



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOCIENCIAS
VULCANOLOGÍA

**ESTUDIO DE PROCESOS EROSIVOS POR
LAHARES POST- ERUPTIVOS: BARRANCA
MONTEGRANDE, VOLCÁN DE COLIMA 2015-
2017.**

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA:

PRESENTA:

IXTLITZIN YAOCIHUATL BRAVO CARVAJAL

TUTORA PRINCIPAL:
DRA. LUCIA CAPRA PEDOL
CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM.

JURIQUILLA, QRO 2019



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.

DECLARATORIA DE ETICA

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.



Ixtlitzin Y. Bravo Carvajal

*“En tiempos de cambio, quienes estén abiertos al aprendizaje se adueñarán del futuro,
mientras que aquellos que creen saberlo todo estarán bien equipados
para un mundo que ya no existe.”*

Eric Hoffer

ESTE TRABAJO LO DEDICO

A mis padres

Por brindarme su apoyo incondicional y motivación para lograr una meta más. Sin ustedes mi vida seria otra.

Muchas gracias por tanto y por todo, Los quiero inmensamente.

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, por permitirme ser parte de ella, por haberme brindado la oportunidad de lograr otra meta de vida. Es un orgullo haber estudiado en una de las mejores universidades del mundo, ser de sangre azul y oro, gracias, UNAM, “Por mi raza hablará el espíritu”.

A la **Dra. Lucia Capra Pedol**, por su apoyo, paciencia, tiempo y atención durante el desarrollo de este trabajo. Por permitirme ser parte de su equipo de trabajo y brindarme la oportunidad de adentrarme en el mundo de la Vulcanología. Es una persona admirable. Gracias totales.

A mis sinodales **Dra. Ana María Lizeth Caballero García, Dr. Víctor Hugo Márquez Ramírez, Dr. Lorenzo Vázquez Selem y Dra. Norma Dávila Hernández**, por su tiempo, disposición, comentarios y oportunas observaciones para enriquecer la presente tesis.

Al proyecto PAPIIT-DGAPA Clave IN105116: “*Actividad eruptiva asociada a colapso de domo en el Volcán de Colima: estudio vulcanológico integral y evaluación del peligro*” y al proyecto CONACYT -PN 360 convocatoria 2015: “*Prevención de desastres naturales asociados a eventos hidrometeorológicos en los volcanes activos mexicanos*”, por el apoyo económico para la elaboración de este trabajo, y a su vez, al **Centro de Geociencias**, por brindarme la oportunidad de adentrarme en el mundo de la investigación, por permitirme usar sus instalaciones y tener un espacio de trabajo y por servir de motivación para lograr esta meta.

Al **Mtro. Amiel Nieto Torres** por siempre brindarme su apoyo y experiencia. Por darme consejos, motivación y confianza para seguir con crecimiento académico. Mil gracias, Amiel.

A mis personitas de vida (**Alex, Milton, Sebastián, Roy, Manu, Sharon, Mariana y Mich**) por confiar en mí y por siempre estar a mi lado motivándome a seguir, brindándome fuerzas y llenando mi vida de colores, Gracias totales, ¡Los quiero!

A todas y cada una de las personas que de alguna forma contribuyeron a que esta meta se cumpliera, ¡¡**Muchas gracias!!**

RESUMEN

El volcán de Colima es uno de los volcanes más activos de México, ubicado en la parte occidental del Cinturón Volcánico Trans-mexicano. La recurrente actividad explosiva ha generado grandes volúmenes de material en las barrancas principales propiciando la formación de lahares durante la temporada de lluvias.

La erupción ocurrida los días 10 y 11 de julio del 2015 generó flujos piroclásticos que se emplazaron a lo largo de la barranca Montegrande, en el sector sur del volcán, hasta una distancia de 10.5 km. Los depósitos asociados no solamente rellenaron el canal sino también desbordaron, cubriendo con más de 4 m de depósito a las terrazas laterales, y provocaron un cambio morfológico drástico en uno de los canales más activos en cuanto a la generación de lahares. Dicho cambio en la barranca de Montegrande a raíz de la erupción de julio 2015, representa una oportunidad única para entender los procesos erosivos en volcanes activos, especialmente después de un evento eruptivo cuando la formación de lahares es más frecuente y de mayor magnitud.

A partir de la última erupción se realizaron monitoreos morfológicos en diferentes sectores de la barranca para estudiar la evolución morfológica del canal, su recuperación, y los mecanismos que en mayor medida controlan los procesos erosivos. Con base en lo anterior, se pretendió estudiar los procesos erosivos por los lahares post-eruptivos que se formaron en la barranca Montegrande durante el periodo de 2015- 2017, con la finalidad de entender la relación que existe entre la ocurrencia de estos flujos y la influencia de la precipitación, así como también, la evolución morfológica que ha presentado la barranca durante este periodo.

Al comparar la distribución de las lluvias acumuladas en los años 2015, 2016 y 2017 se observó que el 2015 (1728 mm) fue un año extraordinario en cuanto a precipitación con dos eventos extremos (Huracán Patricia y un frente frío en el mes de marzo) mientras que en los años 2016(1223 mm) y 2017 (978.6 mm) se observa un comportamiento similar entre ellos.

El análisis de la señal sísmica de los lahares registrados en el periodo 2015-2017 se llevó a cabo en un rango de frecuencia de los 5 a los 50 Hz con base en la visualización de la señal sísmica. Se observó que el frente del lahar se registra dentro del rango de 5 a 30 Hz, mientras que el cuerpo y su porción más diluida en la parte

recesional, en frecuencias que oscilan entre los 10 y 50 Hz. Para la discriminación entre un evento de lahar y ruido de la señal sísmica se utilizó un umbral de amplitud de 10^{-3} m/s, a partir de ese umbral se pudieron identificar las distintas partes del flujo y hacer la caracterización de este.

De los tres años estudiados, el 2016 fue el año que presentó un mayor número de lahares (25 en 2016; 12 en 2015 y 22 en 2017). A su vez se pudo constatar que los lahares siempre se presentan en la temporada de lluvias (jun-oct), con excepción del año 2015 en donde se presentó un lahar de magnitud significativa en el mes de marzo (9.8×10^{-2} cm/s) asociado al evento de lluvia extraordinario provocado por el frente frío No. 41y su interacción con la novena tormenta invernal.

El análisis de los cambios morfológicos de la barranca Montegrande muestra una tendencia hacia procesos deposicionales durante los años 2015 y 2016, tanto en el sector recto como en el sector de curva y a procesos erosivos durante el 2017.

Con base en los resultados obtenidos se pudo observar que después del emplazamiento del flujo piroclástico en el 2015, la superficie del canal quedó homogénea, por lo que las escorrentías superficiales no tenían un canal preferencial para su concentración y acumulación de sedimentos. Esta tendencia continúa durante el 2016, y a pesar de que fue el año en que se presentó una mayor cantidad de lahares, estos fueron de corta duración y baja magnitud (espesor del flujo < 2 m) para que predominaran procesos erosivos.

A finales del 2016 comienzan a formarse canales definidos, lo que facilitó durante la temporada de lluvia del 2017 la concentración de los escurrimientos en un canal principal y la formación de flujos de mayor magnitud (profundidad) y con mayor poder erosivo.

En la desembocadura, se observó un comportamiento muy diferente. La información morfológica analizada muestra que del año 2015 al 2017, los procesos erosivos predominaron y no hubo acumulación de material. Sin embargo, es importante señalar que esto debido probablemente a procesos antrópicos ya que, durante estos años se retiró material constantemente para encausar los flujos y evitar daños a las poblaciones cercanas.

Con los datos aquí obtenidos, a raíz de la erupción del 2015 se ha observado una inversión en la tendencia, ya que, aunque el 2015 haya sido el año con mayor

disponibilidad de sedimentos (producto de la erupción) y de mayor acumulación de lluvia, fue el año con el menor número de lahares y de menor magnitud. Esta tendencia la hemos relacionado al cambio drástico en la morfología de la barranca, y a la falta de un canal principal para la concentración de los escurrimientos principales. Es solamente a partir del 2017 que ya se observa un regreso a las condiciones de formación de lahares como fueron descritos antes de la erupción del 2015. Es posible que en los años posteriores ocurran flujos de magnitudes mayores; sin embargo, éstos irán siendo cada vez menos frecuentes y se requerirá de mayor intensidad de lluvia, tales como las ocurridas en 2015, para desencadenar un flujo, hasta que finalmente llegue a su etapa de estabilidad una vez más.

El presente trabajo representa una contribución para el mejor entendimiento de estos fenómenos en volcanes activos ubicados en zonas tropicales, con la integración de herramientas multidisciplinarias en diversos campos de las ciencias de la Tierra tales como Geomorfología, Hidrología, Geología, Geomática, Sismología y Geografía de los Riesgos. Finalmente, este trabajo aspiraría a convertirse en una pauta para que puedan desarrollarse programas de prevención, mitigación y manejo del riesgo de desastres asociados a lahares.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	21
a) Hipótesis	22
b) Justificación	23
c) Objetivo general y particulares	24
d) Contenido de la tesis	24
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	27
1.1. Los lahares	27
1.2. El Volcán de Fuego de Colima	36
1.3. Zona de estudio: Barranca Montegrande	38
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.	41
2.1. Análisis de datos de precipitación de los años 2015, 2016 y 2017.	41
2.2. Catálogo de lahares 2015- 2017.	44
2.3. Análisis de los cambios morfológicos de la barranca Montegrande.	47
CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN EN EL VOLCÁN DE COLIMA, 2015-2017.	51
3.1. Precipitación del año 2015	51
3.2. Precipitación del año 2016	62
3.3. Precipitación del año 2017	73
CAPÍTULO IV. LAHARES EN LA BARRANCA MONTEGRANDE, 2015- 2017.	83
4.1. Análisis de las señales sísmicas por lahares en el Volcán de Colima.	83
4.2. Catálogo de lahares Barranca Montegrande, 2015	87
4.3. Catálogo de lahares Barranca Montegrande, 2016	98
4.4. Catálogo de lahares Barranca Montegrande, 2017	106
CAPÍTULO V. ANALISIS MORFOLÓGICO DE LA BARRANCA MONTEGRANDE Y EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS EROSIVOS	131
5.1. Cambios morfológicos en la zona media de la barranca: estación de monitoreo	135

5.2. Cambios morfológicos en la zona distal de la barranca. _____	143
CAPÍTULO VI DISCUSIÓN _____	159
6.1. Precipitación del periodo 2015 a 2017 en la barranca Montegrande. _____	159
6.2. Análisis de señales sísmicas para la caracterización de lahares en la barranca Montegrande. _____	162
6.3 Cambios morfológicos de la barranca Montegrande en el periodo 2015- 2017. ____	169
CONCLUSIONES _____	174
REFERENCIAS _____	177
HEMEROGRAFÍA _____	187

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Estructura de un lahar, trayectoria y segregación por tamaño de partícula. ____	30
Figura 1.2. Mapa de ubicación del Volcán de Colima y de la zona de estudio: Barranca Montegrande. _____	38
Figura 2.1. a) Estación HOBO que registra la precipitación en la barranca Montegrande. b) Estación de monitoreo ubicada en la sección media de la barranca Montegrande. _____	41
Figura 2.2. Ubicación de la estación meteorológica automática (EMA) Nevado de Toluca, perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN). _____	42
Figura 2.3. Ubicación de la estación de precipitación HOBO, la estación de la Red Sísmica de la Universidad de Colima (RESCO) y la estación de monitoreo de lahares del Centro de Geociencias, UNAM, en donde se encuentra otra estación HOBO. _____	44
Figura 2.4. Señal sísmica de un lahar multipulso en donde se pueden identificar las partes del flujo. _____	46
Figura 2.5. Modelos digitales de elevación elaborados de la sección media y distal de la Barranca Montegrande. _____	47
Figura 2.6. Ejemplo de elaboración de secciones transversales en Microsoft Excel, mediante la información obtenida de los MDE. _____	48
Figura 2.7. Ejemplo de levantamiento de secciones transversales, mediante la información obtenida de los MDE. _____	49
Figura 3.1. Climatología y precipitación (mm) 2015. Estimaciones de lluvia promedio mensual y acumulada a nivel nacional en 2015 (barras y línea azul) comparada con el promedio de largo periodo 1941 – 2013. _____	51
Figura 3.2. Precipitación acumulada mensual nacional en mm del mes de marzo del 2015, en donde se puede observar que, en la costa del pacífico, específicamente en los estados de Colima y Jalisco la precipitación acumulada fue > 150 mm y > 300 mm _____	51
Figura 3.3. Trayectoria del huracán Patricia del 20 al 24 de octubre del 2015 _____	53
Figura 3.4. A) Imagen en infrarrojo METOP-8 mejorada del huracán Patricia el 23 de octubre del 2015. Cortesía de CIRA (tomada de NOAA- NHC, 2015). B) Fotografía facilitada por la NASA del 23 de octubre del 2015 donde muestra el huracán Patricia a su llegada a la costa de México _____	54
Figura 3.5. Precipitación acumulada mensual nacional en mm del mes de octubre del 2015 _	54

- Figura 3.6.** Precipitación mensual del año 2015 del estado de Colima. _____56
- Figura 3.7.** Precipitación acumulada del año 2015 en el estado de Colima. _____56
- Figura 3.8.** Imagen interpretada con los principales sistemas meteorológicos del 14 de marzo de 2015. _____57
- Figura 3.9.** Lluvias acumuladas del 14 al 15 de junio de 2015. Se muestra la trayectoria que siguió el huracán Carlos. _____57
- Figura 3.10.** Intensidad de la lluvia reportada en la estación automática Nevado de Colima durante el impacto del huracán Patricia en tierra. _____58
- Figura 3.11.** Intensidad promedio de precipitación de la estación Nevado de Colima SMN. Se observa que los meses con mayor intensidad fueron julio y octubre. _____61
- Figura 3.12.** Intensidad máxima del año 2015, de la estación Nevado de Colima SMN. _____61
- Figura 3.13.** Trayectoria del huracán Earl (2 al 6 de agosto de 2016). Tomado de: Stewart, R.S., (2017a) _____64
- Figura 3.14.** Trayectoria de la tormenta tropical Javier (7-9 de agosto 2016). Tomado de: Stewart, R.S., (2017b). _____64
- Figura 3.15.** Trayectoria del huracán Newton (4 al 7 de septiembre de 2016). Tomado de: Berg (2017). _____65
- Figura 3.16. A)** Cantidad de precipitación (mm) de la costa del Pacífico oriental por el paso del huracán Frank. **B)** Precipitación acumulada a nivel nacional de Julio 2016 _____66
- Figura 3.17. A)** Cantidad de precipitación (mm) de la costa del Pacífico oriental por el paso de la tormenta tropical Javier. **B)** Precipitación acumulada a nivel nacional de agosto 2016 _____67
- Figura 3.18. A)** Cantidad de precipitación (mm) de la costa del Pacífico oriental por el paso del huracán Newton. **B)** Precipitación acumulada a nivel nacional de septiembre 2016 _____68
- Figura 3.19** Precipitación registrada en la barranca Montegrande del volcán de fuego de Colima, en el año 2016 _____70
- Figura 3.20.** Precipitación acumulada registrada en la barranca Montegrande del volcán de fuego de Colima, en el año 2016. Se puede observar a partir de junio hay un incremento en los eventos de precipitación lo que marca claramente la temporada de lluvias de eso año. _____70
- Figura: 3.21.** Intensidad promedio año 2016, en la barranca Montegrande en el Volcán de Colima. Se observa que los meses con mayor intensidad fueron junio, julio y agosto. _____72

Figura 3.22. Intensidad máxima del año 2016, de la barranca Montegrando en el Volcán de Colima. Se observa que los meses con eventos significativos fueron junio y agosto.	72
Figura 3.23. Trayectoria del huracán Dora (23 al 27 de junio 2017). Tomado de Berg, 2018.	75
Figura 3.24. Trayectoria de la tormenta tropical Pilar (23 al 24 de septiembre 2017).	76
Figura 3.25. Precipitación registrada en la barranca Montegrando del volcán de fuego de Colima, en el año 2017.	78
Figura 3.26. Precipitación acumulada registrada en la barranca Montegrando del volcán de fuego de Colima, en el año 2017	78
Figura 3.27. Intensidad promedio de los eventos de precipitación mayores a una hora en la barranca Montegrando, Volcán de fuego, Col.	80
Figura 3.28. Intensidad máxima calculada a un intervalo de 5 min, de los eventos de precipitación mayores a una hora en la barranca Montegrando, Volcán de fuego, Col.	80
Figura 4.1. Ejemplo de lahar de un solo pulso registrado el 24 de julio de 2012. Tomado de: Vázquez et al., 2016.	85
Figura 4.2. Ejemplo de lahar multipulso registrado el 11 de junio de 2013. Tomado de: Vázquez et al., 2016.	85
Figura 4.3. Lahares formados el 17 de marzo del 2015.	88
Figura 4.4. Registro sísmico del lahar 1 formado a las 00:45 hrs GMT el 17 de marzo de 2015	88
Figura 4.5. Espectro de frecuencias del lahar del 17 de marzo del 2015. CD: Corrientes diluidas; FEB: Frentes enriquecidos en bloques.	89
Figura 4.6. A) Segundo lahar formado a las 05:15 hrs GMT; B) Espectro de frecuencias del segundo lahar.	90
Figura 4.7. A) Lahar del 4 de julio, en donde se puede apreciar que únicamente hay un frente principal. B) Espectro de frecuencias del lahar del 4 de julio de 2015.	92
Figura 4.8. Imagen tomada por la cámara de la estación de monitoreo en donde se aprecia el comportamiento del lahar del 4 de julio de 2015	92
Figura 4.9. Imágenes tomadas por la cámara de la estación de monitoreo en donde se aprecia el comportamiento del lahar del 4 de julio de 2015	93
Figura 4.10. A) Lahar de un solo pulso registrado el 6 de julio de 2015. B) Espectro de frecuencias del lahar del 6 de julio de 2015.	94

Figura 4.11. A) Señal sísmica del lahar del 12 de agosto del 2015;	95
Figura 4.12. Espectro de frecuencias del lahar del 12 de agosto de 2015	96
Figura 4.13. A) Lahar registrado el 23 de octubre a las 21:00 hrs GMT; B) Espectro de frecuencias del lahar del 23- 24 de octubre de 2015	97
Figura 4.14. A) Señal sísmica del lahar del 4 de julio del 2016. B) Espectro de frecuencias del lahar del 4 de julio del 2016	99
Figura 4.15. A) Lahar del 23 de julio de 2016. B) Espectro de frecuencias del lahar del 23 de julio del 2016	100
Figura 4.16. Lahar del 29 de julio del 2016.	101
Figura 4.17. Espectro de frecuencias del lahar del 29 de julio del 2016.	101
Figura 4.18. A) Lahar de un solo pulso registrado el 26 de agosto del 2016	102
Figura 4.19. Espectro de frecuencias del lahar del 26 de agosto de 2016	102
Figura 4.20. Lahar multipulso del 30 de agosto del 2016	103
Figura 4.21. B) Espectro de frecuencias del lahar del 30 de agosto del 2016	104
Figura 4.22. A) Lahar del 12 de septiembre de 2016. B) Espectro de frecuencias del lahar del 12 de septiembre del 2016	105
Figura 4.23. Señal sísmica del lahar del 15 de septiembre de 2016.	106
Figura 4.24. Espectro de frecuencia del evento del 15 de septiembre del 2016	106
Figura 4.25. Evento multipulso registrado el 30 de junio del 2017.	108
Figura 4.26. Espectro de frecuencias del 30 de junio del 2017.	108
Figura 4.27. Señal del sensor de infrasonido que registró el paso del lahar del 30 de junio del 2017, en la estación de monitoreo de la barranca Montegrande	109
Figura 4.28. Señal sísmica del lahar del 3 de julio de 2017.	110
Figura 4.29. Espectro de frecuencias del lahar del 3 de julio de 2017	110
Figura 4.30. Presencia de lluvia en la barranca al momento en que el lahar fue registrado por los sensores de la estación de monitoreo.	111

Figura 4.31. Formación de canales secundarios en las zonas en donde se amplía el ancho del canal, y sobre los depósitos de las terrazas más antiguas _____	111
Figura 4.32. Frente principal del flujo, enriquecido en bloques. _____	111
Figura 4.33. Lahar multipulso del 23 de julio del 2017. _____	112
Figura 4.34. Espectro de frecuencias del lahar del 23 de julio del 2017. _____	113
Figura 4.35. Barranca Montegrande antes del paso del lahar. _____	113
Figura 4.36. Depósitos del lahar del 23 de julio del 2017 _____	113
Figura 4.37. Señal sísmica del lahar del 28 de julio del 2017. _____	115
Figura 4.38. Espectro de frecuencias del lahar del 28 de julio del 2017. _____	115
Figura 4.39. Barranca Montegrande antes de la lluvia que provoco el lahar del 28 de julio del 2017. _____	116
Figura 4.40. Formación de escorrentías secundarias al canal principal. La flecha roja indica el canal principal y las flechas amarillas indican las escorrentías secundarias. _____	116
Figura 4.41. Corriente diluida previa al frente principal del lahar. _____	117
Figura 4.42. Primer pulso registrado a las 00:20 hrs GMT. Se puede observar la presencia de bloques de gran tamaño en el frente del pulso. _____	117
Figura 4.43. Pulso identificado alrededor de las 00:30 hrs GMT. _____	118
Figura 4.44. Frente principal identificado a las 00:36:15 hrs GMT. Se puede observar que el frente estaba enriquecido en bloques de gran tamaño, y tenía una alta energía ya que estos bloques viajaron una gran distancia (Flechas amarillas). _____	118
Figura 4.45. Varios pulsos con carga de bloques de gran tamaño (Flechas amarillas). _____	119
Figura 4.46. A las 00:59 hrs GMT dejo de llover y el flujo aún seguía _____	119
Figura 4.47. Señal sísmica del lahar del 8 de semptiembre de 2017 _____	120
Figura 4.48. Espectro de frecuencias del lahar del 8 de septiembre de 2017. _____	121
Figura 4.49. Señal sísmica del lahar del 20 de octubre del 2017. _____	122
Figura 4.50. Espectro de frecuencias del lahar del 20 de octubre de 2017. _____	122
Figura 4.51. Lahares que se formaron en la barranca Montegrande en el año 2015. _____	124

Figura 4.52. Valores de amplitud máxima y cantidad de lluvia acumulada de los lahares que ocurrieron en el año 2015_____	125
Figura 4.53. Relación de amplitud máxima acumulada y lluvia acumulada_____	125
Figura 4.54. Lahares que se formaron en la barranca Montegrande en el año 2016_____	126
Figura 4.55. Precipitación acumulada y valores de amplitud máxima por evento del año 2016._____	127
Figura 4.56. Relación de amplitud máxima y lluvia acumulada. _____	127
Figura 4.57. Lahares que se formaron en la barranca Montegrande en el año 2017_____	129
Figura 4.58. Distribución de valores de amplitud máxima y precipitación acumulada por evento_____	129
Figura 4.59. Relación de amplitud máxima y lluvia acumulada. _____	130
Figura 5.1. Perfil longitudinal de la barranca Montegrande. _____	132
Figura 5.2. <i>Izquierda:</i> Mapa de la barranca Montegrande antes y después de la erupción de julio 2015. <i>Derecha:</i> perfiles transversales de los distintos puntos de la barranca _____	133
Figura 5.3. Sección D (zona distal) de la barranca Montegrande, ápice del depósito de abanico_____	134
Figura 5.4. Sección E (zona distal) de la barranca Montegrande, depósito de abanico_____	134
Figura 5.5. Ejemplo de secciones transversales y su orientación con respecto al volcán.____	135
Figura 5.6. Fotografías de la porción MG1710. A) agosto 2016. Se observa un canal principal de 12 a 20 metros de ancho y escorrentías secundarias menores al oeste del canal; B) diciembre 2016, el canal principal fue rellenado y únicamente quedó un pequeño canal en el costado oriental de la barranca._____	136
Figura 5.7. A) marzo 2017, no se aprecia un canal principal, solo escorrentías someras; B) octubre- noviembre 2017 _____	136
Figura 5.8. Sección 1 de la porción media de la barranca Montegrande MG1710_____	137
Figura 5.9. Sección 2 de la porción media de la barranca Montegrande MG1710 _____	138
Figura 5.10. Sección 3 de la porción media de la barranca Montegrande MG1710 _____	138
Figura 5.11. Sección 4 de la porción media de la barranca Montegrande MG1710_____	139

Figura 5.12. Fotografías de la porción MG1712. A y B) agosto - diciembre 2016, no se observan cambios significativos. En algunas partes se aprecia mayor erosión en el canal principal que permiten diferenciar las terrazas de los distintos lahares C) octubre-noviembre 2017.	140
Figura 5.13. Sección 1 de la porción media de la barranca Montegrande MG1712	141
Figura 5.14. Sección 2 de la porción media de la barranca Montegrande MG1712	141
Figura 5.15. Sección 3 de la porción media de la barranca Montegrande MG1712	142
Figura 5.16. Sección 4 de la porción media de la barranca Montegrande MG1712	143
Figura 5.17. Fotografías de la porción MG1721. A) mayo 2017, se aprecian de forma somera varios canales, no existe un canal estable y definido; B) noviembre 2017, se puede observar un canal bien definido del lado occidental de la barranca con una profundidad de ~3.5 metros, y algunos canales secundarios paralelos a este, de profundidades menores.	144
Figura 5.18. Sección 1 de la porción distal de la barranca Montegrande MG1721	144
Figura 5.19. Sección 2 de la porción distal de la barranca Montegrande MG1721	145
Figura 5.20. Sección 3 de la porción distal de la barranca Montegrande MG1721	145
Figura 5.21. Fotografías de la porción MG1722. A) agosto 2015, no existe un canal estable y definido; B) noviembre 2015, se puede observar un canal más definido	146
Figura 5.22. A) mayo 2017, se aprecian dos canales que se bifurcan formando uno solo. B) noviembre 2017, Se aprecia un canal principal bien definido al oeste de la barranca el cual media casi 2 metros de profundidad	146
Figura 5.23. Sección 1 de la porción distal de la barranca Montegrande MG1722	147
Figura 5.24. Sección 2 de la porción distal de la barranca Montegrande MG1722	148
Figura 5.25. Sección 3 de la porción distal de la barranca Montegrande MG1722	149
Figura 5.26. Sección 4 de la porción distal de la barranca Montegrande MG1722	150
Figura 5.27. Sección 1 de la porción depósito de abanico de la barranca Montegrande	151
Figura 5.28. Sección 2 de la porción depósito de abanico de la barranca Montegrande en donde	151
Figura 5.29. Sección 1 de la porción depósito de abanico de la barranca Montegrande	152

- Figura 5.30. Sección 1 y sección 2:** Se puede observar que en el año 2016 predominó la deposición y en el año 2017 predominaron los procesos erosivos y hubo mayor cantidad de lahares. _____153
- Figura 5.31. Sección 3 y sección 4:** Se puede observar que en el año 2016 predominó la deposición y en el año 2017 predominaron los procesos erosivos y hubo mayor cantidad de lahares. _____154
- Figura 5.32. Secciones 1 a 3:** Se puede observar que en el año 2016 predominó la deposición y en el año 2017 predominaron los procesos erosivos y hubo mayor cantidad de lahares. _____155
- Figura 5.33. Sección 4:** Se puede observar que en el año 2016 predominó la deposición y en el año 2017 predominaron los procesos erosivos y hubo mayor cantidad de lahares. _____156
- Figura 5.34. Secciones 1 a 3:** Se puede observar que en el año 2017 predominaron los procesos erosivos y hubo mayor cantidad de lahares. _____156
- Figura 5.35. Sección 1 y sección 2:** Se puede observar que en el año 2015 y 2017 predominaron los procesos erosivos. _____157
- Figura 5.36. Sección 3 y sección 4:** Se puede observar que en el año 2015 y 2017 predominaron los procesos erosivos. _____158
- Figura 5.37. Sección 1 a 3:** Se puede observar que en el año 2015 y 2017 predominaron los procesos erosivos. _____158
- Figura 6.1.** Precipitación acumulada de los años 2015, 2016 y 2017 _____161
- Figura 6.2.** Distribución de la precipitación y del número de lahares durante los años 2015, 2016 y 2017. _____163
- Figura 6.3.** Diagramas que muestran la relacion entre lluvia acumulada, amplitud máxima y duración de los eventos de lahar del año 2015 _____164
- Figura 6.4.** Diagramas que muestran la relacion entre lluvia acumulada, amplitud máxima y duración de los eventos de lahar del año 2016 _____165
- Figura 6.5.** Diagramas que muestran la relacion entre lluvia acumulada, amplitud máxima y duración de los eventos de lahar del año 2017 _____166
- Figura 6.6.** Diagrama que muestra la relacion entre amplitud máxima y duración de los eventos de lahar del año 2017. Color verde: lahar de un solo pulso, Color Rojo: Lahar multipulso. _____168

Figura 6.7. Diagrama que muestra la relación entre amplitud máxima y duración de los eventos de lahar del año 2017. Color verde: lahar de un solo pulso, Color Rojo: Lahar multipulso. _____168

Figura 6.8. Diagrama que muestra la relación entre amplitud máxima y duración de los eventos de lahar del año 2017. Color verde: lahar de un solo pulso, Color Rojo: Lahar multipulso. _____169

Figura 6.9. Sección transversal de la porción media de la barranca Montegrande, donde se aprecia la formación de los nuevos canales principales en el periodo 2016- 2017 _____171

Figura 6.10. Diagramas que muestran el promedio de pérdida y ganancia de material durante el periodo 2016 y 2017 en la porción media de la barranca Montegrande _____173

Figura 6.11. Diagramas que muestran el promedio de pérdida y ganancia de material durante el periodo 2015 y 2017 en la porción distal de la barranca Montegrande. _____173

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Eventos de precipitación mayores a 1 hr y con precipitación acumulada > 10 mm del año 2015 en Colima (CONAGUA,2015).	60
Tabla 3.2. Eventos de precipitación mayores a 1 hr y con precipitación acumulada > 10 mm del año 2016 de la barranca Montegrande en el Volcán de fuego, Colima.	71
Tabla 3.3. Eventos de precipitación mayores a 1 hr y con precipitación acumulada > 10 mm del año 2017 de la barranca Montegrande en el Volcán de fuego, Colima.	79
Tabla 4.1. Eventos de lahar con los valores de amplitud máxima más altos en el año 2015.	124
Tabla 4.2. Eventos de lahar con los valores de amplitud máxima más altos en el año 2016.	126
Tabla 4.3. Eventos de lahar con los valores de amplitud máxima más altos en el año 2017.	128
Tabla 5.1. Resumen de los cambios morfológicos de la barranca media MG1710.	153
Tabla 5.2. Resumen de los cambios morfológicos de la barranca media MG1712.	154
Tabla 5.3. Resumen de los cambios morfológicos de la barranca distal MG1721.	156
Tabla 5.4. Resumen de los cambios morfológicos de la barranca distal MG1722.	157
Tabla 5.5. Resumen de los cambios morfológicos del depósito de abanico.	158

Al Volcán de Colima

Gregorio Torres Quintero

¡Salve, oh titán! ¡Gemelo de granito,
que al rumor del Pacífico, arrullado,
tienes por lecho, espléndido collado,
por cortinaje azul, el infinito!

Cuando retumbas con sonoro grito,
conmueves la ciudad, el valle, el prado,
y montes de vapor ensortijado,
levantas con estrépito inaudito.

A tus pies, la asombrada muchedumbre
te contempla confusa y no se atreve
a robar una chispa de tu lumbre.

Sólo el invierno se te acerca aleve...
Mas viene primavera a tu alta cumbre
¡y un beso inflama tu crespón de nieve!

INTRODUCCIÓN

Uno de los peligros volcánicos que representan la mayor amenaza para los asentamientos humanos ubicados alrededor de los volcanes activos, son los lahares. Estos son flujos constituidos por una mezcla de agua y fragmentos de roca de distintos tamaños, en proporciones muy variables según su origen y distancia a la fuente, y fluyen pendiente abajo debido a la gravedad (Smith and Fritz, 1989).

Entre los siglos XVII y XIX, el 15 % de las víctimas (40,000) por erupciones volcánicas fueron causadas por lahares (Lavigne y Thouret, 2000a). En el siglo XX, la proporción se elevó un 40% (31 500 víctimas más), algunos de los desastres más conocidos fueron en el Nevado del Ruiz en Colombia (1985) y durante la erupción del monte Santa Helena en 1980, así como en el volcán Unzen y Pinatubo en 1991 (Lavigne y Thouret, 2000a). El continuo crecimiento de infraestructura y de las poblaciones a lo largo de canales fluviales incrementa su vulnerabilidad y demuestra que es necesaria una mejor planeación del uso de suelo y la realización de planes de evacuación para reducir el riesgo de desastre (Pistolesi et al., 2014).

Desde 1991, el Volcán de Colima ha presentado este tipo de fenómenos en las barrancas que drenan de sus flancos, y algunos de ellos han ocasionado daños a la infraestructura de las poblaciones que están asentadas cerca del edificio volcánico. Las erupciones más importantes han ocurrido en los años 1994, 1998-9, 2001-3, 2004-5 y 2015.

Durante los días 10 y 11 de julio del 2015, una erupción generó corrientes piroclásticas a lo largo de la Barranca Montegrande. Estos flujos piroclásticos han sido los más grandes y de mayor alcance que se han registrado en los últimos 30 años (Capra et al. 2016). Cabe destacar que, desde la última actividad eruptiva

ocurrida en el 2005, se determinó que esta barranca había recuperado de manera progresiva el equilibrio en el balance de sedimentos, por lo que la ocurrencia de lahares había disminuido y solamente eran disparados en caso de eventos hidrometeorológicos importantes (Vázquez et al., 2016a); sin embargo, a raíz de la actividad del año 2015, se ha presentado un cambio radical en la morfología de la Barranca Montegrando debido al emplazamiento de flujos piroclásticos con espesores de más de 20 m (Capra et al., 2016). Estos cambios determinan el inicio de una nueva etapa de erosión de la barranca, con el incremento en frecuencia y magnitud de lahares.

El incremento de la susceptibilidad a la formación de lahares representa una amenaza potencial hacia la desembocadura de la barranca, en donde se encuentran importantes obras de comunicación, amplias zonas de cultivo de caña de azúcar, y el pueblo de Quisería con más de 7000 habitantes (Dávila et al., 2007), el cual aloja un ingenio azucarero importante para la zona. A raíz de las condiciones descritas anteriormente, se consideró necesaria la investigación aquí propuesta.

a) Hipótesis.

La continua actividad explosiva del Volcán de Colima favorece el depósito de grandes volúmenes de material piroclástico en sus laderas. De manera particular, la actividad del 2015 ha provocado un cambio morfo-hidrológico relevante en la barranca de Montegrando, en el flanco sur del volcán, por lo que en los siguientes años se verificará un cambio importante en la modalidad de procesos erosivos. Esto incrementará la frecuencia y magnitud de lahares durante la temporada de lluvia, los cuales representan una amenaza latente para las poblaciones que se encuentran cercanas a la desembocadura de la barranca.

b) Justificación.

El Volcán de Colima, uno de los volcanes más activos de México, es muy susceptible a la formación de lahares, que ocurren con mayor frecuencia después de una fase eruptiva, y que han provocado daños a las poblaciones e infraestructura localizadas en un radio de 15 km desde la cima del volcán. El cambio drástico ocurrido en la barranca de Montegrande a raíz de la erupción de julio 2015, representa una oportunidad única para entender los procesos erosivos en volcanes activos, especialmente después de un evento eruptivo cuando la formación de lahares es más frecuente y de mayor magnitud.

Un aspecto importante por definir es la forma en que los procesos superficiales actúan en la regeneración del canal original y cuáles son los factores que podrían dar pie a la formación de nuevos canales, con importantes implicaciones hacia la evaluación del peligro asociado.

El presente trabajo representa una contribución para el mejor entendimiento de estos fenómenos en volcanes activos ubicados en zonas tropicales, con la integración de herramientas multidisciplinarias en diversos campos de las Ciencias de la Tierra tales como Geomorfología, Hidrología, Geología, Geomática, Sismología y Geografía de los Riesgos. Finalmente, este trabajo aspiraría a convertirse en uno de los primeros trabajos interdisciplinarios que puedan ser incluidos en programas operativos de emergencia y alerta temprana por parte de las autoridades de protección civil ante la ocurrencia de lahares.

c) *Objetivo General*

La presente investigación tiene como objetivo general *realizar un estudio de los procesos erosivos post- eruptivos en la barranca Montegrande del Volcán de Colima durante el periodo 2015- 2017, mediante el análisis de las temporadas de precipitación, señales sísmicas emitidas por lahares y los cambios morfológicos de la zona de estudio.*

d) *Objetivos particulares.*

- Determinar las características de las lluvias (magnitud e intensidad) de los eventos ocurridos durante las temporadas de lluvia del 2015, 2016 y 2017.
- Elaborar un catálogo de los lahares ocurridos en el periodo de estudio con base en el registro sísmico; caracterización de su magnitud, duración y características dinámicas.
- Definir cambios espaciales y temporales en la morfología de la Barranca Montegrande a través de modelos de elevación obtenidos antes y después de la erupción de julio del 2015, así como durante la temporada de lluvia de los años 2015, 2016 y 2017.
- Relacionar los eventos de precipitación, la frecuencia y magnitud de los lahares, y la evolución morfológica de la barranca desde el año 2015 al 2017.
- Identificar los factores que controlan los procesos erosivos (y de acumulación de los sedimentos erosionados).

e) *Contenido de la tesis*

Este trabajo está conformado por 6 capítulos. En el capítulo 1 se presenta el marco teórico que sustenta a esta investigación. A su vez, se describen las características geológicas del Volcán de Colima y los estudios previos realizados en el área de estudio.

En el capítulo 2 se describe la metodología utilizada para el procesamiento, análisis e interpretación de los datos necesarios para esta investigación. Dicho capítulo se subdivide en tres secciones principales: A) Análisis de precipitación de los años 2015, 2016 y 2017; b) Elaboración del catálogo de lahares del 2015, 2016 y 2017; y c) Análisis cualitativo y cuantitativo de los cambios morfológicos de la barranca Montegrando después de la erupción de julio de 2015 y a lo largo de las temporadas de lluvia de los años 2016 y 2017. En cada una de estas secciones se describe el procedimiento que se llevó a cabo para cumplir con cada uno de los objetivos planteados para este trabajo.

El capítulo 3, presenta el análisis detallado de los eventos hidrometeorológicos registrados durante las temporadas de lluvia de los años 2015, 2016 y 2017. Se hace una descripción de la precipitación de cada año a nivel nacional y se identifica cuáles fueron los eventos hidrometeorológicos que tuvieron una influencia directa en el estado de Colima. Posteriormente, se analiza la precipitación a nivel local es decir, en la zona de estudio; y finalmente, se describe la cantidad de precipitación, la intensidad promedio y la duración de los eventos registrados a lo largo de cada temporada.

En el capítulo 4 se lleva a cabo una revisión y análisis de las señales sísmicas proporcionadas por la Red Sismológica del Estado de Colima (RESCO) para identificar los eventos de lahar que ocurrieron en los años 2015, 2016 y 2017. Se elaboró un catálogo de estos tres años en el cual, se describen los lahares más representativos, analizando su amplitud máxima, el espectro de frecuencias, su duración y forma de la señal. A su vez, se complementó el análisis con las imágenes y videos registrados por la cámara de la estación de monitoreo, todo esto con la finalidad de hacer una clasificación de los eventos y para su posterior correlación con los cambios morfológicos temporales.

En el capítulo 5, se describen los cambios morfológicos de la barranca antes y después de la erupción del 10-11 de julio del 2015. Adicionalmente, se analizan los cambios morfológicos en 2 sectores identificados en la porción media y distal de la barranca, con base en la elaboración de modelos digitales de elevación obtenidos a partir de imágenes capturadas antes y después de las temporadas de lluvia en el 2016 y 2017, mediante vehículos aéreos no tripulados (VANTs). En particular, para este análisis, se generaron secciones transversales para identificar de forma más detallada la morfología del canal durante el 2015, 2016 y 2017, con la finalidad de entender los cambios en los procesos erosivos y de deposición que ha presentado la barranca durante este periodo.

Finalmente, en el capítulo 6 se hace una extensa discusión que engloba los objetivos alcanzados y los resultados obtenidos con este trabajo, así como también, se presentan las conclusiones a las que se llegó con la investigación realizada durante este proyecto de maestría.

CAPITULO I. MARCO TEÓRICO.

1.1 Los Lahares.

Las erupciones volcánicas pueden afectar los sistemas hidrológicos cuando la cantidad de sedimentos depositados excede la cantidad que normalmente se encuentra en los sistemas fluviales (Gran & Montgomery, 2005; Manville et al., 2005). En respuesta a estos cambios, se lleva a cabo la formación de flujos conocidos como *lahares*.

El termino *lahar* es de origen indonesio, y hace referencia a mezclas de sedimentos y agua que fluyen debido a la fuerza de gravedad. Su formación, requiere de una fuente importante de agua y disponibilidad de material no consolidado que típicamente corresponde a depósitos piroclásticos (de flujo o de caída), depósitos epiclásticos superficiales, así como suelos en relieves con una pendiente significativa ($> 15^\circ$). Esto condiciona su poder erosivo y su comportamiento el cual, es muy variable.

La pendiente, la disponibilidad de sedimentos y las características de las lluvias juegan un papel muy importante para entender el comportamiento y la ocurrencia de lahares. Estos factores han sido estudiados por muchos años en ambientes montañosos alrededor del mundo y han servido para extrapolar estas condiciones a ambientes volcánicos. (Cole et al., 2009; Capra et al., 2010; Guthrie et al., 2010; Berger et al., 2011; Schurch et al., 2011; Abancó y Hurlimann, 2014; Theule et al., 2015; Vázquez et al, 2016a)

En los volcanes, los lahares provocados por una fuente repentina de agua pueden ocurrir por 3 distintas causas principalmente: 1) erosión y consecuente derretimiento del glaciar por parte del emplazamiento de flujos piroclásticos (i.e. Volcán Nevado

del Ruiz, Colombia, 1985); 2) por el desplazamiento del agua de un lago de cráter en el momento de la erupción (Mt. Ruapeuh, NZ, Año, 1996 y 2007), y 3) y por lluvias intensas y prolongadas, comúnmente observadas en el Volcán de Colima.

Con base en la génesis de los lahares, estos fenómenos pueden ser *primarios o syn-eruptivos* cuando se originan durante o pocas horas después de la erupción volcánica; o *secundarios (post eruptivos)* cuando ocurren durante una etapa de quietud del volcán (Manville et al., 2009). Su duración y magnitud dependerá principalmente de la intensidad y duración de la precipitación.

La palabra lahar hace referencia al fenómeno, y dependiendo de la relación entre contenido de fracción sólida y agua se pueden originar diferentes tipos de flujos conforme a la distancia y tiempo en su recorrido. Un lahar puede presentar 2 fases que incluyen al flujo de escombros y el flujo hiperconcentrado; las corrientes fluviales se consideran parte de los procesos fluviales (Pierson y Costa, 1987; Vallance, 2000; Lavigne y Thouret, 2002):

- **Flujos de escombros:** Son una mezcla saturada y pobremente seleccionada de escombros y agua, que fluye pendiente abajo por gravedad, y la concentración de sedimentos excede 60% en volumen o el 80% en peso.
- **Flujos hiperconcentrados:** varían entre el 20 y 60% en volumen o 40 y 80% en peso. Es una fase de transición entre el flujo de escombros y el flujo de corriente. Esta mezcla es en general mejor seleccionada que un flujo de escombros, y enriquecida en las fracciones de arena y grava. Generalmente representa la fase inicial de crecimiento de un flujo de escombros o su dilución durante el transporte.

Es importante mencionar que durante el emplazamiento de un lahar se pueden verificar transiciones continuas entre las dos fases antes descritas, dependiendo de

los procesos de erosión, transporte y deposición, pendiente y geometría del canal, y aportes laterales de agua (Lavigne y Thouret (2002), Vázquez et al., 2016).

Una de las características principales de los lahares es la formación de oleadas o frentes con mayor concentración de sedimentos. El comportamiento en oleadas se puede generar por la inestabilidad del flujo originada por periodos de disminución de velocidad, por el aumento o disminución del volumen de sedimentos durante el transporte, por cambios morfológicos a lo largo del canal (Doyle et al., 2011) y dependiendo de los tiempos de recarga de las cuencas hidrográficas (Capra et al., 2018). Estos cambios llevan a la formación de pulsos con frentes enriquecidos en bloques (FEB), seguidos por el cuerpo del flujo, el cual puede presentar fluctuaciones en la descarga (DS) en forma de pulsos u oleadas. Finalmente, la cola corresponde a la porción más diluida y pobre en sedimentos (Fig. 1.1) (Vázquez et al., 2016a; Lavigne y Thouret, 2002; Takahashi, 1991).

Por ser un flujo gravitacional, la velocidad de un lahar depende principalmente de la pendiente del canal y de su masa (i.e. espesor) y puede variar de pocos m/s hasta 10-15 m/s (Costa, 1984). La descarga depende de los dos factores antes mencionados, velocidad y espesor (área transversal) y varía de cientos a miles de m³/s, con valores de millones de metros cúbicos, valores máximos estimados por eventos catastróficos asociados a colapsos de edificios volcánicos (Vallance y Scott, 1997).

Los lahares pueden ser muy erosivos, proceso definido como bulking, y que promueve el incremento en volumen del flujo (Scott, 1988; Fagents y Baloga, 2006). La capacidad erosiva dependerá de densidad del fluido, su profundidad y el esfuerzo de cizalla que el flujo ejerce hacia la base del canal, que en promedio es 6 veces mayor que en las corrientes fluviales.

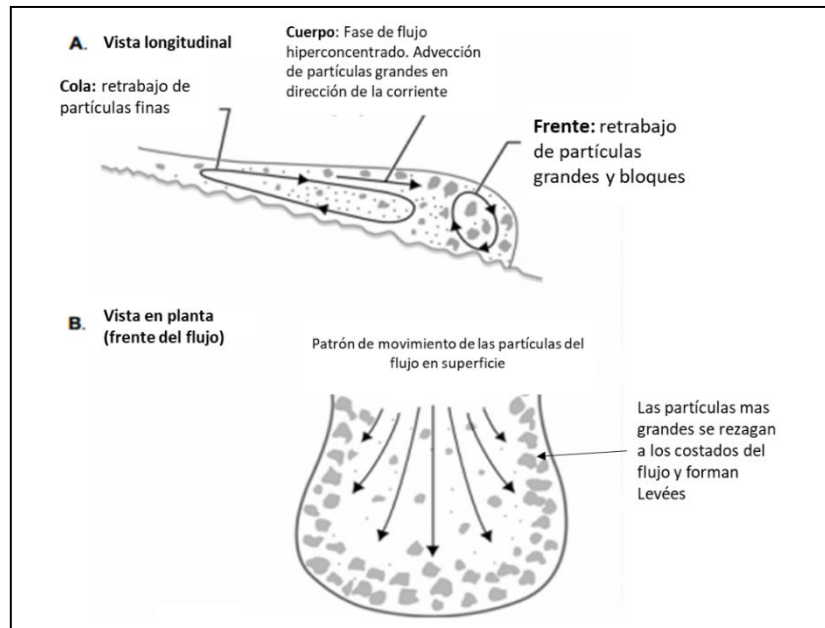


Figura 1.1. Estructura de un lahar, trayectoria y segregación por tamaño de partícula. *Tomado de: Iverson (2005)*

1.1.1. Procesos de destrucción y construcción de canales durante el emplazamiento de un lahar

Un lahar es uno de los principales agentes morfogénicos que se originan en los estratovolcanes en climas húmedos, cuyo rol es exacerbado cuando el edificio está coronado por un casquete glaciar. Estos fenómenos, se encuentran entre los más destructivos asociados a volcanes activos.

Estos flujos, redistribuyen el material acumulado durante una erupción volcánica, alterando el equilibrio en el sistema fluvial. A lo largo de varios años después de una erupción, grandes volúmenes de material quedan inestables en las zonas con mayor pendiente ($> 15^\circ$) del cono volcánico y son fácilmente removilizados durante los eventos de lluvia, por varios años más, hasta alcanzar un equilibrio y balance en el transporte de sedimentos (Major et al., 2000). Cabe señalar, que los impactos causados por el hombre tales como, el cambio de uso de suelo y la

perturbación de la flora original de un lugar, son factores que aceleran también, los procesos erosivos (De la Rose et al., 2011).

Estudios previos mencionan que las tasas de erosión más altas en cuencas hidrológicas van de los 10^5 - 10^6 m³/km²/año, y corresponden a volcanes activos que se encuentran en climas húmedos (Lavigne, 2004).

Existen investigaciones donde se analizan los procesos de erosión/ deposición (E/D) en canales activos en ambientes volcánicos, y los factores que controlan dichos procesos (Major et al., 2000; Lavigne, 2004; Berger et al., 2011; Pierson et al., 2011; Starheim et al., 2013; Thouret et al., 2014). En estos estudios se ha encontrado que los factores principales que afectan las tasas de E/D son la cantidad de lluvia, el volumen de sedimentos disponible, las características del lecho (roca sólida vs. sedimentos sueltos), la morfología del canal, la concentración de sedimentos en el flujo, su velocidad y profundidad (Fagents y Baloga, 2006; Berger et al., 2011; Okano et al., 2012; Thouret et al., 2014; Vázquez et al., 2016a).

Los flujos de escombros, por su mayor concentración de sedimentos y espesor, son más erosivos hacia la base, en donde ejercen un elevado esfuerzo de cizalla; mientras que los flujos hiperconcentrados, por ser más diluidos y turbulentos, presentan mayor erosión en los flancos del canal (Lavigne y Thouret, 2000a; Procter et al., 2014).

Se han llevado a cabo diversos experimentos en laboratorios y en ambientes montañosos, para entender la dinámica de estos procesos (Mangney et al., 2010; Iverson et al., 2011; Hungr et al., 2005; Guthrie et al., 2010; Berger et al., 2011; McCoy et al., 2012; Abancó y Hurlimann, 2014; Theule et al., 2015) y se ha demostrado que los mecanismos que gobiernan el comportamiento de estos flujos son complejos y dependen del sitio y de las características del flujo mismo.

Existen estudios en donde se analizan los procesos de erosión y acumulación con base en observaciones antes y después de un evento. (Scott et al., 2005; Tanarro et al., 2004, Vázquez et al., 2016a; Walter T.R. et al., 2018). La metodología más utilizada es a través del análisis temporal de Modelos Digitales de Elevación (MDE) para hacer comparaciones topográficas y de esta forma, localizar áreas de erosión y acumulación, y estimar el volumen de material removido o depositado a lo largo de las barrancas principales de los volcanes (Barclay et al., 2007; Dávila et al., 2007).

Estudios más recientes se han llevado a cabo con tecnologías fotogramétricas conocidas como *Estructura desde el movimiento* o SfM (Structure- From- Motion) que ayudan a obtener información de alta resolución que puede servir para estudios morfológicos en terrenos volcánicos abruptos (James y Varley, 2012). A su vez, existe la tecnología LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) que se ha utilizado para obtener MDE de muy alta resolución, con la finalidad de cuantificar los cambios en el sistema de drenaje en respuesta a los procesos erosivos y redistributivos generados por lahares (De Rose et al., 2010; Procter et al., 2014) sin embargo, la información que se obtiene de estos sensores laser aún es muy costosa y se requieren equipos informáticos potentes para procesarla.

Algunos trabajos importantes que han utilizado algunas de estas técnicas son los siguientes: Dávila et al. (2007), llevaron a cabo un análisis de imágenes LiDAR, ASTER y LANDSAT para el reconocimiento de cambios morfológicos en zonas de inundación de lahares en el Volcán de Colima. Con técnicas de percepción remota, y datos observacionales, determinaron variación en magnitud y frecuencia de lahares en el periodo 1995-2006, con un evidente incremento después de la fase eruptiva del 2004-2005. Además, a partir de este trabajo, se reconocieron cuales barrancas son las más activas del Volcán de Colima en cuanto a la formación de lahares, y qué alcance pueden tener.

Tanarro *et al.* (2010), comparan mapas geomorfológicos en un periodo de 4 años (2002- 2005) para analizar la evolución debido al paso de lahares en la porción media de la barranca Huiloac que se encuentra ubicada en el flanco norte del Volcán Popocatepetl. En este trabajo, observaron que a pesar de que el volcán había estado en un periodo de calma la presencia dominante de rasgos de erosión en la barranca fue correlacionada con la formación de lahares desencadenados por lluvias cuya frecuencia fue disminuyendo a lo largo de los años.

Por otro lado, Procter *et al.* (2014), hacen una cuantificación de los impactos geomorfológicos por un lahar formado en el Monte Ruapehu, en Nueva Zelanda ocurrido en el 2007. El lahar viajó 200 km a través del río Whangaehu. Antes y después del evento, se realizaron escaneos LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging), de todo el canal recorrido por dicho lahar y se relacionaron las zonas dominadas por procesos de erosión y deposición en función de los cambios de pendiente, confinamiento del canal y de la disponibilidad de sedimentos. Cuando hay una gran disponibilidad de sedimentos, la erosión es muy frecuente y el lahar puede aumentar hasta 3 veces su volumen original. A su vez, observaron que los procesos deposicionales se presentaban en sitios en donde la pendiente disminuía, el canal aumentaba su anchura o se bifurcaba.

Sin embargo, existen otras técnicas basadas en sistemas de Observación Terrestre (Earth Observation Data), tal es el caso de la estereoscopía digital la cual utiliza imágenes satelitales de alta resolución para la construcción de MDEs; siendo una alternativa más económica en comparación con el costo de un vuelo LIDAR. Es importante mencionar que este tipo de herramientas satelitales ha cobrado mayor importancia gracias a la ampliación del catálogo de servicios de las agencias que proporcionan este tipo de telemetría. A su vez, otro de los avances tecnológicos que ha sido utilizado cada vez más en el area de las Ciencias de la Tierra, son los VANTs

(Vehículos Aéreos No Tripulados) debido a su flexibilidad en el manejo, ya que pueden ir a regiones abruptas o de difícil acceso y obtener información georreferenciada del terreno de alta precisión. A partir de esto, se llevan a cabo técnicas de fotogrametría a corto alcance que permiten la generación de MDE con una muy alta resolución.

Vera et al. (2017), llevaron a cabo un estudio para identificar lahares generados por avalanchas mixtas durante la erupción del 03 de Marzo de 2015 en el volcán Villarica, Chile. Mediante el uso de un eBee Drone obtuvieron un MDE de alta resolución (8.4 cm) que les permitió elaborar un mapa de la distribución de depósitos proximales de lahar y estimar volúmenes de hielo erodado en la parte superior del volcán que posteriormente se transforman en lahares.

Walter et al., (2018), hicieron fotogrametría de corto alcance mediante el uso de un VANT para monitorear los cambios morfológicos asociados a eventos de lahar en la Barranca Montegrande en el Volcán de Colima durante el paso del huracán Patricia en octubre de 2015.

Dávila et al. (2019), utilizaron pares estereoscópicos y triescópicos para caracterizar la fase eruptiva (2014-2016) del Volcán de Colima a partir de imágenes satelitales SPOT 6 y 7. Por medio de estas herramientas, estimaron los volúmenes asociados a flujos piroclásticos y coladas de lava.

Este tipo de investigaciones sirven de puntos de partida para el análisis de las modificaciones geomorfológicas debido a flujos post-eruptivos en ambientes volcánicos. Los resultados pueden ser utilizados para definir áreas de peligro e informar a las poblaciones más vulnerables.

1.1.2. Monitoreo sísmico de lahares

El estudio de los procesos de transporte de sedimentos en zonas montañosas ha sido ampliamente desarrollado en las últimas décadas. El monitoreo de este tipo de fenómenos en cuencas instrumentadas permite realizar un análisis espaciotemporal del balance de los sedimentos y determinar los factores que controlan la erosión, el aporte de sedimentos y la evolución morfológica de los canales o barrancas (Abancó et al., 2014; Coviello et al., 2015).

Las vibraciones del suelo provocadas por los movimientos en masa han sido utilizadas para detectar el inicio del fenómeno y determinar sus parámetros físicos (Vázquez et al., 2016b). Existen varios tipos de sensores que están instalados en volcanes activos alrededor del mundo con la finalidad de detectar y monitorear la ocurrencia y variaciones espacio- temporales de lahares, especialmente aquellos que son desencadenados por lluvias (Lavigne et al., 2000b; Doyle et al., 2010, 2011).

En particular, el análisis y cuantificación de las señales sísmicas generadas por lahares, ha sido llevada a cabo mediante sistemas de monitoreo acústico de flujos (AFM) (Lavigne et al., 2000; Cole et al., 2009), sismómetros de banda ancha (Doyle et al., 2010) o la combinación de ambos (Cole et al., 2009; Cole 2011; Vázquez et al., 2016b; Coviello et al., 2018). Estos análisis, han mostrado que las características de dichas señales están relacionadas con el volumen y descarga de sedimentos, los cuales varían con las fluctuaciones que pueda presentar el flujo.

Marcial et al. (1996), obtuvieron el rango de frecuencias de los lahares registrados en el volcán Pinatubo de entre 10 y 100 Hz. Lavigne et al. (2000b) observaron que, al usar información sísmica adquirida a una distancia menor a 50 metros del canal de emplazamiento de un lahar, las frecuencias registradas son entre los 10 y 100 Hz.; sin embargo, con base en Vázquez et al., 2016b, la mayor información acerca del

comportamiento del flujo se ve reflejada estrictamente en frecuencias entre los 10 y 50 Hz mediante un filtrado de la señal en rangos de 10 Hz. Es importante mencionar que la señal sísmica registrada durante el paso de un lahar corresponde a la vibración del suelo por la interacción del flujo con el substrato principalmente. La amplitud de la señal sísmica será mayor a medida que incrementa la carga sólida del flujo así como su espesor (magnitud) (Capra et al. 2010; Vázquez et al., 2016b).

1.2 El Volcán de Fuego de Colima

El Volcán de Colima es un estratovolcán de composición andesítica (~50 ka de edad; Robin et al., 1987), ubicado en la parte occidental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano, en la frontera entre el estado de Colima y Jalisco (De la Cruz-Reyna, 1993; Saucedo et al., 2004). Forma parte del Complejo Volcánico de Colima, siendo el edificio más joven después del Nevado de Colima (Pleistoceno) (Dávila et al., 2007; Zobin et al., 2009) (Fig.1). Junto al volcán Popocatepetl, se considera entre los volcanes más activos de México y abarca 4 municipios del estado de Jalisco: Zapotitlan de Vadillo, San Gabriel, Tuxpan y Tonila; y 3 del estado de Colima: Comala, Villa de Álvarez y Cuauhtemoc.

Este volcán ha presentado un amplio espectro de estilos eruptivos, desde colapsos gravitacionales a erupciones vulcanianas y plinianas con frecuente emplazamiento de domos somitales y colapsos (Breton González et al., 2002). El cono activo actual, también conocido como Volcán de Fuego, se ha formado al interior de una estructura en herradura relicto del colapso gravitacional del volcán ancestral llamado Paleofuego. A partir de la actividad pliniana de 1913, el volcán ha presentado varias fases eruptivas, cada una con una duración de pocos años. Sin embargo, desde 1998 su actividad se ha vuelto más persistente con erupciones de tipo vulcaniano y extrusión de domos y lava (Saucedo et al., 2005).

Varios episodios efusivos ocurrieron en 1991, 1998-9, 2001, 2002, 2003 y 2004, y los eventos explosivos significativos ocurrieron en 1994, 1999, 2003 y 2005. Durante este periodo, el colapso parcial de columnas eruptivas vulcanianas así como el colapso de domos en la cima, produjeron numerosos depósitos de flujos de bloques y cenizas que rellenaron los drenajes principales hasta distancias de 6 km de la fuente con volúmenes del orden de los 10^5 m^3 (Sulpizio et al., 2010).

En el 2007 un nuevo domo creció lentamente y se detuvo en junio del 2011. Después de eso, el volcán no presentó actividad significativa hasta inicios del año 2013. El 6 de enero de 2013, una nueva fase explosiva de tipo vulcaniana se desarrolló y terminó el día 29 de ese mismo mes. Esta fase consistió en la destrucción del domo emplazado durante el periodo 2007- 2011 (Zobin et al., 2015).

En julio de 2014, se presentaron pequeñas explosiones y caídas de roca. En septiembre del mismo año se reanudó la actividad efusiva, con el emplazamiento de un nuevo domo acompañado por un flujo de lava que alcanzó una distancia de 1.5 km en el flanco SW del volcán.

En enero del 2015 varias explosiones causaron la destrucción parcial del domo y generaron una pluma de ceniza de 3 km de alto, que se dispersó hacia el NE (Capra et al., 2016). Actividad similar continuó en los meses siguientes. A principios de julio, dos flujos de lava avanzaron hacia el flanco norte y sur. El 10 de julio comenzó la actividad paroxismal con la formación de corrientes piroclásticas diluidas (PCD) que descendieron por la ladera sur del volcán y se acanalaron en la barranca Montegrande. Este evento, afectó a las comunidades cercanas: La Yerbabuena, La Becerrera, San Antonio, Carrizalillo, El Naranjal, Nuevo Naranjal y Suchitlán. El 11 de julio se presentó otro flujo piroclástico que fluyó a través de la barranca Montegrande y alcanzó una distancia de 10.5 km de la fuente (Capra et al., 2016).

Después de la actividad del 10 y 11 de julio, la morfología de la cima del volcán presentó cambios importantes por la formación de un escarpe de 130 m de ancho al SE, a través del cual un flujo de lava descendió varios metros barranca abajo hasta una distancia de 2.5 km (Capra et al., 2016).

1.3 Zona de estudio: Barranca Montegrande.

La barranca de Montegrande es una de las más activas en la formación de lahares (Dávila et al., 2007; Capra et al., 2010). Está ubicada en la ladera sur del Volcán de Colima, es un canal fluvial efímero y su cabecera comienza a los 2600 msnm (19° 29' 26.71" N, 103°37' 14.5 "W). Termina con la formación de un abanico, en su parte más distal a 1557 msnm (19°25'30.99" N, 103°36'19.64" W) (Fig. 1.2). A su vez, se formó por la erosión de depósitos de avalancha del Holoceno y depósitos de flujo piroclástico emplazado por la erupción pliniana de 1913.

La barranca de Montegrande ha estado sujeta a distintos tipos de investigaciones geológico-geomorfológicas debido a la actividad lahárica que presentó en los últimos años. Desde el 2011 se instaló una estación de monitoreo equipada con una cámara de video, una estación de lluvia y un geófono, que transmiten los datos en tiempo real a las instalaciones de la RESCO (Red sismológica de la Universidad de Colima). Esta estación, junto con otros instrumentos de monitoreo instalados a lo largo de la barranca y las distintas salidas de campo llevadas a cabo anualmente, han sido las herramientas fundamentales para estudiar la dinámica y características de los lahares producidos en los últimos años. Durante la erupción del 2015, dicha estación se perdió completamente, sin embargo, en octubre del 2015 se instaló un nuevo sitio de monitoreo.

Los lahares en el volcán de Colima ocurren durante la temporada de lluvias, entre junio y octubre, con un promedio anual de 800 a 1500 mm de precipitación (Dávila

et al., 2007; Capra et al., 2010). Fluyen principalmente por las barrancas La Lumbre, Zarco, San Antonio, Montegrande y Arena hasta distancias entre 8 y 12 km. Al inicio de la temporada de lluvia, los lahares son más frecuentes debido al comportamiento hidrofóbico de los suelos, lo que provoca que sean desencadenados por lluvias de 20 mm y de corta duración (Capra et al., 2010).

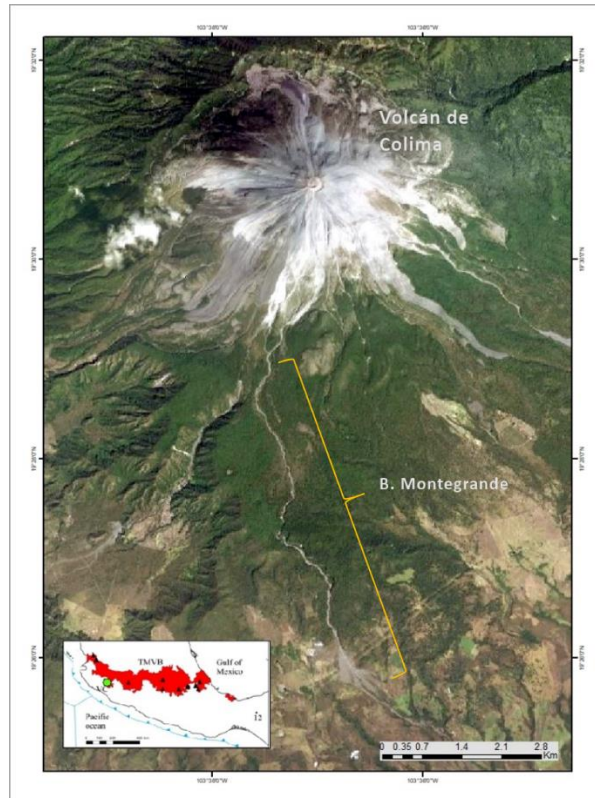


Figura 1.2. Mapa de ubicación del Volcán de Colima y de la zona de estudio: Barranca Montegrande. (Imagen satelital: Bing, 2015).

En los meses siguientes, a medida que los suelos adquieren un mayor grado de humedad la hidrofobicidad se pierde. Las lluvias en estos meses (sept.- oct) son de menor intensidad, pero de larga duración por lo que, los lahares son menos frecuentes y de mayor magnitud (Capra et al., 2010).

Los lahares en el Volcán de Colima son más frecuentes en los meses siguientes a una erupción y dos o tres años después (Dávila et al., 2007). La erupción que ocurrió

en Julio de 1999 determinó el emplazamiento de un depósito de flujo de bloques y cenizas el cual relleno las barrancas de Montegrande y San Antonio. Un día después de la ocurrencia de estos fenómenos, la lluvia removilizó parte de estos depósitos con la formación de un lahar a lo largo de la Barranca de Montegrande que destruyó una línea de corriente eléctrica en la desembocadura.

Un año después, el 1ro de julio del 2000 se desencadenó un lahar a lo largo de las barrancas el Zarco y La Lumbre, después de haber llovido intensamente 1 hora. Este lahar, enterró parcialmente dos casas y afectó un puente que conecta el pueblo de La Becerrera con el pueblo de San José del Carmen ([Dávila et al., 2007](#)).

A partir de la puesta en marcha del monitoreo sísmico y visual, se ha realizado un estudio sistemático de los eventos (i.e. [Vázquez et al., 2014 y 2016](#)). En particular, se ha podido caracterizar la señal sísmica con base en las características de los flujos, concentración de sedimentos y transiciones longitudinales.

Asimismo, se estableció una correlación entre la señal sísmica y las diferentes partes de un flujo, como el frente, el cuerpo y la cola. Se reconocieron dos tipos principales de eventos. Los lahares unipulso, caracterizados por un evento discreto, con duración inferior a la hora, constituido por un frente rico en bloques y un cuerpo en el rango de concentración entre flujos de escombros e hiperconcentrados, seguido por una cola más diluida.

Por el contrario, los lahares multi-pulso presentan una secuencia de varios pulsos con las características antes descritas y con duración de varias horas. Se pudo observar que cada evento puede depositar diferentes unidades con características texturales diferentes y con una tasa de sedimentación de 5-6 cm por minuto ([Vázquez et al., 2014](#)).

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

El procesamiento de información y la obtención de resultados se llevaron a cabo mediante el uso de registros de precipitación de la barranca Montegrando durante los años 2015, 2016 y 2017. A su vez, se utilizaron los datos recabados por una estación sísmica de banda ancha de la RESCO instalada a 500 m de la estación de monitoreo instalada a un costado de la barranca. Durante el periodo del 2015 hasta el 2017 se realizó trabajo de campo para la observación de los depósitos asociados a los lahares ocurridos en la temporada de lluvia y para la realización de vuelos no tripulados para la obtención de imágenes. A continuación, se describe a detalle la forma en que se procesaron, analizaron e interpretaron los datos adquiridos en la zona de estudio.

2.1. Análisis de datos de precipitación de los años 2015, 2016 y 2017.

En este trabajo de investigación se utilizaron los registros de precipitación del periodo 2015- 2017, con la finalidad de conocer la cantidad de lluvia acumulada, la intensidad de cada evento registrado, su duración, y la influencia que tienen los fenómenos hidrometeorológicos en esta zona para la generación de lahares.

La erupción ocurrida los días 10 y 11 de julio del 2015 generó flujos piroclásticos que se emplazaron a lo largo de la barranca Montegrando provocando la destrucción de la estación de monitoreo que estaba instalada desde el 2011. Debido a esto, fue imposible obtener los datos de precipitación de ese año. Por lo tanto, se utilizaron los datos de precipitación para el 2015 de la estación meteorológica automática (EMA) “*Nevado de Colima*”, la cual se encuentra ubicada en el estado de Jalisco al noreste del volcán ($19^{\circ}35'30''$; $-103^{\circ} 35'26''$), a una altitud de 3461 m.s.n.m, y pertenece al Servicio Meteorológico Nacional.

Una Estación Meteorológica Automática (EMA), está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática de los sitios donde están estratégicamente colocadas. Su función principal es la recopilación y monitoreo de variables meteorológicas para generar archivos cada 10 minutos de dichas variables, esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 ó 3 horas por estación.

Los datos de precipitación de los años 2016 y 2017 se obtuvieron de la nueva estación de monitoreo de la barranca Montegrande, ubicada en la porción media de la barranca a 6 km de distancia del cráter del Volcán de Colima, y cuenta con un sensor de lluvia HOBO RG3, acoplado con un sensor de humedad HOBO EC instalado en el subsuelo. La estación de lluvia es de balancín, cada movimiento corresponde a 0.2 mm de lluvia. Dependiendo del *data logger*, los datos son registrados cada que se mueve el balancín, o en un intervalo de tiempo definido por el usuario (para el presente trabajo cada 5 min.). (Figs. 2.1, 2.2 y 2.3).

Con base en lo anterior, se obtuvieron datos de lluvia de los meses de mayo a diciembre del año 2016, y de enero a septiembre del 2017.



Figura 2.1. a) Estación HOBO que registra la precipitación en la barranca Montegrande. b) Estación de monitoreo ubicada en la sección media de la barranca Montegrande.

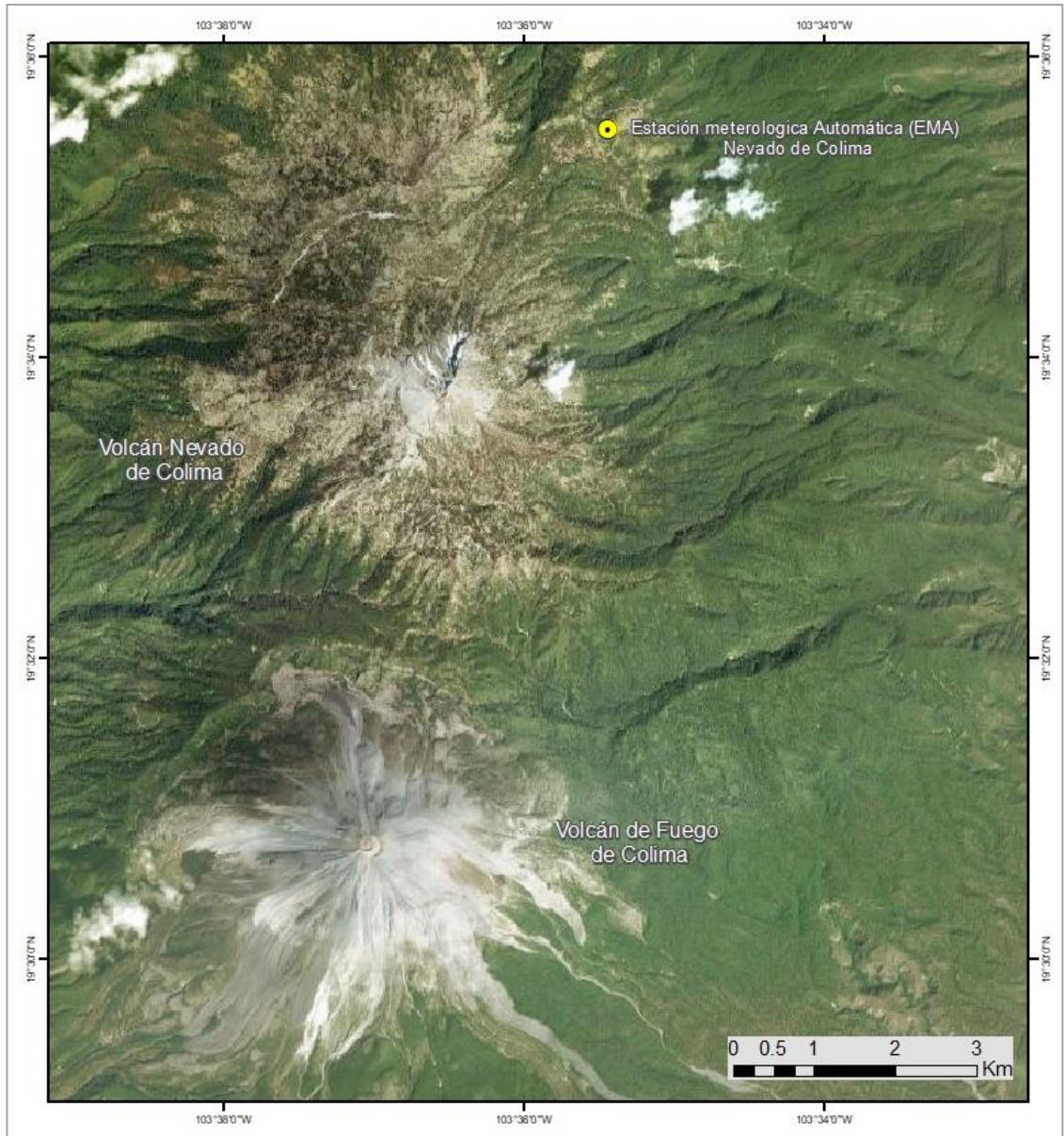


Figura 2.2. Ubicación de la estación meteorológica automática (EMA) Nevado de Colima, perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Una vez que se tuvieron los registros de precipitación de cada año, se identificaron los eventos de lluvia que presentarían una acumulación pluvial mayor de 10 mm, valor mínimo necesario para disparar un lahar (Capra et al., 2010).

Posteriormente, se calculó la intensidad promedio de cada evento, para esto se utilizó el programa Microsoft Excel 2018. A partir del valor de lluvia acumulada se

hizo una división de este valor, entre la duración del evento. Asimismo, se procesaron los datos para analizar la intensidad máxima instantánea de cada evento de precipitación, calculada a un intervalo de 5 min, mediante el uso del programa DISRAINS versión 1.3 (Borselli,2009).

A su vez, se consultaron los reportes del clima y se analizaron las temporadas de lluvia de cada año a nivel nacional, estatal y local, con la finalidad de conocer el comportamiento de la precipitación y los fenómenos hidrometeorológicos que influyen directamente en el régimen pluvial de la zona de estudio y que favorecen la ocurrencia de lahares. Esta información fue consultada en las bases de datos del Servicio Meteorológico Nacional.

Es importante señalar que la medición de lluvia utilizada en este trabajo es muy local, por lo tanto, los registros de precipitación pueden diferir de un punto a otro de la barranca, así como también de los datos de precipitación a nivel estatal y nacional. Esto se pudo observar en los videos de la cámara que se encuentra en la estación de monitoreo, en donde se muestra que al pasar el flujo algunas veces no está lloviendo y después de algunos minutos las lluvias se aproximan al punto de monitoreo. Esto ocurre comúnmente al principio de la temporada, cuando las lluvias son de tipo orográficas, con un control del relieve en la acumulación de la humedad.

2.2 Catálogo de lahares 2015- 2017.

La elaboración del catálogo consistió en el análisis de los datos sísmicos proporcionados por la RESCO (Red Sísmica de la Universidad de Colima) (Fig. 2.3), específicamente de la estación de banda ancha instalada en la barranca Montegrande. Esta estación consiste en un sensor de tres componentes Guralp-CMG- 6TD, de 0.03 – 100 Hz de frecuencia natural y tiene una tasa de muestreo de 100 Hz. Este sensor está ubicado 500 m aguas arriba de la estación de monitoreo

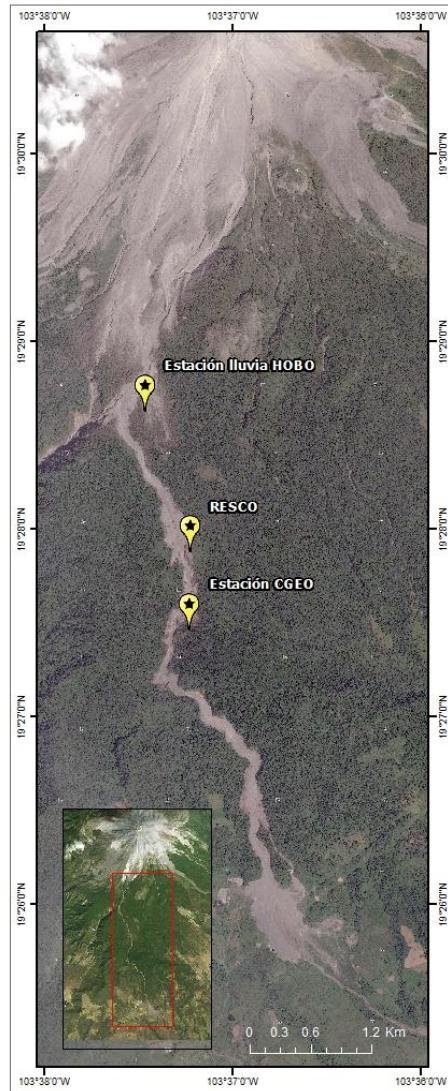


Figura 2.3. Ubicación de la estación de precipitación HOBO, la estación de la Red Sísmica de la Universidad de Colima (RESCO) y la estación de monitoreo de lahares del Centro de Geociencias, UNAM, en donde se encuentra otra estación HOBO.

El tratamiento de los datos consistió en el diseño un algoritmo en MatLab para obtener el espectrograma de frecuencias y el espectro de potencia de los datos sísmicos de la RESCO. La aplicación fue desarrollada por el Dr. Víctor Hugo Márquez Ramírez, investigador del Centro de Geociencias. Dicha rutina utiliza la técnica de Welch para el análisis de frecuencias. A partir de esto, se pudo obtener la

distribución de energía de la señal con respecto a la frecuencia, el espectro de potencia y la distribución de amplitudes máximas.

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de las señales por cada hora, con la finalidad de identificar los lahares ocurridos en cada año. Para la identificación de los lahares se probó el umbral de amplitud utilizado por Vázquez *et al.* (2016b) que fue de 1×10^{-8} m/s, sin embargo, se observó que la señal emitida por los lahares comenzaba a registrarse desde amplitudes de 1×10^{-3} cm /s por lo que este valor fue más apegado al umbral de amplitud establecido por Coviello *et al.* (2008), el cual permite identificar corrientes fluviales de flujos hiperconcentrados y de escombros. Posteriormente, para cada evento se identificaron las características de los flujos con base en la clasificación propuesta por Vázquez *et al.*, (2016a). Dicha clasificación está basada principalmente en las fluctuaciones presentadas por los lahares y en su correspondiente firma sísmica (tanto de amplitud como de contenido frecuencial) la cual, se diferencia entre *frentes enriquecidos en bloques (FEBs)*, normalmente asociados con el frente del lahar y que corresponde al pico en amplitud; y *oleadas diluidas (DSs)* identificadas por las fluctuaciones en la descarga del flujo, asociadas al cuerpo del lahar.

Los lahares observados en el Volcán de Colima se diferencian principalmente en flujos unipulso, de corta duración (< 1 hr) con un único frente rico en bloques al cual sigue un cuerpo y una cola diluida (*single pulse event, "SPE"*), de los multipulsos, de larga duración (~ 3 hr) constituidos por las secuencias de varios pulsos (*Multipulse event, "MPE"*) (Vázquez *et al.*, 2016a) (Fig. 2.4).

Cada evento identificado se ha relacionado con la cantidad de lluvia registrada antes o durante la formación del lahar. El catálogo aquí compilado incluye los resultados de estos análisis y se muestran en el capítulo 4.

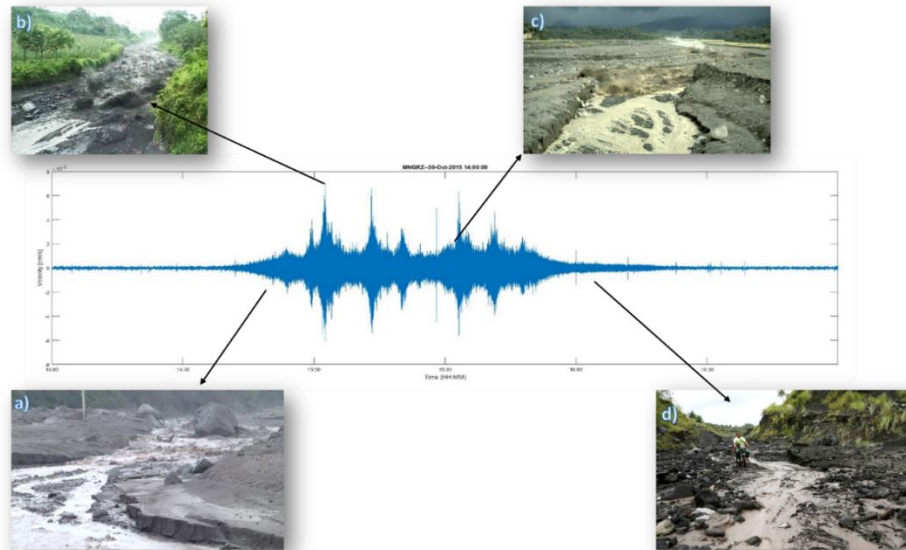


Figura 2.4. Señal sísmica de un lahar multipulso en donde se pueden identificar las partes del flujo: **a)** Ejemplo de corrientes diluidas previas al frente enriquecido en bloques (FEB)¹; **b)** Frente Enriquecido en bloques (FEB)²; **c)** Cambios en la descarga en donde existe alternancia entre corrientes diluidas (DSs) y FEBs³; **d)** Cola del lahar⁴.

2.3 Cambios morfológicos de la Barranca Montegrande

Este análisis se llevó a cabo a partir de la descripción de los cambios morfológicos de la barranca antes y después de la erupción de julio del 2015, y durante las temporadas de lluvia de los dos años siguientes. Para los cambios asociados al emplazamiento del flujo piroclástico se utilizaron modelos digitales de elevaciones obtenidos a partir de imágenes SPOT adquiridas en noviembre 2014 y finales de julio del 2015, con una resolución de 10 m y 21 m respectivamente. Como

¹ Lahar en el Monte Merapi, Indonesia. Tomado de: <http://footage.framepool.com/es/shot/979813695-lahar-yogyakarta-monte-merapi-ceniza>

² Lahar en el Volcán de Fuego, Guatemala. Tomado de: <http://www.sonora.com.gt/2018/07/31/lahar-y-lluvias-amenazan-comunidades-cercanas-al-volcan-de-fuego-de-guatemala/>

³ Lahar en el Volcán Santiaguito, Guatemala. Tomado de: <http://volcano-pictures.info/glossary/lahar.html>

⁴ Lahar en el Volcán Mayon, Filipinas. Tomado de: <https://www.accuweather.com/en/weather-news/what-is-a-lahar/70004295>. Última fecha de consulta de las imágenes: 30/01/2019.

soporte para la definición de los cambios espaciales se utilizaron las imágenes de Google Earth del 27 de febrero del 2015 y del 17 de noviembre del mismo año.

Posteriormente, se analizaron las fotografías tomadas en campañas de vuelo en campo con el VANT DJI Phantom 4 Pro, de agosto y noviembre 2015, agosto y diciembre 2016, y marzo, mayo, octubre y noviembre del 2017. Los vuelos se llevaron a cabo a una altura de 90 m.

El procesamiento de las imágenes obtenidas con el VANT se realizó con el software *Agisoft Photo Scan Professional*, mediante el cual se construyeron 5 mosaicos con sus respectivos MDE de la zona media de la barranca (ago., dic 2016 y mar, oct y nov 2017) y 2 en la zona distal (may y oct 2017) de la barranca (Fig. 2.5). Los MDE tienen una resolución espacial < 1 cm.

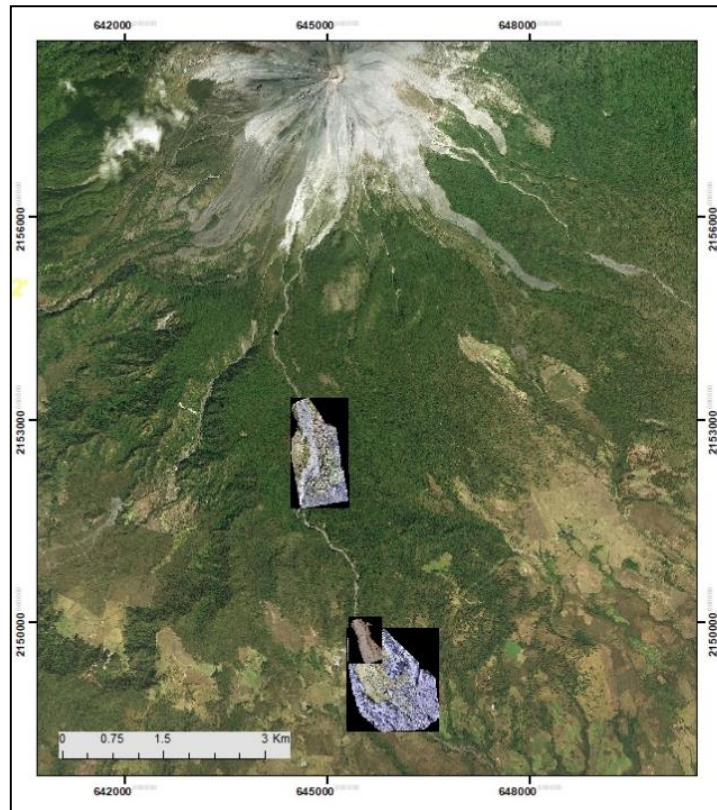


Figura 2.5. Modelos digitales de elevación elaborados de la sección media y distal de la Barranca Montegrande.

Una vez que se tuvo la información espacial adecuada, se trazaron secciones transversales de la parte media (estación de monitoreo) y distal de la barranca para realizar el análisis temporal de las variaciones del canal. Estas secciones se elaboraron para cada año de estudio mediante el uso del SIG *Arcgis 10.5*. y las herramientas de análisis tridimensional (*3D analyst Tools*). Posteriormente, la información de cada perfil se exportó a una hoja de cálculo de Microsoft Excel 2016 y se elaboró el gráfico correspondiente a cada sección (fig. 2.6).

Cabe señalar, que una de las limitaciones que se encontraron al intentar comparar los perfiles transversales de cada año, fue que siempre existe un desfase en el vector Z de ± 2 m. Para resolver dicha incertidumbre y debido a que no se contaba con un GPS de estación total para la localización de los puntos de control durante los vuelos, se ajustaron los perfiles manualmente considerando puntos fijos que no hubiesen cambiado con el paso del tiempo (E.g. Bloques de gran tamaño, arboles, etc) y se hizo un traslado vertical de dichos perfiles para hacer coincidir los puntos fijos. (Fig. 2.7)

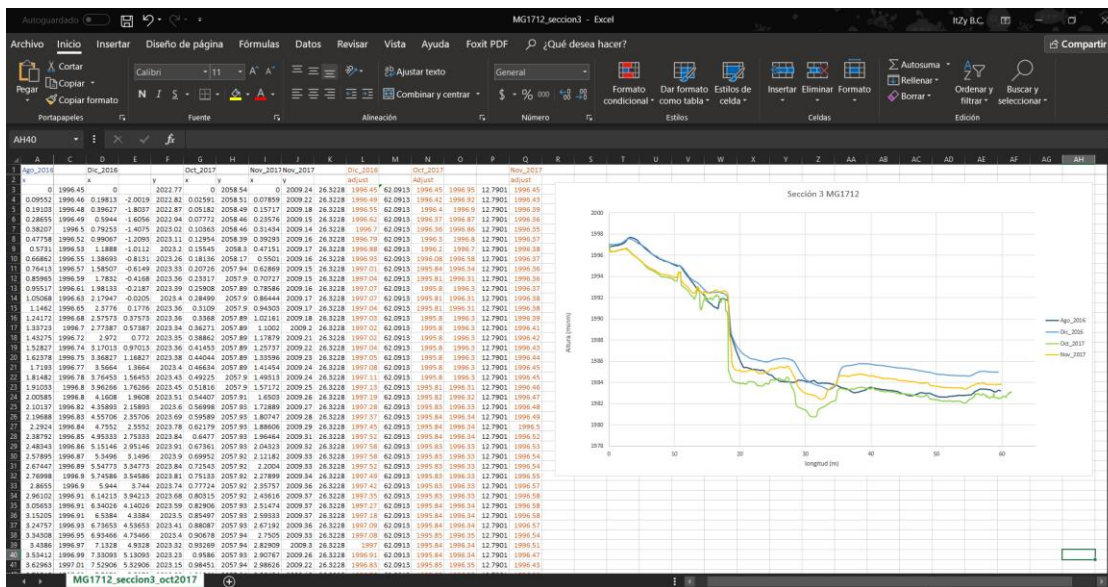


Figura 2.6. Ejemplo de elaboración de secciones transversales en Microsoft Excel, mediante la información obtenida de los MDE.

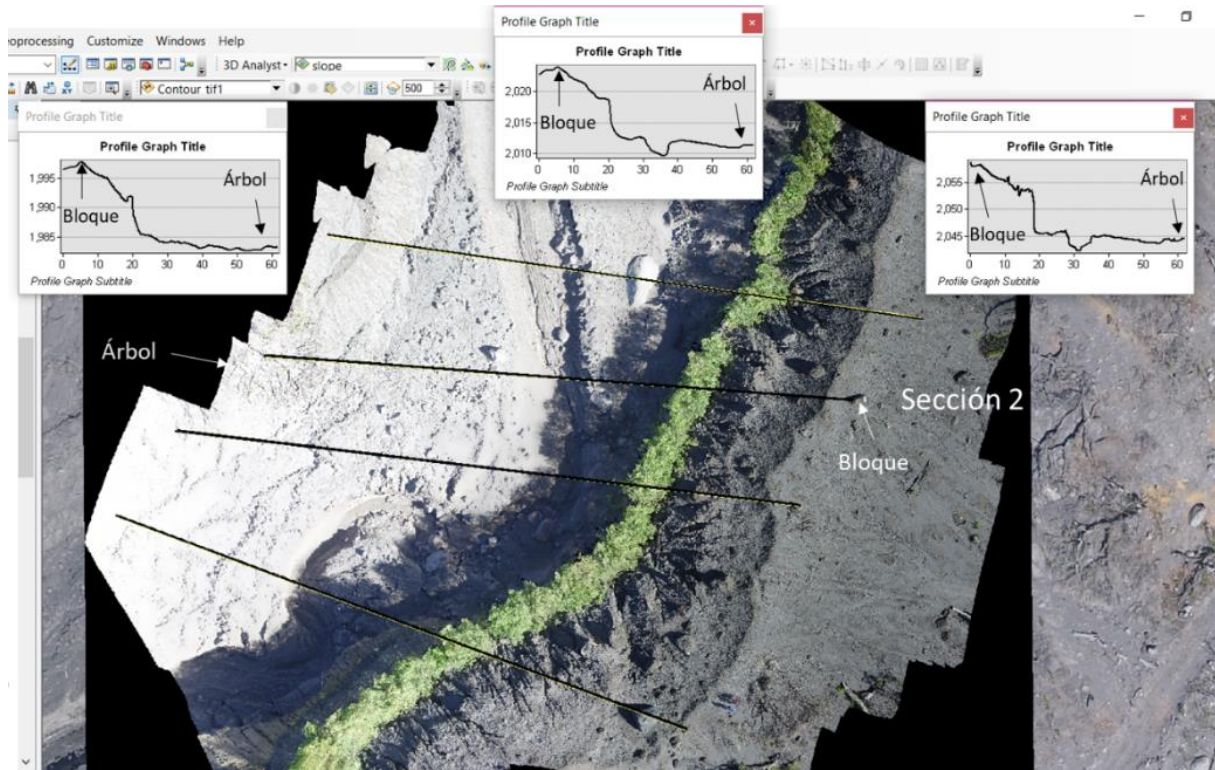


Figura 2.7. Ejemplo de levantamiento de secciones transversales, mediante la información obtenida de los MDE.

Con las secciones de la parte media y distal de la barranca, se llevó a cabo un análisis para identificar las zonas que presentaron procesos erosivos y acumulativos mediante la medición (en metros) del material depositado y erosionado en cada una de las secciones. En particular se consideró el cambio máximo en la profundidad de la sección del canal (Ver capítulo V y VI).

CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN EN EL VOLCÁN DE COLIMA, 2015-2017.

3.1. Precipitación del Año 2015

Este año ha sido catalogado como uno de los más lluviosos de México en las últimas 7 décadas, después del 2010. Ocho meses del año 2015 presentaron lluvias por arriba de lo normal y cuatro por debajo del promedio histórico (1941 –2014). Marzo, destacó como el más lluvioso con una anomalía de 373.2%, octubre ocupó el cuarto lugar (anomalía 48%). Los meses con lluvias por debajo de su promedio fueron julio y agosto que se caracterizaron por alcanzar el 10° periodo más seco desde 1941, con una anomalía de -21.5% y - 22.5% respectivamente (SMN;2015) (Fig. 3.1).

De acuerdo con Juan José Guerra Abud, titular de la SEMARNAT en el año 2015, particularmente en el mes de marzo, la variación sobre la media superior de lluvia fue de 250 por ciento (Sol de Puebla, 2015). La elevada cantidad de lluvia en este mes fue consecuencia de la combinación de los frentes fríos número 40 y 41, las tormentas invernales 8 y 9, y la significativa propagación de humedad proveniente del Océano Pacífico(SMN, 2015; Méndez, 2015) (Fig.3.2).

En México, la temporada de huracanes normalmente comienza el 1 de junio, sin embargo, en 2015 inició a principios de mayo (Gallegos, 2015). La formación de un gran número de eventos hidrometeorológicos se debió a la presencia del fenómeno de El Niño (15 de mayo al 30 de noviembre), el cual trae masas de aire y corrientes calientes al Pacífico oriental, además de que disminuye la actividad ciclónica del océano Atlántico (SMN, 2015).

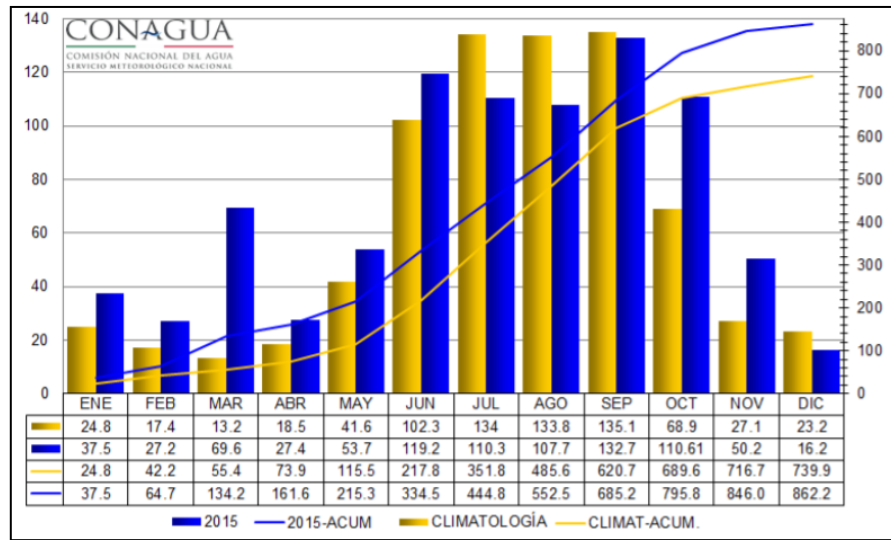


Figura 3.1. Climatología y precipitación (mm) 2015. Estimaciones de lluvia promedio mensual y acumulada a nivel nacional en 2015 (barras y línea azul) comparada con el promedio de largo periodo 1941 – 2013. Tomado de: SMN, 2015.

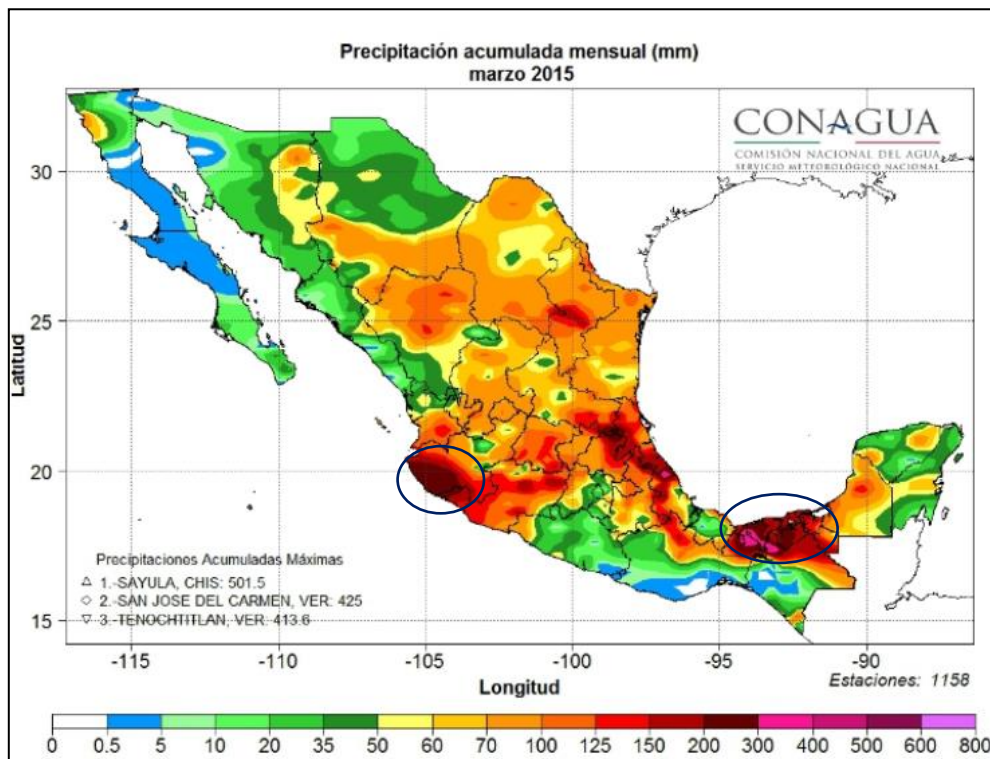


Figura 3.2. Precipitación acumulada mensual nacional en mm del mes de marzo del 2015, en donde se puede observar que, en la costa del pacífico, específicamente en los estados de Colima y Jalisco la precipitación acumulada fue > 150 mm y < 300 mm (Tomado de SMN -CONAGUA, 2015).

El huracán más intenso ocurrió en las costas del Pacífico y se le asignó el nombre de “Patricia”. Su formación ocurrió el 20 de octubre, al sur del estado de Oaxaca y siguió una trayectoria paralela a la costa en los siguientes días. El 23 de octubre tocó tierra continental en las costas de Jalisco, y se desvaneció el 24 de octubre en el continente, al suroeste de Monterrey (Figura 3.3).

La zona de baja presión generada por el huracán fue la más grande registrada en la historia del Pacífico Oriental, con valores de 872 hPa. Su recorrido desde Centroamérica hacia el norte afectó principalmente a seis países: Costa Rica, Nicaragua, El Salvador, Guatemala, México (Michoacán, Colima, Jalisco y Nayarit) y Estados Unidos (Texas). Este huracán dio lugar a intensas precipitaciones (vaguadas) y vientos particularmente intensos, que alcanzaron los 345 km/h, aunque hubo rachas < 1 min de casi 400 km/h. En el caso de las lluvias, específicamente en terrenos bajos se registraron valores de precipitación de 127 a 550 mm; sin embargo, en las zonas montañosas se registraron de 203 a 330 mm de lluvia. En el volcán Nevado de Colima se reportaron tormentas con precipitaciones de hasta 318 mm ([Enciclopedia de Características, 2017; Kimberlain et al., 2016](#)) (Figs. 3.4 y 3.5).

La estimación total de los daños causados, incluyendo los efectos en otros países, fue de aproximadamente 407,4 millones de dólares, y el conteo de fallecidos fue de 19: trece en México (ocho directos, cinco indirectos), cuatro en El Salvador, uno en Guatemala y uno en Nicaragua ([Enciclopedia de Características, 2017; Kimberlain et al., 2016](#)).

3.1.1. Precipitación en Colima y en la Barranca Montegrande

De acuerdo con el SMN, la precipitación en Colima del año 2015 fue de 1956.7 mm. Los meses más lluviosos fueron marzo (306.1 mm), septiembre (240.9 mm) y octubre (601.9 mm).

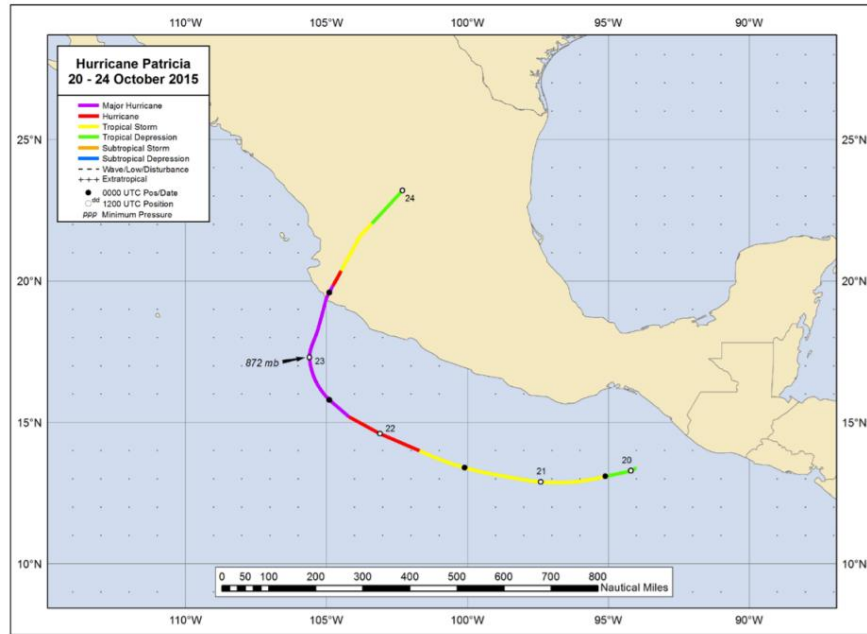


Figura 3.3. Trayectoria del huracán Patricia del 20 al 24 de octubre del 2015. Tomado de: (Kimberlain, T. B *et al.*, 2016)

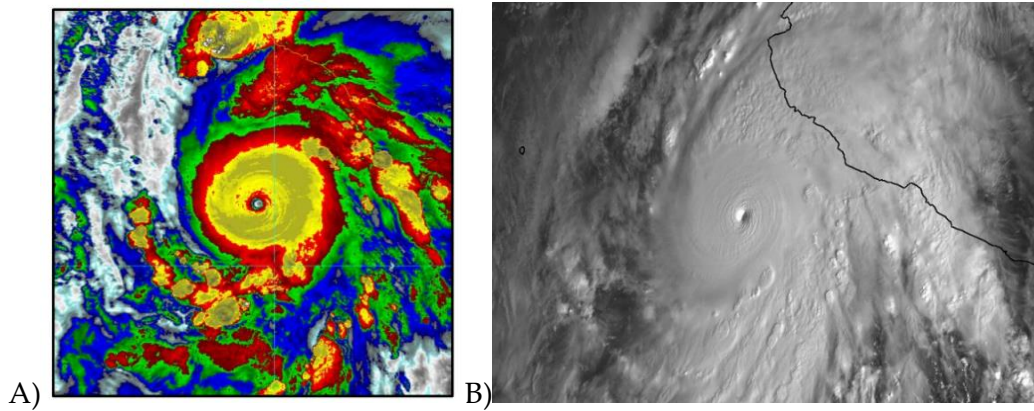


Figura 3.4. A) Imagen en infrarrojo METOP-8 mejorada del huracán Patricia el 23 de octubre del 2015. Cortesía de CIRA (tomada de NOAA- NHC, 2015). B) Fotografía facilitada por la NASA del 23 de octubre del 2015 donde muestra el huracán Patricia a su llegada a la costa de México (Tomada de Notimex, 2015).

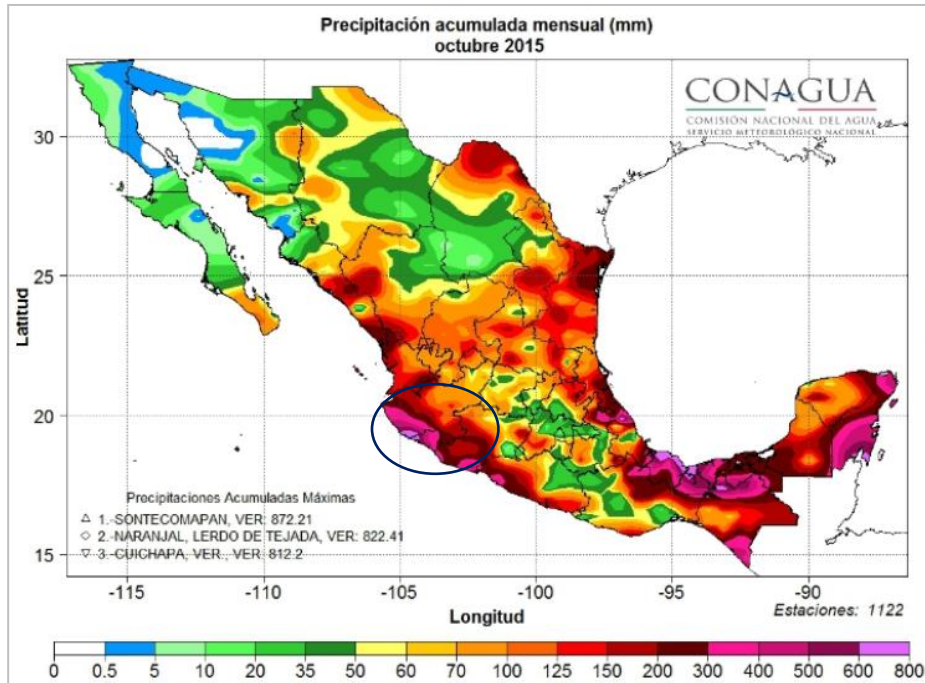


Figura 3.5. Precipitación acumulada mensual nacional en mm del mes de octubre del 2015 en donde se puede observar que, en la costa del pacífico, específicamente en los estados de Colima y Jalisco la precipitación acumulada fue > 200 mm (Tomado de SMN -CONAGUA, 2015).

En el caso del Volcán de Colima, para este año, las estaciones del sistema de monitoreo de lahares no estaban funcionando, por lo que los datos de precipitación consultados fueron de la estación que se encuentra instalada al NE del volcán Nevado de Colima perteneciente a la CONAGUA (Ver capítulo 2), la cual es la más cercana a la barranca Montegrande, zona de estudio de esta investigación. De acuerdo con esta estación, la precipitación total acumulada fue de 1759 mm.

Los meses de mayor precipitación fueron marzo, junio, julio y octubre (Fig. 3.4 y 3.5). En el mes de marzo los días de más lluvia fueron el 14, 15, 16 y 17, en los cuales se acumularon 476.8 mm, esto debido a la entrada de humedad proveniente del océano Pacífico y su interacción con la novena tormenta invernal y el sistema frontal No. 41 (Servicio Meteorológico Nacional, 2015; UASLP, 2018) (Fig. 3.6).

En el mes de junio se registraron 131.8 mm de lluvia acumulada, y los días más lluviosos fueron del 12 al 16 de junio, debido a la interacción del aire húmedo proveniente del océano Pacífico y Golfo de México con un canal de baja presión que se extendió desde el norte hasta el centro del país. Aunado a esto, como consecuencia de estas condiciones, el paso del Huracán Carlos contribuyó a la humedad que hubo en el estado de Colima en esos días (Servicio Meteorológico Nacional,2015) (Fig. 3.4 y 3.7).

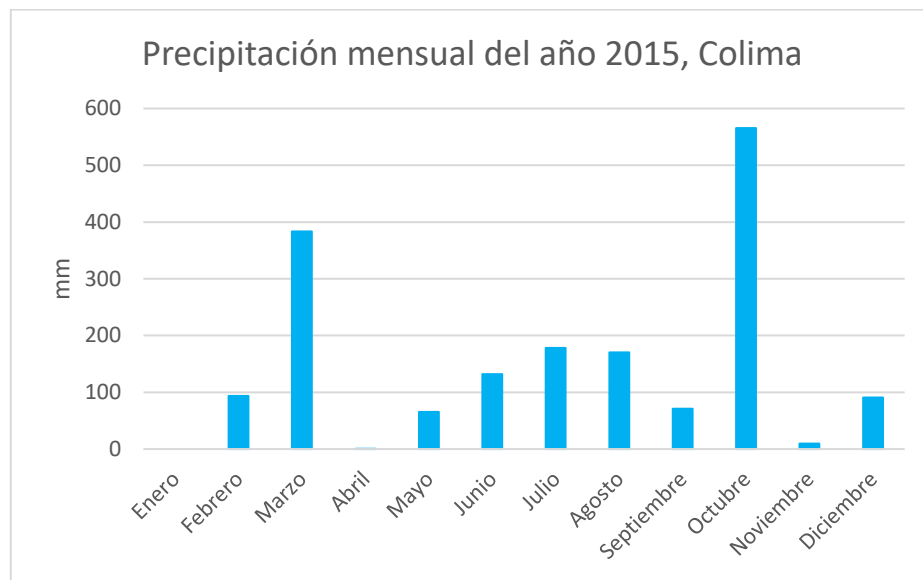


Figura 3.6. Precipitación mensual del año 2015 del estado de Colima. Se puede apreciar que los meses con mayor precipitación pluvial fueron octubre, marzo, julio y agosto (Estación Nevado de Colima, CONAGUA,2015).

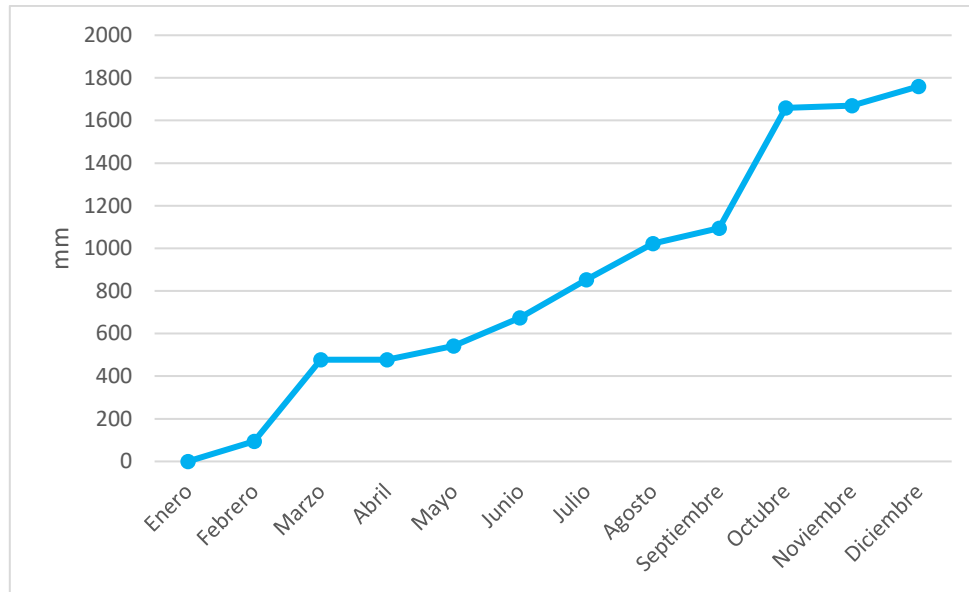


Figura 3.7. Precipitación acumulada del año 2015 en el estado de Colima. Se aprecia que en los meses de marzo y octubre hubo dos diferencias significativas en la cantidad de lluvia acumulada en ese año. Esto fue debido a fenómenos hidrometeorológicos de altas intensidades tales como, el frente frío no. 41 y el Huracán Patricia de categoría 5 (Estación Nevado de Colima, CONAGUA,2015).

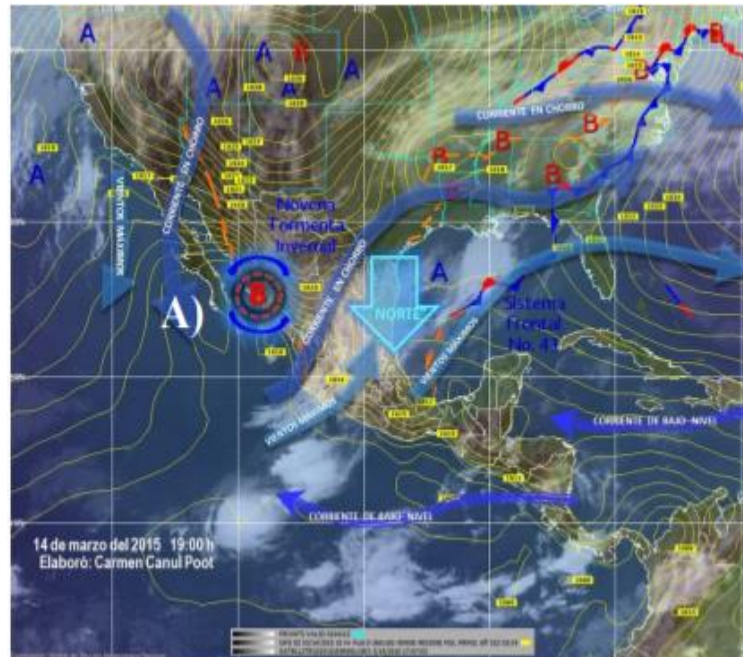


Figura 3.8. Imagen interpretada con los principales sistemas meteorológicos del 14 de marzo de 2015, en donde se puede ver con una flecha azul cielo, el avance en una dirección norte a sur del frente frío no.41 (Imagen tomada del SMN, 2015).

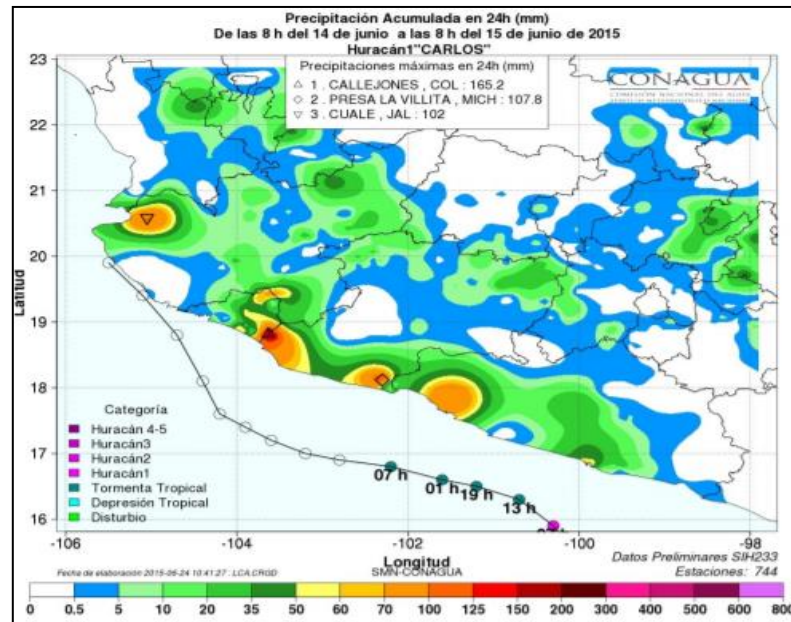


Figura 3.9. Lluvias acumuladas del 14 al 15 de junio de 2015. Se muestra la trayectoria que siguió el huracán Carlos. Mapa elaborado con datos del SIH de CONAGUA, 2015

En el mes de julio se registraron 178.4 mm de lluvia. Los días más lluviosos fueron el 2, 3 y 25. Esto se debió principalmente a un canal de baja presión que se extendió desde el noroeste hasta el centro del país y su interacción con la entrada de humedad del Pacífico (Figura 4). Finalmente, en el mes de octubre se acumularon 565.4 mm de precipitación. Los días más lluviosos de este mes fueron del 23 al 30; debido a la entrada del Huracán Patricia, como ya se mencionó anteriormente (Servicio Meteorológico Nacional, 2015) (Figs. 3.4, 3.8 y 3.10).

Después del análisis del registro de lluvia se seleccionaron los eventos que acumularon más de 10 mm para posteriormente ser correlacionados con la ocurrencia de lahares durante el mismo año. Análisis previos han evidenciado que este valor es el mínimo para poder disparar un lahar (Capra et al., 2010). Se construyó una base de datos con la hora y duración de cada evento, la precipitación acumulada, la intensidad promedio y la intensidad máxima calculada a un intervalo de 5 min (Tabla 3.1).

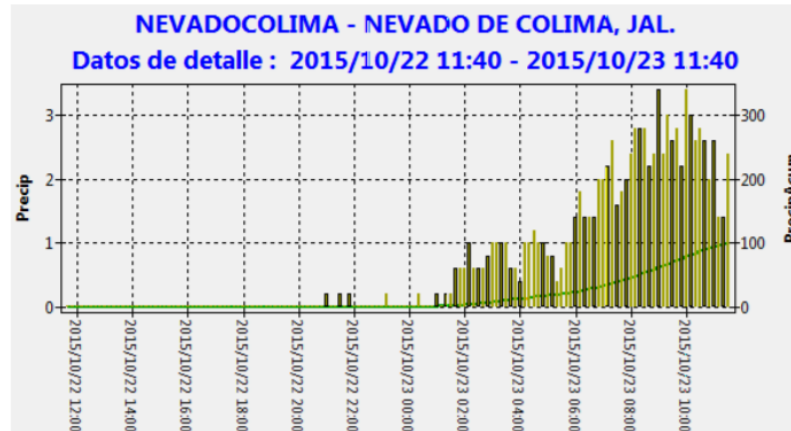


Figura 3.10. Intensidad de la lluvia reportada en la estación automática Nevado de Colima durante el impacto del huracán Patricia en tierra (tomado de Reporte del clima en México del mes de octubre, CONAGUA-SMN, 2015).

A partir del análisis de estos datos, se pudo observar que las mayores intensidades de lluvia coinciden con los meses en los que hubo más precipitación acumulada. En el caso del mes de marzo, el día 16 se registró una intensidad promedio de 71.02 mm/hr y una intensidad máxima de 103.17 mm calculada cada 5 min. El día 17 de marzo se obtuvo una intensidad promedio de 63.23 mm/hr y una intensidad máxima de 70.79 mm cada 5 min. En el mes de julio y agosto, se notaron diferencias muy pequeñas en los eventos pluviales en cuanto a su intensidad, sin embargo, en el mes de octubre hay un incremento abrupto en los datos. El día 23 de octubre presentó una intensidad máxima de 49.18 mm cada 5 min, y en el día 24 del mismo mes, se registró una intensidad máxima de 43.18 mm cada 5 min (Figs. 3.11 y 3.12).

Se observó que los eventos de precipitación que presentan características adecuadas para la ocurrencia de lahares en este año sucedieron en los meses de octubre y marzo principalmente y con menor intensidad en junio, julio y agosto. El evento extremo fue en octubre debido al paso del Huracán Patricia.

Tabla 3.1. Eventos de precipitación mayores a 1 hr y con precipitación acumulada > 10 mm del año 2015 en Colima (CONAGUA,2015). * Intensidad máxima: tomada cada 5 minutos

Evento	Inicio	Final	Lluv.Tot.Ac (mm)	Duración (hr)	Int. Prom (mm/hr)	Intensidad máxima (mm/min)*
15/03/2015	22.0001	23.1668	10.8	1.1667	9.25714286	13.2046
16/03/2015	12	13	13.4	1	13.4	19.1981
16/03/2015	16.0001	17.0001	10	1	10	12
16/03/2015	17.1668	18.1668	15.8	1	15.8	27.5882
16/03/2015	19.3335	20.3335	12.4	1	12.4	22.7929
16/03/2015	20.5001	21.6668	11	1.1667	9.42857143	17.996
16/03/2015	21.8335	22.8335	10	1	10	3.5997
16/03/2015	23.1668	24.3333	15.2	1.1665	13.0301226	19.1925
17/03/2015	0.6667	1.6667	17.2	1	17.2	15.6074
17/03/2015	1.8333	3	15	1.1667	12.8571429	16.7914
17/03/2015	4.5	5.5	11.4	1	11.4	10.8014
17/03/2015	5.6667	6.8333	10.2	1.1667	8.74285714	8.4031
28/05/2015	12.0001	13.1668	16	1.1667	13.7142857	33.5788
12/06/2015	8.1667	9.1667	14.8	1	14.8	61.1789
15/06/2015	8.5	9.5	11.2	1	11.2	23.9842
25/06/2015	9.1668	10.1668	13.4	1	13.4	24.0092
02/07/2015	7.8335	8.8335	26.4	1	26.4	59.985
03/07/2015	5.1667	6.1667	13.6	1	13.6	20.4
25/07/2015	5.5001	6.6668	20.8	1.16667	17.8285714	51.588
04/08/2015	9.1668	10.1668	11.4	1	11.4	26.3838
08/08/2015	18.6668	19.8335	13.4	1.1667	11.3142857	28.7982
17/09/2015	7.6667	8.6667	10.2	1	10.2	7.1988
23/10/2015	5.6667	6.8333	11.4	1.1667	9.77142857	8.4029
23/10/2015	7	8	14.6	1	14.6	25.1981
23/10/2015	8.1667	9.1667	18.8	1	18.8	20.3928
23/10/2015	9.333	10.3333	19.6	1	19.6	20.3971
23/10/2015	10.5	11.5	15.2	1	15.2	16.806
23/10/2015	11.6667	12.6668	13.2	1.0001	13.1981669	18.005
23/10/2015	12.8334722	13.8334722	18.8	1	18.8	16.8004
23/10/2015	14.0001	15.0001	20	1	20	33.5849
23/10/2015	15.1668	16.1668	18.8	1	18.8	23.9988
23/10/2015	16.3335	17.3335	22.4	1	22.4	31.1898
23/10/2015	17.5001	18.5001	21.2	1	21.2	37.192
23/10/2015	18.6668	19.6668	20.2	1	20.2	29.9972
23/10/2015	19.8335	20.8335	21.6	1	21.6	13.1994
23/10/2015	21.0001	22.0001	35.2	1	35.2	46.7762
23/10/2015	22.1668	23.3335	37.8	1.1667	32.4	49.1803
24/10/2015	0	1	31.6	1	31.6	43.182
24/10/2015	1.1667	2.1667	18.2	1	18.2	21.0801
24/10/2015	2.3333	3.3333	18.4	1	18.4	22.8012
24/10/2015	13.1668	14.1668	12	1	12	19.1925
24/10/2015	14.3335	15.3335	16.4	1	16.4	28.79
30/10/2015	12.8335	13.8335	12	1	12	13.1988
30/10/2015	14.0001	15.0001	15.8	1	15.8	21.5896
12/12/2015	11.6667	12.6668	10.6	1	10.598528	8.405

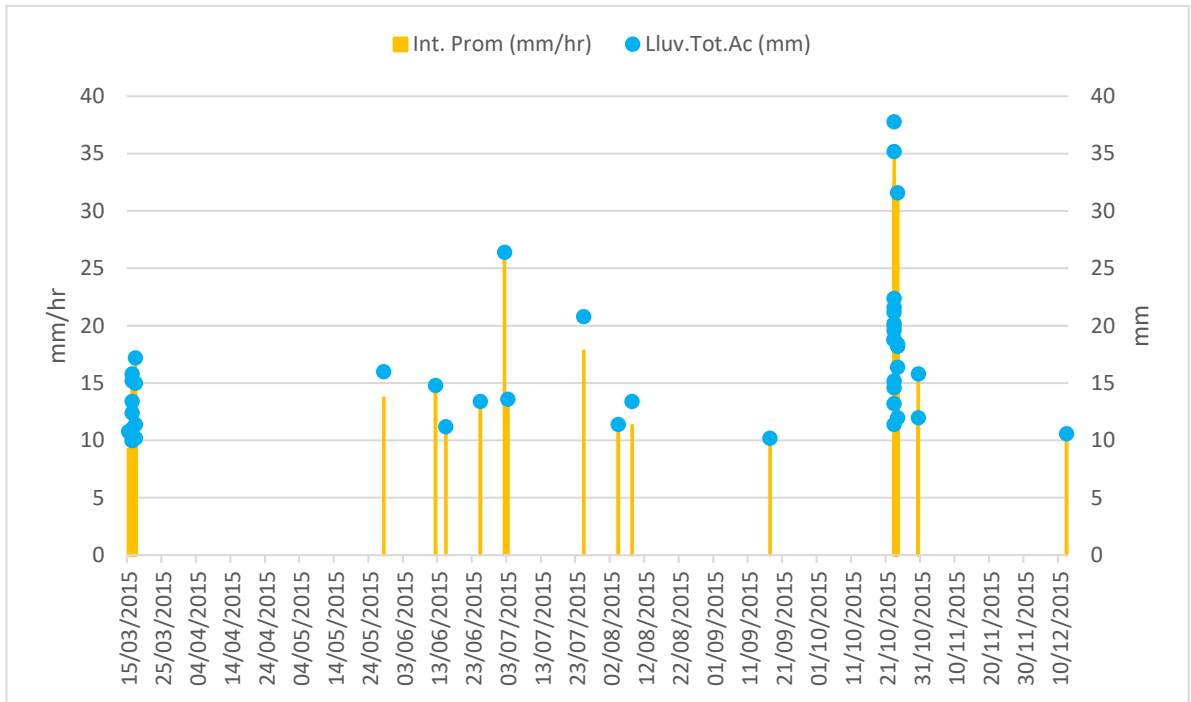


Figura 3.11. Intensidad promedio de precipitación de la estación Nevado de Colima SMN. Se observa que los meses con mayor intensidad fueron julio y octubre.

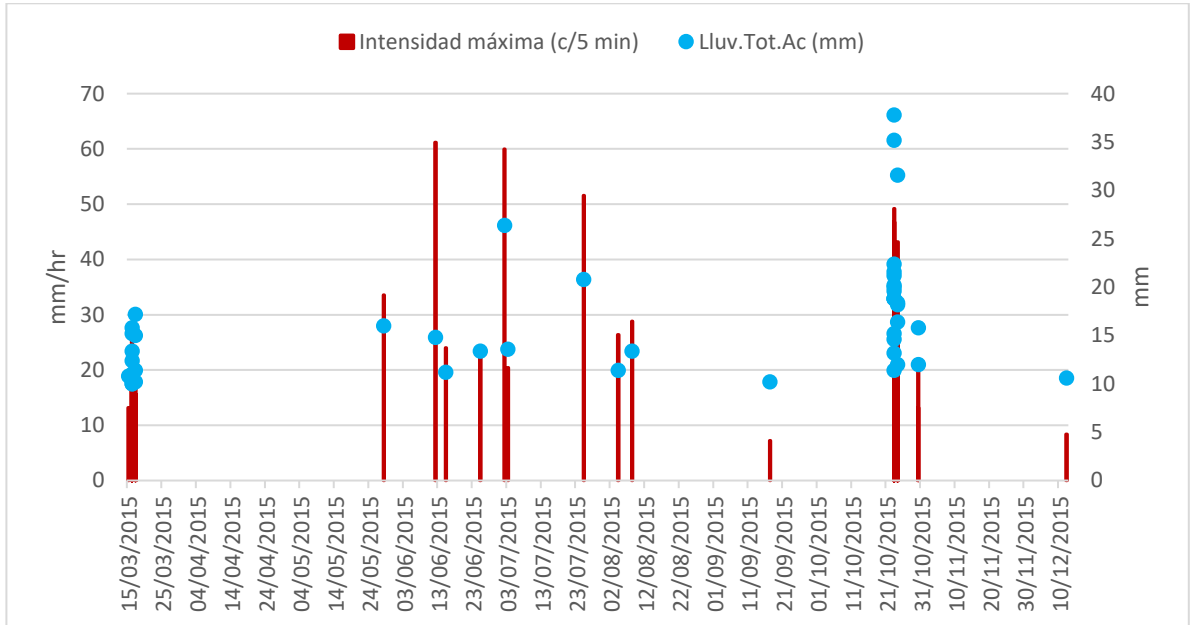


Figura 3.12. Intensidad máxima del año 2015, de la estación Nevado de Colima SMN.

3.2. Precipitación del año 2016

Este año ha sido catalogado como el más cálido dentro de los 137 años registrados globalmente, y finalizó como el XXVI año menos lluvioso desde 1941, al registrarse 744.0 mm a nivel nacional, lo que representan 36.4 mm menos que el promedio (1941-2015). Las lluvias anuales se distribuyeron por debajo del promedio en gran parte de los estados costeros del país. En el Pacífico, los déficits se observaron en regiones desde Sonora hasta Chiapas, donde esta última entidad, experimentó su noveno año menos lluvioso y Oaxaca su tercero. En el resto del país, las lluvias fueron de normal a por arriba de lo normal. En este último rango, Colima experimentó su sexto año más lluvioso, acumuló 1,333.3 mm de precipitación media anual ([Servicio Meteorológico Nacional, 2016](#)).

El fenómeno de El Niño finalizó en la primavera y dio lugar a un evento de La Niña débil, a finales del año. Los meses que presentaron eventos de precipitación importantes fueron de junio a octubre y en menor cantidad noviembre y diciembre.

La temporada de huracanes comenzó el 15 de mayo. En el océano Atlántico se formaron 3 huracanes y 9 tormentas tropicales, de los cuales únicamente el Huracán Earl se aproximó al territorio mexicano. En el océano Pacífico se formaron 13 huracanes y 9 tormentas tropicales. El huracán Newton y Javier fueron los que más se aproximaron al territorio nacional. A continuación, se describen de manera más detallada los huracanes que fueron significativos en México en este año:

- **Huracán Earl (2 al 6 de agosto)**

Este huracán se formó a partir de una onda tropical proveniente de África, el 26 de julio de 2016. Dicha onda tropical, comenzó a avanzar a través del océano atlántico hasta que llegó a Belice en forma de tormenta tropical, y se convirtió en huracán el 3 de agosto. Siguió avanzando hasta llegar a la costa de Campeche, paso

la península de Yucatán, entró al golfo de México en donde agarró fuerza de nuevo y tocó tierra en Veracruz el 5 de agosto. Siguió avanzando por el continente, hasta que llegó a la Ciudad de México el 6 de agosto, en donde se debilitó y se volvió una depresión tropical. Siguió su trayectoria y atravesó todo el territorio nacional hasta llegar a la costa del pacífico nororiental. La humedad remanente de Earl dio lugar a la formación de la tormenta tropical Javier, días después, en el océano Pacífico (Stewart, 2017a) (Fig. 3.13).

- **Tormenta tropical Javier (7 al 9 de agosto).**

Este fenómeno hidrometeorológico se formó a partir de los remanentes del huracán Earl. Un sistema convectivo favoreció la formación de la depresión tropical 11-E, al sur- sureste de Manzanillo, Col., el 7 de agosto. Ese mismo día a las 12 hrs UTC, se convirtió en tormenta tropical al sur de Manzanillo. Una vez que se formó la tormenta tropical Javier, siguió su trayectoria hacia la península de Baja California y el 8 de agosto llegó al sur de Cabo San Lucas. Tocó tierra el 9 de agosto cerca de San José del Cabo, BCS. La interacción del sistema de baja presión con las elevaciones montañosas del lugar permitió que este se debilitara. Siguió península a dentro, sin embargo, el 19 de agosto se disipó al oeste de La Bocana, BCS (Stewart, 2017b) (Fig.3.14).

- **Huracán Newton (4 al 6 de septiembre)**

Este fenómeno hidrometeorológico inició el 4 de septiembre como una tormenta tropical, al sur de Manzanillo Col., la cual se vio favorecida por humedad que comenzó a formarse desde el 29 de agosto, proveniente del océano Atlántico.

Esta tormenta siguió su trayectoria hacia el noroeste, en dirección hacia Baja California. La trayectoria de este fenómeno se vio influenciada por la presencia de una cresta de humedad que cubría parte de Estados Unidos, y llegaba hasta el Golfo

de México. A su vez, esta tormenta se desplazó por aguas cálidas (30°), lo cual le dio mayor fuerza para convertirse en huracán.

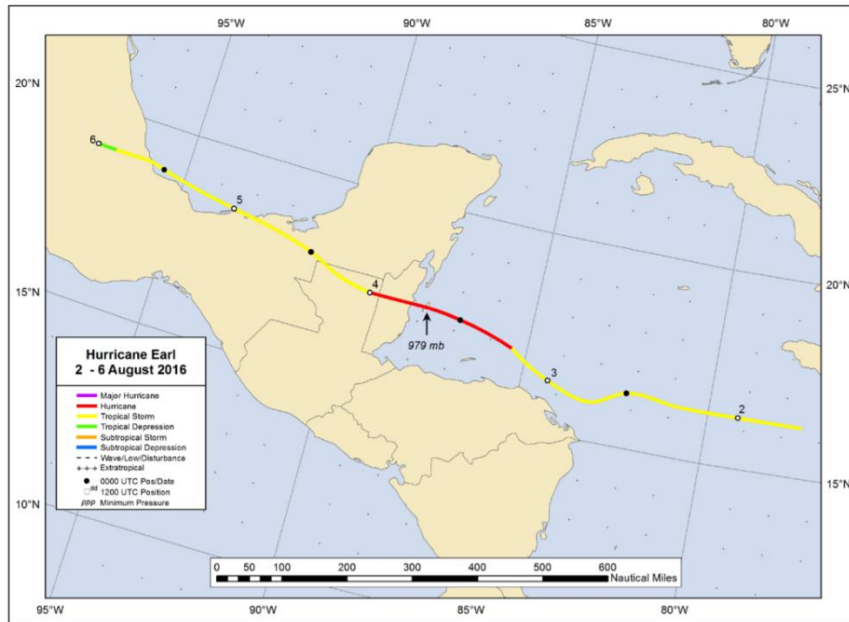


Figura 3.13. Trayectoria del huracán Earl (2 al 6 de agosto de 2016). Tomado de: Stewart, R.S., (2017a)

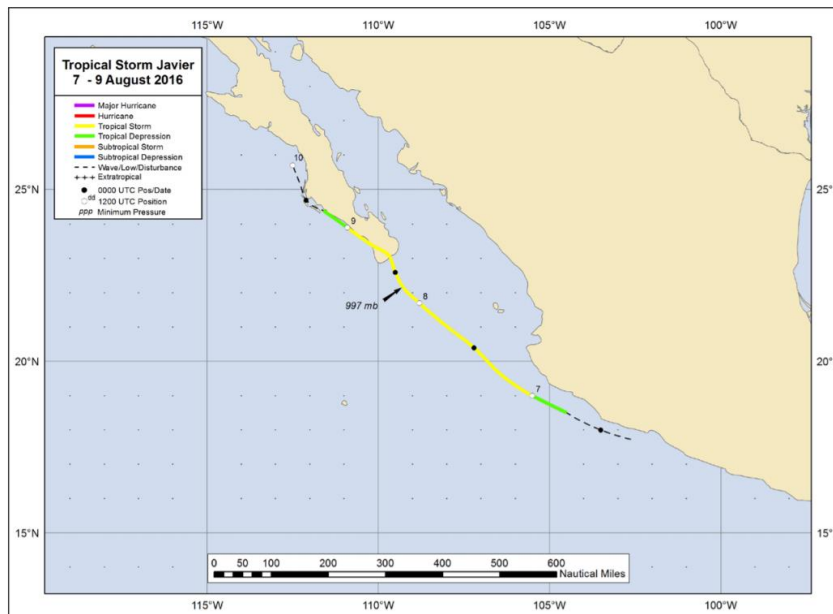


Figura 3.14. Trayectoria de la tormenta tropical Javier (7-9 de agosto 2016). Tomado de: Stewart, R.S., (2017b).

El 5 de septiembre se acercó a Cabo Corrientes, BCS y el 6 de septiembre alcanzó su pico máximo de 90 mph (150 km/h), tocando tierra en Cabo San Lucas BCS. El huracán siguió su trayectoria a través del territorio de Baja California hasta que giró al noreste el 7 de septiembre, atravesó el golfo de baja california y toco tierra nuevamente en la Bahía de Kino, Sonora, en donde se debilitó y se convirtió en tormenta tropical. Siguió avanzando hacia Arizona, EUA y se disipó el 8 de septiembre en territorio norteamericano (Berg, 2017) (Fig. 3.15).

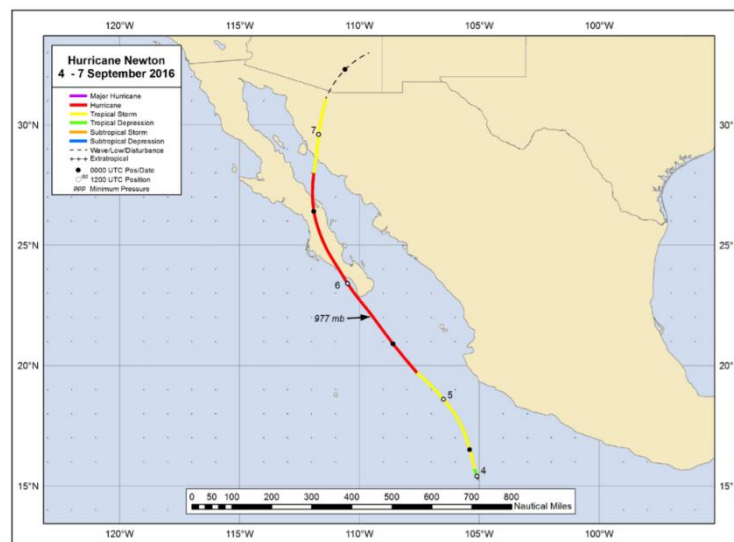


Figura 3.15. Trayectoria del huracán Newton (4 al 7 de septiembre de 2016). Tomado de: Berg (2017).

3.2.1. Precipitación en Colima y Barranca Montegrande.

La mayor parte de las lluvias que ocurren en México se registran durante el verano (junio a septiembre) y se forman principalmente por los sistemas tropicales. De acuerdo con SMN (2016) y el Sistema de Información Hidro climatológica (SIH) de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos-Conagua, en el 2016 los meses más lluviosos fueron Julio (252 mm), Agosto (340 mm) y Septiembre (314 mm) en el estado de Colima, debido principalmente al Monzón de Norteamérica, así

como por la presencia en el centro y sureste de México, de líneas de vaguadas, huracanes y ondas tropicales.

En el mes de Julio la mayor cantidad de precipitación que se registró en el estado de Colima fue por el paso del huracán Frank (21 al 28 de julio), el cual inició su evolución a partir de una zona de inestabilidad atmosférica que fue detectada la noche del 19 de julio aproximadamente a 700 km al sursureste de Puerto Ángel, Oax. Al día siguiente mantuvo un desplazamiento con rumbo al oeste y por la noche cuando se encontraba a 585 km al sur de Acapulco, Gro., sus vientos alcanzaron los 45 km/h. La tarde del día 21 de julio el disturbio se convirtió rápidamente en la tormenta tropical Frank, aproximadamente a 455 km al sur de Manzanillo, Col., con vientos máximos de 75 km/h y rachas de 95 km/, sus bandas nubosas afectaron la región oriente y costa central del Pacífico.

Las lluvias máximas acumuladas del 20 al 22 de julio se observaron en los estados de Nayarit (133.5 mm) y Sinaloa (125.0 mm y 114.8 mm) en las estaciones climatológicas de Ruíz, Ixpalino y Acatitlán respectivamente (SMN, 2016) (Fig. 3.16)

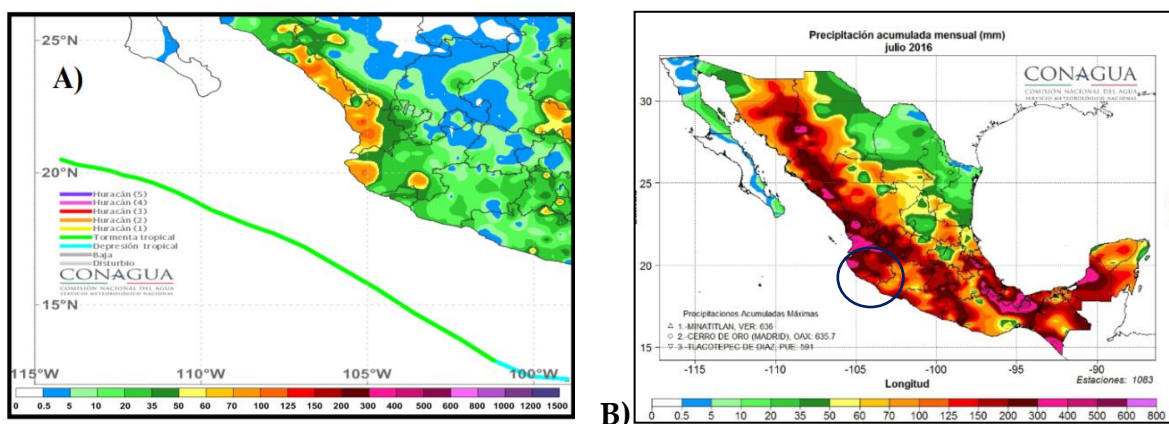


Figura 3.16. A) Cantidad de precipitación (mm) de la costa del Pacífico oriental por el paso del huracán Frank. B) Precipitación acumulada a nivel nacional de Julio 2016. Fuente: SMN, 2016, 2018

En el mes de agosto hubo aporte de humedad en el pacífico debido a la presencia de la tormenta tropical Javier. En Colima se registraron valores de precipitación de los 50 a los 300 mm, en todo ese mes (Fig. 3.16).

En septiembre, ocurrió la actividad máxima de la temporada de ciclones tropicales debido a la energía disponible en la atmósfera, que resulta del calentamiento de la superficie del mar desde que comenzó el verano en el hemisferio norte. El huracán Newton aportó bastante humedad en las costas del Pacífico, en el caso de Manzanillo Col., se registraron 179.2 mm de precipitación pluvial (SMN, 2016,2018) (Fig. 3.18).

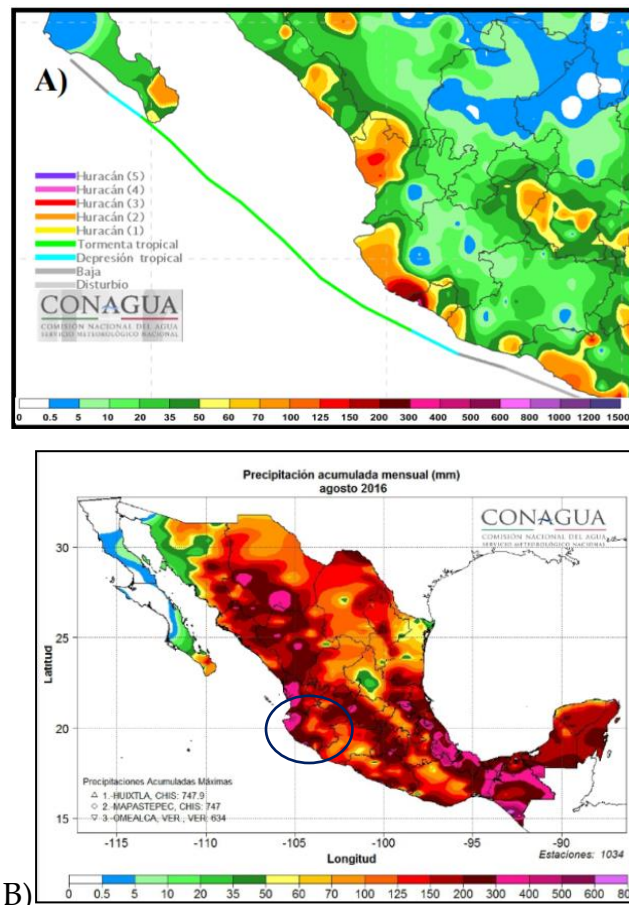


Figura 3.17. A) Cantidad de precipitación (mm) de la costa del Pacífico oriental por el paso de la tormenta tropical Javier. B) Precipitación acumulada a nivel nacional de agosto 2016. Fuente: SMN, 2016, 2018.

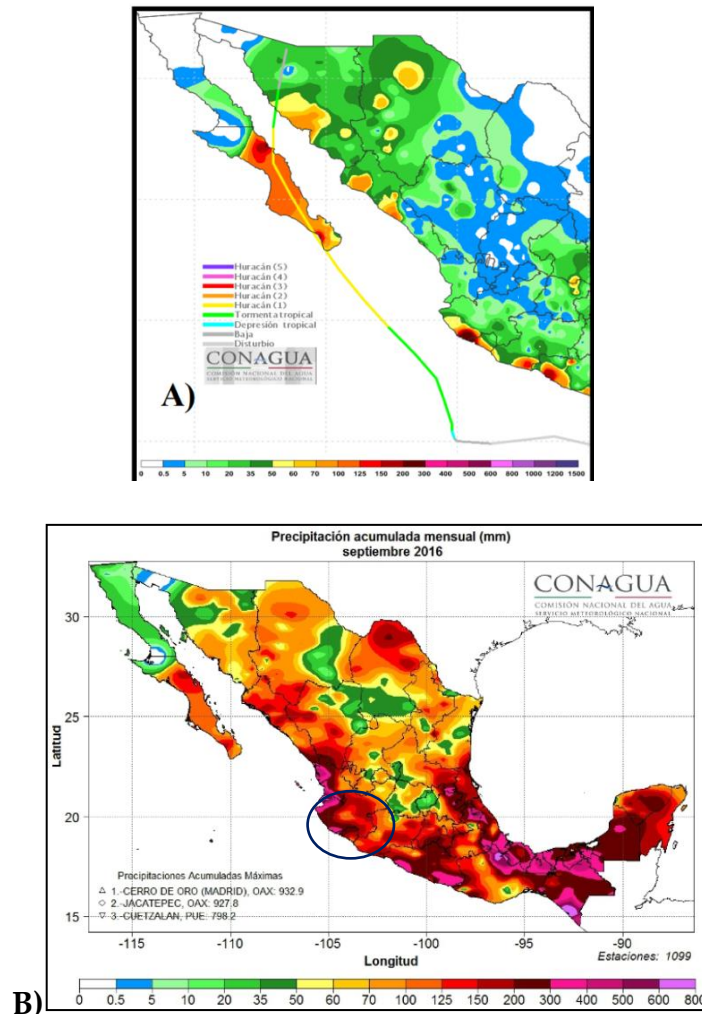


Figura 3.18. A) Cantidad de precipitación (mm) de la costa del Pacífico oriental por el paso del huracán Newton. B) Precipitación acumulada a nivel nacional de septiembre 2016. Fuente: SMN, 2016,2018.

Específicamente en la barranca Montegrande en el Volcán de Colima, las mediciones de la precipitación del año 2016 se hicieron con la estación pluviométrica HOBO ubicada en la estación de monitoreo de lahares ubicada a 6 km de distancia desde el cráter (ver capítulo II). A partir de estos registros, se pudo observar que en la Barranca Montegrande los máximos valores de precipitación se presentaron en los meses de julio, agosto y septiembre.

En el mes de Julio se registró un valor de precipitación acumulada de 207.6 mm debido a líneas de vaguada y los remanentes de humedad que dejaron a su paso la tormenta tropical *Estelle* (15- 22 de Julio) y el huracán (*I*) *Frank* (21- 28 julio); en agosto se acumularon 720.8 mm de lluvia debido a los remanentes de humedad del huracán *Earl* y la tormenta tropical *Javier*, y a las vaguadas que se formaron en el centro del país en ese momento. En septiembre se acumularon 204.8 mm de lluvia principalmente por el paso del huracán *Newton* (Figs.3.19 y 3.20).

Se estimó la precipitación acumulada de cada evento, la intensidad promedio y la intensidad máxima calculada a un intervalo de 5 min (Tabla 3.2). A partir del análisis de estos datos, se pudo observar que las mayores intensidades coinciden con la temporada de mayor ocurrencia de huracanes y tormentas tropicales.

En el caso del mes de junio, el día el día 25 se observó una intensidad promedio de 32.94 mm/hr y una intensidad máxima de 119 mm cada 5 min. El día 03 de julio se obtuvo una intensidad promedio de 43.38 mm/hr y una intensidad máxima de 105.80 mm cada 5 min.

En el mes de agosto, el día 19 presentó una intensidad promedio de 27.15 mm/hr y una intensidad máxima de 137.59 mm cada 5 min, y en el día 30 del mismo mes, se observó una intensidad máxima de 77.93 mm cada 5 min (Fig.3.21). A su vez, se puede observar que a partir del 21 de junio incrementó la intensidad de precipitación en la zona de estudio y el 28 de agosto hubo otro incremento abrupto; cabe aclarar que, aunque estas fechas no coincidan con algún evento hidrometeorológico importante, las precipitaciones son muy frecuentes en esta zona por la alta humedad que hay en la atmosfera en esta temporada y por el efecto orográfico (Fig. 3.22).

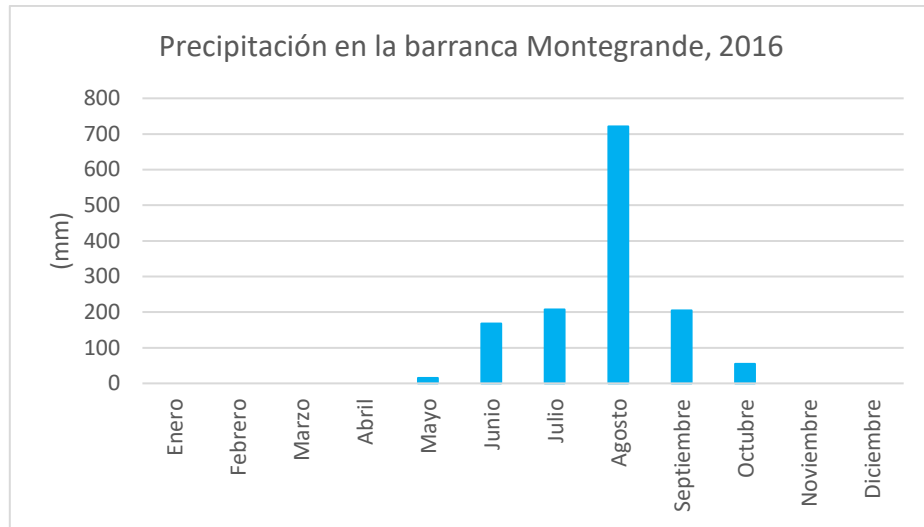


Figura 3.19 Precipitación registrada en la barranca Montegrando del volcán de fuego de Colima, en el año 2016.

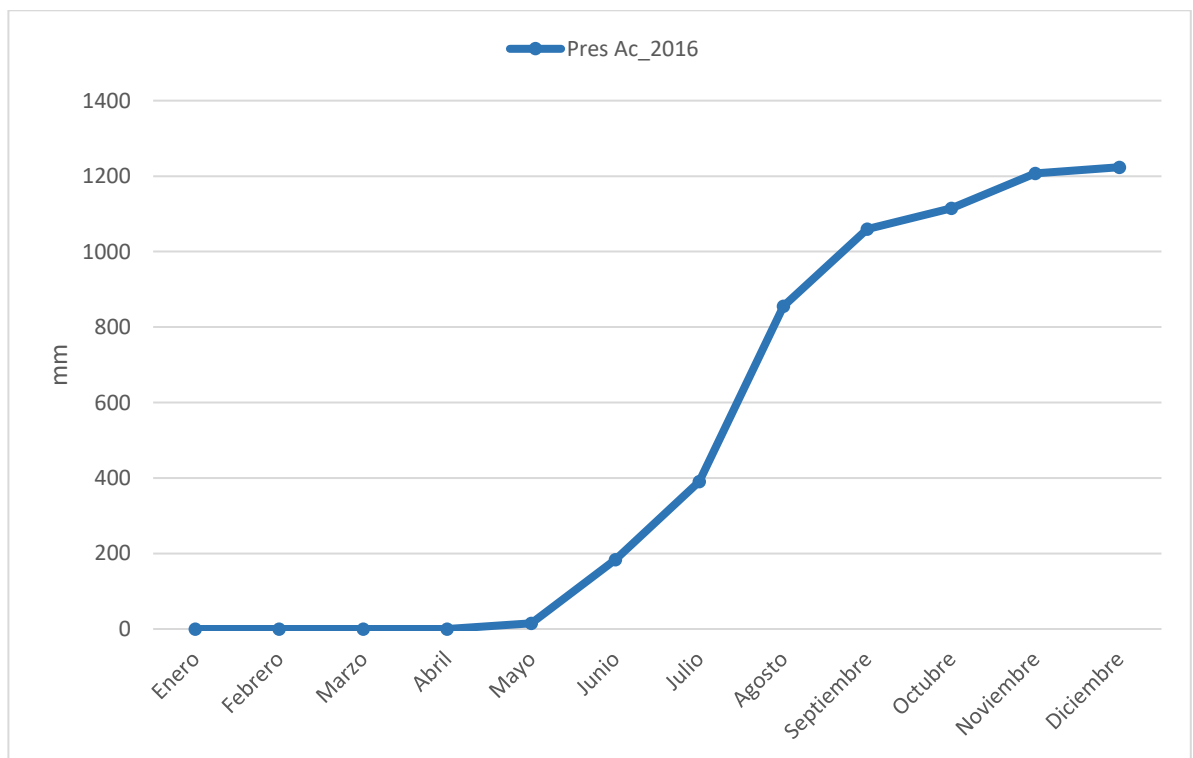


Figura 3.20. Precipitación acumulada registrada en la barranca Montegrando del volcán de fuego de Colima, en el año 2016. Se puede observar a partir de junio hay un incremento en los eventos de precipitación lo que marca claramente la temporada de lluvias de ese año.

Con base en la información analizada, se puede observar que los eventos de precipitación que tienen características que favorecen la ocurrencia de lahares en este año, sucedieron en los meses de junio, julio y agosto principalmente, y con menor intensidad en mayo y octubre. A pesar de que este año fue catalogado como un año seco, el estado de Colima fue uno de los que presentó más lluvia. Es evidente que la influencia de los huracanes y tormentas tropicales aumenta la frecuencia de lluvias que se presentan en la zona de estudio. Esto es un factor importante para la ocurrencia de lahares, sin embargo, es importante analizar más factores tales como las características morfológicas y sedimentológicas del área de estudio.

Tabla 3.2. Eventos de precipitación mayores a 1 hr y con precipitación acumulada > 10 mm del año 2016 de la barranca Montegrando en el Volcán de fuego, Colima. * Intensidad Máxima tomada cada 5 min.

Evento	Inicio	Final	Lluv.Tot.Ac (mm)	Duración (hr)	Int. Prom (mm/hr)	Intensidad máxima (mm/min)*
13/05/2016	2.99305556	4.69305556	11.4	1.7	6.70588235	37.9784
15/06/2016	23.27639	24.75972	24.6	1.483333	16.58427	40.8
21/06/2016	15.24306	15.77639	10.8	0.533333	20.25	60.5989
22/06/2016	3.35922	4.859722	29.4	1.5	19.6	118.001
23/06/2016	19.04306	19.80972	13.36	0.766667	17.42609	
25/06/2016	18.37639	19.35972	32.4	0.983333	32.94915	119.0004
27/06/2016	8.72638889	10.0763889	10.4	1.35	7.7037037	36.4024
27/06/2016	10.0930556	11.3930556	11	1.3	8.46153846	21.1989
03/07/2016	19.40972	20.49306	47	1.083333	43.38462	105.8039
07/07/2016	19.05972	20.50972	20.8	1.45	14.34483	67.2
09/07/2016	2.993056	4.07638889	11	1.08333333	10.1538462	55.0035
12/07/2016	19.9930556	21.0930556	10.8	1.1	9.81818182	39.3991
21/07/2016	18.10972	18.97639	14.8	0.866667	17.07692	
22/07/2016	17.59306	18.7263889	12	1.13333333	10.5882353	8.2
28/07/2016	14.09306	15.34306	9.6	1.25	7.68	
30/07/2016	17.90972	19.22639	11.4	1.316667	8.658228	58.0012
31/07/2016	18.54306	19.40972	12	0.866667	13.84615	45.1993
02/08/2016	18.59306	19.6930556	15	1.1	13.636363	30.7994
03/08/2016	17.74306	19.22639	9.2	1.483333	6.202247	30.7991
19/08/2016	0.679444	2.012778	36.2	1.333333	27.15	137.5962
21/08/2016	23.76278	24.76278	19.2	1	19.2	23.6319
28/08/2016	18.34611	19.17944	12.8	0.833333	15.36	31.2
30/08/2016	24.42944	26.34611	24	1.916667	12.52174	77.9346
30/08/2016	23.09611	24.0961111	32	1	32	75.3278
31/08/2016	24.1794444	25.1794444	17.6	1	17.6	58.5435
31/08/2016	25.2627778	26.6794444	14.8	1.41666667	10.4470588	89.92
03/09/2016	1.762778	3.09611111	12.2	1.33333333	9.15	51.1659
04/09/2016	1.596111	2.596111	19.2	1	19.2	142.7648
09/09/2016	25.1794444	26.2627778	21	1.08333333	19.3846154	87.3591
15/09/2016	1.096111	2.179444	11.8	1.083333	10.89231	48
21/09/2016	22.67944	23.92944	12.4	1.25	9.92	35.6468
29/09/2016	23.67944	24.34611	11.4	0.666667	17.1	82.013
13/10/2016	22.09611	23.09611	25.8	1	25.8	61.5038
10/12/2016	11.6125	12.3516667	12	0.73916667	16.2344983	48.316

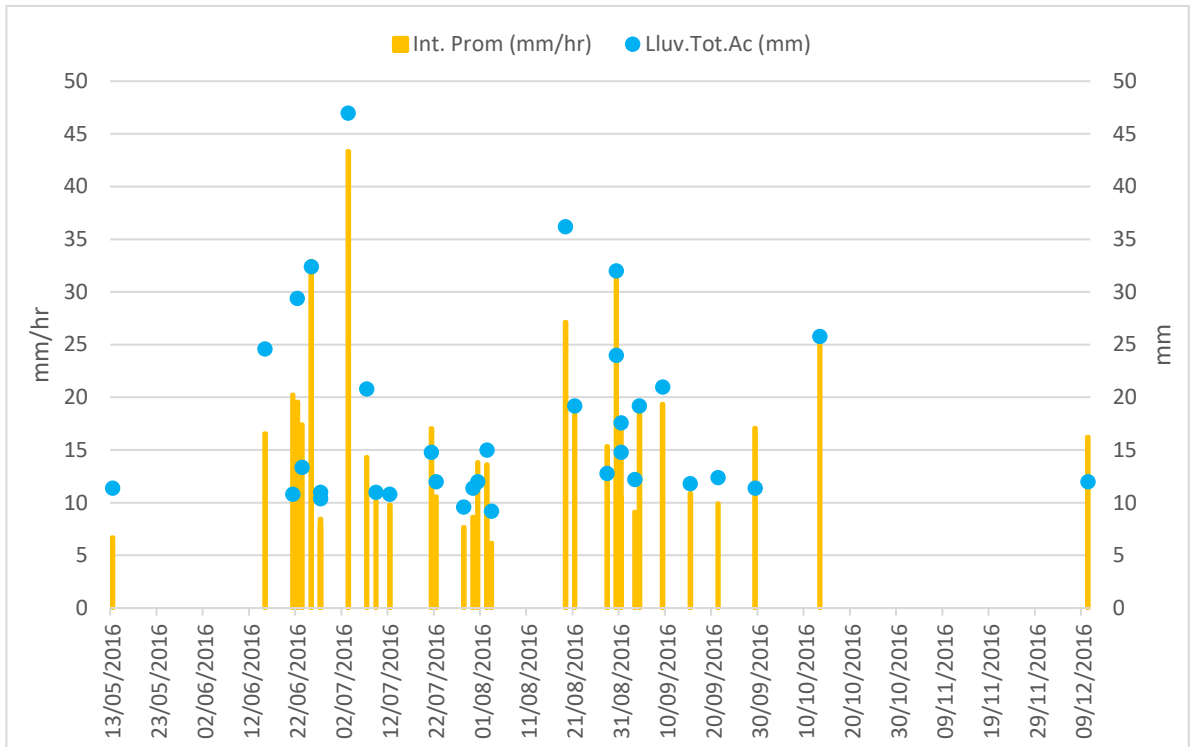


Figura: 3.21. Intensidad promedio año 2016, en la barranca Montegrando en el Volcán de Colima. Se observa que los meses con mayor intensidad fueron junio, julio y agosto.

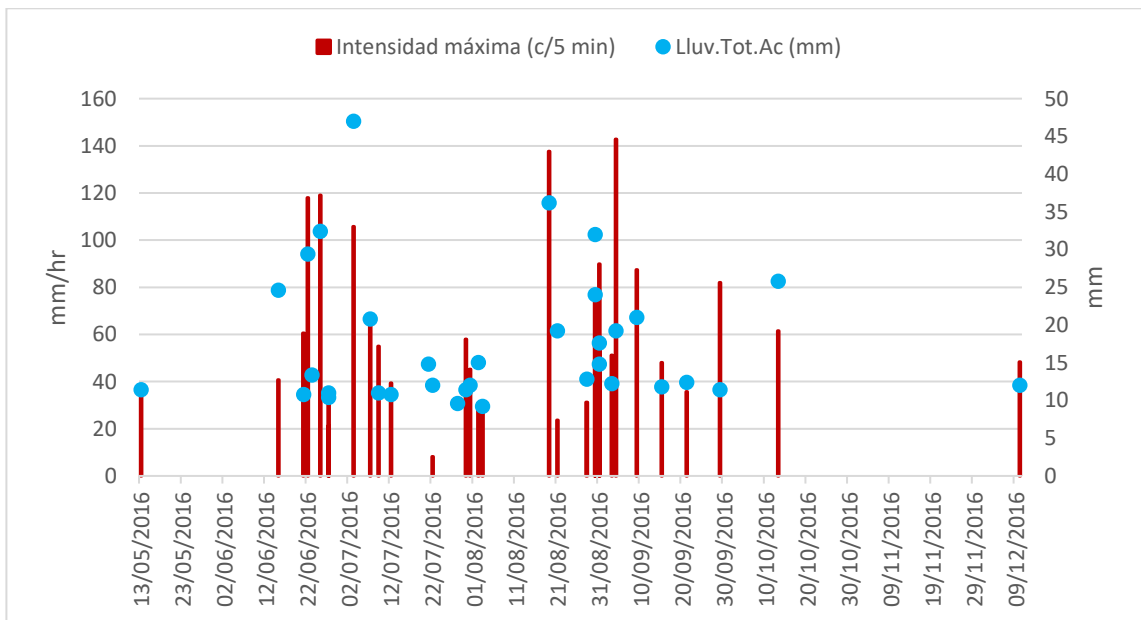


Figura 3.22. Intensidad máxima del año 2016, de la barranca Montegrando en el Volcán de Colima. Se observa que los meses con eventos significativos fueron junio y agosto.

3.3. Precipitación del año 2017.

De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional (2017), este año se consideró lluvioso para muchos estados de la República Mexicana. A nivel nacional se ubicó ligeramente por arriba del promedio histórico, al acumularse el 100.1% de lluvia (1941-2016).

La temporada de huracanes comenzó antes de lo previsto, el 19 abril se presentó la primera tormenta tropical en el océano Atlántico llamada *Arlene*, muy lejos de las costas nacionales. La temporada de huracanes para el océano Atlántico consistió en 8 tormentas tropicales y 11 huracanes.

En el océano Pacífico se desarrollaron 11 tormentas tropicales y 9 huracanes (NOAA, 2017). De ellos, solo cuatro entraron o se aproximaron al territorio nacional provenientes del Atlántico y seis desde el Pacífico. El primer ciclón cercano a México fue la tormenta tropical *Adrián* que se formó al sureste de Chiapas el 9 de mayo de 2017 (SMN,2017).

En el verano, de junio a agosto, se acumularon 389.4 mm a nivel nacional. En este período, Campeche experimentó su sexto verano más lluvioso, al mismo tiempo Colima y Morelos registraron su verano más lluvioso; en esta última entidad llovió más del doble de lo que normalmente llueve.

El otoño considerado de septiembre a noviembre, fue el 27° más lluvioso, con un valor de lluvia acumulada a nivel nacional de 257.4 mm, el cual equivale al 102.6% de la lluvia promedio. Lluvias por arriba del promedio se observaron en el noreste, occidente, centro, oriente y en porciones del sur y de la Península de Yucatán.

En el occidente, Jalisco experimentó su décimo otoño más lluvioso, Nayarit su quinto y Colima su cuarto período más húmedo. Por otra parte, Morelos, en el centro

del país alcanzó su cuarto otoño más lluvioso y en el oriente, Veracruz el séptimo más lluvioso. En contraste, la Ciudad de México experimentó su décimo otoño menos lluvioso y Sonora su tercer otoño menos húmedo

En este año, destacó el mes de septiembre por aportar el 21.7% a la lluvia anual, cuando su aporte promedio es del 18.4%, debido a las lluvias que dejaron las tormentas tropicales Lidia y Pilar, los huracanes Max y Katia, además de dos frentes fríos. En contraste, marzo con el 2.0%, es el mes de menor aporte de acuerdo con los registros climatológicos (SMN, 2017). A continuación, se describirán más a detalle los huracanes que tuvieron una influencia importante en las precipitaciones de la costa del Pacífico oriental.

- **Huracán Dora (23–27 junio).**

No fue un huracán que impactó a la República Mexicana, sin embargo, debido a su trayectoria cercana al país, aportó lluvias que fueron benéficas para el sur del territorio nacional. También fue el primer ciclón que alcanzó la categoría de huracán en este año. En su etapa de formación provocó nublados y lluvias que alcanzaron el norte de Oaxaca. Al final de su trayectoria, las lluvias más sobresalientes ocurrieron en la costa de Jalisco. El 26 de junio se convirtió en un huracán de categoría 1 en la escala Saffir-Simpson, a 275 km al sursuroeste de Manzanillo, Colima y a 415 km al sur de Cabo Corrientes, Jalisco. Dora se convirtió en el primer huracán de la temporada 2017 en el Pacífico nororiental.

Este huracán, avanzó paralelo a las costas del Pacífico mexicano. El 27 de junio se degradó a tormenta tropical y continuó su avance alejándose de las costas nacionales a 400 kilómetros al sur de Cabo San Lucas, B.C.S. Sus remanentes se debilitaron el 28 de junio al suroeste de la Península de Baja California.

A pesar de varios días de trayectoria cercana a las costas nacionales dejó pocas lluvias con respecto a lo esperado, con el máximo acumulado de 340.7 mm en cinco días en la estación climatológica de El Cuale, en la región de Puerto Vallarta, Jalisco (Berg, 2018) (Fig. 3.23).

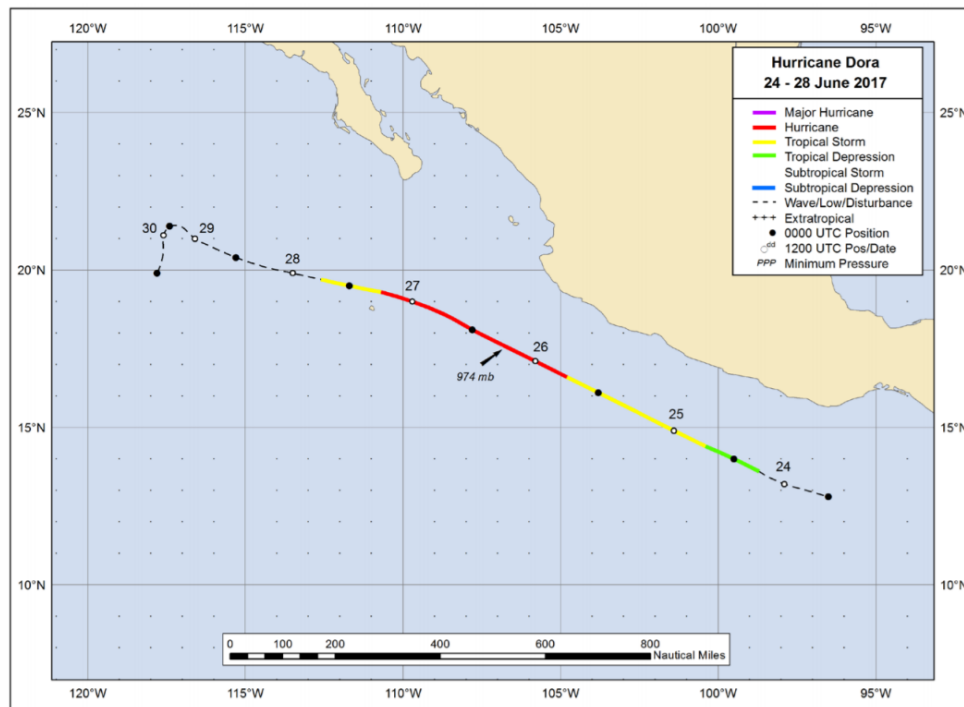


Figura 3.23. Trayectoria del huracán Dora (23 al 27 de junio 2017). Tomado de Berg, 2018.

- **Tormenta tropical Pilar (23–24 septiembre).**

Fue otro ciclón tropical que no ingresó al territorio nacional pero su aportación de lluvias y humedad fue importante para las costas del Pacífico mexicano. En su etapa previa (disturbio y sistema de baja presión) aportó humedad a las costas de Guerrero y Oaxaca entre el 21 y 23 de septiembre. La noche del 23 de septiembre se convirtió en tormenta tropical a 195 km al sureste de Cabo Corrientes, Jalisco. El 24 de septiembre avanzó paralelo a las costas de Nayarit y un día después avanzó paralelo a las costas de Sinaloa a la altura de Mazatlán, ya como depresión tropical.

En la tarde de ese mismo día sus remanentes se ubicaron a 100 km al noroeste de Mazatlán (Stewart, 2018) (Fig. 3.24).

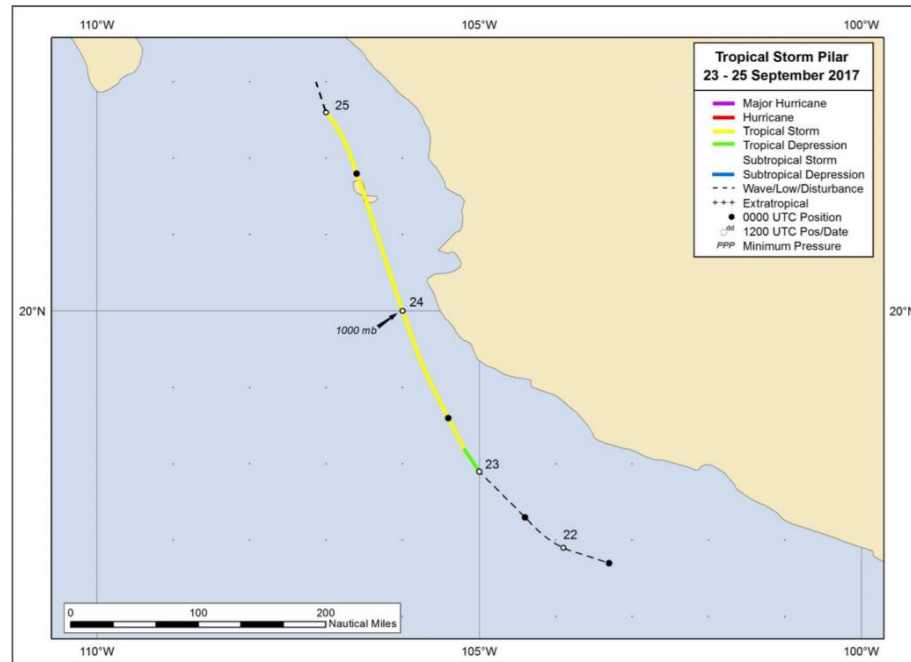


Figura 3.24. Trayectoria de la tormenta tropical Pilar (23 al 24 de septiembre 2017). Tomado de Stewart, 2018.

3.3.1. Precipitación en el Estado de Colima y en la Barranca Montegrande.

De acuerdo con el [Servicio Meteorológico Nacional \(2018a\)](#), la precipitación media anual en el estado de Colima fue de 249.8 mm. Los meses que presentaron mayor precipitación fueron julio con 287.4 mm, agosto con 560.3 mm y septiembre con 528 mm, no obstante, los que presentaron bajos registros de precipitación fueron enero, abril y noviembre.

La precipitación total registrada en la barranca Montegrande con la estación HOBO localizada en la zona más proximal fue de 978.6 mm, y coincide con la temporada de lluvias a nivel nacional y estatal. Los meses más lluviosos fueron julio

y septiembre, seguidos de agosto. En el mes de julio se registraron 313 mm de lluvia relacionados con ondas tropicales y líneas de baja presión.

En el mes de agosto se acumularon 200 mm de precipitación debido a los remanentes de humedad del huracán Franklin y la formación del huracán Lidia, y finalmente en septiembre se acumularon 324 mm, siendo el mes con mayor precipitación ya que había una intensa inestabilidad atmosférica: el aporte de humedad de la tormenta tropical Pilar, ondas tropicales, el frente frío no. 3 y las lluvias remanentes de los huracanes Lidia y Katia. (Figs. 3.24 y 3.25).

La tabla 3.3 muestra los valores de precipitación acumulada de cada evento, la intensidad promedio y la intensidad máxima calculada a un intervalo de 5 min. A partir de esto, se observó que los meses de julio y septiembre presentaron los valores más altos de intensidad promedio y máxima.

El 3 de julio se acumularon 14 mm de precipitación y se estimó una intensidad promedio de 46.29 mm/hr y una intensidad máxima de 87.27 mm/hr calculada cada 5 min. El 8 de julio se registraron 31.6 mm de lluvia, una intensidad promedio de 31.93 mm/hr y una intensidad máxima de 94.7 mm/hr calculada en un intervalo de 5 min.

El 21 de julio se acumularon 18 mm de lluvia en una hora y se estimó una intensidad promedio de 18.53 mm/hr y una intensidad máxima de 111 mm /hr cada 5 min.

Finalmente, otro día que presentó valores altos, fue el 18 de septiembre en el cual se acumularon 28.2 mm de precipitación en una hora, una intensidad promedio de 52.49 mm/hr y una intensidad máxima de 79.11 mm/hr cada 5 min (Figs. 3.26 y 3.27).

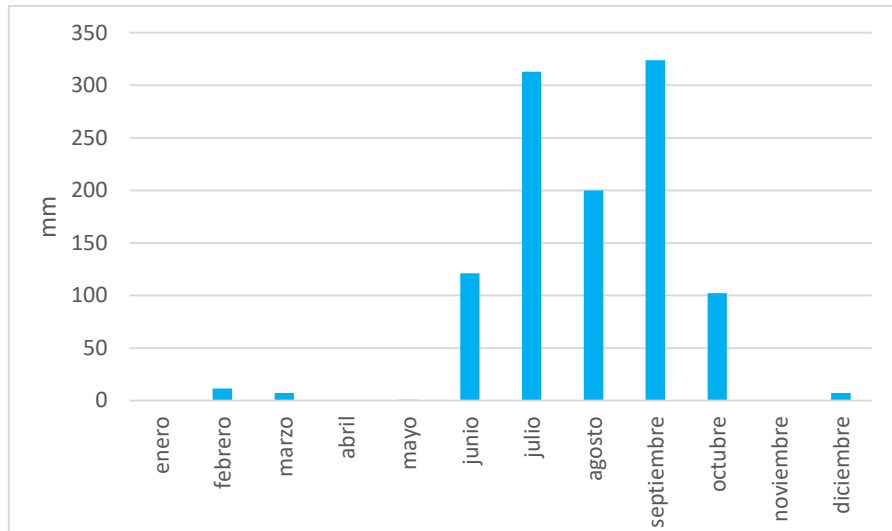


Figura 3.25. Precipitación registrada en la barranca Montegrande del Volcán de Colima, en el año 2017

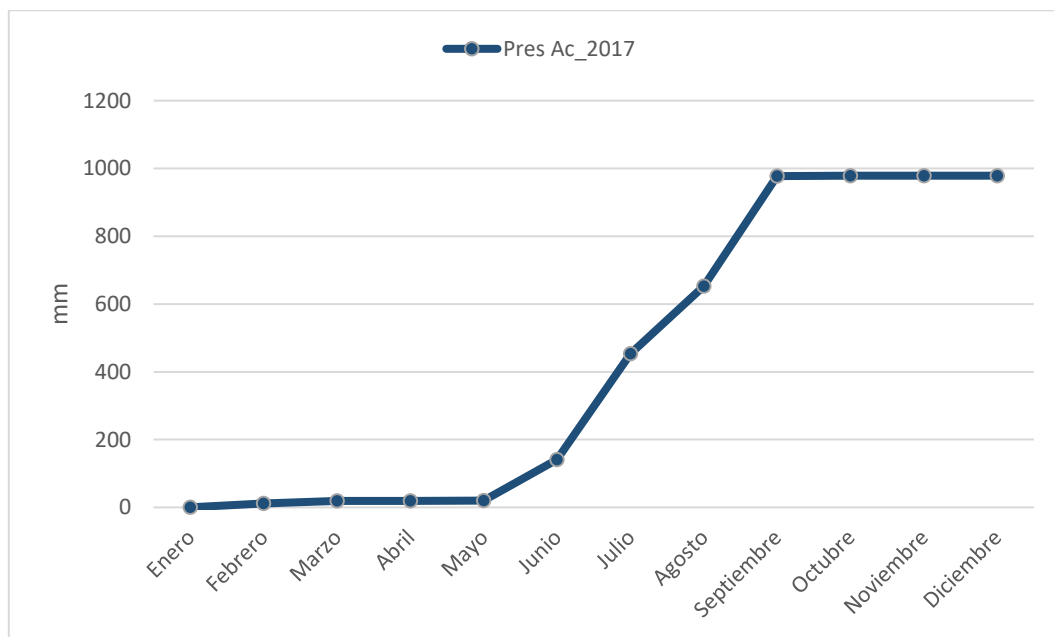


Figura 3.26. Precipitación acumulada registrada en la barranca Montegrande del Volcán de Colima, en el año 2017 Se puede observar a partir de junio hay un incremento en los eventos de precipitación lo que marca claramente la temporada de lluvias de ese año y que no hubo presencia de eventos extraordinarios.

Tabla 3.3. Eventos de precipitación mayores a 1 hr y con precipitación acumulada > 10 mm del año 2017 de la barranca Montegrande en el Volcán de fuego, Colima. *Intensidad máxima tomada cada 5 min.

Evento	Inicio	Final	Lluv.Tot.Ac (mm)	Duración (hr)	Int. Prom (mm/hr)	Intensidad máxima (mm/ min)*
18/06/2017	1.85722222	2.67972222	12	0.8225	14.5896657	55.4371
19/06/2017	12.1283333	13.2519444	13.2	1.12361111	11.7478368	59.9847
25/06/2017	0.075	1.08277778	10.6	1.00777778	10.5181918	36.8999
30/06/2017	12.7972222	13.8002778	37	1.00305556	36.8872888	48.3908
03/07/2017	17.8455556	18.1652778	14.8	0.31972222	46.2901825	87.2742
05/07/2017	15.3475	16.9547222	10	1.60722222	6.22191497	4.9312
07/07/2017	16.1616667	16.4547222	13.6	0.29305556	46.4075829	40
08/07/2017	12.5688889	13.5647222	31.8	0.99583333	31.9330544	94.706
09/07/2017	11.8202278	13.0072222	23	1.18694444	19.3774865	71.1273
12/07/2017	10.865	12.2041667	10	1.33916667	7.46733043	17.0272
12/07/2017	12.2177778	12.7675	11.2	0.54972222	20.3739262	25.1232
21/07/2017	16.0105556	17.025	18.8	1.01444444	18.5323111	111.7715
22/07/2017	16.0433333	17.0638889	10	1.02055556	9.79858465	46.2422
27/07/2017	16.8269444	17.5875	29.2	0.76055556	38.3929876	47.8098
28/07/2017	13.8586111	14.4830556	14.6	0.66861111	21.8363108	56.6999
10/08/2017	23.0025	23.9913889	10.6	0.98888889	10.7191011	11.60321
23/08/2017	14.6022222	15.345	10.2	0.74277778	13.7322364	39.1238
29/08/2017	22.7222222	23.9811111	10.6	1.25888889	8.42012357	8.8418
30/08/2017	0.00861111	1.58972222	10	1.58111111	6.3246662	13.7905
30/08/2017	8.45	9.9075	10.2	1.4575	6.99822847	7.0247
30/08/2017	9.9075	11.4044444	10.2	1.49694444	6.81388013	14.9991
30/08/2017	15.5277778	16.7422222	10.2	1.21444444	8.3989021	16.2182
02/09/2017	20.0102778	21.2547222	13.4	1.2444444	10.7678571	34.2327
03/09/2017	12.7486111	13.7552778	15.6	1.00666667	15.4966887	52.5332
03/09/2017	15.6861111	17.0375	10	1.35138889	7.39979445	41.9592
04/09/2017	17.6938889	18.9988889	10.6	1.305	8.12260536	11.6084
04/09/2017	19.0061111	19.9327778	12.6	0.92666667	13.5971223	55
08/09/2017	11.7172222	12.7277778	38	1.01055556	37.6030786	70.4332
17/09/2017	14.0711111	14.7619444	14.4	0.69083333	20.8443908	4.32
18/09/2017	16.5297222	17.0669444	28.2	0.53722222	52.4922441	79.1109

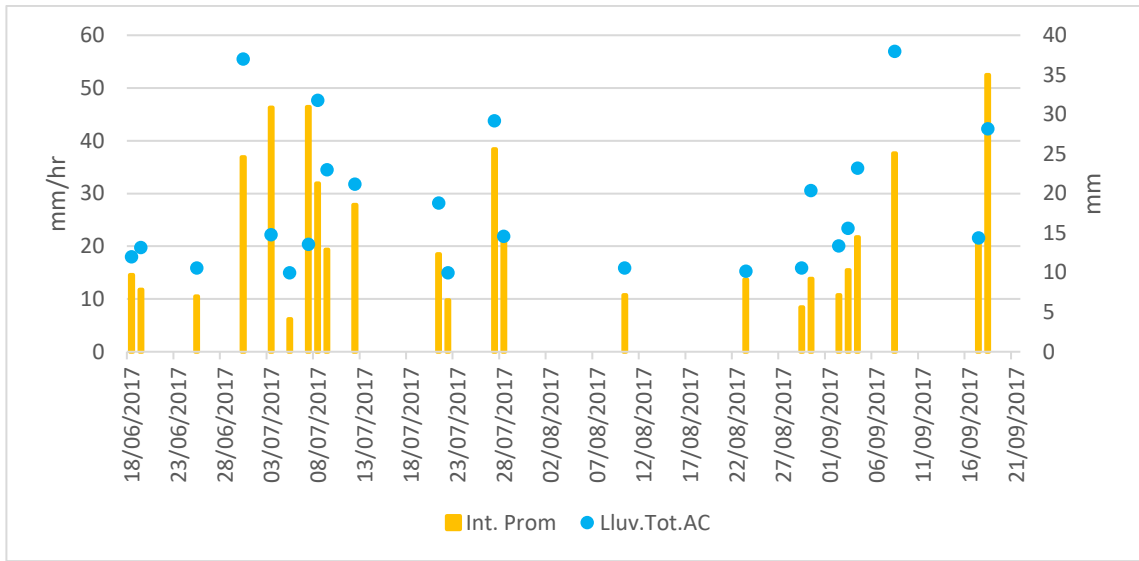


Figura 3.27. Intensidad promedio de los eventos de precipitación mayores a una hora en la barranca Montegrande, Volcán de fuego, Col.

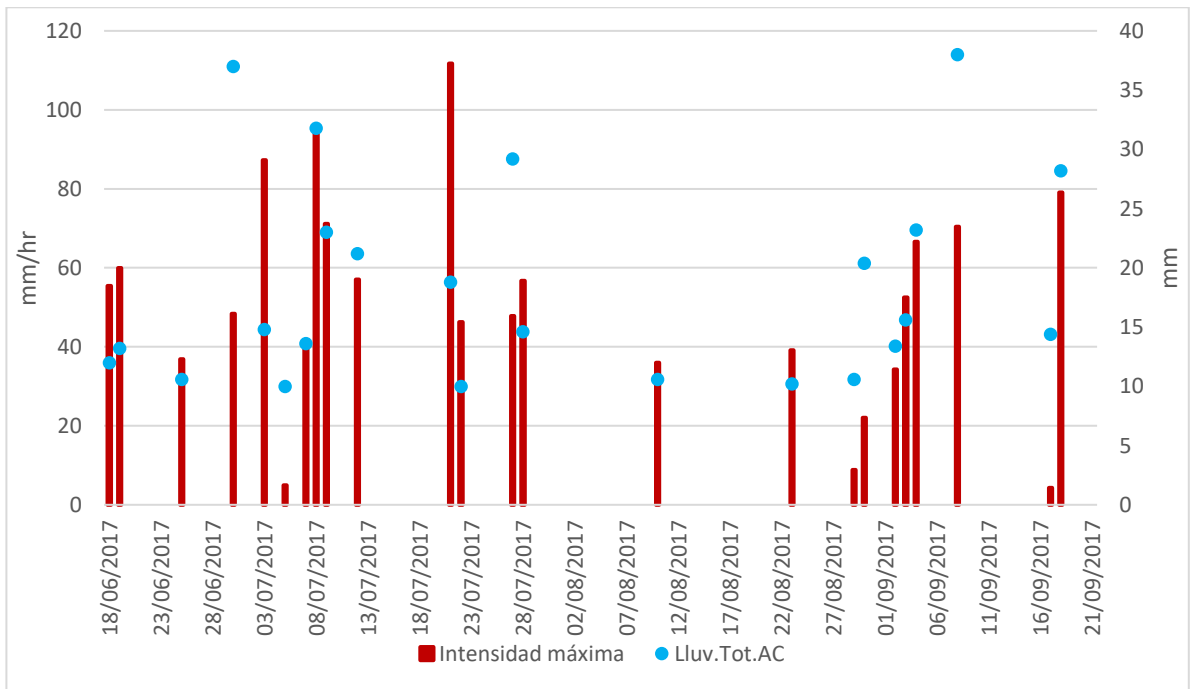


Figura 3.28. Intensidad máxima calculada a un intervalo de 5 min, de los eventos de precipitación mayores a una hora en la barranca Montegrande, Volcán de fuego, Col.

Es evidente que la influencia de los huracanes y tormentas tropicales aumenta la frecuencia de lluvias que se presentan en la zona de estudio. En el año 2015 se pudo observar que los meses de mayor precipitación fueron marzo, julio y octubre. En el mes de marzo se presentaron tormentas invernales y frentes fríos lo que provocó eventos de precipitación de hasta 10 hrs en un día, en el Volcán de Colima.

En el mes de julio no hubo tanta influencia de eventos meteorológicos importantes únicamente canales de baja presión y humedad proveniente del pacífico y los eventos de precipitación eran de 1 hr por día; sin embargo, en el mes de octubre se puede apreciar que la influencia del huracán Patricia fue muy fuerte, se presentaron las mayores intensidades de lluvia y la duración de los eventos de precipitación fueron de hasta 22 hrs en un día.

En el año 2016, los meses más lluviosos fueron julio, agosto y septiembre. En el mes de julio los remanentes de humedad del huracán Estelle y Frank influyeron para que se presentaran eventos de precipitación de 1 hora al día. En el mes de agosto, los huracanes Earl y Javier provocaron que hubiera mayor precipitación en el volcán ya que estos huracanes sí tocaron el territorio nacional y los eventos de precipitación registrados en la zona de estudio duraron hasta 3 hr por día; este fue el mes que presentó los valores más altos de intensidad promedio. En el mes de septiembre, el paso del huracán Newton influyó para que ocurrieran eventos de lluvia con una duración de 1 hr por día.

Finalmente, en el año 2017, los meses de mayor precipitación fueron julio, agosto y septiembre. En el mes de Julio y agosto no hubo mayor influencia por eventos meteorológicos importantes, únicamente el aporte de humedad de ondas tropicales, línea de baja presión y el paso de huracanes a distancia generaron eventos de lluvia con una duración de 1 a 2 hrs por día; sin embargo, en el mes de septiembre se presentó una gran inestabilidad atmosférica en la región, la tormenta tropical

Pilar, el frente frío No.3 y el paso de los huracanes Lidia y Katia, provocaron que los eventos de precipitación en la zona de estudio fueran de 2 hrs de duración, siendo este el mes con los valores de intensidad promedio más altos del año.

Con base en lo anterior se puede observar que existe una relación directa con la ocurrencia de huracanes y los eventos de precipitación de larga duración, sobre todo es importante aclarar que entre más cerca esté el evento hidrometeorológico de las costas de Colima, más lluvias de larga duración e intensidad habrá en la zona de estudio.

Se pudo observar que el periodo en el que se presentan las precipitaciones más duraderas (> 2hrs en un día) es de agosto a octubre, que justo es la parte final de la temporada de lluvias correspondiente al Volcán de Colima. En el inicio de la temporada de lluvias (junio- Julio) los eventos de precipitación duran máximo 1 hr. A su vez, existen eventos hidrometeorológicos extraordinarios que pueden darse a inicios de año, como en el caso de marzo del 2015 sin embargo a pesar de que pueden ser de larga duración, el valor de intensidad puede permanecer dentro del promedio general e incluso ser bajo.

CAPÍTULO IV. LAHARES EN LA BARRANCA MONTEGRANDE, 2015- 2017

4.1. Análisis de señales sísmicas por lahares en el Volcán de Colima.

Los lahares desencadenados por lluvia son fenómenos muy comunes en el Volcán de Colima, durante la temporada de precipitaciones. Esta temporada, abarca los meses de junio a octubre (Capra et al., 2010). La ocurrencia de lahares es más frecuente y de menor magnitud durante el comienzo de la temporada de lluvias (junio- julio), sin embargo, en el periodo final de la temporada (septiembre- octubre) la frecuencia de lahares baja, pero la mayoría son de magnitudes altas, especialmente durante las fuertes precipitaciones asociadas a huracanes (Capra et al., 2013 y Vázquez et al., 2014).

Los registros sísmicos del Volcán de Colima se obtienen de la red sismológica de la universidad de dicho estado (RESCO), y de los geófonos instalados en las estaciones de monitoreo de lahares a cargo del Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. Estos instrumentos, se han utilizado para identificar lahares y así, poder definir sus características sísmicas de acuerdo con el contenido de sedimentos, la magnitud, descarga y velocidad de emplazamiento.

Antes de la instalación de estaciones de monitoreo con videocámara, los lahares eran identificados únicamente con la señal sísmica, por lo que no era posible distinguir si la señal correspondía a un flujo de agua (< 20% en volumen de sedimentos), a un flujo hiperconcentrado o a un flujo de escombros (Dávila et al., 2007). Por el contrario, a partir del 2011 se inició un monitoreo sistemático y se acopló el registro de la señal sísmica a la imagen del evento, para poder hacer una correlación.

Vázquez *et al.* (2016b), analizaron tres eventos de lahar que ocurrieron el 25 de junio de 2012, 11 de junio de 2013 y 24 de julio de 2013, en la barranca Montegrande, a partir de información obtenida en tiempo real.

Con base en el análisis de las imágenes tomadas por la cámara instalada en la estación de monitoreo, se lograron identificar en la señal sísmica, las diferentes partes del flujo (frente, cuerpo y cola). Aunado a esto, se pudo definir que las amplitudes máximas de la señal sísmica se relacionan con la llegada de los frentes principales del lahar ricos en bloques de dimensiones de decenas de centímetros a metros, mientras que los picos secundarios, se asociaron a las fluctuaciones del cuerpo del flujo.

A su vez, se pudieron separar las corrientes fluviales de los flujos hiperconcentrados y de los flujos de escombros con frentes enriquecidos en bloques. En particular, se observó que los frentes correspondían al pico máximo de amplitud, con una duración de pocos segundos y valores que pueden llegar a amplitudes de $>10^{-3}$ m/s y con frecuencias entre los 10-20 Hz, mientras que el cuerpo y cola más diluida del flujo, presentaron amplitudes inferiores con valores entre 10^{-4} y 10^{-3} m/s en forma de fluctuaciones que se identificaron a lo largo de varios minutos con frecuencias de hasta los 40 y 50 Hz. Esto se debe a la turbulencia que pueden desarrollar, a diferencia del frente y cuerpo en donde domina un régimen laminar.

A partir de esta información, se pudo hacer una clasificación de dos tipos de lahares: Eventos de un pulso y eventos multipulso. Los eventos de un solo pulso son aquellos con limitada duración, de 1 a 1.5 hr., que se presentan con una oleada principal compuesta de un frente enriquecido en bloques, seguido por el cuerpo con variaciones en descarga y concentración de fracción sólida en el límite de un flujo de escombros y flujo hiperconcentrado, y finalmente la cola que consiste en corrientes diluidas menores (Fig. 4.1).

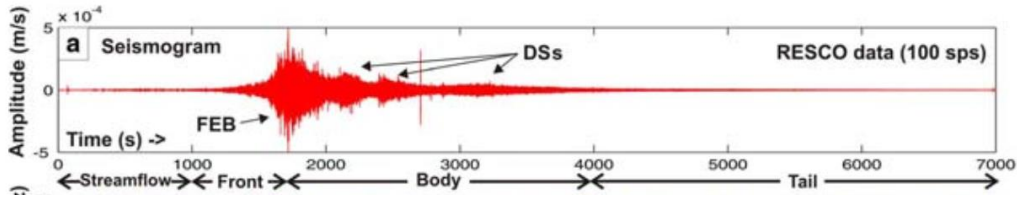


Figura 4.1. Ejemplo de lahar de un solo pulso registrado el 24 de julio de 2012. Tomado de: Vázquez *et al.*, 2016.

Los eventos multipulso, presentan más de un pulso con las características antes descritas. Estos eventos duran más de 3 hrs y son precedidos y seguidos por un flujo de agua prolongado (Fig.4.2).

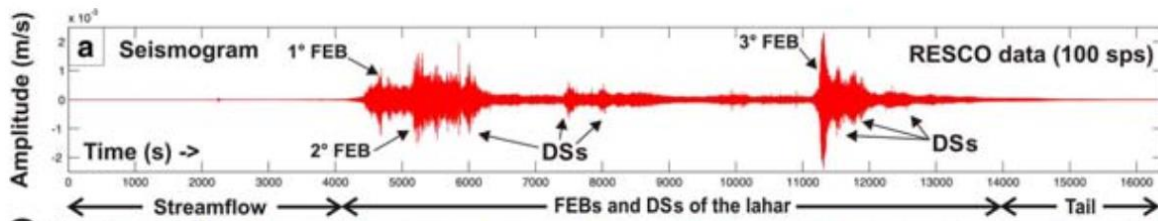


Figura 4.2. Ejemplo de lahar multipulso registrado el 11 de junio de 2013. Tomado de: Vázquez *et al.*, 2016.

Coviello *et al.* (2018), llevaron a cabo un estudio para identificar la transición entre una corriente fluvial y un flujo hiperconcentrado a partir del análisis de señales de vibración del suelo, las cuales fueron registradas por un geófono de componente vertical de 10 Hz instalado fuera del canal, y de muestras colectadas directamente del flujo que ocurrió el 8 de octubre del 2015, en la barranca La Lumbre del Volcán de Colima. El límite de amplitud que establecieron para hacer esta diferenciación fue de 1.8×10^{-3} mm/s.

En este trabajo se realiza una clasificación de los eventos principales que ocurrieron en los años 2015, 2016 y 2017 basada en las amplitudes máximas, sus variaciones y la duración total.

Con base en el trabajo de Vázquez *et al.* (2014 y 2016) y el trabajo de Coviello *et al.* (2018), se utilizaron los siguientes criterios para la identificación de los eventos en las temporadas de lluvia analizadas, así como para una descripción cualitativa de cada uno de ellos:

- Frente enriquecido en bloques (FEB): amplitudes $> 10^{-3}$ cm/s con duración de pocos segundos hasta 1 min.
- Corrientes Diluidas o Flujo hiperconcentrado (fluctuaciones en descargas. cambios a lo largo de varios minutos): amplitudes $> 10^{-4}$ cm/s.
- Corriente fluvial: amplitudes $< 10^{-4}$ cm/s

Para cada evento descrito se reporta la cantidad de lluvia acumulada en las estaciones en donde se tuvo acceso a los datos y a su vez, se lleva a cabo la caracterización del flujo de acuerdo con la clasificación de lahares Multipulso (MPE) y de un solo pulso (SPE) de Vázquez *et al.* (2016b). Sin embargo, es muy importante tomar en cuenta que los eventos de precipitación, sobre todo al principio de la temporada de lluvia son muy locales, por lo que los datos adquiridos por una estación no necesariamente corresponden a la lluvia acumulada que disparó el lahar.

A lo largo de la descripción de los diferentes eventos, se utilizará el término de *corriente diluida* para variaciones del flujo con bajas amplitudes de la señal, en el rango de flujos hiperconcentrados; sin embargo, es importante recalcar que con este término siempre se hace referencia a un lahar, ya que los rangos de amplitudes son superiores a 10^{-4} cm/s. Se prefiere utilizar el término de “*diluido*” debido a que no se tiene una estimación exacta de la concentración de sedimentos. Únicamente se utilizará el término *Flujo hiperconcentrado* en los eventos en los que existen evidencias visuales proporcionadas por las cámaras de la estación de monitoreo.

Con el termino de *pulso*, se indican incrementos en la amplitud que pueden correlacionarse con incrementos en la descarga de un flujo, que por su forma de onda (de larga duración) no necesariamente correspondería a un frente enriquecido en bloques. A este propósito es importante evidenciar que dependiendo del tamaño de bloques en los frentes, la amplitud de la señal podrá ser diferente entre eventos, sin embargo, en un evento la forma de onda del frente es claramente distintiva con respecto a la señal del cuerpo y cola.

4.2. Catálogo de lahares, Barranca Montegrande año 2015

En el año 2015 se presentaron 12 lahares los cuales, oscilan dentro de un rango de amplitudes máximas de 3.6×10^{-3} cm/s a 9.8×10^{-2} cm/s, y un rango de frecuencia de 10 Hz a 40 Hz. A su vez, estos eventos presentaron una duración mínima de 45 min y una duración máxima de 395 min.

En este año, el primer evento se registró en el mes de marzo, mucho antes del inicio de la temporada de lluvia. Por otro lado, en los primeros meses de la temporada de lluvias (jun- ago.) se registraron 8 lahares de los cuales, el de mayor magnitud tuvo una duración de 90 min y una amplitud máxima de 3.6×10^{-3} cm/s.

En la fase final de la temporada de lluvia, (sept-oct) se registraron 3 eventos. El de mayor duración fue de 395 min y tuvo una amplitud máxima de 3.8×10^{-2} cm/s.

Características generales de los principales lahares observados.

- Lahares del 17 de marzo de 2015

En este día, hubo dos eventos de lahar significativos (Fig. 4.3). El primero, denominado lahar 1, fue registrado a las 00:45 hrs GMT y presentó flujos hiperconcentrados previos al frente principal con amplitudes $< 1 \times 10^{-3}$ cm/s. En la señal se puede observar un aumento gradual de la amplitud conforme pasa el

tiempo. A las 12:58 hrs GMT, se registró primer frente (1.5×10^{-3} cm/s) y a las 01:25 hrs GMT, se registró el frente principal del flujo, con una amplitud máxima de 5.75×10^{-3} cm/s. El cuerpo del lahar permaneció con amplitudes de $\pm 2 \times 10^{-3}$ cm/s durante 45 min, y posteriormente, se registró otro frente enriquecido en bloques a las 02:15 hrs GMT con una amplitud máxima de 4×10^{-3} cm/s, seguido de otro más grande con una amplitud máxima de 9.2×10^{-3} cm/s.

Este lahar es un evento multipulso y su duración total fue de 124 min. Las frecuencias dominantes en los frentes de este lahar fueron de 10 a 25 Hz, mientras que el rango de frecuencias del cuerpo fue de 10 a 40 Hz (Fig. 4.4).

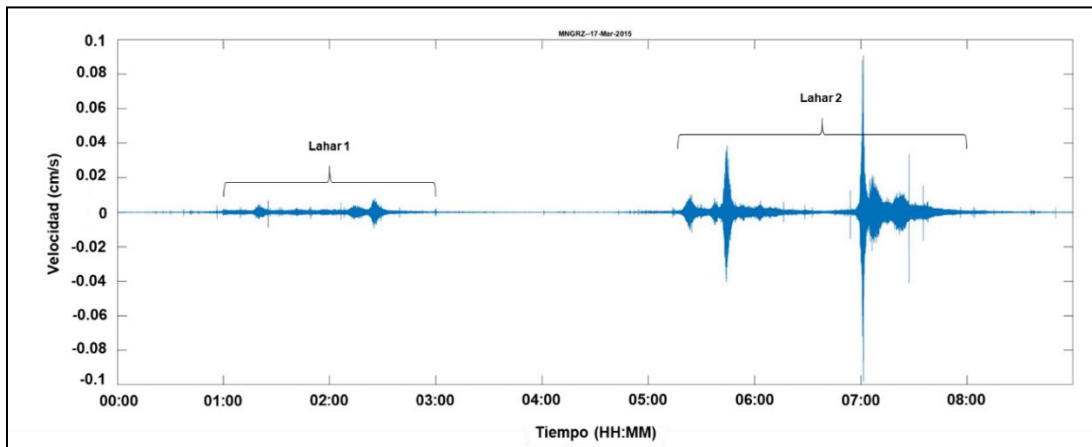


Figura 4.3. Lahares formados el 17 de marzo del 2015.

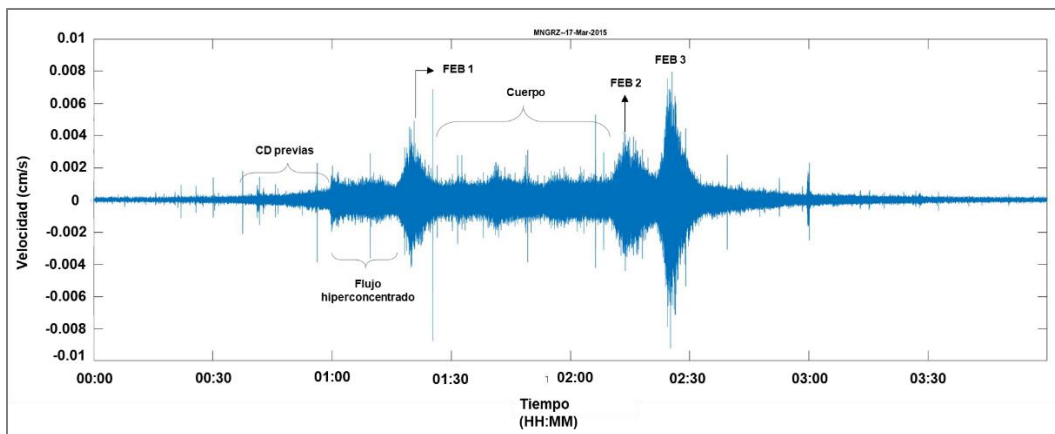


Figura 4.4. Registro sísmico del lahar 1 formado a las 00:45 hrs GMT el 17 de marzo de 2015; CD: Corrientes diluidas; FEB: Frentes enriquecidos en bloques.

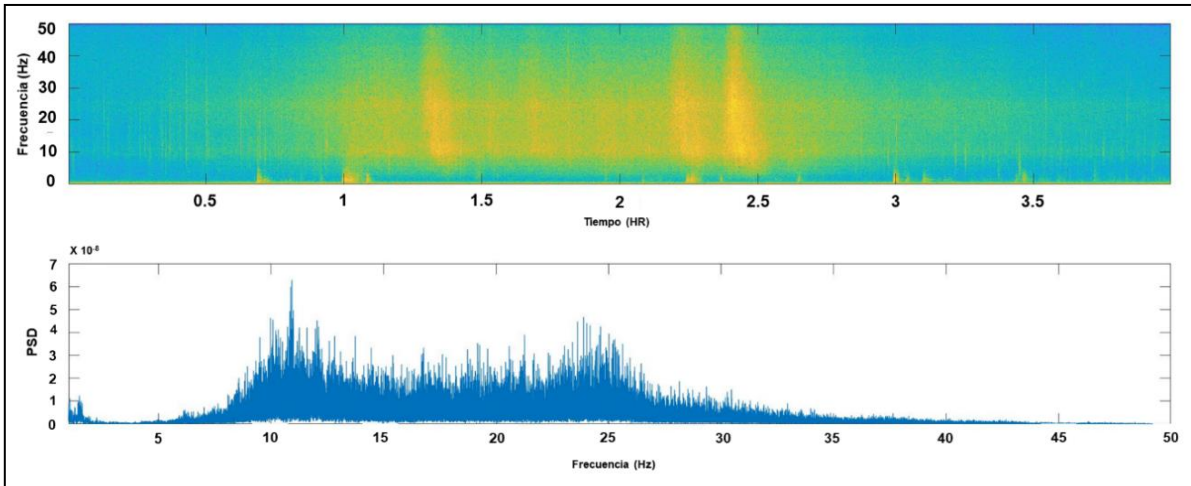


Figura 4.5. Espectro de frecuencias del lahar 1 del 17 de marzo del 2015.

El segundo lahar inició a las 05:15 hrs GMT y duro casi tres horas. Inicialmente, se registraron dos pulsos con amplitudes $< 1 \times 10^{-2}$ cm/s.

A las 05:50 hr GMT, se registró el frente principal con una amplitud máxima de 4×10^{-2} cm/s. Posteriormente, se observaron flujos hiperconcentrados con amplitudes de 5×10^{-3} cm /s. A las 7:00 hrs GMT, se registró otro frente con una amplitud máxima de 9.8×10^{-2} cm/s, seguido de dos pulsos más con amplitudes de hasta 2×10^{-2} cm /s.

El rango de frecuencia de los frentes enriquecidos en bloques fue de 10 a 25 Hz, sin embargo, el cuerpo del lahar presentó rangos que van de los 10 a los 40 Hz (Fig. 4.6).

El 17 de marzo del 2015 se caracterizó por haber sido el día más lluvioso del mes, esto debido a la influencia de la entrada de humedad proveniente del océano Pacífico y su interacción con la novena tormenta invernal y el sistema frontal No. 41. A pesar de que este mes no se considera parte de la temporada de lluvias en el volcán, las precipitaciones registradas en marzo de ese año fueron suficientes para desencadenar eventos de lahar.

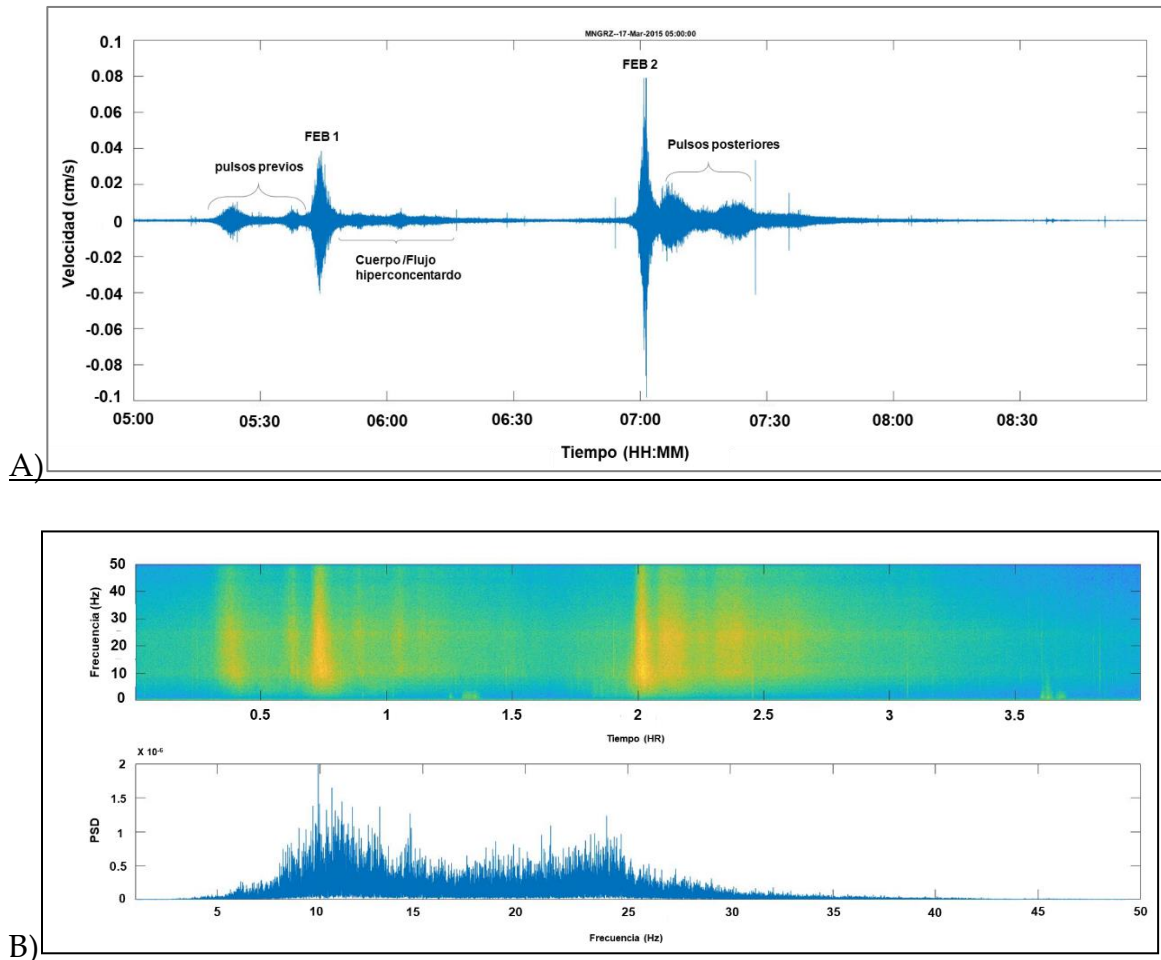


Figura 4.6. A) Segundo lahar formado a las 05:15 hrs GMT el 17 de marzo de 2015; B) Espectro de frecuencias del segundo lahar.

Con base en los datos de precipitación registrados en la estación ese día se acumularon 98.2 mm de lluvia, con una intensidad promedio de 63.23 mm/hr. La lluvia inició a las 00 hrs y se detuvo hasta las 17 hrs. Aunado a esto, los días anteriores presentaron lluvias durante más de 12 hrs. En total del 14 al 17 de marzo se acumularon 351 mm.

- Lahar del 4 de julio de 2015

Este lahar ocurrió después de 5 hrs de llovizna que registró la estación del Nevado de Colima. El lahar, comenzó a las 21:30 hrs GMT después de 7 mm de

precipitación acumulada. El primer frente se detectó a las 21:45 hrs, y fue de pequeña magnitud (0.4×10^{-3} cm/s). Diez minutos después, se registró el frente principal el cual, presentó una amplitud máxima de 1.2×10^{-3} cm/ s.

Cabe señalar que en el momento en que pasó el primer frente por la estación, no estaba lloviendo, esto indica que la precipitación desencadenante del lahar se dio en la parte alta de la barranca (Fig.4.7)

Una vez que pasó el frente principal, se pudo apreciar un flujo hiperconcentrado, fácilmente distinguible en las imágenes tomadas por la cámara instalada en la estación de monitoreo a las 22:11:46. As su vez, se pudieron observar pequeñas fluctuaciones en la descarga del flujo, que no se registraron en la señal sísmica. Estas fluctuaciones pueden generarse debido a cambios en la morfología del canal por erosión durante el emplazamiento, cambios en la dinámica interna del flujo a lo largo de su recorrido e incremento o decremento en volumen (acumulación de material y llegada de grandes bloques). Este evento tuvo una duración total de 60 min (Fig. 4.7).

Con base en las observaciones descritas anteriormente y en la clasificación hecha por Vázquez et al. (2016), este lahar es un evento de un solo pulso (SPE: *single pulse event*), caracterizado por un frente principal enriquecido en bloques y seguido por corrientes diluidas y una cola que muestra una disminución gradual de la profundidad del flujo. Este evento es la representación de los lahares más comunes en el comienzo de la época de lluvias del Volcán de Colima.

Finalmente, en las imágenes de la cámara se puede apreciar que parte de los bloques que traía el frente se quedaron atorados en una de las curvas del canal y provocaron que poco a poco se formara una pequeña represa. Al no tener paso, el

agua comenzó a acumularse y esto dio lugar a que el flujo se desbordara y formara otro camino alternativo al canal principal (Figs. 4.8 y 4.9).

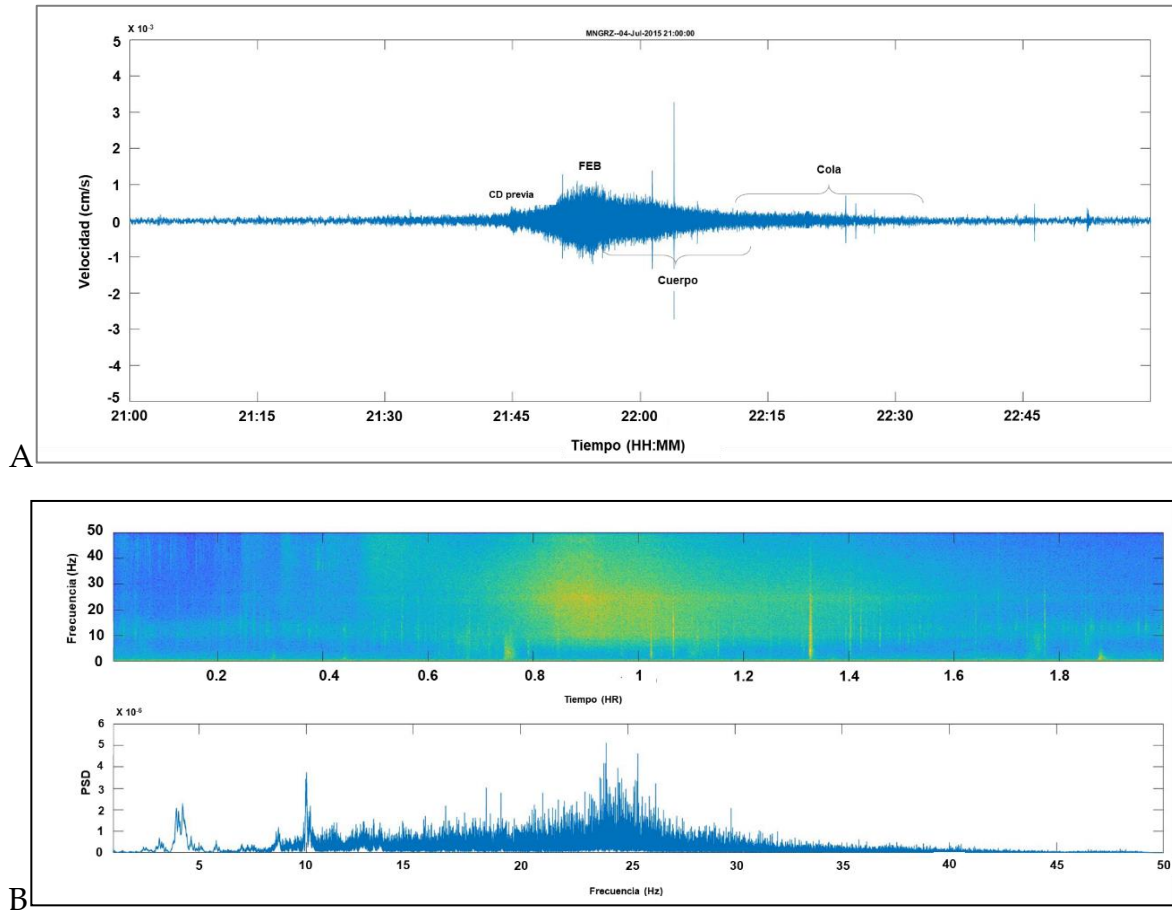


Figura 4.7. A) Lahar del 4 de julio, en donde se puede apreciar que únicamente hay un frente principal. B) Espectro de frecuencias del lahar del 4 de julio de 2015.



A. Primer flujo de corriente previo al frente principal del lahar.

Figura 4.8. Imagen tomada por la cámara de la estación de monitoreo en donde se aprecia el comportamiento del lahar del 4 de julio de 2015



B. Incremento del flujo de corriente previo al frente principal del lahar.



C. Paso del frente principal y bloqueo del canal principal por bloques de gran tamaño.



D. Formación de un canal alternativo debido al bloqueo del canal principal por bloques.

Figura 4.9. Imágenes tomadas por la cámara de la estación de monitoreo en donde se aprecia el comportamiento del lahar del 4 de julio de 2015

- Lahar del 6 de julio de 2015

De acuerdo con la estación de lluvia del Nevado de Colima, el día 6 de julio hubo una lluvia muy incipiente y se acumularon en total 7 mm agua; sin embargo, los días anteriores, del 1 al 5 de julio, se acumularon 71.8 mm de precipitación.

Este lahar tuvo una duración de 50 min y se caracteriza por presentar un frente principal enriquecido en bloques el cual, se registró a las 18:15 GMT con una amplitud máxima de 1×10^{-2} cm/s (Fig.4.10).

En el cuerpo del lahar se observaron corrientes diluidas con valores de amplitud de 4×10^{-3} a 1×10^{-3} cm/s.

Este evento así como el anterior fue clasificado como un evento de un solo pulso, de acuerdo con la clasificación descrita por Vázquez et al. (2016).

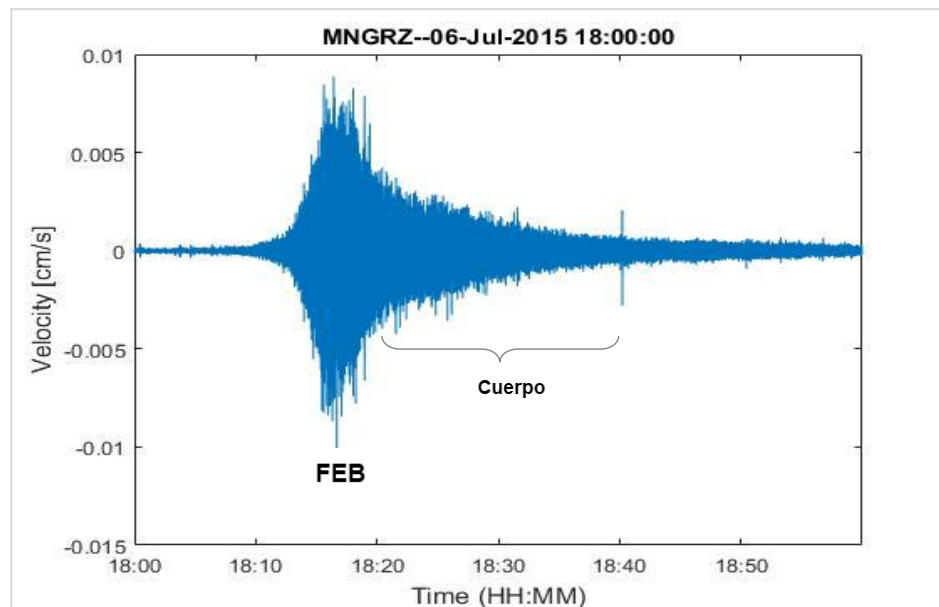


Figura 4.10. A) Lahar de un solo pulso registrado el 6 de julio de 2015. B) Espectro de frecuencias del lahar del 6 de julio de 2015.

- Lahar del 12 de agosto de 2015

Este lahar tuvo una duración de 70 min, y de acuerdo con la estación del volcán Nevado de Colima, la precipitación acumulada de ese día fue de 8.6 mm.

En la señal sísmica se puede observar una corriente diluida a las 22:38 hrs GMT con una amplitud de $\sim 0.5 \times 10^{-3}$ cm/s. Diez minutos después, se presentó un pulso con una amplitud de $\sim 2 \times 10^{-3}$ cm/s. El frente principal (FEB) se registró a las 22:55 hrs GMT, y tuvo una amplitud máxima de 5.6×10^{-3} cm/s (Fig. 4.11 y 12).

A las 23:02 hrs GMT se detectó un pulso posterior al FEB y presentó una amplitud máxima de $\sim 3 \times 10^{-3}$ cm/s. Diez minutos después, se registró un segundo pulso con una amplitud máxima de 2.5×10^{-3} cm/s. Finalmente, a las 23:16 se registró un último pulso con amplitud máxima de 1.5×10^{-3} cm/s. Estos pulsos corresponden a corrientes diluidas dentro del cuerpo del lahar.

El evento se clasificó como unipulso debido a que presenta un frente principal y corrientes diluidas posteriores de menos magnitud y tuvo una duración de 1 hr (Vázquez et al., 2016).

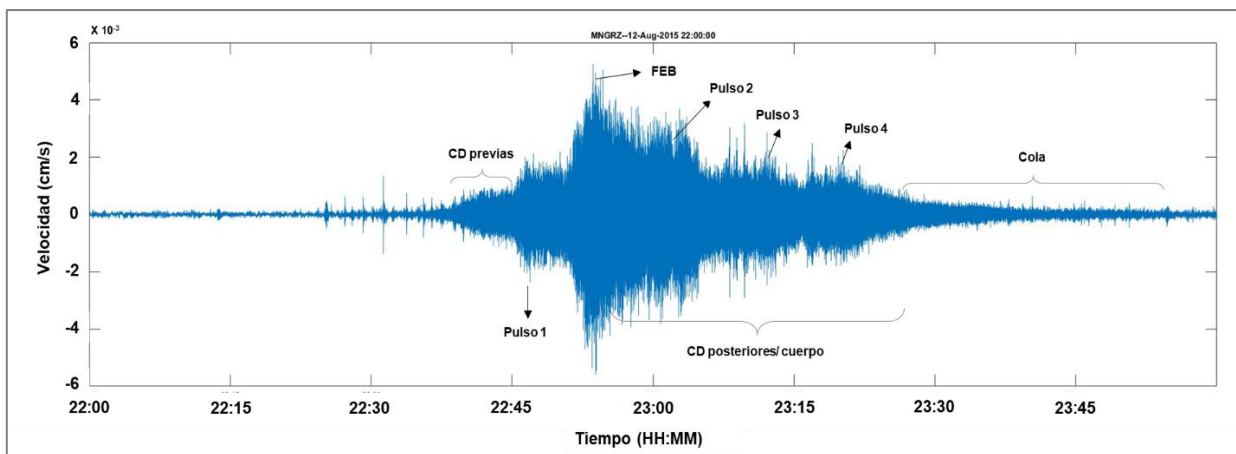


Figura 4.11. Señal sísmica del lahar del 12 de agosto del 2015.

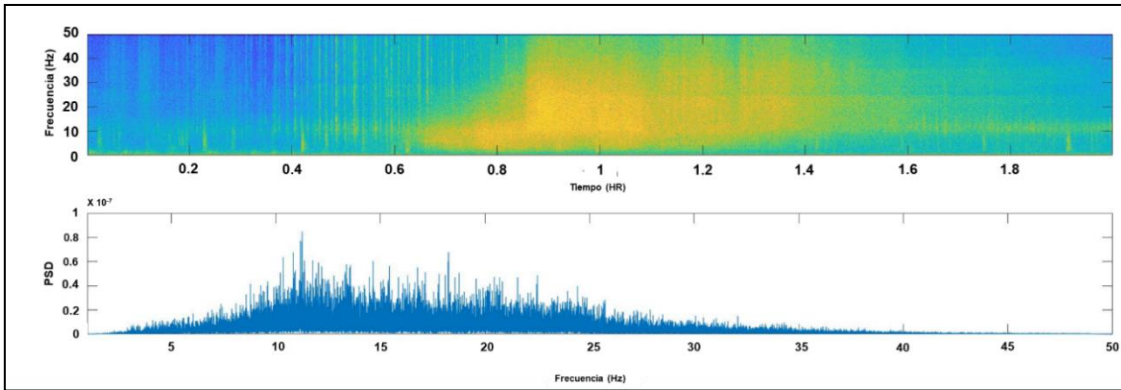


Figura 4.12. Espectro de frecuencias del lahar del 12 de agosto de 2015

- Lahar del 23-24 de octubre de 2015

De acuerdo con la estación Nevado de Colima del SMN, los días 23 y 24 de octubre se acumularon 440.6 mm de lluvia, lo que equivale casi al valor de precipitación media anual de todo el estado de Colima de ese año, que fue de 630.6 mm. Como ya se mencionó anteriormente la entrada del Huracán Patricia en las costas del Pacífico fue la causa de la ocurrencia de lluvias tropicales en el volcán.

Debido a esto, el 23 de octubre a las 21:00 hrs GMT, se registró el comienzo de un lahar en la barranca Montegrande que duró 6 horas en total. Este evento se dividió en dos partes para su análisis. En las primeras dos horas (21:50 a las 00:00 hrs GMT) el flujo presentó un primer FEB y varios pulsos de amplitudes máximas que oscilaron entre 1.0×10^{-2} y 2.8×10^{-2} cm/s. Se caracterizó por ser un flujo sostenido el cual duró 1 hr 30 min aproximadamente y de acuerdo con los valores de amplitud que registró el sensor sísmico el lahar estaba enriquecido en bloques.

A las 00:35 hrs GMT, se registró un pulso ($1. \cdot 10^{-2}$ cm/s) seguido de un segundo FEB con un registro de amplitud máxima de 3.8×10^{-2} cm /s. Posteriormente se presentaron dos pulsos menores con amplitudes máximas de hasta 2×10^{-2} cm /s. En la cola del lahar se observaron amplitudes $<5 \times 10^{-3}$ cm/s correspondientes a corrientes diluidas.

Este flujo se clasifica como un evento multipulso ya que dura más de 3 horas y presenta más de un frente enriquecido en bloques (Vázquez et al., 2016) (Fig.13).

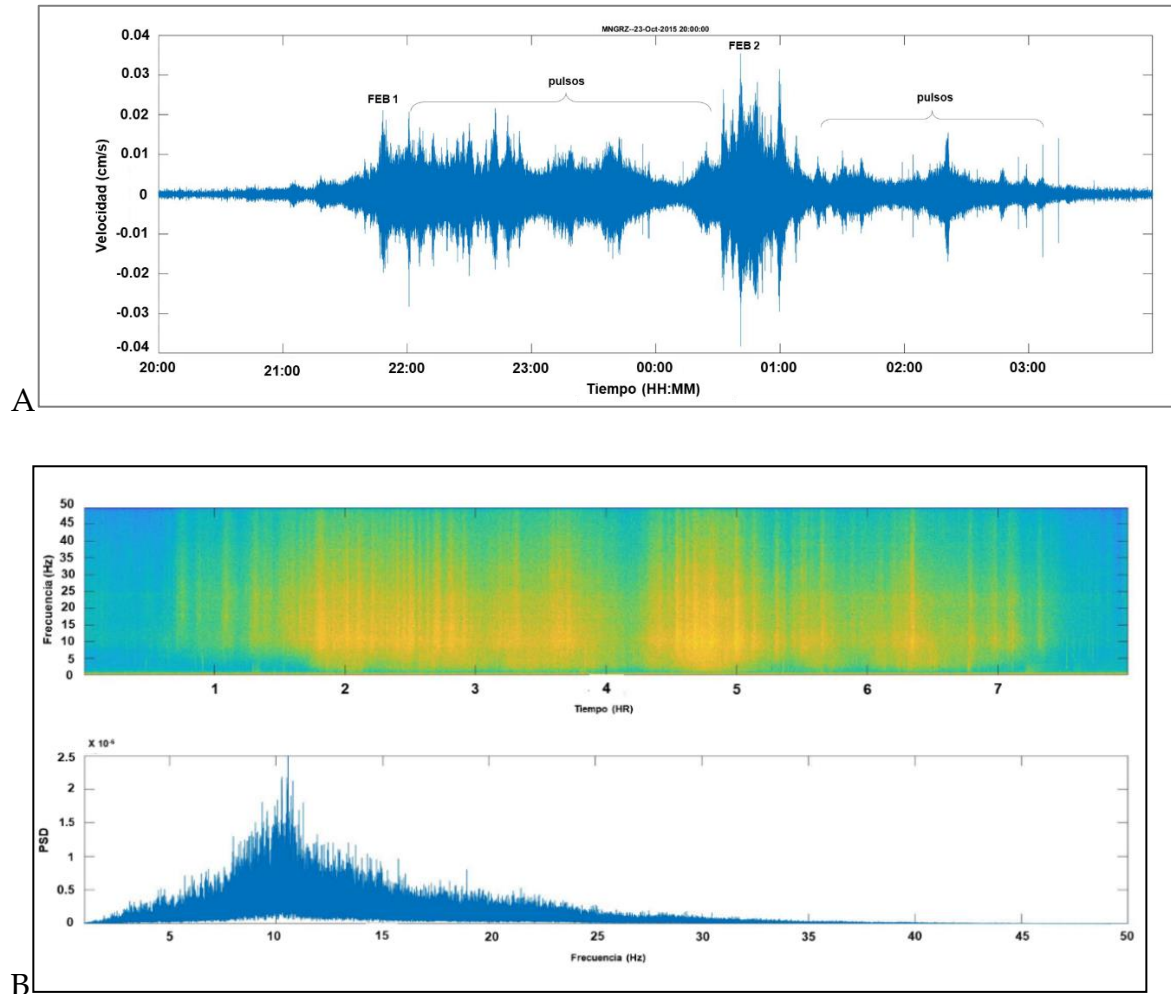


Figura 4.13. A) Lahar registrado el 23 de octubre a las 21:00 hrs GMT; B) Espectro de frecuencias del lahar del 23- 24 de octubre de 2015.

4.3. Catálogo de lahares, Barranca Montegrande año 2016

En el año 2016 se registraron 25 lahares, los cuales oscilan dentro de un rango de amplitudes máximas de 0.00141 a 0.0663 cm/s, y un rango de frecuencia de 10 Hz a 50 Hz. A su vez, estos eventos presentaron una duración mínima de 39 min y una duración máxima de 165 min.

En el inicio de la temporada de lluvias (jun- ago.) se presentaron 21 lahares de los cuales, el más grande duró 105 min y tuvo una amplitud máxima de 0.0663 cm/s, y en el periodo final de la temporada de lluvias (sept-oct) se presentaron 7 lahares. El de mayor duración fue de 145 min y tuvo una amplitud máxima de 5.6×10^{-2} cm/s.

Características generales de los principales lahares observados

- Lahar del 04 de Julio de 2016

De acuerdo con la estación de monitoreo instalada en la barranca, entre los días 3 y 4 de julio se acumularon 25 mm de precipitación. A las 00: 45 hrs GMT del 4 de julio se registró el inicio del lahar y el primer frente se registró a las 00:58 hrs GMT con un valor de amplitud máxima de 8.2×10^{-3} cm /s, seguido por dos pulsos con amplitudes de 1×10^{-2} cm/s. A las 01:18 hrs GMT se observó un segundo frente el cual estaba enriquecido en bloques y registró una amplitud máxima de 1.6×10^{-2} cm/s (Fig.4.14a).

El cuerpo del flujo se caracteriza por presentar una corriente diluida con amplitudes máximas de 2×10^{-3} cm/s. La duración de este lahar fue de 90 min; y de acuerdo con la clasificación de lahares hecha por Vázquez et al. (2016), es un evento multipulso (Fig. 4.14b).

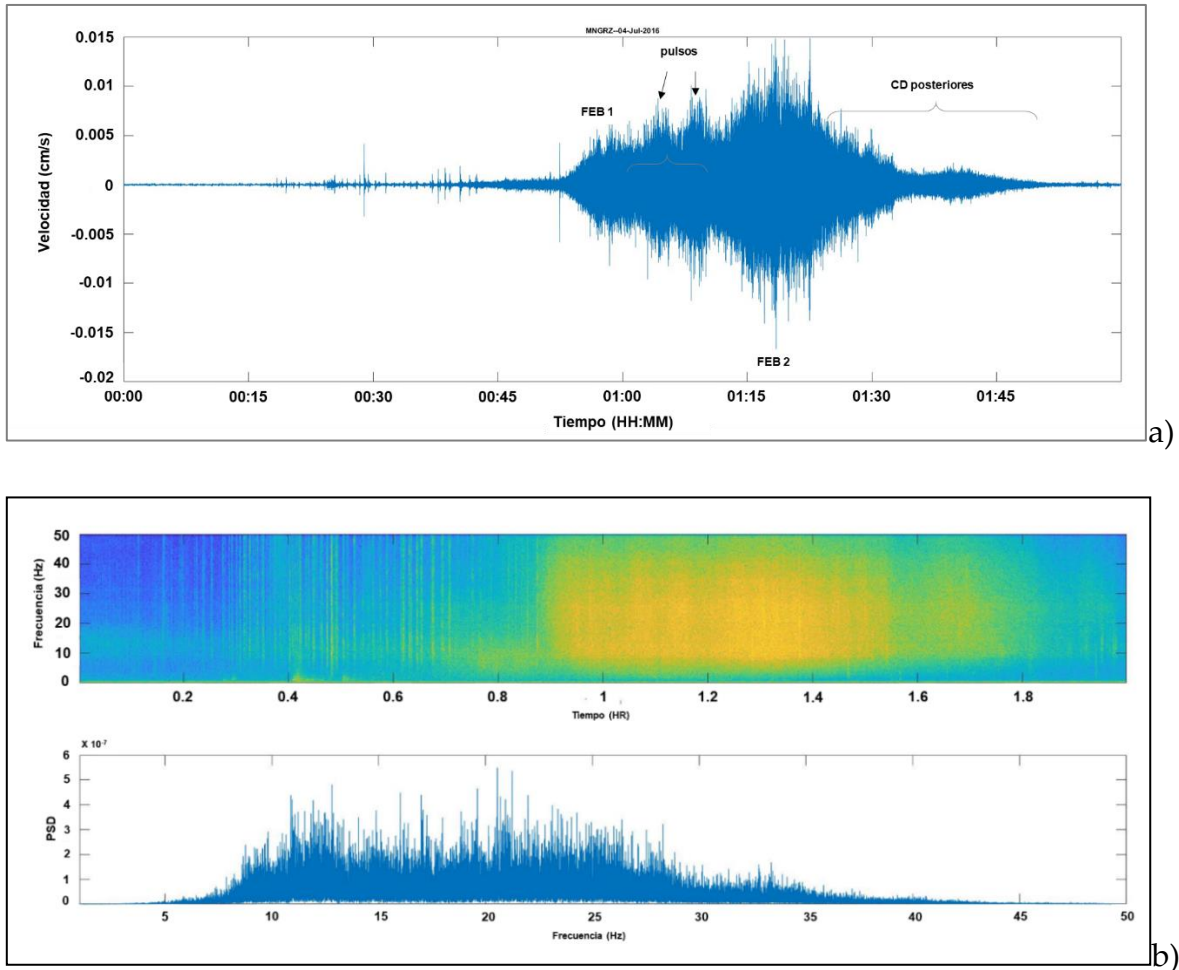


Figura 4.14. A) Señal sísmica del lahar del 4 de julio del 2016. B) Espectro de frecuencias del lahar del 4 de julio del 2016.

- Lahar del 23 de julio de 2016

Este lahar tuvo una duración de 145 min y durante ese día se registraron 17 mm de lluvia acumulada. Se compone de un flujo hiperconcentrado inicial el cual duró 30 min aproximadamente y registró una amplitud máxima de 1×10^{-3} cm/s.

A las 19 :13 hrs GMT se observó el frente principal con una amplitud máxima de 1.8×10^{-2} cm /s y un rango de frecuencia de 10 a 30 Hz. Cabe destacar que hubo un frente previo al frente principal que tuvo una amplitud máxima de $\sim 1.2 \times 10^{-2}$ cm/s (Fig.4.15).

Posterior al frente principal se presentaron pulsos de flujos hiperconcentrados en el cuerpo, con amplitudes de $\sim 5 \times 10^{-3}$ cm/s y frecuencias de entre 10 y 40 Hz (Fig. 4.15). Este fue un evento de tipo multipulso ya que tiene más de un FEB (Vázquez et al., 2016).

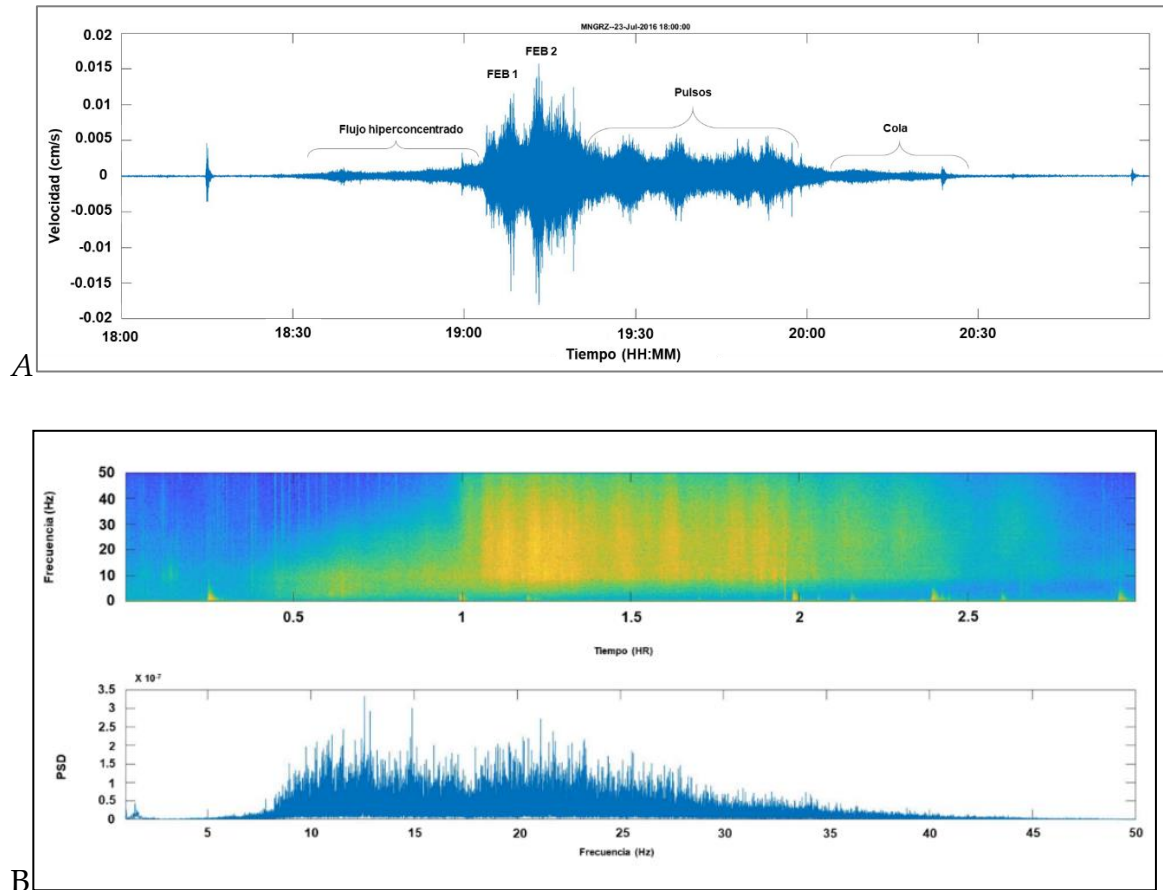


Figura 4.15. A) Lahar del 23 de julio de 2016. B) Espectro de frecuencias del lahar del 23 de julio del 2016

- Lahar del 29 de julio de 2016

De acuerdo con la estación de monitoreo el 29 de julio se acumularon 14.6 mm de lluvia, sin embargo, el día anterior se acumularon 21 mm de lluvia. Debido a que es temporada de lluvia en el Volcán de Colima, es común que llueva más de dos días seguidos. El lahar que se formó este día tuvo una duración de 70 min.

A las 19:05 hrs GMT se registró un frente correspondiente a una corriente diluida (0.5×10^{-2} cm/s) previa al frente principal del lahar. Posteriormente, a las 19:11 hrs GMT se presentó el frente principal enriquecido en bloques con un valor de amplitud máxima de 4.9×10^{-2} cm /s y un rango de frecuencias de 5 a 25 Hz (Fig. 4.16).

El cuerpo del lahar estaba compuesto de pulsos los cuales presentaron amplitudes máximas de hasta 2×10^{-2} cm /s y un rango de frecuencia de 10 a 40 Hz. (Fig. 4.17). A las 19:30 hrs GMT el régimen cambió a un flujo hiperconcentrado con amplitudes máximas de 8×10^{-3} cm/s. De acuerdo con la clasificación de Vázquez et al. (2016), fue un evento unipulso.

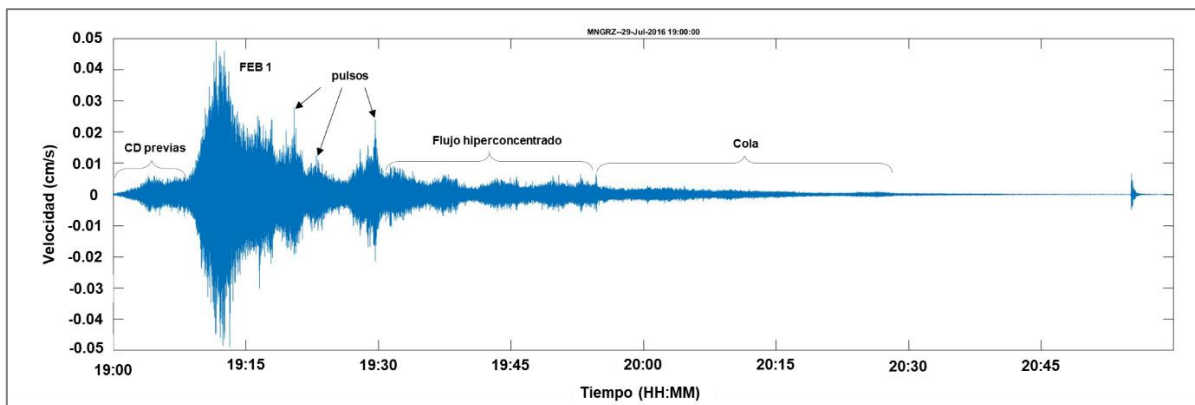


Figura 4.16. Lahar del 29 de julio del 2016

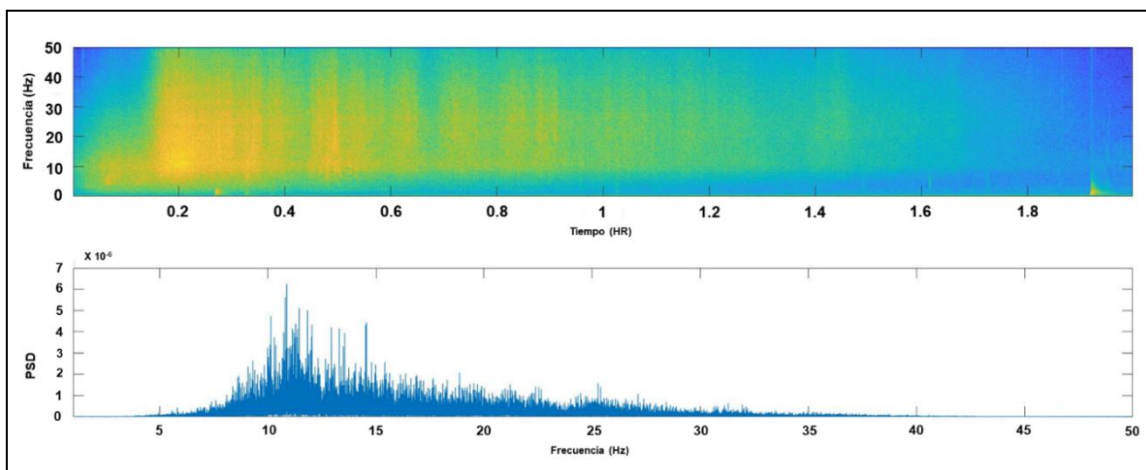


Figura 4.17. Espectro de frecuencias del lahar del 29 de julio del 2016.

- Lahar del 26 de agosto de 2016

A las 21:50 hrs GMT se registró una corriente diluida de muy baja magnitud ($<1 \times 10^{-3}$ cm/s), previa al frente principal. El frente principal se registró a las 22:05 hrs GMT y presentó una amplitud máxima de 6.6×10^{-2} cm/s y un rango de frecuencia de 5 a 20 Hz.

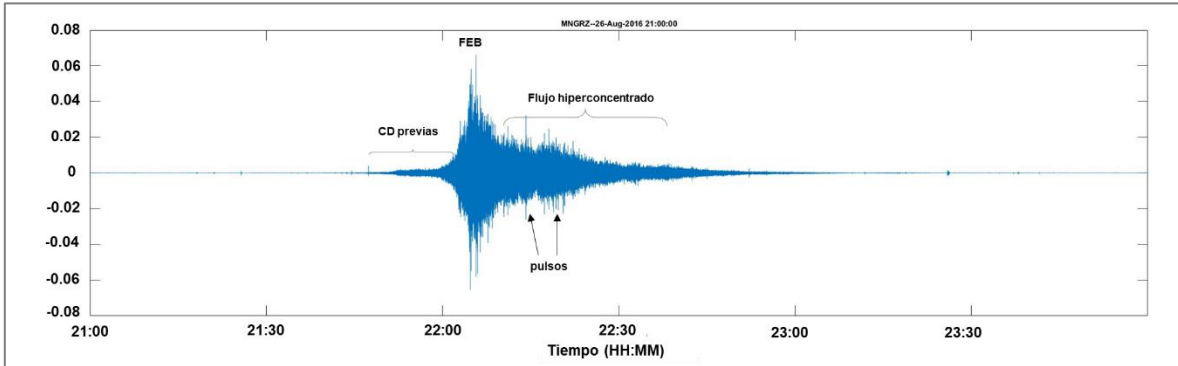


Figura 4.18. A) Lahar de un solo pulso registrado el 26 de agosto del 2016.

En el cuerpo se pudieron observar dos pulsos pequeños correspondientes a flujos hiperconcentrados, los cuales presentaron amplitudes máximas de 1.6×10^{-3} cm/s y frecuencias hasta de 40 Hz (Fig. 4.18 y 4.19).

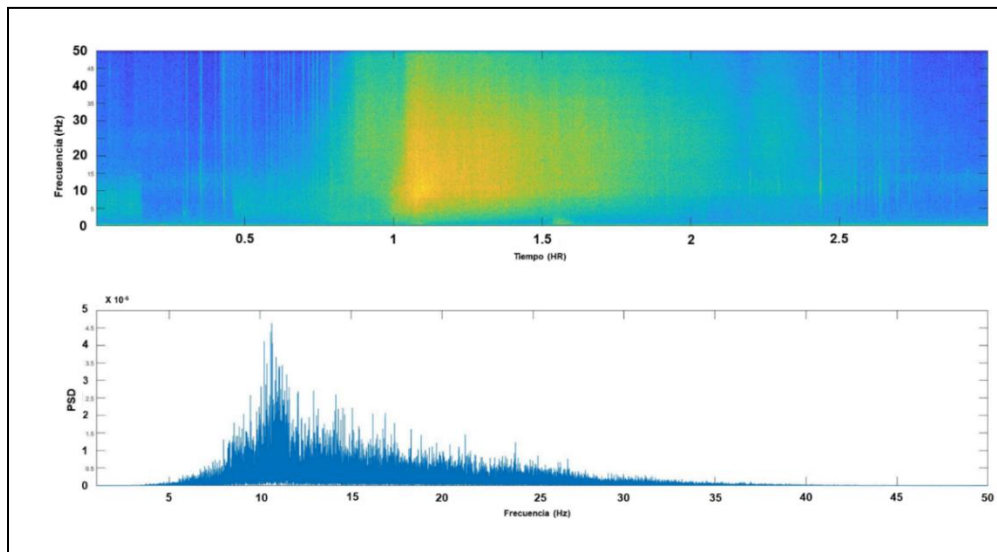


Figura 4.19. Espectro de frecuencias del lahar del 26 de agosto de 2016

De acuerdo con la clasificación de Vázquez et al. (2016), es un evento de un solo pulso ya que, presenta un frente principal seguido de corrientes diluidas menores y una duración de 105 min.

- Lahar del 30 de agosto de 2016

El 30 de agosto se acumularon 64.40 mm de precipitación en la estación de monitoreo de la barranca Montegrande. A las 22:15 hrs GMT, se registró un flujo inicial en donde se vieron dos pequeños pulsos de amplitudes no mayores a 1×10^{-2} cm/s. Posteriormente se registró el primer frente de un flujo de mayor magnitud, su amplitud máxima fue de 2×10^{-2} cm/s. A las 23:02 hrs GMT se observó el frente principal enriquecido en bloques, el cual tuvo una amplitud máxima de 6×10^{-2} cm/s y un rango de frecuencias de 5 a 20 Hz.

El cuerpo del lahar presentó varios pulsos con amplitudes máximas de 2×10^{-2} cm/s y frecuencias de 10 a 40 Hz. A las 23:42 se observó otro frente con una amplitud máxima de 3.5×10^{-2} cm/s y dos pulsos posteriores, de menor magnitud. Este flujo duró 195 min y de acuerdo con la clasificación de Vázquez et al. (2016), es un evento multipulso por tener más de dos frentes, corrientes diluidas posteriores y con una duración mayor a 3 hrs (Fig.4.20 y 21.)

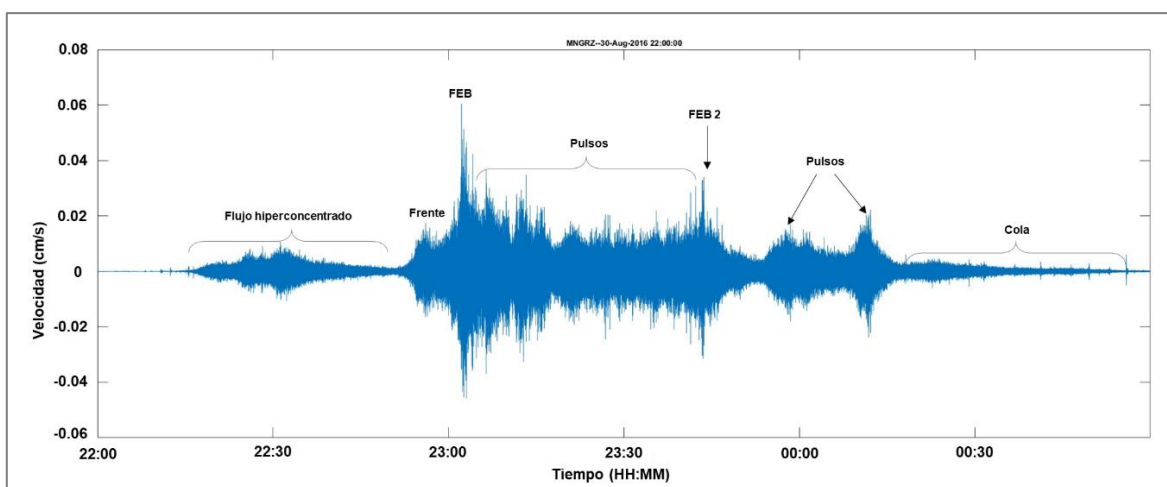


Figura 4.20. Lahar multipulso del 30 de agosto del 2016.

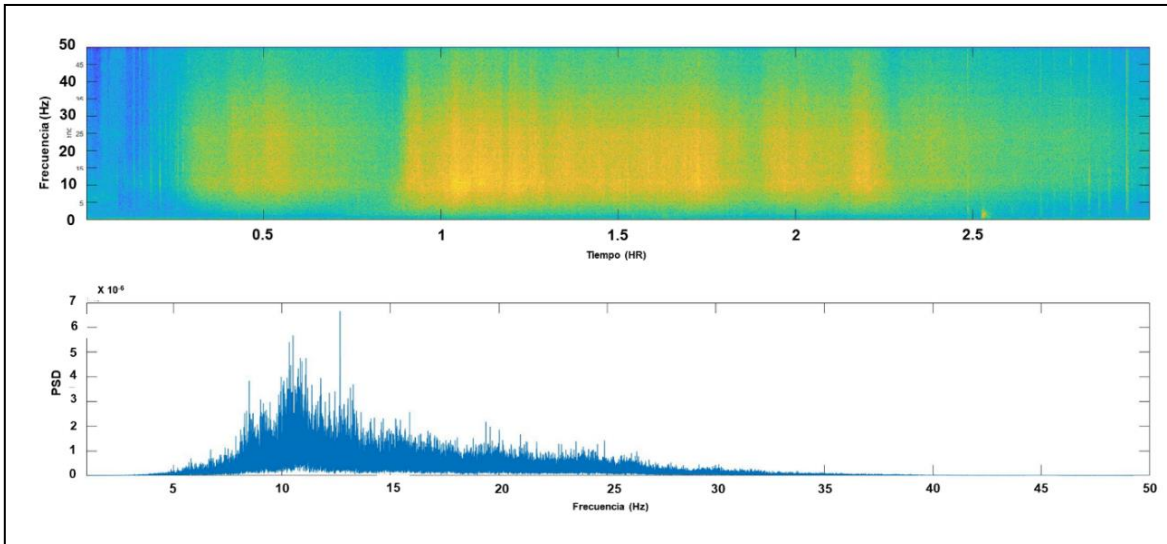


Figura 4.21. Espectro de frecuencias del lahar del 30 de agosto del 2016

- Lahar del 12 de septiembre de 2016

El frente principal de este lahar se registró a las 19:05 hrs GMT, con un valor de amplitud máxima de 1.5×10^{-2} cm /s, diez minutos después se presentó otro frente con una amplitud máxima de 2.1×10^{-2} cm /s, y un rango de frecuencias de 10 a 30 Hz. El cuerpo del flujo estuvo compuesto de corrientes diluidas con un valor de amplitud máxima de 5×10^{-3} cm /s y un rango de frecuencias de 10 a 40 Hz (Fig. 4.22). Este evento tuvo una duración total de 115 min y fue clasificado como un evento multipulso, ya que presenta dos frentes y corrientes diluidas posteriores (Vázquez, et al., 2016).

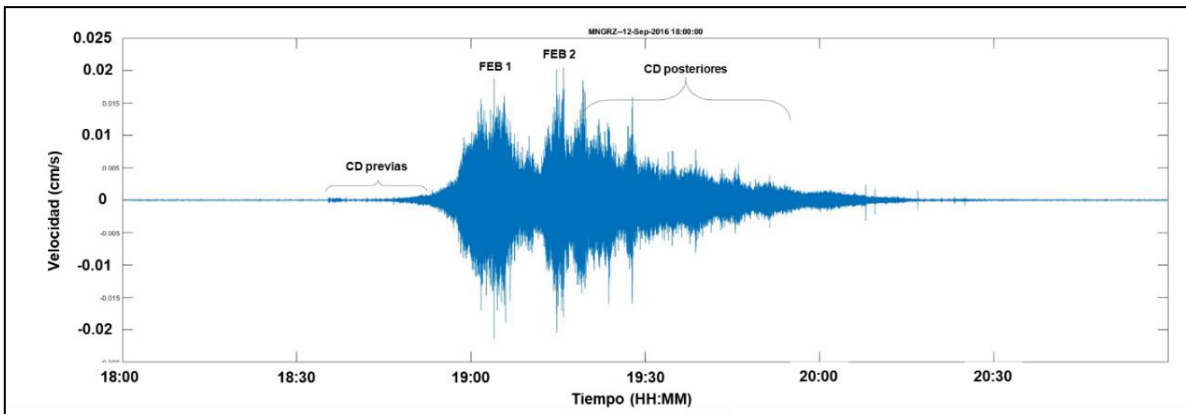
- Lahar del 15 de septiembre de 2016

De acuerdo con la estación de monitoreo de la barranca Montegrande, el día 15 de septiembre se registraron 12.20 mm de lluvia acumulada. El evento que se desencadenó tuvo una duración de 62 min. El frente principal del flujo se registró a las 00:56 hrs GMT con un valor de amplitud máxima de 5.1×10^{-3} cm /s. El cuerpo del lahar tuvo un comportamiento muy uniforme y fue decreciendo en su magnitud

de manera gradual. Se pudieron observar flujos hiperconcentrados en el cuerpo y cola, las cuales tenían valores de amplitud máxima de 1×10^{-3} cm /s. (Fig. 4.23 y 24).

Este es un evento unipulso, ya que presenta un solo frente principal, pulsos secundarios de menor magnitud y su duración fue de una hora (Vázquez et al., 2016).

a)



b)

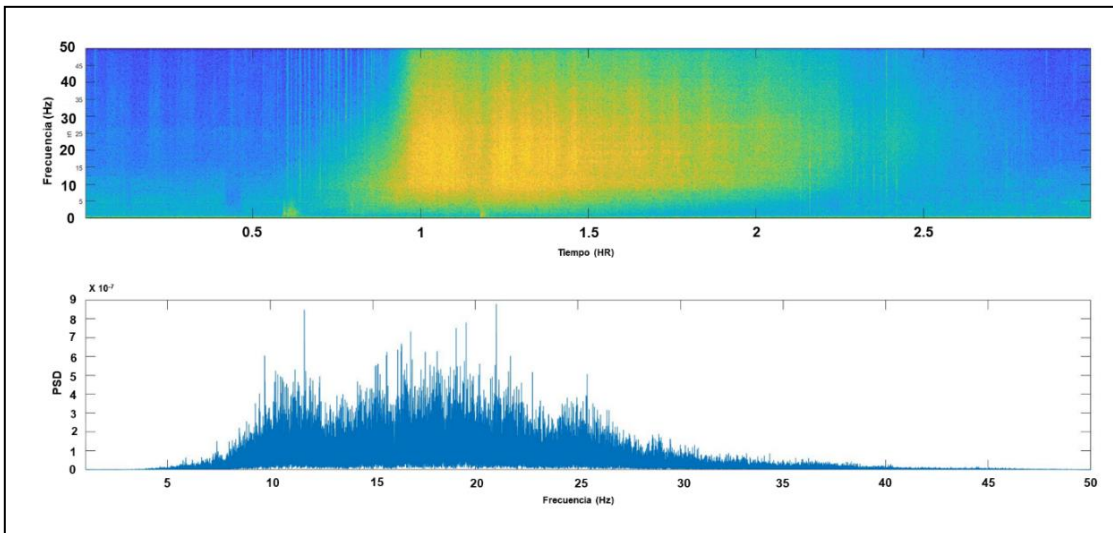


Figura 4.22. A) Lahar del 12 de septiembre de 2016. **B)** Espectro de frecuencias del lahar del 12 de septiembre del 2016.

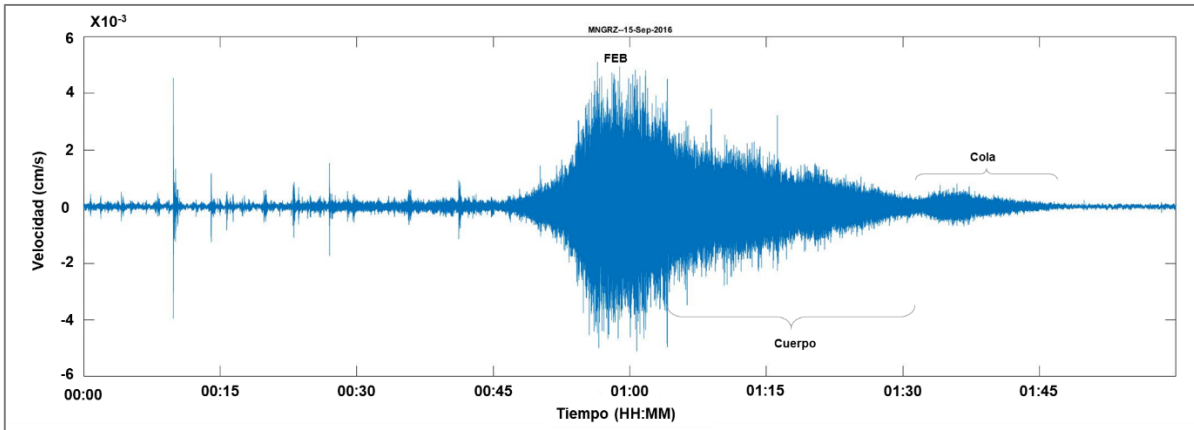


Figura 4.23. Señal sísmica del lahar del 15 de septiembre de 2016.

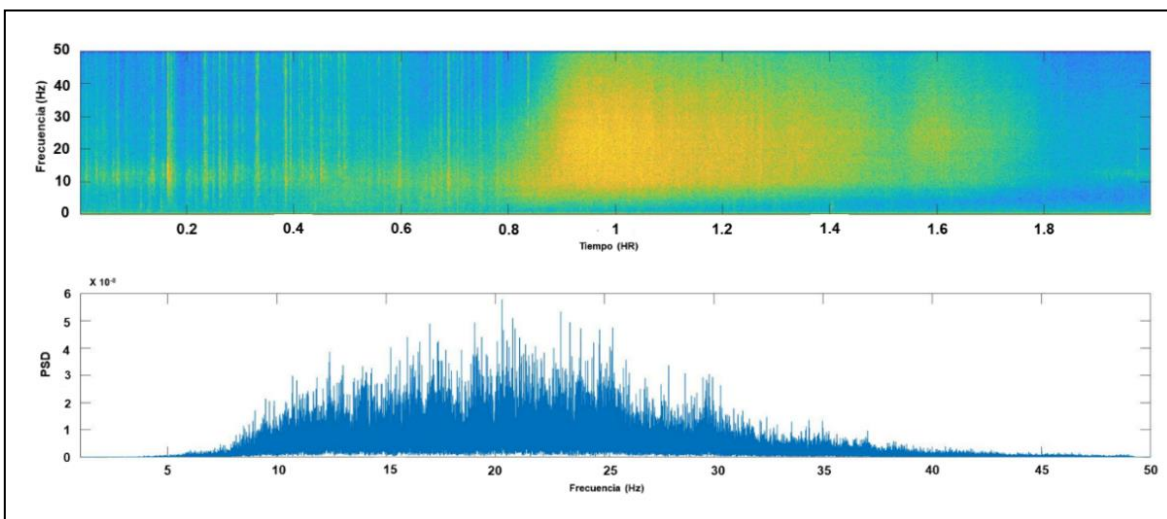


Figura 4.24. Espectro de frecuencia del evento del 15 de septiembre del 2016.

4.4. Catálogo de lahares, Barranca Montegrande año 2017

En el año 2017 ocurrieron 22 lahares, los cuales oscilan dentro de un rango de amplitudes máximas de 0.00155 a 0.05653 cm/s, y un rango de frecuencia de 10 Hz a 60 Hz. A su vez, estos eventos presentaron una duración mínima de 45 min y una duración máxima de 145 min.

En el inicio de la temporada de lluvias (jun- ago.) se presentaron 15 lahares de los cuales, el más grande duró 145 min y tuvo una amplitud máxima de 0.00591cm/s,

y en el periodo final de la temporada de lluvias (sept-oct) se presentaron 7 lahares. El de mayor duración fue de 145 min y tuvo una amplitud máxima de 0.04511cm/s.

Características generales de los principales lahares observados

- *Lahar del 30 de junio del 2017*

Este día, se registró un valor de precipitación acumulada de 44 mm. A las 20:10 hrs GMT, se observaron corrientes diluidas previas al frente principal con amplitudes máximas de 2×10^{-3} cm /s.

El primer frente se registró a las 20:27 hrs GMT, con una amplitud máxima de 5×10^{-3} cm/s, permaneció así 10 minutos, y a las 20:43 hrs GMT se presentó un frente de mayor magnitud con un valor de amplitud máxima de 1.8×10^{-2} cm/s y un rango de frecuencia de 9 a 25 Hz.

A las 21:00 hrs GMT, se registró el frente más grande de este flujo con una amplitud máxima de 2.1×10^{-2} cm/s y frecuencias que oscilan entre los 10 y 25 Hz. Posteriormente, se pudo observar que el flujo fue decreciendo hasta convertirse nuevamente en una corriente fluvial (Figs. 4.25 y 26).

Además de la señal sísmica, la estación de monitoreo registró la señal de infrasonido generada por este lahar y se pudo apreciar que la masa de aire empujada por el frente principal a través de la barranca fue detectada a las 20:40 hrs GMT, con una presión de ~ 0.57 Pa, minutos antes que el registro de la señal sísmica (Fig. 4.27).

Finalmente, este fue un evento multipulso, por tener más de un frente principal y durar más de 1 hr, de acuerdo con la clasificación de Vázquez et al. (2016).

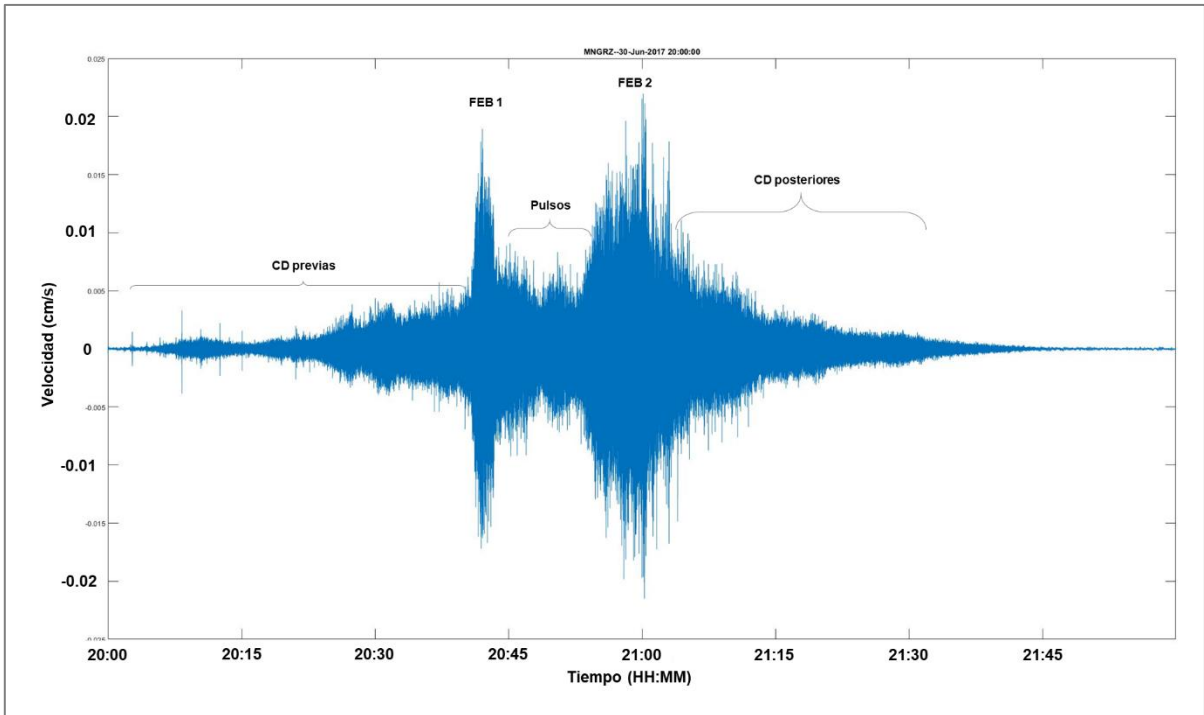


Figura 4.25. Evento multipulso registrado el 30 de junio del 2017.

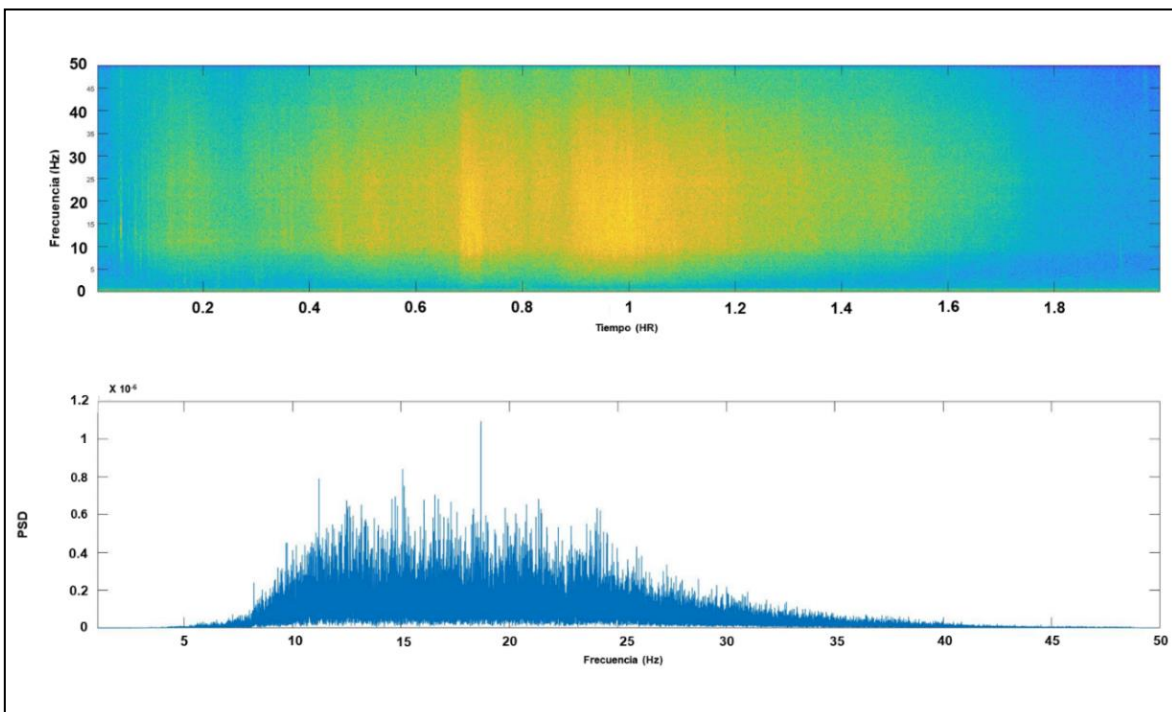


Figura 4.26. Espectro de frecuencias del 30 de junio del 2017.

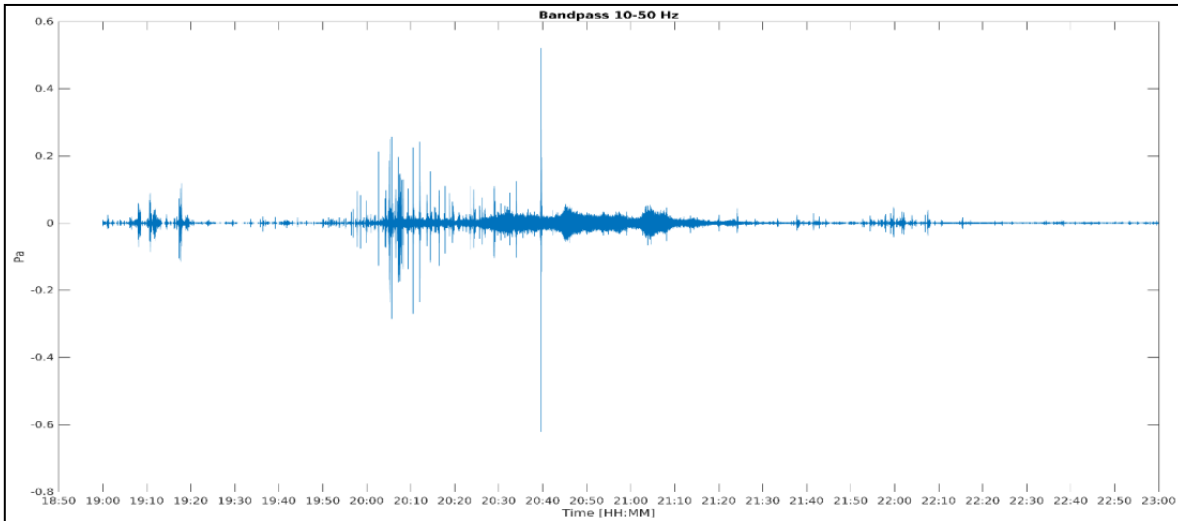


Figura 4.27. Señal del sensor de infrasonido que registró el paso del lahar del 30 de junio del 2017, en la estación de monitoreo de la barranca Montegrande.

- Lahar del 3 de julio del 2017

En la señal sísmica de este evento se puede apreciar que a las 00:59 hrs GMT, se presentó el primer frente del flujo el cual, de acuerdo con las imágenes tomadas por la cámara de la estación de monitoreo, fue un frente enriquecido en bloques. Tuvo una amplitud máxima de 1×10^{-2} cm/s, sin embargo, 18 minutos después se registró un segundo frente enriquecido en bloques el cual, tuvo una amplitud máxima de 5.6×10^{-2} cm/s y un rango de frecuencias de 5 a 15 Hz. Aunado a esto, el cuerpo del lahar presentó amplitudes de entre 2×10^{-3} y 0.5×10^{-3} cm/s (Figs. 4.28 y 29).

Es importante hacer notar que el registro de precipitación acumulada en la estación de monitoreo fue de 22 mm y en el momento en que el flujo fue registrado por los sensores, estaba lloviendo. A su vez, se pudo observar en las imágenes que en algunas zonas de la barranca en donde se ensancha el canal, se forman pequeñas escorrentías secundarias las cuales aportan material y agua al canal principal (Figs. 4.30 a 4.32).

De acuerdo con la clasificación hecha por Vázquez et al. (2016), este fue un lahar multipulso ya que presentó dos frentes enriquecidos en bloques, tuvo una duración de 55 min y no hubo pulsos de corrientes diluidas menores.

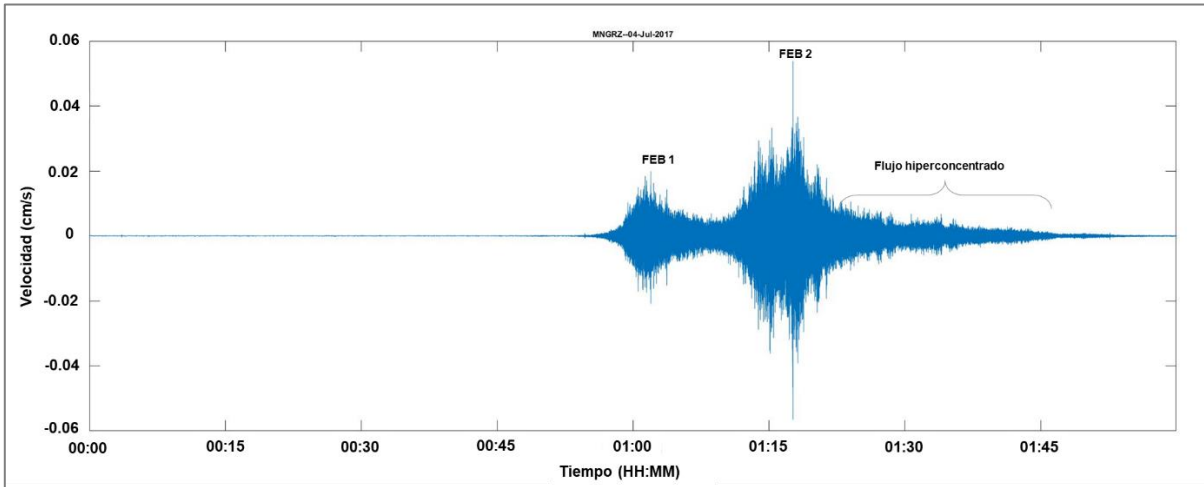


Figura 4.28. Señal sísmica del lahar del 3 de julio de 2017.

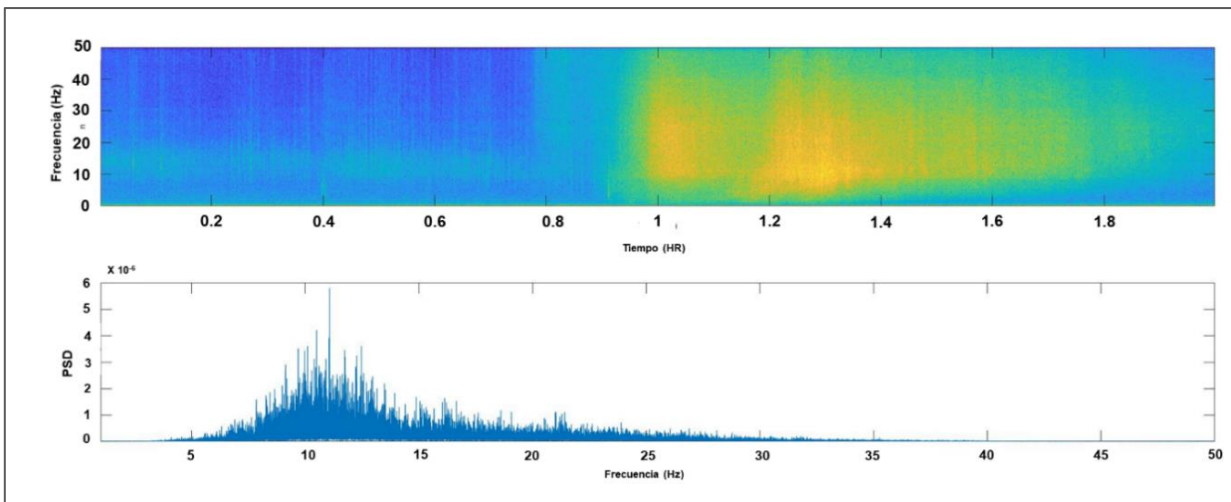


Figura 4.29. Espectro de frecuencias del lahar del 3 de julio de 2017



Figura 4.30. Presencia de lluvia en la barranca al momento en que el lahar fue registrado por los sensores de la estación de monitoreo.



Figura 4.31. Formación de canales secundarios en las zonas en donde se amplía el ancho del canal, y sobre los depósitos de las terrazas más antiguas.



Figura 4.32. Frente principal del flujo, enriquecido en bloques.

- Lahar del 23 de julio del 2017

El sensor sísmico instalado a un costado del canal de la barranca Montegrande, registró el primer frente de un flujo hiperconcentrado previo al FEB a las 23:30 hrs GMT, con un valor de amplitud máxima de 4.2×10^{-3} cm/s.

A las 00:05 hrs GMT, se observó un pulso de 1×10^{-2} cm/s, sin embargo, el FEB se registró a las 00:15 hrs GMT, con un valor de amplitud máxima de 2.4×10^{-2} cm/s y un rango de frecuencias de 10 a 20 Hz. A este frente le siguieron dos pulsos, uno casi del mismo tamaño que el frente principal (1.7×10^{-2} cm/s) (FEB 2) y otro de menor amplitud (1×10^{-2} cm/s). Se pudieron observar flujos hiperconcentrados en el cuerpo del lahar, que presentaron amplitudes máximas $< 5 \times 10^{-3}$ cm/s y con rangos de frecuencia de 10 a 40 Hz (Figs. 4.33 y 34).

Al observar las imágenes tomadas por la cámara de la estación de monitoreo del antes y después del paso del lahar, se puede interpretar que el flujo fue principalmente erosivo favoreciendo el arrastre de material del depósito de relleno en algunas porciones del canal principal (Figs. 4.35 y 4.36).

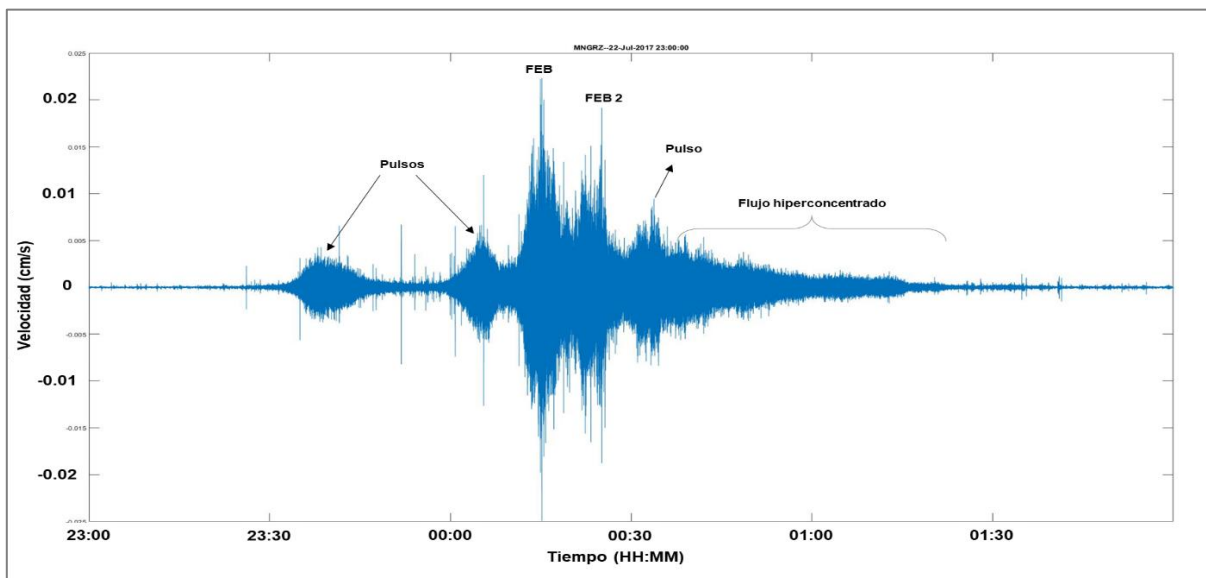


Figura 4.33. Lahar multipulso del 23 de julio del 2017.

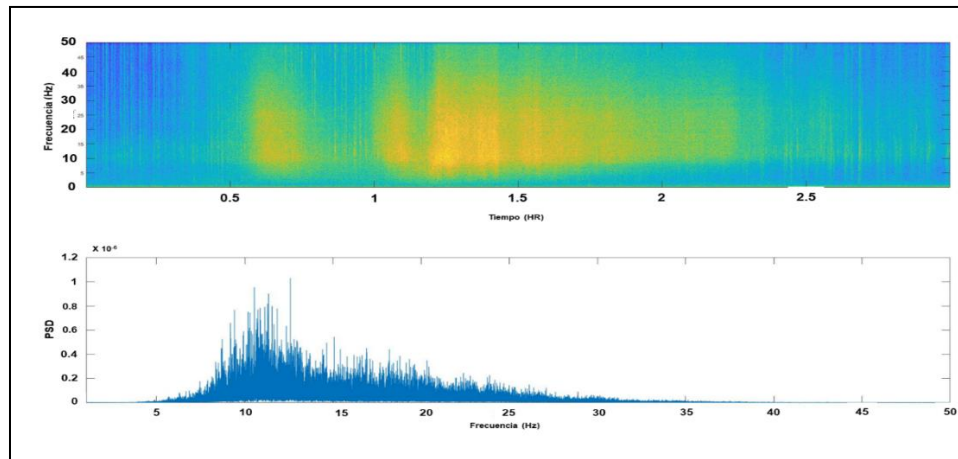


Figura 4.34. Espectro de frecuencias del lahar del 23 de julio del 2017.



Figura 4.35. Barranca Montegrande antes del paso del lahar.



Figura 4.36. Depósitos del lahar del 23 de julio del 2017.

- Lahar del 28 de julio de 2017

De acuerdo con los registros de precipitación y las imágenes tomadas por la cámara de la estación de monitoreo, el día 28 julio se acumularon 17 mm de lluvia. Cabe destacar que un día anterior se acumularon 29 mm en 24 hrs.

A las 00:04 hrs GMT comenzó a llover en la porción de la barranca correspondiente a la estación. Lo primero que sucedió es que el suelo comienza a saturarse y empiezan a formarse las escorrentías secundarias al canal principal (Figs. 4.37 y 4.38).

A las 00:15 hrs GMT, se presencié el primer frente en el canal principal (1.5×10^{-2} cm/s), sin embargo, la carga de bloques era escasa. El primer frente cargado de bloques se pudo observar a las 00:20 hrs GMT, el segundo y tercer pulso ocurrieron a las 00:26 hrs y 00:30 GMT respectivamente.

El FEB de mayor magnitud se observó a las 00:36 hrs GMT, con una amplitud máxima de 2.8×10^{-2} cm/s, y un rango de frecuencias de 10 a 20 Hz. A partir de este frente enriquecido en bloques, el canal se llenó casi en su totalidad. El flujo tenía una profundidad aproximada de dos metros y el material dominante en su frente era de bloques de hasta 2 o 3 metros de diámetro (Figs. 4.38).

Durante aproximadamente 40 min el flujo tuvo espesor casi constante y presentó fluctuaciones en la descarga, las cuales se podían apreciar como pulsos menores cargados de bloques y seguidos de un flujo más diluido. Estas fluctuaciones, presentaron amplitudes de hasta $< 1 \times 10^{-2}$ cm/s y valores de frecuencia de hasta 45 Hz. A las 00:49 hrs GMT, dejó de llover en el sitio de la estación de monitoreo, pero el lahar seguía fluyendo. Gradualmente fue comportándose como un flujo hiperconcentrado ($< 4 \times 10^{-3}$ cm/s) hasta convertirse en un flujo de corriente fluvial (Figs. 4.39 a 4.46).

En total este evento duró ~ 105 min y fue un lahar mutipulso (Vázquez et al., 2016), ya que a pesar de que no fue tan larga su duración, pudo ser clara la presencia de varios frentes enriquecidos en bloques seguidos de corrientes diluidas menores.

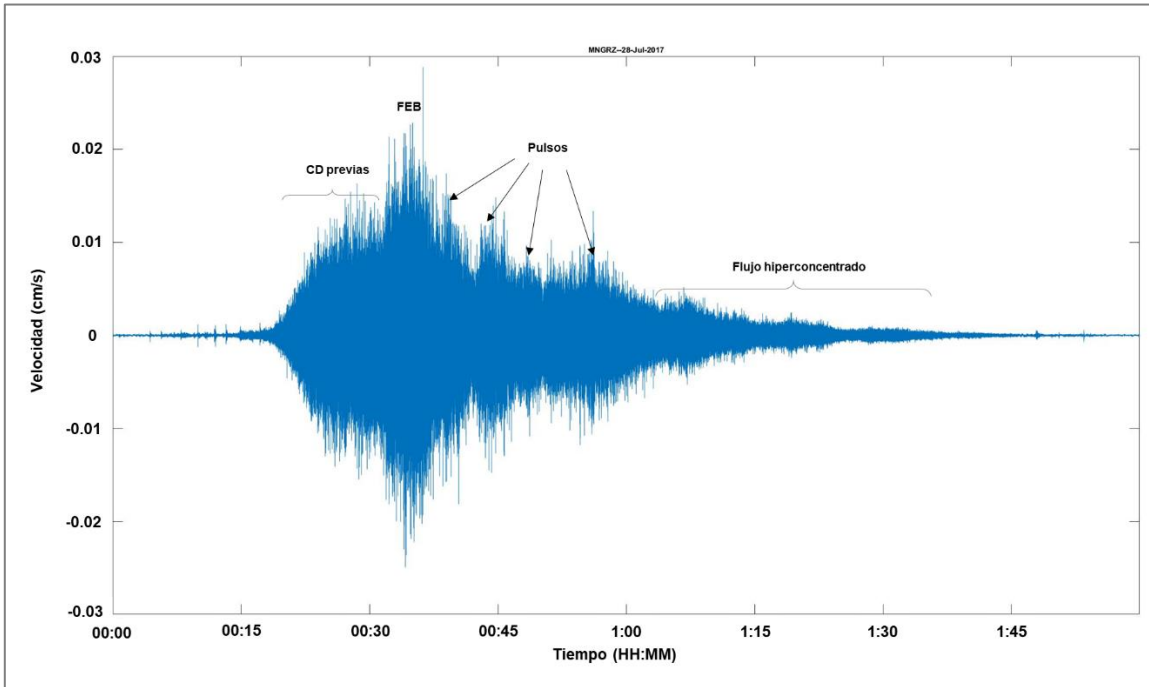


Figura 4.37. Señal sísmica del lahar del 28 de julio del 2017.

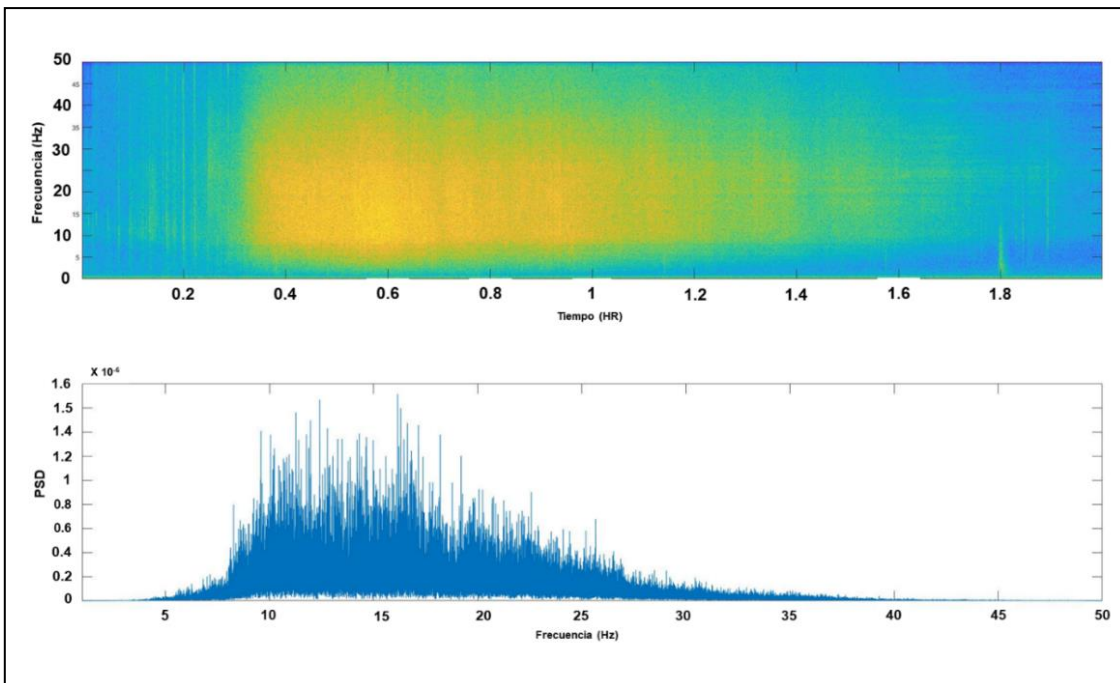


Figura 4.38. Espectro de frecuencias del lahar del 28 de julio del 2017.



Figura 4.39. Barranca Montegrande antes de la lluvia que provocó el lahar del 28 de julio del 2017.



Figura 4.40. Formación de escorrentías secundarias al canal principal. La flecha roja indica el canal principal y las flechas amarillas indican las escorrentías secundarias.



Figura 4.41. Corriente diluida previa al frente principal del lahar.



Figura 4.42. Primer pulso registrado a las 00:20 hrs GMT. Se puede observar la presencia de bloques de gran tamaño en el frente del pulso.

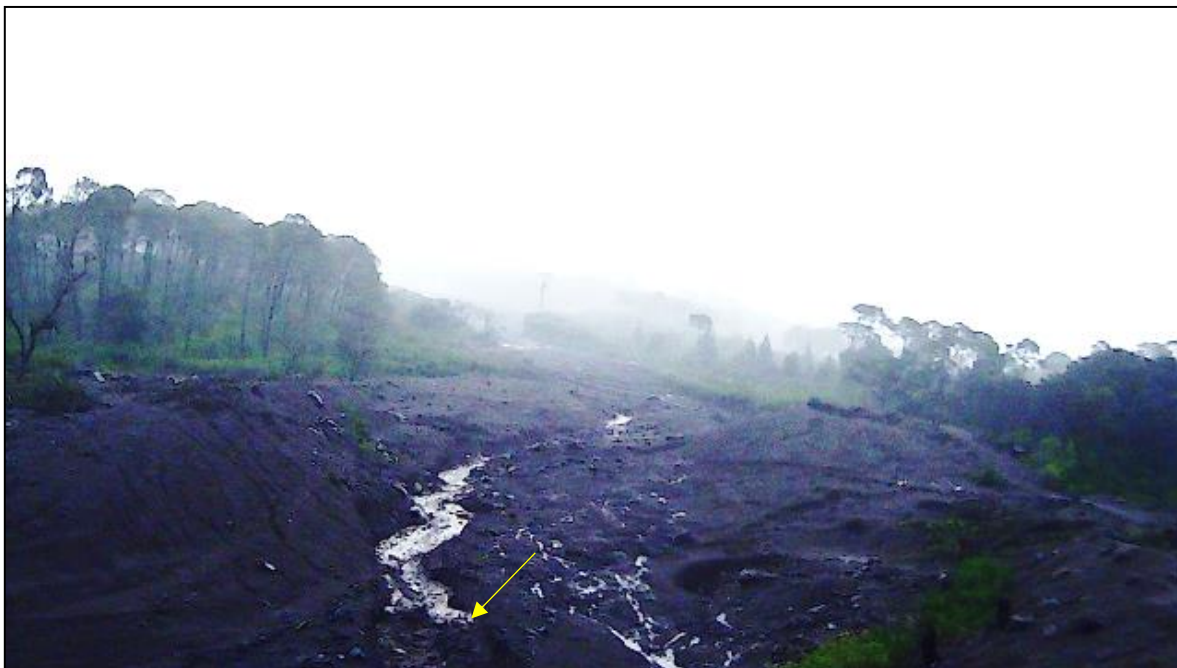


Figura 4.43. Pulso identificado alrededor de las 00:30 hrs GMT.



Figura 4.44. Frente principal identificado a las 00:36:15 hrs GMT. Se puede observar que el frente estaba enriquecido en bloques de gran tamaño (Flechas amarillas).



Figura 4.45. Varios pulsos con carga de bloques de gran tamaño (Flechas amarillas).



Figura 4.46. A las 00:59 hrs GMT dejo de llover y el flujo aún seguía.

- Lahar del 8 de septiembre de 2017

De acuerdo con los registros de precipitación de la estación de monitoreo, se registraron 49 mm de lluvia acumulada para ese día. La señal sísmica correspondiente a este lahar muestra que a las 19:00 hrs GMT se detectó una corriente diluida de amplitudes bajas ($< 5 \times 10^{-3}$ cm/s).

El frente principal se detectó a las 19:08 hrs GMT y presentó un valor de amplitud máxima de 5×10^{-2} cm/s. Minutos después, se registraron varios pulsos posteriores con magnitudes similares al frente (Fig. 4.47). A las 19:30 se registró otro FEB con una amplitud máxima de 4×10^{-2} cm/s. Es importante mencionar que este lahar tuvo un FEB principal y el cuerpo permaneció con amplitudes máximas muy cercanas al valor de amplitud máxima del FEB1, lo que indica que la carga de bloques en el cuerpo del lahar fue alta. Fue hasta la cola en donde las amplitudes máximas disminuyeron y el flujo se volvió más diluido ($< 4 \times 10^{-3}$ cm/s).

El rango de frecuencias del frente principal fue de 10 a 20 Hz y para los pulsos posteriores se registraron frecuencias de 10 a 40 Hz (Fig.4.48). Este lahar tuvo una duración de 105 min y es un evento multipulso, de acuerdo con la clasificación de Vázquez et al. (2016).

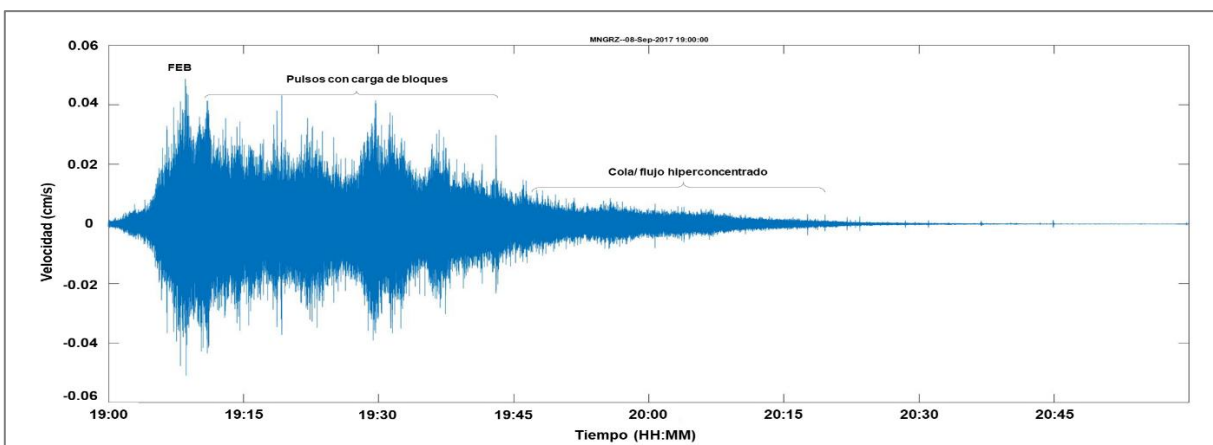


Figura 4.47. Señal sísmica del lahar del 8 de septiembre de 2017.

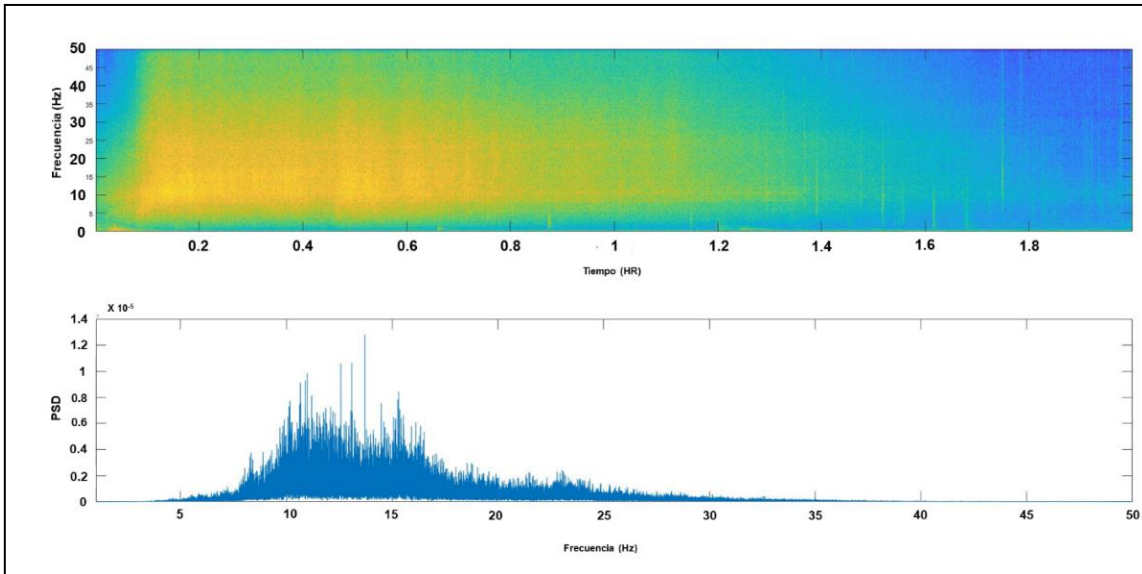


Figura 4.48. Espectro de frecuencias del lahar del 8 de septiembre de 2017.

- Lahar del 20 de octubre de 2017

Este lahar fue registrado a partir de las 18:37 hrs GMT con una corriente diluida previa al frente principal. El frente principal se registró a las 18:44 hrs GMT con un valor de amplitud máxima de 3×10^{-2} cm/s, dos minutos después se registró otro FEB con una amplitud máxima de 3.8×10^{-2} cm/s. Posteriormente, se registraron corrientes diluidas ($< 4 \times 10^{-3}$ cm/s) en el cuerpo del lahar, las cuales fueron disminuyendo en magnitud gradualmente.

Los valores de frecuencia del frente principal fueron de 10 a 25 Hz. Tuvo una duración de 77 min y de acuerdo con la clasificación de Vázquez et al. (2016) es un evento multipulso (Figs.4.49 y 4.50).

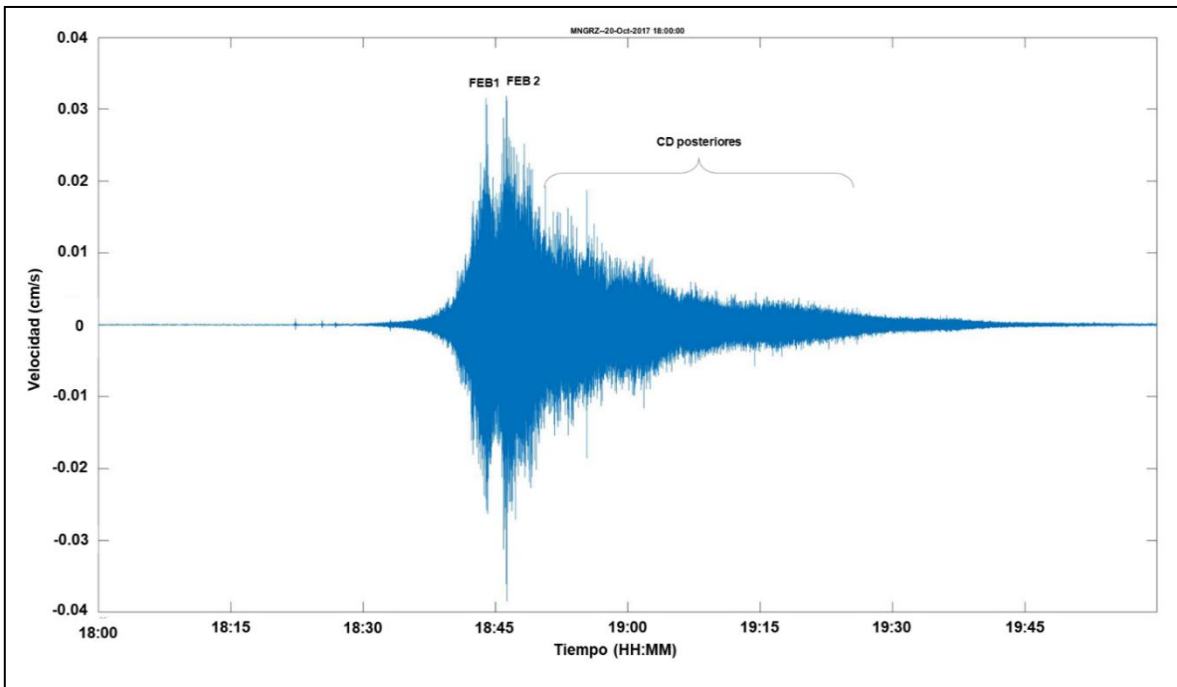


Figura 4.49. Señal sísmica del lahar del 20 de octubre del 2017.

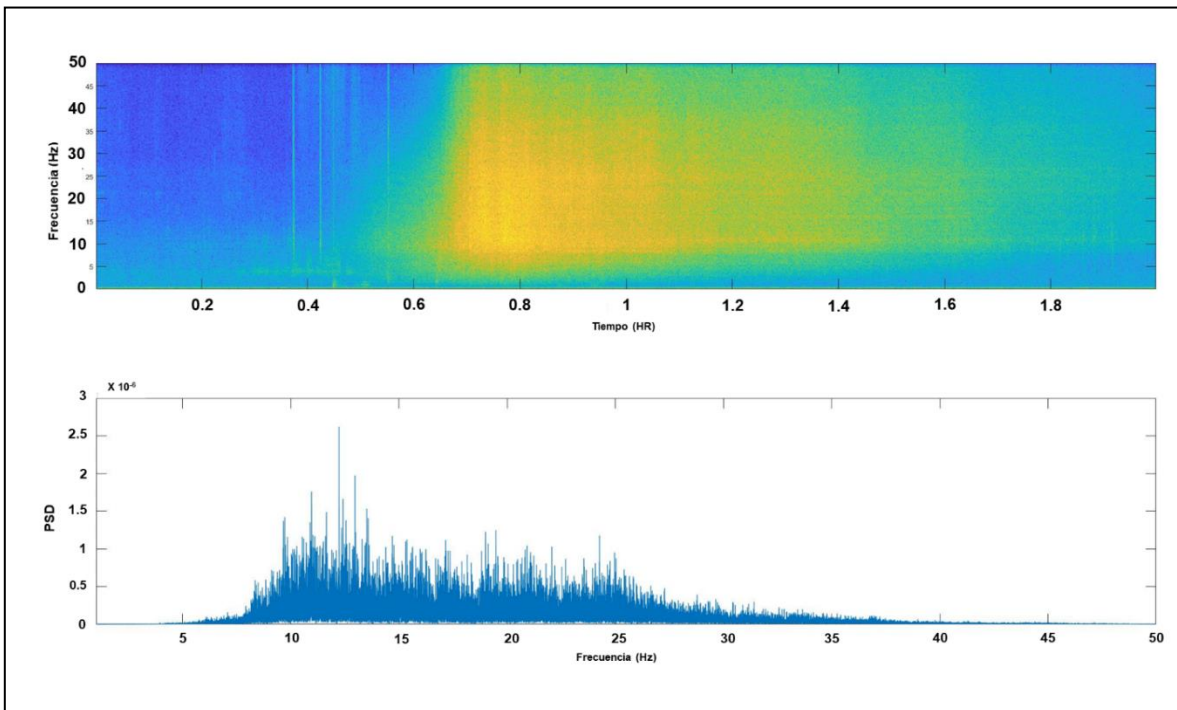


Figura 4.50. Espectro de frecuencias del lahar del 20 de octubre de 2017.

A partir del análisis hecho anteriormente se puede observar que de los tres años estudiados, el 2016 fue el año que presentó mayor cantidad de lahares. A su vez se pudo constatar que los lahares siempre se presentan en la temporada de lluvias correspondiente al estado de Colima, a excepción del año 2015 en donde se presentó un lahar de magnitud significativa en el mes de marzo.

En el año 2015 el 83% de los flujos se desencadenaron en los meses correspondientes a la temporada de lluvias (julio a octubre). Los eventos más frecuentes fueron de un solo pulso (SPE: *single pulse event*). A su vez, los eventos multipulso coincidieron con los días en que hubo eventos hidrometeorológicos de mayor magnitud, tales como: huracanes, frentes fríos, ondas tropicales, etc. Este fue el caso de los meses de marzo y octubre. El promedio de amplitud máxima para este año fue de 1.8×10^{-2} cm/s y hubo 4 lahares significativos con magnitudes arriba de 1.2×10^{-2} cm/s (Tabla 4.1 y Figs. 4.51 a 4.53)

En el año 2016, todos los eventos de lahar se presentaron dentro de la temporada de lluvia del Volcán de Colima. El 52% ocurrieron en el periodo inicial de la temporada y el 48 % en los últimos meses de la misma. Los eventos más frecuentes fueron de tipo multipulso (MPE: *multipulse events*) y ocurrieron en los días que hubo huracanes y tormentas tropicales. El promedio de amplitud máxima para este año fue de 2.4×10^{-2} cm/s. A su vez, se identificaron 7 eventos significativos con magnitudes arriba de 5×10^{-2} cm /s (Tabla 4. 2, Figs 4.54 a 4.56).

Tabla 4.1. Eventos de lahar con los valores de amplitud máxima más altos en el año 2015

Fecha	Amplitud Máxima (cm/s)	Precipitación acumulada (mm)	Intensidad promedio (mm/hr)	Evento hidrometeorológico asociado
17 marzo	9.2×10^{-3}	98.2	5.30	*Tormenta Invernal *Frente frío no. 41 *Humedad proveniente del Pacífico
	9.8×10^{-2}			
4 julio	1.2×10^{-3}	9	1.35	*Canal de baja presión
6 julio	1.2×10^{-2}	7	3.23	*Canal de baja presión
12 agosto	5.6×10^{-3}	8.6	0.40	Humedad proveniente del Pacífico
23/24 octubre	2.1×10^{-2}	340/100.4	14.48/ 7.63	Huracán Patricia
	3.8×10^{-2}			

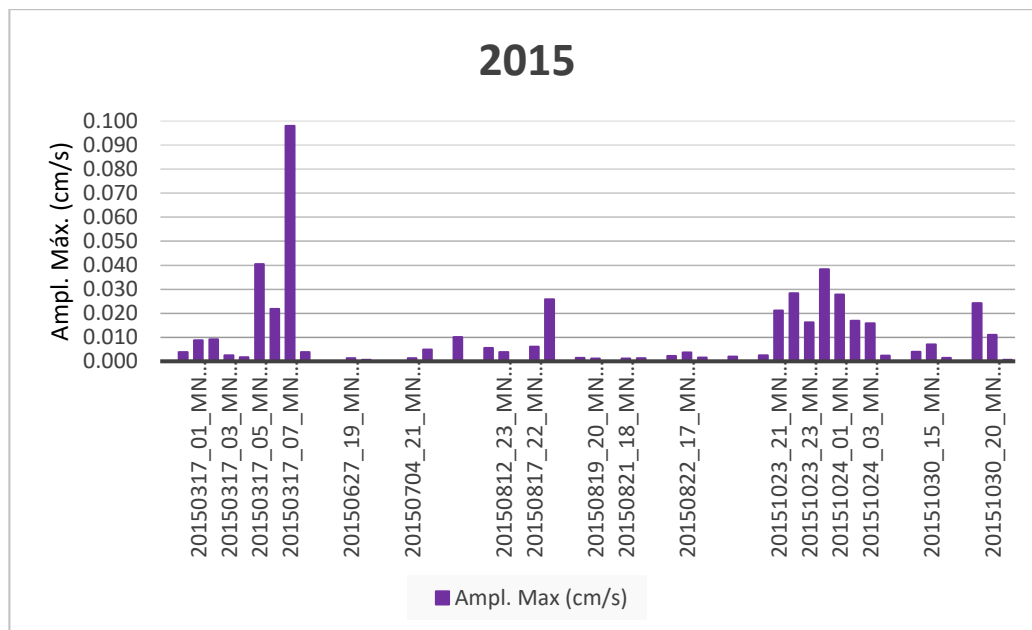


Figura 4.51. Lahares que se formaron en la barranca Montegrande en el año 2015.

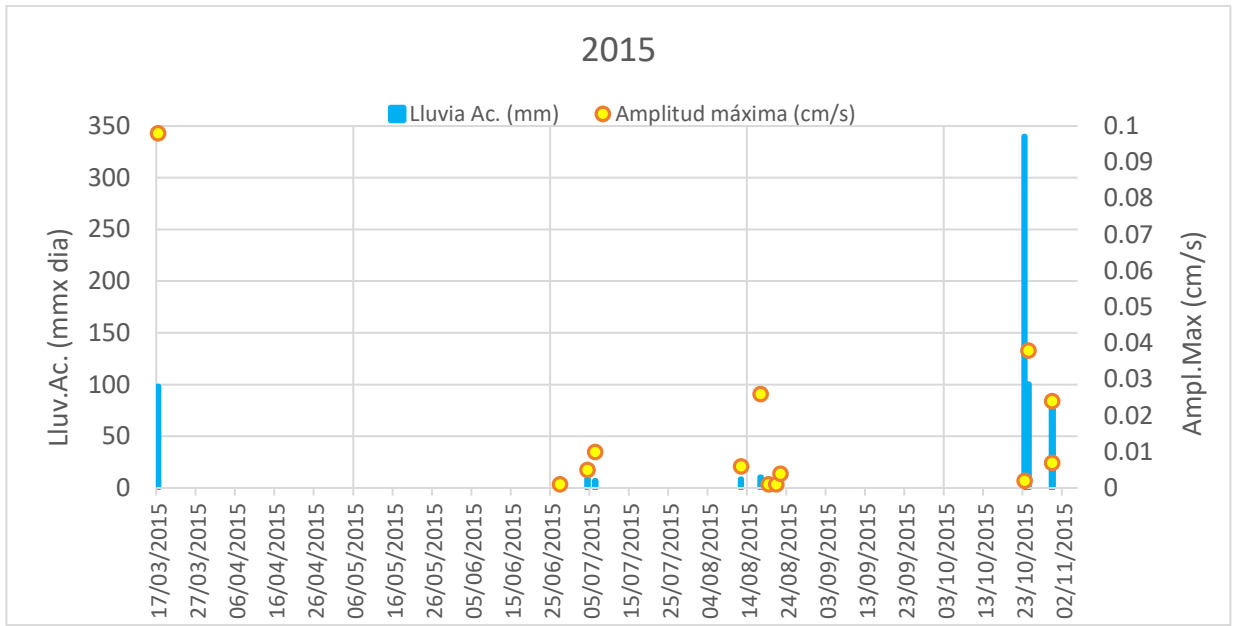


Figura 4.52. Valores de amplitud máxima y cantidad de lluvia acumulada de los lahares que ocurrieron en el año 2015.

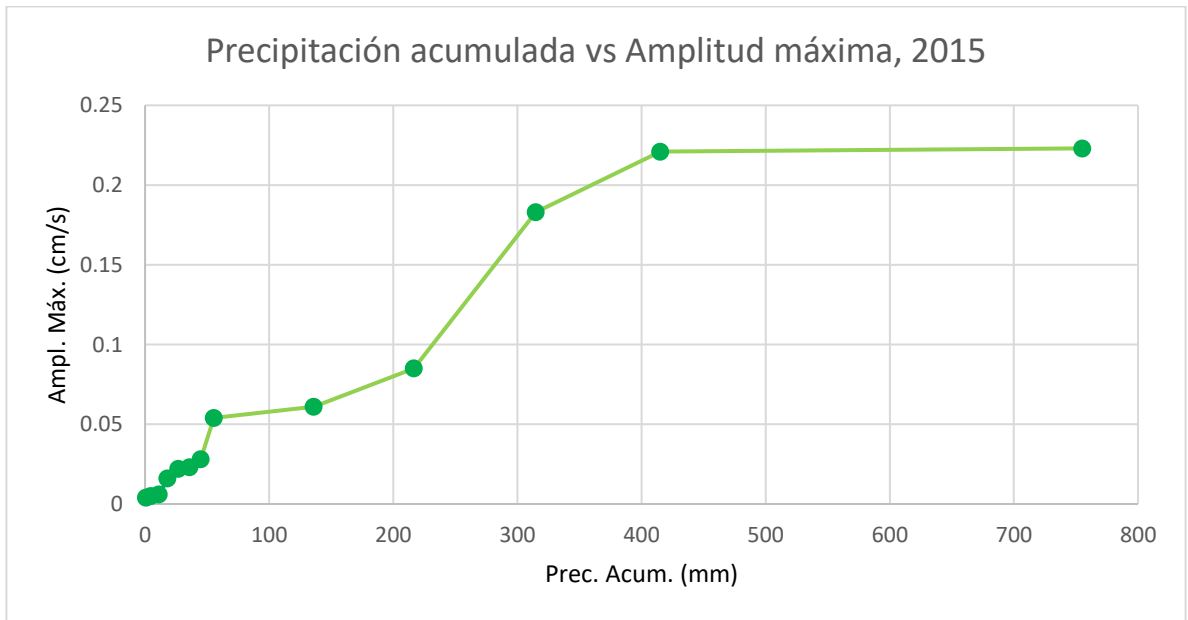


Figura 4.53. Relación de amplitud máxima acumulada y lluvia acumulada. Se puede observar que ambos valores son directamente proporcionales entre ellos. La mayoría de los eventos fueron de magnitudes y concentraciones de lluvia acumulada bajas. Los eventos poco comunes son aquellos de mayor magnitud y que ocurren en temporada de huracanes.

Tabla.4.2. Eventos de lahar con los valores de amplitud máxima más altos en el año 2016.

Fecha	Amplitud Máxima (cm/s)	Precipitación acumulada (mm)	Intensidad promedio (mm/hr)	Evento hidrometeorológico asociado
4 julio	8.2×10^{-3}	23.8	15.45	Humedad proveniente del pacífico
	1.6×10^{-2}			
23 julio	1.8×10^{-2}	17	0.72	Huracán Frank
29 julio	4.9×10^{-2}	14.6	7.12	
26 agosto	6.6×10^{-2}	7.20	1.2	Humedad remanente de Frank
30 agosto	6×10^{-2}	54.40	9.06	Humedad remanente por Tormenta tropical Javier
12 septiembre	1.5×10^{-2}	3	1	Humedad en la atmosfera por huracán Newton
	2.1×10^{-2}			
15 septiembre	5.1×10^{-3}	12.20	4.06	

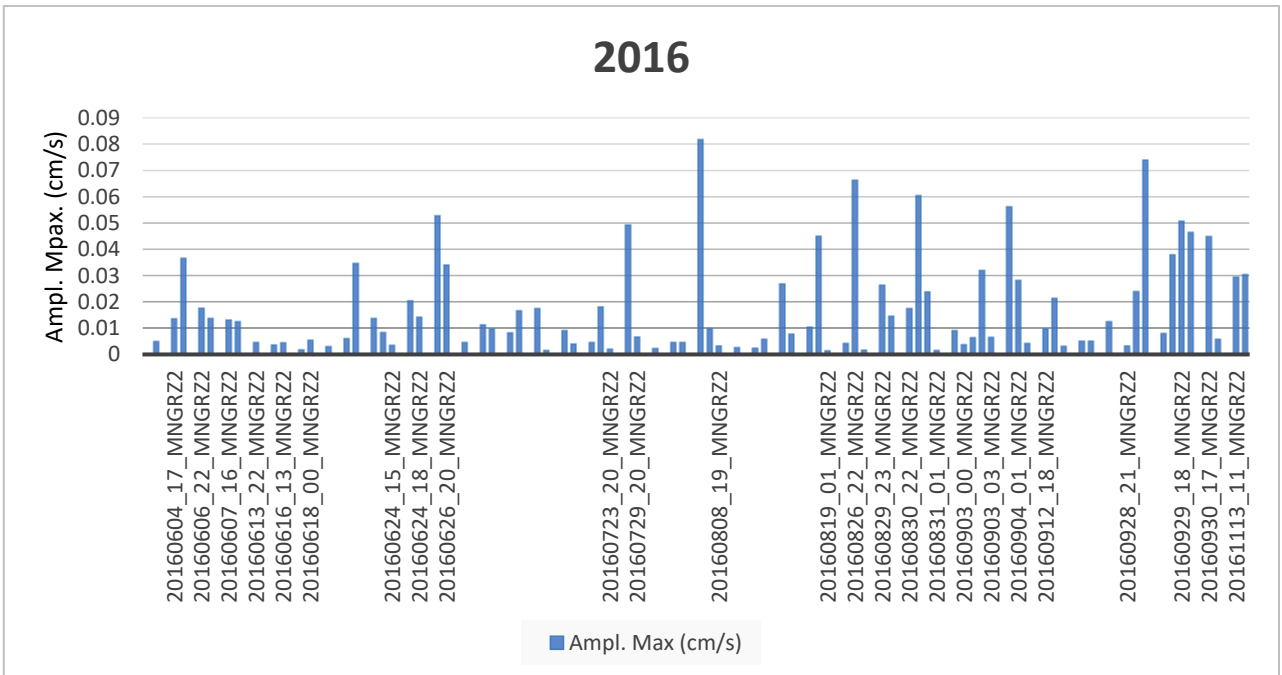


Figura 4.54. Lahares que se formaron en la barranca Montegrande en el año 2016

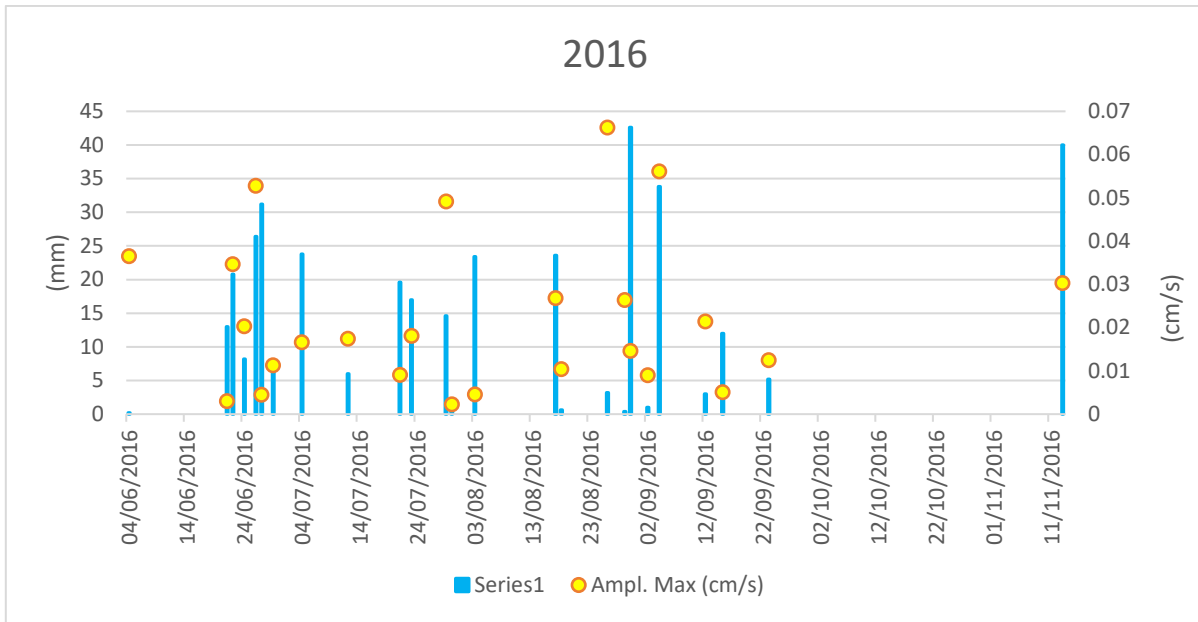


Figura 4.55. Precipitación acumulada y valores de amplitud máxima por evento del año 2016.

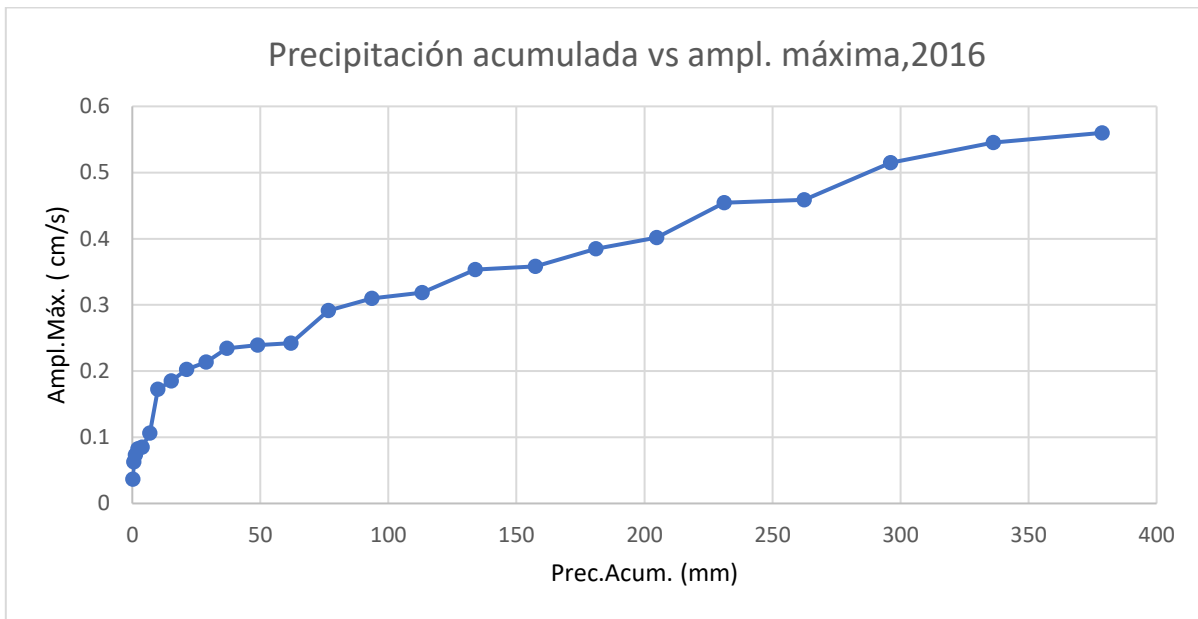


Figura 4.56. Relación de amplitud máxima y lluvia acumulada. Se puede observar que ambos valores son directamente proporcionales entre ellos. Este año, la distribución de los eventos de distintas magnitudes fue más uniforme.

En el año 2017, de la misma forma que en los años anteriores, los eventos de lahar se presentaron únicamente en la temporada de lluvias. Predominaron los lahares de tipo multipulso y coincidieron con los días del paso de huracanes, ondas tropicales, frentes fríos y líneas de baja presión. Hubo tres eventos que tuvieron los valores de amplitud más altos: el lahar del 3 julio, 8 de septiembre y 20 de octubre y el promedio de amplitud máxima de este año fue de 3×10^{-2} cm/s (Tabla 4.3 y Figs. 4.57 a 4.59)

Finalmente, se puede observar que los eventos unipulso son más frecuentes al principio de la temporada de lluvia, en precipitaciones de corta duración y baja acumulación (10-30 mm), y presentan señales de amplitud más baja con respecto a los eventos multipulso, que se asocian a eventos de lluvia de larga duración e importante acumulación de agua (>100 mm), y con elevados valores de amplitud máxima en correspondencia de los frentes principales.

Tabla 4.3. Eventos de lahar con los valores de amplitud máxima más altos en el año 2017

Fecha	Amplitud Máxima (cm/s)	Precipitación acumulada (mm)	Intensidad promedio (mm/hr)	Evento hidrometeorológico asociado
30 junio	5×10^{-3}	44	14.6	Huracán Dora
	1.8×10^{-2}			
3 julio	1×10^{-2}	14.8	7.15	Ondas tropicales y líneas de baja presión
	5.6×10^{-2}			
23 julio	2.4×10^{-2}	10.4	3.46	Ondas tropicales y líneas de naja presión
28 julio	2.8×10^{-2}	17	5.66	Ondas tropicales y líneas de baja presión
	3.3×10^{-2}			
8 septiembre	5×10^{-2}	49	16.33	Inestabilidad atm
20 octubre	3.8×10^{-2}	-	-	Paso huracán Pilar, Frente frío no. 3, paso huracán Lidia y huracán Katia.

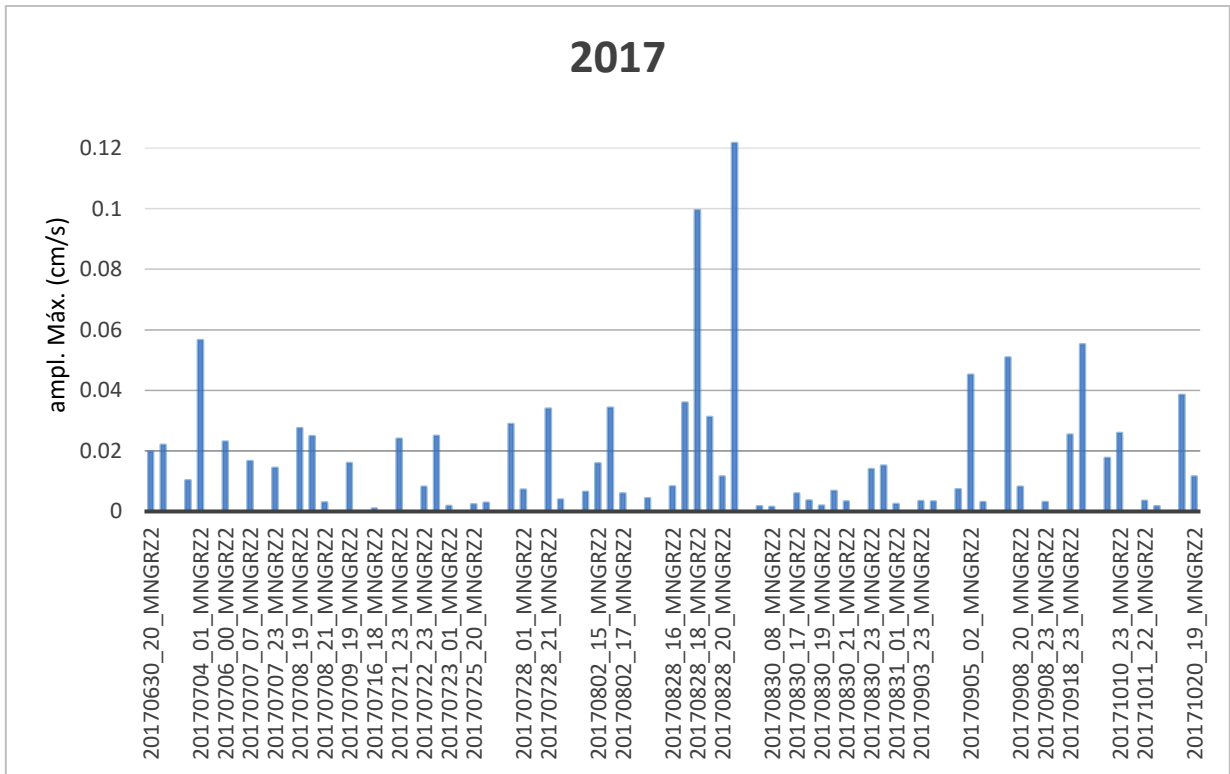


Figura 4.57. Lahares que se formaron en la barranca Montegrande en el año 2017

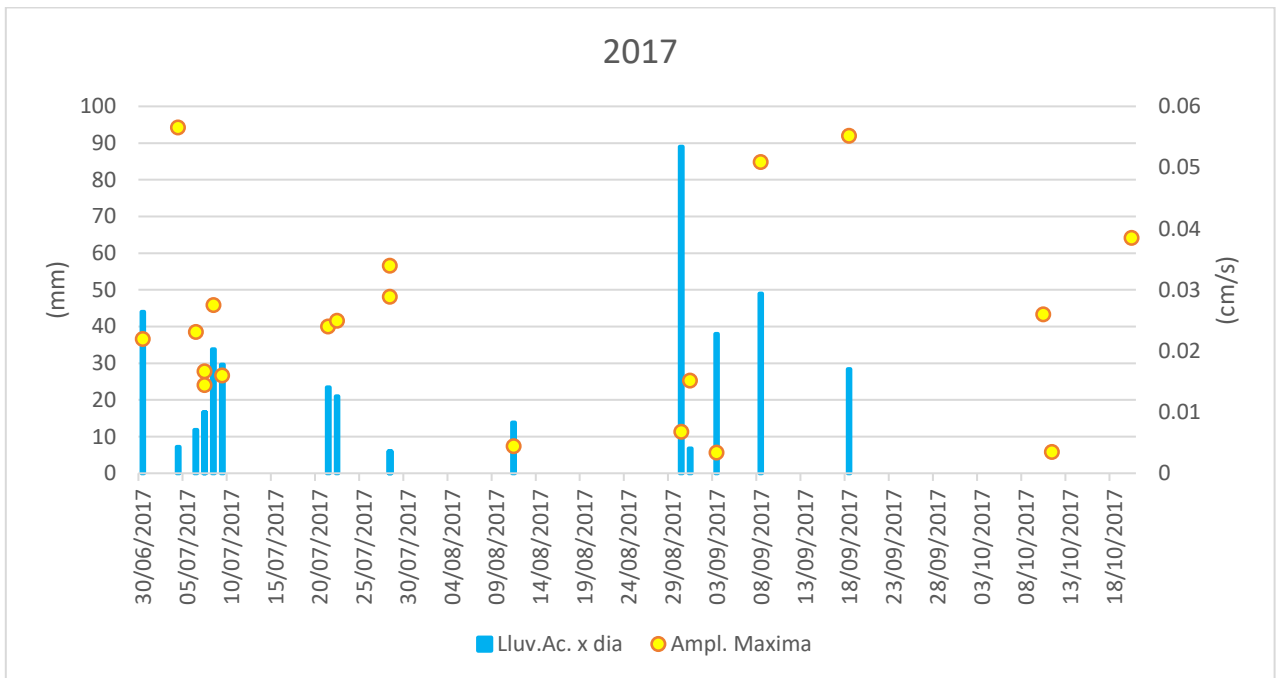


Figura 4.58. Distribución de valores de amplitud máxima y precipitación acumulada por evento

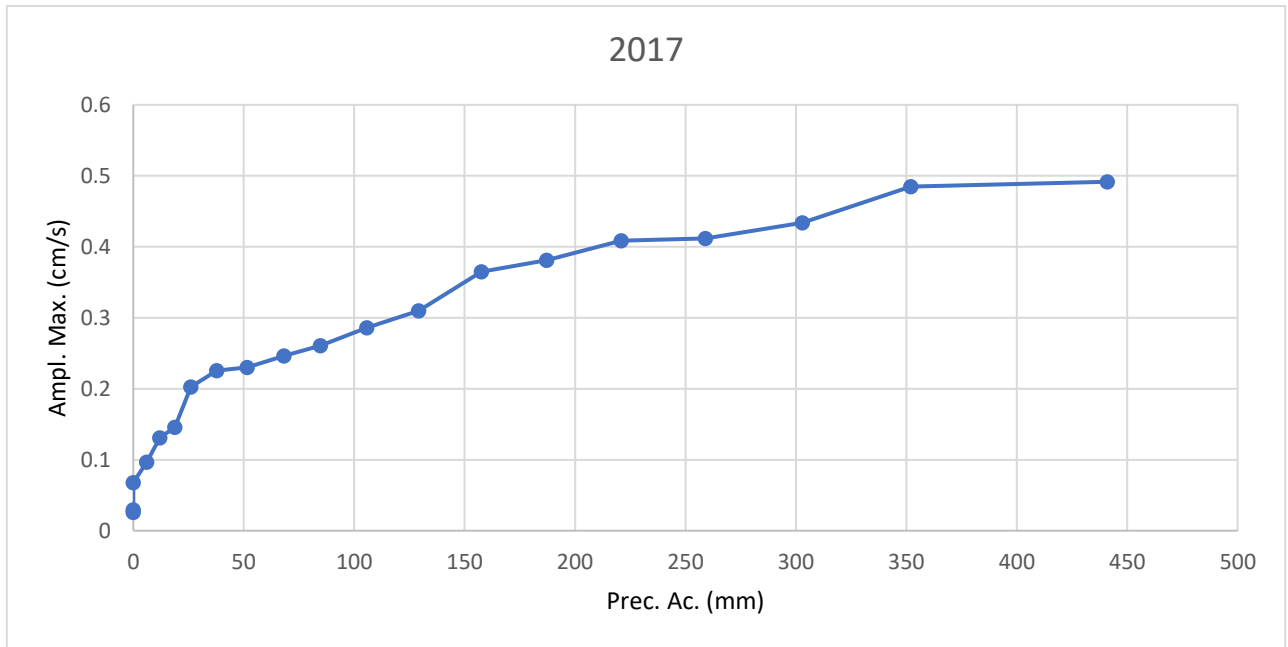


Figura 4.59. Relación de amplitud máxima y lluvia acumulada. Se puede observar que ambos valores son directamente proporcionales entre ellos. Este año, la distribución de los eventos de distintas magnitudes fue más uniforme.

CAPÍTULO V. ANÁLISIS MORFOLÓGICO DE LA BARRANCA MONTEGRANDE Y EVALUACIÓN DE PROCESOS EROSIVOS.

La barranca Montegrande es un canal efímero y se forma a partir de la unión de dos afluentes en la ladera sur del cono del Volcán de Colima, a 2400 m.s.n.s. y se extiende por una distancia de 7.5 km hasta el abanico distal. Su génesis se debe a la erosión de los depósitos de avalancha de escombros asociados a los colapsos sectoriales ocurridos en el Holoceno y también, de los depósitos piroclásticos asociados a las erupciones históricas por colapso de domo o por erupciones de tipo sub-pliniano a pliniano, como la erupción ocurrida en 1913 acompañada por el emplazamiento de flujos piroclásticos hasta distancias de 15 km desde el cráter (Capra *et al.*, 2010 y 2016; Vázquez *et al.*, 2016a).

Se caracteriza por ser una barranca activa, es decir, presenta una dinámica morfológica alta con la alternancia de procesos de erosión y de acumulación de sedimentos durante la temporada de lluvia; y de acuerdo con Vázquez *et al.* (2016a), la parte alta de la barranca se caracteriza por tener pendientes mayores a 20°, la parte media de 8 a 10° y la parte distal de 2 a 8° (Fig. 5.1).

En los años previos a la erupción del 2015, la barranca se encontraba en un periodo moderadamente estable. Consistía en un canal principal, muy encajado en su parte alta. En la porción media, se apreciaba mayor sinuosidad con formación de pequeños meandros en la porción distal antes de desembocar y formar un abanico en donde, por el cambio brusco en la anchura del canal, el material transportado por los lahares se depositaba de manera súbita.

El interior del canal se caracterizaba por la presencia de terrazas de diferente orden, productos del emplazamiento de lahares en las diferentes temporadas y de material depositado por corrientes fluviales, algunas de ellas con un cierto grado de

estabilidad debido a la presencia de vegetación en su superficie. El área total del canal era de 0.69 km² aproximadamente (Fig. 5.2). El canal activo era altamente variable en anchura, desde 20 m hasta no más de 3 metros, con una trayectoria compleja, ya que muestra patrones rectos en algunas partes y en otras, giros de dirección de 60° a 20° (Vázquez *et al.*, 2016a).

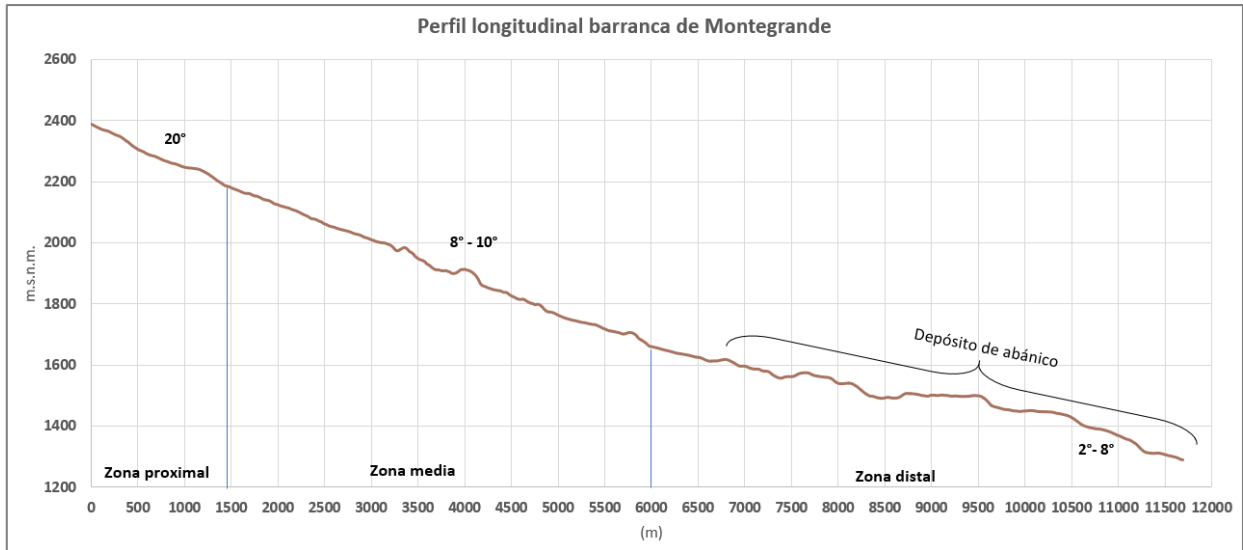


Figura 5.1. Perfil longitudinal de la barranca Montegrande.

A partir de la erupción del 2015, la superficie de la barranca aumentó debido al paso de un flujo piroclástico, y el canal principal se llenó completamente por los depósitos de dicho flujo. El volumen estimado del material volcánico que relleno la barranca fue de $4.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Capra *et al.*, 2016).

En la zona proximal se depositaron de 10 a 17 metros de material piroclástico (sección A y B), En la sección B, se aprecia la superficie homogénea que quedó después del emplazamiento del flujo (Fig. 5.2)

En la porción media se puede apreciar que antes de la erupción del 2015 la barranca se relleno 25 metros (Sección C). En la porción media distal, únicamente se relleno la barranca ~10 metros (Sección D).

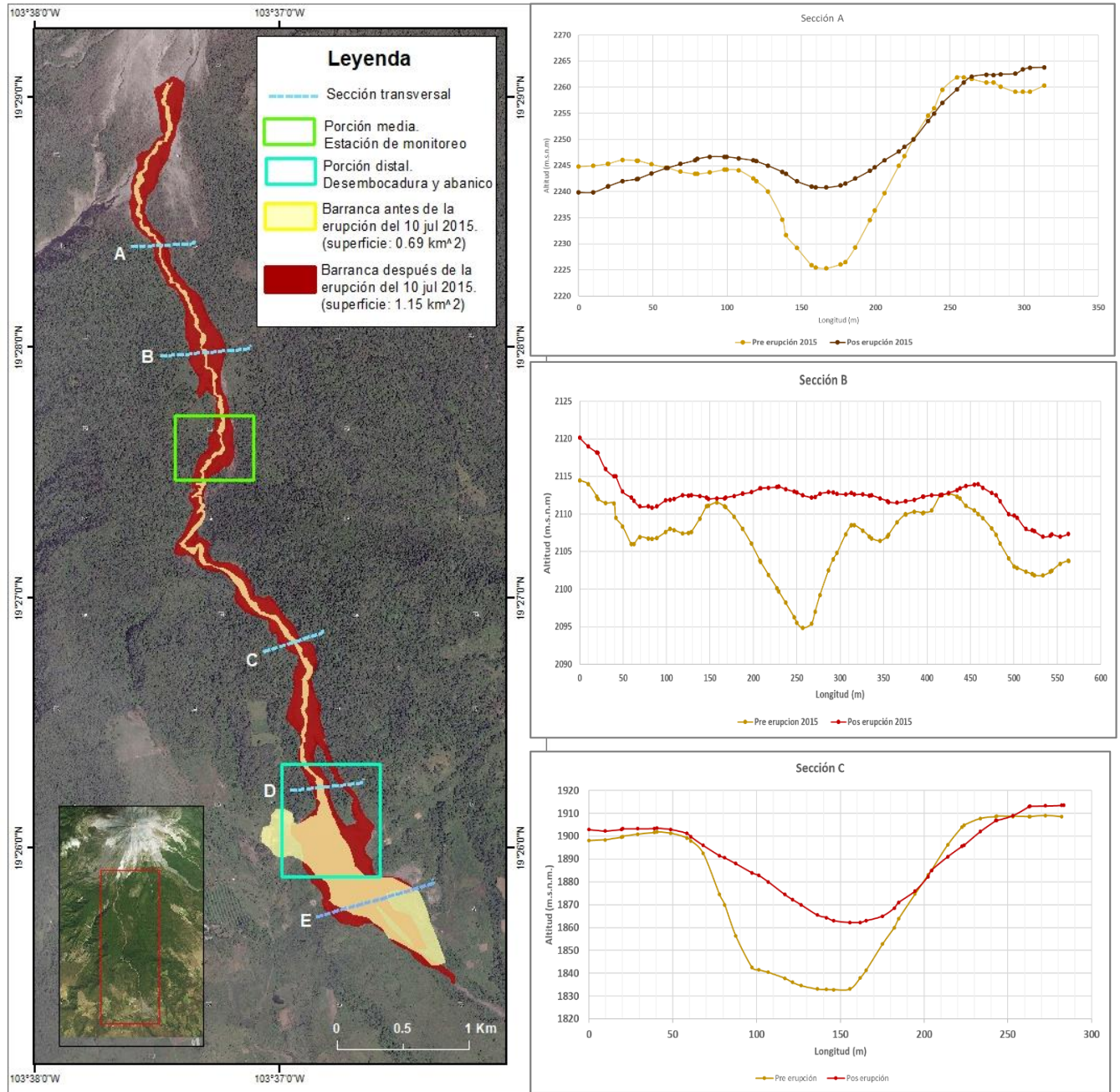


Figura 5.2. Izquierda: Mapa de la barranca Montegrande antes y después de la erupción de julio 2015 y zonas de estudio. Derecha: perfiles transversales de los distintos puntos de la barranca en donde se puede observar el depósito del flujo piroclástico que rellenó el canal principal. Fotografía satelital 17/ 11/2015, resolución espacial 30 cm. Fuente: Google Earth Pro, 2018.

Finalmente, en la desembocadura de la barranca, el canal principal logró rellenarse 10 metros; sin embargo, fue tal la cantidad de sedimento acarreado por el flujo piroclástico que se desvió al encontrarse con una barrera topográfica de 20m de altura (Figs. 5.2 y 5.3)

El area total de la barranca despues del evento de julio del 2015 fue de ~1.15 Km². A partir de este evento eruptivo, el régimen fluvial cambió y la formación de nuevos canales comenzó a verse en los años posteriores (Figuras 5.2).

En este capítulo se analizaron los cambios morfológicos que ha presentado la barranca despues de la erupción de 2015 y durante los años 2016 y 2017. El análisis se realizó en la parte media de la barranca, a 7 km desde el cráter en donde se encuentra la estación de monitoreo y en una porción de la zona distal (Fig.5.4)

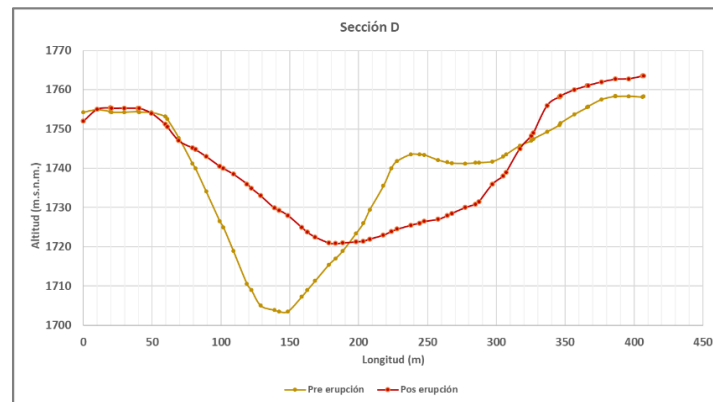


Figura 5.3. Sección D (zona distal) de la barranca Montegrande, ápice del depósito de abanico.

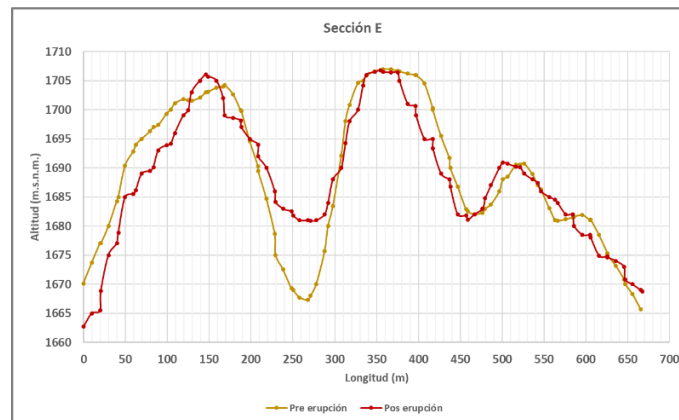


Figura 5.4. Sección E (zona distal) de la barranca Montegrande, depósito de abanico.

5.1. Cambios Morfológicos en la porción media de la barranca: Estación de monitoreo.

Para el análisis de los cambios morfológicos por el emplazamiento de lahares durante las temporadas de lluvia, se hicieron secciones transversales en dos porciones de la barranca cercanas a la estación de monitoreo. Estas secciones se nombraron MG1710 y MG1712. Es importante señalar que las secciones fueron tomadas viendo hacia el volcán, sin embargo, a la hora de hacer las descripciones, se tomó como base la orientación con respecto a la dirección del flujo (Fig. 5.5). A continuación, se muestran los resultados de dicho análisis

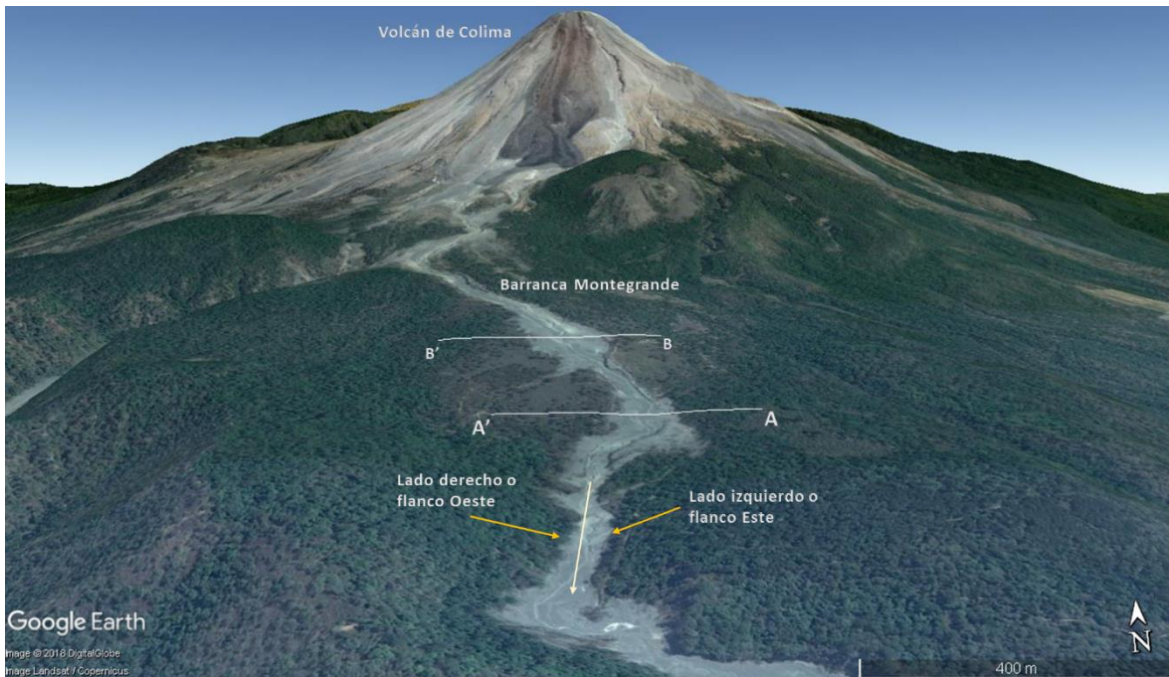


Figura 5.5. Ejemplo de secciones transversales y su orientación con respecto al volcán.

5.1.1 Zona media MG1710

En esta zona de la barranca se trazaron 4 secciones transversales a cada ~12 m con la finalidad de observar los cambios morfológicos antes y después de las temporadas de lluvia de los años 2016 y 2017 (Figs. 5.6 y 5.7).

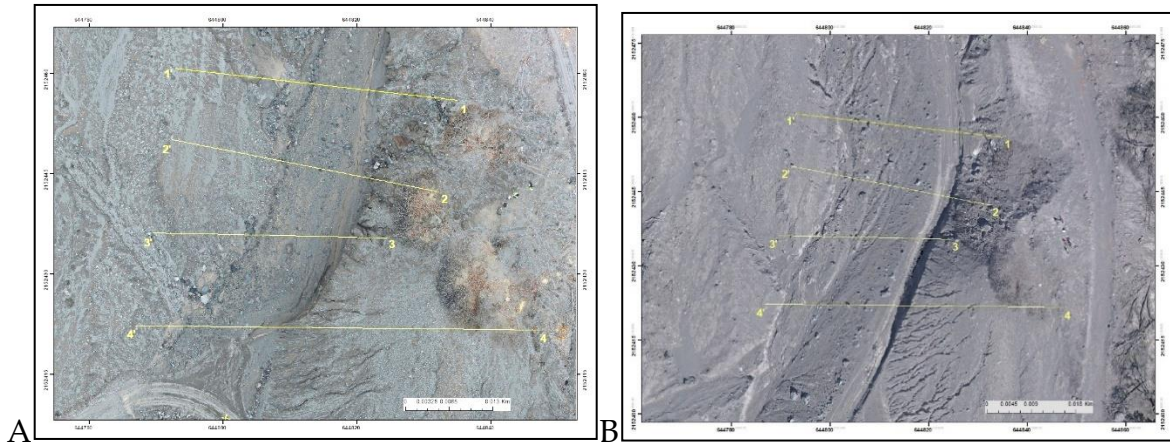


Figura 5.6. Fotografías de la zona MG1710. A) agosto 2016. Se observa un canal principal de 12 a 20 metros de ancho y escorrentías secundarias menores al oeste del canal; B) diciembre 2016, el canal principal fue rellenado y únicamente quedó un pequeño canal en el costado oriental de la barranca.

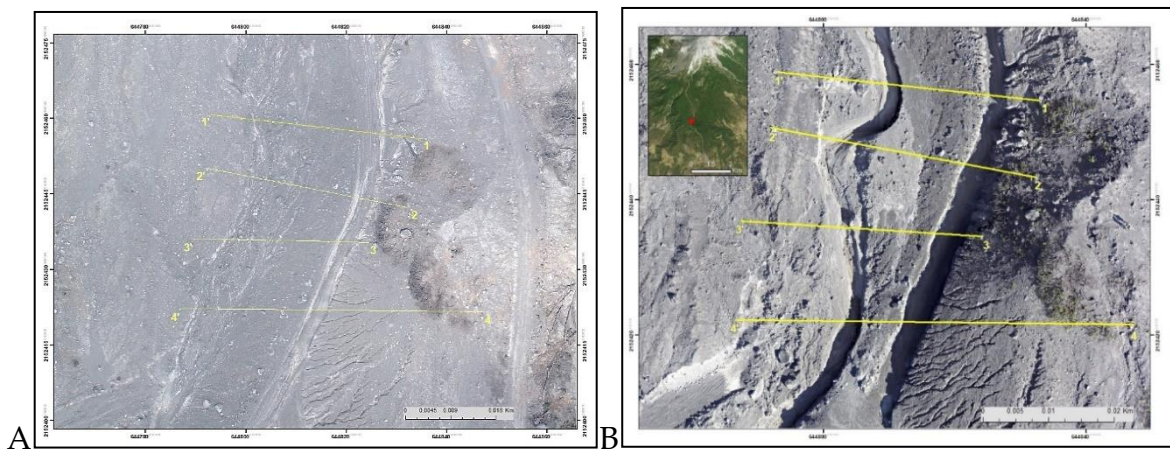


Figura 5.7. A) marzo 2017, no se aprecia un canal principal, solo escorrentías someras; B) octubre- noviembre 2017, se aprecia erosión y la formación de dos canales principales en el límite entre el relleno del canal de ~5 metros de ancho y el material previo. A su vez, se aprecia la presencia antrópica, con un camino que corta la barranca transversalmente y uno paralelo a esta.

En las secciones 1, 2 y 3 se observó que, en agosto del 2016, la barranca presentaba un relieve negativo con una morfología trapezoidal inversa en su canal principal; sin embargo, de agosto a diciembre 2016 la barranca tuvo una evolución positiva en su morfología, y el canal principal se rellenó hasta 3 metros. En el invierno, de diciembre a marzo de 2017 la barranca se rellenó de ~0.5 a ~1 m (Figs.

5.8 y 5.9) sin embargo, se puede observar que la sección 3 muestra que el canal de la derecha se socavó ~90 cm.

De marzo a octubre del 2017, se formaron dos canales en los bordes del canal principal anterior, cada uno con un máximo de 3 m de profundidad. De octubre a noviembre, se observa acumulación de material de hasta 1 m en el canal hacia el este. A su vez, se vieron condicionados por la forma convexa del lecho, la cual propició la bifurcación del canal principal (Figs. 5.10 y 5.11).

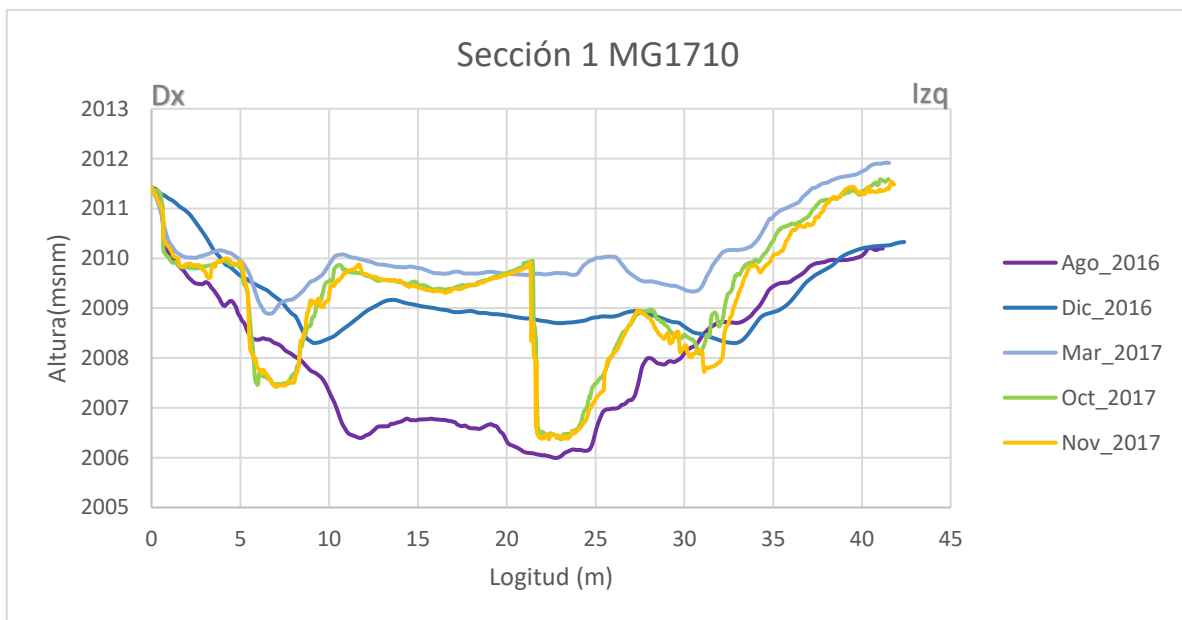


Figura 5.8. Sección 1 de la zona media de la barranca Montegrande MG1710 en donde se aprecian los cambios morfológicos durante el periodo de agosto 2016 a noviembre de 2017.

En la sección 4 se puede observar el mismo comportamiento que en las secciones anteriores. Desde agosto a diciembre del 2016 se observa un relleno uniforme de más de 2 metros. Durante la temporada de lluvia del 2017 se observa la formación de nuevos canales hacia las zonas externas de hasta 1 m de profundidad y de 2 a 5 m de anchura. (Figura 5.11)

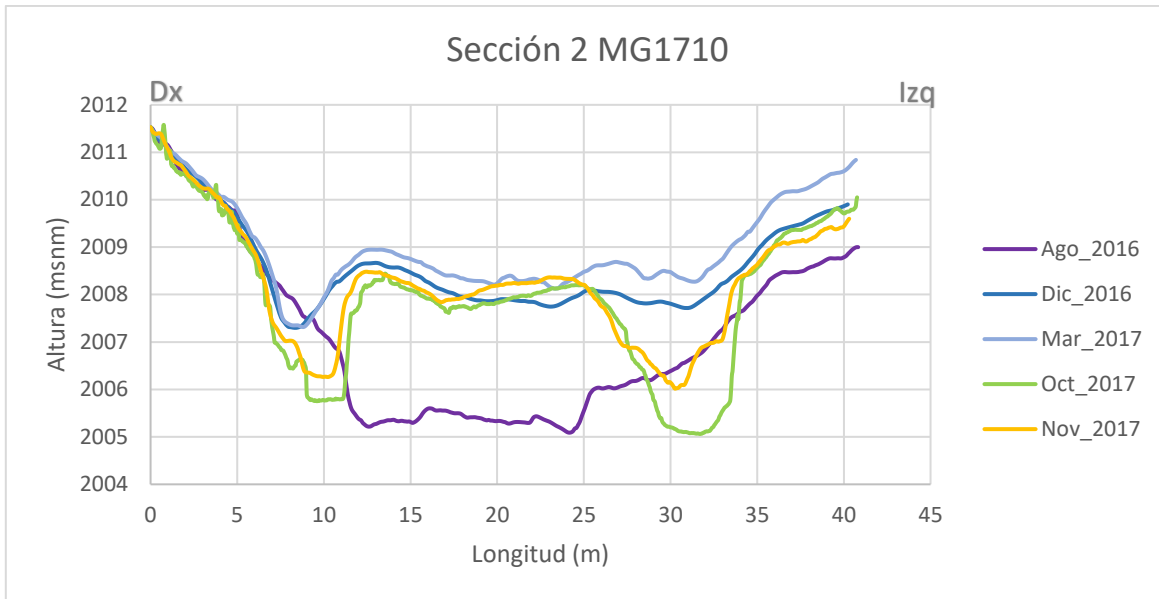


Figura 5.9. Sección 2 de la zona media de la barranca Montegrande MG1710 en donde se aprecian los cambios morfológicos durante el periodo de agosto 2016 a noviembre de 2017.

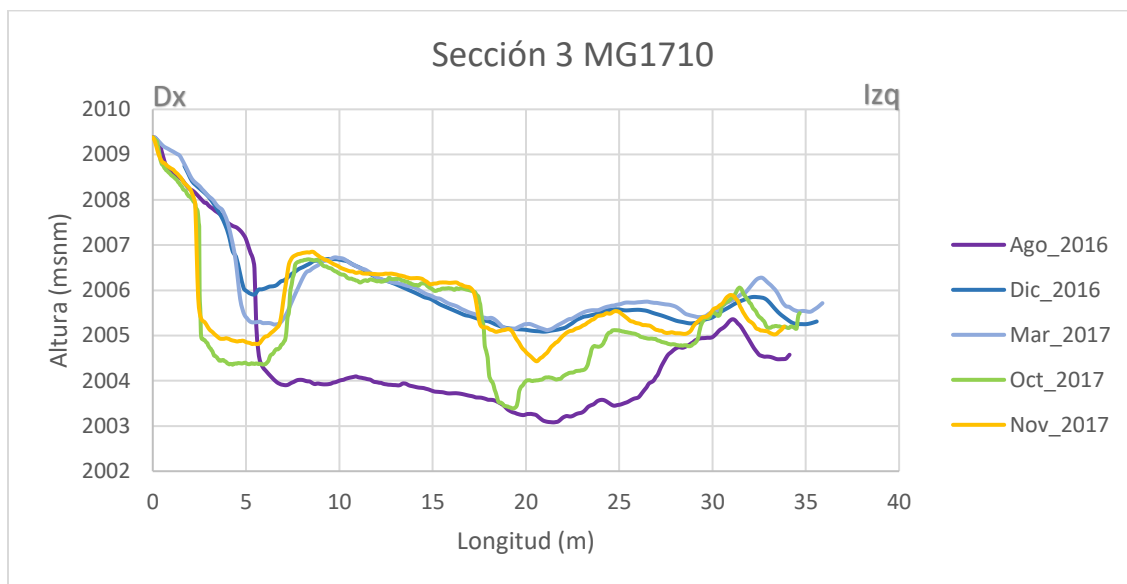


Figura 5.10. Sección 3 de la zona media de la barranca Montegrande MG1710 en donde se aprecian los cambios morfológicos durante el periodo de agosto 2016 a noviembre de 2017.

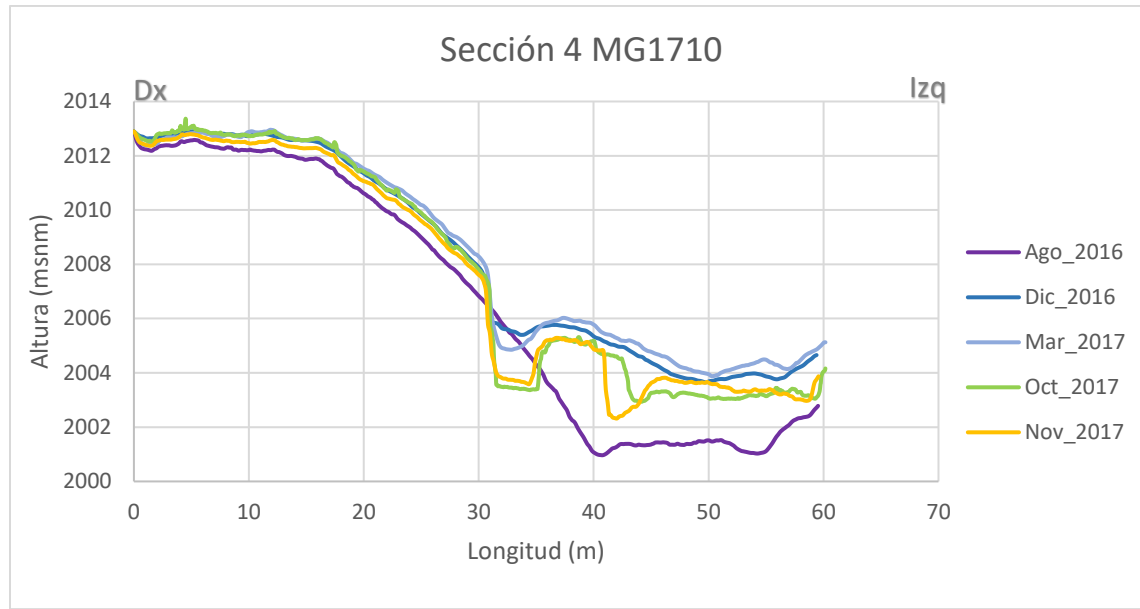


Figura 5.11. Sección 4 de la zona media de la barranca Montegrando MG1710 en donde se aprecian los cambios morfológicos durante el periodo de agosto 2016 a noviembre de 2017.

5.1.2. Zona media MG1712

En esta zona de la barranca se trazaron 4 secciones transversales a cada ~10 m con la finalidad de observar los cambios morfológicos durante los años 2016 y 2017 (Figura 5.12). Respecto a la zona rectilínea del canal, anteriormente descrita; aquí se describe el sector de curva del canal principal.

En la sección 1, hubo una migración del canal principal de derecha a izquierda durante la temporada de lluvia del 2016 (agosto- diciembre). A su vez, hubo deposición de material con un espesor de hasta 2 metros. De diciembre de 2016 a octubre de 2017, predominaron los procesos erosivos y el canal principal se profundizó ~1 metro; sin embargo, en noviembre de 2017, nuevamente se rellenó el canal y subió el nivel base ~1m.

Se puede observar que la morfología en general no cambia de forma drástica, únicamente se suaviza la superficie cuando hay procesos acumulativos dominantes.

En la sección 2 no se observan cambios relevantes, de agosto a diciembre 2016 se forma el canal principal y solamente se aprecia un incremento en el nivel del canal de aproximadamente 1 m de octubre a noviembre de 2017.

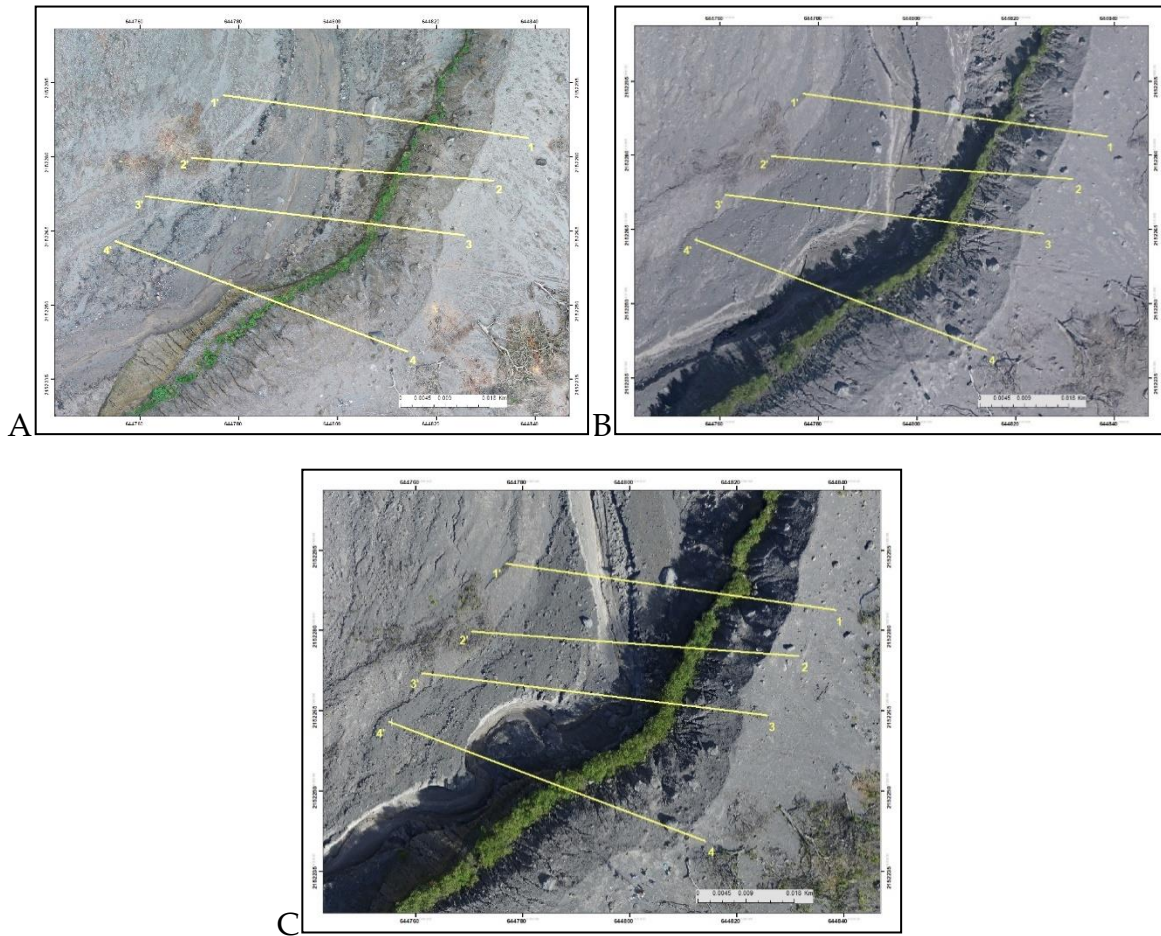


Figura 5.12. Fotografías de la zona MG1712. A y B) agosto - diciembre 2016, no se observan cambios significativos. En algunas partes se aprecia mayor erosión en el canal principal que permiten diferenciar las terrazas de los distintos lahares C) octubre- noviembre 2017.

En la sección 3 (Figura 5.15), se observó que durante el año 2016 no hubo procesos erosivos importantes. Esta zona de la barranca no mostraba un canal principal definido y únicamente hay canales someros. Por el contrario, durante la temporada de lluvia del 2017 se observa un proceso predominantemente erosivo con la formación de un canal de 4 m de profundidad hacia la derecha del canal principal.

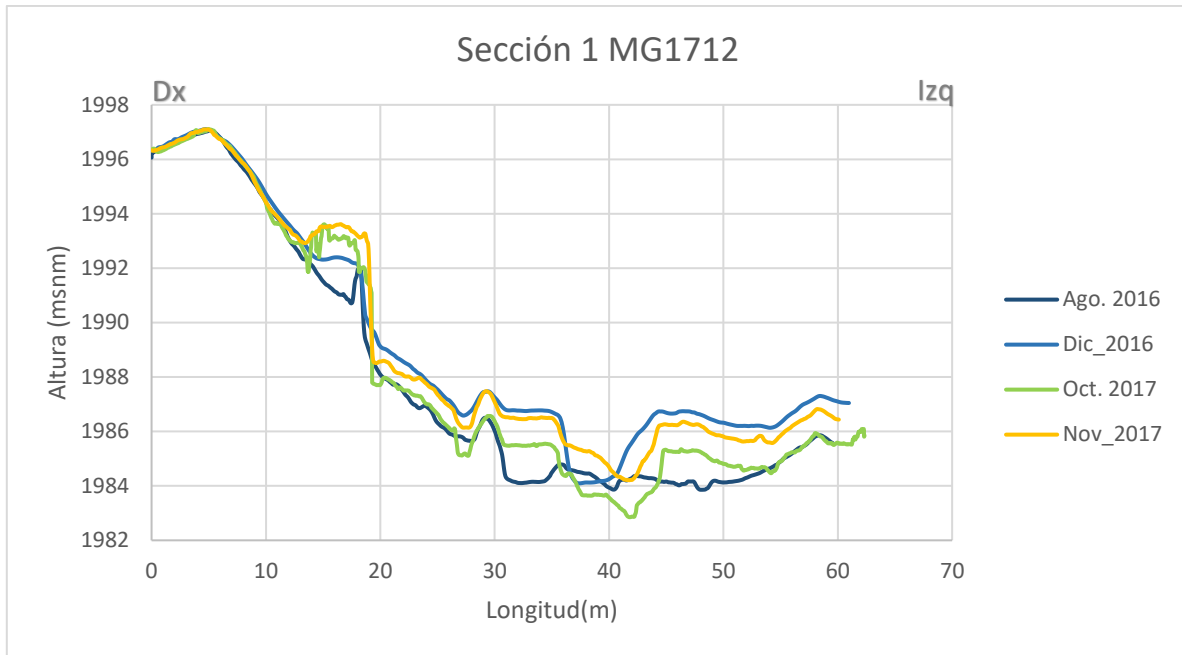


Figura 5.13. Sección 1 de la zona media de la barranca Montegrando MG1712 en donde se observa la migración del canal principal 5 metros a la izquierda, en el periodo de lluvias del 2016 (agosto a diciembre). Hay predominio de procesos erosivos de diciembre 2016 a octubre 2017 y deposición de octubre a noviembre de 2017.

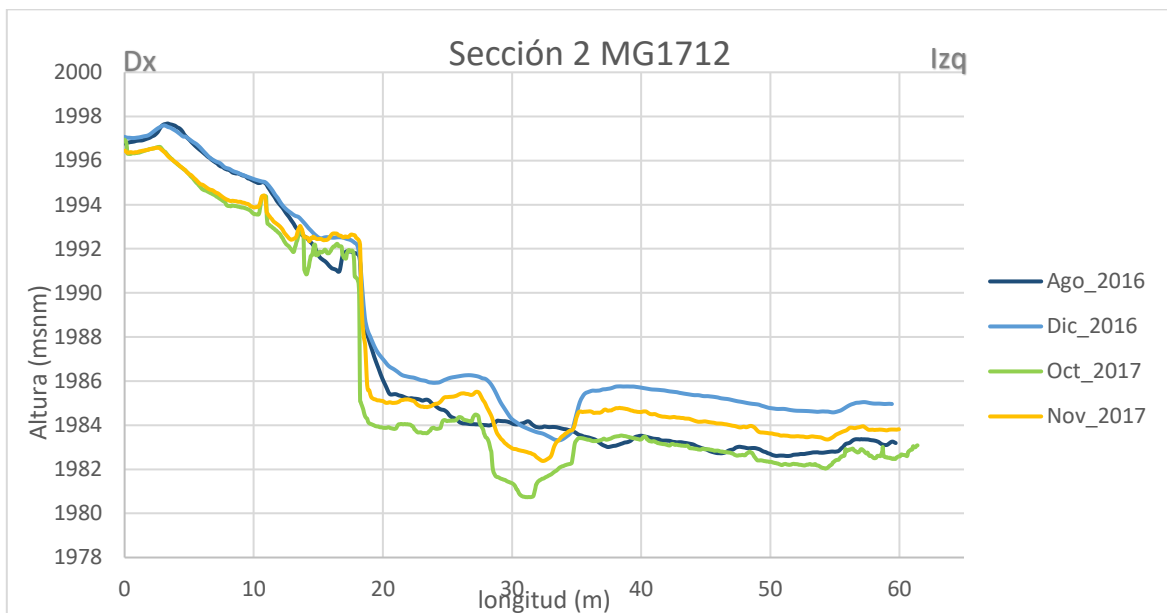


Figura 5.14. Sección 2 de la zona media de la barranca Montegrando MG1712 en donde se mantiene una morfología negativa de balance entre los procesos de erosión y de deposición. De octubre a noviembre 2017 hubo procesos de deposición en donde el nivel base subió 2 m.

Un mes después, se puede apreciar un relieve más suavizado que indica que los procesos acumulativos predominaron, dejando depósitos de material de ~1 a 2 m de espesor (Figura 5.15).

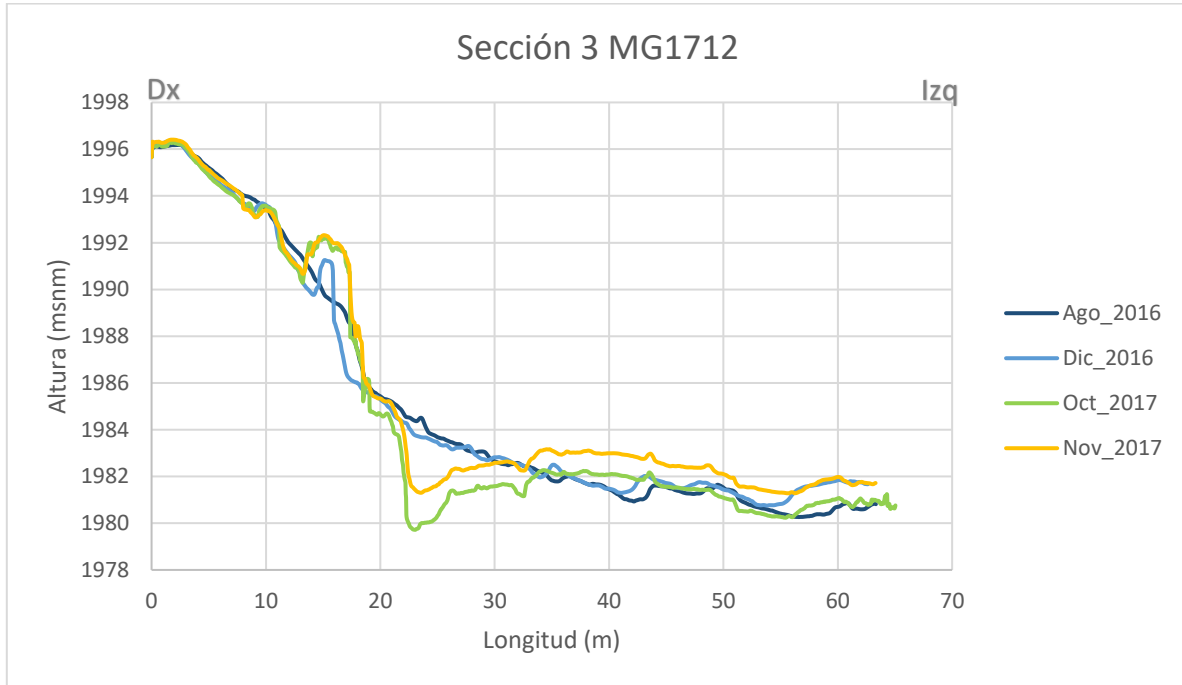


Figura 5.15. Sección 3 de la zona media de la barranca Montegrando MG1712 en donde se aprecian los cambios morfológicos durante el periodo de agosto 2016 a noviembre de 2017.

En la sección 4 se observa el mismo comportamiento descrito anteriormente, sin embargo, en esta parte del canal de diciembre de 2016 a octubre de 2017, se observa un aumento en su anchura de ~10 m. Presenta una morfología rectangular y un buzamiento en el lecho que va acorde con la pendiente del terreno *in situ*. Esta inclinación favorece que se presente una mayor incisión en el lado izquierdo del canal. Una vez más, se observó que los procesos erosivos predominaron en el año 2017 (Fig. 5.16).

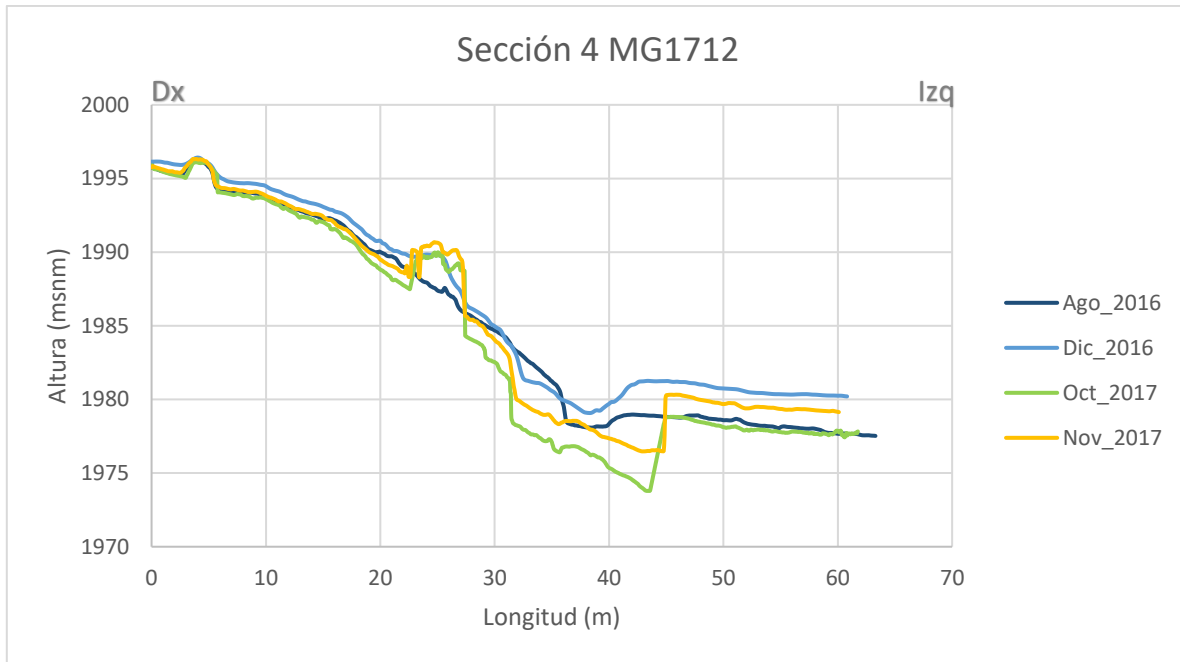


Figura 5.16. Sección 4 de la zona media de la barranca Montegrando MG1712 en donde se aprecian los cambios morfológicos durante el periodo de agosto 2016 a noviembre de 2017.

5.2. Cambios morfológicos en la porción distal de la Barranca.

El análisis de los cambios morfológicos de la barranca Montegrando, se llevó a cabo en dos porciones de la zona distal de la barranca, las cuales se nombraron con las siguientes claves: MG1721 y MG1722, respectivamente. A continuación, se muestran los resultados de dicho análisis. Para este tramo de la barranca solo se cuenta con los datos del 2017.

5.2.1 Zona distal MG1721

En esta zona de la barranca se trazaron 3 secciones transversales a cada ~10 m (Figura 5.17). Se puede apreciar que a inicios del 2017 se había formado un canal principal y algunos secundarios; sin embargo, en el transcurso de ese mismo año se presentaron procesos erosivos significativos, lo que provocó una incisión marcada. El canal principal se erosionó de ~2 a 3 metros y los canales secundarios aumentaron su profundidad ~1 metro (Figs. 5.18 a 5.20).

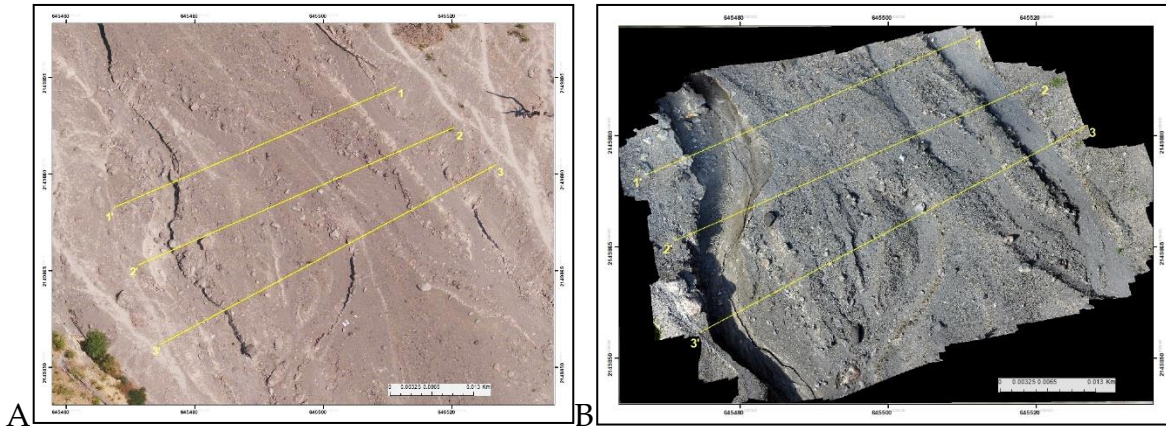


Figura 5.17. Fotografías de la zona MG1721. A) mayo 2017, se aprecian de forma somera varios canales, no existe un canal estable y definido; B) noviembre 2017, se puede observar un canal bien definido del lado occidental de la barranca con una profundidad de ~3.5 metros, y algunos canales secundarios paralelos a este, de profundidades menores.

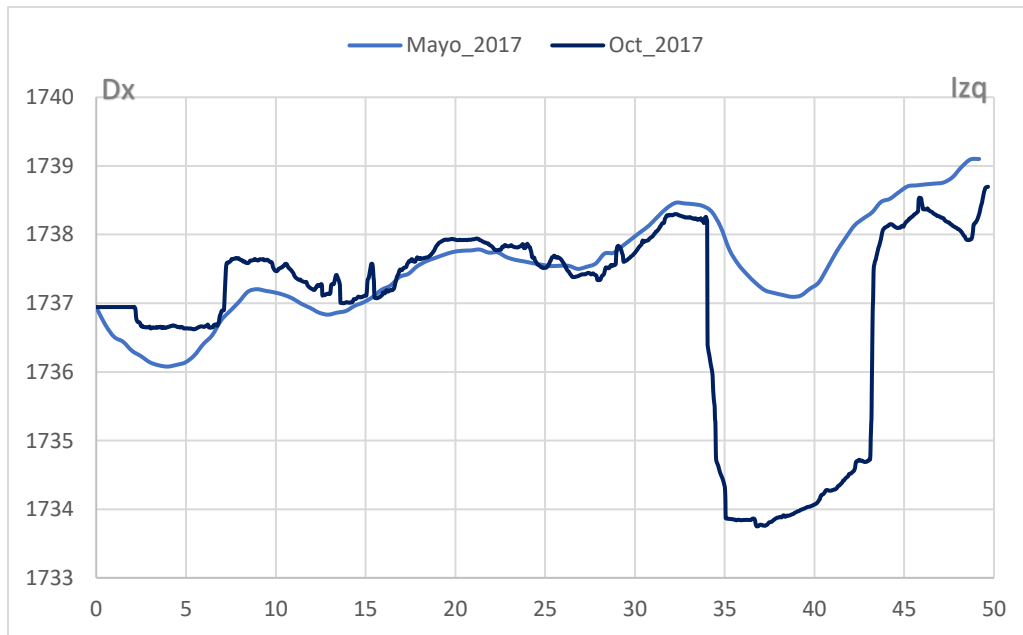


Figura 5.18. Sección 1 de la zona distal de la barranca Montegrande MG1721 en donde se aprecian los cambios morfológicos durante el periodo de mayo a octubre 2017.

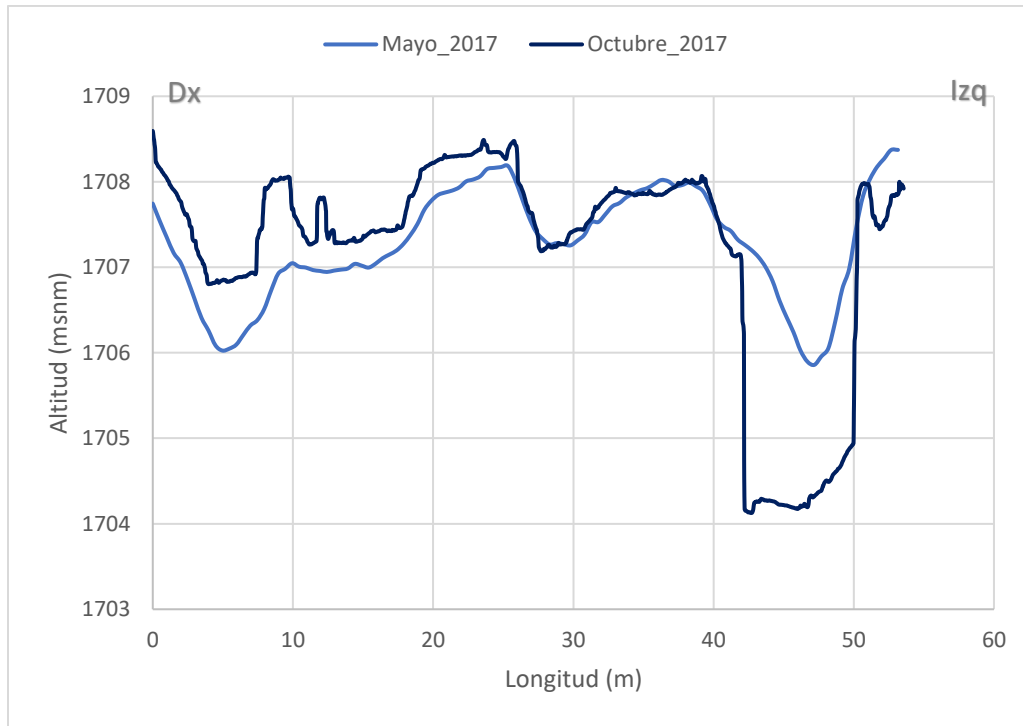


Figura 5.19. Sección 2 de la zona distal de la barranca Montegrande MG1721 en donde se aprecian los cambios morfológicos durante el periodo de mayo a octubre 2017.

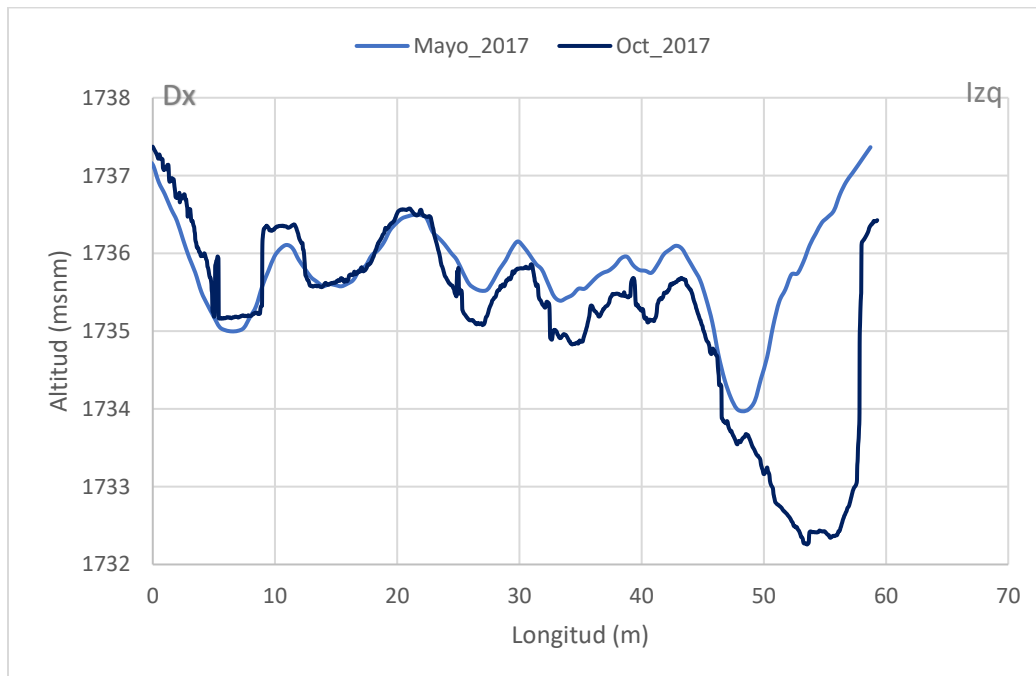


Figura 5.20. Sección 3 de la zona distal de la barranca Montegrande MG1721 en donde se aprecian los cambios morfológicos durante el periodo de mayo a octubre 2017.

5.2.2. Zona distal MG1722

Esta porción de la barranca corresponde con la zona de canal antes de la desembocadura. Se trazaron 4 secciones transversales, con la finalidad de observar los cambios morfológicos por eventos de lahar durante los años 2015 y 2017 (Figs. 5.21y 22). El perfil agosto 2015 representa la superficie intacta depósito de flujo piroclástico.

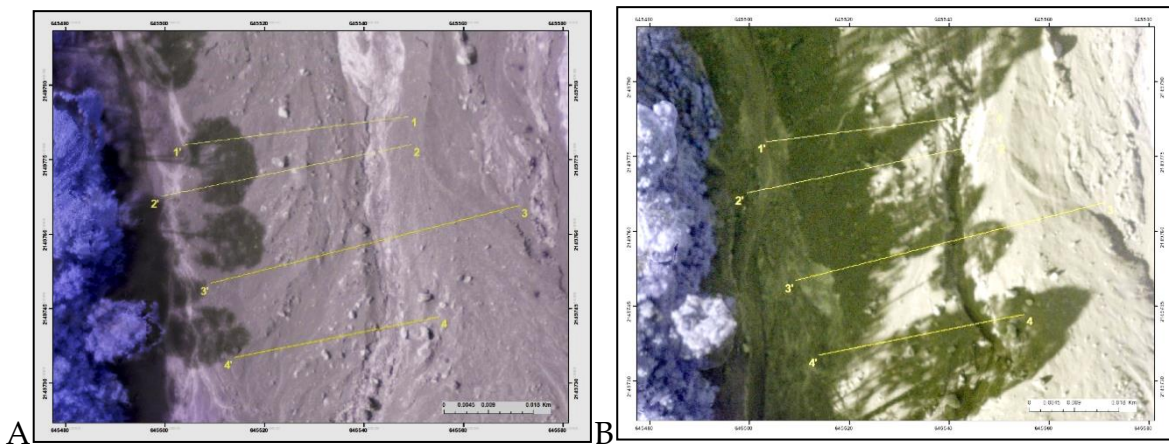


Figura 5.21. Fotografías de la zona MG1722. A) agosto 2015, no existe un canal definido; B) noviembre 2015, se puede observar un canal más definido.

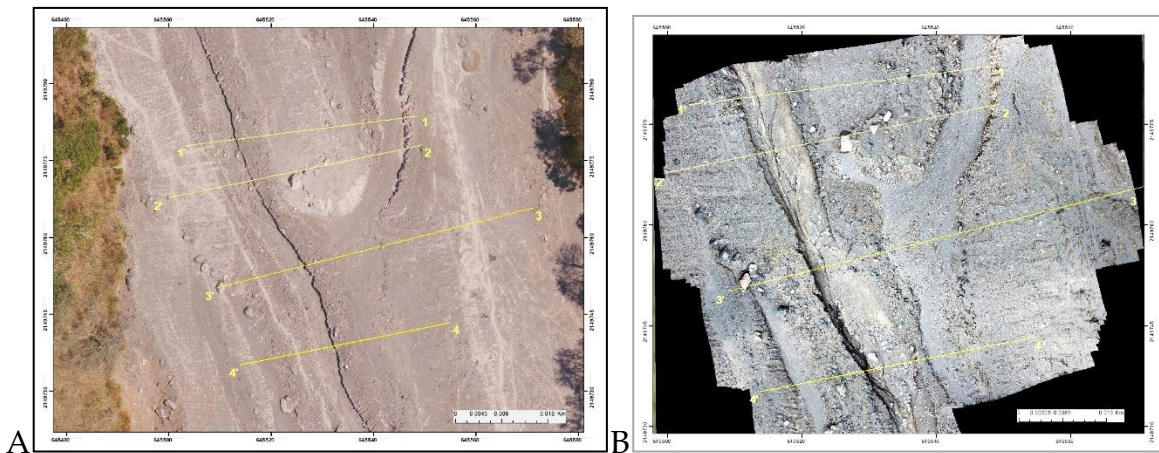


Figura 5.22. A) mayo 2017, se aprecian dos canales que se bifurcan formando uno solo. B) noviembre 2017, Se aprecia un canal principal bien definido al oeste de la barranca el cual media casi 2 metros de profundidad.

En las dos primeras secciones se observó la presencia de un canal principal en la porción derecha de la barranca que se formó en el año 2015. Tenía una profundidad de ~50 a 90 cm y una anchura de 8 metros.

En la parte central de la sección se puede observar una elevación de 3 metros de altura, constituida por el material del flujo piroclástico del 2015, el cual se erosionó únicamente en los costados derecho e izquierdo.

Desde agosto a noviembre del 2015 se observa que domina la sedimentación. Por el contrario, después de la temporada de lluvia del 2017, se observa un proceso erosivo dominante, con la formación de dos canales laterales de menos de 1 m de profundidad, y flanqueado por terrazas de neoformación. Este proceso es más evidente en la sección 2, en donde se aprecia cómo desde el 2015 se estabilizan dos canales principales erosionados en los depósitos de flujo piroclástico. En noviembre 2015, el canal derecho medía más de un metro de profundidad y más de 5 m de ancho, sin embargo, se redujo durante la temporada 2017 por una migración hacia su porción interior por la construcción de terrazas hacia su porción externa; por el contrario, el canal izquierdo se fue rellenando progresivamente (Fig. 5.23 y 24.)

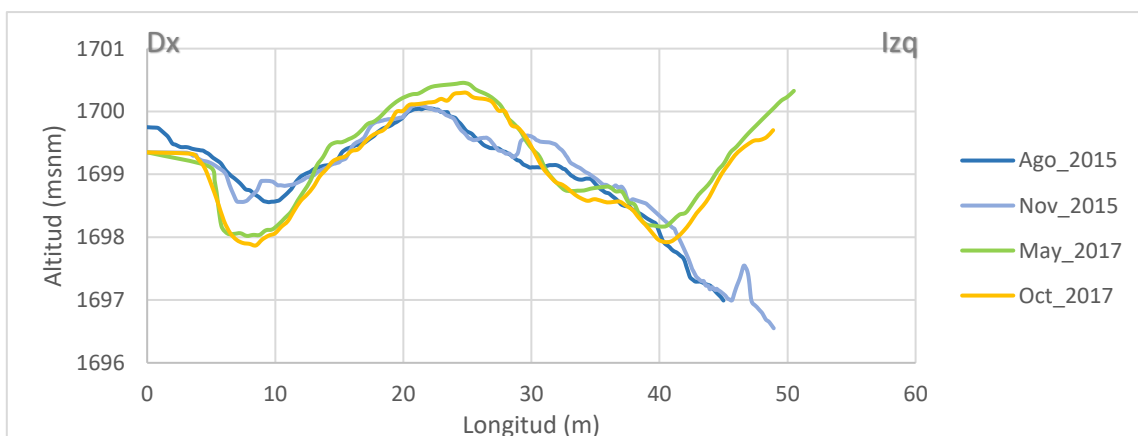


Figura 5.23. Sección 1 de la zona distal de la barranca Montegrando MG1722 en donde se aprecian los cambios morfológicos durante el periodo de agosto 2015 a octubre 2017

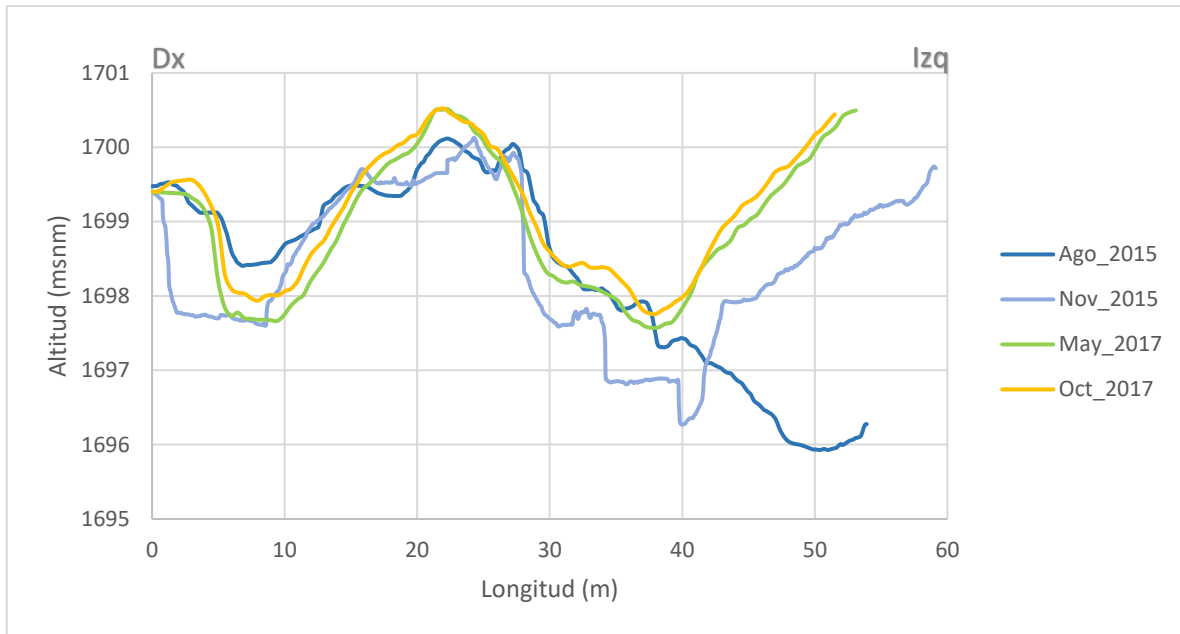


Figura 5.24. Sección 2 de la zona distal de la barranca Montegrando MG1722 en donde se aprecian los cambios morfológicos durante el periodo de agosto 2015 a octubre 2017

El tercer perfil muestra que en el año 2015 había solo un canal principal hacia su porción derecha. En agosto de ese año el canal, tenía una profundidad de 50 cm y en noviembre aumentó su profundidad a 150 cm. A su vez, la porción izquierda del canal muestra una zona más deprimida en comparación con la porción central derecha. En mayo del 2017, el canal principal se rellenó y migro 20 metros a la derecha y se rellenó ~2.5 metros (Fig. 5.24).

Finalmente, en octubre del mismo año se aprecia que predominaron los procesos erosivos. El canal principal se hizo un metro más profundo y se observó la presencia de una terraza en su interior. A su vez, se formó un pequeño canal secundario a la izquierda del canal principal de ~1.20 metros de profundidad y ~4 metros de anchura (Figuras 5.24 y 5.25).

En el año 2015, había un canal principal y en el mes de noviembre, eventos erosivos socavaron el canal 50 cm más y hubo acumulación de 50 cm de material en las porciones laterales (Fig. 5.24).

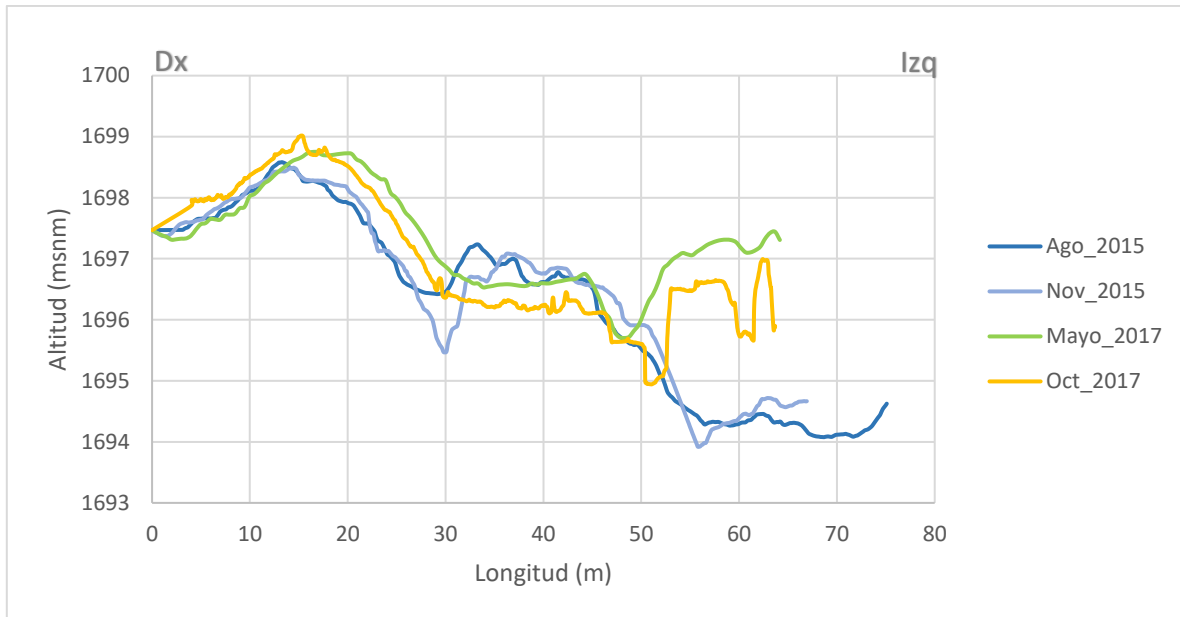


Figura 5.25. Sección 3 de la zona distal de la barranca Montegrande MG1722 en donde se aprecian los cambios morfológicos durante el periodo de agosto 2015 a octubre 2017

En el transcurso del año 2016 y 2017 se aprecia que los procesos erosivos tuvieron mayor incidencia en esta parte de la barranca ya que, en la porción derecha del perfil los flujos removieron ~2 metros de material, mientras que en la porción izquierda se formó un canal de 90 cm de profundidad flanqueado por una terraza de neoformación

Cabe destacar que, en octubre del 2017, el canal principal aumentó en profundidad ~70cm más, formando pequeñas terrazas en su interior. A su vez, el canal secundario aumentó ~60 cm su profundidad y medía 10 metros de ancho (Figuras 5.25 y 5.26).

5.2.3 Abanico

Finalmente, se trazaron secciones transversales sobre el depósito de abanico que se ha formado a partir de los eventos de lahar y del depósito de flujo piroclástico de julio de 2015; sin embargo, con base en las observaciones hechas en campo, el depósito presentó modificaciones antrópicas durante los años 2016 y 2017 ya que,

en algunas zonas el material había sido removido con maquinaria para usos industriales.

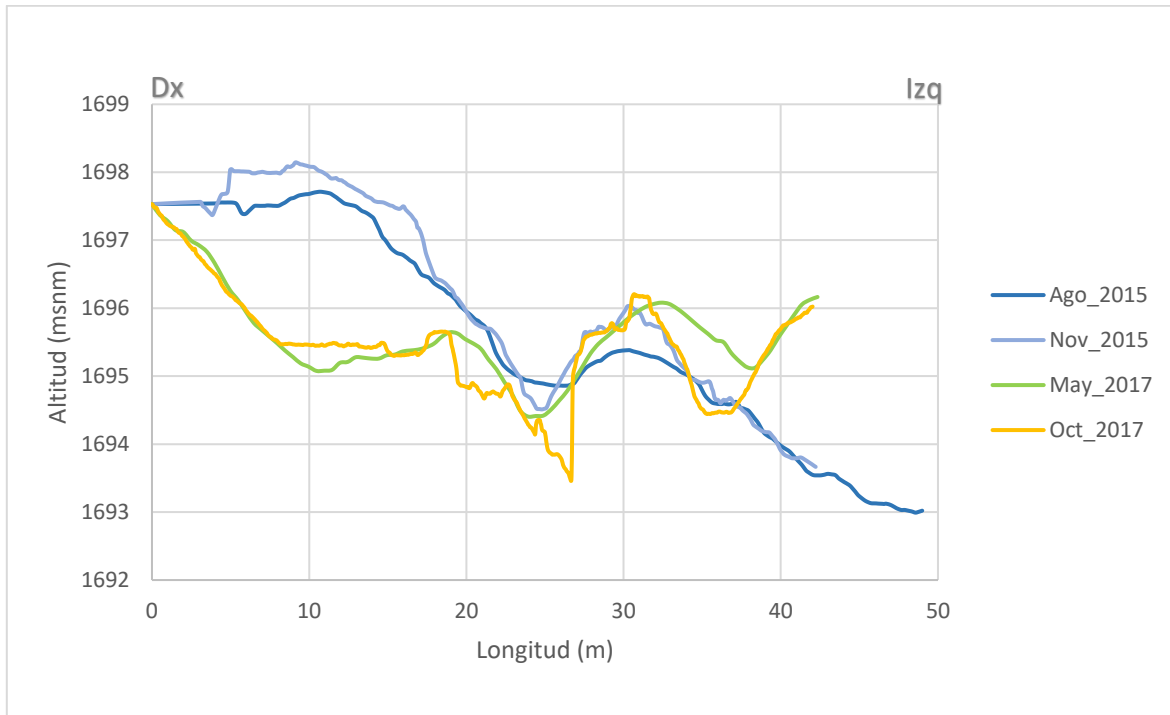


Figura 5.26. Sección 4 de la porción distal de la barranca Montegrande MG1722 en donde se aprecian los cambios morfológicos durante el periodo de agosto 2015 a octubre 2017

También, formaron un canal en medio del depósito para contener los lahares que ocurrieran en la barranca. Estas modificaciones se logran apreciar en algunas de las secciones transversales que se tomaron de dicho lugar.

En el año 2015, posterior a la erupción de julio, el depósito presentaba una morfología rugosa, con diversas acanaladuras y elevaciones menores resultado del depósito de material de flujos piroclásticos; en cambio, en el año 2017 se observa una superficie completamente aplanada y sin ningún rasgo o indicador morfológico producido por lahares (Figuras 5.27 a 29).

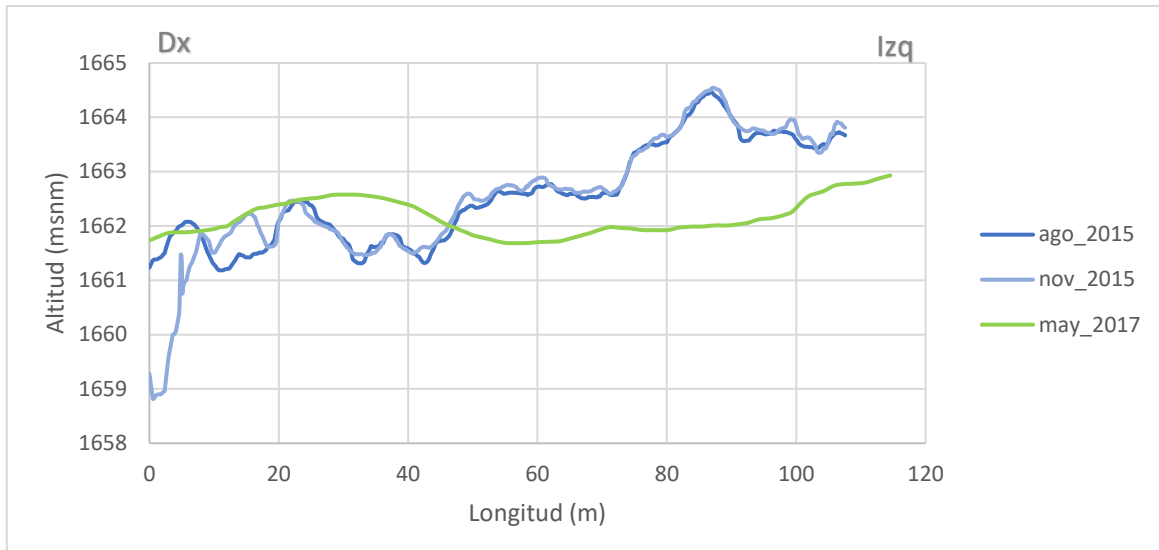


Figura 5.27. Sección 1 de la porción depósito de abanico de la barranca Montegrande en donde se aprecian los cambios morfológicos durante el periodo de agosto 2015 a mayo 2017

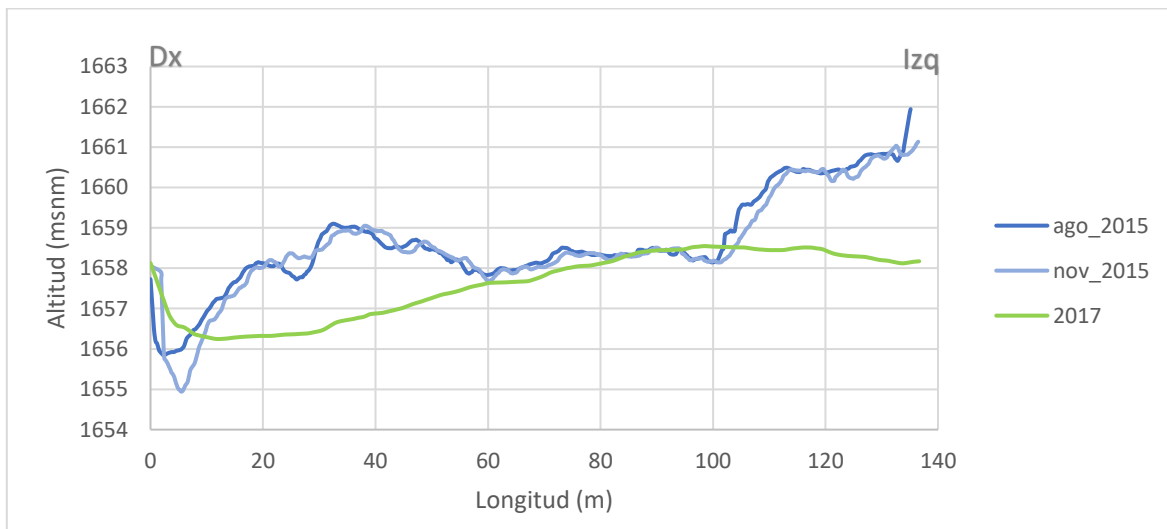


Figura 5.28. Sección 2 de la porción depósito de abanico de la barranca Montegrande en donde se aprecian los cambios morfológicos durante el periodo de agosto 2015 a mayo 2017.

A partir de las observaciones previamente hechas, en la temporada de lluvia del año 2016 predominaron los procesos acumulativos en la porción media de la barranca. Por otro lado, en el año 2017, predominaron los procesos erosivos y se observó la formación de dos canales con más de 2 metros de profundidad y, en algunas zonas, con más de 5 metros de ancho.

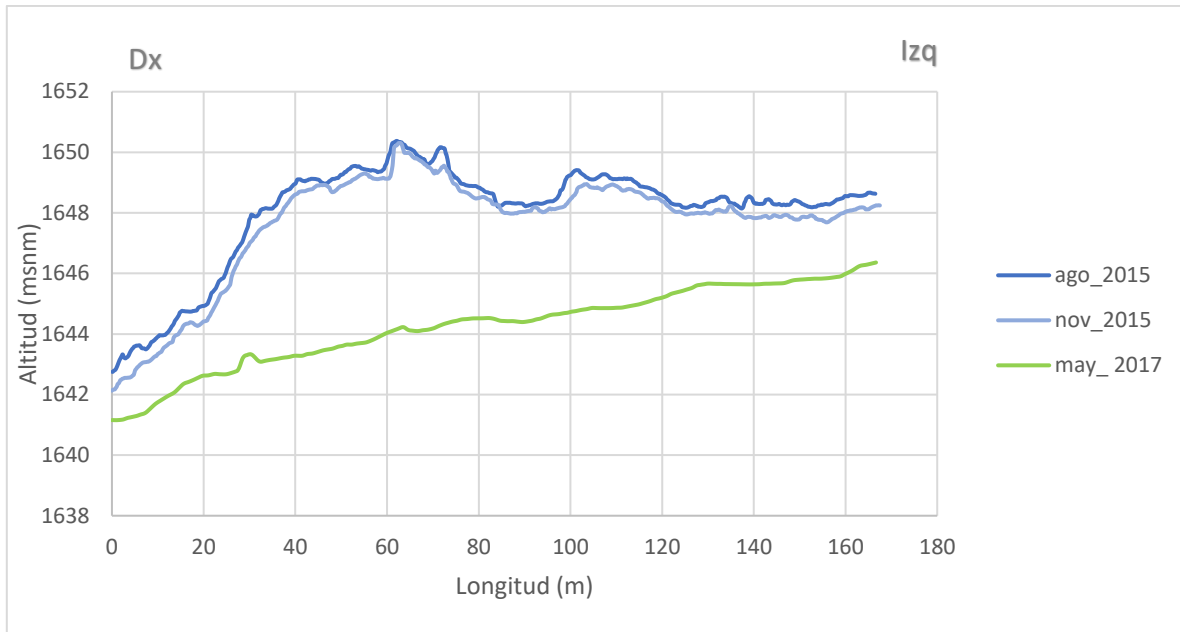


Figura 5.29. Sección 1 de la porción depósito de abanico de la barranca Montegrande en donde se aprecian los cambios morfológicos durante el periodo de agosto 2015 a mayo 2017

Esto fue resultado de las precipitaciones intensificadas por la presencia de eventos hidrometeorológicos que pasaron muy cerca del estado de Colima. A su vez, esto se refleja en el aumento de la ocurrencia de lahares en ese año (Tabla 5.1, Figs. 5.30 a 5.32).

En la zona de desembocadura, se pudo observar que en octubre del 2015 aumentaron los procesos erosivos debido a la entrada del huracán Patricia en el estado de Colima, el cual aportó una gran cantidad de agua a la barranca y ocasionó la formación de 2 lahares de grandes magnitudes.

Durante el año 2016 y la primera mitad del 2017, hubo procesos acumulativos que rellenaron la barranca. A pesar de que en el año 2016 hubo mayor cantidad de lahares, no fueron de magnitudes suficientemente grandes para arrastrar cantidades significativas de material que modificaran la morfología del canal; sin embargo, en el año 2017 predominaron los procesos erosivos, favoreciendo la formación de dos canales principales (Figs. 5.33 a 5.37).

El monitoreo morfológico muestra una tendencia a la deposición hasta la segunda mitad del año 2016. A finales del 2016 y durante el año 2017, predominaron los procesos erosivos, hubo mayor cantidad de eventos de lahar y se formaron canales estables que condicionan la trayectoria de los flujos futuros

Tabla 5.1. Resumen de los cambios morfológicos de la barranca media MG1710.

Contexto				
Periodo	Lluvia Acumulada (mm)	Eventos HM	Lahares	Amplitud Acumulada (cm/s)
Agosto- Diciembre 2016	845.4	Earl, Javier, Newton	15	0.42
Diciembre 2016- Marzo 2017	34.8	N/A	N/A	N/A
Marzo - Octubre 2017	1069	Dora, Pilar, Lidia y Katia	20	0.49
Octubre - Noviembre 2017	102.2	N/A	N/A </td <td>N/A</td>	N/A

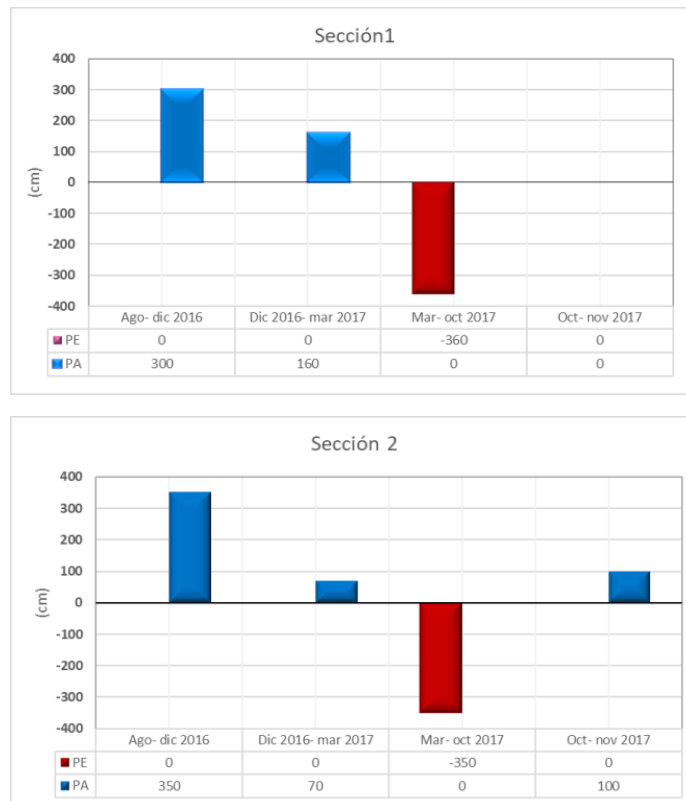


Figura 5.30. Sección 1 y sección 2: Se puede observar que en el año 2016 predominó la sedimentación y en el año 2017 predominaron los procesos erosivos y hubo mayor cantidad de lahares.

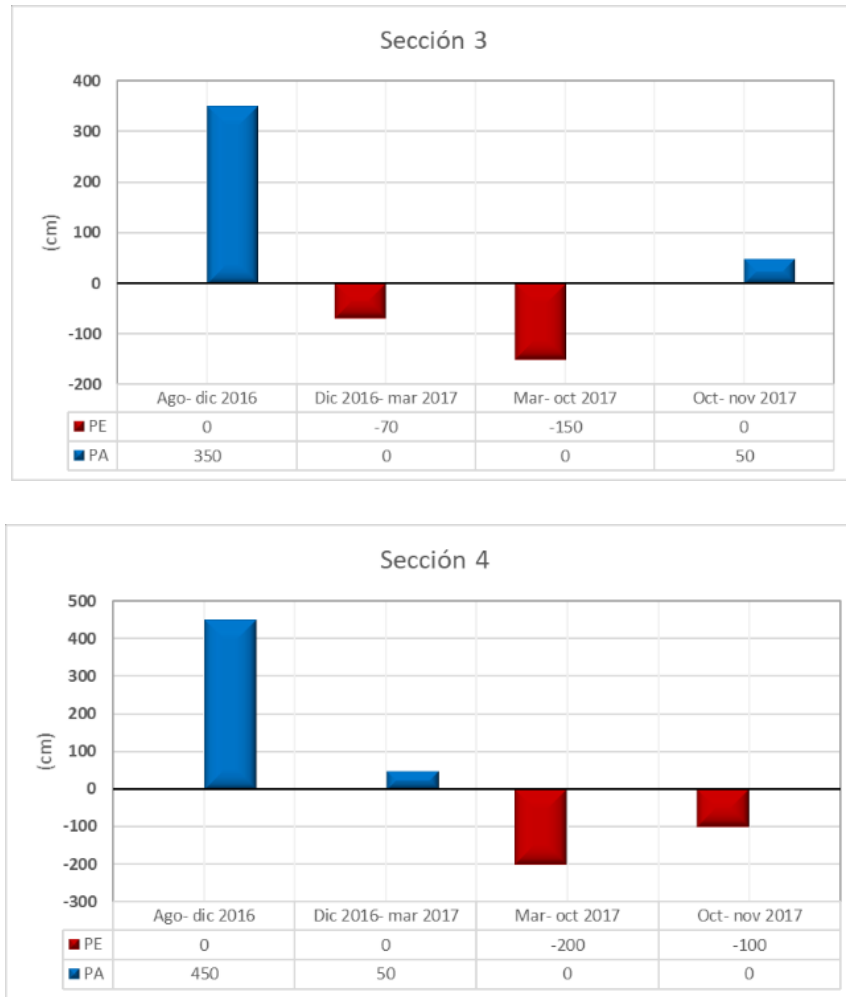


Figura 5.31. Sección 3 y sección 4: Se puede observar que en el año 2016 predominó la deposición y en el año 2017 predominaron los procesos erosivos y hubo mayor cantidad de lahares.

Tabla 5.2. Resumen de los cambios morfológicos de la barranca media MG1712.

Contexto				
Periodo	Lluvia Acumulada (mm)	Eventos HM	Lahares	Amplitud Acumulada (cm/s)
Agosto - Diciembre 2016	996.4	Earl, Javier, Newton	15	0.42
Diciembre 2016- Octubre 2017	1095.9	Dora, Pilar, Lidia y Katia	20	0.49
Octubre- Noviembre 2017	102.2	N/A	N/A	N/A

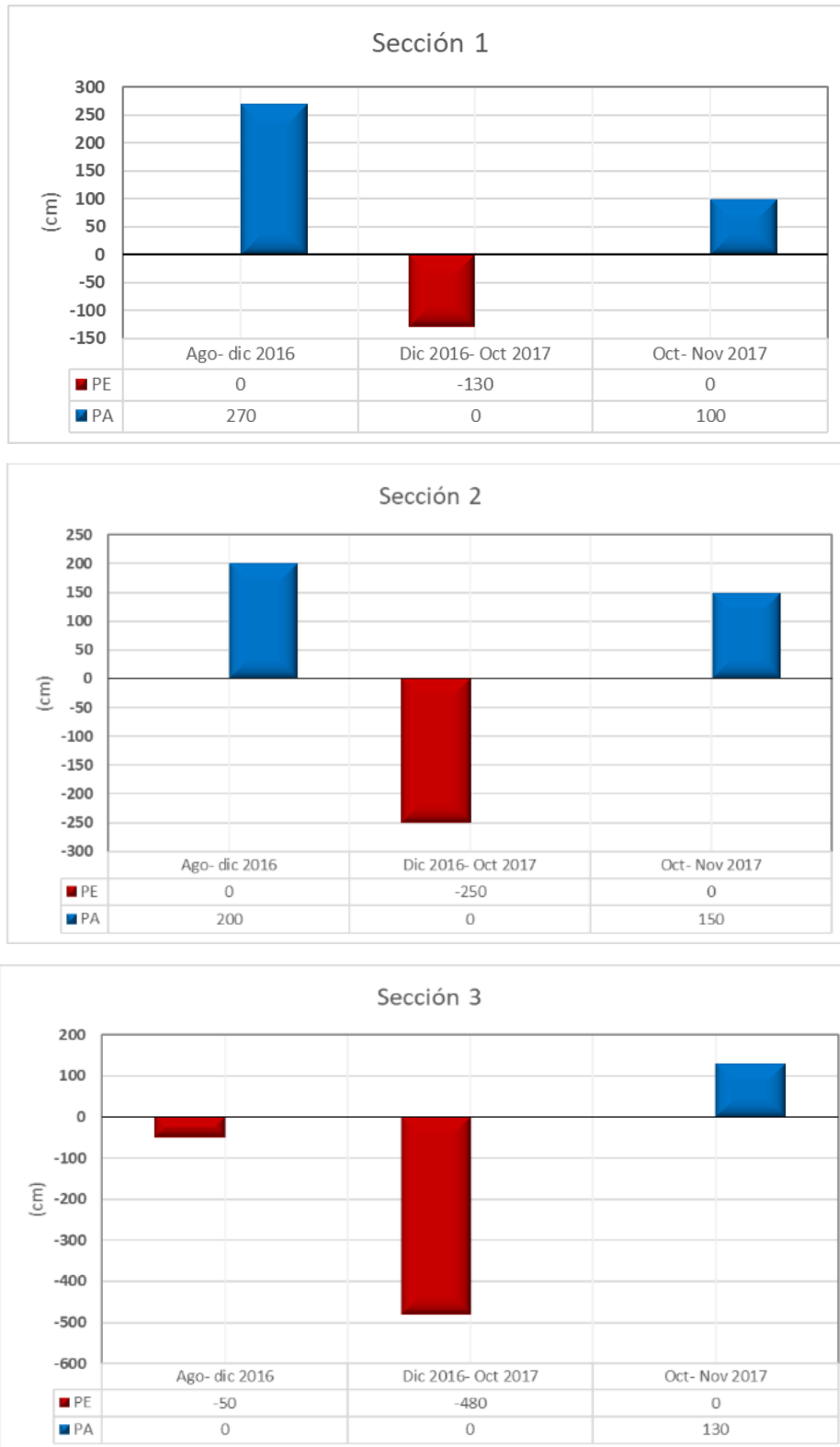


Figura 5.32. Secciones 1 a 3: Se puede observar que en el año 2016 predominó la deposición y en el año 2017 predominaron los procesos erosivos y hubo mayor cantidad de lahares.

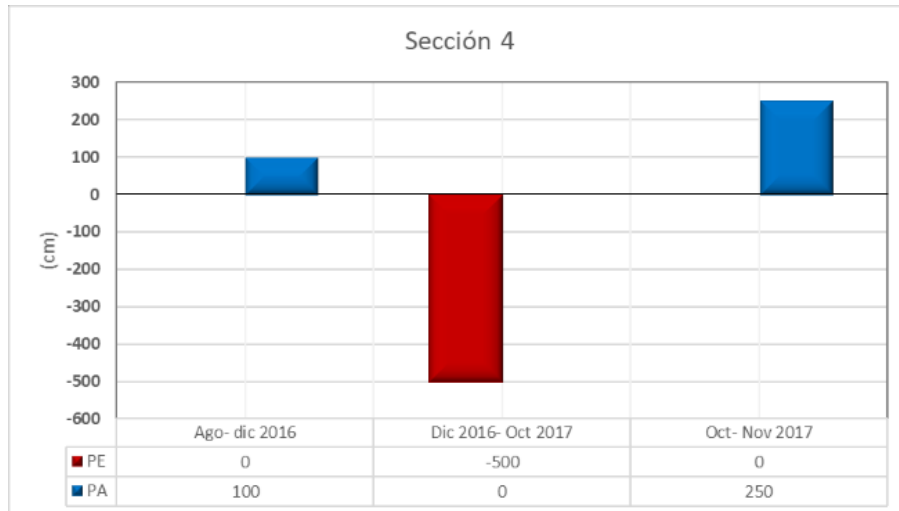


Figura 5.33. Sección 4: Se puede observar que en el año 2016 predominó la deposición y en el año 2017 predominaron los procesos erosivos y hubo mayor cantidad de lahares.

Tabla 5.3. Resumen de los cambios morfológicos de la barranca distal MG1721.

Contexto				
Periodo	Lluvia Acumulada (mm)	Eventos HM	Lahares	Amplitud Acumulada (cm/s)
Mayo- Octubre 2017	1061.1	Dora, Pilar, Franklin, Lidia y Katia	20	0.49



Figura 5.34. Secciones 1 a 3: Se puede observar que en el año 2017 predominaron los procesos erosivos y hubo mayor cantidad de lahares.

Tabla 5.4. Resumen de los cambios morfológicos de la barranca distal MG1722.

Contexto				
Periodo	Lluvia Acumulada (mm)	Eventos HM	Lahares	Amplitud Acumulada (cm/s)
Agosto- Noviembre 2015	816.6	Patrice	9	0.11
Noviembre 2015- Mayo 2017	1511.6	Earl, Javier, Newton	30	0.7
Mayo- Octubre 2017	1061.1	Dora, Pilar, Franklin, Lidia y Katia	20	0.49

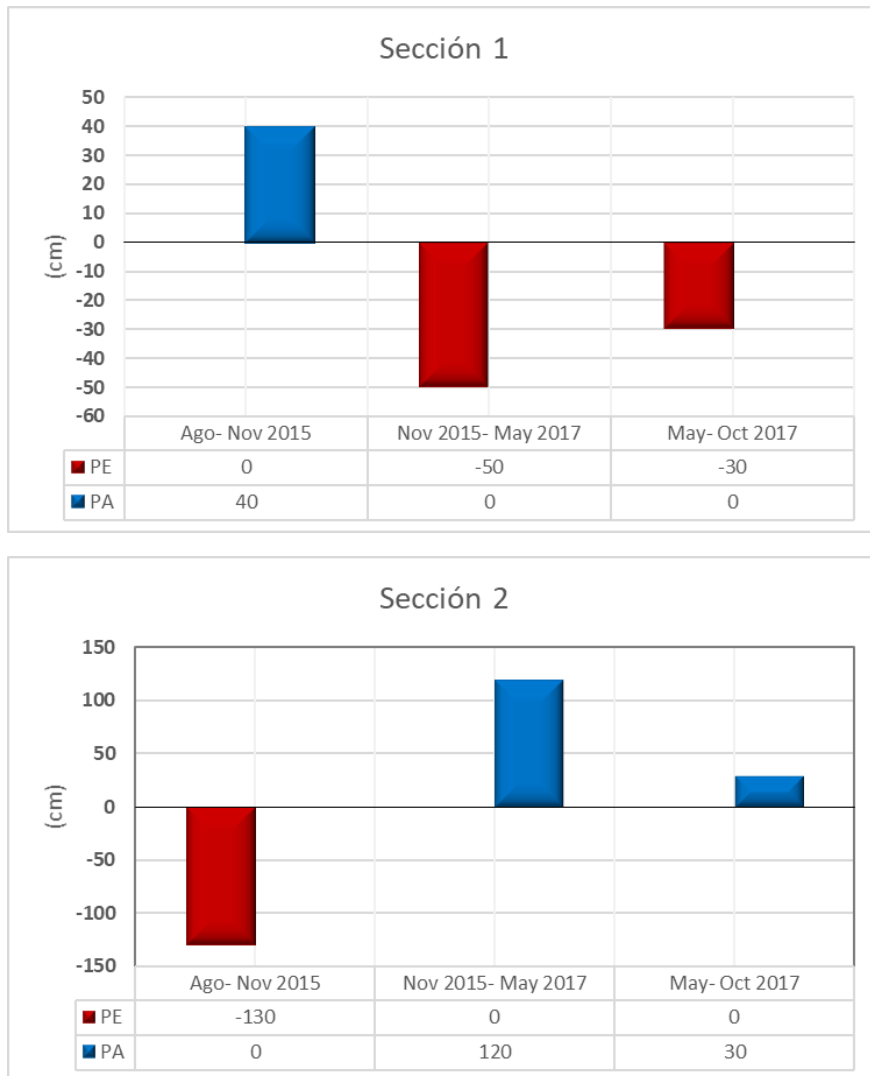


Figura 5.35. Sección 1 y sección 2: Se puede observar que en el año 2015 y 2017 predominaron los procesos erosivos.

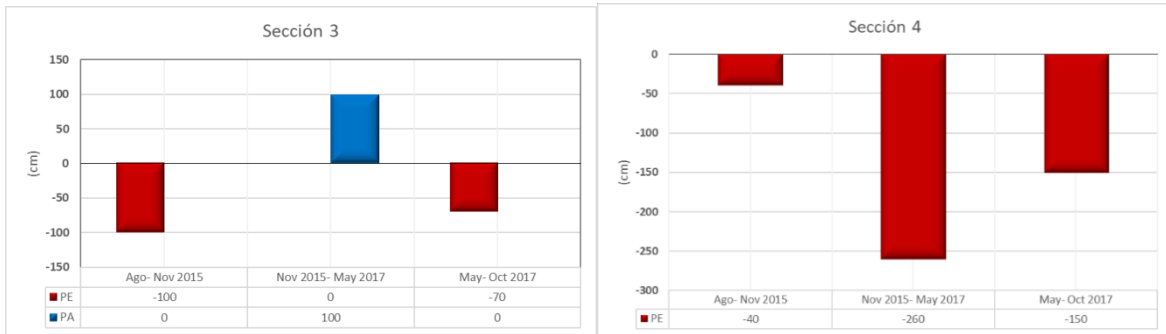


Figura 5.36. Sección 3 y sección 4: Se puede observar que en el año 2015 y 2017 predominaron los procesos erosivos.

Tabla 5.5. Resumen de los cambios morfológicos del depósito de abanico.

Contexto				
Periodo	Lluvia Acumulada (mm)	Eventos HM	Lahares	Amplitud Acumulada (cm/s)
Agosto- Noviembre 2015	816.6	Patricia	9	0.11
Noviembre 2015 - Mayo 2017	1506.8	Earl, Javier, Newton	30	0.7

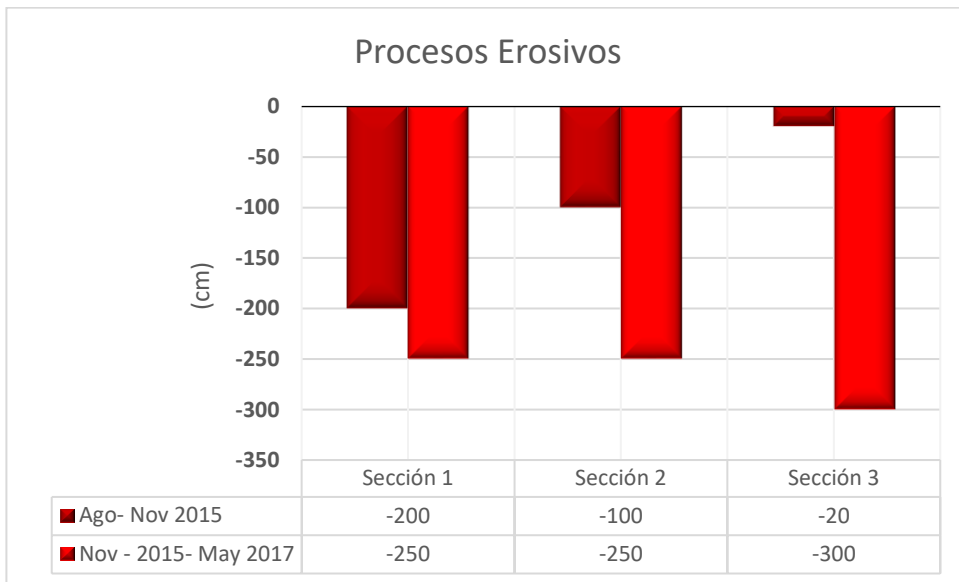


Figura 5.37. Sección 1 a 3: Se puede observar que en el año 2015 y 2017 predominaron los procesos erosivos.

CAPITULO VI. DISCUSIÓN

Este trabajo de investigación se enfocó en el estudio de la evolución morfológica que ha sufrido la barranca Montegrando a partir de la erupción de julio del 2015 hasta el 2017. Se abordaron tres temáticas principales: 1) Análisis de la temporada de precipitación de los tres años de estudio, 2) Caracterización de los lahares ocurridos durante las temporadas de lluvia 2015-2017 mediante señales sísmicas, y 3) Monitoreo de los cambios morfológicos por procesos erosivos y deposicionales generados por lahares post-eruptivos.

6.1. Precipitación del periodo 2015 a 2017 en la barranca Montegrando.

En zonas tropicales, los lahares se presentan con más frecuencia en la temporada de precipitaciones (Lavigne y Suwa, 2004; Jones et al., 2017). Los factores involucrados en el momento en que una lluvia desencadena un lahar son la distribución de la lluvia, la intensidad, su duración, las características morfológicas del drenaje y la disponibilidad de sedimentos (Lavigne et al., 2000a). Particularmente se observó que la frecuencia de lahares post-eruptivos en volcanes como el Merapi, Mayon, Pinatubo, Ruapehu y algunos volcanes de México que han sido monitoreados tales como el Popocatépetl, Citlaltépetl y el Volcán de Fuego de Colima, depende principalmente de la intensidad y duración total de la lluvia (Thouret y Lavigne, 2000; Lavigne y Thouret, 2002; van Westen y Daag, 2005, Rodriguez et al., 2006; Barclay et al., 2007, Capra et al., 2010; Tanarro et al., 2010; Berguer et al., 2011; Pierson y Major, 2014; Vázquez et al., 2014; Vazquez et al., 2016; Capra et al., 2018).

El rango de intensidad promedio que se observó en las precipitaciones de estos años, osciló entre 8.74 mm /hr y 49 mm/hr en eventos con duración de 1 hora. En el

mes de marzo se registró un evento extraordinario con una duración de 4 días, durante el cual se acumularon 351.6 mm, con un valor de intensidad máxima de 27.58 mm cada 5 min.

Al inicio de la temporada de lluvias (jul- ago.) hubo 10 eventos de precipitación, los cuales representan el 62% de las lluvias de ese año. En la segunda parte de la temporada de lluvias (sept - oct), el evento más significativo ocurrió con la entrada del Huracán Patricia. Las lluvias duraron 37 hrs y su intensidad máxima fue de 49.18 mm cada 5 min.

En el año 2016 se acumularon en la zona de estudio 1223 mm de lluvia. Los meses de mayor precipitación fueron julio, agosto y septiembre, los cuales coinciden con la ocurrencia de huracanes y tormentas tropicales. Estas precipitaciones fueron de una duración no mayor a 2 horas, y no se registraron eventos extraordinarios como en el 2015.

En el inicio de la temporada de lluvias, hubo 25 eventos de lluvia con una duración máxima de 1 hr. El rango de precipitación acumulada fue de 9 a 47 mm y presentaron un valor de intensidad máxima entre 21 mm y 137 mm calculada cada 5 min.

En la parte final de la temporada de lluvias ocurrieron 8 eventos de precipitación con una duración máxima de una hora. Estos eventos tuvieron un valor promedio de lluvia acumulada entre 11.4 mm y 25.8 mm y un rango de intensidad máxima que osciló entre los 35 y 142 milímetros cada 5 min.

Finamente, en el año 2017 se registró un valor de precipitación acumulada de 978.6 mm, por lo que fue el año más seco. Las lluvias se concentraron en los meses de julio, agosto y septiembre. Los dos últimos presentaron una mayor precipitación debido a la influencia del paso de huracanes en la región. En los primeros meses de

la temporada de lluvias, se presentaron 15 eventos significativos de lluvia. La cantidad de lluvia acumulada fue de 10 a 31.8 mm y la intensidad máxima osciló entre los 17 y 111 mm cada 5 min. En los meses de agosto a octubre hubo 13 eventos de lluvia significativos, y la intensidad máxima fue de 4 mm a 79 mm calculada cada 5 min (Fig. 6.1.).

Al comparar la distribución de las lluvias acumuladas en los años 2015, 2016 y 2017 se puede observar que el 2015 fue un año extraordinario en cuanto a precipitación con dos eventos extremos (fácilmente observable por la mayor pendiente de la recta en marzo y octubre), mientras que en los años 2016 y 2017 se observa un comportamiento similar entre ellos. Más adelante se hará la comparación con el número de lahares registrados en cada temporada de lluvia para definir una posible correlación con las lluvias acumuladas en cada temporada y su relación con la evolución morfológica de la barranca.

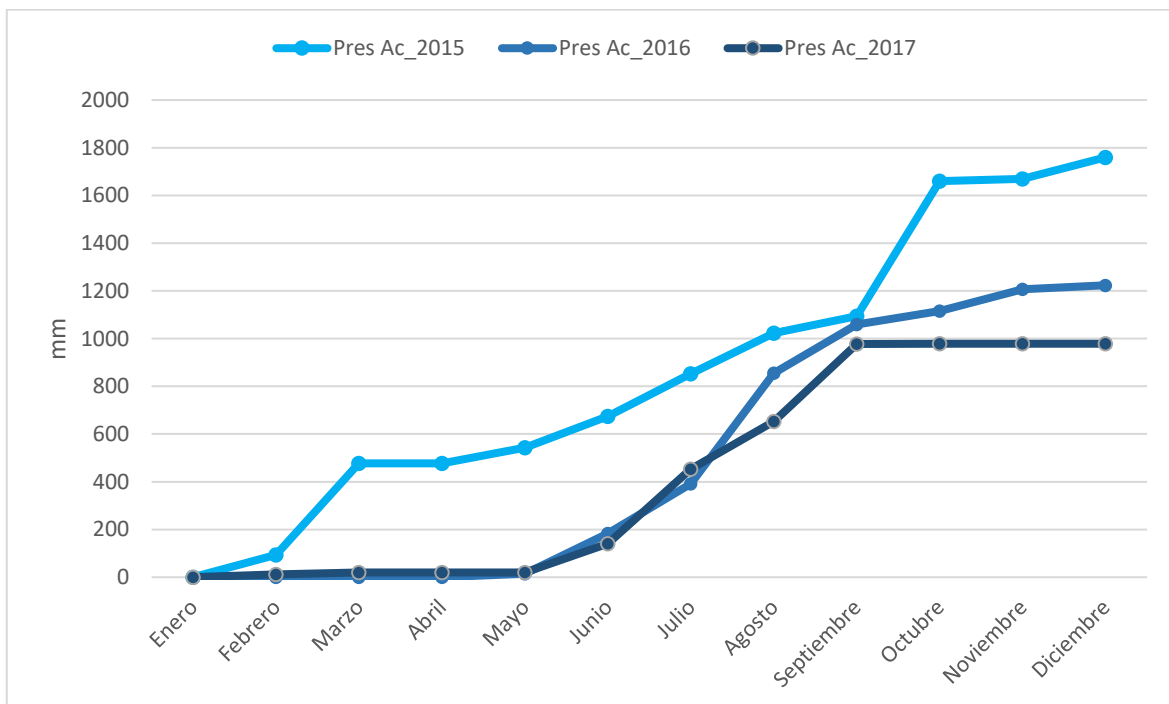


Figura 6. 1. Precipitación acumulada de los años 2015, 2016 y 2017

6.2. Análisis de señales sísmicas para la caracterización de lahares en la barranca Montegrando.

En el análisis de la señal sísmica de los lahares registrados en el periodo 2015-2017, se observó que el frente del lahar se registra dentro del rango de 5 a 30 Hz, mientras que el cuerpo y su porción más diluida de la cola, en frecuencias que oscilan entre los 10 y 50 Hz. Estos valores caen dentro de los reportados por Cole (2011), Vázquez et al. (2016b) y muy cercanos a los reportados por Coviello et al. (2018). Para la discriminación entre un evento fluvial y un flujo hiperconcentrado se utilizó un umbral de amplitud de 10^{-3} m/s (Coviello et al., 2018)

De los tres años estudiados, el 2016 fue el año que presentó mayor número de lahares (25 en 2016; 12 en 2015 y 22 en 2017) (Fig. 6.2). A su vez se pudo constatar que los lahares siempre se presentan en la temporada de lluvias (jun-oct), con excepción del año 2015 en donde se presentó un lahar de magnitud significativa en el mes de marzo (9.8×10^{-2} cm/s) asociado al evento de lluvia extraordinario antes descrito.

En el año 2015 el 92% de los flujos se desencadenaron en los meses correspondientes a la temporada de lluvias (julio a octubre). A su vez, el 82% (9 eventos) de los lahares se presentaron al inicio de la temporada de lluvias (jun- ago.) y fueron eventos de pulso único (SPE: *Single Pulse Event*) y el 10 % (2 eventos) restante en el mes de octubre y fueron de tipo multipulso.

Este comportamiento en la ocurrencia de lahares post eruptivos se ha observado en la barranca Montegrando desde antes de la erupción del 2015. Vázquez et al. (2016a) estudiaron a detalle un lahar que ocurrió el 15 de septiembre del 2012, el cual se desencadenó con por una precipitación de 20 min de duración y una intensidad de 95 mm/hr y 20 mm de lluvia acumulada. Este lahar duró 40 min y tuvo

una amplitud máxima arriba del umbral de 10^{-3} cm/s, por lo tanto, presenta las características típicas de los flujos que ocurren durante eventos de lluvia estacional en el Volcán de Colima.

A su vez, Tanarro et al. (2010) observaron un comportamiento similar en el volcán Popocatepetl en donde en la barranca Huiloac, los lahares ocurren durante el inicio de la temporada de lluvias con valores <30 mm de lluvia acumulada y los flujos son más frecuentes al inicio de la temporada de lluvias, tal como ocurre en Colima.

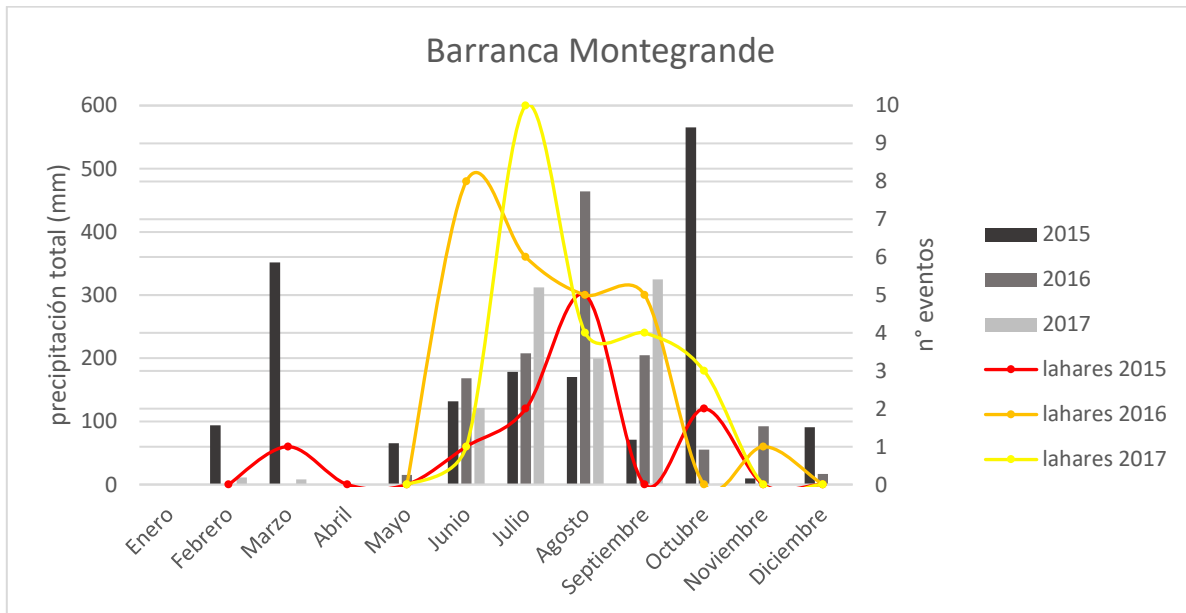


Figura 6.2. Distribución de la precipitación y del número de lahares durante los años 2015, 2016 y 2017.

En el año 2016, todos los eventos de lahar se presentaron dentro de la temporada de lluvia. El 76% ocurrieron en el periodo inicial de la temporada, de los cuales 17 fueron de un solo pulso y dos de tipo multipulso; el 24 % restante ocurrieron en los últimos meses (sept- oct): 5 lahares fueron de un solo pulso y uno, de tipo multipulso. Se identificaron 7 eventos significativos con magnitudes arriba de 4×10^{-2} cm/s y con una duración de 1 a 2 horas. Estos lahares ocurrieron justo en

los días en que 3 huracanes aportaron una gran cantidad de humedad a la región (ver capítulo 4).

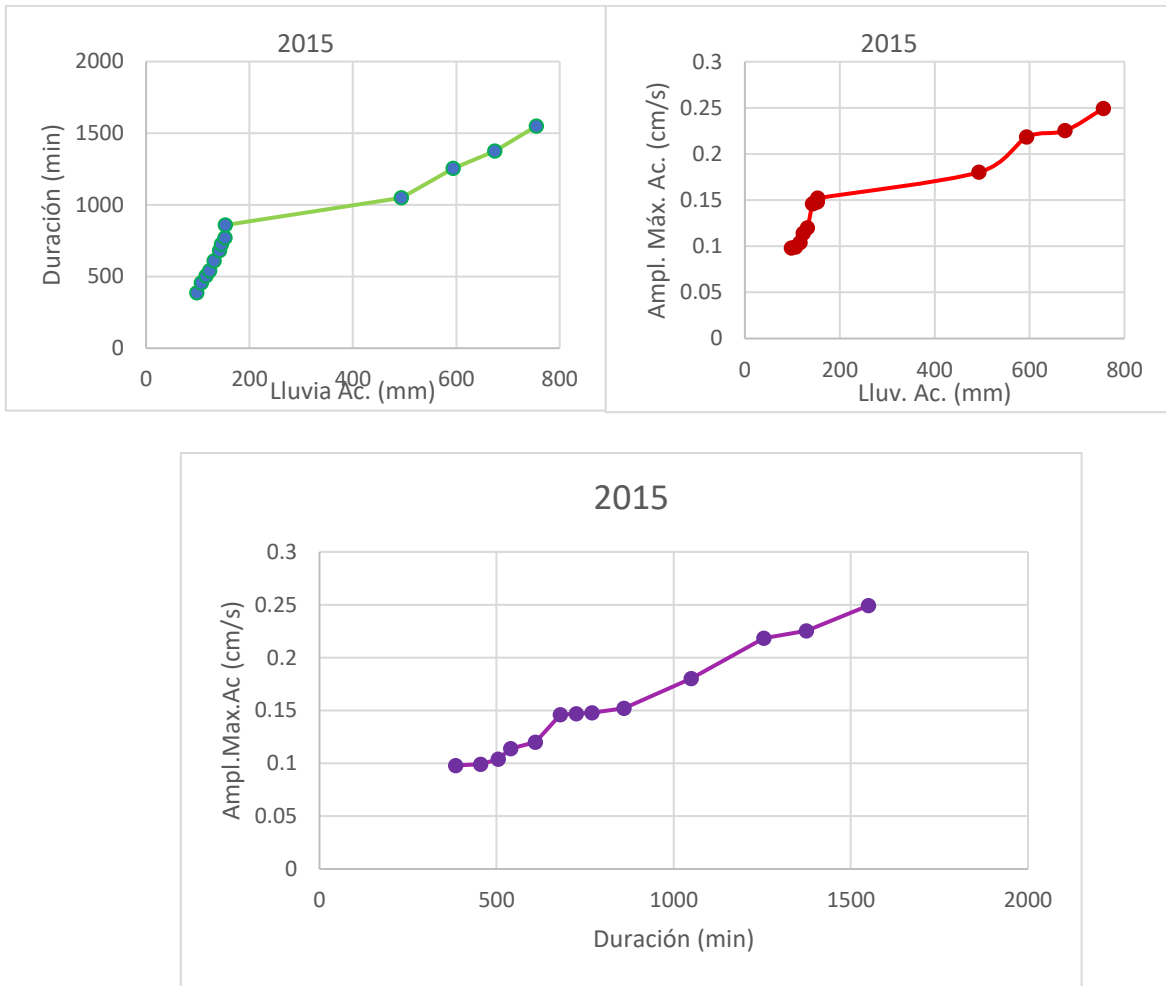


Figura 6.3. Diagramas que muestran la relación entre lluvia acumulada, amplitud máxima y duración de los eventos de lahar del año 2015

Sin embargo, con base en los datos registrados para el 2016 se puede observar que, a diferencia del 2015, durante este año los eventos registrados tuvieron características muy similares, mostrando una relación casi lineal entre la amplitud, la duración y la cantidad de lluvia acumulada (Figs. 6.3 y 6.4), aunque la duración total fue mucho mayor respecto al 2015.

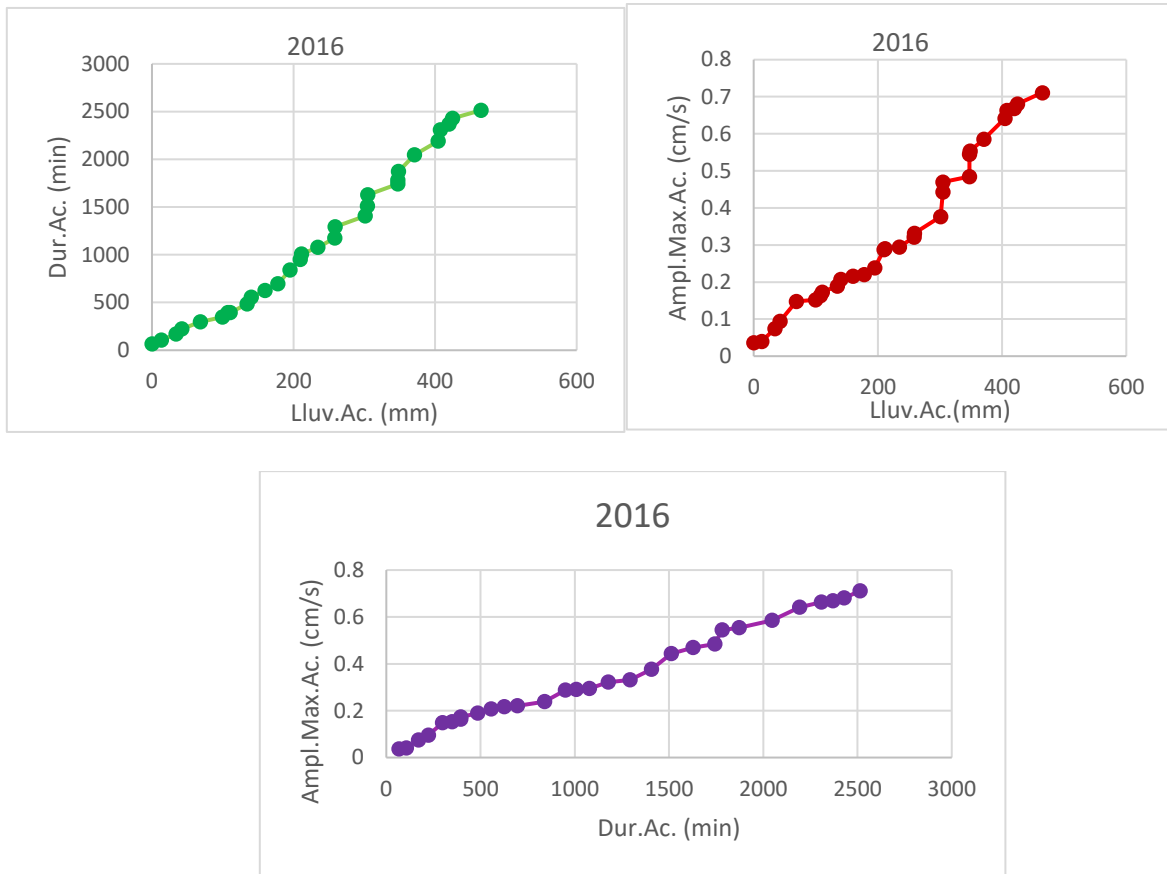


Figura 6.4. Diagramas que muestran la relación entre lluvia acumulada, amplitud máxima y duración de los eventos de lahar del año 2016

En el año 2017, de la misma forma que en los años anteriores, los eventos de lahar se presentaron únicamente en la temporada de lluvias. El 68 % se presentaron de junio a agosto, de los cuales 10 fueron de un solo pulso y 5 de tipo multipulso. En la parte final de la temporada (sept- oct) únicamente el 32% de los de los lahares ocurrieron en estos meses: 6 fueron de tipo unipulso y uno de un solo pulso; Sin embargo, hubo tres eventos que tuvieron los valores de amplitud más altos ($> 3 \times 10^{-2}$ cm/s): el lahar del 3 julio, 8 de septiembre y 20 de octubre.

Al analizar las gráficas de los valores acumulados de duración amplitud y lluvia se puede observar un comportamiento intermedio entre el 2015 y el 2016, con una tendencia gradual al principio de la temporada de lluvia, lo que apunta a

eventos similares de corta duración y baja amplitud (eventos unipulso) a eventos más esporádicos, pero de mayor magnitud y duración. La duración total acumulada es muy similar a la registrada para el 2016 (Fig. 6.5).

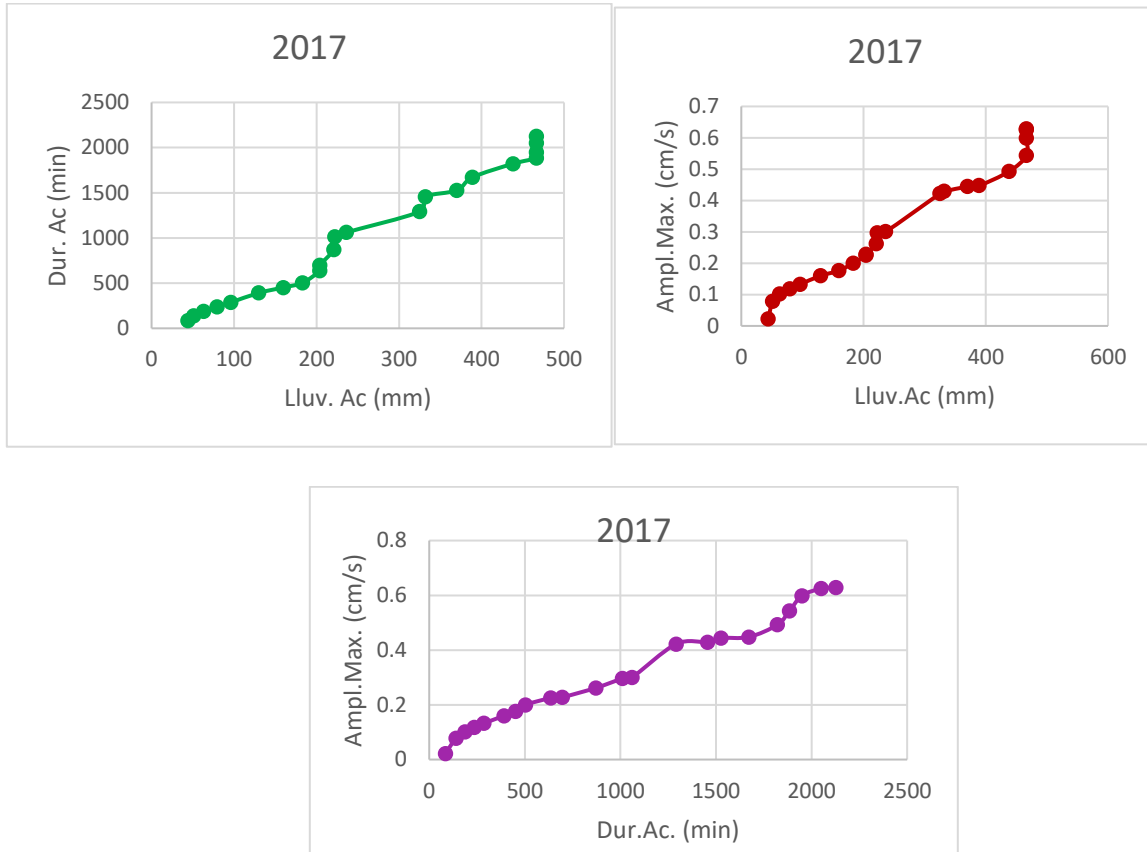


Figura 6.5. Diagramas que muestran la relación entre lluvia acumulada, amplitud máxima y duración de los eventos de lahar del año 2017

En la figura 6.5, se puede observar que en el año 2015 únicamente hubo 4 eventos de amplitudes mayores los cuales fueron de más de 1 hr de duración y de tipo multipulso. En el año 2016 (Fig. 6.6) la distribución de eventos fue más homogénea durante el año con respecto a la magnitud y duración de los lahares. La mayoría alcanzaron magnitudes por debajo de 3×10^{-2} cm/s y duraciones por debajo de los 120 min. Hubo 4 eventos que superan los 4×10^{-2} cm/s, uno de ellos fue un lahar de tipo multipulso. Se observa que hubo un incremento en la cantidad de

precipitación en la parte final del año (sept- oct-nov), y los lahares también aumentaron ligeramente su magnitud.

En el año 2017 se presentó un comportamiento similar al del año 2016, sin embargo, los eventos multipulso presentan mayores amplitudes ($> 3 \times 10^{-2}$ cm/s) a lo largo del año. Se observa que hubo una constancia en la ocurrencia de eventos en los meses de junio y julio. En el mes de agosto bajó, pero de septiembre a noviembre ocurrieron lahares de magnitudes mayores.

A partir de esta información, se puede apreciar que en 2017 hubo más cantidad de lahares de gran tamaño y duración comparado con el 2016. A su vez, existe una relación de los lahares con los eventos de precipitación ya que, cuando se presentan eventos de lluvia de baja intensidad (< 50 mm/hr) y duración (< 1 hr) generalmente se forman lahares de magnitudes bajas ($< 10^{-2}$ cm/s) y de tipo unipulso, y cuando los valores de intensidad y duración de las lluvias aumentan (> 50 mm/hr; > 1 hr respectivamente) los lahares son de magnitudes mayores ($> 10^{-2}$ cm/s) y de tipo multipulso. Esta información concuerda con los valores presentados por Dávila et al., (2007), Saucedo et al., (2008), Capra et al., (2010), Tanarro et al., (2010), Vázquez et al., (2016b) y Capra et al., (2018), y demuestran que, en un volcán activo con gran disponibilidad de sedimentos, la magnitud de un lahar depende de la cantidad de lluvia acumulada (Figs. 6.6 y 6.7).

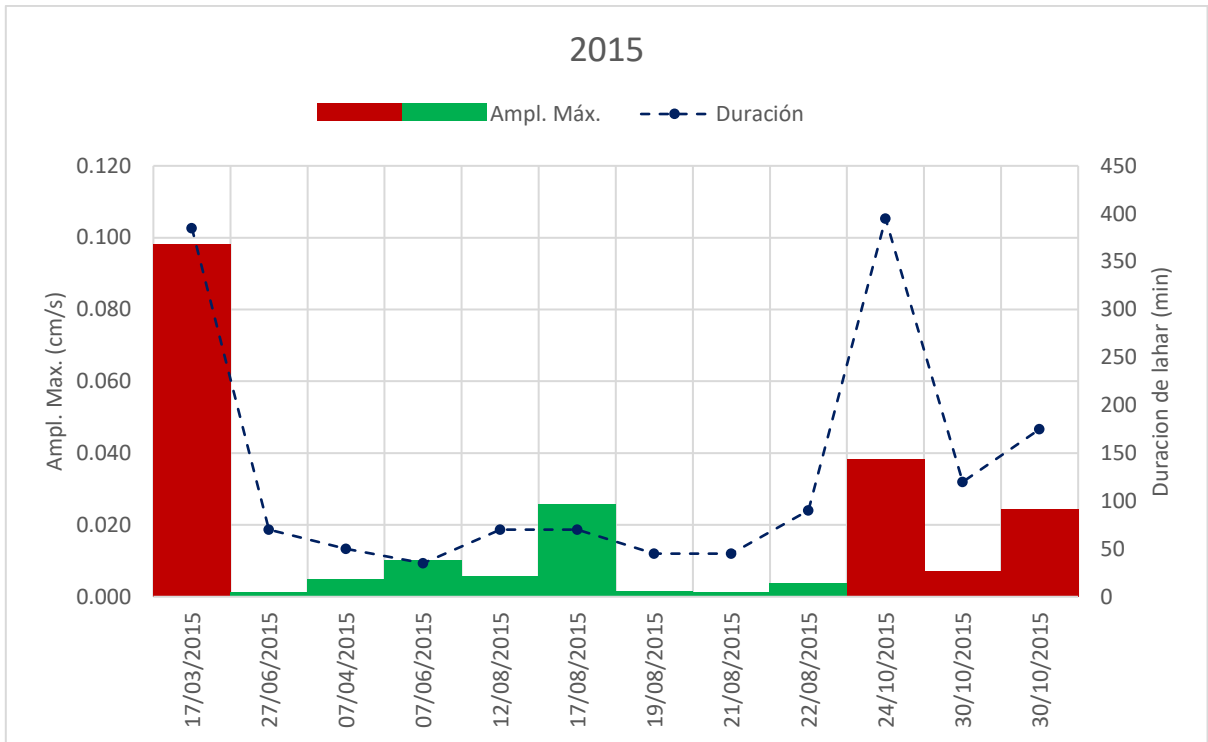


Figura 6.6. Diagrama que muestra la relación entre amplitud máxima y duración de los eventos de lahar del año 2015. Color verde: lahar de un solo pulso, Color Rojo: Lahar multipulso.

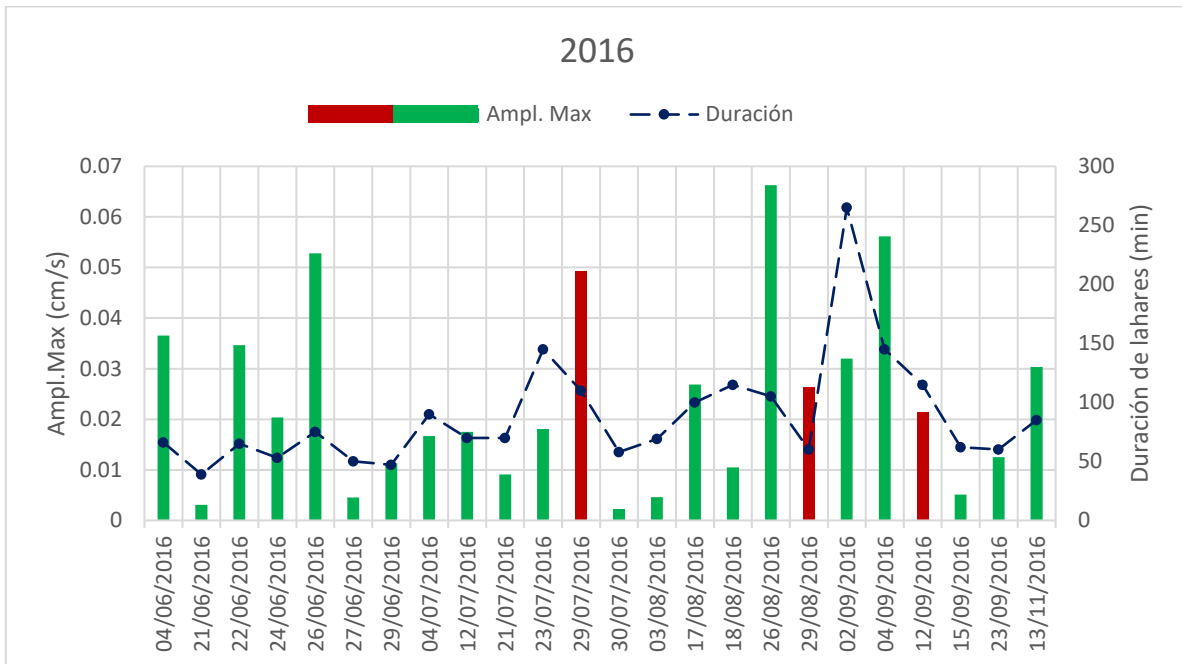


Figura 6.7. Diagrama que muestra la relación entre amplitud máxima y duración de los eventos de lahar del año 2016. Color verde: lahar de un solo pulso, Color Rojo: Lahar multipulso.

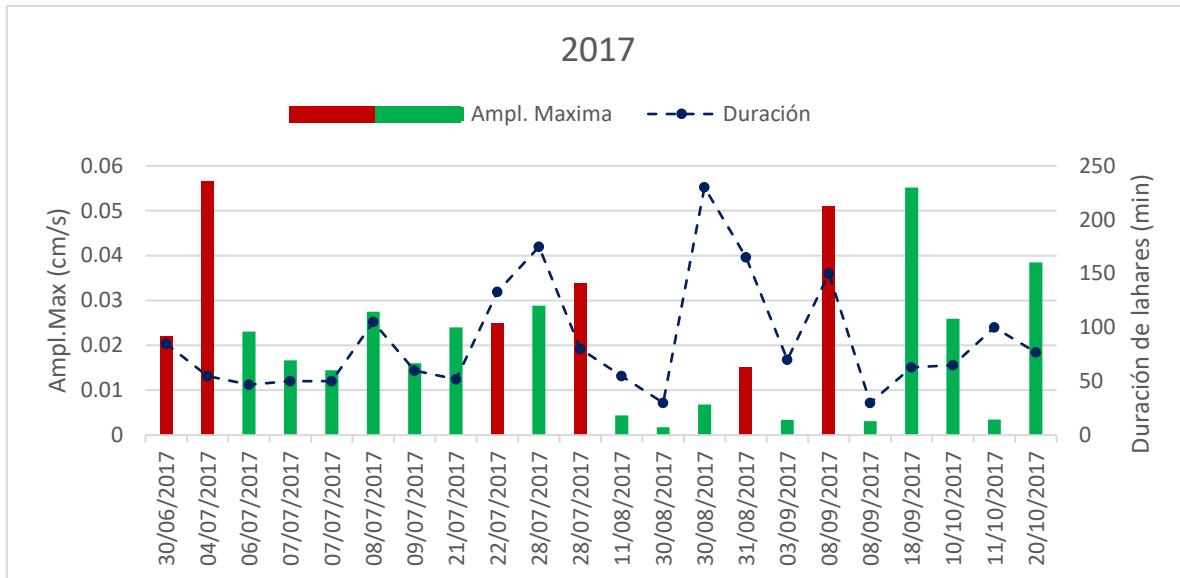


Figura 6.8. Diagrama que muestra la relación entre amplitud máxima y duración de los eventos de lahar del año 2017. Color verde: lahar de un solo pulso, Color Rojo: Lahar multipulso.

6.3 Cambios morfológicos de la barranca Montegrando en el periodo 2015- 2017.

La erupción de julio de 2015 cambió completamente la topografía de la barranca. Se rellenó con espesores de material piroclástico hasta de 17 m en la porción proximal, 25 m en las porciones medias y hasta 10 m en la parte más distal (Ver capítulo 5).

El análisis de los cambios morfológicos de la barranca Montegrando muestra una tendencia hacia procesos deposicionales durante los años 2015 y 2016, tanto en el sector recto como en el sector de curva y a procesos erosivos durante el 2017. En particular, se observa que, en el tramo recto, para el 2016 no se había establecido un canal principal, y a partir del 2017, ya se observan dos canales principales, y se unen en uno solo en la porción de curva. Esta tendencia no se correlaciona con la cantidad de lluvia acumulada para el 2015 (que fue el año más lluvioso) y tampoco con el número elevado de eventos para el 2016, en términos de erosión.

Después del emplazamiento del flujo piroclástico en el 2015, la superficie del canal quedó homogénea, por lo que las escorrentías superficiales no tenían un canal preferencial, lo cual no promovió el transporte ni la acumulación de material en zonas preferenciales. Esta tendencia continúa durante el 2016, y a pesar de que fue el año en que se presentó una mayor cantidad de lahares, éstos fueron de corta duración y baja magnitud (profundidad del flujo < 2 m) para que predominaran procesos erosivos. Anteriormente, Vázquez *et al.* (2016a) observaron que la capacidad erosiva de un lahar depende principalmente de la profundidad del flujo; los flujos unipulso tienen generalmente profundidades inferiores a los 2 m y son principalmente deposicionales en la porción medio-distal de la barranca.

A finales del 2016 comienzan a formarse canales definidos, lo que facilitó durante la temporada de lluvia del 2017 la concentración de los escurrimientos en un canal principal y la formación de flujos de mayor magnitud (profundidad) y con mayor poder erosivo (Fig. 6.9). Este fenómeno fue también descrito por Berguer *et al.* (2011), Schurch *et al.* (2011) y Vázquez *et al.* (2016a), en donde observan mayor capacidad erosiva en flujos de mayor profundidad y con frentes mayores a 2 m, hasta que el canal alcanza una anchura crítica; después de este valor los procesos deposicionales comienzan a dominar y esto da lugar a la formación de terrazas a lo largo del canal.

Con base en estas observaciones, debido al desarrollo incipiente de canales, durante el año 2015 y 2016, los flujos no fueron de magnitudes suficientes para tener frentes mayores a 2 m de altura y por lo tanto los procesos erosivos solo ocurrieron por la acción de escurrimientos en superficie. Sin embargo en el año 2017, una vez establecidos los canales principales, éstos concentraron de manera más eficiente los escurrimientos superficiales con la formación de lahares de mayor magnitud y

mayor profundidad, lo que favoreció a los procesos erosivos (Capra et al., 2010; Vázquez et al., 2016a).

En la desembocadura, se observó un comportamiento muy diferente. La información morfológica analizada muestra que del año 2015 al 2017, los procesos erosivos predominaron y no hubo acumulación de material. Sin embargo, es importante señalar que ésto es debido probablemente a procesos antrópicos, ya que durante estos años se retiró material constantemente para encausar los flujos y evitar daños a las poblaciones cercanas (Fig. 6.10 y 11).

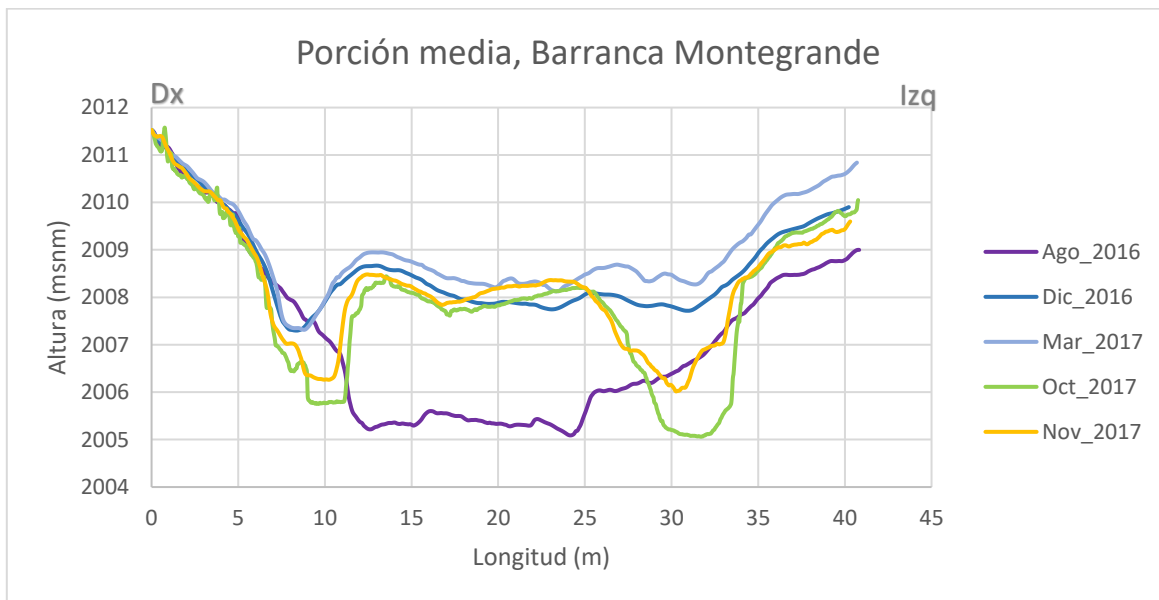


Figura 6.9. Sección transversal de la porción media de la barranca Montegrande, donde se aprecia la formación de los nuevos canales principales en el periodo 2016- 2017

De acuerdo con Vázquez et al., (2016a), y con base en el análisis morfológico de la Barranca de Montegrande antes de que ocurriera la erupción de 2015, se observó que la lluvia acumulada y la disponibilidad de sedimentos fueron parte de los factores fundamentales que influyen en los procesos de erosión y deposición en la barranca Montegrande. Con los datos aquí obtenidos, a raíz de la erupción del 2015 se ha observado una inversión en la tendencia, ya que, aunque el 2015 haya

sido el año con mayor disponibilidad de sedimentos (producto de la erupción) y de mayor acumulación de lluvia, fue el año con el menor número de lahares y de menor magnitud. Esta tendencia la hemos relacionado al cambio drástico en la morfología de la barranca, y a la falta de un canal principal para la concentración de los escurrimientos principales. Es solamente a partir del 2017 que ya se observa un regreso a las condiciones de formación de lahares como fueron descritos antes de la erupción del 2015. A partir del 2017, y de no haber más aporte de sedimentos derivado de actividad eruptiva, se espera que la actividad de lahares esté principalmente controlada por la magnitud de los eventos de lluvia, y su frecuencia podrá ir disminuyendo a medida que los sedimentos son removilizados desde la porción alta del cono. Es posible que en los años posteriores ocurran flujos de magnitudes mayores; sin embargo, éstos irán siendo cada vez menos frecuentes y se requerirá de mayor intensidad de lluvia, tales como las ocurridas en 2015, para desencadenar un flujo, hasta que finalmente llegue a su etapa de estabilidad una vez más. Los trabajos de Major et al. (2000) han demostrado que la ocurrencia de lahares se estabiliza en un periodo largo de tiempo, ya que la migración del sedimento puede durar décadas.

En la barranca Montegrando el proceso de generación de nuevos canales duró 1 año y medio después de la erupción de julio de 2015 y los cambios morfológicos continúan. Aún no se ha llegado a un estado estable ya que aún existe una gran cantidad de material disponible para la generación de lahares.

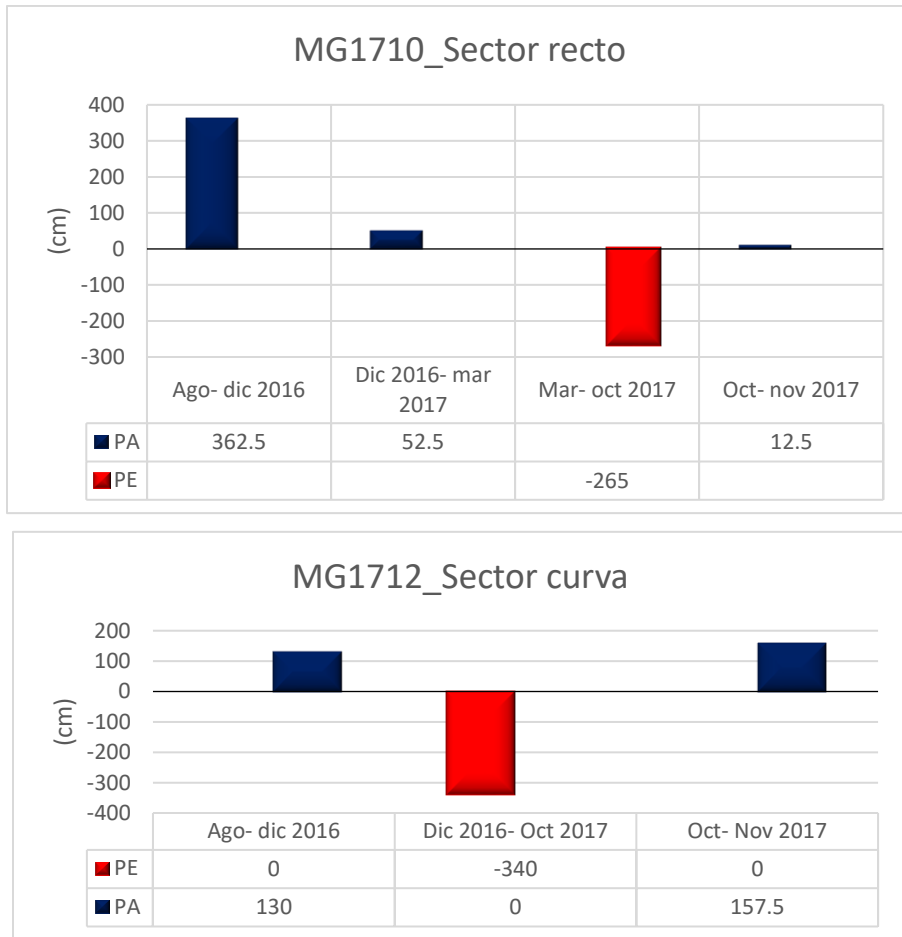


Figura 6.10. Diagramas que muestran el promedio de pérdida y ganancia de material durante el periodo 2016 y 2017 en la porción media de la barranca Montegrande

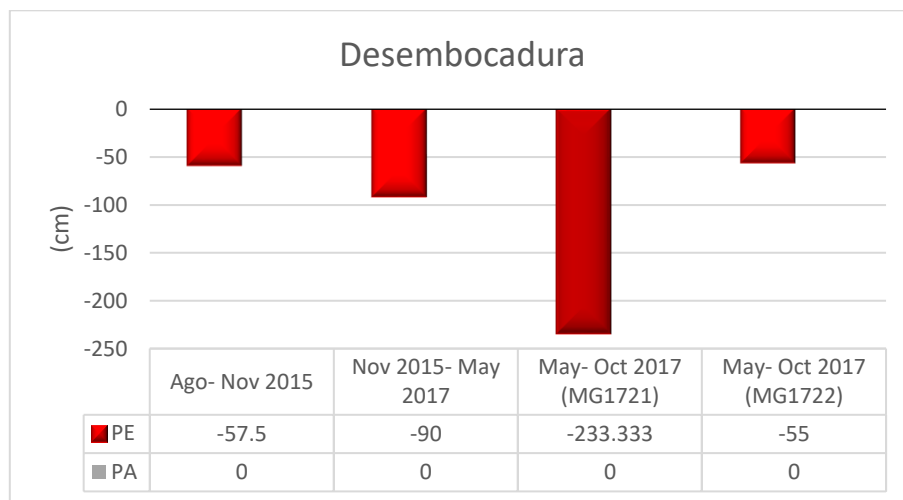


Figura 6.11. Diagramas que muestran el promedio de pérdida y ganancia de material durante el periodo 2015 y 2017 en la porción distal de la barranca Montegrande.

CONCLUSIONES

A partir de la información analizada y descrita en este trabajo de tesis, se desprenden las siguientes conclusiones:

- ☞ Después del emplazamiento del flujo piroclástico en la barranca Montegrande, las condiciones hidrológicas fueron modificadas drásticamente, por lo que, aunque el año 2015 fue el de mayor acumulación de lluvia, esto no se ve reflejado en el número de lahares, como se observó normalmente en las temporadas de lluvias previas al 2015.
- ☞ Los procesos deposicionales prevalecieron durante la temporada de lluvias de los años 2015 y 2016. En comparación con la temporada del año 2017 que fue predominantemente erosiva.
- ☞ Durante el 2015 y parte del 2016, la falta de drenajes estables en la barranca limitó la concentración de los escurrimientos superficiales, promoviendo la generación de lahares de baja magnitud y principalmente deposicionales. Solamente a partir del 2017, con la formación de canales estables, la frecuencia y magnitud de lahares muestra una relación con los procesos erosivos y la magnitud de la lluvia acumulada, como se observó en trabajos previos a la erupción del 2015.
- ☞ Los factores fundamentales que determinan la ocurrencia de lahares en la barranca Montegrande y que gobiernan los procesos de E/D son la cantidad de lluvia acumulada (> 10 mm), su intensidad (> 1 cm/hr) y duración (> 1 hr), la geometría del canal y la disponibilidad de sedimentos.
- ☞ En los años analizados, se vuelve a confirmar que en la primera parte de la temporada (Jul- Ago) de lluvias predominan los lahares de menor magnitud y duración y en la segunda parte de la temporada (Sept- Oct), aumenta la ocurrencia de lahares de magnitudes mayores los cuales, corresponden a eventos que se originan durante huracanes o lluvias de larga duración. La correlación entre la ocurrencia de lahares con respecto a la temporada de lluvias y su

recurrencia a través de distintos periodos de tiempo, facilitan la inserción de sistemas de alerta temprana en los planes operativos de la protección civil.

- ☞ Existe una relación entre la lluvia acumulada y la duración de un lahar; se puede observar que al principio de la temporada de lluvia (Jul- Ago), se registra un mayor número de eventos de corta duración (menor a una hora, y de tipo unipulso) con respecto a los meses de septiembre y octubre en donde los eventos son más esporádicos pero asociados a una mayor acumulación de lluvia (>100 mm). Si se analiza la amplitud de la señal (mayor amplitud ~ mayor magnitud del flujo) se puede también observar que los eventos que se originan hacia finales de la temporada de lluvia son también los de mayor amplitud ($> 10^{-2}$ cm/s) y duración con respecto a los eventos del inicio de temporada ($< 10^{-2}$ cm/s).
- ☞ Se pudo establecer un umbral de 10^{-3} cm/s para diferenciar lahares de corrientes fluviales. A partir de ahí, se establecieron criterios de amplitud máxima para identificar un FEB de un flujo hiperconcentrado. Con base en los registros sísmicos analizados en esta investigación, los Frentes enriquecidos en bloques (FEB) presentan amplitudes $> 10^{-3}$ cm /s y de duración corta (de pocos segundos hasta 1 min) a diferencia de los flujos hiperconcentrados o corrientes diluidas que presentan amplitudes $< 10^{-3}$ cm/s y duran varios minutos. Es importante evidenciar que dependiendo del tamaño de bloques en los frentes, la amplitud de la señal podrá ser diferente entre eventos, sin embargo, en un evento la forma de onda del frente es claramente distintiva con respecto a la señal del cuerpo y cola.
- ☞ El análisis de las señales sísmicas permite conocer la magnitud de un lahar y a partir de ahí poder clasificarlo más detalladamente. Aunado a esto, dicho análisis permite de forma indirecta conocer el tipo de morfologías que se pueden encontrar en la barranca con base en la magnitud del lahar. Se

observó que un lahar con órdenes de magnitud arriba de 10^{-2} cm/s en amplitud, generalmente es caracterizado como un lahar multipulso con frentes enriquecidos en bloques. Debido a que son lahares de larga duración y una alta capacidad erosiva, la barranca presentará morfologías de socavación y aumentara la profundidad del canal; por otro lado, si el flujo presenta amplitudes menores a 10^{-2} cm/s es posible que sean eventos de corta duración y de un solo pulso, los cuales no contienen grandes cantidades de carga sedimentaria y por lo tanto se podrán observar morfologías deposicionales tales como terrazas y barras a lo largo del canal, y abanicos aluviales en la desembocadura. Cabe señalar que el modelado morfológico de la barranca depende de otros factores como la pendiente y del sustrato rocoso, sin embargo, la energía del flujo reflejada en la señal sísmica sirve como un factor más para entender la dinámica geomorfológica del sitio de estudio.

- ☞ Los resultados obtenidos con el sistema de monitoreo han ayudado a entender la relación que existe entre la morfología del canal, la magnitud de los lahares y la influencia que tiene la precipitación en su ocurrencia. Todos ellos son parámetros cuantificables y que pueden ser normalizados para enriquecer estudios de riesgo y para la construcción futura de un sistema de alerta temprana que pueda beneficiar a las poblaciones que se encuentran en zonas vulnerables.
- ☞ Resultaría interesante continuar estudiando esta dinámica, en otros sitios de la barranca, con otras metodologías y en los años posteriores al 2017, con la finalidad de complementar este estudio y poder apreciar el momento en que la barranca logra su equilibrio nuevamente, tal como se encontraba antes del 2015.

REFERENCIAS

- Abancó C, Hürlimann M, Moya J. (2014) Analysis of the ground vibration generated by debris flows and other torrential processes at the Rebaixader monitoring site (central Pyrenees, Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14: 929–943. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-929-2014>
- Barclay, J., Alexander, J., Sušnik, J., 2007. Rainfall-induced lahars in the Belham Valley, Montserrat, West Indies. *Journal of the Geological Society, London* 164, 815–827.
- Berg, R. (2018) HURRICANE DORA (EP042017) 24 – 28 June 2017. Tropical Cyclone Report. Miami, Fl: National Hurricane Center, NOAA. Recuperado de: https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/EP042017_Dora.pdf. Fecha de consulta: 18/07/2018.
- Berg, R. (2017) HURRICANE NEWTON (EP152016) 4 – 7 September 2016. Tropical Cyclone Report. Miami, Fl: National Hurricane Center, NOAA. Recuperado de: https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/EP152016_Newton.pdf. Fecha de consulta: 16/07/2018.
- Berger, C., McArdell, B. W., and Schlunegger, F. (2011) Direct measurement of channel erosion by debris flows, Illgraben, Switzerland, *J. Geophys. Res.*, 116, F01002, doi:10.1029/2010JF001722
- Bretón, M., Ramírez, J.J., Navarro, C., (2002). Summary of the historical eruptive activity of Volcán de Colima, México : 1519–2000. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 117, 21–46
- Capra, L., Coviello, V., Borselli, L., Márquez-Ramírez, V.-H., and Arámbula-Mendoza, R (2018) Hydrological control of large hurricane-induced lahars: evidence from rainfall-runoff modeling, seismic and video monitoring, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 781–794, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-781-2018>.
- Capra, L., Macías, J. L., Cortés, A., Dávila, N., Saucedo, R., OsorioCampo, S., Arce, J. L., Gavilanes-Ruiz, J. C., Corona-Chávez, P., García-Sánchez, L., Sosa-Ceballos, G., and Vázquez, R.(2016) Preliminary report on the July 10–11, 2015 eruption at Volcán

- de Colima: Pyroclastic density currents with exceptional runouts and volume, J. Volcanol. Geotherm. Res., 310, 39–49.
- Capra, L., Gavilanes-Ruiz, J.C., Varley, N., Borselli, L. (2014). Origin, behavior and hazard of rain-triggered lahars at Volcán de Colima. In: Varley, N., Komorowski, J.C. (Eds.), *Volcán de Colima: Managing the Threat*. Springer, 126- 136.
 - Capra L, Borselli L, Varley N, Gavilanes-Ruiz JC, 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: 105–117.
 - Cole SE (2011) Geophysical investigation into the internal dynamics of moving lahars. Thesis for Doctoral Department of Soil and Earth Science, Massey University, Palmerston North N.Z, p 187.
 - Cole SE, Cronin SJ, Sherburn S, Manville V. 2009. Seismic signals of snow slurry lahars in motion: 25 September 2007, Mt Ruapehu, New Zealand. *Geophysical Research Letters* 36: 1–5.
 - Costa, J.E., 1984, The physical geomorphology of debris flow, in Costa, J.E., and Fleisher, P.J., eds., *Developments and Applications of Geomorphology*: Berlin and New York, Springer-Verlag, p. 268-317.
 - Coviello, V., et al., (2018) Seismic characterization of hyperconcentrated flows in a volcanic environment. *Earth Surf. Process. Landforms*. DOI: 10.1002/esp.4387.
 - Coviello V, Arattano M, Turconi L. 2015. Detecting torrential processes from a distance with a seismic monitoring network. *Natural Hazards* 78: 2055–2080. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1819-2>.
 -
 - Dávila, N., Capra, L., Ferrés, D., Gavilanes- Ruíz, J.C., y Flores, P. (2019) Chronology of the 2014- 2016 Eruptive Phase of Volcán de Colima and Volume Estimation of Associated Lava Flows and Pyroclastic Based on Optical Multi- Sensors. *Remote Sensing*, no. 11, 1167. MDPI. doi:10.3390/rs11101167.

- Dávila, N., et al. (2007) Recent Lahars at Volcán de Colima (México) : Drainage variation and spectral classification. *Journal of Volcanology and geothermal research* 165. Elsevier. pp. 127- 141.
- De la Cruz-Reyna, S., 1993. The historical eruptive activity of Colima Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 55, 51–68
- De Rose, R., Basher, L. R. (2011) Measurement of river bank and cliff erosion from sequential LIDAR and historical aerial photography. *Geomorphol.* 126, Elsevier, pp. 132- 147. doi:10.1016/j.geomorph.2010.10.037
- Doyle EE, Cronin SJ, Thouret J-C (2011) Defining conditions for bulking and debulking in lahars. *Geol Soc Am Bull* 123:1234–1246
- Doyle EE, Cronin SJ, Cole SE, Thouret JC (2010) The coalescence and organization of lahars at Semeru volcano, Indonesia. *Bull Volcanol* 72:961–970
- Enciclopedia de Características (2017). "Huracán Patricia". Recuperado de: <https://www.caracteristicas.co/huracan-patricia/>. Fecha de consulta: 08/07/2018.
- Fagents, S. A. and Baloga, S. M. (2006) Toward and model for the bulking and debulking of lahars, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 111, B10201, doi:10.1029/2005JB003986.
- Guthrie, R. H., Hockin, A., Colquhoun, L., Nagy, T., Evans, S. G., and Ayles, C. (2010) An examination of controls on debris flows mobility: Evidence from coastal British Columbia, *Geomorphol.*, 114, 601–613
- Hungr, O., McDougall, S., and Bovis, M. (2005) Entrainment of material by debris flows, in: *Debris-flows hazards and related phenomena*, edited by: Jakob, M. and Hungr, O., Springer, Berlin Heidelberg, 135–158
- Iverson, R. M., Reid, M. E., Logan, M., LaHusen, R. G., Godt, J. W., and Griswold, J. P. (2011) Positive feedback and momentum growth during debris-flow entrainment of wet bed sediment, *Nat. Geosci.*, 4, 116–121, doi:10.1038/ngeo1040
- Iverson, R.M. (2005) Debris- flow Mechanics. Capítulo 6 en Jacob M. y Hungr., O. (2005). *Debris- flow Hazards and Related Phenomena*. Praxis, Springer Berlin Heidelberg.
- Iverson, R.M., 1997. The physics of debris flows. *Rev. Geophys.* 35, 245–296

- Iverson RM, Reid ME, LaHusen RG (1997) Debris-flow mobilization from landslides. *Annu Rev Earth Planet Sci* 25:85–138
- James, M.R., Varley, N. (2012). Identification of structural controls in an active lava dome with high resolution DEMs: Volcán de Colima, Mexico. *Geophys. Res. Lett.* 39 (22), L22303
- Jones, R., Manville, V., Peakall, P., Froude, M. J., Odbert, H. M. (2017) Real time prediction of rain- triggered lahars : incorporating seasonality and catchment recovery. *Nat.Hazards Earth Syst. Sci.* 17, pp. 2301- 2312-
- Kimberlain, T. B., Blake, E. S., y Cangialosi, J. P. (2016). HURRICANE PATRICIA (EP202015) 20 – 24 October 2015. Miami, FL: National Hurricane Center, NOAA. Recuperado de: https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/EP202015_Patricia.pdf. Fecha de consulta: 08/07/2018.
- Lavigne F, Suwa H (2004) Contrasts between debris flows, hyperconcentrated flows and streamflows at a channel of Mount Semeru, East Java, Indonesia. *Geomorphology* 61:41–58
- Lavigne F., Thouret J.C. (2002). Sediment transportation and deposition by rain-triggered lahars at Merapi Volcano, Central Java, Indonesia. *Geomorphology* 49. Elsevier., pp. 45-69.
- Lavigne F., Thouret, J. (2000a) Les lahars: Dépôts, origines et dynamique. *Bull.Soc.géol.*, T.171, no.5, pp.545-557, France.
- Lavigne, F., Thouret, J.C., Voight, B., Young, K., LaHasen, R., Marso, J., Suwa, H., Sumaryono, A., Sayudi, D.S., Dejean, M., (2000b). Instrumental lahar monitoring at Merapi volcano, Central Java, Indonesia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 100, 457–478.
- Macías, J.L., 2005. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Bol. Soc. Geol. Mexicana* LVII 3, 379–424
- Major, J. J., Pierson, T. C., Dinehart, R. L., and Costa, J. E. (2000) Sediment yield following severe volcanic disturbance: a two-decade perspective from Mount St. Helens, *Geology*, 28, 819–822.

- Mangeney, A., Roche, O., Hungr, O., Mangold, N., Faccanoni G., and Lucas, A. (2010) Erosion and mobility in granular collapse over sloping beds, *J. Geophys. Res. Earth. Surf.*, 115, 1–21, doi:10.1029/2009JF001462.
- Manville, V., Németh, K., and Kano, K., (2009), Source to sink: A review of three decades of progress in the understanding of volcanoclastic processes, deposits, and hazards: *Sedimentary Geology*, v. 220, p. 136-161.
- Manville, V., Newton, E., y White, J. (2005) Fluvial responses to volcanism : re-sedimentation of the 1800a Taupo ignimbrite eruption in the Rangitaiki river catchment, north Island, New Zealand. *Geomorphology*, Vol. 65 1-2, Elsevier. Pp. 49- 70. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.07.007>
- Marcial, S., Melosantos, A.A., Hadley, K.C., LaHusen, R.G., Marso, J.N., 1996. Instrumental lahar monitoring at Mount Pinatubo. In: Newhall, C.G., Punongbayan, R.S. (Eds.), *Fire and Mud. Eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. University of Washington Press, Seattle.
- McCoy, S. W., Kean, J. W., Coe, J. A., Tucker, G. E., Stanley, D. M., and Wasklewicz, T. A. (2012) Sediment entrainment by debris flows: In situ measurements from the headwaters of a steep catchment, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 117, 1–25, doi:10.1029/2011JF002278
- Okano, K., Suwa, H., and Kanno, T. (2012) Characterization of debris flows by rainstorm condition at a torrent on the Mount Yakedake Volcano, Japan, *Geomorphol.*, 136, 88–94
- Pierson, T. C., and J. J. Major (2014), Hydrogeomorphic effects of explosive volcanic eruptions on drainage basins, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 42(1), 469–507, doi:10.1146/annurev-earth-060313-054913.
- Pierson, T. C., Pringle, P. T., and Cameron, K. A. (2011) Magnitude and timing of downstream channel aggradation and degradation in response to a dome-building eruption at Mt. Hood, Oregon, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 123, 3–20.
- Pierson, T. C., A. S. Daag, P. J. D. Reyes, M. T. M. Regalado, R. U. Solidum, and B. S. Tubianosa (1996) Flow and deposition of post-eruption hot lahars on the east side of

Mount Pinatubo, July – October 1991, in *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*, edited by C. G. Newhall and R. S. Punongbayan, Univ. of Wash. Press, Seattle.

- Pierson T.C., Costa J.E (1987). A rheologic classificatio of subaereal sediment- wáter flows. En: Costa J.E. y Wieczorek G.E. eds., *Debris flows/avalanches: Process, recognition, and mitigation*. Geol. Soc. Amer., *Rev. Engineer. Geol.*, 7, 1-12.
- Pistolesi, M., Cioni, R., Rosi, M., y Aguilera, E. (2014) Lahar hazard assessment in the southern drainage system of Cotopaxi volcano, Ecuador: Results from multiscale lahar simulations. *Geomorphology* 207, Elsevier, 51- 63.
- Procter, J., Cronin, S. J., Fuller, I. C., Lube, G., and Manville,V. (2014) Quantifying the geomorphic impacts of a lake-breakout lahar, Mount Ruapehu, New Zealand, *Geol.*, 38, 67–70, doi:10.1130/G30129.1
- Procter, J., Cronin, S., Fuller, I.C., Sheridan, M., Neall, V.E., y Keys, H. (2010) Lahar hazard Aessment using Titan 2D for an alluvial fan with rapidly changing geomorphology: Whangaehu River, Mt. Ruapehu. *Geomorphology* 116, pp. 162-1774. Doi: 10.1016/j.geomorph.2009.10.016
- Robin, C., et al., (1987) Eruptive History of the Colima volcanic complex (Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* Vol. 31, Issues 1-2, pp. 99-113. Doi: [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(87\)90008-4](https://doi.org/10.1016/0377-0273(87)90008-4)
- Rodríguez, S., Mora, I., Murrieta, J., (2006), Flujos de baja concentración asociados con lluvias de intensidad extraordinaria en el flanco sur del volcán Pico de Orizaba (Citlaltépetl), México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Número Especial de Geología Urbana* 2, 223-236.
- Saucedo R, Macias JL, Sarocchi D, Bursik M, Rupp B (2008) The rain-triggered Atenquique volcanoclastic debris flow of October 16, 1955 at Nevado de Colima Volcano, Mexico. *J Volcanol Geotherm Res* 173:69–83
- Saucedo, R., Macías, J.L., Sheridan, M.F., Bursik, J.C., Kmorowski, J.C. (2005) Modeling of pyroclastic flows of Colima Volcano, Mexico: implications for hazard

- assessment. *Journal of volcanology and geothermal research* 139, Elsevier, pp. 103-115. doi:10.1016/j.jvolgeores.2004.06.019
- Saucedo, R., Macias, J.L., Bursik, M.I., (2004). Pyroclastic flow deposits of the 1991 eruption of Volcan de Colima, Mexico. *Bulletin of Volcanology* 66, 291– 306.
 - Saucedo, R., Macias, J.L., Bursik, M.I., Gavilanes, J.C., Corté's, A., 2002. Emplacement of pyroclastic flows during the 1998–1999 eruption of volca'n de Colima, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 117, 129– 153.
 - Schürch, P., Desnmore, A., Rosser, N.J. y McArdell, BW. (2011) Dynamic controls on erosion and deposition on debris- flow fans, *Geology*, 39 (9), 827- 830, doi: 10.1130/G32103.1
 - Scott, K. M., Vallance, J. W., Kerle, N., Macias, J. L., Strauch, W., and Devoli, G. (2005) Catastrophic precipitation-triggered lahar at Casita volcano, Nicaragua: Occurrence, bulking, and transformation, *Earth Surf. Proc. Landf.*, 30, 59–79, doi:10.1002/esp.1127
 - Scott, K.M., (1988), Origin, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz River System: U.S. Geological Survey Professional Paper, v. 1447-A.
 - Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua. (2018a) Resúmenes mensuales de precipitación y temperatura 2015. México: SMN- CONAGUA. Recuperado de: <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias> Fecha de consulta: 08/07/2018
 - Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua. (2018b) Precipitación a nivel nacional y por entidad Federativa, 2015. México: SMN- CONAGUA. Recuperado de: <https://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/PREC/2015.pdf>. Fecha de consulta: 08/07/2018.
 - Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua (2015) Reporte del clima en México marzo, junio y octubre 2015. México: SMN- CONAGUA.

- Recuperado de: <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/diagnostico-climatico/reporte-del-clima-en-mexico>. Fecha de consulta: 08/07/2018.
- Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua (2016) Reporte del clima en México junio, julio y agosto 2016. México: SMN- CONAGUA. Recuperado de: <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/diagnostico-climatico/reporte-del-clima-en-mexico>. Fecha de consulta: 16/07/2018.
 - Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua. (2018) Precipitación a nivel nacional y por entidad Federativa, 2016. México: SMN- CONAGUA. Recuperado de: <https://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/PREC/2016.pdf>. Fecha de consulta: 16/07/2018
 - Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua. (2018) Precipitación a nivel nacional y por entidad Federativa, 2017. México: SMN- CONAGUA. Recuperado de: <https://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/PREC/2017.pdf>. Fecha de consulta: 18/07/2018.
 - Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua (2017) Reporte del clima en México anual 2017. México: SMN- CONAGUA. Recuperado de: <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/diagnostico-climatico/reporte-del-clima-en-mexico>. Fecha de consulta: 18/07/2018.
 - Smith, G. A. and Fritz, W. J. (1989) Volcanic influences on terrestrial sedimentation, *Geology* 17: 375- 376.
 - Starheim, C., Gomez, C., Daves, T., Lavigne, F., and Wassmer, P. (2013) In-flow evolution of lahar deposits from video-imagery with implications for post-event deposit interpretation, Mount Semeru, Indonesia, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 256, 96–104.

- Stewart, S.R. (2018) TROPICAL STORM PILAR (EP182017) 23–25 September 2017. Tropical Cyclone Report. Miami, FL: National Hurricane Center, NOAA. Recuperado de: https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/EP182017_Pilar.pdf. Fecha de consulta: 18/07/2018.
- Stewart, S.R. (2017a) HURRICANE EARL (AL052016) 2 – 6 August 2016. Tropical Cyclone Report. Miami, FL: National Hurricane Center, NOAA. Recuperado de: https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL052016_Earl.pdf. Fecha de consulta: 16/07/2018.
- Stewart, S.R. (2017b) Tropical Storm Javier (EP 112016) 7- 9 august 2016. Tropical Cylone Report. Miami, FL: National Hurricane Center. NOAA. Recuperado de: https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/EP112016_Javier.pdf. Fecha de consulta: 16/07/2018.
- Takahashi T. (1991) Debris Flow, IAHR Monograph, A. A.Balkema: Rotterdam.
- Tanarro, L.M., Andrés, N., Zamorano, J.J., Palacios, D., y Renschler C.S. (2010) Geomorphological evolution of a fluvial channel after primary lahar deposition: Huiloac Gorge, Popocatépetl volcano (Mexico), *Geomorphol.* 122, Elsevier, pp. 178-190.
- Tanarro, L.M., Andrés, N., Zamorano, J.J., Palacios, D., 2004. Postlaharic evolution of the Proglacial Gorge on Popocatépetl Volcano (México): control and hazard prevention. *Geophysical Research Abstracts* 6-04609
- Theule, J. L., Liébault, F., Laigle, D., Loye, y Jaboyedoff, M. (2015) Channel scour and fill bye debris flows and edload transport, *Geomrphol*, 243(0), 92-105, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.003>
- Thouret J. C., Oehler, J. F., Gupta, A., Solikhin, A., and Procter, J. N. (2014) Erosion and aggradation on persistently active volcanoes – a case study from Semeru Volcano, Indonesia, *Bull. Volcanol.*, 857, 26 pp., doi:10.1007/s00445-014-0857-z.
- Thouret JC, Lavigne F (2000) Lahars: occurrence, deposits and behaviour of volcano-hydrologic flows. Volcaniclastic rocks from magmas to sediments. In: Herve' Leyrit, Christian Montenat (eds) Gordon and Breach Science Publishers, pp 151–174

- UASLP (2018) Frentes Fríos. San Luis Potosí, México: Area de Climatología, UASLP. Recuperado de: http://langif.uaslp.mx/portadaClima_FF.php. Fecha de consulta: 08/07/2018
- Vallance JW (2005) Volcanic debris flows. In: Jakob M, Hungr O (eds) Debris-flows hazards and related phenomena. Springer, Berlin, pp. 247–272.
- Vallance, J.W. (2000) Lahars, in Encyclopedia of volcanoes, edited by H. Sigurdsson, B.F. Houghton, S.R., McNutt, H., Rymer, and J., Stix., Academic Press, New York, 601- 616.
- Vallance, J.V., and Scott, K.M., (1997), The Osceola Mudflow from Mount Rainier: Sedimentological and hazard implication of a huge clay-rich debris flow: Geological Society of America Bulletin, v. 109, p. 143-163
- Van Westen CJ, Daag AS (2005) Analyzing the relationship between rainfall characteristics and lahar activity at Mount Pinatubo, Philippines. Earth Surf Process Landf 30:1663– 1674.
- Vázquez, R., Capra, L., Coviello, V. (2016a) Factors controlling erosion/deposition phenomena related to lahars at Volcán de Colima, México. Natural Hazards and Earth Systems Sciences 16: 1881- 1895
- Vázquez R, Suriñach E, Capra L, Arámbula-Mendoza R, Reyes-Dávila G. (2016b). Seismic characterisation of lahars at Volcán de Colima, Mexico. Bulletin of Volcanology 78: 8.
- Vázquez R, Capra L, Caballero R, Arámbula-Mendoza R, Reyes-Dávila G (2014) The anatomy of a lahar: deciphering the 15th September 2012 lahar at Volcán de Colima, Mexico. J Volcanol Geotherm Res 272:126–136
- Vera, F. y Palma, J.L. (2017) Origen, transporte y emplazamiento de lahares generados en la erupción de 2015 del volcán Villarica. Universidad de Atacama.
- Walter, T.R., Salzer, J., Varley, N., y Navaro, C. (2018) Localized and distributed erosion triggered by the 2015 Hurricane Patricia investigated by repeated drone surveys and time lapse camera at Volcán de Colima, México. Geomorphology No. 319, Elsevier, pp. 186- 198.

- Zobin, V.M., Arámbula, R., Bretón, M., Reyes, G., Plascencia, I., Navarro, Carlos, Téllez, Armando, Campos, Arnoldo, González, Miguel, León, Zoraida, Martínez, Alejandro, Ramírez, Carlos, 2015. Dynamics of the January 2013–June 2014 explosive-effusive episode in the eruption of Volcán de Colima, México: insights from seismic and video monitoring. Bull. Volcanol. 77:1–13. <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0917-z>.
- Zobin, V. M., (2009) The characteristics of seismic signals produced by lahars and pyroclastic flows: Volcán de Colima, Mexico. Journal of volcanology and Geothermal Research 179, Elsevier, pp. 157-167.

HEMEROGRAFÍA

- Gallegos, O. [Excelsior] (2015, diciembre 01) Los huracanes más intensos del 2015 en el Pacífico. Recuperado de: <https://www.excelsior.com.mx/multimedia/2015/12/01/1060667> Fecha de consulta: 08/07/2018.
- Méndez, E. (2015) marzo de 2015, el mes más lluvioso en el país desde 1941. Ciudad de México, México: Excelsior. Recuperado de: <http://www.excelsior.com.mx/nacional/2015/03/19/1014402>. Fecha de consulta: 08/07/2018
- Notimex. (2015) *Se aproxima Patricia a costas de Jalisco y Colima con vientos de 200*. Monterrey, N.L: Info7. Recuperado de: <http://www.info7.mx/clima/se-aproxima-patricia-a-costas-de-jalisco-y-colima-con-vientos-de-200/1550592>. Fecha de consulta: 08/07/2018.
- Sol de Puebla (2015) Ha sido 2015 el año más lluvioso para México. México: Programa agua: Fondo para la comunicación y la educación ambiental A.C. Recuperado de: <https://agua.org.mx/ha-sido-2015-el-ano-mas-lluvioso-para-mexico/>. Fecha de consulta: 08/07/2018.