 2008, ya que se conservó la vegetación a su alrededor; sin embargo durante el 2009 hubo un depósito fluvial de 23cm. (Fig. 21).

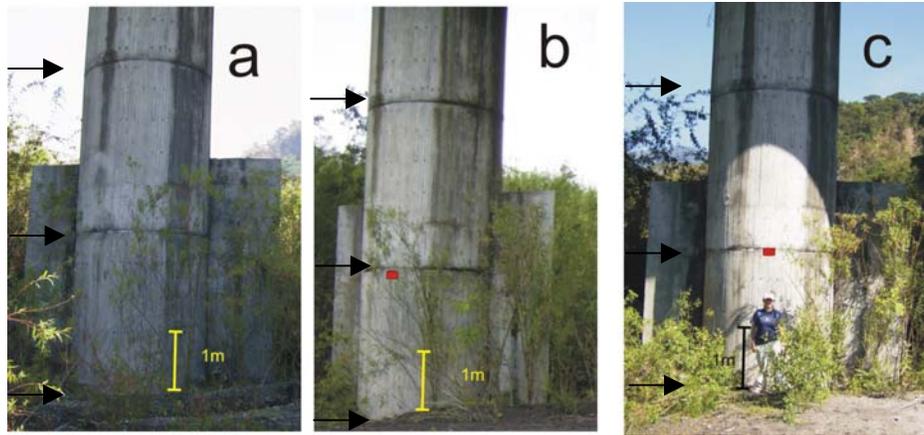


Fig. 21. Cambios en el tercer pilar del puente La Lumbre a: abril 2008, la marca se estableció a una altura de 2.33 m b: julio 2008; c: diciembre 2008.

En la estación alta del Río El Zarco (BZa) los cambios correspondieron a derrumbes ocasionados por la inestabilidad en las paredes de los depósitos anteriores y erosión de las terrazas. En la estación media de la barranca (BZb), los cambios fueron mayores; después de la temporada de lluvias, se identificó movimiento de bloques menores a 2m de diámetro y la formación de una terraza de 74 cm, generada por derrumbes y por acumulación de lahares (Fig. 22, Fig. 23). En la estación baja (BZc) no se presentaron cambios.

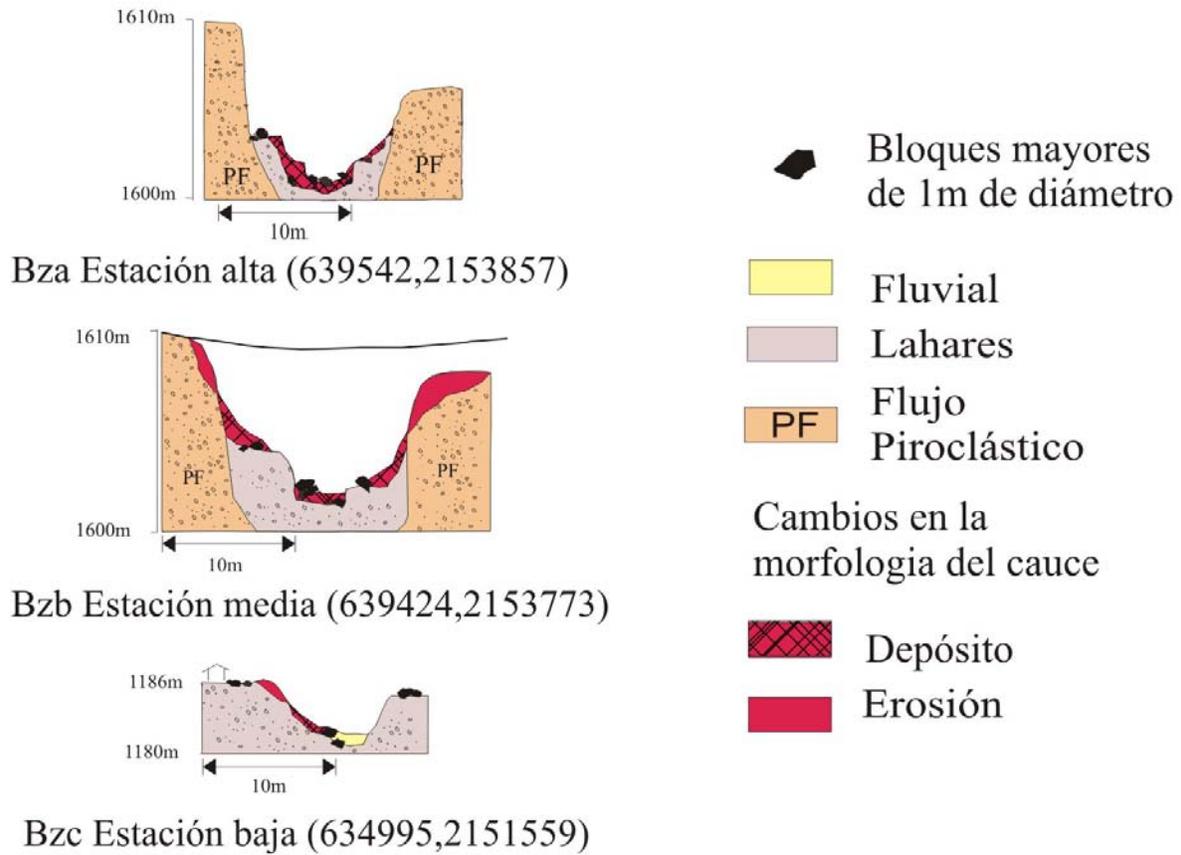


Figura 22. Secciones comparativas trazadas en la parte alta, media y baja del Río El Zarco



Fig. 23. Cambios identificados en la estación media de la Barranca El Zarco durante los meses de a: abril 2008; b: julio 2008 y c: diciembre 2008.

En la estación alta del Río El Cordobán (BCa) no se presentaron cambios. En la estación media la terraza aumento un metro y en la estación baja tampoco se registraron cambios, lo que significa que el material se depositó antes de llegar al puente vehicular y formo nuevas terrazas, material que puede ser removilizado de forma posterior (Fig. 24).

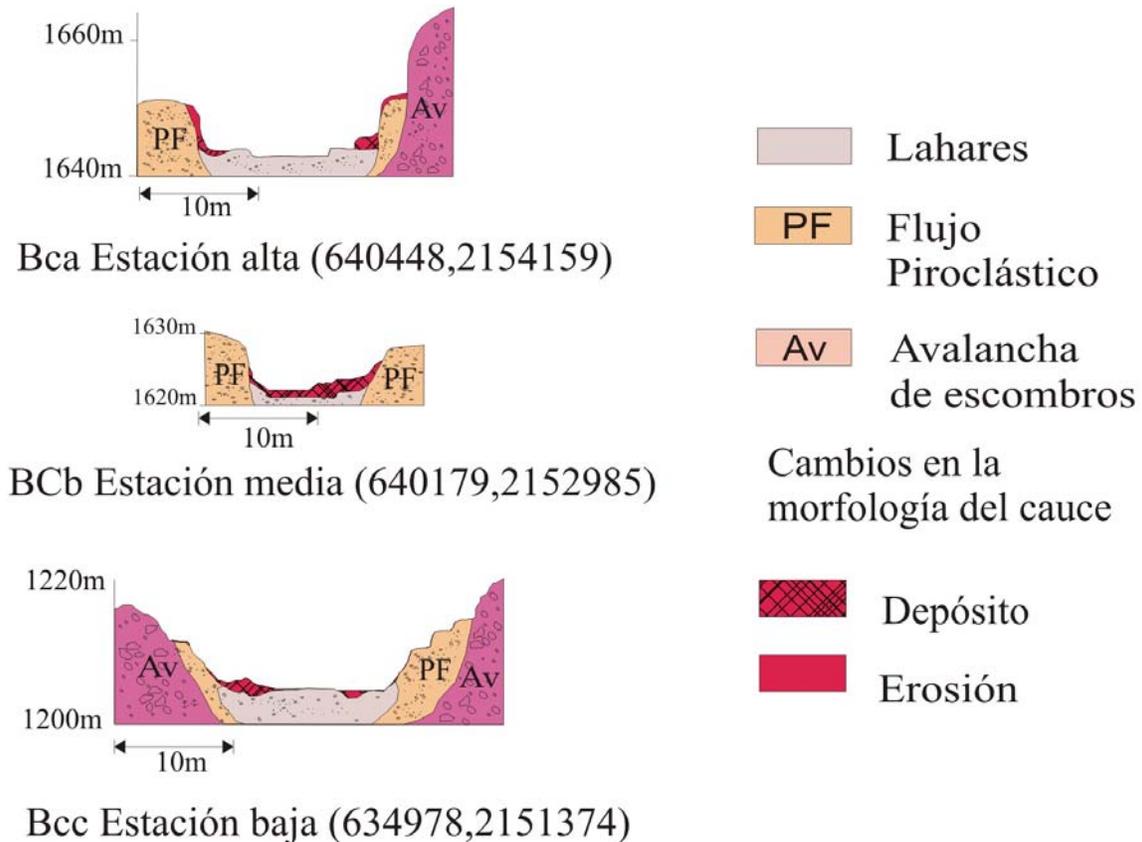


Fig. 24. Secciones comparativas trazadas en la parte alta, media y baja del Río El Cordobán

El estudio comparativo a partir de las marcas establecidas y las secciones trazadas, permitió identificar los cambios morfológicos, en cuanto a depósito y erosión, que se generó por diferentes lahares que ocurrieron en las Barrancas La Lumbre, El Zarco y El Cordobán durante 2008 y 2009. De acuerdo con las variaciones en las medidas de campo de la Barranca La Lumbre, en la estación BLa se erosionó 0.82 m, en la estación BLb se depositó 1.20 m y en la estación BLc se depositaron 0.59 m, lo que representa que en la parte alta de la Barranca se encuentra material poco consolidado que se removilizó y se depositó en la parte media y baja del Río La Lumbre.

En la Barranca El Zarco, en la estación BZa se erosionó 1.10 m, en la estación BZb se depositó 0.74 m de escombros y en la estación BZc se depositó 0.03m. La Barranca el Cordobán no presentó cambios en la estación BCa, en la estación BCb las terrazas existentes se erosionaron 0.60 m y en la estación BCc tampoco se registraron cambios (Tabla 6).

Tabla 6. Resultados de las estaciones de medición							
Estaciones de medición		2008				2009	
		abril	julio	diciembre	Resultados	diciembre	Resultados
Barranca Lumbre BL	a Alta	3.18 m		4.00 m	-0.82 m	2.40 m	+1.60 m
	b Media	10.50 m		9.30 m	+1.20 m		
	c Baja	2.33 m	3.15 m	2.56 m	+0.59 m	2.61 m	-0.05 m
Barranca Zarco BZ	a Alta	3.00 m	3.20 m	4.10 m	-1.10 m		
	b Media	3.04 m	2.55 m	2.30 m	+0.74 m	2.40 m	-0.10 m
	c Baja	1.50 m		1.49 m	+0.01m	1.46 m	+0.03 m
Barranca Cordobán BC	a Alta		2.00 m	2.00 m	0.00 m		
	b Media		1.00 m	1.60 m	-0.60 m		
	c Baja	2.10 m	2.10 m	2.10 m	0.00 m	2.10 m	0.00 m

Los resultados representan: (-) erosión y (+) deposito de escombros

Los resultados obtenidos a partir del trabajo de campo y análisis granulométrico, permitieron identificar y diferenciar los depósitos de lahares en la ladera SW del Volcán de Colima, a partir de lo cual se especifica que corresponden a flujos hiperconcentrados, flujos de escombros y depósitos fluviales. En la parte alta y media se identificaron depósitos de flujos de escombros e hiperconcentrados y en la parte baja predominan los depósitos fluviales (Tabla 7).

Los lahares de las barrancas La Lumbre, El Zarco y el Cordobán son masivos, por lo que se dificulta distinguir las diferentes unidades mas recientes. Los depósitos tienen clastos de andesita gris con fenocristales de plagioclasa y piroxeno y escoria (obscura, subangulosos y subredondeados). Los bloques tienen diámetros que varían de 10 cm a >1 m soportados por una matriz fina que representa el 40% de los depósitos. También se midieron bloques de 2 y 3m de diámetro en las estaciones medias, presentan una textura fanerítica con fenocristales de plagioclasa y piroxeno.

Tabla 7. Lahares de la ladera SW del Volcán de Colima

	La Lumbre	El Zarco	El Cordobán	El Playón
Características de los clastos	Bloques de lavas grises 10-15% de fenocristales plagioclasa y piroxenos Bloques de escoria oscura	Bloques de lavas grises 10 – 15% de fenocristales plagioclasas y piroxeno	Bloques de lavas grises 10-15% de fenocristales plagioclasas y piroxeno	Bloques de lavas grises 10 – 15% fenocristales plagioclasa y piroxeno  Pómez densa poco porosa de color café claro con piroxeno abundante
Forma de los clastos	Subredondeados	Angulosos y subredondeados	Subredondeados	Subangulosos
Tipo de matriz	Arenosa arcillosa	Arenosa arcillosa	Arenosa arcillosa	Arenosa
Arena	97%	97%	97.7%	
Arcilla	2%	2.3%	2.9%	
% de matriz en el depósito	40%	40%	30%	40%
Tipo de flujo	Flujo de escombros	Flujo de escombros	Flujo de escombros	Flujo de escombros
Origen	Removilización de flujos piroclásticos y lahares	Removilización de flujos piroclásticos y lahares	Removilización de flujos piroclásticos y lahares	Removilización de flujos piroclásticos
Imagen del depósito				

En el transcurso del cauce los lahares presentan cambios en su textura, integran agua y sedimento a su paso. En general, la matriz está compuesta en su mayoría por arena y en menor porcentaje de partículas finas. Los histogramas de frecuencia muestran una distribución unimodal y bimodal.

El análisis granulométrico muestra que la matriz de los lahares analizados tiene una textura de  $-5\ \phi$  a  $>4\ \phi$ . Las muestras de la estación baja de El Cordobán (BCc\_0209), tienden al grano medio, al igual que las estaciones medias de El Zarco (BZb\_1208) y La Lumbre (BLb\_1109) Tabla 8.

Tabla 8. Clasificación granulométrica

Muestra	coordenadas		Altitud	% matriz		
	X	y		grava	arena	limo-arcilla
BC_1208	636890	2155015	1550	49.62	47.45	2.93
BCa_1209	640491	2154185	1750	32.86	61.8	5.34
BCb_1209	640512	2153594	1680	44.1	54.87	1.03
BCc_0209	634971	2151371	1180	14.59	78.07	7.34
BZa_1208	639798	2153791	1780	56.7	40.92	2.38
BZa_1209	640350	2154707	1780	26.52	69.99	3.49
BZb_1209	639417	2153759	1620	41.28	56.96	1.76
BZb_1208	640510	2153069	1630	29.34	68.43	2.23
BZc_1109	635008	2151555	1180	43.67	55.5	0.83
BLa_1109	638243	2155871	1560	40.25	56.41	3.34
BLb_1109	638250	2155609	1600	31.28	67.12	1.6
BLb_1109	637106	2155216	1420	32.84	63.98	3.18
BLc_1109	635978	2154119	1320	35.04	63.33	1.63
BLc_1109	633837	2151267	1100	36.18	61.03	2.79

Los depósitos de las estaciones altas de las barrancas (BLa, BZa y BCa) presentan una matriz de finos con una distribución bimodal, característica de los flujos de escombros al igual que en las estaciones medias (BLb, BZc y BCc) y en las estaciones bajas (BLc, BZc y BCc) los depósitos contienen mayor porcentaje de matriz fina, con una distribución unimodal, lo que significa que en las estaciones bajas los lahares tienden a transformarse en flujos hiperconcentrados y fluviales (Fig 25).

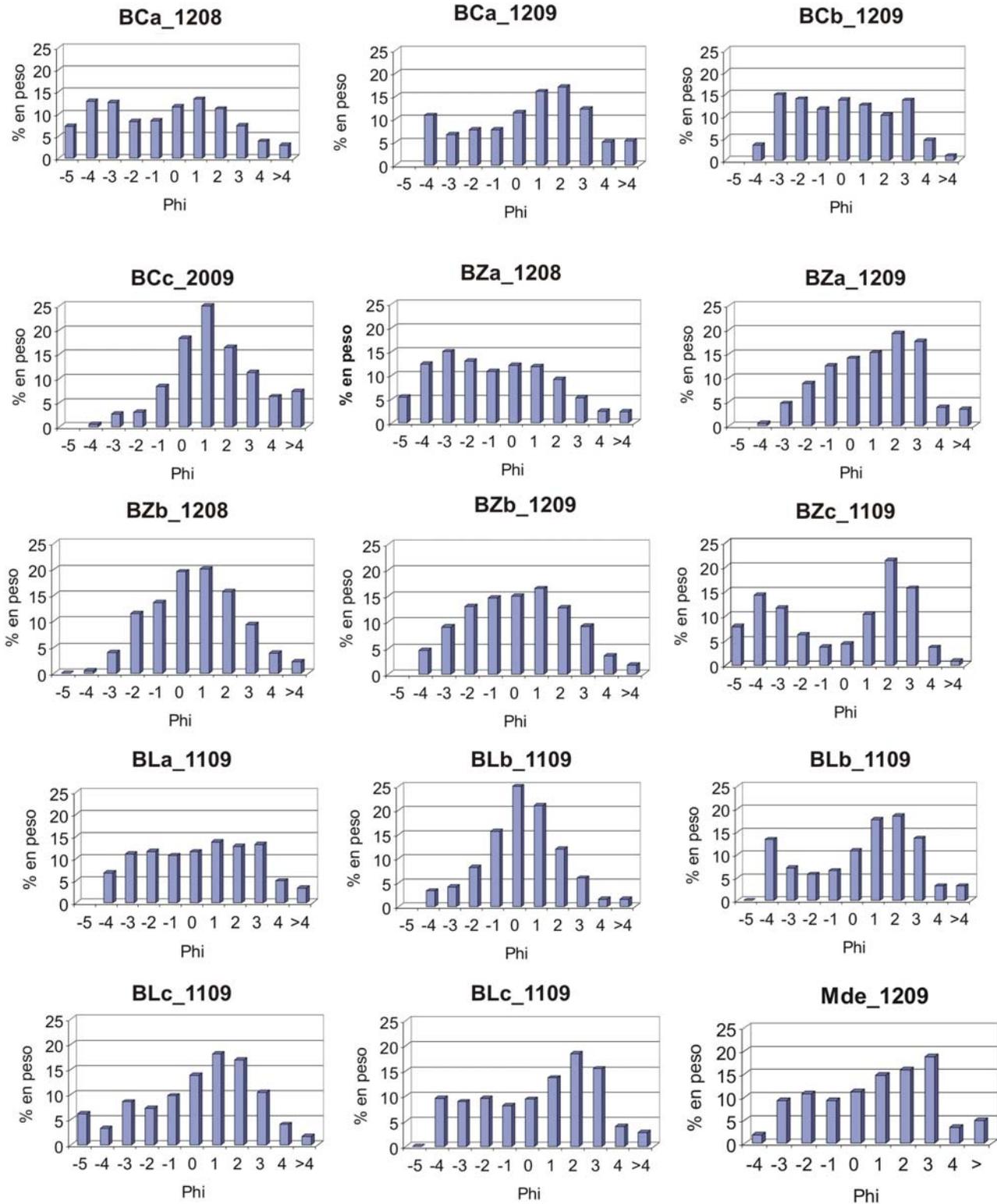


Figura 25. Clasificación granulométrica de acuerdo al porcentaje de peso y tamaño de grano.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LA SIMULACION DE LAHARES

Se realizaron simulaciones con los programas TITAN2D y LAHARZ, para obtener escenarios de afectación por lahares secundarios en la ladera SW del Volcán de Colima. Como se mencionó en el capítulo de metodología, los resultados de las simulaciones se validaron con la información de campo.

Los lahares secundarios están relacionados con la removilización de material piroclástico durante la temporada de lluvias y se simularon con tres volúmenes diferentes, Se utilizó un volumen de  $4 \times 10^5 \text{ m}^3$  para los lahares pequeños, que corresponde al volumen de los lahares ocurridos en 2008 y 2009 en las Barrancas El Zarco ( $1 \times 10^5 \text{ m}^3$ ), El Cordobán ( $0.9 \times 10^5 \text{ m}^3$ ) y La Lumbre ( $2 \times 10^5 \text{ m}^3$ ), volumen que se calculó a partir de depósitos medidos en campo y fotointerpretación (Fotografías aéreas). También se realizó una simulación con un volumen de  $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ , que corresponde con los flujos piroclásticos que originaron el lahar de 2005 (Dávila et, al 2007) y con un volumen de  $3.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ , que corresponde al lahar de 2000 que afectó a La Becerrera (Gavilanes, 2004). Todos los volúmenes de las simulaciones se consideraron a partir del depósito mas 40% de agua, por ser considerados flujos de escombros.

### 5.1. LAHARZ

Las simulaciones en LAHARZ se realizaron sobre un Modelo Digital de Elevación de 5 m de resolución, debido a que la resolución de la base topográfica es fundamental para determinar los límites de inundación. La línea de energía se utilizó con un gradiente de  $H/L = 0.35$  para todos los lahares chicos y medianos en las Barrancas La Lumbre, El Zarco y El Cordobán, debido a que los depósitos más cercanos, se identificaron a 5 km del cráter.

Los resultados de las simulaciones de LAHARZ muestran que los lahares secundarios con un volumen de  $4 \times 10^5 \text{ m}^3$  (temporada de lluvias de 2008 y 2009) en las tres Barrancas estudiadas, llegaron a 12 km a partir del cráter (Fig. 26). Estos lahares afectaron una casa y rellenaron parcialmente la base del puente.

Los lahares simulados con un volumen de  $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ , llegaron a una distancia de entre 12 y 15 km y afectaron a los puentes y a la carretera que comunica los estados de Colima y Jalisco, como ocurrió en la temporada de lluvias de 2005 y 2006 (Fig. 27). Con un volumen de  $3.1 \times 10^6 \text{ m}^3$  los lahares alcanzaron 17.5 km a partir del cráter. En este caso, afectaron a la carretera que comunica a Comala, Colima con San José del Carmen Jalisco; los puentes y la comunidad La Becerrera, como sucedió en el 2000 (Fig. 28).

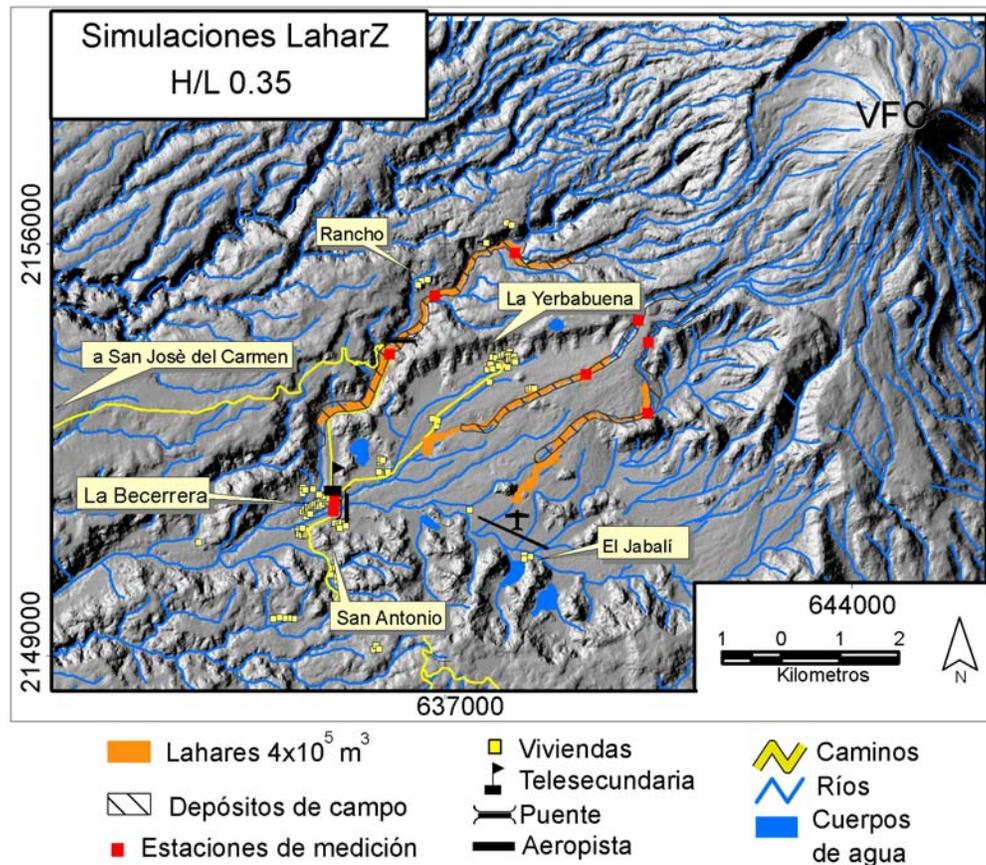


Fig. 26 Simulación de Lahares Secundarios con un volumen total de  $4 \times 10^5 \text{ m}^3$  por las Barrancas La Lumbre, El Zarco y el Cordobán en la ladera SW del volcán de Colima, ocurridos durante la temporada de lluvias de los años 2008 y 2009.

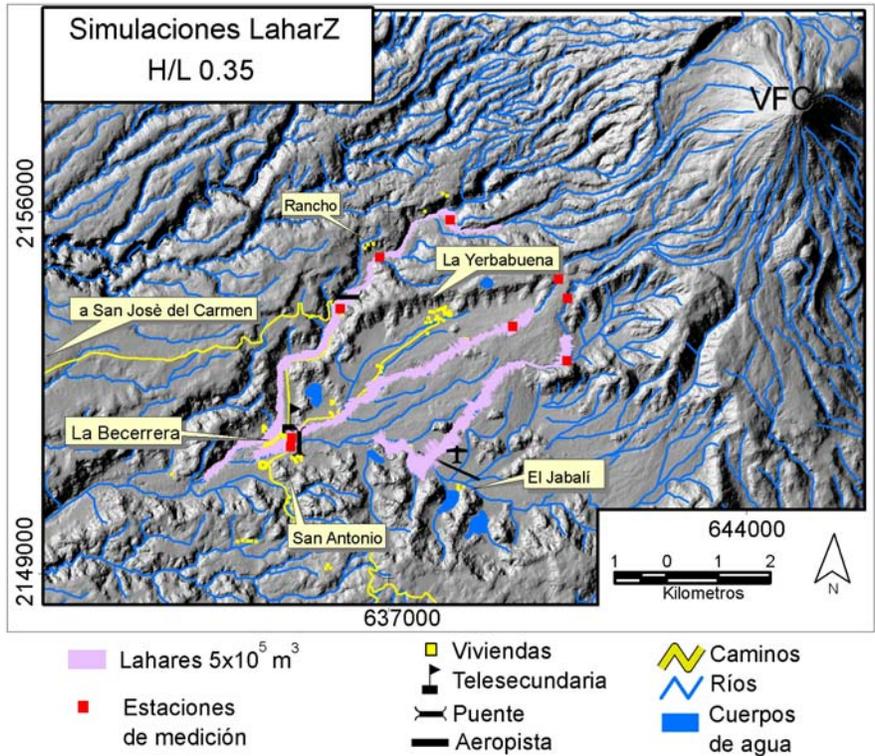


Fig. 27 Simulación de Lahares Secundarios con un volumen de  $5 \times 10^5 \text{ m}^3$  por las Barrancas La Lumbre, El Zarco y el Cordobán en la ladera SW del volcán de Colima, ocurridos durante la temporada de lluvias de los años 2005 y 2006.

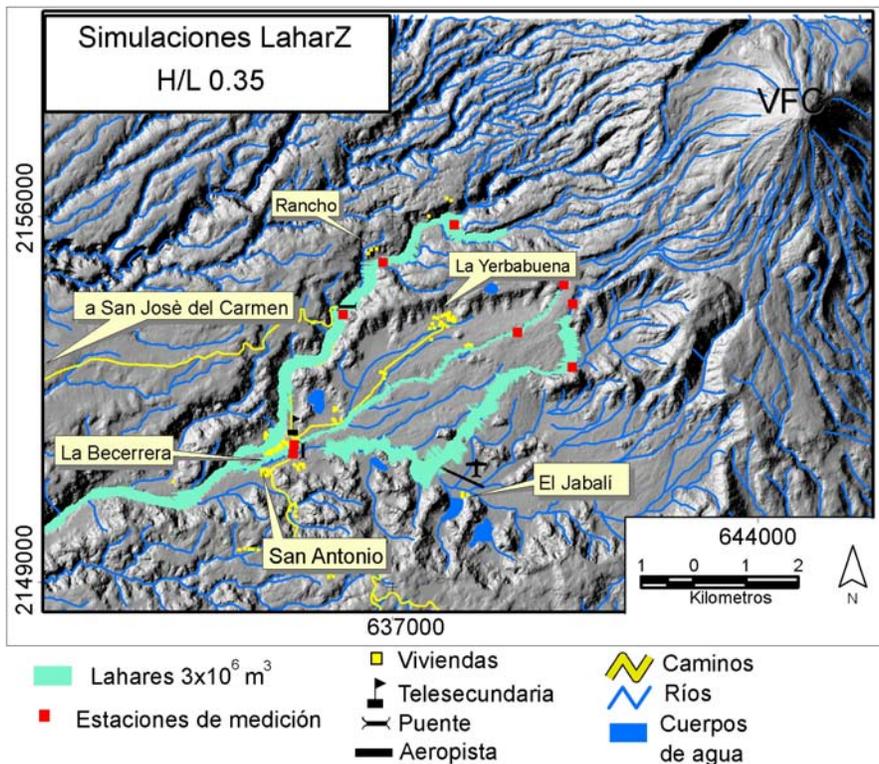


Fig. 28. Simulación de Lahares Secundarios con un volumen de  $3.1 \times 10^6 \text{ m}^3$  en las Barrancas La Lumbre, El Zarco y el Cordobán en la ladera SW del volcán de Colima, ocurridos en el año 2000.

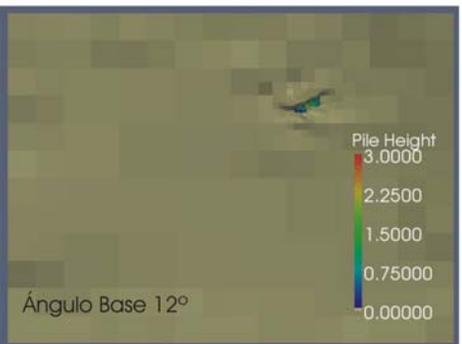
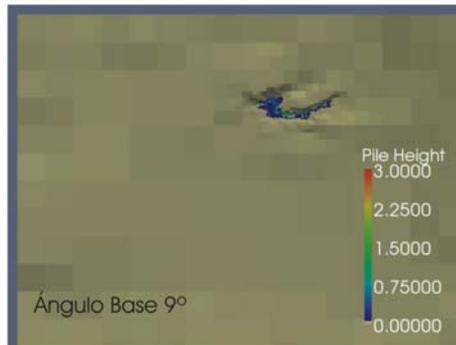
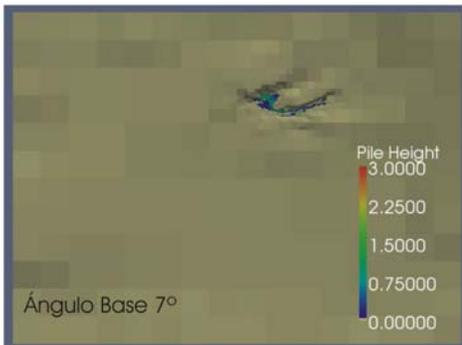
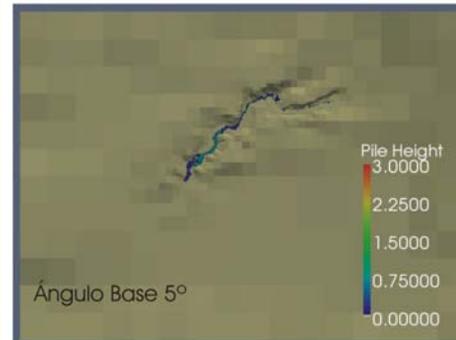
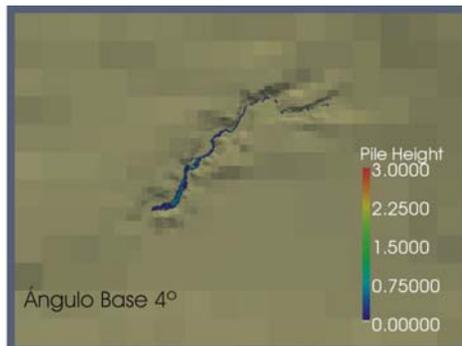
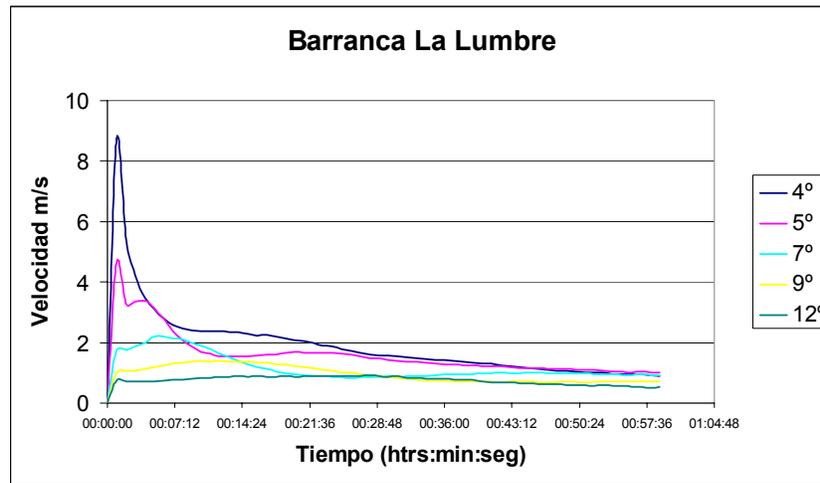
## 5.2. TITAN2D

Los resultados de las simulaciones con TITAN2D se visualizaron mediante el programa ParaView, y se identificaron las zonas de inundación sobre el modelo digital del terreno. Debido a que la resolución de la base topográfica es importante para definir las zonas de inundación para los lahares secundarios, se utilizó un DEM con 5 m de resolución. Las simulaciones respetan los límites del cauce en la Barranca La Lumbre, donde la profundidad es mayor a 5 m y desborda en las Barrancas El Cordobán y El Zarco, en los lugares que el cauce es menos profundo.

Las simulaciones se realizaron con un ángulo de fricción interna de  $25^\circ$  para los lahares secundarios de 2000, 2005 y 2008, que corresponde al ángulo de reposo de arenas húmedas. El ángulo de fricción base representa las fuerzas de resistencia entre la pila y la base, por lo tanto controla la velocidad y el alcance del lahar. Algunos autores como Murcia et al. (2008) realizaron simulaciones de lahares con el programa Titan2D y utilizaron un ángulo de fricción interno de  $34^\circ$  y un ángulo de fricción base entre  $4^\circ$  y  $10^\circ$ , para un flujo de escombros no cohesivo en las laderas del Volcán Cerro Machin en Colombia. Por su parte, Procter et al. (2010) realizaron un estudio de peligro por lahares con base en el programa Titan2D en un abanico aluvial del río Whangaehu en el Volcán Mt. Ruapehu de Nueva Zelanda y utilizaron ángulos de fricción interna de  $30^\circ$  y  $35^\circ$  y un ángulo de fricción de base entre  $9^\circ$  y  $12^\circ$ .

En el presente trabajo se realizaron diferentes simulaciones variando el ángulo de fricción base con valores de entre  $3^\circ$  y  $12^\circ$  como los utilizados por Murcia et al. (2008) y Procter et al. (2010) y considerando las variaciones de la pendiente identificadas en campo para cada barranca. Los resultados numéricos de las simulaciones con Titan2D mostraron que la velocidad y distribución de los lahares varía al modificar el ángulo de fricción base. Con un ángulo de fricción base de  $3^\circ$  el flujo presentó un máximo de velocidad de 15 a 20 m/s que no corresponde con los datos de campo y supero las barreras topográficas, por otra parte con ángulos de fricción base altos de  $10^\circ$  y  $12^\circ$  el flujo avanzó 100 m en una hora con velocidades menores de 1m/s, valores inferiores a la velocidad de los lahares secundarios. Los resultados se validaron con los obtenidos en campo y el mejor ajuste con respecto a los depósitos que se identificaron en campo se obtuvieron con ángulos de  $4^\circ$  para La Lumbre y  $7^\circ$  para El Zarco y El Cordobán. En la Barranca La Lumbre, con un ángulo base de  $4^\circ$  la velocidad del flujo fue de 5 – 1 m/s y el alcance de 10 km en 37 minutos (Fig. 29). En la Barranca El Cordobán con un ángulo de  $7^\circ$  la velocidad fue de 7.2 - 1 m/s y llegó

a 7.7 km en 17 minutos (Fig. 30). En la Barranca El Zarco con un ángulo base de 7° la velocidad fue de 1 a 5.3 m/s y llegó a 8 km en 19 minutos (Fig. 31).



### Simulaciones

Barranca La Lumbre  
 Volumen: 1x10 m  
 Ángulo de Fricción Interno 25°

Fig. 29 Gráfica de velocidad y Simulaciones Barranca La Lumbre

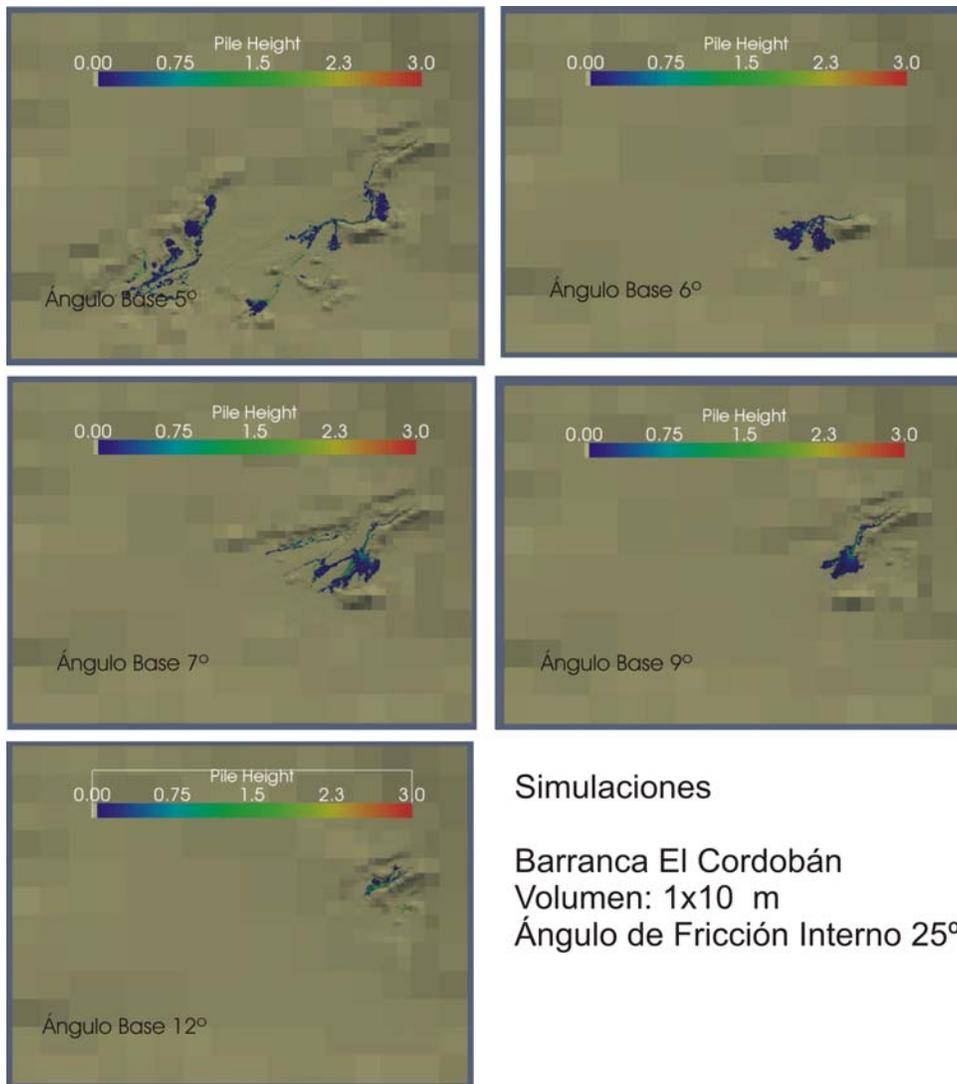
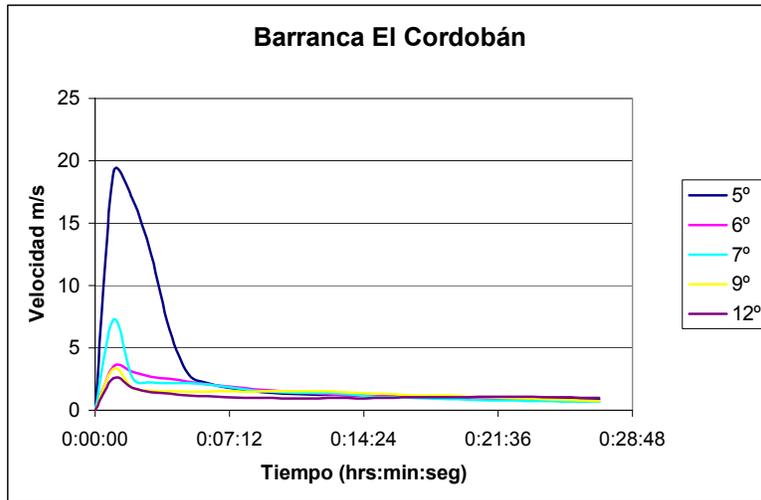
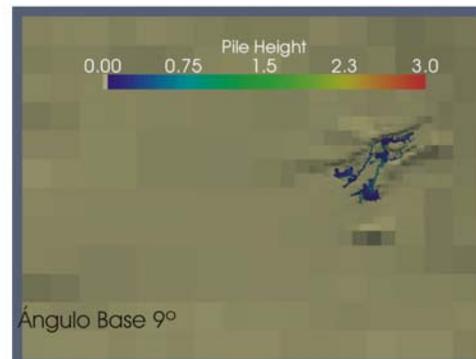
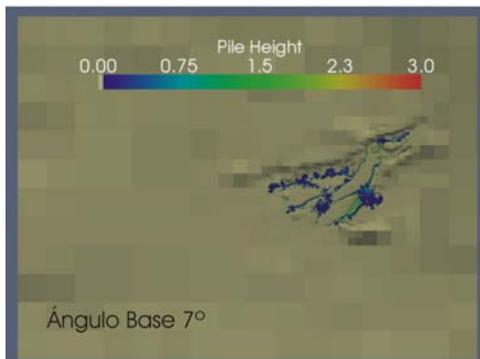
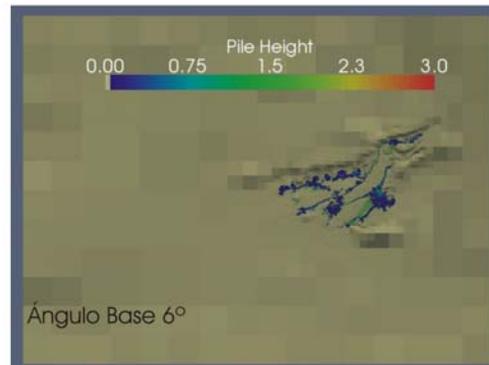
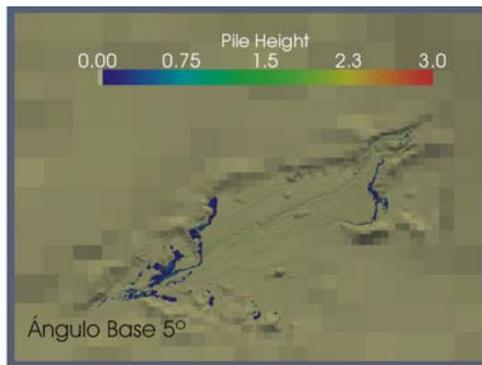
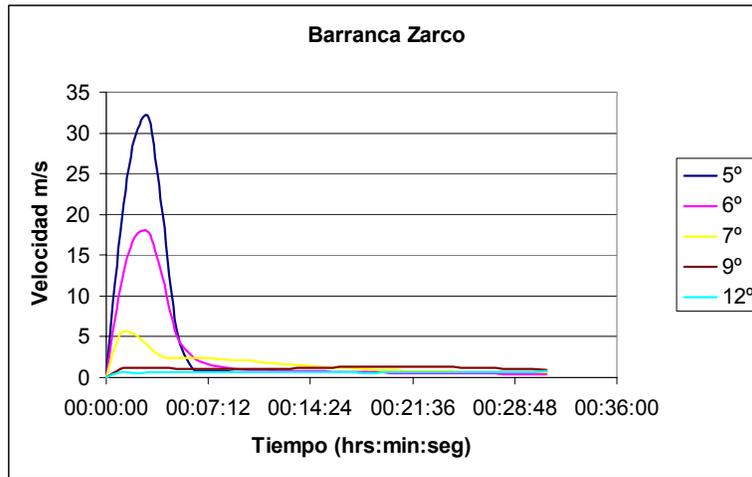


Fig. 30 Gráfica de velocidad y Simulaciones Barranca El Cordobán



### Simulaciones

Barranca El Zarco  
 Volumen: 1x10 m  
 Ángulo de Fricción Interno 25°

Fig. 31 Gráfica de velocidad y Simulaciones Barranca El Zarco.

La velocidad promedio de los lahares en el Volcán de Colima se midió a partir del alcance de los depósitos y el tiempo que tardó el registro sísmico en las estaciones de monitoreo volcánico cercanas a las barrancas. Los lahares secundarios de 2006 en el Volcán de Colima presentaron una velocidad de 10 m/s con un alcance de 8 a 12 km a partir del cráter (Zobin et al., 2008). Estos parámetros se utilizaron para validar los resultados de las simulaciones. Los límites que se consideraron para las simulaciones de Titan2D fueron una velocidad mínima de 1 m/s y un tiempo máximo de 2 horas (7,200 seg), debido a que una velocidad menor a 1 m/s es muy baja para un lahar y el tiempo de dos horas es el tiempo máximo que ha registrado una señal sísmica relacionada con la ocurrencia de lahares secundarios en el Volcán de Colima.

Se graficó la velocidad de los lahares con respecto al tiempo, a partir de los resultados numéricos del programa Titan2D. Como se observa en las gráficas de la Fig. 32, la velocidad más elevada se presenta al inicio del lahar y disminuye gradualmente con el paso del tiempo. Para definir el punto donde el lahar deja de fluir se graficó la velocidad y se consideró el punto en el que la velocidad disminuye y es constante.

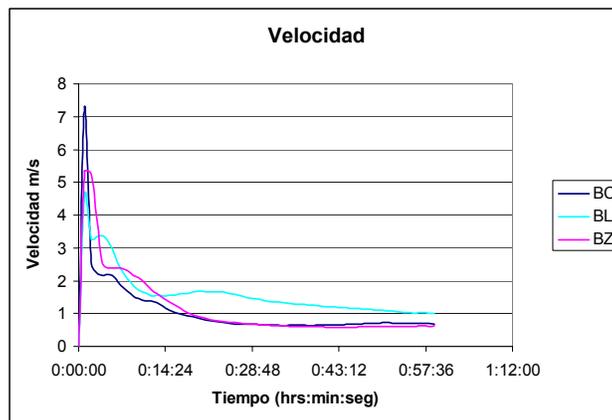


Fig. 32. Gráficas de velocidad de las simulaciones de lahares Barranca La Lumbre (BL) con ángulo base de 5°, Barranca El Cordobán (BC) y Barranca El Zarco (BZ) con ángulo base de 7°.

En la Barranca La Lumbre el máximo de velocidad registrada fue 4.6 m/s y disminuyó hasta 1 m/s. En la Barranca El Cordobán el máximo de velocidad fue de 7.2 m/s y descendió hasta llegar a 0.6 m/s y en la Barranca El Zarco la máxima velocidad fue de 5.3 m/s. Las distintas velocidades se atribuyen a las diferencias de pendiente en el terreno, debido a que la Barranca El Zarco presenta una pendiente promedio de 10°, la Barranca La Lumbre tiene una pendiente de 7° y El Cordobán de 9°. A partir de los ajustes en el ángulo de fricción base, se realizaron las simulaciones de lahares con diferente volumen y parámetros de entrada (Tabla. 9).

Tabla 9. Parámetros de entrada para simulaciones de lahares con TITAN2D

Datos de entrada								Resultados			
Simulación	Barranca	volumen m <sup>3</sup>	dimensiones del depósito inicial			Ángulo de fricción interno	Ángulo de base	Tiempo	Velocidad		Distancia (m)
			alto	diámetro mayor	diámetro menor				máx	min	
BL_base3	BL	2x10 <sup>5</sup>	15	100	85	25	3	00:43:12	20.0	2.0	13650
BLfricc25_base4	BL	2x10 <sup>5</sup>	15	100	85	25	4	00:59:00	8.6	1.0	13100
BL_base5	BL	2x10 <sup>5</sup>	15	100	85	25	5	00:57:36	4.6	1.0	11090
BC_base6	BC	1x10 <sup>5</sup>	8	100	80	25	6	00:28:00	4.2	1.0	9200
BCfricc25_base7	BC	1x10 <sup>5</sup>	8	100	80	25	7	00:17:00	7.2	1.0	9100
BC_base8	BC	1x10 <sup>5</sup>	8	100	80	25	8	00:28:00	2.0	1.0	8100
BZ_base6	BZ	1x10 <sup>5</sup>	8	100	80	25	6	00:28:48	17.6	1.0	10450
BZfricc25_base7	BZ	1x10 <sup>5</sup>	8	100	80	25	7	00:19:00	5.3	1.0	10300
BZ_base8	BZ	1x10 <sup>5</sup>	15	100	80	25	8	00:28:48	1.0	0.8	8270
BL_5x105	BL	5x10 <sup>5</sup>	15	200	110	25	4	00:45:00	6.9	1.9	12,000
BZ_5x105	BZ	5x10 <sup>5</sup>	15	200	110	25	7	00:10:00	0.8	0.7	11,000
BC_5x105	BC	5x10 <sup>5</sup>	15	200	110	25	7	00:18:00	2.6	1.0	11,000
BL_3x106	BL	3x10 <sup>6</sup>	16	400	300	25	4	0:45:00	12.1	1.0	15,000
BZ_3x106	BZ	3x10 <sup>6</sup>	16	400	300	25	7	0:22:00	1.0	1.0	15,000
BC_3x106	BC	3x10 <sup>6</sup>	16	400	300	25	7	0:26:00	4.0	1.0	15,000

BL Barranca La Lumbre, BZ Barranca El Zarco, BC Barranca El Cordobán, A Armería.

Al variar el ángulo de fricción base se obtuvieron depósitos con diferente alcance, en la Barranca La Lumbre con ángulo de 3° la simulación presentó un alcance mayor al de campo, con 4° tuvo un alcance similar al depósito de campo y con 5° la simulación presentó un alcance menor al de campo, por lo tanto el mejor ajuste se obtuvo con 4°.

En la Barranca El Zarco con ángulo de 6° la simulación presentó un alcance mayor que el depósito de campo, con 7° la simulación tuvo el mismo alcance que en campo, pero desbordó en los puntos donde la barranca tiene menos de 5 m de alto, debido a la resolución del DEM y con 8° la simulación quedó mas corta que el depósito de campo. En la Barranca El Cordobán con ángulo de 6° la simulación desborda y supera el depósito de campo, con 7° la simulación desborda en algunos puntos y el alcance es menor que el depósito en campo y con 8° la simulación queda muy corta, por lo tanto el ángulo de base utilizado fue 7°.

Los resultados de las simulaciones con un volumen de 4x10<sup>5</sup> m<sup>3</sup> indican que los lahares llegaron a distancias de 13.1, 10.3 y 9.1 km en las Barrancas La Lumbre, El Zarco y El Cordobán, respectivamente. Sin embargo, las simulaciones en las Barrancas El Zarco y El Cordobán se desbordan y sobrepasan los límites de la barranca, debido a que hay diferentes puntos donde la profundidad del cauce es menor que la resolución del DEM utilizado (Fig. 33).

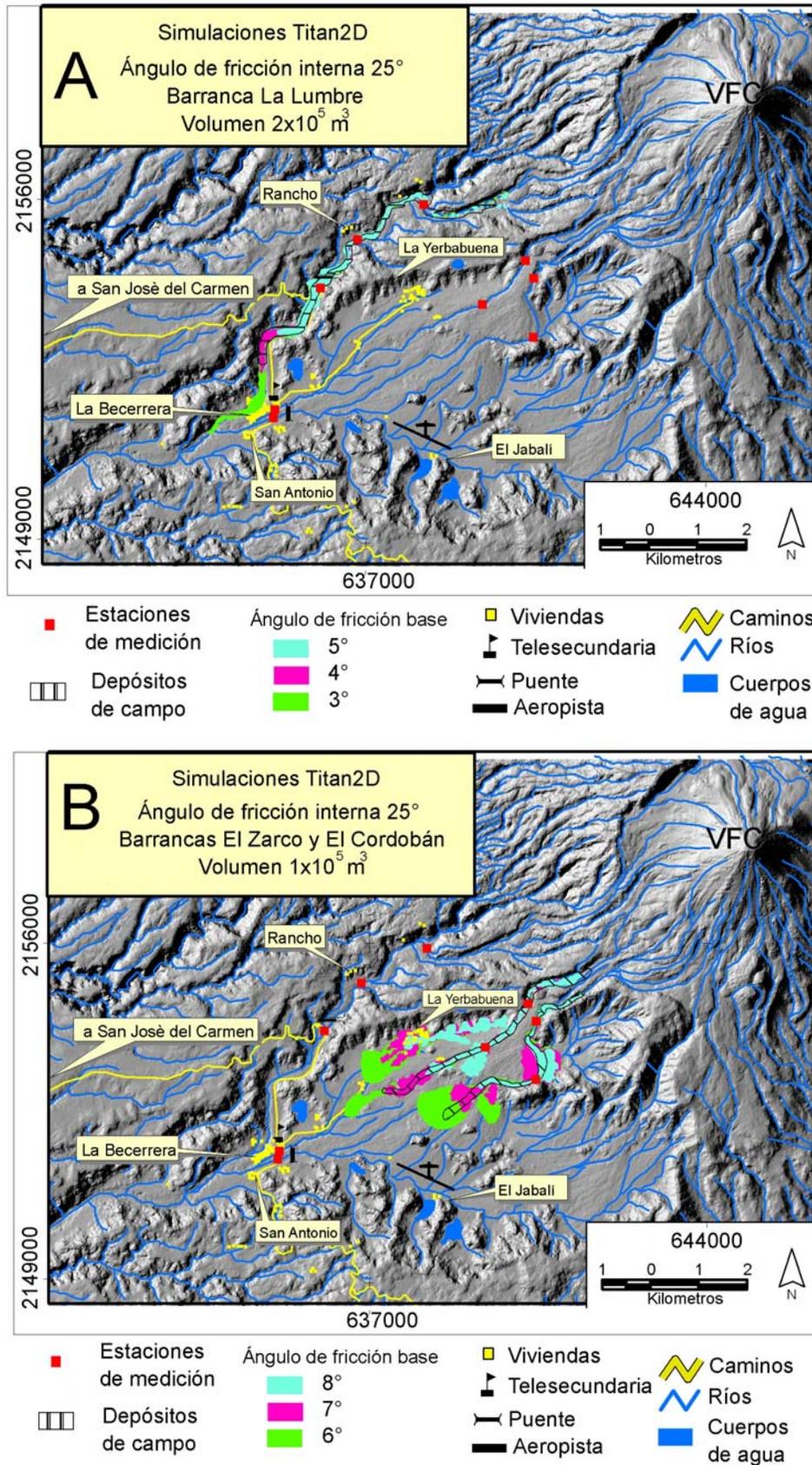


Fig. 33. Simulación con Titan2D de lahares secundarios en la ladera SW del Volcán de Colima  
 A: Barranca La Lumbre, volumen  $2 \times 10^5 \text{ m}^3$  B: Barrancas El Zarco y El Cordobán, volumen  $1 \times 10^5 \text{ m}^3$  en cada barranca.

Los resultados de las simulaciones de Titan2D con un volumen de  $3 \times 10^6 \text{ m}^3$  como los que ocurrieron en 2000 tienen un alcance mayor a 15 Km con afectaciones en las vías de comunicación y a la comunidad de La Becerrera, así como la infraestructura de El Jabalí y la Ex Hacienda San Antonio, debido a que el flujo se desborda en las barrancas El Zarco y El Cordobán (Fig. 34).

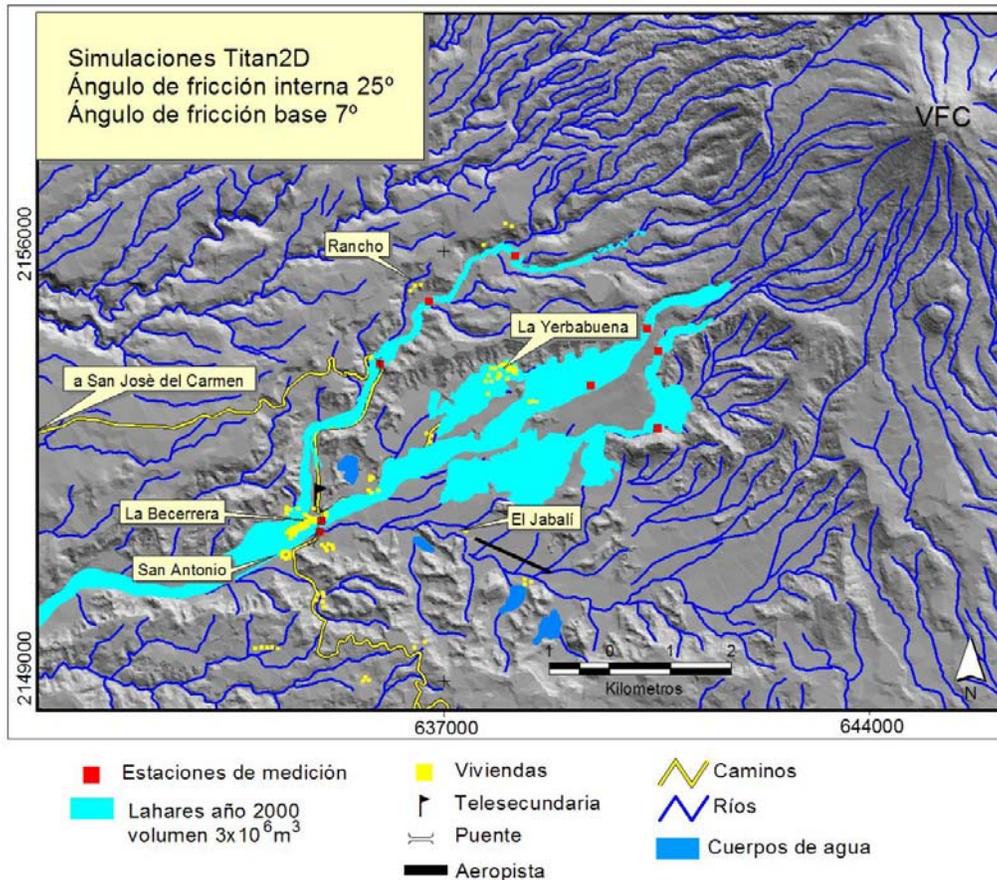


Fig. 34. Simulación de Lahares secundarios con Titan2D, volumen de  $3.1 \times 10^6 \text{ m}^3$  en las Barrancas La Lumbre, El Zarco y el Cordobán en la ladera SW del volcán de Colima, ocurridos en el año 2000.

Con base en las simulaciones realizadas con Titan2D, se determinó que los lahares que superen una altura de 5 m por la Barranca El Zarco pueden desbordarse y afectar a la comunidad de La Yerbabuena, como se muestra en las simulaciones. Los resultados de las simulaciones con Titan2D con un volumen de  $5 \times 10^5 \text{ m}^3$  como los que ocurrieron en 2006 tienen un alcance mayor a 12 Km con afectaciones en las vías de comunicación, la comunidad de La Becerrera y la infraestructura de la ladera SW, debido a que el flujo se desborda en las barrancas El Zarco y El Cordobán (Fig. 35).

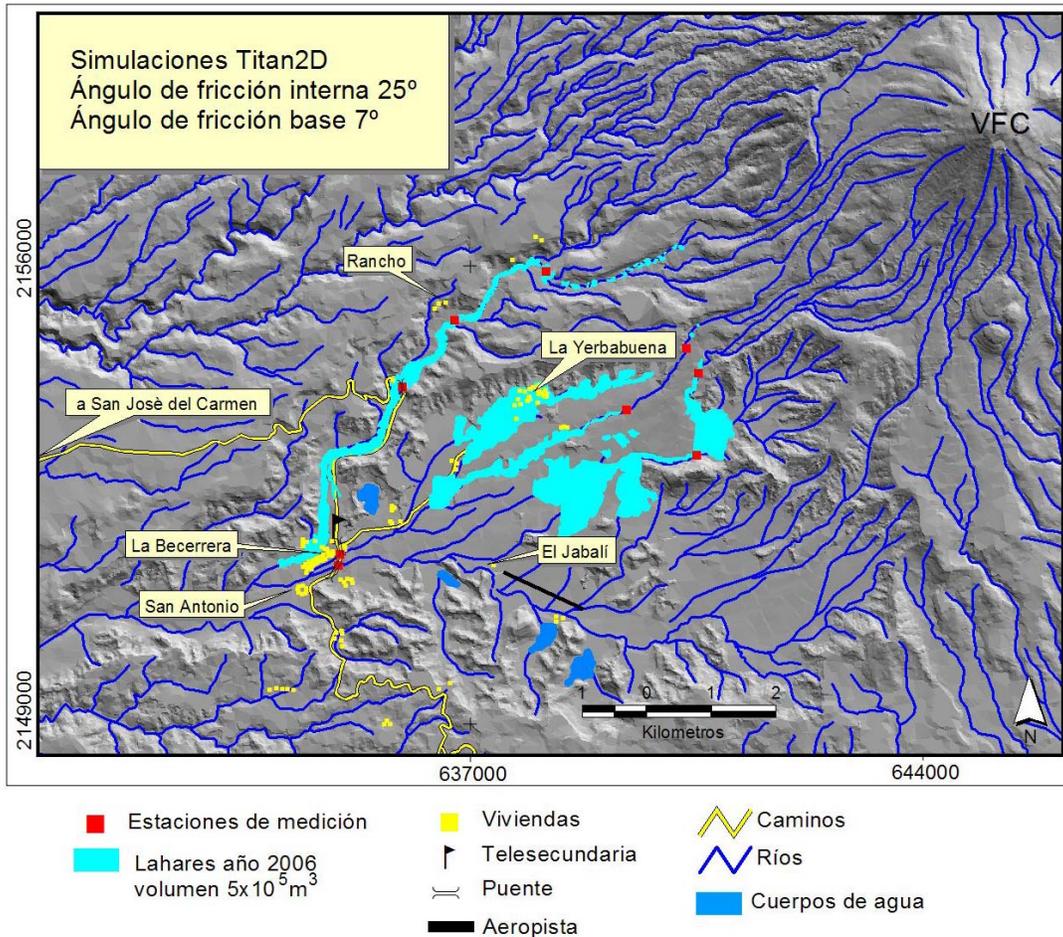


Fig. 35 Simulación de Lahares secundarios con Titan2D, volumen de  $5 \times 10^5 \text{ m}^3$  por las Barrancas La Lumbre, El Zarco y el Cordobán en la ladera SW del Volcán de Colima, ocurridos durante la temporada de lluvias de los años 2005 y 2006.

### 5.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Se compararon los resultados de las simulaciones con los programas LAHARZ y Titan2D, con los lahares históricos del Volcán de Colima; a partir del volumen y el alcance. Los lahares de 2000, 2006, 2008 y 2009 se consideran secundarios, los lahares de 1913 se consideran sineruptivos y el de 3.6 ka A.P. se consideran lahares por colapso (Fig. 36).

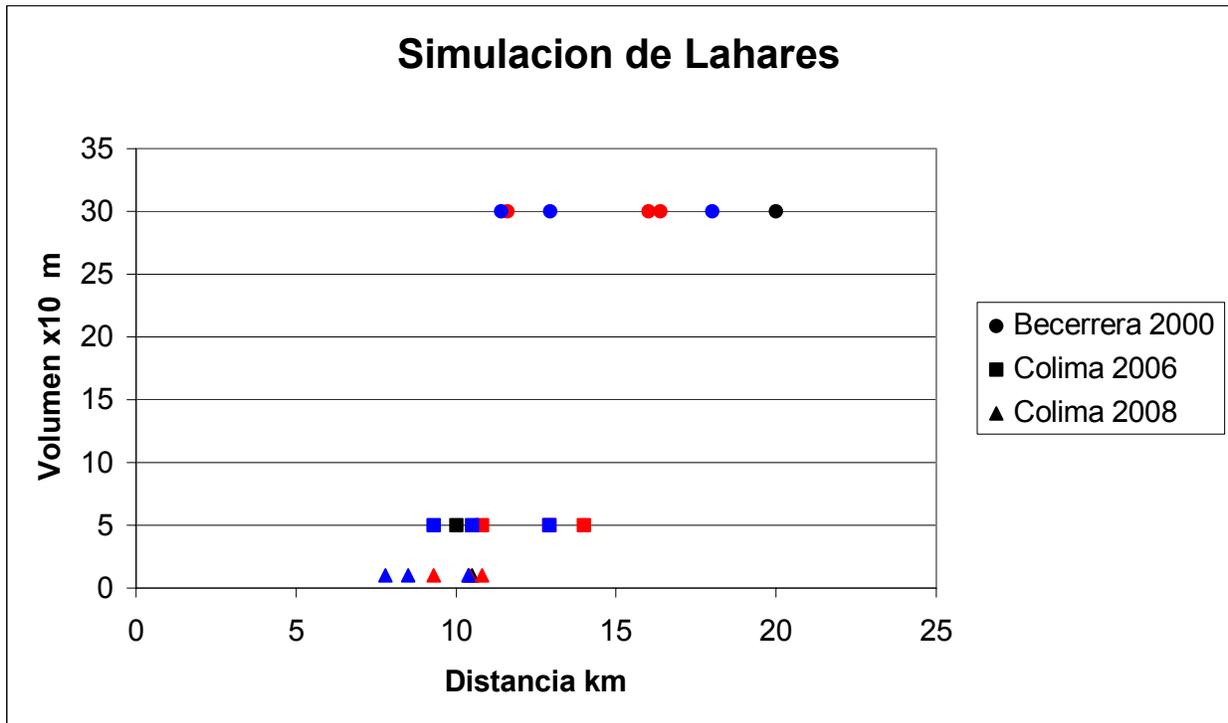


Fig. 36 Comparación de resultados de campo y simulaciones de lahares secundarios y sin eruptivos. LaharZ: rojo Titan2D: azul, campo negro

Se compararon los resultados de las simulaciones de los lahares secundarios, con las mediciones de campo de 2008 y 2009 realizadas en las Barrancas El Zarco, El Cordobán y La Lumbre. En la Barranca el Cordobán el alcance de los depósitos que se identificaron en campo fue de 8.7 km y las simulaciones con LaharZ y Titan2D con un volumen de  $1 \times 10^5$  presentan un alcance de 9.5 y 9.1 km a partir del cráter respectivamente, lo que significa que los resultados de las simulaciones llegaron a una distancia mayor a la que se identificó en campo. En la Barranca El Zarco el alcance de los depósitos medidos en campo fue de 9.4 km y las simulaciones con LaharZ y Titan2D con un volumen de  $1 \times 10^5$  llegaron a 10.2 y 10.3 km a partir del cráter respectivamente, lo que significa que las simulaciones presentan un alcance similar al que se identificó en campo con LaharZ y un alcance menor con Titan2D.

En la Barranca La Lumbre el alcance de los depósitos que se identificaron en campo fue de 12.0 km y las simulaciones con LaharZ y Titan2D con un volumen de  $2 \times 10^5$  presentan un alcance de 11.7 y 13.1 km a partir del cráter respectivamente, lo que significa que los resultados de las simulaciones presentan un alcance similar al observado en campo (Fig. 37).

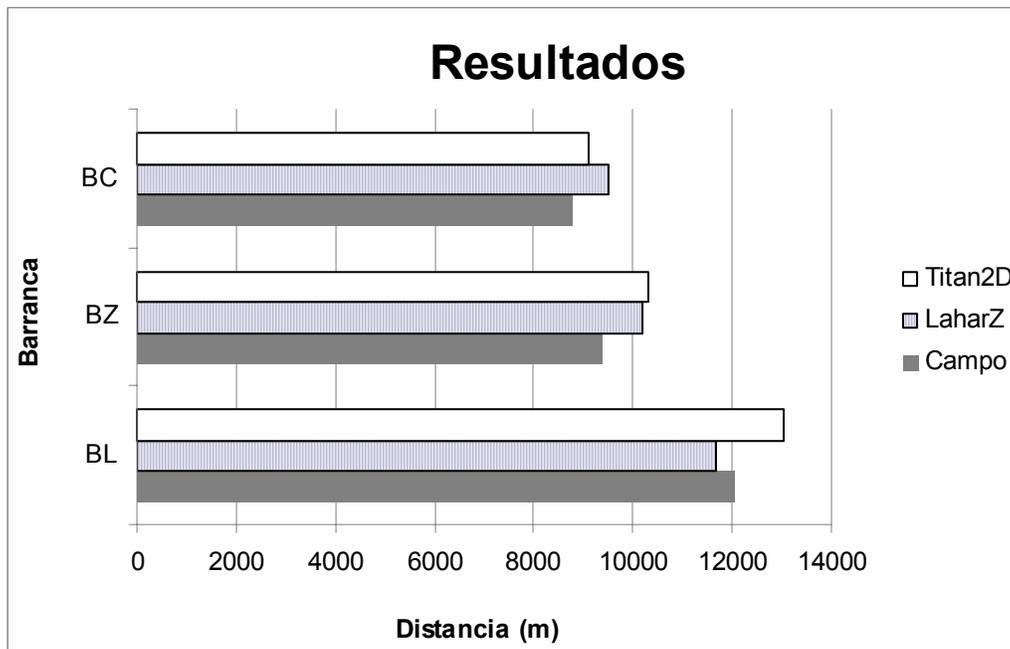


Fig. 37. Alcance de los lahares secundarios de la ladera SW del Volcán de Colima. Simulaciones realizadas con los programas Titan2D y LaharZ comparados con los datos de campo. Barranca Cordobán (BC), El Zarco (BZ) y La Lumbre.

En un DEM con resolución de 20 m la simulación produce límites más altos de inundación debido a que fácilmente supera los límites del cauce, mientras que con una base topográfica de 5 m de resolución las simulaciones respetan los límites del cauce.

Se compararon los resultados de las simulaciones de LaharZ y Titan2D a través de perfiles topográficos trazados en las estaciones de medición donde se representó el límite de inundación de los lahares de 2000, 2005, 2008 y 2009 (Fig 39). Los resultados más correspondientes con las mediciones de campo se obtuvieron con Titan2D para la Barranca la Lumbre y con LaharZ para las Barrancas El Zarco y El Cordobán. Con Titan2D los lahares superan los límites de las barrancas El Zarco y El Cordobán en algunos puntos y presentan áreas de inundación mayor, que no corresponden con los datos de campo (Fig. 38, 39 y 40).

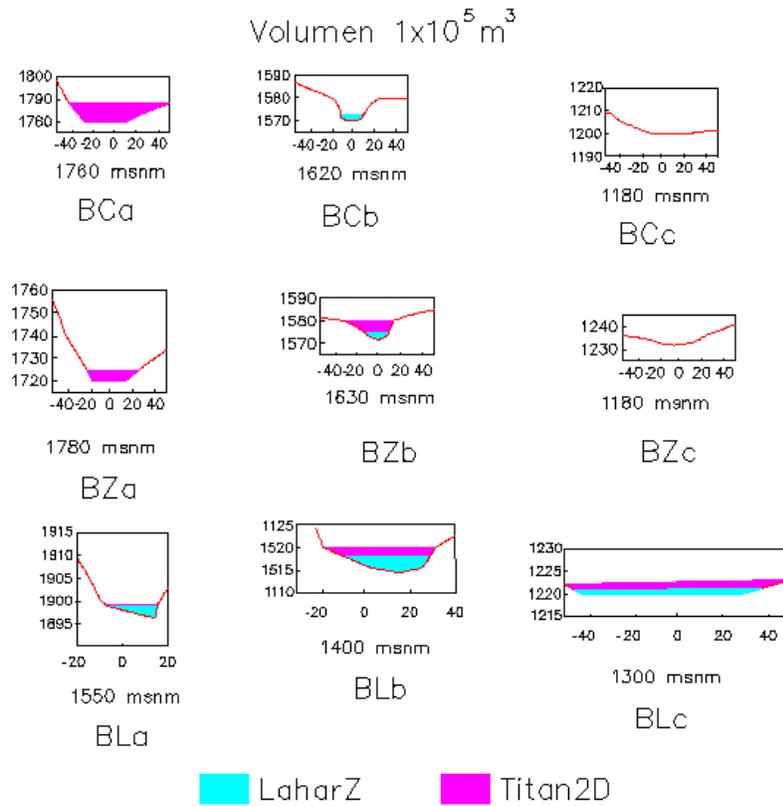


Fig. 38. Secciones de inundación en las Barrancas La Lumbre, el Zarco y El Cordobán con un Volumen de  $4 \times 10^5 \text{ m}^3$ .

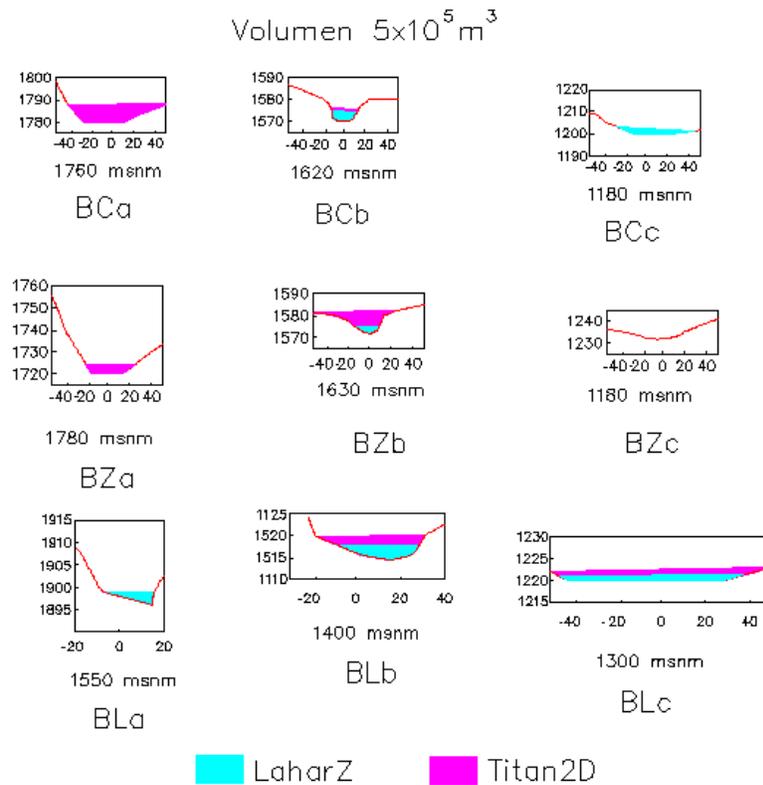


Fig. 39. Secciones de inundación en las Barrancas La Lumbre, el Zarco y El Cordobán con un Volumen de  $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ .

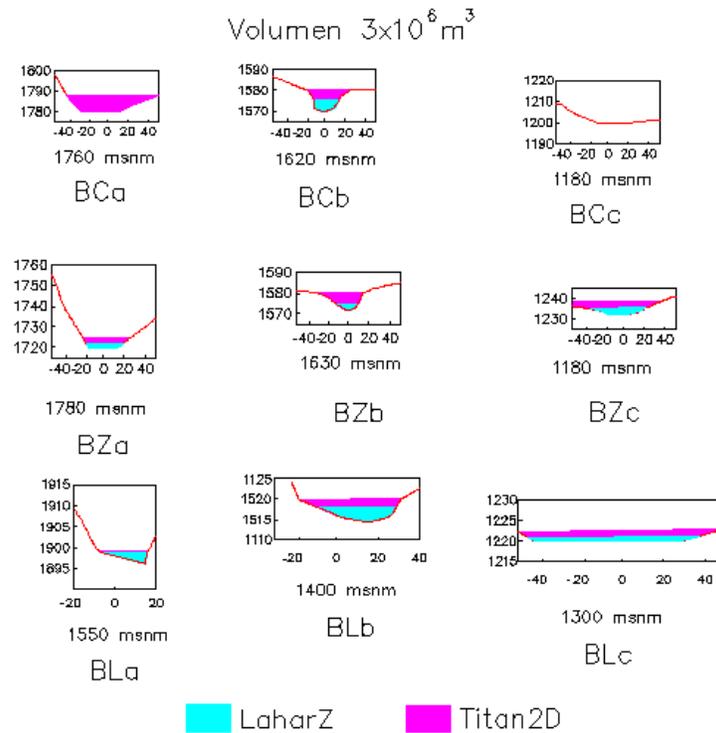


Fig. 40. Secciones de inundación en las Barrancas La Lumbre, el Zarco y El Cordobán con un Volumen de  $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Para complementar el trabajo se realizaron simulaciones de lahares sineruptivos, asociados con erupciones plinianas como la de 1913 (volumen de  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) y lahares asociados a eventos de colapso como los que ocurrieron después de las grandes avalanchas de escombros, como la del Río Armería, relacionado con el colapso de 3600 años A.P. ( $2.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ) (Cortés et al., 2009). Las simulaciones de los lahares sineruptivos y por colapso se realizaron sobre un DEM de 20 m de resolución, debido a que el alcance de los lahares grandes excede el área cubierta por el DEM de 5m. En el programa LaharZ se utilizó un gradiente de  $H/L = 0.1$  y en el Programa Titan2D se utilizaron ángulos de fricción interna de  $25^\circ$  y ángulo de fricción base de  $7^\circ$ .

En el programa LaharZ los lahares sineruptivos ( $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) llegaron al Río Armería (26 km) y los lahares por colapso ( $2.81 \times 10^8 \text{ m}^3$ ) llegaron a la ciudad de Coquimatlán (50 km) (Fig. 41).

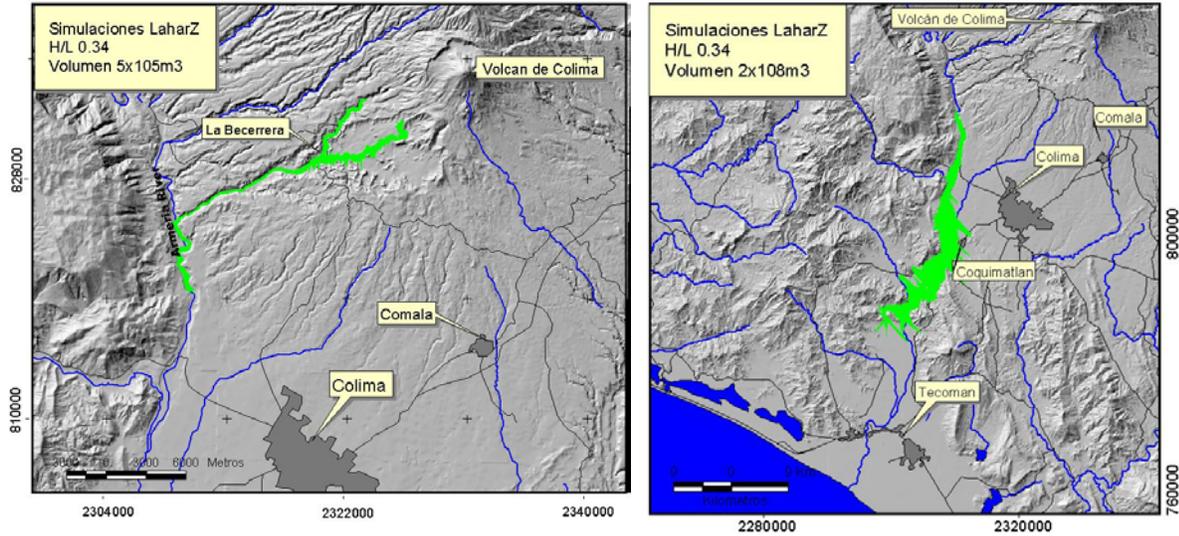


Fig. 41 Simulaciones con LaharZ de lahares sineruptivos con un volumen de  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$  y por colapso en el Río Armería  $2.8 \times 10^8 \text{ m}^3$

En el programa Titan2D los lahares sineruptivos ( $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) llegaron a 20 km en el Río Armería y los lahares por colapso ( $2.81 \times 10^8 \text{ m}^3$ ) llegaron a 30 km (Fig. 42).

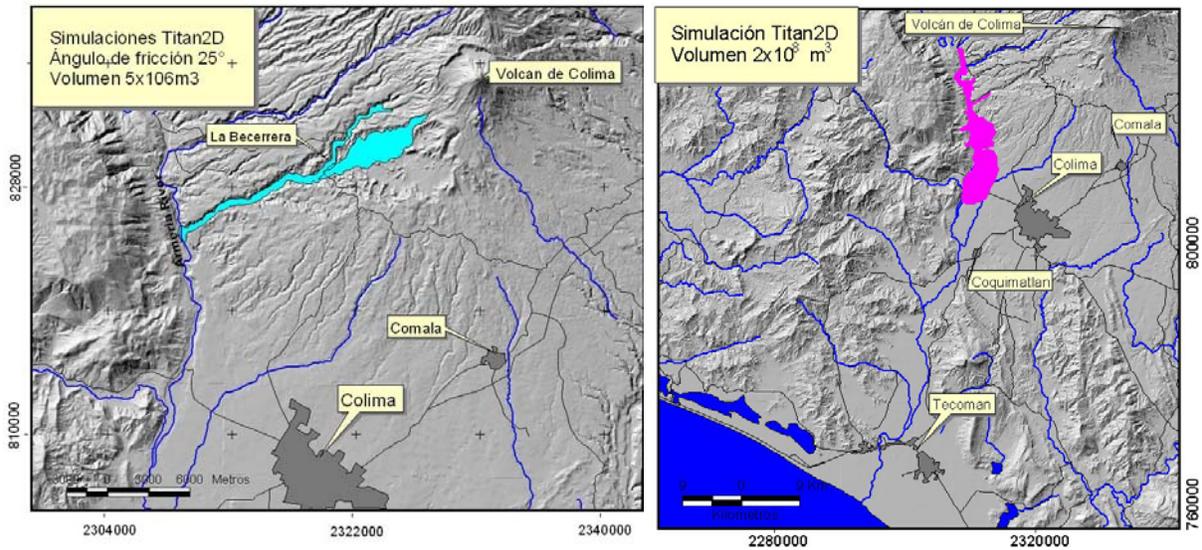


Fig. 42 Simulaciones con Titan2D de lahares sineruptivos con un volumen de  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$  en la ladera SW y por colapso  $2.8 \times 10^8 \text{ m}^3$  en el Río Armería.

#### 5.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE TITAN2D Y LAHARZ

Se analizó el funcionamiento de los programas Titan2D y LaharZ para identificar las ventajas y desventajas de su uso. El programa Titan2D, requiere de un Modelo Digital de Elevación, las dimensiones del depósito inicial, ángulo de fricción interno y ángulo de fricción base; mientras que, el programa LaharZ requiere un Modelo Digital de Elevación, a partir del cual genera la red hidrológica, la línea de energía y el volumen del lahar. Las diferencias que muestran los programas en cuanto a los parámetros de entrada, son: 1) El programa LaharZ utiliza la red hidrológica para definir las zonas de inundación a partir de un río. 2) el programa Titan2D realiza el procedimiento en función de la gravedad, con los ángulos de fricción interna y ángulo base sobre un Modelo Digital de Elevación, sin embargo los resultados no corresponden siempre al cauce de un río. 3) El Programa Titan2D simula a partir de un depósito inicial que empieza a fluir; sin embargo, no se pueden definir los puntos en el cauce donde el lahar incrementa su volumen por erosión progresiva. 4) Los dos programas funcionan sobre una base topográfica y de la resolución de esta, depende la precisión de los resultados (Tabla. 10).

Tabla 10. Parámetros de entrada para los programas Titan2D y LaharZ.

Parámetros	LaharZ	Titan2D
Modelo Digital de Elevación MDE	*	*
Red hidrológica	*	
Volumen del lahar	*	
Dimensiones del depósito inicial		*
Ángulo de fricción base		*
Ángulo de fricción interno		*
(H/L) pendiente del cono	*	

Las ventajas que presenta el programa Titan2D es que genera resultados con valores de espesor del depósito y velocidad del flujo, en lapsos de tiempo establecidos por el usuario. En este estudio se empleó un lapso de tiempo de 30 segundos, debido a que se consideró una velocidad promedio de 3 m/s para los lahares basado en registros sísmicos, por lo tanto en un lapso de 30 segundos el flujo avanzó 100 m, y se obtuvieron resultados numéricos y gráficos cada 100 m que muestran la distribución del flujo sobre el DEM de acuerdo al espesor. La desventaja que presenta el programa TITAN2D es que fue programado para simulación de flujos granulares

secos y no considera la incorporación de agua, por lo tanto se utilizó un ángulo de fricción base bajo para realizar simulaciones de lahares. Otra de las desventajas, es que el procesamiento es tardado (de 10 a 20 hrs más que el LaharZ.) y esta en función de la capacidad del equipo de cómputo y de los parámetros de entrada para la simulación. Para la visualización de los resultados sobre un DEM se requieren diferentes procesamientos debido a que los formatos de salida del programa son restringidos a determinados programas. Sin embargo, en este estudio así como en los de Murcia et al. (2008) y Procter et al. (2010) se obtienen resultados similares a los de campo.

Las ventajas que presenta el programa LaharZ son: 1) el tiempo de procesamiento es menor y muestra resultados para un máximo de 4 volúmenes diferentes asignados por el usuario, 2) permite mostrar los resultados en un Sistema de información geográfica Arc Gis y 3) presenta una buena delimitación de zonas potencialmente afectadas por lahares con volúmenes pequeños. Las desventajas son que únicamente proporciona resultados gráficos o polígonos de inundación y con volúmenes medianos y grandes la zona de inundación sobrepasa las barreras de las barrancas (Tabla 11).

## CAPITULO 6. ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS, ESCENARIOS DE PELIGRO Y VULNERABILIDAD

### 6.1. ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS

La distribución de los depósitos identificados en campo y los resultados de las simulaciones muestran que los lahares secundarios afectan frecuentemente un radio de 12 km a partir del cráter. Los terrenos de cultivo de frutales y cafetales de los ejidos La Yerbabuena y La Becerrera; así como la Telesecundaria de la misma comunidad, están ubicados sobre depósitos de antiguos lahares de los ríos La Lumbre, El Zarco y El Cordobán. Así mismo, el rancho El Jabalí (zona de reserva ecológica), el Hotel Ex Hacienda San Antonio (hotel de lujo), la zona ecoturística Laguna La María, y la vivienda del Rancho Schulte, se encuentran amenazados por la recurrencia de lahares secundarios por la cercanía a los ríos y en caso de presentarse lahares con un volumen mayor a  $1 \times 10^5 \text{ m}^3$  los resultados de las simulaciones muestran que se inundarían los terrenos próximos a las Barrancas.

Los lahares posteriores a la erupción de 1913 en el Volcán de Colima, tuvieron alcances mayores a 20 km por el flanco suroeste (Saucedo et al., 1997), donde se ubican los poblados de La Yerbabuena (31 hab.) y La Becerrera (3,274 hab.). En el flanco sur-sureste los lahares llegaron a Quesería (8,079 hab.) en el Estado de Colima y hasta el poblado de Cofradía de Tonila (92 hab.) y a San Marcos (3,279 hab.) en el Estado de Jalisco; de igual forma, se identificaron alrededor de 10 ranchos que están construidos sobre estos depósitos (Saucedo et al, 2010).

La presencia de lahares se ha manifestado desde tiempos históricos en la ladera SW del Volcán de Colima, a pesar de que se cuenta con pocos registros de daños históricos, debido a que la infraestructura de la región es reciente. Sin embargo, en caso de presentarse lahares de gran magnitud en la región, afectarían a la reserva natural, las actividades turísticas y comerciales del lugar, debido a que actualmente las principales fuentes de trabajo para los habitantes de las comunidades son la Ex Hacienda San Antonio y el Rancho El Jabalí.

El Jabalí, con una superficie de 5,178 has se decretó como Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre en el municipio de Comala, Colima por José López Portillo el día 14 de agosto de 1981, con los objetivos de preservar y conservar las especies y su hábitat y la reproducción natural de las especies vegetales y animales en busca de un equilibrio ecológico. La zona cuenta con bosques templados de pino, bosque de encino, se encuentran vestigios de bosque tropical subcaducifolio. Las especies más comunes son: el nopal (*Juglas major*), fresno (*Fraxinus udhey*), tescalama (*Ficus cotinifolia*), encino (*Quercus* sp), pino (*Pinus serotina* sp), capolli y árnica (*Heterotica inuloides inuloides*). La zona constituye un refugio para las comunidades de animales silvestres de pequeños mamíferos, reptiles, anfibios, aves y peces. Del total de la superficie decretada como reserva, 1,300 hectáreas son de un particular y el resto es administrado por ejidatarios y campesinos (Valencia Salazar, 1992).

La Ex Hacienda San Antonio data de 1879. A finales del siglo XX, Arnoldo Vogel, empresario de origen alemán llegó a Colima y construyó la hacienda Santa Cruz en las cercanías del Volcán de Colima, posteriormente se le cambió el nombre a Hacienda San Antonio (3,392.2 hectáreas). La hacienda se dedicaba a la producción de café y caña morada para azúcar, alcohol y piloncillo (Ortoll, 1988). El ingenio azucarero de la hacienda funcionó hasta 1928. Posteriormente, la propiedad fue adquirida por la señora Rosa Vogel de Santa Cruz y en 1955 el terreno se fraccionó (González, 1999; Valencia Salazar, 1992).

La Ex Hacienda fue remodelada en 1970 a manos del señor Atenor Patiño, quien emprendió la reconstrucción del inmueble y creó un desarrollo turístico de lujo, por lo que los moradores de San Antonio fueron desalojados (Valencia Salazar, 1992). El núcleo de población desalojado formó el ejido Ex Hacienda San Antonio, La Yerbabuena, y La Becerrera; algunas personas cambiaron de residencia al Estado de Jalisco, y otras compraron terrenos sobre la carretera Comala-Cofradía de Suchitlán y constituyeron el asentamiento Nuevo San Antonio (Valencia Salazar, 1992). En 1997, la cadena de servicios Aman Resorts obtuvo la concesión de la Ex Hacienda San Antonio y cambió su nombre por Mahakua. Actualmente cuenta con 22 suites de 210 m<sup>2</sup> y 3 Grand Suites de 420 m<sup>2</sup> (Hacienda San Antonio, 2010) (Fig. 43a).

El crecimiento poblacional de la región también se considera reciente, ya que de acuerdo con la Comisión Agraria Mixta, en 1956 la cifra total de habitantes en la región suroeste del volcán era

de 567, incluidas la Ex Hacienda de San Antonio, La Becerrera, Barranca del Agua y La Yerbabuena. A finales del sexenio de Gustavo Díaz Ordaz en 1968 fue otorgado el ejido La Yerbabuena, donde las familias Cuéllar Altamirano, Mendoza Reyes, Montejano Vega y Montejano Zamora fundaron la comunidad La Yerbabuena con un total de 80 habitantes (Valencia Salazar, 1992).

En 1983, con el propósito de impulsar la actividad turística y aprovechar los recursos disponibles para fortalecer empleos e ingresos en la zona, se propusieron dos centros de esparcimiento dentro del Plan de Desarrollo de Colima (Valencia Salazar, 1992). Los centros que se crearon son: los Lagos La María y Carrizalillo en el Municipio de Comala y el centro de reproducción de venado, El Venadario de la Yerbabuena, administrados por integrantes del ejido Alfredo B. Bonfil. En la región, se brindan servicios de hotel, restaurante, cabañas, zonas de acampar, canchas de voleibol y un campo de fútbol. En las lagunas se practica la pesca y se puede navegar en pequeñas lanchas; de igual forma cuenta con servicios de vigilancia y limpieza por parte de los ejidatarios (Fig. 43b).



Fig. 43. a) Hotel Ex hacienda San Antonio, b) Centro Turístico La María

Con la influencia del turismo se incrementó el número de viviendas y comercios en la zona de La Yerbabuena y La Becerrera, situación que incrementó el grado de exposición en la región. El censo de 1990 reportó 169 habitantes en la comunidad La Yerbabuena, población que aumentó en el conteo de 1995 a 183 habitantes; sin embargo en el año de 1992 la actividad del Volcán de Colima se incrementó y la comunidad la Yerbabuena se consideró como zona de alto riesgo, por lo que los habitantes fueron evacuados en diferentes ocasiones. En el episodio eruptivo de 1998-

1999, se generó una propuesta de reubicación de la comunidad, proyecto que se concretó el 22 de mayo de 2002 con la entrega oficial de viviendas a los habitantes de la Yerbabuena en Cofradía de Suchitlan a 14 km del volcán.. Durante 2005 solo 43 familias reubicadas permanecían en la nueva Yerbabuena, mientras que 14 familias se rehusaron a la reubicación y regresaron bajo su propio riesgo a sus viviendas. Actualmente residen 31 habitantes en la antigua comunidad La Yerbabuena (Cuevas y Seefoo. 2005).

Las actividades económicas principales en el ejido La Yerbabuena son: la agricultura comercial y de autoconsumo, la ganadería extensiva y el turismo. En la agricultura comercial el cultivo fundamental es el café, mientras que en la agricultura de autoconsumo es el maíz de temporal en ocasiones combinado con frijol, así como algunos frutales como limón, zarzamora y papaya (Valencia Salazar, 1992). La ganadería inició en la comunidad bajo la fórmula de trabajo colectivo. Sin embargo, para los habitantes reubicados, el cultivo del café continuó siendo la principal fuente de ingreso. La necesidad de trasladarse diariamente hasta La Yerbabuena para el corte y cuidados del café, implicó un desajuste económico para algunas familias, por lo que los pobladores formaron una cooperativa para la distribución y comercialización de su producto. Los principales compradores del café de la región son la ex hacienda San Antonio y la Cooperativa de Cofradía de Suchitlán. Después de la agricultura, las principales fuentes de empleo de la zona son la ex hacienda San Antonio, el rancho El Jabalí; donde trabajan como jornaleros y las obras de construcción de Comala y Colima.

De acuerdo a la información proporcionada por el H. Ayuntamiento de Comala (2007), a través del Sistema Integral de Control Catastral, la población La Becerrera cuenta con 176 predios clasificados en 48 ejidales, 22 rústicos y 106 urbanos; estos últimos distribuidos en 8 manzanas. De forma general, los predios urbanos constan de una vivienda con una o dos habitaciones y un espacio denominado solar por los pobladores de la comunidad, donde conservan árboles frutales, plantas y animales de granja para autoconsumo. Los muros de las casas son de mampostería, tabique, bloque, piedra, cantera, entre otros; los techos son de lámina de asbesto o metálica, teja y en menor porcentaje son rígidos de losa o concreto. (Fig. 44)



Fig. 44 Tipo de vivienda en la comunidad La Becerrera

La Comunidad La Becerrera cuenta con instituciones de educación preescolar, la primaria Colegio Primero de Diciembre y una telesecundaria estatal No. 17 Lic. Luis Donaldo Colosio M. que dependen de la Secretaría de Educación Pública (SEP) (Fig. 45a). También cuenta con un centro de salud regido por la Secretaría de Salud con un médico general y un consultorio de atención básica (Figura 45b).



Fig. 45. a) Telesecundaria Estatal No. 17 b) Centro de Salud rural de la comunidad la Becerrera.

De acuerdo con los habitantes de la zona, las vías de comunicación eran afectadas cada año por la ocurrencia de lahares, durante la temporada de lluvias. El camino a la Becerrera quedó bloqueado por los lahares de 2000 y afectó el paso de Comala a San José del Carmen, Jalisco; por lo que fue necesario construir el puente del Río La Lumbre.

En septiembre de 2002, se realizó la licitación de obra pública por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) del Estado de Jalisco para la construcción de un puente de cuatro carriles sobre el Río La Lumbre, con una longitud de 110 metros, en el kilómetro 28 de la Carretera Zapotitlán de Vadillo-San José del Carmen en el límite de los Estados de Jalisco y Colima, a cargo de la Constructora TELT, S.A. DE C.V. con un monto de 9.91 millones de

pesos; sin embargo la estructura del puente resulto afectada en 2005, 2006 y 2007 por los depósitos de lahares y los grandes bloques removilizados (SCT, 2002).

En 2009 las autoridades municipales de Comala y el Alcalde de Zapotitlán de Badillo, Jalisco realizaron obras de desasolve en la base del puente La Lumbre, para evitar acumulación de material y afectaciones en la infraestructura, debido a que cada año durante la temporada de lluvias, el material removilizado por lahares se deposita en el cauce y los grandes bloques golpean los pilares que soportan al puente La Lumbre. En 2005 los lahares destruyeron un muro de protección de los pilares del puente (Ecos de la Costa, 2009) (Fig. 46).



Fig. 46. Vías de comunicación a: Camino a La Becerrera cruce del Río El Zarco, b: Puente del Río La Lumbre.

Con base en la descripción anterior, se presentó a manera de inventario, la infraestructura localizada en la ladera SW del Volcán; se especifica la distancia a la que está ubicada a partir del cráter, el tipo de afectación y sus características. Se consideró afectación directa cuando la infraestructura resulta inundada por lahares y la afectación indirecta cuando se afecta el funcionamiento de las comunidades (Tabla 12 y Fig. 47).

En la ladera SW del Volcán de Colima existe infraestructura importante amenazada por lahares. El área de protección de flora y fauna El Jabalí consta de Infraestructura para turismo exclusivo. La comunidad La Becerrera que esta ubicada en la intersección de los ríos El Zarco, El Cordobán y La Lumbre; de acuerdo con datos de INEGI en el 2005 contaba con 274 habitantes, 69 viviendas, servicios básicos como escuela primaria y centro de salud rural. La Telesecundaria No. 17 Lic. Luís Donald Colosio esta instalada sobre depósitos de antiguos lahares, a unos metros del Río La Lumbre, por lo que puede ser afectada por el paso de los lahares. La

comunidad La Yerbabuena y El Borbollón no presentan una amenaza directa ante la presencia de lahares, sin embargo en caso de presentarse lahares por las Barrancas El Zarco y La Lumbre los habitantes quedan incomunicados. El hotel de turismo exclusivo Ex Hacienda San Antonio, esta ubicado al nivel del Río El Zarco y El Cordobán, por lo que puede ser afectado de forma directa por los lahares. El Rancho Schulte es afectado por los lahares del Río La Lumbre, el centro turístico La María está amenazado por los lahares del Río El Zarco. Las carreteras y puentes, las líneas de transmisión eléctrica y los terrenos ejidales pueden ser afectados por los lahares. La comunidad de San José del Carmen presentaría una afectación indirecta al cerrarse la comunicación con las localidades del Estado de Colima.

Tabla 12. Infraestructura amenazada por lahares en la ladera SW del Volcán de Colima

Infraestructura	Distancia	Grado de Exposición a la amenaza	Características
Área de Protección de Flora y Fauna El Jabalí	8.6 km	Directa	Reserva Natural Infraestructura para turismo exclusivo 1 vivienda 1 aeropista
Comunidad La Becerrera	12 km	Directa	274 Habitantes 69 viviendas Escuela primaria Centro de Salud Rural
Telesecundaria No. 17 Lic. Luís Donaldo Colosio M	12 km	Directa	3 salones de clases, 1 laboratorio, dirección baños, patio cívico, desayunador y tres bodegas.
La Yerbabuena	8 km	Indirecta	31 Habitantes 10 Viviendas
Ex Hacienda San Antonio	12 km	Directa	Hotel de turismo exclusivo 22 suites y 3 Grand Suites
El Borbollón	9 km	Indirecta	1 vivienda
Rancho Schulte	9 km	Directa	1 vivienda Terrenos ganaderos
El centro turístico La María	10 km	Directa	Cabañas y zona recreativa con afluencia turística en fines de semana
Carreteras y puentes	11 km	Directa	Vías de comunicación de Comala, Colima a San José del Carmen, Jalisco Puente La Lumbre, El Zarco y El Cordobán
Líneas eléctricas	9 km	Directa	Abastecimiento de servicio eléctrico de La Becerrera, La Yerbabuena y San Antonio.
Ejidos	8 km	Directa	El Ejido La Yerbabuena cuenta con 531has repartidas entre 23 ejidatarios dedicados a la producción de frutales y cafetales.
San José del Carmen	16 km	Indirecta	775 Habitantes

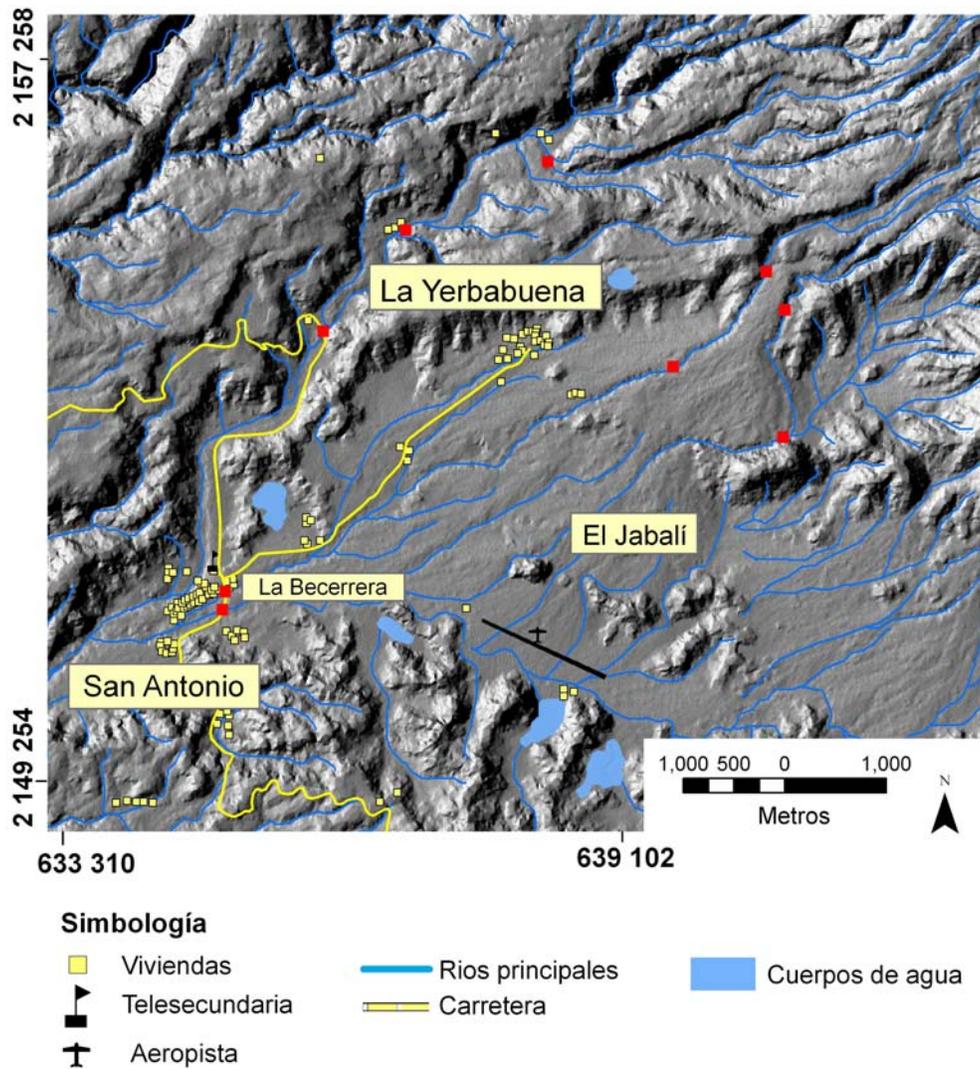


Fig. 47. Mapa de distribución de infraestructura en la ladera SW del Volcán de Colima

## 6.2. ESCENARIOS DE PELIGRO

Los resultados de la simulación y del trabajo de campo muestran que los lahares pequeños presentan un alcance de 12 km a partir del cráter, por las tres barrancas del sector SW. Estos afectan a los terrenos de cultivo de las partes altas de la ladera y al Rancho El Jabalí (Fig. 48).

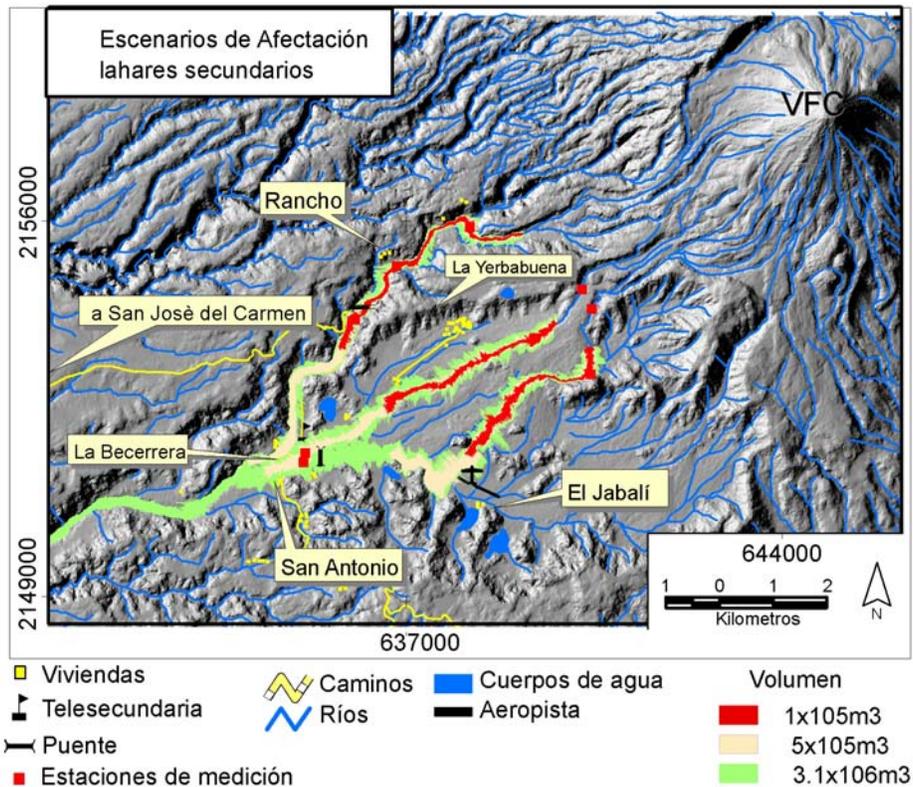


Fig. 48 Escenario de afectación por lahares pequeños en la ladera SW del Volcán de Colima

El periodo de recurrencia que presentan los lahares, se identificó en función del volumen. Los lahares pequeños (secundarios) son los más frecuentes en la ladera SW del Volcán de Colima, están relacionados con la presencia de flujos piroclásticos y la temporada de lluvias. Sin embargo, en la medida en que transcurren los años sin actividad explosiva y sin formación de flujos piroclásticos, el volumen de los lahares secundarios disminuye. Los lahares medianos (sineruptivos) están asociados con los episodios plinianos que producen flujos de bloques y ceniza que dejan grandes volúmenes de material en el cauce de los ríos como las erupciones de 1611, 1609, 1818 y 1913. Los lahares grandes (por colapso) son menos frecuentes y están relacionados con la generación de avalanchas de escombros como las que ocurrieron 2.7, 3.6, 4.2, 7.0 y 9.6 Ka A.P.

Anteriormente no se contaba con registros detallados de lahares secundarios, pero en el periodo de 1960 a la fecha se presentaron periodos de 13, 10 y 5 años sin lahares, aunque después del aumento en la actividad la frecuencia fue anual. Durante los últimos cinco años, posterior al

episodio explosivo de 2005, han ocurrido un promedio de trece lahares por año. Se tomaron en cuenta los registros de lahares pequeños de 1960 a la fecha y se calculó una recurrencia  $\geq 2.7$  años. Los lahares por colapso ocurren entre 1000 y 2000 años, pero se han presentado 5 episodios en los últimos 10,000 años y por lo tanto se les asignó un periodo de recurrencia de 2,000 años. En los últimos 400 años se han presentado 4 episodios plinianos que generan lahares medianos y por consiguiente los lahares sineruptivos presentan una recurrencia de aproximadamente 100 años (Tabla. 13).

Tabla. 13 Recurrencia de Lahares

Tipo de Lahares	Presencia de lahares	Volumen $m^3$	Superficie de afectación	Recurrencia
lahares secundarios	1962, 1975, 1976, 1981, 1991, 1992, 1993, 1994, 1997, 1999, 2000  2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008 y 2009	$1 \times 10^5$	$1 \times 10^6 m^2$	18 en 50 años $\geq 2.7$ años
Lahares sineruptivos	1611, 1609, 1818 y 1913	$1 \times 10^6$	$1 km^2$	4 en 400 años = 100 años
lahares por colapso	2.7, 3.6, 4.2, 7.0, 9.6 Ka A.P.	$1 \times 10^8$	$6.4 km^2$	5 en 10,000 años = 2000 años

Los lahares pequeños tuvieron un alcance menor a 12 km a partir del cráter, los lahares medianos llegaron al Río Armería (24 km) y los lahares grandes pueden llegar a las ciudades de Colima, Villa de Álvarez y Coquimatlan (50 km). Los lahares pequeños presentan menor superficie de afectación; sin embargo, su recurrencia es mayor.

En 1991 los lahares afectaron la infraestructura de el Rancho El Jabalí por la Barranca El Cordobán, también se registró la muerte de 20 cabezas de ganado del agricultor Ramón Aguirre Valencia. Durante 1992 resultaron afectados dos propietarios, indicaron que el lahar cubrió dos hectáreas de tierras de pastoreo, árboles frutales y varios colmenares dedicados a la producción de miel (Smithsonian Institution, 1999).

En 1993 los lahares cubrieron una parte de la carretera de la comunidad La Becerrera y en 2000 un lahar que bajó por la Barranca El Zarco sepultó una vivienda y un auto. En la Barranca Montegrande los lahares afectaron las antenas de transmisión eléctrica de la CFE en los años 2000, 2003 y 2007.

### 6.3. VULNERABILIDAD FÍSICA Y ESTRUCTURAL DE LA LADERA SW

Se calculó la tasa de descarga y la velocidad de los lahares de la ladera SW del Volcán de Colima, con base en las formulas propuestas por Toyos et al (2008) y Rickenmann (1999). Se consideró que los lahares con un volumen de  $4 \times 10^5 \text{ m}^3$ , como los ocurridos en 2008 y 2009, pueden alcanzar una velocidad máxima de 11.55 m/s, 12.96 m/s y 12.43 m/s en las barrancas La Lumbre, El Zarco y El Cordobán respectivamente (Tabla 14).

Tabla 14. Características de los lahares en la ladera SW del Volcán de Colima

Barranca	Volumen $\text{m}^3$	Tasa de descarga $\text{m}^3/\text{s}$	Pendiente	Velocidad máxima $\text{m/s}$	Velocidad simulaciones $\text{m/s}$
BL	$2 \times 10^5$	1,462	7 °	11.55	4.6
BZ	$1 \times 10^5$	1,462	10 °	12.96	7.2
BC	$0.9 \times 10^5$	1,462	9 °	12.43	5.3

Se calculó el tiempo de llegada de los lahares secundarios a los diferentes puntos amenazados de forma directa, a partir de la velocidad máxima calculada con la formula de Rickenmann, 1999 y la velocidad obtenida de las simulaciones, así como la distancia en cada una de las Barrancas. El tiempo que tarda en llegar un lahar secundario con un volumen de  $2 \times 10^5 \text{ m}^3$  a la comunidad La Becerrera por la Barranca La Lumbre es entre 12 y 32.6 minutos, por El Zarco con un volumen de  $1 \times 10^5 \text{ m}^3$  el tiempo es de 9 a 22 minutos y por El Cordobán con  $0.9 \times 10^5 \text{ m}^3$  tarda entre 10.7 y

18.5 minutos. El tiempo que tarda en llegar un lahar al puente La Lumbre esta entre 7.2 y 18.1 minutos aproximadamente, al puente El Cordobán de 10.05 a 17.4 minutos y al Rancho El Jabalí entre 6 y 10.4 minutos (Tabla 15).

Tabla. 15 Velocidades y tiempo de llegada de los lahares

Barranca	Infraestructura	Velocidad máxima	Velocidad simulaciones	Distancia	Tiempo
BL	La Becerrera	11.55 m/s	4.6 m/s	9 km	12 - 32.6 min.
	Telesecundaria	11.55 m/s	4.6 m/s	7.6 km	10.9 – 27.5 min.
	Puente La Lumbre	11.55 m/s	4.6 m/s	5 km	7.2 – 18.1 min.
BZ	La Becerrera	12.96 m/s	5.3 m/s	7 km	9 – 22 min.
BC	La Becerrera	12.43 m/s	7.2 m/s	8 km	10.7 – 18.5 min.
	Puente El Cordobán	12.43 m/s	7.2 m/s	7.5 km	10.05 – 17.4 min.
	El Jabalí	12.43 m/s	7.2 m/s	4.5 km	6.0 – 10.4 min.

En la estación media de la Barranca El Zarco se midieron megabloques de 2 y 3 m de diámetro, estos bloques se transportan por flotación en el frente del lahar y golpean lo que encuentran a su paso. Los grandes bloques al ser removilizados por los lahares a una velocidad promedio de 3 m/s representan una energía cinética de entre 1.9 a  $6.4 \times 10^6$  Joules, por lo tanto, la infraestructura se encuentra expuesta de forma directa como la comunidad La Becerrera, los puentes La Lumbre y El Cordobán.

En el censo de 2005 se reportaron 101 viviendas localizadas en la ladera SW. Se clasificaron con base a las características de construcción (Tabla 3) y se definió el tipo de vulnerabilidad estructural ante la ocurrencia de lahares. Del total de viviendas de la ladera SW, 19 se clasificaron como Tipo 1 de mampostería con techo rígido o flexible, la cimentación es construida con una zapata corrida de concreto o de mampostería por lo que presentan una vulnerabilidad estructural media. Setenta y cinco de las construcciones son de Tipo 2, con muros de adobe, techo rígido o flexible, cimentación de mampostería cuando existe pueden clasificarse con vulnerabilidad alta. Siete viviendas son de Tipo 3 con muros de materiales

débiles con techo flexible y generalmente sin cimentación por lo que se consideran con vulnerabilidad estructural muy alta (Fig. 49).

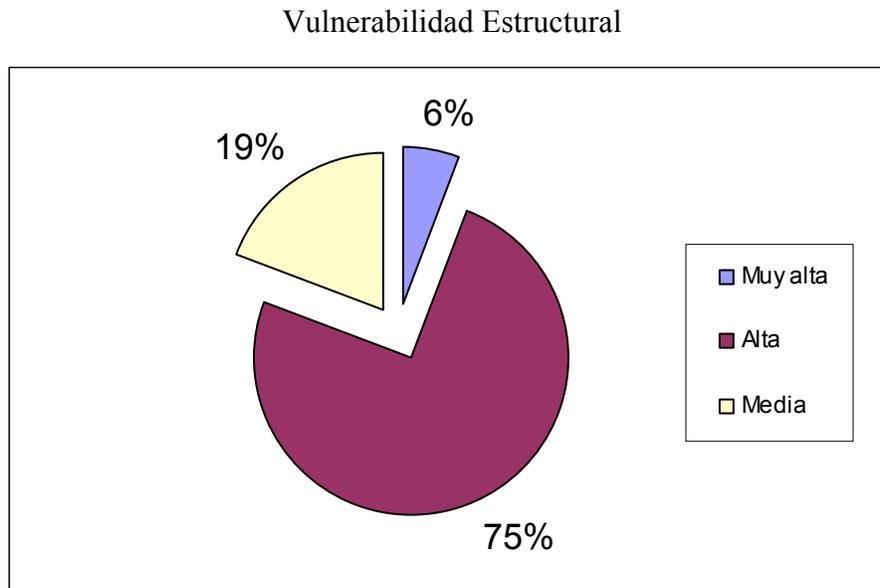


Fig. 49 Tipo de vulnerabilidad estructural que presentan las viviendas de la ladera SW, tipificadas de acuerdo al material de construcción que presentan.

La vulnerabilidad física y estructural de la ladera SW se presenta en el mapa de la Fig. 50. Las carreteras, los puentes y las viviendas presentan una vulnerabilidad física alta debido a que se encuentran ubicadas en la zona de depósito de lahares, 7% de las viviendas tienen una vulnerabilidad estructural muy alta, 74% alta y 19% baja. Estos rangos de vulnerabilidad son aplicados a lahares pequeños o medianos, sin embargo con lahares muy grandes relacionados con avalanchas de escombros todas las viviendas pueden ser afectadas independientemente de las características del material de construcción.

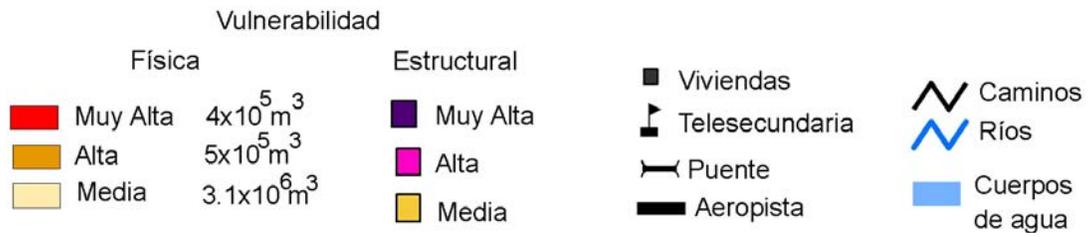
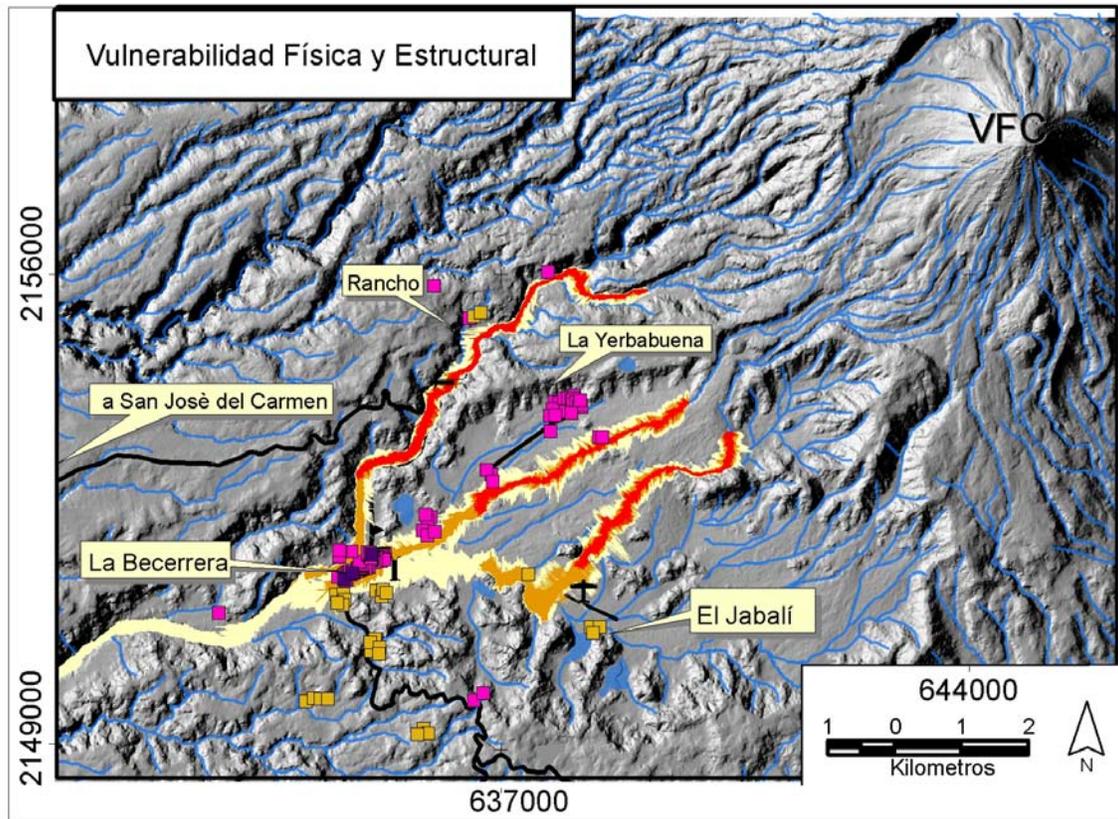


Fig. 50 Mapa de vulnerabilidad física y estructural de la ladera SW

## CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.

Los lahares de la ladera SW del Volcán de Colima en 2008 y 2009, removilizaron depósitos de flujos piroclásticos emplazados en 2005. Tuvieron un volumen de  $4 \times 10^5 \text{ m}^3$  por cada Barranca (La Lumbre, El Zarco y El Cordobán) y un alcance de 9 a 12 km a partir del cráter.

Durante las temporadas de lluvias de 2008 y 2009 se identificaron cambios importantes en las tres barrancas de estudio así como afectaciones en la infraestructura y el medio ambiente, a pesar de que el volumen de los lahares fue pequeño. En la estación de monitoreo media de la Barranca La Lumbre (BLb) (1630 msnm) se formó una terraza de 2.2 m de alto después de la temporada de lluvias y en la estación media de El Zarco (BZb) (1620 msnm) el depósito fue de 0.74 m de alto. En la estación media del Cordobán la terraza de depósito fue de 0.6 m. Este material puede ser removilizado por la corriente normal del río y por lahares posteriores y afectar de forma directa a la comunidad La Becerrera y a los puentes La Lumbre y El Cordobán. También se identificaron derrumbes ocasionados por la inestabilidad de las paredes de las barrancas, este material podría ser removido por lahares posteriormente. Los cambios que se identificaron con las secciones comparativas muestran que en altitudes superiores a 1780 msnm ocurrieron procesos erosivos. En altitudes medias entre 1700 y 1200 msnm cambios erosivos y acumulativos, en altitudes menores a 1200 m procesos de acumulación.

Los depósitos de las estaciones altas (BLa, BZa y BCa) presentan una matriz de finos, con una distribución bimodal, al igual que en las estaciones medias (BLb, BZc y BCc). En las estaciones bajas (BLc, BZc y BCc) los depósitos contienen mayor porcentaje de finos, con una distribución unimodal. En estas estaciones los lahares se transforman a flujos hiperconcentrados y corriente fluvial.

Las simulaciones para los lahares de 2008 y 2009 con el programa Titan2D indican que al variar el ángulo de fricción base se obtuvieron depósitos con diferente alcance. El mejor ajuste con respecto a los depósitos que se identificaron en campo es con ángulos base de 4° para la Barranca La Lumbre, 7° en El Cordobán y El Zarco, esto debido a que con ángulos mayores el flujo se desplazaba a una velocidad menor a 1 m/s y el depósito tuvo un alcance menor al identificado en campo y con un ángulo de fricción base de 3° el flujo simulado presentó velocidades superiores a 20 m/s, superó las barreras topográficas y el depósito presentó un alcance mayor a los depósitos identificados en campo. En la Barranca La Lumbre, con un ángulo base de 5° la velocidad del flujo fue de 4.6 – 1 m/s y el alcance de 10 km en 59 minutos. En la Barranca El Cordobán con un ángulo de 7° la velocidad fue de 7.2 - 1 m/s y llegó a 7.7 km en 17 minutos. En la Barranca El Zarco con un ángulo base de 7° la velocidad fue de 1 a 5.3 m/s y llegó a 8 km en 19 minutos.

Con base en las simulaciones realizadas con el programa Titan2D, se identificaron diferencias en las tres barrancas. En la Barranca La Lumbre el flujo permaneció dentro del cauce, mientras que de las Barrancas El Zarco y El Cordobán los lahares se desbordaron e inundaron zonas próximas a los ríos, debido a que la profundidad de las Barrancas es menor a la resolución del DEM (5m). Por lo tanto, se determinó que los lahares que superen una altura de 5 m por la Barranca El Zarco pueden desbordarse y afectar a la comunidad de La Yerbabuena.

Los resultados de las simulaciones con el programa LaharZ con un volumen de  $4 \times 10^5 \text{ m}^3$  (temporada de lluvias de 2008 y 2009) llegaron entre 9 y 12 km a partir del cráter y muestran zonas de inundación similares a las identificadas en campo; sin embargo, con volúmenes mayores ( $5 \times 10^5 \text{ m}^3$  y  $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) muestran límites de inundación irregulares en los bordes.

Por lo tanto, para obtener mejores resultados de lahares secundarios es importante utilizar ambos programas Titan2D y LaharZ, ya que LaharZ no considera la física del fluido,

únicamente delimita el área de inundación por lahares, mientras que Titan2D genera resultados de velocidad y espesor del depósito que pueden ser identificados en campo.

Los resultados de las simulaciones muestran que los lahares de  $4 \times 10^5 \text{ m}^3$  no llegan a las partes bajas. Sin embargo, en la estación media afectaron una vivienda en la Barranca La Lumbre. Con volumen  $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ , los depósitos llegan a las partes medias y bajas afectando la comunidad La Becerrera (274 Habitantes, 69 viviendas), La Telesecundaria Lic. Luis Donaldo Colosio, los puentes que comunican el Estado de Colima con Jalisco, el Rancho Schulte, el Rancho El Jabalí (Reserva Natural) y la Ex Hacienda San Antonio (Hotel de turismo exclusivo con 22 suites y 3 Grand Suites) además del ejido La Yerbabuena (531has. repartidas entre 23 ejidatarios).

Los bloques mayores a 2 m de diámetro que se encuentran en las estaciones medias de las barrancas pueden ser removilizados por lahares posteriores y golpear las estructuras que se encuentren a su paso, como viviendas de la comunidad La Becerrera y los puentes. Estos bloques al ser removido por los lahares a una velocidad de 3 m/s presentarán una energía cinética entre  $1.9$  y  $6.4 \times 10^6$  Joules.

Con respecto a la vulnerabilidad estructural el 7% de las viviendas de la ladera SW presentan vulnerabilidad estructural muy alta, 74% alta y 19% media. Se calculó que el tiempo que tarda un lahar en llegar a la comunidad La Becerrera, por la Barranca La Lumbre es de 12 a 32.6 minutos. Por la Barranca El Zarco de 9 a 22 minutos y por El Cordobán, entre 10 y 18 minutos. El tiempo que tarda en llegar un lahar al puente La Lumbre es de entre 7 y 18 minutos aproximadamente, al puente El Cordobán entre 10 y 17 minutos, al Rancho El Jabalí entre 6 y 10 minutos. La Barranca El Cordobán representa mayor amenaza para el Rancho El Jabalí y la Ex Hacienda San Antonio, debido a que los lahares de  $5 \times 10^5 \text{ m}^3$  se desbordan y afectan los predios de la reserva ecológica. El puente y la carretera que comunican al Estado de Jalisco con Colima, así como el Rancho Schulte y la Telesecundaria están amenazados por los lahares que ocurren en la Barranca La Lumbre. Una medida para reducir el impacto puede ser la implementación de presas Sabo que se utilizan para reducir el impacto de los flujos de escombros en la infraestructura.

Los lahares secundarios tienen una recurrencia de 2.7 años. En los últimos 50 años, se tiene registro de lahares en 18 años y durante los últimos cinco años de 2005 a 2010 han ocurrido un promedio de trece lahares durante la temporada de lluvias. Sin embargo en la medida en que transcurren los años, sin actividad explosiva y sin formación de flujos piroclásticos, el volumen y la frecuencia de los lahares secundarios disminuye (2005, 6 lahares; 2006, 19 lahares; 2007, 16 lahares; 2008, 19 lahares; 2009, 6 lahares).

Los lahares como los de 1913 pueden llegar al río Armería a 20 km a partir del cráter y amenazar a La Becerrera, la telesecundaria, los puentes, la Ex Hacienda San Antonio, El ejido La Yerbabuena. Estos presentan una recurrencia de aproximadamente 100 años y están asociados con los episodios plinianos que producen flujos de bloques y ceniza que dejan grandes volúmenes de material en el cauce de los ríos los cuales se remobilizan, como los ocurridos durante las erupciones de 1611, 1609, 1818 y 1913. Los lahares relacionados con la generación de avalanchas de escombros pueden llegar a más de 50 km de distancia alcanzando las ciudades de Colima, Villa de Álvarez y Coquimatlán y presentan una recurrencia de aproximadamente 2 ka.

Se cuenta con pocos registros de daños por lahares a la infraestructura, debido a que la infraestructura de la región es reciente. En la actualidad con la influencia del turismo se ha incrementado el número de viviendas y comercios en la zona de La Yerbabuena y La Becerrera, situación que incrementa el grado de exposición volcánica. Se recomienda establecer medidas para mitigar los efectos de los lahares en el futuro como no permitir la construcción de infraestructura en la ladera SW, en las zonas próximas a los ríos.

## REFERENCIAS

Aguilera, E., Pareschi, M.T., Rosi, M., Zancheetta, G. 2004. Risk from Lahars in the Northern Valleys of Cotopaxi Volcano (Ecuador) *Natural Hazards* 33: 161–189.

Armanini, A., Scotton, P. 1993. On the dynamic impact of a debris flow on structures. In *Proceedings of XXV Congress of IAHR, Technical Session B, Debris Flows and Landslides* 3: 203–210.

Arreola, J.M. 1915. Catalogo de las erupciones antiguas del volcán de Colima, *Mem. Rev. Soc. Cient. Antonio Alzate, México* 32:443-481.

Barcena, M. 1887. Informe sobre el estado actual del Volcán de Colima, *Anales del Ministerio de Fomento, México*, 328-365.

Beverage, J.P., Culbertson, J.K. 1964. Hyperconcentrations of suspended sediment. *American Society of Civil Engineers Proceedings. Hydraulics Division Journal*. 90: 117-128.

Bretón, M., Ramírez, J., Navarro, C. 2002. Summary of the historical eruptive activity of Volcán de Colima, México 1519-2000. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 117: 21-46.

Capra, L. y Macías, J.L. 2000. Pleistocene cohesive debris flows at Nevado de Toluca Volcano, central México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 102, 149-167.

Capra, L., Macías, J.L. 2002. The cohesive Naranjo debris-flow deposit (10 km<sup>3</sup>). A dam breakout flow derived from the Pleistocene debris-avalanche deposit of Nevado de Colima Volcano (Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 117: 213–235.

Capra, L., Poblete, M.A., Alvarado, R. 2004. The 1997 and 2001 lahars of Popocatepetl volcano (Central México): textural and sedimentological constraints on their origin and hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 3039:1-19.

Capra, L., Borselli, L., Varley, N., Gavilanes-Ruiz, J.C., Norini, G., Sarocchi, D., Caballero, L., Cortes, A., 2010. Rainfall-triggered lahars at Volcán de Colima, Mexico: Surface hydro-repellency as initiation process *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 189 (2010) 105–117

Carrivick, J.L., Marville, V., Cronin, S.J. 2009. A fluid dynamics approach to modeling the 18<sup>th</sup> March 2007 laha at Mt. Ruapehu, New Zeland *Bulletin of Volcanology* 71: 153-169.

CENAPRED Centro Nacional de Prevención de Desastres, (2004). Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, Serie Atlas Nacional de Riesgos, México.

Cortés, A., Garduño, V.H., Navarro, C., Komorowski, J.C., Saucedo, R., Macías, J.L., Gavilanes, J.C. 2005. Carta Geológica del Complejo Volcánico de Colima con Geología del Complejo Volcánico de Colima. *Cartas Geológica y Mineras* 10. *Inst. Geol.* 10: 1–37.

Cortés, A., Macías, J.L. Capra, L., Garduño-Monroy, V.H. 2009. Sector collapse of the SW flank of Volcán de Colima, México The 3600 yr BP La Lumbre–Los Ganchos debris avalanche and associated debris flows *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.

Cronin, S.J., Neall, V.E., Lecointre, J.A. and Palmer, A.S. 1999. Dynamic interactions between lahars and stream flow: A case study from Raupahu volcano, New Zealand, *GSA* 111, 1: 28-38.

Cronin, S., Procter, J., Patra, A., Sheridan, M.F., Dalbey, K. 2004. Evaluating a 2-D granular flow numerical model for prediction of lahars from crater lake at Ruapehu. *Geological Society of New Zealand, New Zealand Geophysical Society, 26th New Zealand Geothermal Workshop*.

Cuevas, A., Seefoo, J.L. 2005. Reubicación y desarticulación de la Yerbabuena entre el riesgo volcánico y la vulnerabilidad política. *Desastros, Saberes y Razones*. Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. SIESAS

Davila, N., Capra, L., Gavilanes-Ruiz, J.C., Varley, N., Norini, G., Gómez., Vazquez, A. 2007. Recent lahars at Volcan de Colima (Mexico): Drainage variation and spectral classification. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 165: 127–141.

De La Cruz Reyna, S., 1993. Random patterns of activity of Colima Volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 55: 51-58.

Días, S. 1906. Efemérides del Volcán de Colima según las observaciones practicadas en los observatorios de Zapotlan y Colima de 1893 a 1905. *Secretaría de Fomento, México*. 168 pp.

Ecos de la Costa. 2009. [www.ecosdelacosta.com.mx/index](http://www.ecosdelacosta.com.mx/index) Patricia Olguín

Fisher, R., Schminke, S. 1984. *Piroclastic Rocks*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 472 pp.

Galindo, I., Elizalde, A., Solano, R., Cruz, M. 1998. *Climatología del Volcán de Colima*. Universidad de Colima 73 pp.

Gavilanes, J.C. 2004. Simulación de escenarios eruptivos del Volcán de Colima y aportaciones al plan de contingencias del volcán de Colima. Tesis de maestría, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. 123 pp.

Geophysical Mass Flow Group GMFG. TITAN2D User Guide. Release, 2007, University at Buffalo, EUA. <http://www.gmgf.buffalo.edu>

Gonzalez–Pomposo, G.J, Martin-Del Pozzo, A.L, Panohaya, J., Gante, J.A. 1993. Estudio de la sismicidad y deformación del Volcán de Colima durante la crisis de abril 1991. *Geofísica Internacional*, 32, 4: 671-682.

Gobierno del Estado de Colima, 2008 Reporte de Actividad del Volcán de Colima [www.colima-estado.gob.mx](http://www.colima-estado.gob.mx)

Gobierno del Estado de Colima, 2009 Reporte de Actividad del Volcán de Colima [www.colima-estado.gob.mx/](http://www.colima-estado.gob.mx/)

GVN 1999 Global Volcanism Network, Smithsonian Institution Colima, Bulletin .  
<http://www.volcano.si.edu/reports/>

GVN 2004 Global Volcanism Network, Smithsonian Institution Colima, Bulletin .  
<http://www.volcano.si.edu/reports/>

Iverson, R.M., Shilling, S.P., Vallance, J.W. 1998. Objective delineation of areas at risk from inundation by lahars: *Geological Society of America*. 110, 8: 972-984.

INEGI: Censo general de población y vivienda 2000. Colima. [www.inegi.gob .mx](http://www.inegi.gob.mx)

INEGI: Conteo de población y vivienda 2005. Colima. [www.inegi.gob .mx](http://www.inegi.gob.mx)

Kerle, N., Wyk de Vries, B., Oppenheimer, C., 2003. New insight into the factors leading to the 1998 flank collapse and lahar disaster at Casita volcano, Nicaragua, *Bulletin of Volcanology* 65: 331-345.

Lasaga, D. 1793. Descripción Geográfica del partido de Colima, 85 pp.

Lavigne, F., Thouret, J.C., Voight, B., Suwa, H., Sumaryono, A. 2000. Lahars at Merapi Volcano, Central Java: an overview, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 100: 423-456.

Luhr J F, Carmichael I S E, 1982. The Colima volcanic complex, Mexico: III. Ash- and scoria-fall deposits from the upper slopes of Volcan Colima. *Contr Mineral Petr*, 80: 262-275

Luhr, J.F., Prestegard, K.L. 1988. Caldera formation at Volcán Colima, México, by large Holocene volcanic debris avalanche. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 35: 335–348.

Luhr, J.F., Carmichael, S.E. 1990. Geology of Volcán de Colima Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. 107:1-101.

Luhr, J.F. 2002. Petrology and Geochemistry of the 1991 and 1998-1999 lava flows from Volcan de Colima, México: implications for the end of the current eruptive cycle, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 117: 169-194.

Lugo, J., Martin Del Pozzo, A.L., Vazquez, L. 1993. Estudio Geomorfológico del complejo volcánico de Colima. *Geofísica Internacional*. 32, 4: 633-641.

Martin Del Pozzo, A.L., Romero, V.H., Ruiz, R.E. 1987. Los Flujos Piroclásticos del Volcán de Colima, México. *Geofísica Internacional*. 26, 2: 291-307.

Martin del Pozzo, A. L., V. H. Romero M., 1989. El origen de la caldera del Volcán de Colima. *Litósfera*, 2 (1): 25-42.

Martín Del Pozzo, A.L., Sheridan, M., Barrera D., Lugo, J., Vazquez, L. 1995. Potencial hazards from Colima volcano, Mexico. *Geofísica Internacional*. 34, 4: 363-376.

Martin Del Pozzo, A.L., Fonseca, R., Barrera, D., 2002. El Volcán de Colima, la erupción de 1913. *Desastres Naturales en América Latina*. Fondo de Cultura Económica. México. 85-100 pp.

Macias, J., Capra, L. 2005. Los Volcanes y sus Amenazas. Colección La Ciencia para Todos, Fondo de Cultura Económica. 159 pp.

Mooser, F., 1961 Los Volcanes de Colima. Instituto de Geología. 61: 49-71.

Medina-Martinez, F., 1983. Analysis of the eruptive history of the Volcan de Colima, Mexico (1560-1980). *Geofísica Internacional*. 22: 157-178.

Murcia, H., 2008. Depósitos de lahar del Complejo Volcánico Tacaná y depósitos fluviales en el Abanico de Tapachula, Chiapas–México Tesis de Maestría, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. 152 pp.

Navarro-Ochoa, C., Gavilanes, J., Cortes, A. 2002. Movement and emplacement of lava flows at Volcan de Colima, Mexico: Nov. 1998-Feb. 1999. *Journal Volcanology and Geothermal Research*. 117: 155-167.

Nieto, A. 2008. Efectos de la caída de ceniza en la biota del área del Volcán de Colima. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. 65 pp.

Ortiz, S.G., 1944. La zona volcánica "Colima" del Estado de Jalisco. Instituto de Geografía, Universidad de Guadalajara, p. 44.

Ortoll, S. 1988. Colima, una historia compartida; México, SEP, Instituto Mora. 45, 390-400.

Pérez de León, J.M. 1789. Descripción del Distrito de Colima y del Corregimiento de San Miguel Xilotlán en 1789, En: Documentos para la historia de Colima: Siglos XVI-XIX, México 1979, 252.

Pierson, T.C., Scott, K.M. 1985. Downstream dilution of a lahar: Transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Resources Research*. 21: 1511-1524.

Pierson, T.C., Costa, J.E. 1987. A rheologic classification of subaerial sediment water flows. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*. 7: 1-12.

Pierson, T.C., Janda, R.J., Thouret, J.C., Borrero, C.A. 1990. Perturbation and Melting of Snow and Ice by the 13 November 1985 Eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and Consequent Mobilization, Flow and Deposition of Lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 41: 17-66.

Pierson, T. 1995. Flow characteristics of large eruption-triggered debris flows at snow-clad volcanoes: constraints for debris flow models. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 66: 283-294.

Pierson, T.C. 2005. Hyperconcentrated flow-transitional process between water flow and debris flow. Springer Berlin Heidelberg. 159–202.

Procter, J.N., Cronin, S.J., Fuller, I.C., Sheridan, M., Neall, V.E., Keys, H. 2010. Lahar hazard assessment using Titan2D for an alluvial fan with rapidly changing. *Geomorphology: Whangaehu River, Mt. Ruapehu, Geomorphology*. 116: 162–174.

Puga, G.B. 1889-1890. La última erupción del Volcán de Colima. *Memorias. Sociedad Científica Antonio Alzate, México*. 3: 97-102.

Rodríguez-Elizarras, S., Siebe, C., Komorowski, J.C., Espindola, J.M., Saucedo, R., 1991. Field observations of pristine block and ash-flow deposits emplaced April 16-17, 1991 at Volcan de Colima, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 48: 399-412.

Rodríguez-Elizarrarás, S.R. 1995. Estratigrafía y estructura del volcán de Colima, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 12, 1: 22-46.

Rodríguez-Elizarrarás, S.R., Mora-González, I., Murrieta-Hernández, J.L. 2007. Flujos de baja concentración asociados con lluvias de intensidad extraordinaria en el flanco sur del volcán Pico de Orizaba (Citlaltepctl), México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 58, 2: 223-236.

RESCO, 2008. Red Sismológica de Colima. <http://resco.ucol.mx/>

Rickenmann, D. 1999. Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards*. 19: 47–77.

Saucedo, R. (1997). Reconstrucción de la Erupción de 1913 del Volcán de Colima, Tesis de maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 185 pp.

Saucedo, R., Macías, J.L., Bursik, M.I., Gavilanes, J.C., Cortés, A. 2002. Emplacement of pyroclastic flows during the 1998–1999 eruption of volcán de Colima, México, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 117: 129–153.

Saucedo, R., Macías, J.L., Sheridan, M.F.; Bursik, M.I., Komorowski, J.C. 2005. Modeling of pyroclastic flows of Colima Volcáno. México: implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 139: 103–115.

Saucedo, R., Macías, J.L., Sarocchi, D., Bursik, M., Rupp, B. 2008. The rain-triggered Atenquique volcanic debris flow of October 16, 1955 at Nevado de Colima Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 173: 69–83.

Saucedo, R. Macías, J.L. Gavilanes, J.C. Arce, J.L. Komorowski, J.C. Gardner, J.E. Valdez-Moreno, G., 2010. Eyewitness, stratigraphy, chemistry, and eruptive dynamics of the 1913 Plinian eruption of Volcán de Colima, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 191 (2010) 149–166.

Scott, K.M., 1988. Origins, behaviour, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz River System. U.S. Geological Survey Professional Paper, vol. 1447-A. 74 pp.

Salazar, J. 1992. Comala ayer Comala hoy, Universidad de Colima, Ayuntamiento de Comala, 153 pp.

SCT, 2002. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. <http://www.sct.gob.mx>

Smith, G.A., Fritz, W.J., 1989. Volcanic influences on terrestrial sedimentation. *Geology* 17, 375–376.

Smith, G.A., Lowe, D.R. 1991. Lahars: Volcano-hydrologic events and deposition in the debris flow – hyperconcentrated flow continuum. En: Fisher, R.V. y Smith, G.A., eds. *Sedimentation in Volcanic Settings*. Society for Sedimentary Geology, Special Publication 45: 59-70.

Starr, F. and J.M. Arreola 1903. The Recent Eruptions of Colima, *J. Geol.*, 11 (8), 749-761.

Stoopes, G.R. y Sheridan, M.F. 1992. Giant debris avalanches from the Colima Volcanic Complex, Mexico: Implication for long-runout landslides (>100 km). *Geology* 20 (1992), pp. 299–302.

Tello, F.A. 1651. Libro segundo de la Crónica Miscelánea de la conquista espiritual y de la Santa Provincia de Xalisco en el Nuevo Reino de la Galicia y Nueva Vizcaya y Descubrimiento del Nuevo México, Guadalajara, 886 pp.

- Thorpe, R.A., Gibson, I.L. and J.S. Vízcaíno 1977. Andesitic pyroclastic flows from Volcán de Colima, *Nature*, 265, 724-725.
- Thouret, J.C., Lavigne, F., Suwa, H., Sukatja, B. 2007. Volcanic Hazards at Mount Semeru, East Java (Indonesia), with emphasis on lahars, *Bulletin of Volcanology*. 70: 221-244.
- Thouret, J.C., Abdurachman, K.E., Bourdier, J.L., Bronto, S. 1998. Origin, characteristics, and behaviour of lahars following the 1990 eruption of Kelud volcano, eastern Java (Indonesia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 59: 460-480.
- Toyos, G., Oramas-Dorta, D., Oppenheimer, C., Pareschi, M.T., Sulpizio, R., Zanchetta, G. 2007. GIS-assisted modelling for debris flow hazard assessment based on the events of May 1998 in the area of Sarno, Southern Italy: Part I. Maximum run-out. *Earth Surface Processes and Landforms*. 32: 1491–1502.
- Toyos, G., Gunasekera, R., Zanchetta, G., Oppenheimer, C., Sulpizio, R., Favalli, M., Pareschi, M.T. 2008. GIS-assisted modelling for debris flow hazard assessment based on the events of May 1998 in the area of Sarno, Southern Italy: II. Velocity and dynamic pressure, *Earth Surface Processes and Landforms*. 33: 1693–1708.
- Universidad de Colima. 2002 Boletín vulcanológico, [www.ucol.mx](http://www.ucol.mx)
- Universidad de Colima. 2004. Boletín vulcanológico, [www.ucol.mx](http://www.ucol.mx)
- Universidad de Colima 2007. Boletín vulcanológico, [www.ucol.mx](http://www.ucol.mx)
- Valencia, S. 1992. Comala ayer Comala hoy. Universidad de Colima, Colima. 153 pp.
- Varley, N., Bernstein, M., Lavallée, Y., Ryan, A., Gavilanes, J.C. 2009. Monitoring and risk evaluation at Volcán de Colima: the 2007-2009 slow effusive eruption, *Memorias 250<sup>th</sup> anniversary of Volcán Jorullo's birth in Michoacan.* pp 56.
- Varley, N., Arámbula-Mendoza, R., Reyes-Dávila, G., Sanderson, R., Stevenson, J. 2010. Generation of Vulcanian activity and long-period seismicity at Volcán de Colima, Mexico *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 198, 45-56.
- Vallance, J.M., Scott, K.M. 1997. The Osceola mudflow from Mount Rainier: Sedimentology and hazard implications of a huge clay-rich debris flow. *Geological Society American Bulletin*. 9: 143-163.
- Vallance, J.W. 2000. Lahars. In *Enciclopedia of volcanoes*, edited by H. Sigurdsson. (London: Academic) 601-616.
- Vizcaíno, 1993. Notas sobre el volcán de colima, *Geofísica Internacional*. 32, 4: 699-701.
- Zobin, V.M., Plascencia, I., Reyes, G., Navarro C. 2009. The characteristics of seismic signals produced by lahars and pyroclastic flows: Volcán de Colima, México *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 179: 157–167.

Varnes, D.J. (1978), Slope movement types and processes. R.L. Schuster (Ed.). Landslides: Analysis and control - Special Report 176. National Academy of sciences, Washington DC, pp. 11-33.

Waitz, P., 1932. Datos históricos y bibliográficos acerca del volcán de Colima. Memorias Revista Sociedad Científica Antonio Alzate, México. 53: 349-384.

Yu B, Dalbey K, Webb A, Bursik M, Patra AE, Pitman B, Nichita CC (2009) Numerical issues in computing inundation areas over natural terrains using Savage-Hutter theory. *Natural Hazards* 50: 249-267

Zobin, V.M., J.F. Luhr, Y.A. Taran, M. Breton, A. Cortés, S. De la Cruz-Reyna, T. Dominguez, I. Galindo, J. Gavilanes, J. Muñiz, C. Navarro, J. Ramirez, G. Reyes, M. Ursua, J. Velasco, E. Alatorre and H. Santiago 2002. Overview of the 1997-2000 activity of Volcán de Colima, México, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 117, 1-19.

Zobin, V.M., Varley, N.R., González, J.O., Reyes, G., Navarro, C., Bretón, M. 2008. Monitoring the andesitic block-lava extrusion at Volcán de Colima, México from seismic activity and SO<sub>2</sub> emission. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 177, 367-377.