



**UNIVERSIDAD MICHUACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA Y MINERALOGÍA**

**ESTUDIO DEL PELIGRO POR FLUJOS DE DETRITOS
Y CORRIENTES HIPERCONCENTRADAS
MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA
EN FLO-2D, CASO DE ESTUDIO: ANGANGUEO, MICH.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

CON ESPECIALIDAD EN:

GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

PRESENTA:

ING. SÓCRATES FIGUEROA MIRANDA

ASESOR:

DR. VÍCTOR MANUEL HERNÁNDEZ MADRIGAL



MORELIA, MICH.

FEBRERO 2013



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA Y MINERALOGÍA**

**ESTUDIO DEL PELIGRO POR FLUJOS DE DETRITOS
Y CORRIENTES HIPERCONCENTRADAS
MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA EN FLO-2D,
CASO DE ESTUDIO: ANGANGUEO, MICH.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

CON ESPECIALIDAD EN:

GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

PRESENTA:

ING. SÓCRATES FIGUEROA MIRANDA

ASESOR:

DR. VÍCTOR MANUEL HERNÁNDEZ MADRIGAL

MORELIA, MICH.

FEBRERO 2013

DEDICO ESTA TESIS A:

Dios, por ser el alfarero que moldea mi vida y mi destino. Por concederme la oportunidad de concluir este trabajo, dándome salud, tiempo, fortaleza y paciencia. Gracias Señor por ser el artífice de mi vida.

Mi familia, por ser mi sustento e inspiración, por ser quienes incondicionalmente ayer, hoy y siempre han estado cerca para apoyarme en cada una de las andanzas que he emprendido. Gracias por ser la razón para superarme cada día.

Mi Ces por emprender esta aventura a mi lado. Por su paciencia, sus consejos, su ayuda y apoyo, pero sobre todo por su interminable amor, cariño y comprensión. Gracias por ser mi respaldo, mi mano derecha, mi confidente y mi compañera.

AGRADECIMIENTOS:

Agradezco a mi familia, ya que gracias a su apoyo y comprensión, hoy cumplo un sueño más.

Agradezco a mi Ces ¿Por qué? Por todo. Todo lo que me ha brindado: el tiempo, el cariño, los momentos, las alegrías, la comprensión, y el amor. Porque gracias a ella he logrado salir ileso de momentos adversos. Por sorprenderme cada día con sus ocurrencias y de esa manera alegrar mis días y porque sin ella este trabajo no hubiera alcanzado la forma que ahora tiene. Gracias mi Cesyaminita.

Agradezco de manera especial a mi asesor, el Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal por ver en mi capacidad para desarrollar este trabajo, por ayudarme, alentarme y comprenderme en momentos de dificultad. Agradezco también sus siempre atinadas aportaciones, sugerencias y comentarios para lograr un buen trabajo. Gracias Doc.

Agradezco también al Dr. Víctor Hugo Garduño y a la Dra. Isabel Israde por sus palabras de ánimo y confortación, además de siempre tener la disposición para atender mis dudas e inquietudes. Y por aportar sus conocimientos en este trabajo.

Agradezco al Ing. Guillermo Benjamín Pérez Morales porque sin querer ha sido motivo de inspiración, por compartir sus conocimientos y ser un excelente profesor.

Agradezco a la Dra. María Alcalá por haberme facilitado el material y el espacio necesario para realizar las pruebas de laboratorio, por sus aportaciones y comentarios siempre en beneficio de mi trabajo.

Agradezco también al Dr. Alejandro Ávila y al Dr. José Luis Macías por sus comentarios y sugerencias a esta tesis como revisores que son.

Agradezco a las personas que de manera directa o indirecta contribuyeron para realizar este trabajo. A Antonio Navarrete, Martha Olivia, Alma, Mariela, Ilenia y Claudia.

Agradezco también a mi amigo Adrian Alejandro, por haber tenido el tiempo para acompañarme en los trabajos de campo.

Quiero agradecer a todos y cada uno de mis maestros del IIM, que fueron parte fundamental para que en esta tesis se plasmen los mejores conocimientos. Reconozco sus enseñanzas, sus consejos, sus palabras de aliento, sus chistes y los pocos pero amenos momentos en que convivimos.

Agradezco a mis compañeros de maestría por ser también mis amigos y ser importantes en mi crecimiento profesional.

Gracias al IIM y al Departamento de Geología por darme la oportunidad de ser uno más de sus egresados y asistirme en las actividades para lograr la titulación.

ÍNDICE.

| | Pág |
|--|-----|
| CONTENIDO | . |
| Índice. | |
| Abreviaturas. | |
| Resumen. | |
| Abstract. | |
| Índice de figuras. | |
| Índice de tablas. | |
| Capítulo I. Introducción. | 1 |
| I. 1. Justificación. | 3 |
| I. 2. Hipótesis. | 3 |
| I. 3. Objetivos. | 4 |
| Capítulo II. Descripción de la zona de estudio. | 5 |
| II.1. Geología. | 7 |
| II.2. Fisiografía. | 13 |
| II.3. Clima y vegetación. | 17 |
| II. 4. Morfometría. | 21 |
| II. 5. Obras antropogénicas. | 23 |
| Capítulo III. Marco conceptual. | 26 |
| III.1. Modelos de fluidos para el estudio de flujos de lodo o detritos. | 28 |
| III.2. Clasificación de los tipos de flujo. | 31 |
| III.2.1. Perspectiva <i>Landslide</i> . | 31 |
| III.2.2. Perspectiva hidráulica torrencial. | 33 |
| III.3. Factores condicionantes y detonantes para la generación de flujos de detritos. | 39 |
| III.4. Flujos de detritos: descripción y características. | 42 |
| III.4.1. Origen y formación. | 42 |
| III.4.2. Movimiento y morfología. | 44 |
| III.4.3. Depositación. | 47 |
| III.5. Distinción en campo de la ocurrencia de una inundación y de un flujo de detritos. | 49 |
| III.6. Modelo numérico FLO-2D | 52 |
| III.6.1. Ecuaciones que utiliza FLO-2D. | 54 |
| III.6.2. Solución numérica. | 55 |
| III.6.3. Lógica del FLO-2D. | 56 |
| III.6.4. Modelo reológico cuadrático. | 59 |
| Capítulo IV. Antecedentes. | 61 |
| IV.1. Uso de FLO-2D en México. | 63 |

| | |
|--|-----|
| Capítulo V. Materiales y metodología. | 66 |
| V.1. Materiales. | 66 |
| V.2. Metodología. | 67 |
| V.2.1. Trabajo de campo. | 67 |
| V.2.2. Trabajo de gabinete. | 72 |
| | |
| Capítulo VI. Resultados. | 82 |
| VI.1. Precipitación. | 83 |
| VI.1.1. Análisis de lluvias históricas. | 83 |
| VI.1.2. Periodos de retorno. | 89 |
| VI.1.3. Análisis de la tormenta de febrero de 2010, con base en el pluviógrafo “Chincua”. | 91 |
| VI.2. Hidrología. | 96 |
| VI.2.1. Precipitación efectiva y abstracciones. | 96 |
| VI.2.2. Hidrogramas y caudales pico. | 98 |
| VI.2.2.1. Gasto pico en la microcuenca San Pedro. | 98 |
| VI.2.2.2. Gasto pico para simulación en FLO-2D. | 102 |
| VI.3. Análisis de sedimentos. | 104 |
| VI.3.1. Deslizamientos, erosión y desprendimientos. | 104 |
| VI.3.2. Clasificación de suelos. | 109 |
| VI.3.2.1. Granulometría. | 109 |
| VI.3.2.2. Límites de Atterberg. | 111 |
| VI.3.3. Parámetros reológicos. | 112 |
| VI.4. Simulación en FLO-2D. | 115 |
| VI.4.1. Simulación con hidrograma líquido. Análisis de los resultados. | 115 |
| VI.4.2. Simulación con hidrograma líquido + hidrograma sólido. Análisis de los resultados. | 123 |
| | |
| Capítulo VIII. Conclusiones y recomendaciones. | 134 |
| | |
| Referencias bibliográficas. | 137 |
| | |
| Anexos. | 144 |
| Anexo I. Tablas y figuras | 144 |
| Anexo II. Fotografías del desastre. Anganguero, 2010. | 148 |

ABREVIATURAS.

CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

CONAGUA. Comisión Nacional del Agua.

FEMA. *Federal Emergency Management Agency.*

FLO-2D. *2-Dimensional Flood Routing Model.*

hp. Altura de precipitación.

IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

IP. Índice Plástico.

LL. Límite Líquido

LP. Límite Plástico.

MCSP. Microcuenca San Pedro.

MDE. Modelo Digital de Elevaciones.

msnm. Metros sobre el nivel del mar.

OFEE. *The Office of the Federal Environmental Executive.*

PGRM. Procesos gravitacionales de remoción en masa.

USGS. *U.S. Geological Survey*

US SCS. *U. S. Soil Conservation Service.*

SUCS. *Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.*

SMN. *Servicio Meteorológico. Nacional.*

RESUMEN.

A finales del mes de enero y principios de febrero del 2010, en el oriente de Michoacán y en particular en la ciudad de Mineral de Angangueo, se presentaron lluvias atípicas de baja intensidad pero de larga duración, que provocaron el registro de 35.8% de la precipitación media anual en solo 4 días. Situación que favoreció la saturación de los suelos y posteriormente la detonación de numerosos deslizamientos en la zona alta de las cumbres de Angangueo. La combinación del emplazamiento de estos deslizamientos en el fondo de barrancas con el abundante escurrimiento superficial, provocaron la movilización de estos depósitos en forma de flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas. El depósito de estos flujos en combinación con deslizamientos dentro de la mancha urbana, impactaron severamente a la población de Angangueo. Se registró el sepultamiento de considerables viviendas, calles y canales, principalmente en los sectores centro, norte y este de la ciudad, con incontables pérdidas económicas y lamentables decesos humanos.

Con el objeto de evaluar el daño en las zonas afectadas y elaborar un mapa de peligro por flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas provenientes de la microcuenca del Río San Pedro, en este trabajo se realizó la modelización matemática de dichos procesos, mediante el programa numérico FLO-2D versión 2009.06. Para tal objetivo, se aplicó una metodología propia de la que destacan la construcción de un Modelo Digital de Elevaciones del área de modelización con base en levantamiento topográfico de detalle; cálculo del hidrograma líquido a partir de información pluviográfica aplicando el método del hidrograma unitario del SCS, y con ayuda del modelo de simulación hidrológica HEC-HMS 3.2; cálculo del hidrograma de sólidos a partir de concentraciones volumétricas de sedimentos que se fueron variando hasta lograr un modelo calibrado; determinación de coeficientes de rugosidad de Manning con base en referencias bibliográfica y recorridos en campo; finalmente, obtención de parámetros reológicos de los sedimentos (viscosidad y esfuerzo de cedencia), estimados indirectamente mediante la comparación de muestras de sedimentos del área de estudio con aquellas reportadas en la bibliografía.

Los resultados de las modelaciones en FLO-2D revelan tres zonas de conflicto tanto para el flujo netamente líquido como para el flujo de detritos. La primera zona se ubica justo a la entrada de la ciudad, en el último cambio de dirección que presenta el río San Pedro; la segunda zona en el puente que intersecta a la calle Libertad y que conduce al Monumento del Minero (calzada Álvaro Obregón); y la tercera en la intersección de la calle Melchor Ocampo con el canal del río San Pedro. En estas zonas los modelos revelan un incremento importante en los tirantes, las velocidades, las fuerzas de impacto y las presiones estáticas. El incremento de dichas variables dinámicas del flujo se vio reflejado en la primer zona con un deslizamiento

rotacional en el flanco izquierdo del río, desbordamientos e inundaciones en la zonas 2 y 3, siendo éstas dos últimas las zonas que sufrieron mayores daños durante el evento. En base a resultados de FLO-2D se elaboró un mapa preliminar de peligro por inundaciones y flujo de detritos para un evento similar al de febrero de 2010. Este mapa muestra que las áreas de mayor peligro se ubican, por obvias razones en los márgenes del río-canal San Pedro, calle Melchor Ocampo y Av. Nacional-Independencia; y con peligrosidad media-baja la calle Libertad y calles perimetrales del atrio del templo de la Inmaculada Concepción de María. Todo ello concordante con el escenario crítico registrado en febrero del 2010 por lo que el modelo es aceptable.

ÍNDICE DE FIGURAS.

| | Pág |
|---|-----|
| Figura 1. Localización del municipio de Angangueo..... | 6 |
| Figura 2. Extracto de la carta geológico-minera E14-A26 Angangueo..... | 8 |
| Figura 3. Perfil geológico B-B' tomado de la carta geológico-minera E14-A26 escala 1:50,000..... | 9 |
| Figura 4. Columnas litológicas que correlacionan eventos incendio-aluvión, en un contexto regional..... | 11 |
| Figura 5. Corte sobre el cauce San Pedro, que quedo expuesto posterior al aluvión de 2010..... | 12 |
| Figura 6. Localización de las morfoestructuras más importantes en la zona de estudio (Modelo Digital de Elevaciones E14-A26)..... | 14 |
| Figura 7. Mapa de pendientes de la microcuenca San Pedro..... | 16 |
| Figura 8. Imagen en perspectiva de Google Earth que muestra la microcuenca del río San Pedro..... | 16 |
| Figura 9. Mapa de cobertura vegetal para la microcuenca San Pedro..... | 17 |
| Figura 10. Ubicación espacial de la ocurrencia de los deslizamientos de mayor magnitud en las microcuencas San Pedro, Catingón y Carrillos..... | 19 |
| Figura 11. Efectos del impacto de grandes troncos en las viviendas de Mineral de Angangueo. Fotografía: Víctor Hugo Garduño Monroy (2010)..... | 20 |
| Figura 12. Depósitos de madera en el centro histórico de Mineral de Angangueo. Fotografía: Víctor Hugo Garduño Monroy (2010)..... | 20 |
| Figura 13. Curva hipsométrica de la microcuenca San Pedro..... | 22 |
| Figura 14. Parteaguas, cauce principal y drenaje de la microcuenca San Pedro..... | 23 |
| Figura 15. Depósitos de escombros de mina sobre el cauce San Pedro..... | 24 |
| Figura 16. Encauzamiento e invasión de las corrientes..... | 25 |
| Figura 17. Zonas de túnel sobre el río Catingón..... | 25 |
| Figura 18. El río San Pedro reclama su cauce. Fotografía: Víctor Hugo Garduño Monroy (2010)..... | 25 |
| Figura 19. Tipos de fluidos y su típica relación entre el esfuerzo cortante (τ) y la tasa de deformación (du/dy)..... | 27 |
| Figura 20. Perfil de velocidades para un fluido Newtoniano, aplicado a flujos..... | 28 |
| Figura 21. El perfil de velocidades para un fluido Bingham..... | 29 |
| Figura 22. Distribución de velocidades para el modelo de fluido dilatante..... | 30 |

| | |
|--|----|
| Figura 23. Clasificación de los flujos con base en la perspectiva <i>Landslide</i> | 32 |
| Figura 24. Clasificación de los flujos en base a la perspectiva de la hidráulica torrencial.... | 33 |
| Figura 25. Flujo normal de agua de un cauce en zona llana, donde la concentración de sedimentos por volumen es menor al 5%..... | 35 |
| Figura 26. Fotografía de un flujo hiperconcentrado o inundación de lodo..... | 36 |
| Figura 27. Fotografía de un típico flujo de lodo o <i>mudflow</i> | 37 |
| Figura 28. Deposito del flujo de detritos al pie del barrio San Pedro, en Mineral de Angangueo..... | 38 |
| Figura 29. Ilustración que explica el origen, formación y depósito de un flujo de detritos, producto de un evento anómalo de lluvias..... | 43 |
| Figura 30. Esquema del transporte y depósito de un flujo de detritos, en perfil..... | 44 |
| Figura 31. Esquema del transporte y depósito de un flujo de detritos, en planta..... | 44 |
| Figura 32. Tamaño de los bloques transportados por un flujo de detritos en el estado de Vargas, Venezuela en 1999 (izquierda)..... | 45 |
| Figura 33. Tamaño de los bloques transportados por un flujo de detritos en el estado de Vargas, Venezuela en 1999 (derecha)..... | 45 |
| Figura 34. Perfil típico de un flujo de detritos..... | 46 |
| Figura 35. Esquema de los procesos de acumulación de depósitos de ondas consecutivas, por un flujo de detritos..... | 47 |
| Figura 36. Evidencias en campo de que sucedió un flujo de detritos..... | 48 |
| Figura 37. Secciones verticales típicas de depósitos de flujos de detritos..... | 50 |
| Figura 38. Evidencias del paso del flujo de detritos sobre el cauce del río San Pedro..... | 50 |
| Figura 39. Evidencias en campo del suceso de una inundación..... | 51 |
| Figura 40. Procesos físicos que simula FLO-2D. Fuente: FLO-2D User's Manual (O'Brien, 2000)..... | 53 |
| Figura 41. Interfaz llanura-inundación. Fuente: FLO-2D User's Manual (O'Brien, 2000).... | 53 |
| Figura 42. Descarga del flujo a través de los elementos de malla, en planta. Fuente: FLO-2D User's Manual (O'Brien, 2000)..... | 57 |
| Figura 43. Daños a la línea férrea Ollantaytambo-Machupicchu, por el flujo de detritos ocurrido en octubre de 2005, en el Cusco, Perú..... | 62 |
| Figura 44. Efectos del alud torrencial sobre los edificios de las costas de Vargas, Venezuela..... | 63 |
| Figura 45. Flujo de detritos, evento de Tijuana, B.C., 1998..... | 64 |

| | |
|--|----|
| Figura 46. Resultados del estudio para la cuenca del Cañón de los Laureles, en Tijuana, Baja California..... | 65 |
| Figura 47. Cuadro sinóptico que desglosa los trabajos realizados en campo..... | 67 |
| Figura 48. Corriente Clear Creek..... | 68 |
| Figuras 49. Río San Pedro..... | 68 |
| Figura 50. Fotografía de una de las calles de Angangueo, tomada posterior al evento..... | 69 |
| Figura 51. Trabajos de levantamiento topográfico con Estación Total sobre el cauce del río San Pedro (izquierda)..... | 70 |
| Figura 52. Trabajos de levantamiento topográfico con Estación Total sobre el cauce del río San Pedro (derecha)..... | 70 |
| Figura 53. Imágenes de tres depósitos de escombros mineros en la parte alta de la microcuenca (Deposito 2)..... | 71 |
| Figura 54. Imágenes de tres depósitos de escombros mineros en la parte alta de la microcuenca (Deposito 3)..... | 71 |
| Figura 55. Imágenes de tres depósitos de escombros mineros en la parte alta de la microcuenca (Deposito 5)..... | 71 |
| Figura 56. Esquema que muestra la metodología general realizada en gabinete..... | 72 |
| Figura 57. Prueba de sedimentación, para conocer el porcentaje de granos finos (limos y arcillas), en las muestras recolectadas en campo..... | 77 |
| Figura 58. Aplicación de la prueba de Casagrande para determinar el límite líquido. Muestra MD1..... | 77 |
| Figura 59. Aplicación de la prueba de Casagrande para determinar el límite líquido. Muestra MD2..... | 77 |
| Figura 60. Trabajo topográfico sobre el deslizamiento San Pedro..... | 79 |
| Figura 61. Grafico que ilustra la metodología seguida para la modelación del flujo de detritos a través de FLO-2D..... | 80 |
| Figura 62. Imagen infrarroja obtenida del satélite GOES, a las 6:15 AM, el 02 de febrero de 2010. Fuente: Aguilar-Garduño, 2010..... | 82 |
| Figura 63. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis pluviométrico..... | 84 |
| Figura 64. Hietograma normal de la estación 16033 Chincua-Senguio..... | 88 |
| Figura 65. Hietograma acumulado de la estación 16033 Chincua-Senguio..... | 88 |
| Figura 66. Hietograma completo de las lluvias producto de los frentes fríos no. 28 y 29, registrado por el pluviógrafo “Chincua”. Lluvia total 358 mm..... | 92 |
| Figura 67. Hietograma de la tormenta de diseño. Lluvia total 320 mm..... | 92 |

| | |
|--|-----|
| Figura 68. Hietograma acumulado con precipitación efectiva y pérdidas, sin considerar las nevadas (capas de hielo de hasta 20 cm, Aguilar-Garduño, 2010)..... | 97 |
| Figura 69. Hidrograma para la MCSP para una hp máxima de 104 mm caída el 4 de febrero de 2010..... | 99 |
| Figura 70. Hidrograma para la MCSP para una hp acumulada de cinco días de 243.5 mm..... | 100 |
| Figura 71. Hidrograma obtenido desde HEC-HMS para la microcuenca San Pedro usando el registro del pluviógrafo “Chincua”..... | 101 |
| Figura 72. El hidrograma obtenido con HEC-HMS para la microcuenca-simulación..... | 102 |
| Figura 73. Zona simulada mediante FLO-2D..... | 103 |
| Figura 74. Imagen tomada desde el flanco izquierdo del deslizamiento San Pedro. Fotografía: Víctor Manuel Hernández Madrigal (2012)..... | 105 |
| Figura 75. Características morfométricas del deslizamiento San Pedro. Ilustración: Víctor Manuel Hernández Madrigal (2012)..... | 105 |
| Figura 76. Coeficientes de fricción equivalente para los deslizamientos de La microcuenca San Pedro..... | 106 |
| Figura 77. Ubicación en planta del deslizamiento San Pedro (No. 1), deslizamiento Cerro Melón (No. 5), y demás deslizamientos superficiales y depósitos de escombros mineros en la MCSP..... | 107 |
| Figura 78. Troncos de madera dejados sobre las laderas inclinadas de la microcuenca San Pedro..... | 108 |
| Figura 79. Muestra MD1..... | 109 |
| Figura 80. Muestra MD2..... | 109 |
| Figura 81. Curvas granulométricas de las muestras analizadas..... | 110 |
| Figura 82. Resultados de la prueba de sedimentación..... | 114 |
| Figura 83. Tirantes máximos de flujo líquido..... | 118 |
| Figura 84. Velocidades máximas del flujo líquido..... | 119 |
| Figura 85. Fuerzas de impacto provocadas por la avenida de flujo líquido..... | 121 |
| Figura 86. Mapa preliminar de peligro por inundación, para un evento de lluvias similar al ocurrido en febrero de 2010..... | 122 |
| Figura 87. Hidrograma líquido e hidrograma sólido..... | 124 |
| Figura 88. Tirantes máximos para el flujo de detritos..... | 126 |
| Figura 89. Fotografía donde se observa el nivel que alcanzó el flujo de lodo en una zona del cauce 100 m aguas arriba de la ZC 1..... | 127 |

| | |
|--|-----|
| Figura 90. Marca de lodo con altura de cuatro metros en una vivienda ubicada en la ZC 1..... | 127 |
| Figura 91. Marca de lodo de seis metros de altura en una vivienda ubicada en la zona de conflicto 3..... | 128 |
| Figura 92. Velocidades máximas del flujo de detritos..... | 129 |
| Figura 93. Una vivienda ubicada sobre la margen del río San Pedro en la zona de conflicto 1, quedó totalmente sepultada por el depósito del flujo de detritos..... | 130 |
| Figura 94. Los bloques de roca, detritos y sedimentos atravesaron las paredes de la iglesia ubicada en la ZC 2 para depositarse en el interior de esta..... | 131 |
| Figura 95. Se muestra el depósito de los detritos y el daño a la iglesia, al fondo se observa el deslizamiento en el Cerro Melón..... | 131 |
| Figura 96. Fuerzas de impacto del flujo de detritos..... | 132 |
| Figura 97. Figura 86. Mapa preliminar de peligro por flujo de detritos, para un evento de lluvias similar al ocurrido en febrero de 2010..... | 133 |
| Figura 98. Hidrogramas unitarios sintéticos del SCS, a) hidrograma adimensional y b) hidrograma triangular (Fuente: U.S. SCS 1972)..... | 145 |
| Figura 99. Automóviles arrastrados por los torrentes de agua y lodo en febrero de 2010... | 148 |
| Figura 100. Destrucción total de una vivienda de dos niveles sobre la margen derecha del río San Pedro..... | 148 |
| Figuras 101. Panorámica desde aguas arriba de los daños en la ZC 1..... | 149 |
| Figura 102. Pequeño deslizamiento rotacional en el ápice de la MCSP detonado por las atípicas lluvias de febrero de 2010..... | 149 |
| Figura 103. Vista frontal del deslizamiento del Cerro Guadalupe, el cual cobró la vida de una familia..... | 150 |
| Figura 104. Labores de limpieza, evacuación y rescate por parte del Ejército Mexicano..... | 150 |
| Figura 105. Escombros y troncos de madera sobre la avenida Nacional, Mineral de Angangueo..... | 151 |
| Figura 106. Afectación sobre una de las calles del barrio de San Pedro, Mineral de Angangueo..... | 151 |
| Figura 107. Destrucción total de una capilla ubicada en la margen derecha del río Catingón. Fue afectada por los flujos de detritos provenientes del cauce y el deslizamiento del Cerro Guadalupe..... | 152 |
| Figura 108. Acumulación de madera, basura y sedimentos en una zona de túnel del río Puercos, esto generó represas que motivaron el desbordamiento del cauce..... | 152 |

ÍNDICE DE TABLAS.

| | Pág |
|--|-----|
| Tabla 1. Proporción de pendientes con respecto al área total de la microcuenca del río San Pedro..... | 15 |
| Tabla 2. Porcentajes de coberturas vegetales en la microcuenca San Pedro..... | 18 |
| Tabla 3. Parámetros morfométricos de la microcuenca San Pedro..... | 22 |
| Tabla 4. Comportamiento del flujo en función de la concentración de sedimentos..... | 34 |
| Tabla 5. Propiedades físicas de flujos hiperconcentrados..... | 48 |
| Tabla 6. Magnitud relativa de los términos que componen la ecuación de onda dinámica, Henderson (1966)..... | 54 |
| Tabla 7. Propiedades de las matrices de flujos de lodo (sólo limo y arcilla). Fuente: O'Brien y Julien (1988)..... | 78 |
| Tabla 8. Esfuerzo de cedencia y viscosidad en función de la concentración volumétrica. Fuente: O'Brien y Julien (1988)..... | 78 |
| Tabla 9. Intensidades de eventos para flujos de lodo y detritos..... | 81 |
| Tabla 10. Estaciones pluviométricas utilizadas para el análisis de lluvias históricas..... | 83 |
| Tabla 11. Altura de precipitación máxima registrada en cada una de las estaciones pluviométricas, a lo largo de su periodo de registros..... | 85 |
| Tabla 12. Frecuencia con que llueve los días 1, 2, 3, 4 y 5 de febrero, en la zona de estudio según las ocho estaciones pluviométricas..... | 87 |
| Tabla 13. Cantidad de lluvia caída con duración de uno y cinco días, para los dos periodos en análisis..... | 90 |
| Tabla 14. Resultados para $h_p=104$ mm..... | 90 |
| Tabla 15. Resultados extrapolados para $h_p=243.5$ mm..... | 90 |
| Tabla 16. Registro de la lluvia de febrero de 2010 por el pluviógrafo "Chincua", para los días del uno al cinco..... | 93 |
| Tabla 17. Tormentas de mayor intensidad por hora, durante el periodo 2006-2009, según registros del pluviógrafo "Chincua"..... | 94 |
| Tabla 18. Registro de mayor altura de precipitación total en una tormenta, durante el periodo 2006-2009, según registros del pluviógrafo Chincua..... | 94 |
| Tabla 19. Precipitación máxima en 24 horas registrada por la estación 16033..... | 99 |
| Tabla 20. Resultados del análisis hidrológico mediante HEC-HMS, para la microcuenca San Pedro, usando el registro de horario de la lluvia del pluviógrafo "Chincua"..... | 100 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 21. Resultados del análisis hidrológico mediante HEC-HMS, para la microcuenca-simulación..... | 102 |
| Tabla 22. Resultados de las pruebas de límites de consistencia..... | 111 |
| Tabla 23. Porcentajes de arcilla de las muestras mediante el método de sedimentación.... | 113 |
| Tabla 24. Selección del número de escurrimiento (N)..... | 144 |
| Tabla 25. Selección del tipo de suelo, para determinar N..... | 145 |
| Tabla 26. Corrección al valor de N, según precipitación antecedente..... | 145 |
| Tabla 27. Valores del hidrograma unitario adimensional, del SCS..... | 146 |
| Tabla 28. Condiciones antecedentes de humedad básicas empleadas en el método SCS. | 146 |
| Tabla 29. Rangos para la clasificación de las condiciones antecedentes de humedad..... | 146 |
| Tabla 30. Coeficientes de rugosidad de Manning para diferentes superficies. Chow V. T., 1982..... | 147 |

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

Los procesos gravitacionales de remoción en masa, coloquialmente conocidos como “deslaves”, constituyen uno de los fenómenos naturales con mayor impacto en asentamientos humanos e infraestructura en general. Anualmente y a nivel global, se registran numerosas pérdidas humanas asociadas a deslizamientos, desprendimientos, pero principalmente, a flujos de detritos. Se considera a esta última tipología como la de mayor peligro debido a la gran velocidad de desplazamiento que puede alcanzar una vez que se ha iniciado. Por lo que asentamientos humanos localizados en su trayectoria, son altamente susceptibles a ser afectados y por lo general se presentan grandes pérdidas humanas además de económicas. Por ejemplo, durante la primera quincena de agosto del 2010, en China se registraron más de 2 mil decesos humanos a consecuencia de avalanchas de lodos y detritos provocadas por intensas precipitaciones (IFRC, 2010). En el año 2009 en toda la zona de costa del estado de Vargas en Venezuela después de caer 911 mm de lluvia en tres días; se suscitaron varios deslizamientos y flujos de detritos que provocaron la muerte de casi 19,000 personas (Larsen *et. al* 2002), siendo considerado el peor desastre natural ocurrido en Venezuela en el siglo XX. En Perú y Colombia después de los terremotos y las inundaciones, los flujos de detritos son el fenómeno que ocasiona más pérdidas de viviendas (EPN, 2008).

En nuestro país, y en particular en la ciudad de Angangueo (oriente de Michoacán), en los primeros días de febrero del 2010 se registró cerca de 35.8% de la precipitación total anual en solo cuatro días, debido a los frentes fríos No. 28 y 29; y la interacción con la corriente de chorro y otros fenómenos climatológicos que propiciaron la quinta tormenta invernal en el territorio nacional (Aguilar-Garduño, 2010). Estas lluvias atípicas y extraordinarias detonaron en numerosos deslizamientos que al mezclarse con el escurrimiento superficial dieron paso a flujos hiperconcentrados y de detritos. El arribo de estos flujos de lodo y detritos en la zona urbana fue devastador, ya que provocaron la muerte de 28 personas y dejaron 80% de Mineral de Angangueo destrozado, por lo que la zona fue declarada zona de desastre natural por la Secretaría de Gobernación (CONAGUA, 2010). Esto ocurrió debido a la invasión de los márgenes aluviales de los cauces San Pedro, Catingón y Carrillos, dicha reducción de la sección hidráulica ha sido producto del crecimiento desordenado de la ciudad, asentando todo tipo de construcciones a lo largo de los ríos, el estrechamiento y rectificación de los cauces antes nombrados originó la obstrucción de los canales y túneles dando pie a la formación de represas compuestas de lodo, piedras y troncos que ocasionaron desbordamientos e inundaciones en varios sectores de Mineral de Angangueo con gran impacto económico ya que fueron arrastrados todo tipo de objetos desde basura, muebles, herramientas, equipos

domésticos e industriales hasta vehículos y maquinaria. Los depósitos de escombros mineros ubicados a lo largo de los cauces fueron un ingrediente extra para incrementar el desastre, ya que además de aportar material de arrastre de diversos tamaños, significan también contaminación por las sustancias químicas agregadas a dichos materiales en los procesos de explotación minera.

La capacidad de arrastre de los flujos generados desprendió en muchos casos la plantilla del cauce y la carpeta asfáltica, dejando en evidencia la existencia de depósitos de material aluvial en épocas pasadas, lo cual muestra que este tipo de eventos han ocurrido con anterioridad en 1940, 1958 y 1995, sin embargo la gente no los recuerda, o no los vivió motivo por el que invade los cauces y sus márgenes.

El estudio del peligro de detritos y flujos hiperconcentrados es complicado de abordar, pues los modelos matemáticos de la hidráulica tradicional no funcionan para flujos con alta concentración de sedimentos. Por ello es que en este proyecto se realizó el estudio del fenómeno mediante técnicas de simulación numérica con ayuda del programa de elemento finito FLO-2D, que simula flujo de fluidos no-newtonianos en abanicos aluviales, usando un modelo reológico cuadrático que incluye la tensión viscosa, esfuerzo de cedencia, turbulencia y condiciones de esfuerzo dispersivo en función de la concentración de sedimentos. El análisis fue enfocado a la microcuenca del río San Pedro debido a que sus características físicas se adaptan de mejor manera en la aplicación del modelo FLO-2D, evitando tiempos de simulación exagerados; además las evidencias de campo en esta zona son más consistentes para obtener una buena calibración del modelo. Para aplicar el modelo fue necesario realizar previamente un levantamiento topográfico de detalle, análisis de precipitaciones, cálculo de escurrimiento superficial y estudios de identificación y clasificación de suelos.

El desastre recién registrado en Angangueo representó una excelente oportunidad para el diseño y calibración de un modelo numérico, con el cual se realizó la zonificación de susceptibilidad por inundación y flujo de detritos. Los resultados obtenidos indican áreas máximas de inundación y zonas de conflicto hidráulico en el barrio San Pedro. En estas últimas, la modelización revela un incremento de los tirantes, velocidad y fuerzas de impacto tanto para eventos de avenidas de agua como para flujos hiperconcentrado. Estas variables dinámicas del flujo se agudizan debido al estrechamiento del cauce y a la invasión de su llanura de inundación, así como a su propia topografía. Con base en los resultados anteriores, se construyó el mapa de peligrosidad por flujos de detritos en el sector centro-este de la ciudad, que representa un producto cartográfico de vital importancia para la planificación del territorio y prevención de desastres de Angangueo.

I.1. JUSTIFICACIÓN.

Estudiar el comportamiento dinámico de los flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas, para la construcción de un modelo numérico a partir del cual sean valorados los niveles de peligrosidad, y posteriormente en trabajos futuros la vulnerabilidad y riesgo, en la comunidad de Mineral de Angangueo, Mich.

I.2. HIPÓTESIS.

El fenómeno hidrometeorológico atípico ocurrido del 1 al 5 de febrero de 2010, que originó deslizamientos que evolucionaron en un enjambre de flujos de detritos en las partes de alta montaña, son un evento reciente cuyos depósitos son aprovechables para ajustar un modelo numérico que permita en el futuro la prevención y/o mitigación de los efectos causados por flujos hiperconcentrados, en el municipio de Angangueo. Además de ser el inicio para implementar una metodología que permita la elaboración de mapas de peligro, sobre este tipo de procesos gravitaciones de remoción en masa en la República Mexicana.

El impacto de los flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas registradas en febrero del 2010, en el sector noreste de Angangueo, fue agudizado por barreras antropogénicas localizadas a lo largo del río San Pedro. Las obras hidráulicas de restauración posteriores al desastre, lejos de proteger y mitigar el impacto de eventos futuros, incrementa la magnitud del fenómeno: la historia se repite.

La modelización numérica de flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas, combinada con una topografía detallada, es una herramienta invaluable en el estudio del peligro y riesgo por este tipo de fenómenos.

I.3. OBJETIVOS.

General.

Estudiar y evaluar el peligro por flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas mediante simulación numérica en FLO-2D, en el sector NE del municipio de Angangueo, Mich.

Particulares.

Realizar un levantamiento topográfico de detalle en el sector NE de Angangueo, que permita la generación de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de alta resolución para un modelado más preciso.

Obtener parámetros físicos de la microcuenca San Pedro, como la morfometría, topografía del cauce, tipo de sedimentos y cálculo de escurrimiento superficial, básicos para la construcción del modelo numérico en FLO-2D.

Construir y calibrar el modelo numérico en FLO-2D, a partir de las evidencias en campo del paso del flujo de detritos.

Sobre el modelo calibrado evaluar la influencia de obras antropogénicas previas y posteriores al evento de febrero del 2010.

Elaborar un mapa de peligro y/o susceptibilidad por flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas, con ayuda de FLO-2D.

CAPÍTULO II.

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

La zona de estudio es la microcuenca hidrográfica del río San Pedro (MCSP), que se localiza en el municipio de Angangueo en el oriente del estado de Michoacán de Ocampo, México. Angangueo se localiza en las coordenadas 19° 37" de latitud Norte y en los 100° 17" de longitud Oeste, a una altitud de 2,580 msnm. Limita con los municipios de Senguio, Ocampo, Áporo y Estado de México; al norte, sur, oeste y este, respectivamente (Figura 1). Su distancia a la capital del estado Morelia es de 170 km. La superficie de su término municipal es de 85.64 km² la cual representa 0.14% del total del estado. Según el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) en 2010 contaba con una población de 4,601 habitantes.

Angangueo se localiza a 34 km al norte de Zitácuaro y el acceso es por la desviación de San Felipe los Alzati, tomando la carretera federal No. 15 México-Morelia. Si se toma la súper carretera México-Morelia-Guadalajara, Angangueo se ubica a 40 km de la autopista, dirigiéndose a Maravatío y seguir a Irimbo para tomar la desviación a Áporo.

Mineral de Angangueo es la cabecera municipal de Angangueo y fue la zona más afectada por la trascendencia del fenómeno meteorológico ocurrido en febrero de 2010. Esta comunidad es perjudicada por la confluencia de los ríos Catingón, San Pedro y Carrillos, cuyas microcuencas hidrográficas se ubican al norte, centro y sur, respectivamente, del sector oriente del municipio de Angangueo (Figura 1).

Para el desarrollo del presente trabajo se seleccionó la microcuenca del río San Pedro ya que ésta tuvo mayor influencia en el desastre ocurrido en 2010, además que se adapta de mejor manera en la aplicación del programa FLO-2D. La microcuenca San Pedro se ubica entre las coordenadas geográficas 100°15'10.84" a 100°17'5.27" de longitud Oeste y 19°37'44.05" a 19°36'51.04" de latitud Norte.

La modelización del evento sobre la MCSP tiene como objetivo conocer la dinámica (velocidades, fuerzas de impacto, volúmenes, tirantes de flujo, entre otros), del flujo torrencial que afectó a la comunidad Mineral de Angangueo, específicamente a las colonias o barrios cercanos al punto de salida de dicha microcuenca y a las viviendas ubicadas en las cercanías del cauce; la culminación del trabajo estará acompañada con la presentación de un mapa preliminar de peligro por flujos de detritos, los cuales fueron consecuencia de la afectación meteorológica, hidrológica y deslizamientos ocurridos en las laderas de la zona alta de la microcuenca.

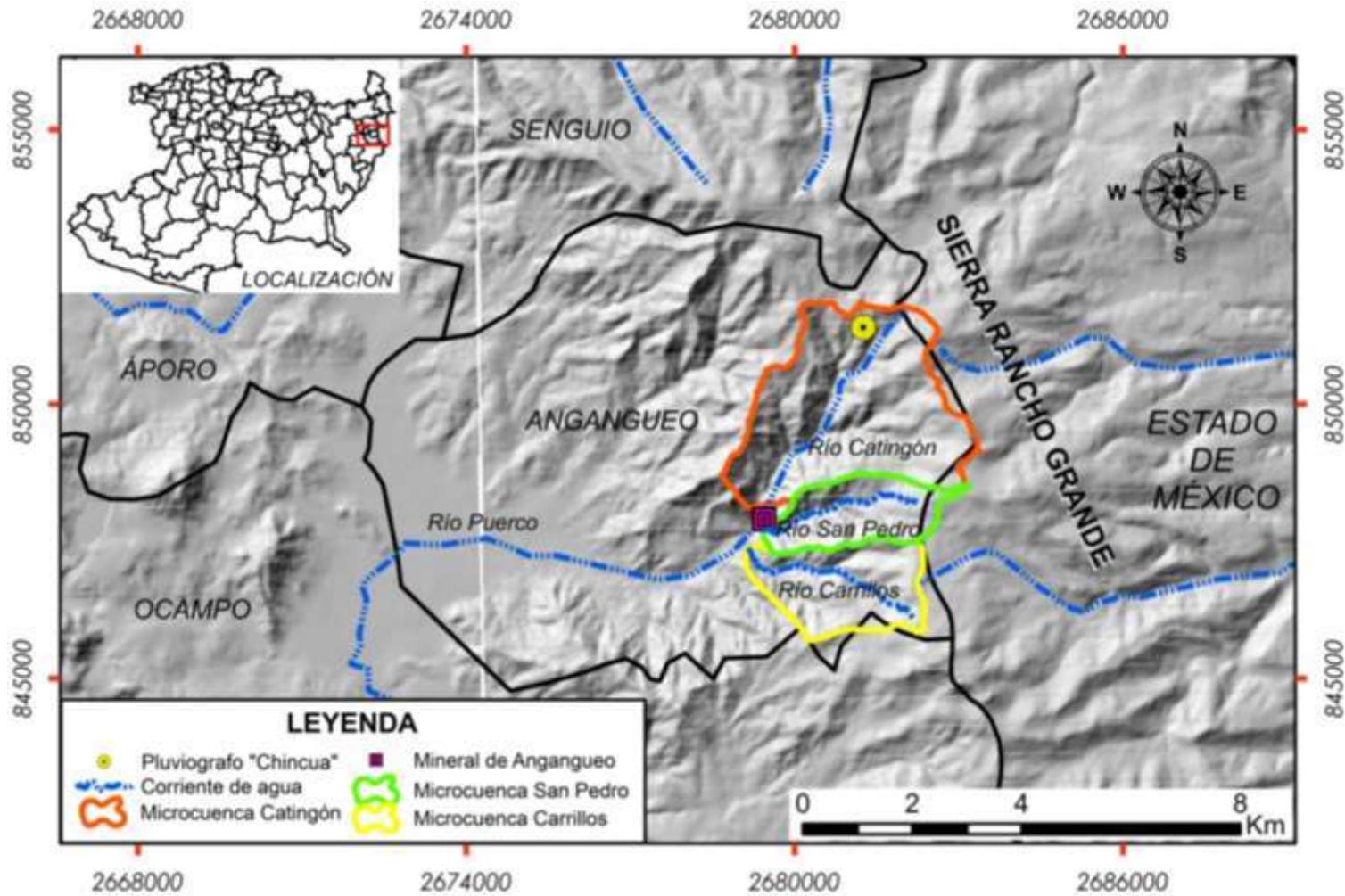


Figura 1. Localización del municipio de Angangueo.

Se observan las tres microcuencas hidrográficas que afectan hidrológicamente a Mineral de Angangueo. La cuenca de análisis es la del río San Pedro. Nótese la ubicación del pluviógrafo “Chincua” que registró la lluvia horaria de febrero de 2010.

En los siguientes párrafos se presenta una caracterización de la microcuenca resaltando que, algunas de estas características fueron factores condicionantes decisivos para magnificar la anomalía meteorológica al grado de elevarla a desastre natural, declarado así por la Secretaría de Gobernación de la República. En cada apartado se menciona la manera en que favoreció dicha característica intrínseca en el engrandecimiento del peligro.

II.1. GEOLOGÍA.

La microcuenca San Pedro pertenece a la unidad andesítica de Angangueo (TmA) (Figura 2) que representa la manifestación masiva con que se inicia la actividad volcánica del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) en la zona (Alcántara-Ayala *et al.*, 2011). Esta unidad se trata de un macizo conformado por varios aparatos volcánicos de composición andesítica con una textura porfídica y en algunas zonas afanítica microcristalina. La edad de esta andesita corresponde al Mioceno. Sin embargo, en este trabajo se hará una breve descripción de la estratigrafía desde el basamento hasta los depósitos del cuaternario, para explicar el papel que jugaron las rocas volcánicas y la secuencia de sedimentos actuales en el evento de 2010.

Angangueo se caracteriza por dos secuencias sedimentarias asociadas a la margen convergente (Pasquaré *et al.*, 1991):

- El terreno Guerrero constituido de metalutitas y metacalizas
- Una secuencia suprayacente de rocas volcánicas del Mioceno-Cuaternario del CVTM.

Terreno Guerrero (Hauteriviano-Albiano). La secuencia vulcano-sedimentaria de Zitácuaro, Angangueo y Tlalpujahuá ha sido objeto de estudio por su gran potencial minero en oro y plata. La principal característica de la región de Zitácuaro, correlacionada con los afloramientos de Angangueo, consiste en una unidad vulcano-sedimentaria metamorfizada con edades que van desde el Jurásico superior al Cretácico inferior, caracterizada por esquistos pelíticos con intercalaciones de horizontes de arenisca (Garduño *et al.*, 1999, Israde y Martínez, 1986). Y por encima en discordancia, una secuencia constituida de lavas andesíticas, *pillow* lavas, conglomerados, areniscas y calizas de plataforma, aunque esta discordancia estratigráfica o tectónica no ha sido observada en esta zona. En sucesión estratigráfica por encima de este depósito, se encuentra un estrato de rocas terrígenas: areniscas y conglomerados. El terreno Guerrero presente en Angangueo, se divide en dos formaciones: Formación Acapetlahuaya (KapMV) y Amatepec (KapaMCz-MLu) (Figura 3).

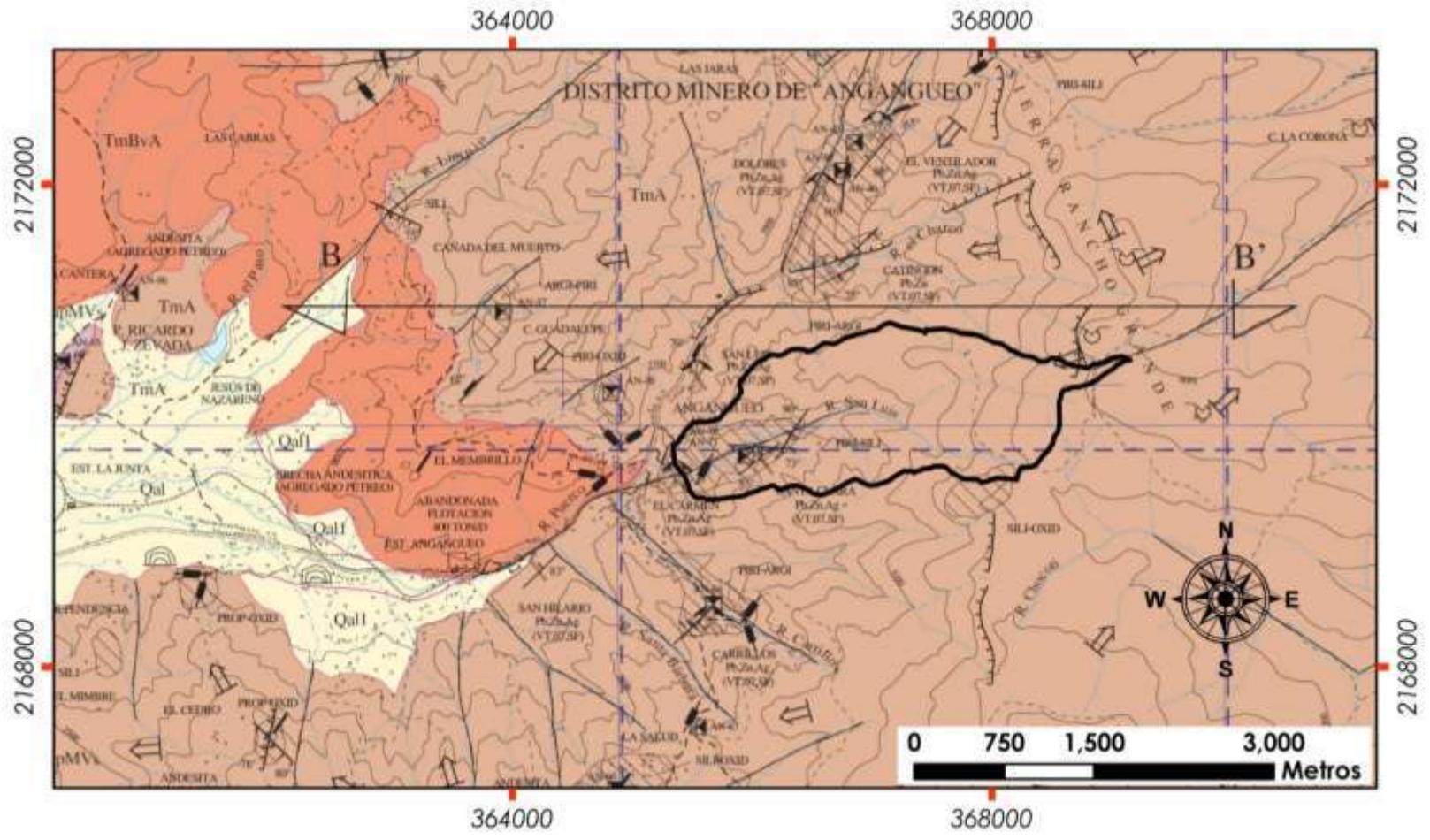


Figura 2. Extracto de la carta geológico-minera E14-A26 Angangueo.

La figura muestra la ubicación de la microcuenca San Pedro dentro de la carta geológica. Obsérvese la ubicación del perfil B-B' de la Figura 3.

Formación Acapetlahuaya (Aptiano superior). Compuesta por sedimentos volcanodetríticos interestratificados con lentes de caliza (Campa *et al.* 1974, 1979; Guerrero, 2004). Algunos conglomerados, brechas volcánicas, areniscas y pelitas tobáceas alternan con niveles de lavas básicas masivas, ocasionalmente almohadilladas seguidas de riolitas. Los conglomerados contienen fragmentos mal clasificados de basalto y andesita, que llegan a ser bloques de tamaño superior a 20 metros en una matriz de arena.

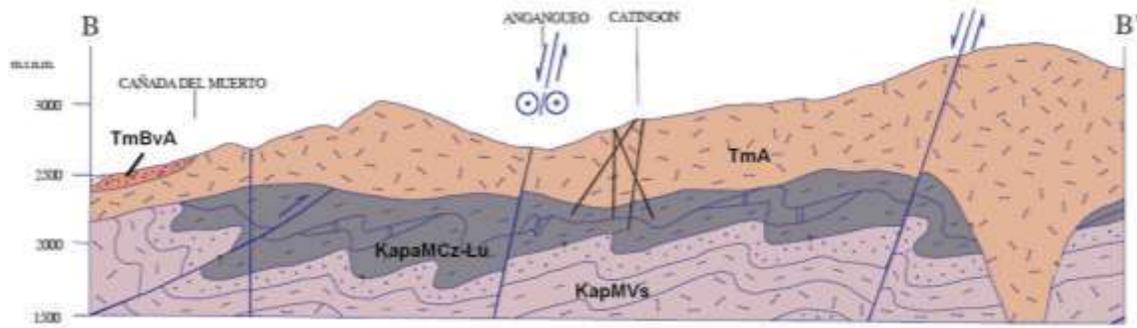


Figura 3. Perfil geológico B-B' tomado de la carta geológico-minera E14-A26 escala 1:50,000.

Donde TmA es la unidad andesítica de Angangueo, TmBvA es la unidad brecha andesítica y debris flow, KapaMCz-Lu es metacaliza-metalutita de la formación Amatepec y KapMVs unidad metavolcano-sedimentaria de la formación Acapetlahuaya.

Los afloramientos de esta formación en la zona de estudio están bajo las morfoestructuras y gracias a su posición, han sido parcialmente preservados de los fenómenos erosivos para ser luego cubiertos por la unidad volcánica del CVTM, en este caso la unidad está en discordancia angular. En Cieneguilla y en Hacienda El Cristo, en cambio, el contacto con la andesita de Angangueo es tectónico, debido a fallas normales con orientación NW-SE.

Formación Amatepec (Aptiano-Albiano). Es una secuencia sedimentaria carbonática en la que se destacan diferentes litofacies, como: calizas intermareales de arrecife de pendiente y de cuenca, con abundantes estructuras primarias de sedimentación (Guerrero *et al.*, 1992). Dicha unidad está compuesta predominantemente por una estratificación de delgados horizontes de caliza, margas, lutitas con abundante materia orgánica, que le confiere una coloración negra grisácea y raros horizontes de pedernal. El metamorfismo y la relación estratigráfica que interesa en esta formación, es la misma de la unidad anterior. Las características litológicas y la presencia de material orgánico indican un ambiente de sedimentación de cuenca profunda, con características de reducción.

Conglomerado Post-Laramide "San Antonio" (Eoceno superior-Oligoceno inferior). Este conglomerado se trata de sucesiones de la orogenia Laramide. Esta formación es una unidad molásica constituida por un conglomerado polimítico semiconsolidado (Tpaecgp-Ar), compuesto de fragmentos de rocas metavolcánicas y metasedimentarias, subarredondeados e incluidos en una matriz arenosa. Al norte, la formación se encuentra en contacto tectónico, debido a una falla normal de dirección E-W, con las coladas basálticas del Cuaternario del CVTM. Al oeste las mismas lavas suprayacen de manera discordante la unidad, mientras al sur están las ignimbritas del Triásico coronando.

Rocas volcánicas del Mioceno-Plioceno del CVTM.

En la zona de estudio este vulcanismo está representado por diversas estructuras: conos cineríticos, domos, volcanes monogenéticos, estratovolcanes, calderas de emisión fisural. La composición de los productos emitidos es heterogénea: de básica a ácida. Esta actividad volcánica se ha desarrollado sobre una zona de debilidad cortical expresada por la Fractura Taxco-San Miguel de Allende, de orientación general NNW-SSE (Demant, 1982; Lugo *et al.*, 1985). Los depósitos volcánicos originados por el CVTM afloran en casi toda el área de estudio (Figuras 2 y 3); estos pueden dividirse en tres grupos: roca volcánica miocénica, roca de la caldera El Capulín y roca del Cuaternario. Las primeras están constituidas por un volumen sustancial de andesita que constituye la Sierra de Angangueo (Figura 8); las segundas están ligadas al colapso de la caldera Capulín durante el Plioceno, y finalmente la última, concluye la secuencia del arco volcánico continental (CVTM) generando una serie de edificios monogenéticos de composición principalmente basáltica.

La andesita miocénica de la Sierra de Angangueo, Los Azufres y Mil Cumbres, son la manifestación del vulcanismo continental que ha dado origen a la parte inferior del CVTM y se puede distinguir en tres formaciones, que se describen a continuación:

Andesita de Angangueo (Mioceno inferior). Esta unidad forma las Sierras Chincua, Rancho Grande y Campanario que constituyen la Sierra de Angangueo de dirección NNW-SSE (Figura 8), la cual es un macizo formado por varios aparatos volcánicos, todos de composición andesítica. La textura es variable, aunque predomina la textura porfídica y en menor medida la afanítica microcristalina. Sin duda, la variación de la textura y de las asociaciones mineralógicas indican la heterogeneidad del evento eruptivo típico de una asociación volcánica con composición intermedia, que muestra que los centros de emisión fueron numerosos y que la diferenciación magmática ha experimentado variación local durante el emplazamiento.

Brecha andesítica “Estación Angangueo” (Mioceno superior). Unidad constituida por brecha andesítica y *debris flow* (TmBvA); se compone de fragmentos andesíticos, con alteración de color verde, morado y gris en una matriz de lava afanítica de la misma composición. Localmente se observan afloramientos de material brechado con aspecto similar de toba, con presencia de pseudo-estratificación alterada y compacta. Esta unidad, constituida de un flujo detrítico bien consolidado con matriz andesítica, representa el último evento producto del vulcanismo miocénico de la Sierra de Angangueo. Aunque no ha sido claramente observado, se puede decir que las brechas son más jóvenes y que están encima de la andesita en forma discordante.

Andesita Cerro Jaltepec (Mioceno tardío): constituido por una andesita, holocristalina con fenocristales de hornblenda (Tms(?)A), cubierta parcialmente en las laderas por una ignimbrita y ambos por depósitos piroclásticos de caída.

Depósitos del Cuaternario. Los depósitos sedimentarios actuales en la MCSP y zonas cercanas se pueden esquematizar en la Figura 4.

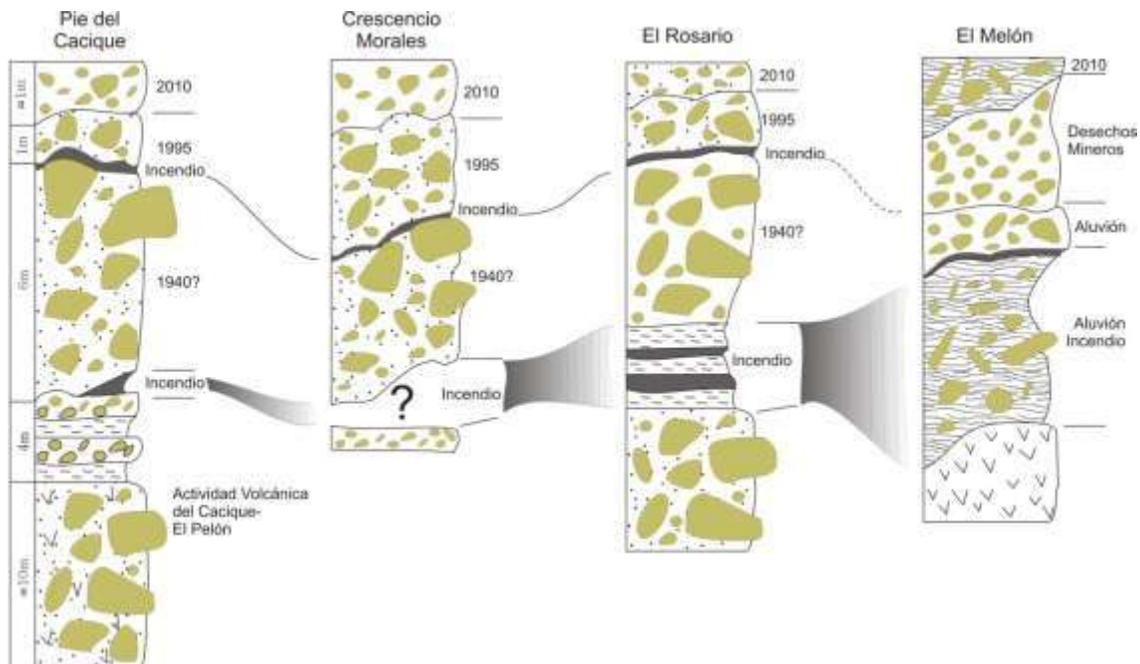


Figura 4. Columnas litológicas que correlacionan eventos incendio-aluvión, en un contexto regional.

También indican los depósitos del cuaternario en la zona de estudio (El Melón) y zonas cercanas como Zitácuaro (Pie del Cacique y Crescencio Morales)

La columna litológica “El Melón” es la que corresponde a la zona de estudio; de la base a la cima se tiene la andesita Angangueo (TmA) descrita anteriormente, en contacto angular suprayace un estrato con espesor de 1.4 m de material con matriz limo-arcillosa rico en carbón con clastos angulosos mayores a 50 cm y troncos de árbol (coníferas) de hasta de 4 m, con diámetros de 40 cm (aluvión-incendio), el estrato se termina con una capa de 15 cm de carbón orgánico. En contacto erosivo se encuentra un depósito de aluvión con bloques angulosos de andesita de 10 a 40 cm embebidos en una matriz arcillosa, el estrato tiene un espesor de unos 60 cm. Los depósitos de residuos mineros se encuentran suprayaciendo al aluvión en contacto erosivo, se trata de material heterogéneo con clastos angulosos del tamaño de gravas hasta detritos, se pueden observar espesores de centímetros hasta decenas de metros a lo largo de los ríos San Pedro y Catingón; coronando a los depósitos mineros se encuentran depósitos coluviales.

De acuerdo a las columnas, puede observarse una relación entre la ocurrencia de incendios y aluviones ocurridos en 1940 y 1995. La hipótesis que plantea el equipo de trabajo que participó en esta tesis es que los incendios prepararon el terreno para la ocurrencia de aluviones importantes, que fueron disparados por sucesos de lluvias extraordinarias en 1940 y 1995.

Durante las lluvias excepcionales de febrero de 2010, los depósitos de coluvión, residuos mineros y de antiguos aluviones fueron aporte de material sólido por efectos de erosión hídrica tanto en las corrientes, como de precipitación sobre las laderas. Este material sólido afectó de manera importante las viviendas ubicadas aguas abajo. Los torrentes de agua también dejaron al descubierto la presencia de los incendios y antiguos aluviones ilustrados en las columnas anteriores, como puede observarse un corte sobre el cauce San Pedro en la Figura 5.



Figura 5. Corte sobre el cauce San Pedro, que quedó expuesto posterior al aluvión de 2010.

Puede notarse un horizonte importante de carbón producto de incendios antiguos, encima se observan depósitos de inundación siendo coronados por los depósitos mineros.

Es importante mencionar que los depósitos de material granular encontrados en el barrio San Pedro, fueron debidos al arrastre del fondo del río y de los depósitos de escombros mineros. Las arcillas y limos son producto de la erosión de los depósitos de talud en las partes cercanas a la salida de la cuenca, de los depósitos aluviales y otra parte fue producto de los finos dentro de los escombros mineros encontrados a lo largo del cauce. También los deslizamientos superficiales sobre las laderas aportaron finos, pero en menor medida.

II.2. FISIOGRAFÍA.

El municipio de Angangueo se encuentra dentro de la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM). La Sierra de Angangueo es el rasgo morfotectónico más representativo de esta zona, de orientación Noroeste-Sureste, con altitudes que varían de los 2,400 a los 3,600 msnm, siendo su punto más alto el Cerro del Campanario con 3,640 msnm. La Sierra de Angangueo esta compuesta por tres conjuntos montañosos: Sierra Chincua, Sierra Rancho Grande y Sierra Campanario (Figura 6).

Sierra Chincua. Se localiza en la parte NW de la sierra y está compuesta por materiales andesíticos terciarios muy modelados. En la parte más montañosa las pendientes predominantes son superiores a los 15° alcanzando frecuentemente los 35° en varias laderas, mientras que el piedemonte supera siempre los 5° (Ramírez, 2001).

Sierra Rancho Grande-Campanario. Este bloque forma la mayor parte de la mitad sur de la Sierra de Angangueo. Está compuesto por materiales andesíticos del Plioceno. Es un conjunto montañoso de relieve abrupto, con pendientes que oscilan desde los 10° hasta los 25°. En la vertiente occidental estos valores de pendiente con cierta frecuencia llegan a los 35°, incluso más, mientras que en la vertiente oriental eso sólo sucede en pocos sitios muy localizados (Ramírez, 2001).

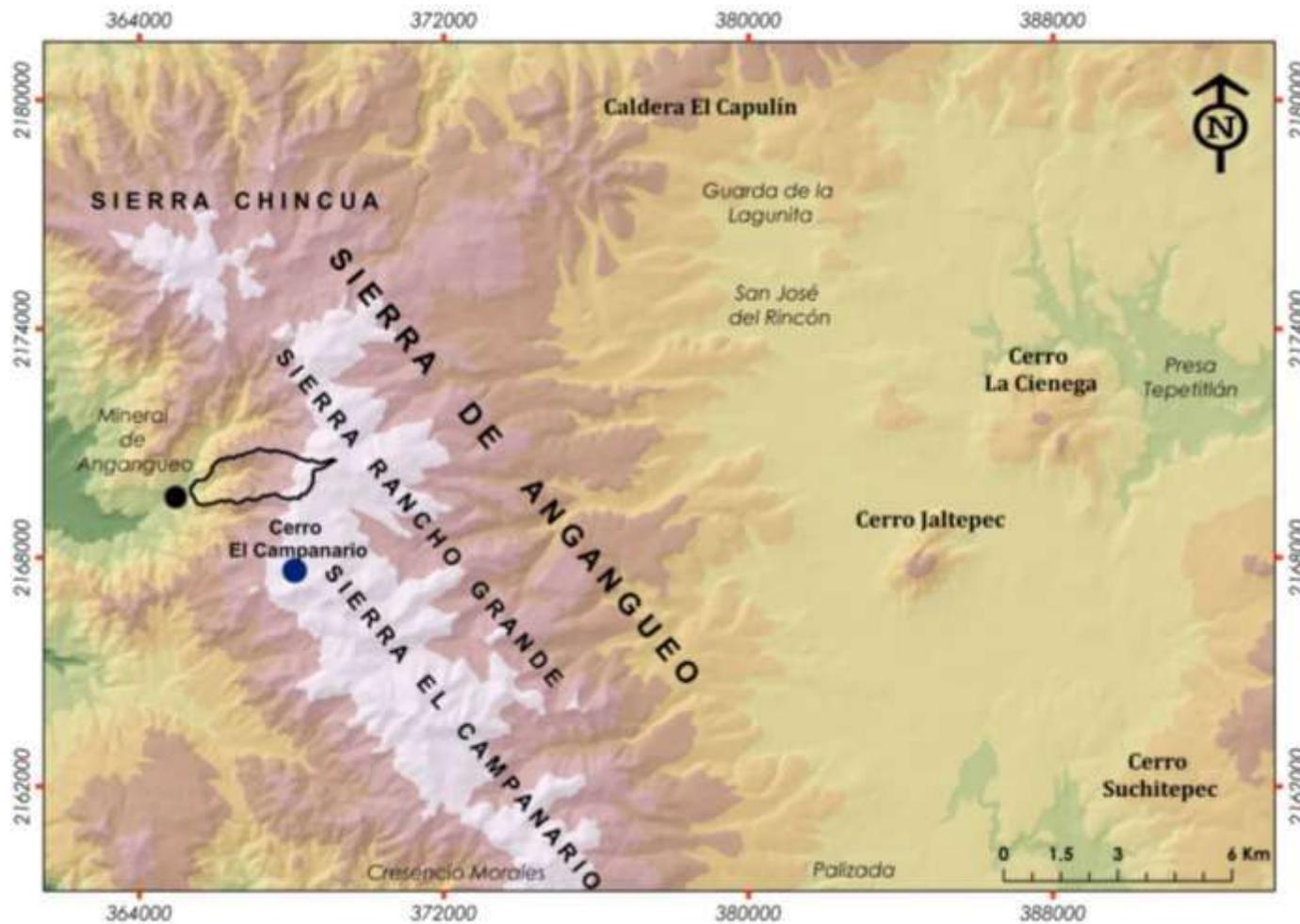


Figura 6. Localización de las morfoestructuras más importantes en la zona de estudio (Modelo Digital de Elevaciones E14-A26).

Se observan la Sierra de Angangueo y sus conjuntos montañosos: Sierras Chincua, Rancho Grande y El Campanario. También se ubica a Mineral de Angangueo y a la microcuenca San Pedro, en el contexto regional.

La microcuenca del río San Pedro se ubica dentro del conjunto montañoso Sierra Rancho Grande-Campanario y presenta un relieve abrupto (Figura 7), ya que sus laderas tienen pendiente predominantemente alta (Tabla 1).

Tabla 1. Proporción de pendientes con respecto al área total de la microcuenca del río San Pedro.

| Clase | Pendiente | Área (km ²) | % |
|----------|-----------|-------------------------|------|
| Muy baja | 0-6° | 0.1084 | 3.2 |
| Baja | 6-12° | 0.2485 | 7.3 |
| Media | 12-25° | 1.4596 | 43.1 |
| Alta | 25-45° | 1.5414 | 45.4 |
| Muy Alta | >45° | 0.0341 | 0.1 |

Las corrientes de agua se han abierto paso sobre las laderas fuertemente inclinadas de la microcuenca, disectando el relieve y ocasionando que los tributarios alimenten rápidamente el cauce principal en momentos de precipitación pluvial, sobre todo en tormentas intensas. Este efecto se reflejó en el incremento de la peligrosidad del fenómeno, ya que el suelo, los detritos y bloques de roca que se encontraban sueltos en las zonas altas e inclinadas fueron más susceptibles a ser movilizados y se apresuraron a ser encauzados y arrastrados hacia aguas abajo, a zonas habitadas de Mineral de Angangueo, lo que redujo los tiempos para alertar y evacuar a las personas.

Este relieve escarpado y de topografía irregular que predomina en las tres microcuencas de aportación, significa encontrar ríos principales cortos y de fuerte pendiente, lo que se refleja en mayor energía potencial (Figura 8) y por ende mayores fuerzas de impacto sobre las edificaciones, además de provocar un escurrimiento superficial mucho más rápido reduciendo los tiempos de concentración y causando avenidas u oleadas de flujo súbitas. El cauce San Pedro tiene un desnivel topográfico de 851 m, característica que le da una gran capacidad para arrastrar sedimentos de grandes tamaños.

También, la morfometría del relieve fue fundamental como factor condicionante para provocar que los deslizamientos y desprendimientos de suelo derivados de las continuas lluvias, aparecieran en zonas provistas de vegetación (Figura 10).

En general, las laderas con altos ángulos de inclinación de la MCSP y la cantidad de lluvia recibida en su superficie fueron un agente desestabilizador importante para la generación de deslizamientos y posteriormente la formación de flujos de lodo y detritos con alta energía cinética.

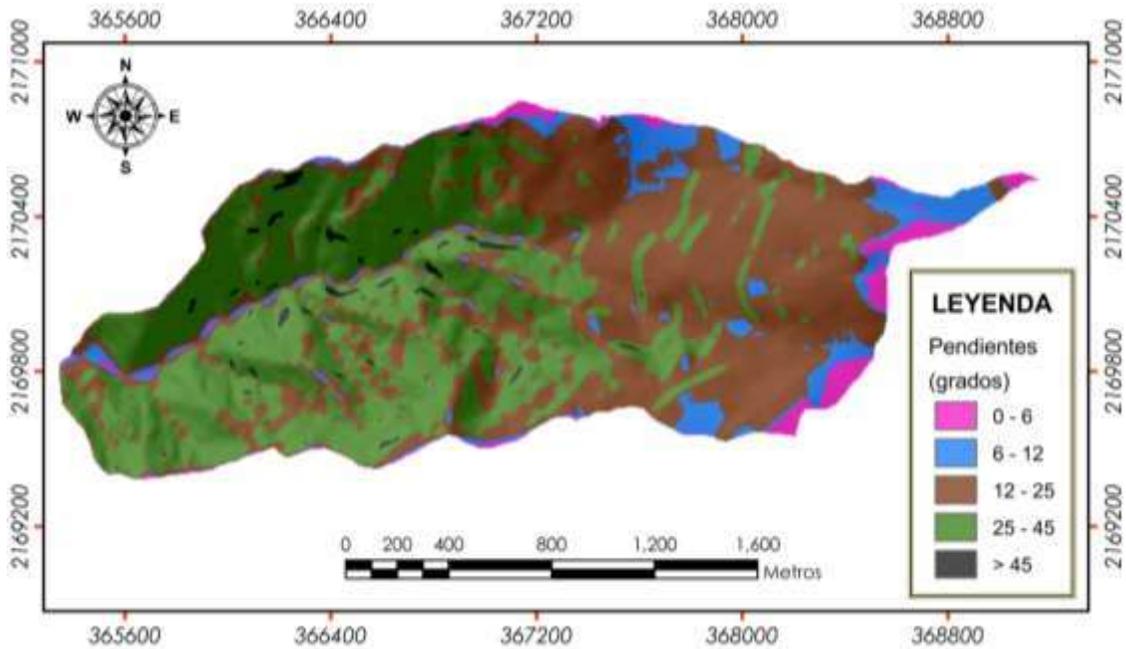


Figura 7. Mapa de pendientes de la microcuenca San Pedro.

El mapa está clasificado con base en rangos de pendiente que propician la inestabilidad. Se observa que predominan pendientes medias y altas.



Figura 8. Imagen en perspectiva de Google Earth que muestra la microcuenca del río San Pedro.

Las laderas fuertemente inclinadas en la zona de estudio motivaron los desprendimientos de suelo. Se observan algunos de los principales deslizamientos detonados en la zona.

II.3. CLIMA Y VEGETACIÓN.

En Mineral de Angangueo de acuerdo a la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y en base a la clasificación de Koppen modificada por García (1988); la microcuenca San Pedro queda dentro de los límites de un clima semifrío, subhúmedo con verano fresco largo Cb (w2), temperatura media anual entre 5 °C y 12 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C, temperatura del mes más caliente 22 °C. La precipitación en el mes más seco es menor a 40 mm; las lluvias de verano y el porcentaje de lluvia invernal es del 5 al 10.2% del total anual. Y la precipitación media anual oscila entre los 800 y 1200 mm. Debido a que las lluvias constituyeron el factor detonante del desastre del 2010, se describirán a mayor detalle en capítulos posteriores.

La vegetación existente en la MCSP puede observarse en el mapa de la Figura 9 y el porcentaje en que participan estas coberturas pueden verificarse en la Tabla 2.

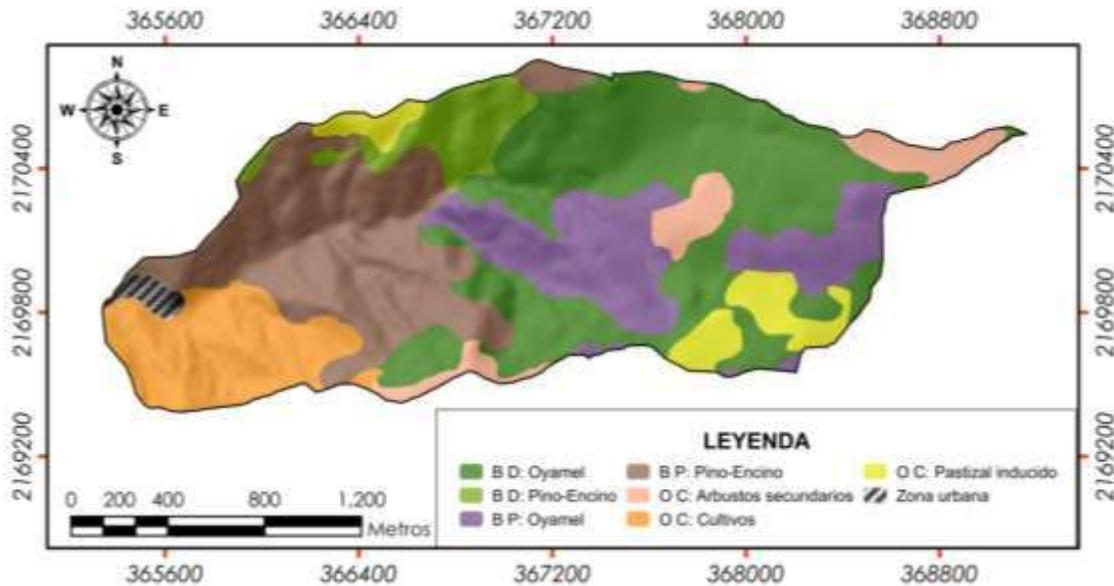


Figura 9. Mapa de cobertura vegetal para la microcuenca San Pedro.

El mapa es modificado de: Vegetación y cubiertas del suelo, 2006. Reserva de la biosfera de la Mariposa Monarca, México. Escala 1:75,000. En este mapa no se considera zonas deforestadas.

Los bosques de oyamel se encuentran sobre pendientes entre 10° y 30°. El estrato arbóreo está compuesto de árboles entre 25 y 30 m de altura. Ocasionalmente se encuentra acompañado por algún elemento de *Salix paradoxa* o *Cupressus lusitanica*, que pueden llegar a medir 8 y 25 m de altura, respectivamente. Este estrato tiene una cobertura promedio entre 50 y 75%,

alcanzando densidades en torno a los 500 árboles por hectárea (Ramírez, 2001). Los bosques de pino-encino también se encuentran sobre pendientes que oscilan entre 10° y 30°. Son bosques ligeramente más densos que los anteriores en todos los niveles. El estrato arbóreo tiene una cobertura entre 75 y 100%, donde, además de encontrarse oyamel, se encuentran pinos y encinos, además de otros árboles, como madroños (*Arbutus glandulosa* y *A. xalapensis*). La densidad de árboles por hectárea oscila entre 500 y 700 elementos (Ramírez, 2001). La perturbación de estos bosques en algunos casos es relevante, y son el resultado de la eliminación del arbolado, producto de un constante y desordenado proceso de deforestación.

Tabla 2. Porcentajes de coberturas vegetales en la microcuenca San Pedro.

| Cobertura vegetal en la MCSP | | |
|------------------------------|-------------------------|------------|
| Bosque Perturbado | Área (km ²) | % |
| Pino-Encino | 0.79 | 23.18 |
| Oyamel | 0.53 | 15.51 |
| Bosque denso | | |
| Pino-Encino | 0.18 | 5.25 |
| Oyamel | 1.11 | 32.85 |
| Otras cubiertas | | |
| Pastizal inducido | 0.18 | 5.40 |
| Arbustos secundarios | 0.19 | 5.58 |
| Cultivos | 0.38 | 11.25 |
| Zona urbana | 0.03 | 0.97 |
| Total: | 3.39 | 100 |

Los pastizales deben su presencia a la intervención humana, que ha desprovisto al suelo de su cubierta original y ha mantenido la actual para su conveniencia. Así mismo se encuentran zonas de cultivo y/o espacio agropecuario, en las que parecieran eran zonas de matorral templado. Generalmente agricultura de temporal es el uso que se le ha dado a estas porciones de vegetación.

Es importante resaltar la evidente deforestación en la microcuenca ya que la tala inmoderada de las especies de maderas preciosas ha dejado zonas desprovistas de vegetación muy significativas. Aunque esta actividad antrópica, no parece haber sido causa de los deslizamientos más importantes, si afectó sobremanera a la población Mineral de Angangueo, ya que, la mayoría de los restos de madera y troncos abandonados de manera intencional o no en las altas cumbres, comenzaron su movilización ladera abajo, debido a la gran cantidad de agua, ocasionando impactos severos en las viviendas de los anganguenses (figura 11), pero

además fueron material para la formación de represas en las zonas de túnel y canales (ver Anexo II), propiciando desbordamiento e inundaciones mas graves. Fue tal la movilización de las maderas que llegaron grandes cantidades al centro histórico de la población formando acumulaciones importantes de diversos tamaños (Figura 12). La afectación por los troncos se vio materializada en mayores pérdidas económicas, debido a la pérdida total o parcial de varias de las viviendas en su mayoría construidas de tabique y cemento, aunque también algunas eran de adobe y madera.

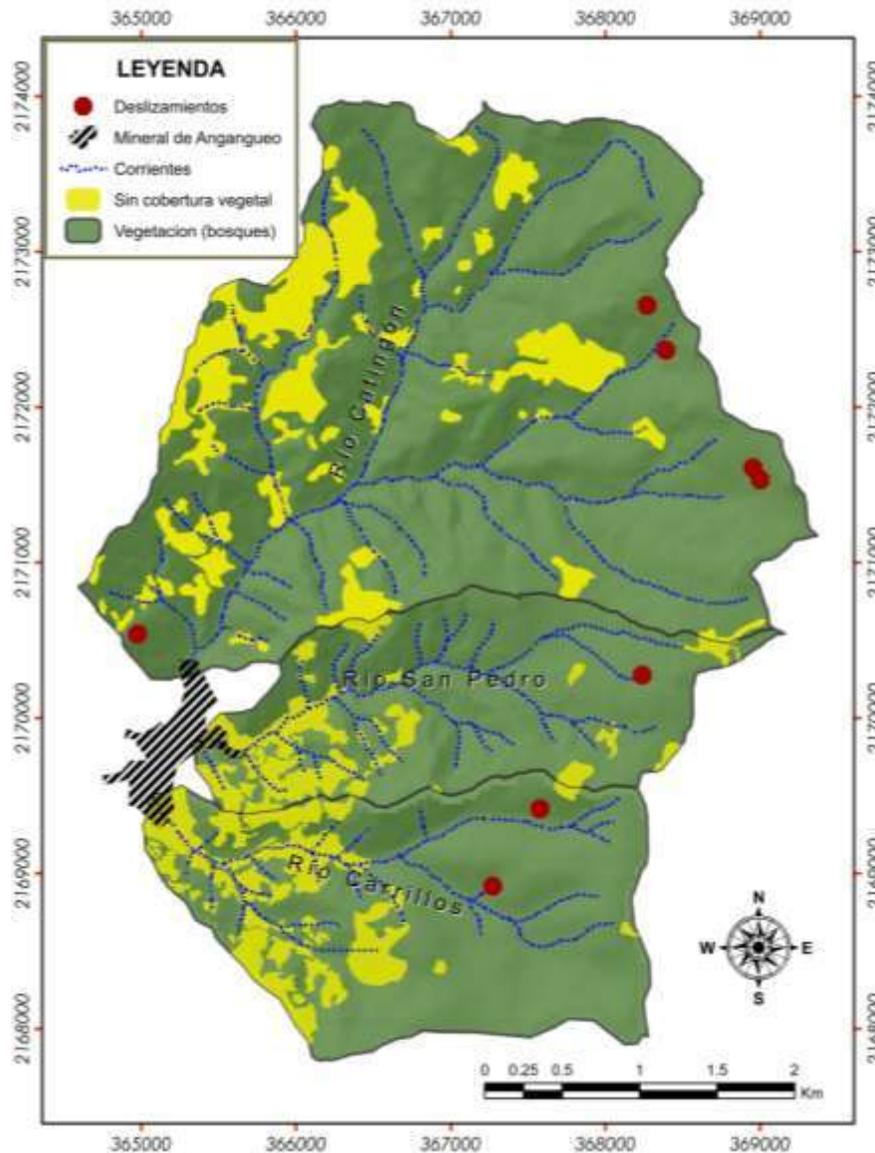


Figura 10. Ubicación espacial de la ocurrencia de los deslizamientos de mayor magnitud en las microcuencas San Pedro, Catingón y Carrillos.

DESCRIPCIÓN. Puede observarse que los deslizamientos ocurrieron en zonas vegetadas y en las zonas mas alejadas de las microcuencas.



Figura 11. Efectos del impacto de grandes troncos en las viviendas de Mineral de Angangueo. Fotografía: Víctor Hugo Garduño Monroy (2010).

En un flujo de detritos, la vegetación se considera parte de los sedimentos, generando una mayor concentración volumétrica y por consiguiente mayor poder destructivo.



Figura 12. Depósitos de madera en el centro histórico de Mineral de Angangueo. Fotografía: Víctor Hugo Garduño Monroy (2010).

Este tipo de acumulaciones pudieron observarse en diferentes zonas de la comunidad, sobre todo en las zonas de túnel de las corrientes de agua.

II.4. MORFOMETRÍA.

La microcuenca San Pedro se encuentra rodeada por las microcuencas Catingón y Carrillos (Figura 1), siendo la más pequeña de las tres, cuenta con una superficie de 3.39 km^2 (0.339 hectáreas). De acuerdo a los parámetros de forma calculados (Tabla 3), la MCSP tiene una forma de oval redonda a oval oblonga (achatada); esta forma se reflejará en un hidrograma líquido pronunciado. El índice de compacidad reafirma la condición montañosa de la microcuenca que se observa en campo y en las Figuras 7 y 18, estas características indican una cuenca con tendencia a presentar un flujo de agua más veloz o torrencial, logrando una evacuación del flujo más rápido, mayor desarrollo de energía cinética en el arrastre de sedimentos hacia el nivel de base, es decir, en los pies de la comunidad Mineral de Angangueo. La red de drenaje es de tipo dendrítico y tiene como cauce principal al río San Pedro o San Luis, el cual tiene una longitud de 3.45 km (Tabla 3 y Figura 14) y una pendiente media de 18% (Tabla 3), considerándose así como un cauce corto y clasificándose como un río de montaña, por ende poco sinuoso, ya que se encuentra en una etapa de transición de joven a maduro (Figura 13). Las corrientes tributarias de este sistema de drenaje son en su mayoría efímeras e intermitentes, el relieve y la forma de la MCSP ocasionan un grado de bifurcación de medio a alto, esto repercute en la eficiencia y buena estructura del drenaje, estas características cooperan en la velocidad y rápida concentración del escurrimiento en el cauce principal de la microcuenca, así como mayores volúmenes.

Este análisis indica que la microcuenca del río San Pedro es proclive a generar escurrimientos rápidos y gastos altos, como respuesta a la rápida concentración de una precipitación intensa hacia el cauce principal, lo que hace susceptible a las viviendas ubicadas aguas abajo, a recibir descargas de agua súbitas e inundaciones con importante cantidad de sedimentos. Es claro entonces que, tanto la forma como el sistema de drenaje y características del cauce principal cooperaron como factores de condición para acentuar las consecuencias del fenómeno meteorológico del 2010, además si tomamos en cuenta que los flujos o avalanchas ocurren típicamente en las cuencas de tamaño menor a 10 km^2 , con un gradiente promedio por encima de 13° y abanicos aluviales de más de 4° (Jackson, 1987), se tiene claro que la morfometría de la cuenca influyó en la peligrosidad del fenómeno desastroso.

Tabla 3. Parámetros morfométricos de la microcuenca San Pedro.

| Parámetros morfométricos | San Pedro | Clasificación |
|---|-----------|-----------------------------|
| Área (km ²): | 3.39 | Muy pequeña |
| Perímetro (km): | 9.36 | - |
| Longitud cauce principal. (km): | 3.45 | Corto |
| Ancho medio cuenca (km): | 1.04 | - |
| Pendiente media cuenca (%): | 44.85 | Alta-Muy alta |
| Elevación media (msnm): | 3,017 | - |
| Altitud mínima (msnm): | 2,597 | - |
| Altitud máxima (msnm): | 3,448 | - |
| Desnivel altitudinal(msnm): | 851 | - |
| Coefficiente de forma(Kf): | 0.32 | Achatada |
| Coefficiente de compacidad (Kc): | 1.42 | Oval redonda a oval oblonga |
| Coefficiente de masividad (km): | 889.5 | Montañosa |
| Orden de corrientes: | 3 | Bajo |
| Numero de escurrimientos: | 23 | Bajo-Medio |
| Longitud de escurrimientos (km): | 13.50 | - |
| Densidad de drenaje (km/km ²): | 4.0 | Media-Alta |
| Densidad de corrientes (corrientes/km ²): | 6.8 | - |
| Pendiente del cauce principal (%): | 18 | Fuerte |
| Sinuosidad del cauce principal: | 1.2 | Poco sinuoso |

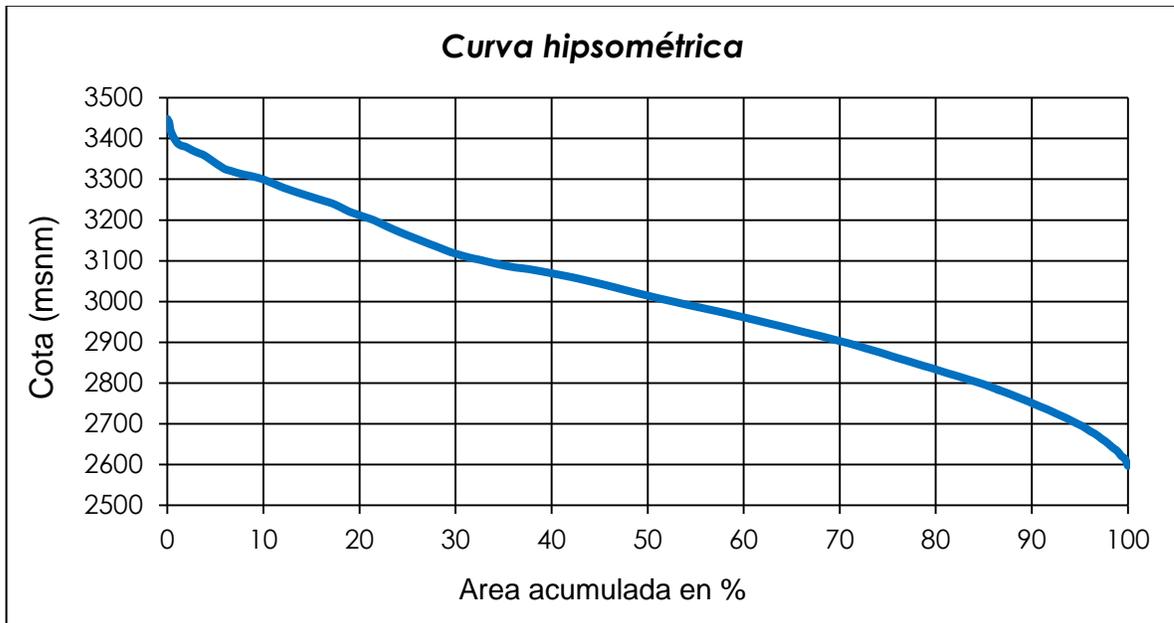


Figura 13. Curva hipsométrica de la microcuenca San Pedro.

La curva indica un río en equilibrio o etapa de madurez, pero aun con una pendiente importante. Es indicativa también de que más del 50% de la superficie superan elevaciones de 3,000 msnm.

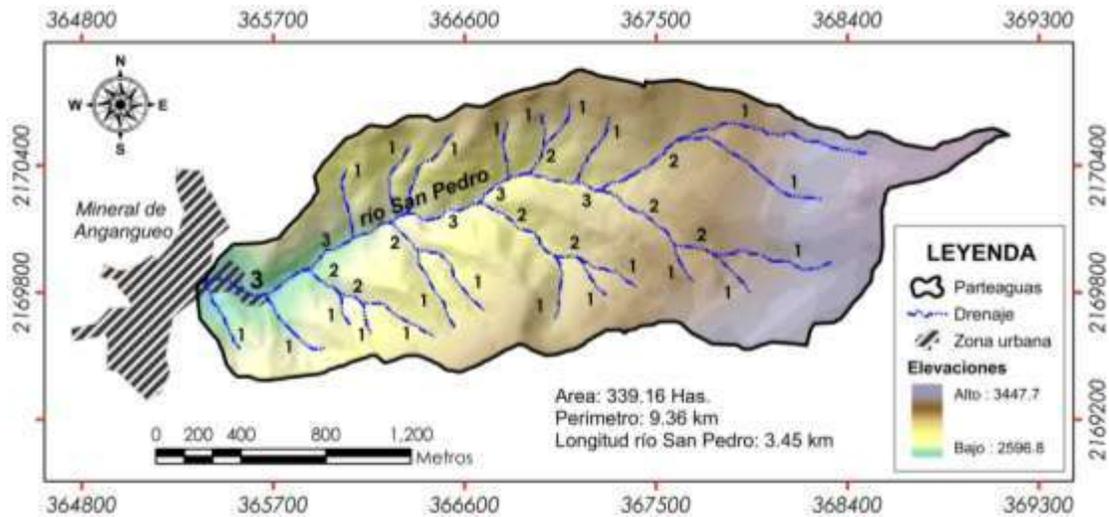


Figura 14. Parteaguas, cauce principal y drenaje de la microcuenca San Pedro.

Se observa un drenaje dendrítico con un orden de corrientes de 3. Las corrientes de grado 1 son tributarios efímeros e intermitentes.

II.5. OBRAS ANTROPOGÉNICAS.

Algunas actividades antropogénicas, que también fueron esenciales para engrandecer el evento de febrero de 2010 son:

La acumulación de siete depósitos de escombros mineros a lo largo del río San Pedro (Figura 15) producto de la actividad minera en Angangueo en tiempos pasados. Estos depósitos fueron erosionados y adicionados al cauce para ser movilizados hacia aguas abajo por los torrentes de agua, la adición de este material al flujo provocó mayor poder de arrastre, erosión del fondo y paredes del cauce, dando origen a flujos de detritos, que además agregaron troncos de árbol al flujo. Este tipo de flujos son más destructivos en su paso hacia zonas de depositación, tal como lo evidenció este evento.

La artificialización de los cauces (Figuras 16 y 17). El revestimiento de los corrientes ocasiona que el flujo sea más rápido, ya que se reduce el coeficiente de rugosidad de Manning, pero también se facilita el tránsito de sedimentos gruesos, basura y materia orgánica como los troncos de árboles, tal como sucedió en Angangueo. El encauzar una corriente natural también ocasiona que desaparezca la llanura de inundación y se reduzca el área hidráulica, en Mineral de Angangueo este fenómeno causó desbordamiento, inundación y daño a las viviendas contiguas.

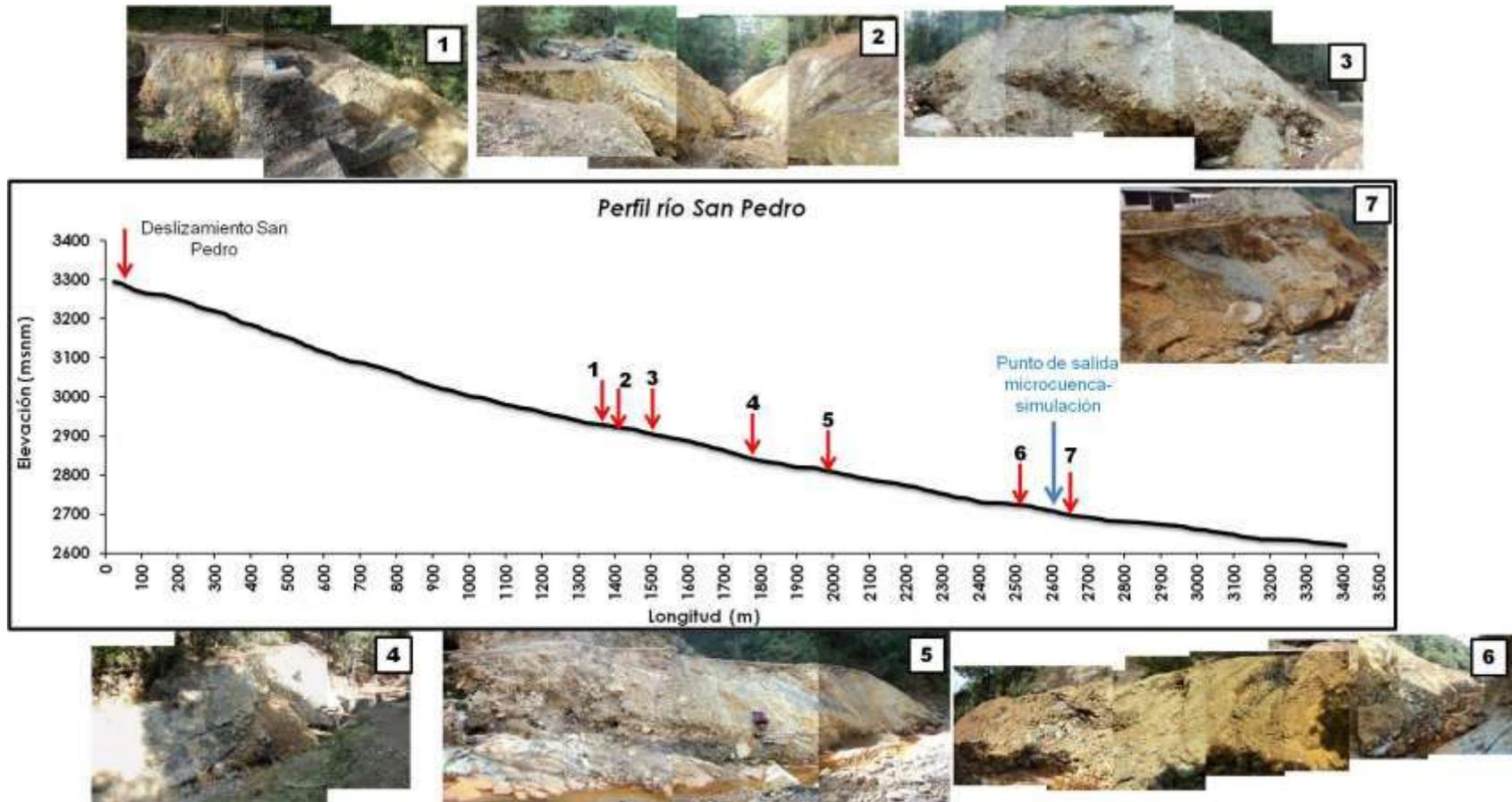


Figura 15. Depósitos de escombros de mina sobre el cauce San Pedro.

Estos depósitos aportaron las gravas, detritos y bloques de roca al flujo que llegó a Mineral de Angangueo, en el barrio San Pedro.

Invasión de los cauces por urbanización. La construcción de viviendas sobre las llanuras de inundación de los cauces reduce la capacidad de conducción de estos. En este caso, esta mala planeación urbana fue consecuencia de mayor cantidad de casas afectadas, ya que el río se abrió paso sobre las casas (Figura 18).

Además de la reducción de la capacidad de los cauces, se tiene el problema adicional del entubamiento del río Puercos (donde confluyen los ríos Catingon y San Pedro), el cual tiene una gran cantidad de cambios de sección transversal, entre ellas un ducto de sección circular de aproximadamente tres metros y en otras partes, es un embovedado de sección rectangular con la plantilla natural del terreno.



Figuras 16 (izquierda) y 17 (derecha). Encauzamiento e invasión de las corrientes. Zonas de túnel sobre el río Catingón.

Estas construcciones antropogénicas favorecieron el desbordamiento de los ríos (16). El tránsito de restos de madera y basura literalmente formaron presas en zonas de túnel (17).



Figura 18. El río San Pedro reclama su cauce. Fotografía: Víctor Hugo Garduño Monroy (2010).

El río se abre paso sobre una de las viviendas construida sobre la llanura de inundación de éste provocándole severos daños. Fotografía: Victor Hugo Garduño Monroy (2010).

CAPÍTULO III.

MARCO CONCEPTUAL.

Debido al carácter multidisciplinario de esta tesis, entendiendo que se abarcan disciplinas como la hidrología, la inestabilidad de laderas y la hidráulica torrencial, este apartado se ha dedicado a la parte medular de la modelización en FLO-2D. Refiriéndonos de esta manera a la inestabilidad de laderas y en mayor medida a la hidráulica torrencial; se abarcarán desde conceptos básicos pasando por las definiciones de los tipos de fluidos y los modelos matemáticos para representar la dinámica de los flujos.

Un fluido es una sustancia que ante solicitaciones de esfuerzos cortantes sufre una deformación progresiva y permanente. La viscosidad es la propiedad física que condiciona la resistencia a la deformación, es decir, al movimiento. Dentro de los fluidos reales y según su comportamiento reológico, tenemos:

Fluido Newtoniano (flujo viscoso o laminar): es un fluido cuya viscosidad puede considerarse constante en el tiempo y presenta una resistencia muy pequeña, o nula, a ser deformado. Para un fluido newtoniano, la relación entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación (gradiente de velocidades) es lineal, como lo indica la Figura 19.

Fluido no Newtoniano (flujo turbulento): es aquél cuya viscosidad varía con la temperatura y la tensión al cortante que se le aplica. No son homogéneos y sus propiedades cambian significativamente cuando descienden por los cauces o laderas de la cuenca o a través de los abanicos aluviales. Estos fluidos exhiben un comportamiento diferente a los Newtonianos, tal como se observa en la Figura 19. Dentro de este tipo de fluidos se analizan los flujos hiperconcentrados, de lodo o detritos.

Los flujos hiperconcentrados, de lodo o detritos se han analizado desde diferentes aristas, los enfoques varían desde fórmulas empíricas como la de Cruz y Massad (1997), a modelos matemáticos con base experimental como los de Takahashi (1991).

Los primeros modelos matemáticos para la caracterización de los flujos partieron de la base de la resistencia de los materiales, de acuerdo a la ecuación de Coulomb (Johnson y Rodine, 1984). Posteriormente se involucraron modelos hidráulicos como los de Bingham, Manning y Bagnold, los cuales fueron adaptados al comportamiento de fluidos producto de la mezcla de suelo y agua.

De acuerdo a las características de la mezcla, a la pendiente y forma del canal se genera un fluido con diferentes características. El modelo de fluido involucra la dinámica interna de la mezcla y los mecanismos generales del movimiento.

En el siguiente capítulo se describirán los modelos matemáticos mostrados en la Figura 19, y que se utilizan para simular flujos Newtonianos y no Newtonianos: hiperconcentrados, de lodo y de detritos.

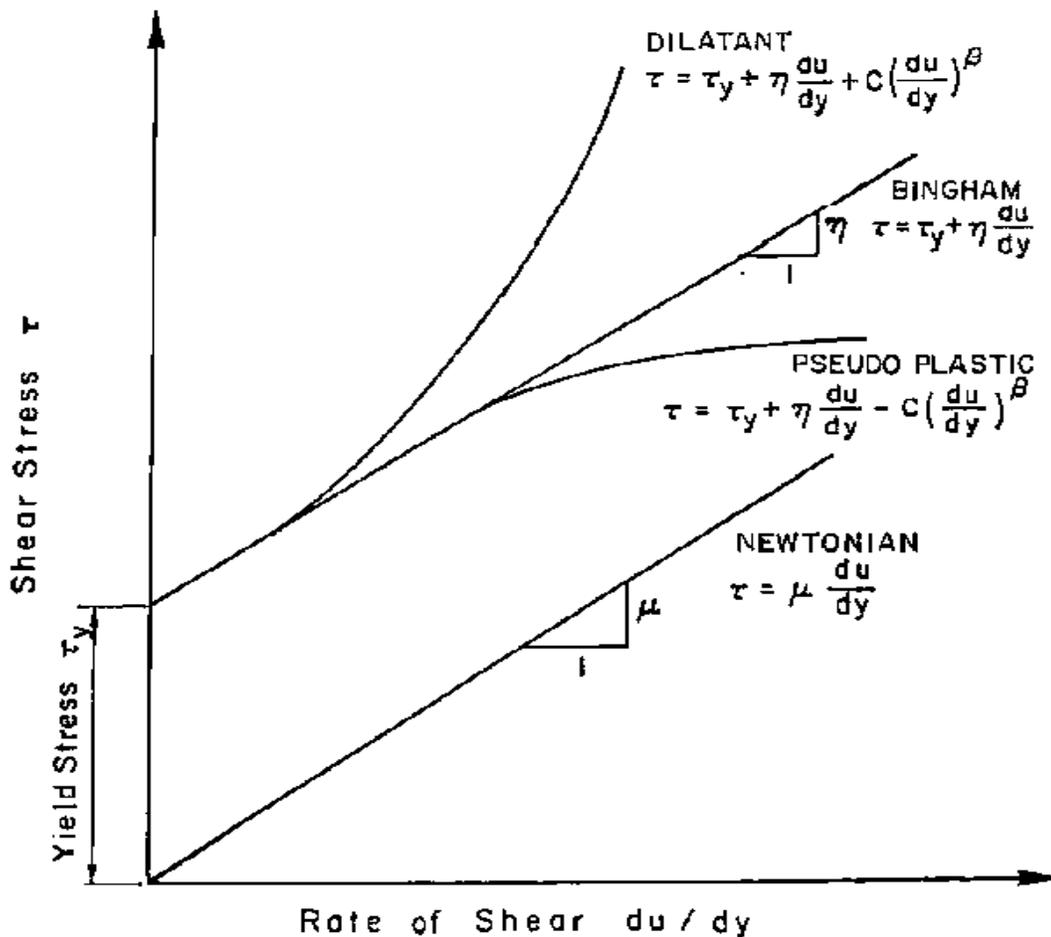


Figura 19. Tipos de fluidos y su típica relación entre el esfuerzo cortante (τ) y la tasa de deformación (du/dy).

Obsérvese que para iniciar el movimiento un fluido no newtoniano, se necesita un esfuerzo adicional, denominado esfuerzo de cedencia τ_y (yield stress).

III.1. MODELOS DE FLUIDOS PARA EL ESTUDIO DE FLUJOS DE LODO O DETRITOS.

Los principales modelos para el análisis de flujos son:

Fluido Newtoniano (Modelo de Manning). Este fluido muestra la relación lineal del esfuerzo cortante (τ) y la deformación al corte o gradiente de velocidad ($\frac{du}{dy}$). La pendiente de la línea recta es la viscosidad μ (Ecuación 1).

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde:

τ es el esfuerzo cortante.

$\frac{du}{dy}$ es la tasa de deformación al corte o gradiente de velocidades (Figura 20).

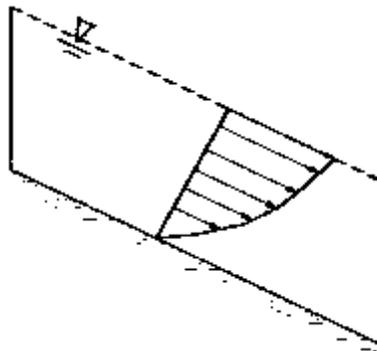


Figura 20. Perfil de velocidades para un fluido Newtoniano, aplicado a flujos.

En flujo turbulento hiperconcentrado, la distribución de velocidades, todavía sigue la ley logarítmica utilizada en la hidráulica tradicional.

Debe tenerse en cuenta que el modelo de Manning no es completamente válido cuando aumentan las concentraciones de sólidos. Para concentraciones muy altas de sólidos (concentraciones cercanas o superiores a $1,000 \text{ kg m}^{-3}$) la distribución de velocidades es más uniforme y el flujo se asemeja más al modelo de Bingham, y si la concentración de sedimentos excede un valor crítico, la distribución de velocidades tiende a ser uniforme (Chien y Wan, 1999).

Fluido Bingham (Modelo de Coulomb). Este es un fluido que no fluye cuando un esfuerzo de corte muy pequeño es aplicado. Los esfuerzos de corte deben exceder un valor crítico conocido como esfuerzo de cedencia o límite de fluencia para que el fluido fluya. Dicho modelo tiene sus inicios en el modelo viscoso de Coulomb el cual se asimila al fluido Bingham y se representa en la Ecuación 2:

$$\tau = C + \sigma_n \tan \varphi + \eta_c \frac{du}{dy} \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde:

τ es la resistencia al cortante en la base del flujo.

σ_n es el esfuerzo normal.

C es la cohesión.

φ es el ángulo de fricción interna.

η_c es el coeficiente de viscosidad.

$\frac{du}{dy}$ es la tasa de deformación al corte o gradiente de velocidades (Figura 21).

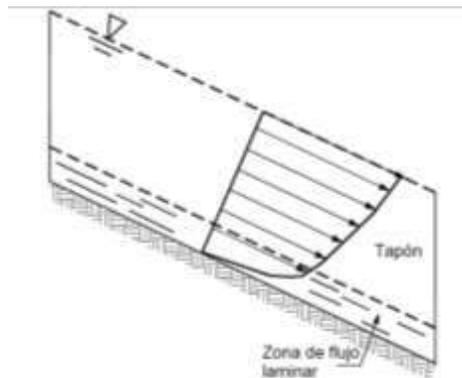


Figura 21. El perfil de velocidades para un fluido Bingham.

El comportamiento de este fluido se puede asimilar a la de un tapón (*plug*) que se mueve sobre una zona de flujo laminar como se indica en la figura. En este caso no existe movimiento relativo importante en la parte alta del flujo, y el flujo se mueve hacia adelante como un solo cuerpo sobre un fluido Bingham.

Aunque este modelo es físicamente una representación correcta del mecanismo de movimiento de flujos viscosos, su utilización en la ingeniería práctica, presenta dificultades para evaluar los diferentes parámetros.

Fluido dilatante y pseudoplástico (Modelo de Bagnold – Takahashi). En el caso de los fluidos pseudoplásticos hay menor resistencia al flujo para esfuerzos mayores, es decir, el fluido escurre más fácilmente cuanto mayor es el esfuerzo. En el caso de los fluidos dilatantes hay mayor resistencia al flujo para esfuerzos mayores, los fluidos dilatantes no son tan abundantes como los pseudoplásticos.

Para el caso de los flujos de detritos no se cumplen las condiciones de fluido Bingham o de fluido Newtoniano y se acude al modelo de fluido dilatante desarrollado por Takahashi (1991), con base en los trabajos de Bagnold. Este modelo se puede expresar en forma general en la Ecuación 3:

$$\tau = \eta_c \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde:

τ es la resistencia al cortante en la base del flujo.

η_c es el coeficiente de viscosidad.

$\frac{du}{dy}$ es la tasa de deformación al corte o gradiente de velocidades (Figura 22).

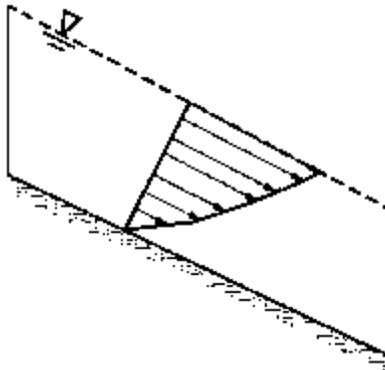


Figura 22. Distribución de velocidades para el modelo de fluido dilatante.

Takahashi también demostró que para el caso de flujos de detritos o flujos no viscosos, en los cuales predomina el efecto de colisión entre partículas, el modelo de fluido dilatante es el apropiado. También consideró el flujo como compuesto por una fase líquida y una fase sólida y derivó ecuaciones de conservación de *momentum* para cada fase; y suma los efectos de las dos fases que son: los esfuerzos de colisión entre partículas sólidas y los esfuerzos en el flujo intersticial, debidos a la turbulencia y la viscosidad.

III.2. CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE FLUJO.

El estudio de los flujos no Newtonianos se ha abordado desde distintas disciplinas, sin embargo, destacan la Hidráulica y la Geología o dicho más acertadamente la corriente de la inestabilidad de laderas o *Landslide*. Y se ha observado que dentro de estas existen una amplia gama de enfoques y definiciones, muchas veces contrapuestos. Sin embargo, en su afán por discernir el fenómeno (origen, transporte y depósito) se han seguido caminos paralelos, donde aun así se pueden encontrar muy pocos puntos convergentes, y que probablemente se deba a que los geólogos se centran en los depósitos y los hidráulicos enfocan sus prioridades en el funcionamiento de los mecanismos de transporte (reología de los flujos).

Me corresponde mencionar, analizar y explicar ambas corrientes y definirme dentro de alguna de ellas, al menos en esta ocasión y en esta circunstancia. Realizando una exhaustiva exploración de la bibliografía y después de escudriñar las corrientes citadas:

III.2.1. Perspectiva *Landslide*.

Varnes en 1978 elabora una clasificación de los Procesos Gravitacionales de Remoción en Masa (PGRM) mencionando seis categorías:

- Caídas
- Volcamientos
- Deslizamientos
- Extensión lateral
- Flujos y
- Movimientos complejos.

Esta corriente define un flujo como un movimiento espacialmente continuo, en el que las superficies de corte son de corta duración, de espaciamiento corto y usualmente no se preservan; la distribución de velocidades en la masa que se desplaza se compara con la de un flujo viscoso (Cruden y Varnes, 1996).

A continuación en la Figura 23 se realiza una clasificación propia de los flujos, según la corriente *Landslide*:

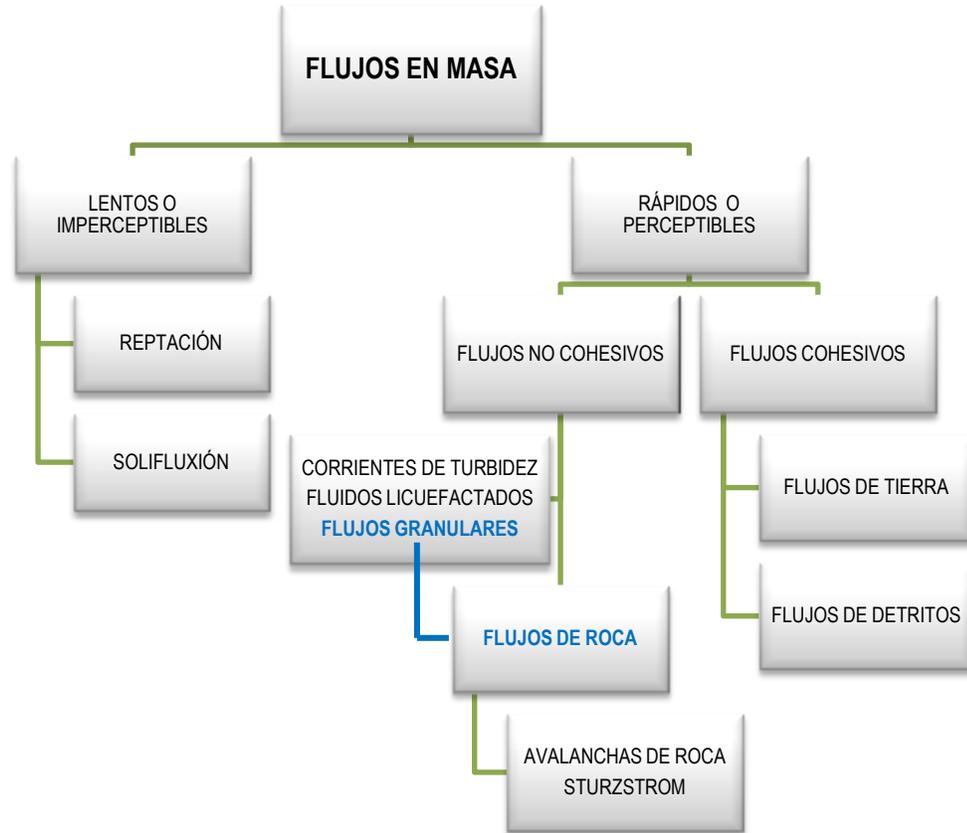


Figura 23. Clasificación de los flujos con base en la perspectiva *Landslide*.

Los flujos se dividen en dos campos de acuerdo a su velocidad o percepción humana de su movimiento, según Sharpe (1960), encontramos los flujos en masa lentos o imperceptibles y los rápidos o perceptibles. Dentro de los flujos lentos encontramos la reptación y solifluxión que se caracterizan por la baja percepción de su movimiento el cual oscila entre 1.6 m año^{-1} y 16 mm año^{-1} (Cruden y Varnes, 1996). En lo que se refiere a los flujos en masa rápidos o perceptibles; la gravedad actuando sobre el fluido produce el movimiento, el que a su vez mueve a los componentes sólidos. En este campo podemos encontrar dos ramas:

- Flujos cohesivos y,
- no cohesivos.

Los flujos no cohesivos se caracterizan por tener poca o nula composición de materiales finos (arcillas y limos), según Varnes aquí solo encontramos a los flujos de roca, pero otros autores mencionan corrientes de turbidez, fluidos licuefactados y flujos granulares; EPOCH (1991-1993) distingue dentro de los flujos no cohesivos: los flujos de roca, las avalanchas de roca y los

Sturzstrom los cuales son corrientes detríticas catastróficas en los cuales ocurre una desintegración inicial de la masa y los detritos escurren a lo largo de un valle casi horizontal a velocidades enormes, (Takahashi, 1981). Sin embargo todo flujo granular puede caer en esta rama.

Según Varnes (1978) y EPOCH (1991-1993), dentro de los flujos cohesivos tenemos los flujos de suelo o tierra (*soil flow/earth flow*), estos pueden ser secos o saturados y los flujos de detritos (*debris flow*). Los cuales se diferencian según estos por el tamaño del grano. Presentándose un flujo de detritos si más del 20% del material (sedimentos) en peso son mayores de 20 mm. Y se trata de un flujo de lodo o tierra si más del 80% de las partículas de suelo son menores a 2 mm.

III.2.2. Perspectiva hidráulica torrencial.

La Figura 24 muestra una clasificación propia de los flujos en base a la corriente de la hidráulica torrencial.

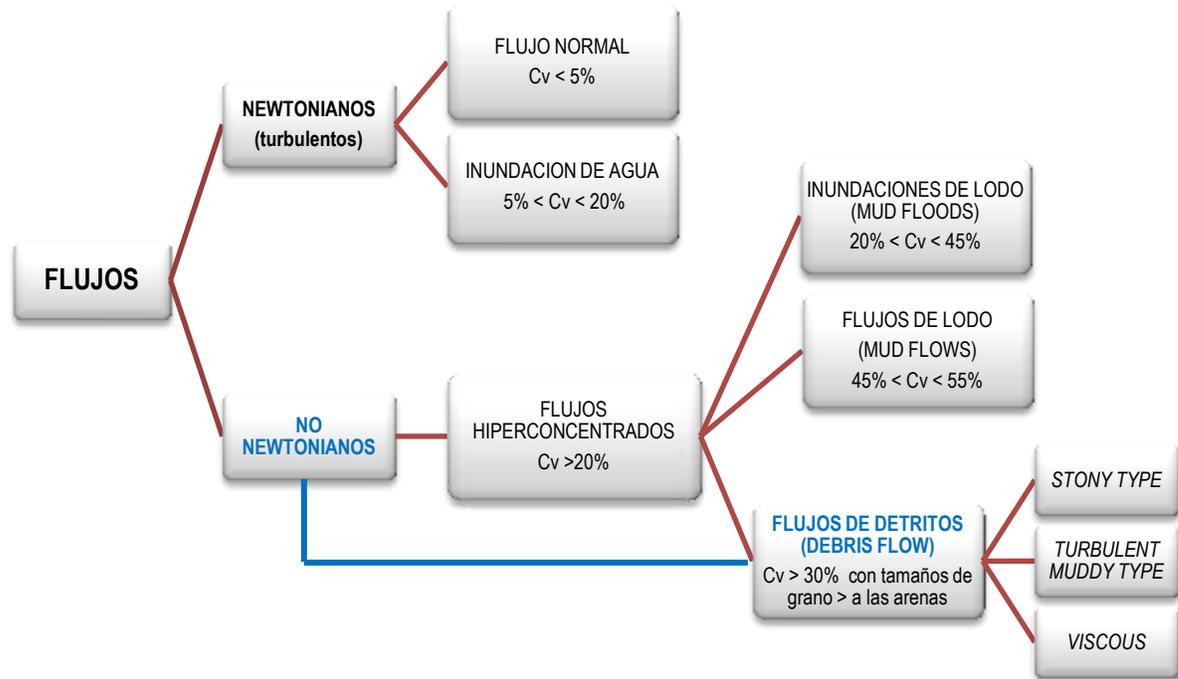


Figura 24. Clasificación de los flujos en base a la perspectiva de la hidráulica torrencial.

Esta clasificación o tendencia es la que se adopta en este trabajo de tesis, debido a que tratándose de flujos o fluidos, la hidráulica torrencial tiene una mayor injerencia en el tema valiéndose de una gama de herramientas más amplia para explicar la dinámica del movimiento, el tipo de flujo, en función de la cantidad y tamaño de los sedimentos embebidos en la mezcla, además de que se han expuesto modelos reológicos de aceptable precisión para interpretar el comportamiento cinético y poder destructivo. El programa FLO-2D fue desarrollado dentro de esta clasificación, para diferenciar los tipos de flujos. En esta perspectiva, se ha determinado mediante observaciones en campo e investigación profunda, que la concentración volumétrica (C_v) de la fracción fina (limos y arcillas), es la que influye en forma primordial en el comportamiento del flujo (Tabla 4). Es por esto que se marca una diferencia discreta entre los flujos Newtonianos y no Newtonianos. Si los definimos en términos de la relación agua-sedimento o concentración volumétrica tenemos:

Tabla 4. Comportamiento del flujo en función de la concentración de sedimentos.

| | Concentración de sedimentos | | Características del flujo |
|----------------------------|-----------------------------|-------------|---|
| | Por volumen | Por peso | |
| Deslizamiento | 0.65 - 0.80 | 0.83 - 0.91 | No fluye; falla por deslizamiento en bloque. |
| | 0.55 - 0.65 | 0.76 - 0.83 | Deslizamiento en bloque con deformación interna y; reptación previa a la falla. |
| Flujo de lodos | 0.48 - 0.55 | 0.72 - 0.76 | Flujo evidente; reptación sostenida de barro; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo; no ocurre esparcimiento sobre una superficie plana. |
| | 0.45 - 0.48 | 0.69 - 0.72 | Flujo con esparcimiento sobre superficies planas. Flujo cohesivo; mezcla. |
| Inundación de lodos | 0.40 - 0.45 | 0.65 - 0.69 | Flujo se mezcla fácilmente; deposición de grandes bloques; ocurren ondas pero se disipan rápidamente. |
| | 0.35 - 0.40 | 0.59 - 0.65 | Deposición marcada de gravas y cantos rodados; esparcimiento casi completo en superficies planas; dos fases en superficie con ondas. |
| | 0.30 - 0.35 | 0.54 - 0.59 | Separación del agua en superficie; las ondas viajan fácilmente; arena y grava viajan como carga de fondo. |
| | 0.20 - 0.30 | 0.41 - 0.54 | Ondas dominan el movimiento superficial. |
| Inundación | < 0.20 | < 0.41 | Inundación de agua con posibilidad de sedimento en suspensión u carga de fondo. |

Flujos Newtonianos turbulentos. En estos la fase líquida gobierna totalmente el movimiento y obedecen a la ley de Manning.

El flujo normal tiene una $C_v < 5\%$; y una inundación de agua o avenida de agua con sedimentos en suspensión tiene una C_v entre 5 y 20%. El agua aparentemente puede estar muy contaminada de sedimentos (Figura 25) y al mismo tiempo, existe cierto transporte de materiales de gran tamaño, especialmente, en el fondo del cauce (Suarez, 2006). En estos tipos de flujo la densidad es menor a 1.3 g cm^{-3} , por lo que su viscosidad no cambia notablemente.



Figura 25. Flujo normal de agua de un cauce en zona llana, donde la concentración de sedimentos por volumen es menor al 5%.

Flujos no Newtonianos. Cuando la relación de agua-sedimento es alta, mayor al 20%, y hasta un máximo de aproximadamente el 55% (USGS considera 60%) del volumen, su comportamiento es el de un flujo hiperconcentrado (Figura 26), debido a que la presencia de cantidades muy grandes de partículas de sedimentos es de tal magnitud que influye notablemente en la mezcla, cambiando las propiedades del fluido y el comportamiento del flujo (Wan y Wang, 1994). En este tipo de flujos el volumen y las propiedades de la matriz gobiernan la hidráulica. Las propiedades de la matriz dependen de la concentración de sedimentos, distribución granulométrica y contenido de arcillas. Si la concentración volumétrica oscila entre 20 y 45%, entonces predominan los esfuerzos turbulentos y sedimentos no cohesivos como las arenas y los limos, entonces estamos hablando de una inundación de lodo o *mud floods* (O'Brien, 2000). Este tipo de flujo puede transportar materiales gruesos; a medida que se tiene mayor turbulencia hay mayor transporte de cantos, detritos o rocas. Una inundación de lodo puede ser modelada como flujo newtoniano, a pesar de que tiene un régimen turbulento.



Figura 26. Fotografía de un flujo hiperconcentrado o inundación de lodo.

USGS considera las inundaciones de lodo, como flujo hiperconcentrado, ya que según ellos, se clasifican así, si tienen una C_v de 40%.

La resistencia al flujo depende de la rugosidad de los bordes, como en los flujos turbulentos en agua clara. Incrementos de la viscosidad del fluido, reducen la velocidad de caída de las partículas de sedimento.

Los flujos de lodo o *mudflows* (O'Brien, 2000), se diferencian de los anteriores porque contienen en mayor proporción sedimentos finos del tipo de los limos y arcillas con una concentración volumétrica de entre 45 y 55% (Figura 27). Dominan los esfuerzos viscosos y de cedencia. De tal manera que se comporta como un flujo no Newtoniano, del tipo fluido Bingham. Sin embargo si el contenido de partículas finas es bajo, puede ocurrir un flujo viscoso continuo en el cual no se forma una parte frontal ni ocurren pulsaciones y se asemeja más al modelo de fluido newtoniano de Manning. Estos flujos son capaces de transportar grandes bloques de roca y detritos en suspensión. De acuerdo a experimentos de Wan y Chien (1989), un fluido se convierte en una mezcla lechosa (lodosa) a una concentración de partículas finas de solamente 90 kg m^{-3} . A medida que la concentración de finos aumenta, la estructura de los sedimentos se floclula formándose una especie de cohesión de mezcla suelo-agua.



Figura 27. Fotografía de un típico flujo de lodo o *mudflow*.

Antes de describir el flujo de detritos, es importante mencionar que algunos autores no consideran a estos, dentro de los flujos hiperconcentrados, por contener un exceso de concentración de sedimentos, generado por la cantidad y tipo de material granular, como gravas, cantos, detritos y rocas. Entonces, puede o no considerarse flujo hiperconcentrado. En este trabajo se considera dentro de los flujos hiperconcentrados, ya que, aunque tenga una concentración de sedimentos muy alta, sigue siendo una hiper-concentración.

Los flujos de detritos o *debris flow*. Son, quizá el tipo más complicado de definir y entender. Estos se definen como una mezcla de sedimentos mal clasificados y de distintos tamaños (que van desde arcillas hasta grandes clastos), que incluyen materia orgánica; agitados y saturados en agua que se desplazan ladera abajo como un flujo viscoso turbulento. Tienen tal capacidad de arrastre que pueden transportar en suspensión troncos de árboles, rocas e incluso autos (ver Anexo II). Algunos consideran que los flujos de detritos ocurren cuando el flujo tiene una C_v mayor a 30%, pero se diferencian de los *mud floods* y *mudflows*, si la mitad de la fracción sólida está compuesta por granos mayores que las arenas. No olvidando que entre mayor sea el diámetro de las partículas, la concentración de sedimentos es mayor (Yellow River, 1977) y entre mayor sea la concentración, son transportadas partículas de mayor diámetro.

Según Takahashi (1991), los flujos de detritos se pueden presentar en 4 tipos:

- Pedregosos (*stony type*). Flujos de detritos en donde la matriz es no cohesiva y dominan los sedimentos gruesos y bloques de roca.
- Fangosos turbulentos (*turbulent-muddy type*). La matriz del flujo es cohesiva compuesta de ceniza fina. La turbulencia en el flujo va desde el frente hasta la parte trasera.
- Viscosos (*viscous*). Tienen una matriz cohesiva (arcillas) y su comportamiento es de un fluido viscoso-turbulento.
- Puede mencionarse un cuarto tipo, el cual se refiere a una combinación de dos o de los tres anteriores, denominado flujo de detritos híbrido.

De los tipos de flujos antes mencionados se desglosará y analizará a detalle el flujo de detritos, debido a que este tipo de flujo fue el que se presentó el cuatro de febrero de 2010 en la microcuenca San Pedro (Figura 28). No se puede dejar de mencionar que, en un evento de este tipo puede presentarse dos o más de los tipos de flujo anteriores, y que son condicionados por el tipo de factor detonante y la granulometría de los sedimentos.



Figura 28. Deposito del flujo de detritos al pie del barrio San Pedro, en Mineral de Angangueo.

Nótese el tamaño de los sedimentos que conforman el depósito que llegó al barrio San Pedro, son detritos y bloques de roca de al menos 20 cm de diámetro.

III.3. FACTORES CONDICIONANTES Y DETONANTES PARA LA GENERACIÓN DE FLUJOS DE DETRITOS.

Geología. Los aspectos más importantes a considerar son el tipo de depósito y el material que lo compone, su densidad, plasticidad, humedad, permeabilidad; la litología de las rocas, su estructura, alteración y meteorización. Por ejemplo el tipo de depósito condiciona ciertas características en su comportamiento; los depósitos volcanoclásticos, glaciales, escombros de piemonte, aluviales, coluviales, y de antiguos flujos de detritos son susceptibles a ser movilizados y/o removilizados, ya que son materiales permeables, donde el agua se infiltra fácilmente, superando su capacidad de infiltración y produciendo la saturación rápida y facilitando el escurrimiento rápido del agua en este material saturado (Hauser, 1997).

Geomorfología. Los rasgos geomorfológicos que condicionan el origen de flujos de detritos son principalmente la topografía, las pendientes de las laderas, la superficie y forma de las cuencas hidrográficas. Estas características inciden en la velocidad, energía y volumen de los flujos de detritos que puedan originarse. Una topografía escarpada (laderas con altos ángulos de inclinación) en combinación con el escurrimiento superficial como agente desestabilizador son la conjunción adecuada para presentarse flujos hiperconcentrados, mientras mayor pendiente tenga el cauce mayor será la capacidad de transporte y energía de los flujos. Así, tributarios cortos de alta pendiente, rectos, y estrechos (o encajonados) concentran el transporte del material incrementando su energía cinética (Jacoby, 2001). Pendientes mayores a 25° en las cabeceras de las cuencas hidrográficas, son favorables para el desarrollo de flujos o “aluviones” (Hauser, 1993), aunque algunos podrían generarse sobre pendientes menores que no sobrepasan los 15° (Sauret, 1987 en Sepúlveda, 1998).

Hidrología e hidrogeología. La red de drenaje, las posiciones y variaciones del nivel freático, caudales, coeficientes de escurrimiento y coeficientes de infiltración, son factores hidrológicos e hidrogeológicos que condicionan la generación de PGRM ya que están directamente relacionados a la incorporación de agua en los suelos o macizos rocosos. El suelo saturado presentará variaciones en los rangos de cohesión dependiendo de su granulometría. Sin embargo, la incorporación de agua en la estructura del suelo, forzosamente genera una disminución en la resistencia del material, disminuyendo su tensión efectiva producto de la generación de presiones de poros (Lambe y Whitman, 1972). En el caso de los flujos, éstos en su gran mayoría se generan por saturación del material, lo cual al provocar un aumento en la presión de poros disminuye su resistencia efectiva. La posición del nivel freático y sus variaciones en este ámbito es importante, ya que al encontrarse a poca profundidad, mediante la incorporación de agua ya sea por lluvias o fusión de nieve, éste puede ascender rápidamente

llegando a generar la saturación del material superficial. Aunque los flujos de detritos se asocian a un suelo saturado, el flujo puede ir incorporando líquido en el trayecto, generándose en un principio por la inestabilidad del suelo condicionada por la resistencia, el ángulo de fricción interna y el grado de saturación del suelo (Yoshida *et al.*, 1991). Pueden existir movimientos de ladera complejos, que pueden derivar en un flujo de detritos o un flujo seco, dependiendo si hay o no incorporación de agua al material transportado (Varnes, 1978).

Vegetación. Prieto (1985) establece que la estabilidad dada por la vegetación está fuertemente condicionada por el efecto del clima y topografía, pues, por ejemplo en zonas que sufren de fuertes vientos, si la pendiente es fuerte, los árboles remueven el terreno provocando su desestabilización. Además, en zonas de climas lluviosos, con abundante vegetación, puede ocurrir que la evapotranspiración no alcance a compensar la alta infiltración, por lo que el nivel freático asciende saturando el material. Según Selby (1993), la vegetación contribuiría a disminuir el efecto erosivo sobre las laderas, generado por factores como el clima, propiedades del suelo y topografía. La existencia de árboles en las laderas permitiría la absorción de agua por parte de estos disminuyendo el grado de saturación del suelo. Además, sus raíces en general ayudarían a la estabilización de las laderas actuando como anclajes de reforzamiento, sin dejar de considerar que en algunos casos esta estabilización es sólo superficial. Los efectos benéficos que se esperarían de una buena cobertura vegetal compuesta de bosques y pasto serían que la vegetación interceptaría el agua caída, disminuiría la capacidad de erosión provocada por el agua en las laderas y aumentaría la resistencia del suelo y su porosidad. Además, aumentaría la evapotranspiración del agua disminuyendo el grado de saturación del suelo y produciría compactación del suelo más profundo (Greenwood y Norris, 2006).

Clima. Los principales factores que generan erosión de laderas son las precipitaciones, temperaturas, viento y radiación solar, siendo las precipitaciones las que en mayor medida generan flujos. La mayor cantidad de grandes flujos de detritos y barro han sido disparados por lluvias intensas, asociadas con saturación del material por lluvias antecedentes cercanas al día del evento que en este caso estarían actuando como condicionante en la estabilidad de la ladera. Por otra parte, otro factor climático de importancia corresponde a la temperatura. La temperatura condiciona el estado de la precipitación, es decir, si es sólida o líquida, controla el punto de fusión de la nieve, modifica la humedad del suelo luego de las lluvias y condiciona el congelamiento del suelo. Por otro lado el viento tiene efectos sobre el ángulo de incidencia de las gotas de lluvia y además en la desestabilización de laderas abruptas con árboles (Selby, 1993). Por último, el factor climático de radiación solar también incide en la estabilidad-inestabilidad de laderas, al influir en la condición de humedad del material, disminuyendo la resistencia de las laderas mientras mayor grado de humedad éstas presenten.

Actividad antrópica. Ejemplos de actividades que influyen en el origen de flujos de detritos y otros PGRM son excavaciones, rellenos, construcción de estructuras, urbanización, cambios en el uso del suelo, extracción de áridos y acumulación de escombros. Estos, entre otros, pueden contribuir tanto a la desestabilización de las laderas producto de la disminución artificial de la resistencia del material, como a la contribución de material para ser movilizado por futuros eventos y cambios en la escorrentía superficial y en la topografía. A esto se suma la deforestación que se lleva a cabo producto de tala ilegal. Otro efecto producido por estas actividades tiene que ver con el aspecto climático. A escala global, las actividades antrópicas en el último tiempo han afectado directamente en el cambio climático terrestre, lo cual está asociado a variaciones en las temperaturas, tipo e intensidad de precipitaciones y su distribución, influyendo directamente en la generación de PGRM que derivan en desastres.

En el capítulo II de este trabajo se mencionó de qué manera tuvieron injerencia estos agentes condicionantes, de manera puntual en la MCSP para la generación del flujo de lodos y detritos de febrero de 2010.

Un agente detonante es un factor externo que genera una respuesta traducida en una remoción en masa mediante el rápido incremento de esfuerzos o la reducción de la resistencia del material de una ladera (Wieczorek, 1996). Un agente detonante se caracteriza principalmente por la existencia de un corto lapso entre causa y efecto. Entre los agentes desencadenantes más comunes de remociones en masa se cuentan principalmente las lluvias de gran intensidad y los sismos; secundariamente las erupciones volcánicas, la intervención antrópica, la fusión de nieve, la erosión de canales, entre otros. En esta ocasión solo se profundizará en las precipitaciones, debido a que fueron estas el factor disparador de los deslizamientos en el municipio de Angangueo.

Precipitaciones. La intensidad, duración y distribución, son características de las precipitaciones (en especial las lluvias) que se considera influyen en la detonación de flujos de detritos. Así, precipitaciones de poca intensidad en periodos prolongados de tiempo y precipitaciones de gran intensidad en periodos cortos de tiempo podrían desencadenar eventos de remociones en masa en zonas donde el escenario sea favorable para ello. Dentro de este aspecto, las precipitaciones cortas e intensas serían susceptibles a provocar eventos superficiales, en tanto remociones más profundas serían provocadas por eventos distribuidos en largo periodo de tiempo (Aleotti, 2004; Kim *et al.*, 2004). Las precipitaciones actúan aumentando el grado de saturación de los materiales, tanto en suelo como en fracturas, aumentando temporalmente la presión de fluidos (μ). Teniendo en cuenta que el esfuerzo efectivo (σ') se define como $\sigma' = \sigma - \mu$, entonces es la disminución de este esfuerzo el que

genera un descenso en la resistencia de los materiales durante un periodo de tiempo, con ello una baja en la estabilidad y un eventual fenómeno de remoción en masa. Además, las precipitaciones intensas aumentan la escorrentía superficial, aumentando con esto la erosión del material en laderas con suelo suelto, y asociado se genera socavación y/o disolución de la ladera. En general, distintas zonas necesitarán lluvias de intensidad y/o duración que superen un umbral característico para generar remociones en masa. El conflicto radica en la estimación de estos umbrales, para lo cual se requiere de datos idealmente continuos de precipitaciones o con alta frecuencia que permitan la realización de análisis estadísticos para la zona de estudio.

III.4. FLUJOS DE DETRITOS: DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS.

Los flujos de detritos son no viscosos y son generalmente flujos turbulentos de dos fases. La fase líquida es un “*slurry*” consistente en agua y partículas finas y la base propiamente sólida son las partículas gruesas. Aunque los flujos de detritos contienen partículas más gruesas, mayores concentraciones, mayores pesos específicos y menores cantidades de agua, la mecánica en algunos aspectos es similar a la de los flujos hiperconcentrados.

III.4.1. Origen y formación.

Al ocurrir un evento anómalo de lluvias extraordinarias se pueden generar procesos de deslizamiento o erosión, los cuales producen una concentración de sedimentos o partículas sobre las laderas o cauces. Las masas que se sueltan están saturadas y la concentración de sedimentos sueltos sobre una pendiente fuerte, propicia su movimiento. Es decir, existe una gradación desde deslizamientos a flujos, dependiendo del contenido de humedad, la movilidad y la evolución del movimiento (Cruden y Varnes, 1996). Por ejemplo, los deslizamientos de detritos pueden convertirse en flujos de detritos extremadamente rápidos o avalanchas de detritos, en la medida en que el material desplazado pierde cohesión, aumenta de contenido de humedad o encuentra pendientes más fuertes (Cruden y Varnes, 1996).

En la etapa de transición deslizamiento-flujo propiamente dicha, la velocidad y el caudal aumentan bruscamente como en una especie de onda. En este proceso pueden incorporarse al flujo nuevos sedimentos por corrosión y arrastre o por aportes de deslizamientos, corrientes de agua u otros deslizamientos (Figura 29). En esta etapa, el flujo puede comportarse como flujo

de lodos, hiperconcentrado o de detritos, de acuerdo con la composición, concentración y velocidad. Después de esta primera oleada, pueden venir otras ondas de menor o mayor amplitud.

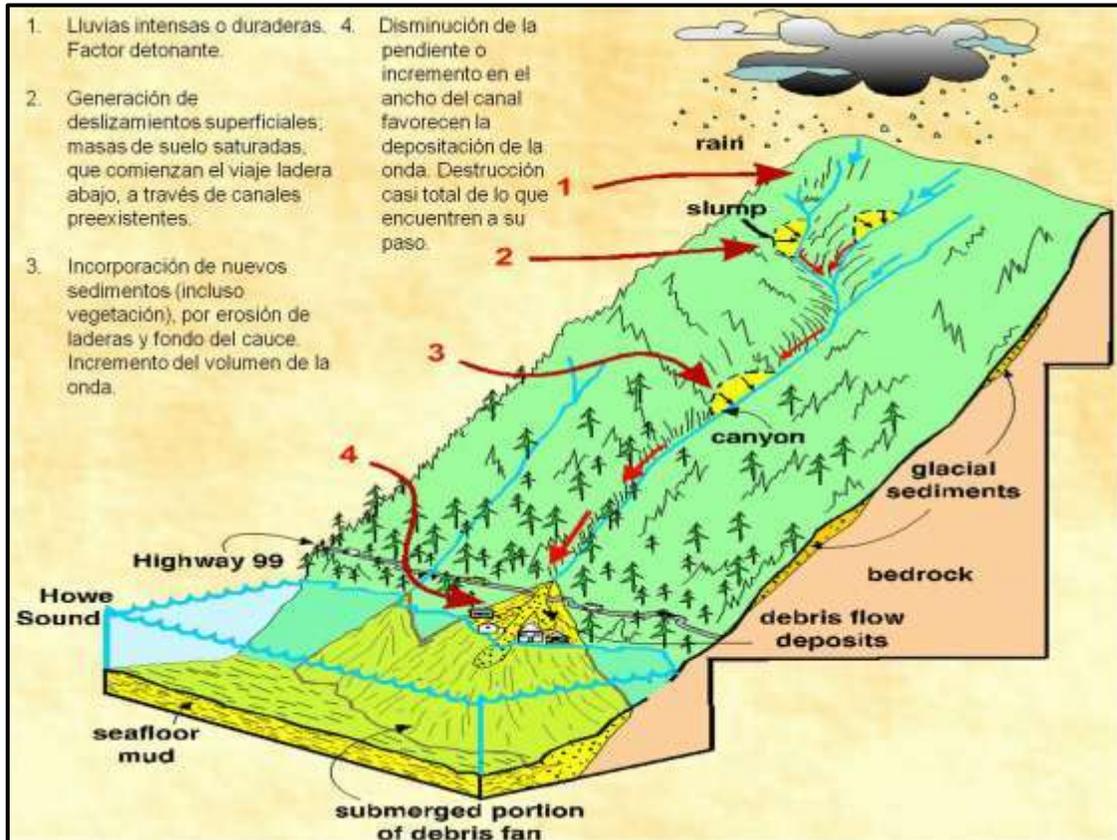
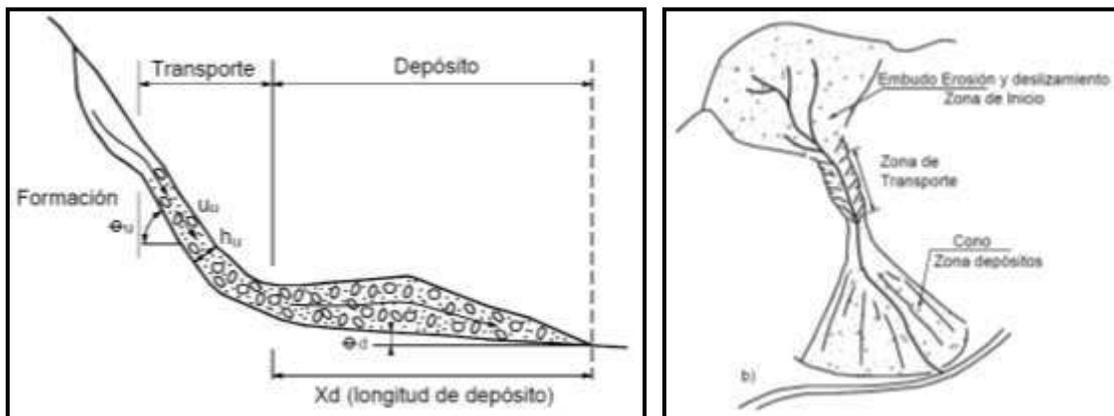


Figura 29. Ilustración que explica el origen, formación y depósito de un flujo de detritos, producto de un evento anómalo de lluvias.

La movilidad de los flujos depende del tipo de material y de las concentraciones de sedimentos en el agua. Ciertos materiales como los volcánicos están caracterizados por tener una mayor movilidad (Legros, 2001). La razón para la gran movilidad de los materiales volcánicos es la naturaleza granular de éstos, su colapsibilidad, grado de meteorización, tamaño de granos, baja resistencia y alto contenido de agua. Otro factor importante que afecta la movilidad es el tamaño de los deslizamientos. Los deslizamientos de mayor magnitud generan flujos de mayor movilidad, la cual es proporcional al caudal del flujo. Sin embargo, el factor más importante en la movilidad es el contenido de agua en el flujo.

Al disminuir la pendiente o aumentar el ancho del canal se presenta una disminución de la velocidad o frenado de la avalancha (Figura 30). La energía cinética disminuye y se produce sedimentación de las partículas. La depositación de los flujos generalmente se da en pulsos (Williams, 2006), lo cual demuestra que el flujo no es permanente sino que tiene ondas y cada onda puede transportar materiales de diferente granulometría desde materiales muy gruesos hasta materiales muy finos o mezclas de varios materiales. El ancho y la pendiente de la zona de depositación determinan el espesor del depósito y la forma como se producen los procesos de frenado y sedimentación (Figura 31). Si en estas zonas de depósito se encuentran viviendas e infraestructura en general, probablemente sean afectadas severamente, por los detritos y grandes rocas, ocasionando inclusive pérdidas humanas (caso Mineral de Angangueo).



Figuras 30 (izquierda) y 31 (derecha). Esquema del transporte y depósito de un flujo de detritos, en perfil y en planta.

Obsérvese que el transporte solo es en pendientes fuertes, y al disminuir ésta, la mayor parte del flujo cesa, continuando hacia aguas abajo el material mas fino.

III.5.2. Movimiento y morfología.

Se ha mencionado que el flujo de detritos generalmente ocurre en zonas de alta pendiente e involucra concentraciones altas de material sólido, principalmente de partículas gruesas y bloques. Debido a que un flujo de detritos ocurre en altas pendientes se pueden transportar fácilmente partículas o bloques de gran tamaño a alta velocidad. Los flujos de detritos son extremadamente destructivos, debido a las fuerzas de impacto de los grandes bloques (Figuras 32 y 33).



Figuras 32 (izquierda) y 33 (derecha). Tamaño de los bloques transportados por un flujo de detritos en el estado de Vargas, Venezuela en 1999.

En función de la alta concentración volumétrica de sedimentos que contienen los flujos de detritos, se consideran un flujo de régimen de inercia granular en donde los esfuerzos de deformación son altos, tal que la transferencia de *momentum* es predominantemente, por la interacción grano a grano.

Investigaciones de centenares de depósitos de flujo de detritos y de revisiones de varios flujos de escombros activos en el resto del mundo, señalan que se transportan firmemente a través de un canal por medio de ondas pequeñas sobrepuestas viajando a altas velocidades. Estas ondas o pulsos, en ocasiones su movimiento es intermitente, como en los flujos de lodos viscosos, pero la amplitud de la onda es relativamente pequeña (20 a 50 cm) y en general, el flujo no es completamente interrumpido entre las ondas.

Un modelo generalmente aceptado para una onda de un flujo de detritos es el que se muestra en la Figura 34 (Hubl y Steinwendtner, 2000). Se distinguen tres partes en la onda: el frente, el cuerpo, y la cola. El frente o cabeza está formada fundamentalmente de grandes clastos; la mayor parte de los granos gruesos como detritos y bloques de roca viajan en esta parte, aquí el flujo es turbulento y se transita a velocidades menores. El movimiento está controlado por este frente y se produce por transferencia de *momentum* al colisionar las partículas o bloques que se mueven.

En el cuerpo de un flujo de detritos disminuye el tamaño de los granos gruesos, estos viajan en suspensión sobre un flujo con alta concentración de sedimentos finos y mayor viscosidad, prácticamente licuados, por la presión de poros alta. Aquí el flujo es semi-turbulento y se tienen velocidades intermedias, en esta zona, también viajan los grandes troncos de madera y basura de todo tipo.

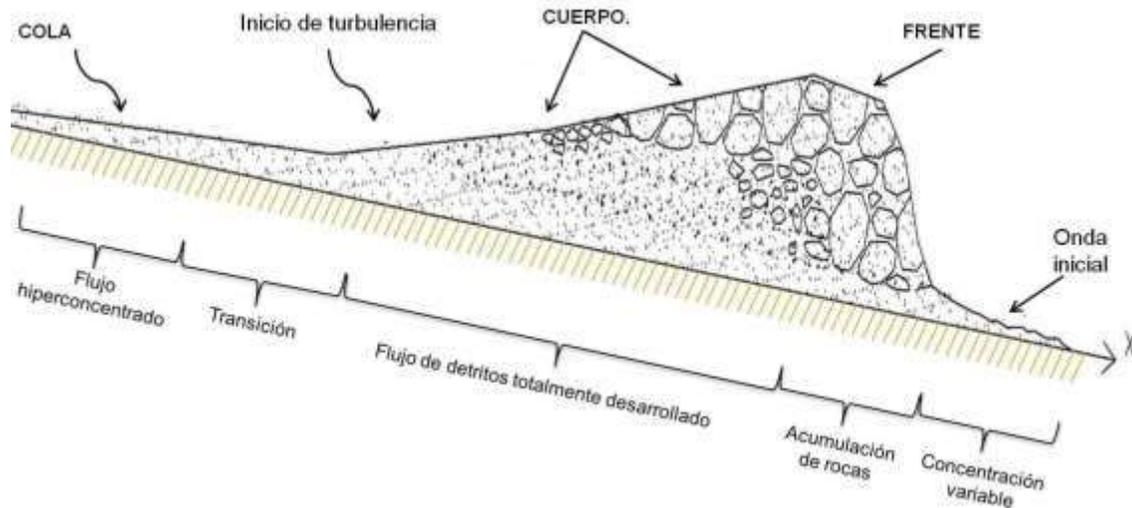


Figura 34. Perfil típico de un flujo de detritos.

En éste se distinguen un frente, un cuerpo y una cola. El perfil puede tener varios pulsos con varios frentes intermedios. En el frente de los pulsos predominan las fuerzas de los sólidos y en el cuerpo las fuerzas del fluido (Iverson, 1997).

En la cola de la onda, la concentración volumétrica de sedimentos decrece, y el flujo se vuelve laminar o turbulento, de acuerdo con la cantidad de material fino, a éste se le considera un flujo hiperconcentrado. Las tres fases forman un medio continuo donde el tamaño del sedimento, la concentración, y la viscosidad, decrecen desde el frente a la cola del flujo de detritos.

La velocidad del flujo de detritos observado varía de 0.5 m s^{-1} a 20 m^{-1} . Las razones de esta gran variedad de velocidad son debido a la clasificación, geometría del canal, pendiente, tamaño y sinuosidad. En una observación en Japón (Okuda, 1980) la velocidad en el tramo superior estuvo por encima de los 10 m s^{-1} pero, en el área del abanico la velocidad fue de 5 m s^{-1} . En algunos trabajos se mencionan velocidades (no medidas) hasta de 36 m s^{-1} .

Aunque los flujos de escombros ocurren en pendientes pronunciadas, es importante notar que este flujo tiene la habilidad de fluir en pendientes muy suaves. Algunas pendientes observadas varían de 2% a 32% (Costa, 1984). En los flujos de escombros en Mt. Thomas, Newzealand (Pierson, 1981) la pendiente del canal varió de 5° a 7° . En Steele Creek, Yukon (Broscoe y Thompson, 1969) la pendiente fue de 13° a 32° y en Wrightwood, California la pendiente fue de 1° a 9° (Sharp y Nobles, 1953).

III.5.3. Depositación.

Al disminuir la velocidad, el flujo de detritos trata de desacelerar, aumentar de espesor y finalmente parar. Este proceso puede ocurrir por la disminución de la pendiente, el aumento del ancho del canal o la presencia de obstáculos que aumenten la resistencia al flujo. Cuando ocurren ampliaciones o cambios significativos en el cauce, se puede producir depositación de las partículas más gruesas. A medida que se depositan más materiales, se forma una especie de diques que hacen levantar el flujo, aumentándose el proceso de depositación como se observa en la Figura 35.

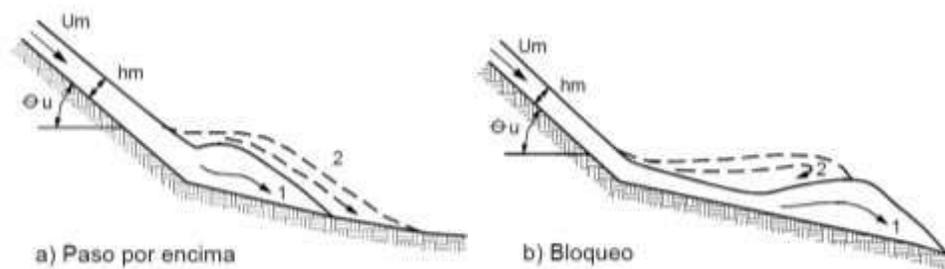


Figura 35. Esquema de los procesos de acumulación de depósitos de ondas consecutivas, por un flujo de detritos.

Cuando el cambio en el ancho del cauce es muy fuerte, o se presenta una disminución fuerte de la pendiente del cauce, la velocidad disminuye abruptamente y se deposita la mayoría del material sólido, formando abanicos o barras de grandes bloques. Primero se depositan las partículas de mayor tamaño, mientras las partículas finas tratan de recorrer una distancia mayor antes de producirse la sedimentación y puede ocurrir que las partículas en suspensión recorran caminos de muchos kilómetros después de que las partículas grandes se depositaron. Observaciones de campo indican que hay cierto ángulo de pendiente límite donde la oleada del flujo de escombros pierde su capacidad de viajar a velocidad uniforme y desacelera, empezando a depositarse la masa de la mezcla. Como primera aproximación, el ángulo de 10° aparece significativo para el comienzo de la deposición. Finalmente se sugiere asumir un rango de ángulos de deposición entre 10° y 14° para flujos abiertos o no confinados y de 8° a 12° para flujos canalizados o confinados (Castillo-Navarro, 2006).

Takahashi (1991) desarrolló modelos matemáticos para representar el proceso de depositación de flujos de detritos con base en la evaluación de las fuerzas de gravedad, *momentum* del flujo antes del cambio de pendiente, las fuerzas hidrostática y de presión de tierras, la fricción en el fondo y los esfuerzos producidos por la turbulencia y viscosidad del fluido.

En la Tabla 5 se muestran las propiedades físicas que se han podido medir para flujos ocurridos en diferentes partes de mundo. Estas propiedades además de determinar el comportamiento y tipo de flujo, brindan información para estimar el poder destructivo de éstos.

Tabla 5. Propiedades físicas de flujos hiperconcentrados.

| Ubicación | Velocidad (m/s) | Pendiente (%) | Densidad (gr/cm ³) | Viscosidad dinámica (poise) | % arcilla | Profundidad (m) | Sólidos (% en peso) | No. Reynolds |
|------------------------------|-----------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|--------------|
| Río Reventado, Costa Rica | 2.9 – 10 | 4.6 – 17.4 | 1.13 – 1.98 | - | 1 – 10 | 8 – 12 | 20 – 79 | - |
| Hunshui Gully, China | 10 – 13 | - | 2 – 2.3 | 15 – 20 | 3.6 (<0.005 mm) | 3 – 5 | 80 – 85 | 40 000 |
| Bullock Creek, Newzealand | 2.5 – 5.0 | 10.5 | 1.95 – 2.13 | 2 100 – 8 100 | 4 | 1.0 | 77 – 84 | 28.57 |
| Pine Creek, Mt. St. Helens | 10 – 31.1 | 7 – 32 | 1.97 – 2.03 | 200 – 3 200 | - | 0.13 – 1.5 | - | 200 |
| Wrightwood Canyon Ca. (1941) | 1.2 – 4.4 | 9 – 31 | 2.4 | 2 100 – 6 000 | <5 | 1.2 | 79 – 85 | 23.8 |
| Wrightwood Canyon Ca. (1969) | 0.6 – 3.8 | 9 – 31 | 1.62 – 2.13 | 100 – 60 000 | - | 1.0 | 59 – 86 | 1.33 |
| Mayflower Gulch, Colorado | 2.5 | 27 | 2.53 | 30 000 | 1.1 (<0.004 mm) | 1.5 | 91 | 3.2 |
| Dragon Creek, Arizona | 7.0 | 5.9 | 2.0 | 27 800 | - | 5.8 | 80 | 29.2 |
| Jian-jia Ravine, China | 8.0 | 0.06 | 2.3 | 15.5 – 1 736 | - | 1.4 | 89 | 148 – 11 561 |

III.5. DISTINCIÓN EN CAMPO DE LA OCURRENCIA DE UNA INUNDACIÓN Y DE UN FLUJO DE DETRITOS.

Las características de los depósitos de flujos de detritos se caracterizan por (Figura 36):

- No presentar dunas o *ripples* en superficie.
- Márgenes lobuladas.
- Acumulaciones de clastos gruesos en las márgenes; la distribución de estos es aleatoria.
- Relieve positivo (morfología de la superficie convexa, donde ocurre la “congelación” del flujo) superficies comúnmente tachonadas con bloques de roca.
- Los diques de flujo son comunes, pero no siempre se forman.
- Paquetes de sedimentos consolidados en “rincones y grietas” ejemplo entre las raíces y fajos de raíces en las cavidades de los árboles, edificios y bancos de la corriente.
- Los depósitos frecuentemente son represados localmente por pequeños atascos o grupos de cantos rodados.
- Clastos frágiles pueden estar presentes en la superficie por ejemplo clastos, suelo, etc.
- Revestimientos de arena y lodo en cantos rodados, tronco y bancos.
- No hay imbricación de grava.

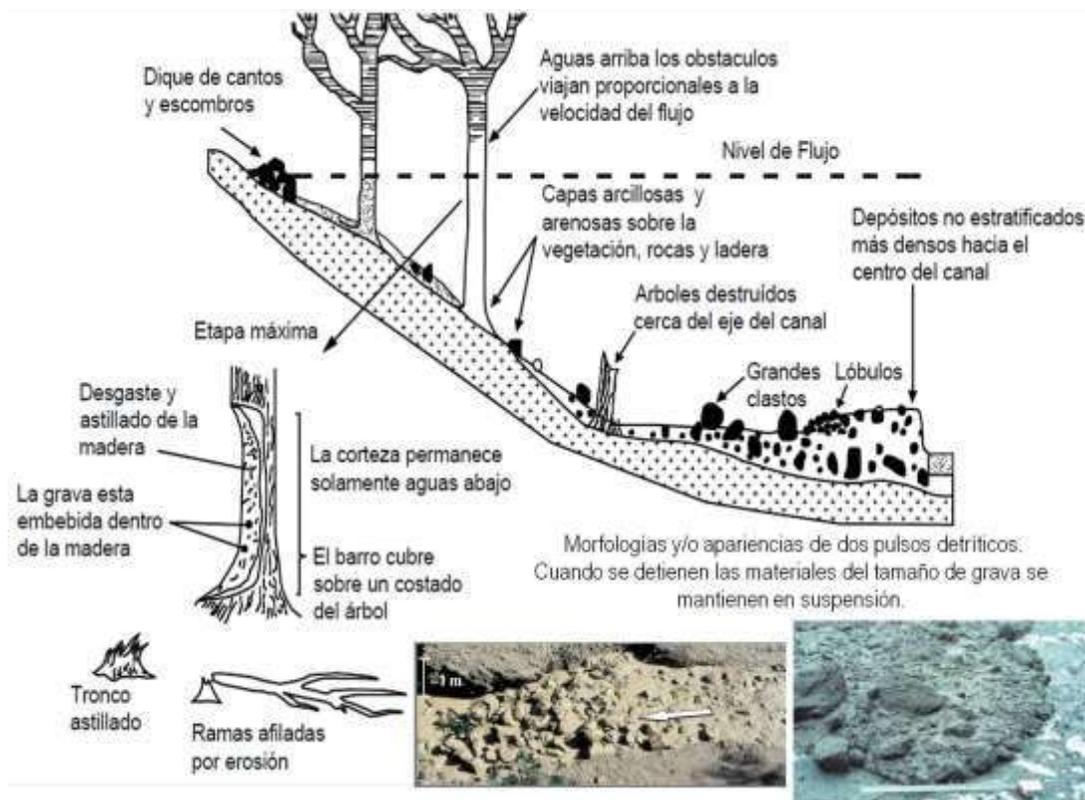


Figura 36. Evidencias en campo de que sucedió un flujo de detritos.

Estos flujos de escombros causan generalmente grandes impactos catastróficos. Las gravas pueden ser angulares a subangulares, los materiales no son estratificados y son muy pobremente clasificados. Pueden presentarse situaciones de gradaciones normales o inversas en las cuales los materiales más gruesos se encuentran encima de los materiales finos. La distribución de los cantos o clastos es al azar en las superficies (Figura 37).



Figura 37. Secciones verticales típicas de depósitos de flujos de detritos.



Figura 38. Evidencias del paso del flujo de detritos sobre el cauce del río San Pedro.

Se observa la incrustación de un clasto y el astillamiento del árbol.

Una inundación se define como una descarga de agua extraordinaria con concentración de sedimentos menores de 5% en volumen. La cantidad de sedimentos en suspensión es insuficiente para afectar sustancialmente la forma en que se comporta un flujo de agua. El agua aparentemente puede estar muy contaminada de sedimentos y al mismo tiempo, existe cierto

transporte de materiales de gran tamaño, en especial, en el fondo del cauce. Posterior a una inundación ocurre lo siguiente (Figura 39):

- Se presentan dunas, ripples o depósitos de flujos de agua.
- No se forman diques, aunque se pueden acumular restos en los márgenes del cauce.
- No hay capas de lodo sobre rocas, troncos, o los bancos del cauce.
- Los clastos de grava pueden ser imbricadas.

Los depósitos de inundaciones son generalmente estratificados en láminas o capas muy bien definidas y en ocasiones, entrecruzadas. Es común que existan cambios bruscos en el tamaño medio de las partículas de las secciones verticales y los materiales se encuentran muy bien clasificados en cada una de estas secciones. La consistencia de los materiales tiende a ser suelta y friable (fácil de excavar). Por lo general, las superficies de las diversas capas poseen dunas, conformando barras longitudinales, acorazadas con clastos gruesos. El tamaño de los sedimentos depende principalmente de la pendiente del cauce. Los cauces de alta pendiente transportan y depositan bloques y gravas mientras en los cauces de baja pendiente, predominan las arenas y los limos.

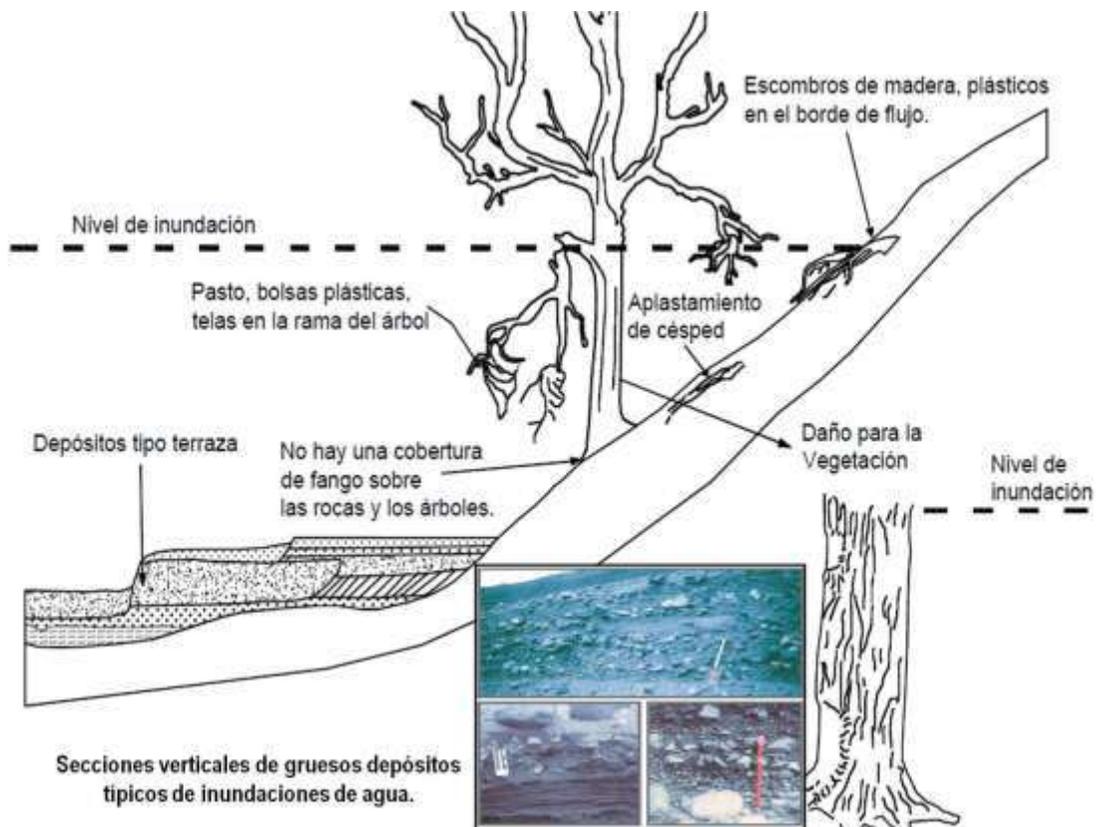


Figura 39. Evidencias en campo del suceso de una inundación.

III.6. MODELO NUMÉRICO FLO-2D.

Existen modelos numéricos que analizan fluidos no Newtonianos: DAMBRK (ecuación de Saint-Venant 1-D y de Bingham), FLATMODEL (leyes de resistencia incluyendo los códigos de Bingham, Herschel, Bulkley y Voellmy), TITAN 2D (se basa en las leyes geofísicas y no en las leyes hidráulicas), LAHAR Z (se basa en la descripción constitutiva de Coulomb de un material seco-granular y un modelo fluido de dos fases), NWS-FLDWAV (ecuaciones completas unidimensionales de Saint-Venant de flujo no-permanente), DAN-W (leyes de Newton), DBF-1D, AVAL-1D, entre otros. Estos modelos en su mayoría son unidimensionales y se enfocan en el análisis dinámico de deslizamientos y avalanchas, reportando información como tirantes, fuerzas de impacto y distancia recorrida.

En este trabajo se usa FLO-2D (*2-Dimensional Flood Routing Model*), que es un modelo bidimensional de diferencias finitas (O'Brien, 1988) que simula flujo de fluidos no Newtonianos en abanicos aluviales. Permite simular flujos en topografías complejas, tales como áreas urbanizadas, terrazas y conos de deyección; así como el intercambio de fluido entre los canales y el cono de deyección. Con FLO-2D puede modelarse flujo de agua y flujos hiperconcentrados (avenidas de lodo, flujo de lodo y flujo de detritos). FLO-2D cuenta con la aprobación de la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) de los Estados Unidos. Para el caso de flujos hiperconcentrados el modelo considera el fluido homogéneo (una sola fase) de concentración variable; esto significa que internamente no se hace distinción de los tamaños de sedimento. FLO-2D rutea los flujos no Newtonianos como un continuo pronosticando el movimiento del fluido viscoso como función de la concentración de sedimentos utilizando un modelo cuadrático reológico (Ecuación 14) para predecir las tensiones de corte y viscosas que describe un continuo de regímenes de flujo desde el flujo viscoso al turbulento/dispersivo.

FLO-2D se basa en la preservación del volumen, es decir, preserva la continuidad del agua y el sedimento en el traslado de una crecida o flujo de detritos sobre un abanico aluvial o una planicie (Figura 40), representada por una malla de elementos cuadrados. Para cada elemento de la malla y cada paso de tiempo, el modelo calcula el cambio en los volúmenes del agua y de sedimento y el correspondiente cambio en la concentración de sedimentos. Tiene como atributos principales que permite el flujo en dos direcciones (ocho lados de un elemento cuadrado), simula el flujo en canales trapeziales, rectangulares o en cauces naturales, permite el intercambio del flujo entre el canal y la llanura de inundación (Figura 41), simula precipitación, evaporación e infiltración, se pueden agregar componentes urbanos como calles, edificaciones y diques, además de estructuras hidráulicas como puentes y alcantarillas.

Como datos de entrada se requiere la topografía digital del terreno, la geometría del canal, valores estimados de la rugosidad del canal y de la planicie de inundación, hidrogramas de entrada (líquidos y sólidos), precipitación y propiedades reológicas de la mezcla agua-sedimento.

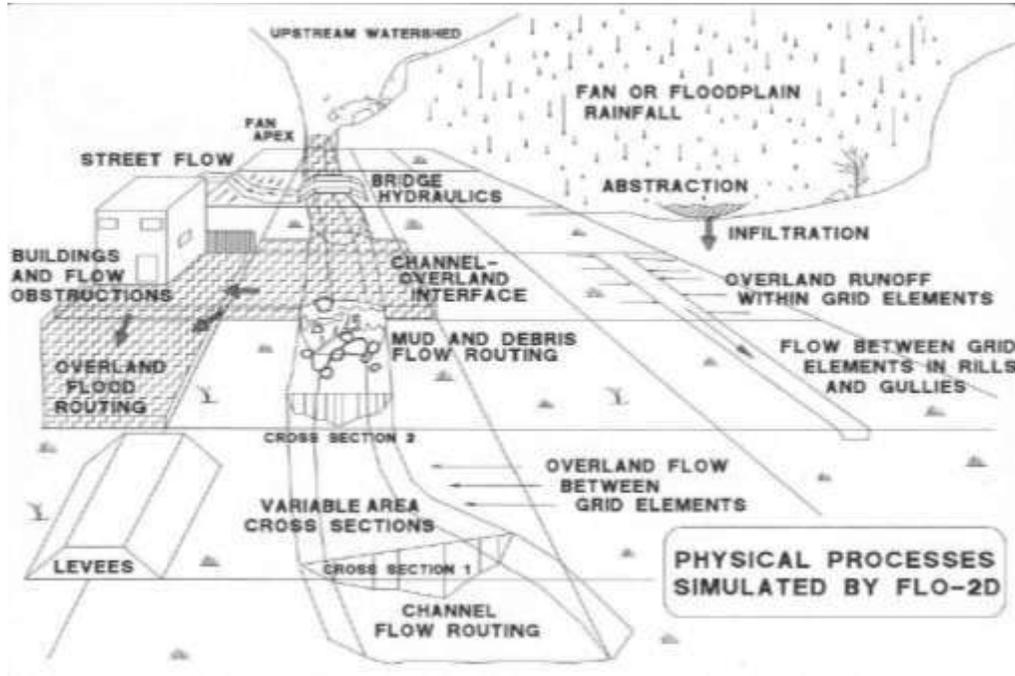


Figura 40. Procesos físicos que simula FLO-2D. Fuente: FLO-2D User's Manual (O'Brien, 2000).

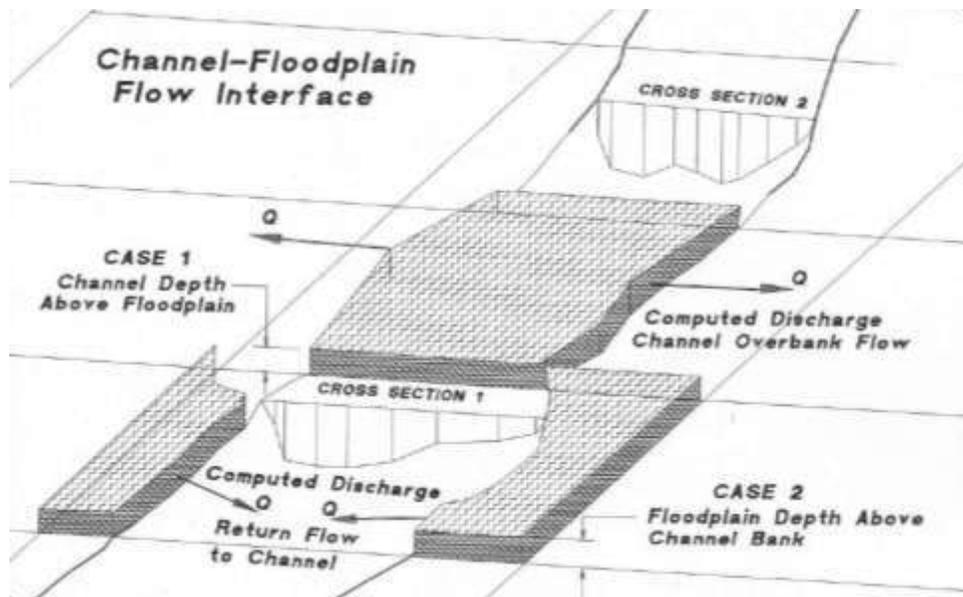


Figura 41. Interfaz llanura-inundación. Fuente: FLO-2D User's Manual (O'Brien, 2000).

III.6.1. Ecuaciones que utiliza FLO-2D.

Ecuacion de la continuidad:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} + \frac{\partial h V_y}{\partial y} = i \quad [\text{Ec. 4}]$$

Y la ecuación de cantidad de movimiento en dos dimensiones:

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x \partial V_x}{g \partial x} - \frac{V_y \partial V_x}{g \partial y} - \frac{1 \partial V_x}{g \partial t} \quad [\text{Ec. 5}]$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y \partial V_y}{g \partial y} - \frac{V_x \partial V_y}{g \partial x} - \frac{1 \partial V_y}{g \partial t} \quad [\text{Ec. 6}]$$

Donde, en las ecuaciones anteriores: h es la profundidad del flujo, V_x, V_y son las componentes de la velocidad media, t es el tiempo, g la aceleración de la gravedad, S_f es la pendiente de fricción, S_o la pendiente del lecho, i es intensidad de la precipitación.

Los elementos de la ecuacion de movimiento son:

$$S_f = S_o - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x \partial V_x}{g \partial x} - \frac{1 \partial V_x}{g \partial t} \quad [\text{Ec. 7}]$$

En negro la onda cinemática, en rojo la onda difusiva y en azul la onda dinámica, en donde el color más fuerte muestra la aceleración advectiva y el tono más claro la aceleración local.

Tabla 6. Magnitud relativa de los términos que componen la ecuación de onda dinámica, Henderson (1966).

| | Pendiente de fondo | Gradiente de presión | Aceleración advectiva | Aceleración local |
|----------------|--------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Término | S_o | $\partial y / \partial x$ | $V \partial V / g \partial x$ | $\partial V / g \partial t$ |
| Magnitud (m/m) | 0.005 | 0.0001 | 0.000035 | 0.000005 |

III.6.2. Solución numérica.

La forma diferencial de las ecuaciones de continuidad y de *momentum* en el modelo FLO-2D, son resueltas mediante un esquema central de diferencias finitas. En métodos numéricos para resolver ecuaciones diferenciales parciales, los cálculos se llevan a cabo en una malla localizada en plano $x-t$. La malla $x-t$ es una red de puntos definida al tomar incrementos de distancia de longitud Δx e incrementos de tiempo de duración Δt . Los esquemas numéricos transforman las ecuaciones diferenciales parciales en un conjunto de ecuaciones algebraicas de diferencias finitas. Para la solución del método de diferencias finitas, el FLO-2D emplea un esquema explícito, que consiste en un esquema simple que requiere de valores pequeños de Δx y Δt para la convergencia del procedimiento numérico. Para la estabilidad numérica de los cálculos, una condición necesaria pero no suficiente para la estabilidad de un esquema explícito es la condición de Courant-Friedrich-Lewy (CFL). El paso de tiempo Δt es limitado por:

$$\Delta t = C \frac{\Delta x}{v+c} \quad [\text{Ec. 8}]$$

Donde:

C es el número de Courant ($0.3 < C < 1.0$). El número de Courant marca el límite superior del intervalo de tiempo interno utilizado por ciertos algoritmos.

Δx es el ancho del elemento de la malla cuadrada.

v es la velocidad promedio de la sección transversal calculada.

c es la celeridad de la onda calculada.

Para el tránsito de onda dinámica, otro criterio de estabilidad numérica aplicado en el modelo es el de Ponce y Theurer (1982). Este criterio está en función de la pendiente del lecho, la descarga y el tamaño del elemento de malla. El paso de tiempo es limitado por:

$$\Delta t < \zeta S_0 \Delta x^2 / q_0 \quad [\text{Ec. 9}]$$

Donde:

q_0 es la descarga unitaria.

S_0 es la pendiente del lecho.

ζ es un coeficiente empírico (Ponce y Theurer, 1982).

Los pasos de tiempo Δt generalmente varían de 0.1 s a 60 s. El modelo comienza con un paso de tiempo mínimo y lo aumenta hasta que uno de los criterios de estabilidad numérica sea

excedido, entonces el paso de tiempo es disminuido. Si los criterios de estabilidad continúan siendo excedidos, entonces el paso de tiempo es disminuido hasta que el paso de tiempo mínimo sea alcanzado. Los pasos de tiempo son una función de la descarga del flujo para un elemento de malla y de su tamaño.

III.6.3. Lógica del FLO-2D.

La topografía de la superficie se discretiza en una malla formada por celdas o elementos cuadrados de tamaño uniforme para toda el área de estudio y a cada elemento se le asigna una posición en la malla, una elevación o cota de terreno, un coeficiente de rugosidad (n de Manning) y factores de reducción del flujo que atraviesa la celda.

El procedimiento computacional para flujos superficiales involucra el cálculo de la descarga a través de cada una de las fronteras en las ocho direcciones del flujo. Las direcciones de flujo incluyen las cuatro direcciones de la brújula y las cuatro direcciones diagonales, como se muestra en el esquema en planta de la Figura 42. El cálculo hidráulico de cada elemento de malla empieza con una estimación de la profundidad del flujo en la frontera del elemento de malla; ésta es un promedio de las profundidades de flujo en los dos elementos de malla que comparten descarga en una de las ocho instrucciones. Los otros parámetros hidráulicos son también promediados para computar la velocidad de flujo incluyendo resistencia de flujo (n de Manning), área del flujo, pendiente, elevación de la superficie de agua y perímetro mojado.

El software FLO-2D solucionará ya sea la ecuación de onda difusiva o la ecuación de onda dinámica completa para computar la velocidad. La ecuación de Manning es luego aplicada en una dirección usando el promedio de la pendiente de la superficie de agua para calcular la velocidad. Si la ecuación de onda difusiva es seleccionada, la velocidad es entonces calculada para las ocho direcciones del flujo en cada elemento de malla. Si la opción de onda dinámica completa es aplicada, la velocidad de onda difusiva calculada es utilizada como primera aproximación en el método de segundo orden de Newton-Raphson de tangentes para determinar las raíces de la ecuación de onda dinámica completa, la cual es una ecuación diferencial parcial de segundo orden, no lineal.

El algoritmo de solución incorpora los siguientes pasos donde cada elemento de malla posee un único valor de rugosidad, elevación y profundidad del flujo:

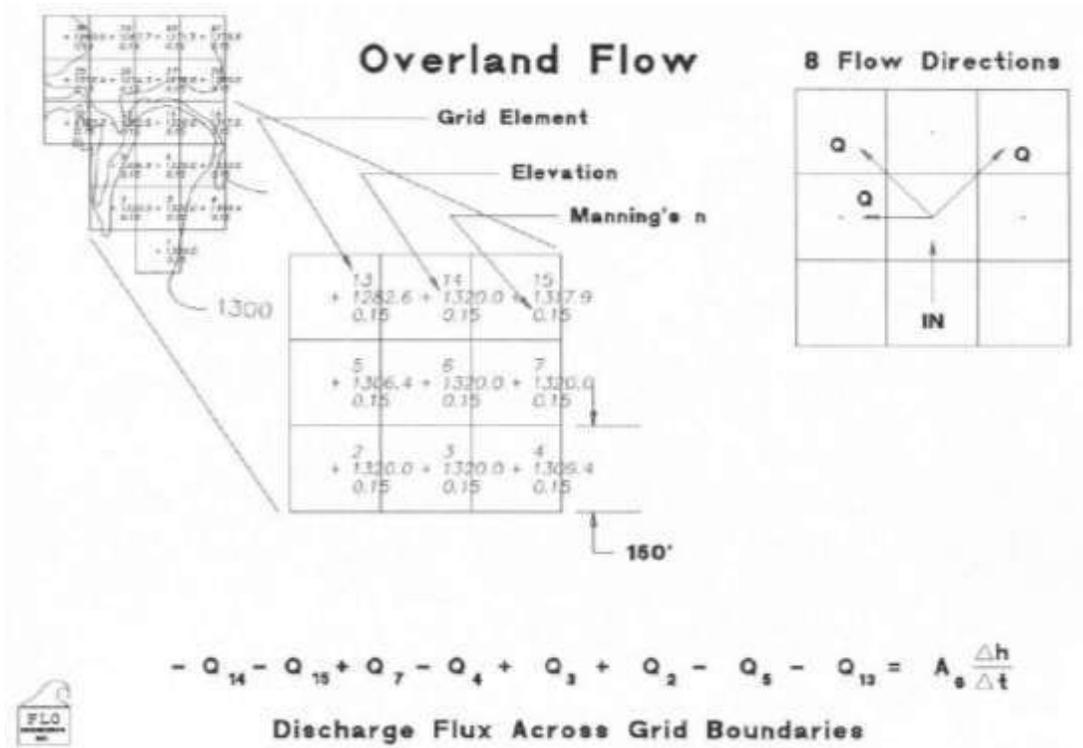


Figura 42. Descarga del flujo a través de los elementos de malla, en planta. Fuente: FLO-2D User's Manual (O'Brien, 2000).

1. El promedio de los valores de rugosidad y geometría del flujo entre dos elementos de la malla son calculados.
2. La profundidad del flujo d para el cálculo de la velocidad a través de la frontera de malla para el siguiente paso de tiempo ($i+1$) es estimado de los pasos de tiempo previos i usando una función lineal (el promedio de la profundidad del flujo entre dos elementos).

$$d_x^{i+1} = d_x^i + d_{x+1}^i \quad [\text{Ec. 10}]$$

3. La velocidad es calculada usando la ecuación de onda difusiva como primera aproximación. La única variable no conocida en la ecuación de onda difusiva es la velocidad.
4. Si la ecuación de onda dinámica completa es seleccionado por el usuario, la velocidad de onda difusiva prevista para ese paso de tiempo es usado como un dato inicial en la solución de Newton-Raphson. Se hace notar que para flujos de sedimentos hiperconcentrados, como flujos de lodo y escombros, el cálculo de la velocidad incluye los términos adicionales de viscosidad y esfuerzo de cedencia.

5. La descarga Q a través de la frontera de la planicie de inundación (o entre dos elementos de canal) es calculado multiplicando la velocidad por el área transversal del flujo.
6. El incremento de descarga para el paso de tiempo a través de las fronteras son sumados,

$$\Delta Q_x^{i+1} = Q_n + Q_e + Q_s + Q_w + Q_{ne} + Q_{se} + Q_{sw} + Q_{nw} \quad [\text{Ec. 11}]$$

7. y la variación en volumen es distribuido sobre el área de almacenamiento disponible dentro del elemento de malla o canal para determinar el incremento en la profundidad del flujo

$$\Delta d_x^{i+1} = \Delta Q_x^{i+1} \Delta t / \text{Area} \quad [\text{Ec. 12}]$$

8. donde ΔQ_x es el delta de la descarga en las ocho direcciones de la planicie de inundación para el elemento de malla y para el paso de tiempo Δt entre el tiempo i e $i + 1$.
9. El criterio de estabilidad numérica es luego verificado para la nueva profundidad del flujo del elemento de malla. Si cualquier criterio de estabilidad es excedida, el tiempo de simulación es reseteado para el tiempo previo y el incremento del paso del tiempo se reduce.
10. La simulación incrementa con el paso de tiempo hasta que el criterio de estabilidad sea excedida.

III.6.4. Modelo reológico cuadrático.

Los flujos hiperconcentrados de sedimentos son simulados por el modelo FLO-2D usando un modelo reológico cuadrático que incluye la tensión viscosa, esfuerzo de cedencia, turbulencia y condiciones de esfuerzo dispersivo en función de la concentración de sedimentos. La relación entre la viscosidad y el esfuerzo de fluencia para las muestras de flujo de lodo son provistas en el manual del software.

El modelo reológico (O'Brien y Julien, 1985), expresa la tensión de corte τ en flujos hiperconcentrados de sedimentos como la suma de cinco componentes: la tensión de corte de cedencia τ_c , tensión de corte de Mohr-Coulomb τ_{mc} , la tensión de corte viscosa τ_v , la tensión de corte turbulenta τ_t y la tensión de corte dispersiva τ_d :

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad [\text{Ec. 13}]$$

Escribiendo la ecuación anterior en términos de la tasa de corte $\frac{dv}{dy}$ o gradiente de velocidad con $\tau_y = \tau_c + \tau_{mc}$, se obtiene la ecuación cuadrática reológica:

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{dv}{dy} \right) + C \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad [\text{Ec. 14}]$$

Donde:

τ es el esfuerzo cortante total.

τ_y es el esfuerzo de cedencia.

η es la viscosidad dinámica.

$\frac{dv}{dy}$ es el gradiente de velocidad.

C es el coeficiente del esfuerzo cortante inercial.

C depende de la densidad de la mezcla ρ_m , de la longitud de mezcla de Prandtl l , del tamaño del sedimento d_s y de una función de la concentración volumétrica de sedimentos C_v :

$$C = \rho_m l^2 + f(\rho_m, C_v) d_s^2 \quad [\text{Ec. 15}]$$

Bagnold (1954) dio la definición de la relación funcional $f(\rho_m, C_v)$ como:

$$f(\rho_m, C_v) = a_i \rho_m \left(\left(\frac{C_*}{C_v} \right)^{1/3} - 1 \right) \quad [\text{Ec. 16}]$$

Donde a_i es un coeficiente empírico igual a 0.01 y C_* es la máxima concentración estática en volumen para las partículas de sedimento.

La ecuación cuadrática reológica puede ser integrada en la profundidad y reescrita en la forma de gradiente adimensional:

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} - \frac{K\eta V}{8\gamma_m h^2} + \frac{n^2 V^2}{h^{4/3}} \quad [\text{Ec. 17}]$$

Donde S_y es el gradiente de cedencia, S_v es el gradiente viscoso, S_{td} es el gradiente dispersivo turbulento, γ_m es el peso específico de la mezcla de sedimentos, K es el parámetro de resistencia f (forma, pendiente, vegetación del canal), y n es el valor de rugosidad de Manning equivalente.

La tensión de corte y la viscosidad varían principalmente con la concentración de sedimentos y pueden ser expresados en una ecuación semiempírica como:

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C} \quad \eta = \alpha_2 e^{\beta_2 C} \quad [\text{Ec. 18 y 19}]$$

$$n = n_t + n_d = n_t + 0.0538 n_t e^{6.0896 C} \quad [\text{Ec. 20}]$$

Donde n_t es el coeficiente de Manning turbulento y n_d es el valor de Manning dispersivo.

En las expresiones de la tensión de corte y viscosidad, como funciones de la concentración de sedimentos en volumen (de limos, arcillas y en algunos casos arenas finas), los parámetros α_1 , α_2 , β_1 , y β_2 son coeficientes empíricos determinados en laboratorio.

La viscosidad de la matriz fluida es también una función del porcentaje y del tipo de limos y arcilla y de la temperatura del fluido. Los flujos de detritos muy viscosos tienen altas concentraciones del sedimento y en correspondencia, altas tensiones de cedencia y pueden dar lugar a flujo laminar aunque los flujos laminares en naturaleza son extremadamente raros. Los flujos menos viscosos (crecidas de lodo) son siempre turbulentos.

CAPÍTULO IV.

ANTECEDENTES.

A continuación se mencionan algunos antecedentes de la aplicación del programa FLO-2D, en diversas partes del mundo. Este modelo numérico se utilizó en el abanico de la cuenca Jones Creek, EUA, para modelar la ocurrencia de un moderado flujo de detritos que ocasionó daños a los puentes, carreteras y propiedades privadas cerca del ápice del abanico en la Ciudad de *Acme, Washington*, en 1983. Los resultados del modelo mostraron tres zonas de impacto de flujos de detritos; resultados que permitieron la elaboración de un mapa con cuatro zonas de peligro, en el abanico aluvial.

Como consecuencia de un flujo de detritos producto de un desprendimiento de hielo y rocas del nevado Verónica (5,893 msnm), ocurrido el 12 de octubre del 2005, se registraron graves daños en las comunidades el Palomar y Tiaparo (Figura 43) ubicadas en las márgenes del río Runtumayo, en el Cusco, Perú. Este evento motivó la aplicación de FLO-2D cuyos resultados obtenidos y las evidencias en campo del flujo de detritos, se concluyó con un mapa de peligro.

En el mismo Perú, en Lima. Se han reconocido importantes PGRM activos, en la Quebrada Paihua, como deslizamientos, caídas de roca, flujos de lodo y erosión de laderas que han afectado de manera importante la parte baja de la quebrada. Con la finalidad de evitar más contingencias por futuros flujos de detritos en la zona baja de la quebrada, se simuló huaycos (flujos de lodo y detritos) para calibrar un modelo numérico (FLO-2D), que sirviera para generar un mapa de peligro para la zona. Se tomaron en cuenta eventos de flujos de detritos ocurridos en 1959, 1968, 1981, 1983 y 1984. Los resultados ayudaron en la generación de un mapa preliminar de amenaza para la ciudad de Matucana, donde se estimó que los sectores más amenazados se sitúan en las áreas pertenecientes a las calles Jr. Lima y calles transversales (aguas abajo paralelas al Jr. Junín). Por otro lado se encuentra toda el área que bordea al río Rímac, y como estructura principal se tiene la Carretera Central en ese tramo. Además como infraestructuras principales a ser dañadas se encuentra el C.E “San Juan Bautista” y la comisaría PNP de la ciudad.



Figura 43. Daños a la línea férrea Ollantaytambo-Machupicchu, por el flujo de detritos ocurrido en octubre de 2005, en el Cusco, Perú.

El 15 y 16 de diciembre de 1999, en las costas del estado de Vargas en Venezuela, cayeron lluvias excepcionales (800.1 mm) que movilizaron más de 40 millones de metros cúbicos de suelo. Los cauces encañonados se ampliaron cerca de la playa, inundando y sedimentando. Las avalanchas pasaron por encima de las edificaciones de poca altura, los sedimentos cubrieron las edificaciones, barrios enteros fueron cubiertos por los sedimentos de piedra, grava, y arena (Figura 44). Se estimó un número de víctimas de 45,000, personas damnificadas 273,000, viviendas destruidas 64,000 y pérdidas directas 1,900 millones de dólares. Posterior al evento se aplicó FLO-2D con la intención de simular eventos de distintas frecuencias y proponer medidas de mitigación. El modelo calibrado fue base para simular eventos con diferentes periodos de retorno que derivaron en un mapa de peligro para la cuenca del Cerro Grande y propuestas para la construcción de obras de mitigación.

El programa FLO-2D también ha sido utilizado en Argentina, en particular en la cuenca del río Iruya emplazada en el ámbito de la Cordillera Oriental y Sierras Subandinas en la Región Noroeste de Argentina. En este caso las simulaciones efectuadas se dirigieron a conocer los aspectos del transporte de los flujos hiperconcentrados de sedimentos. Es decir, comprender y evaluar la influencia de los parámetros del modelo reológico (Ecuación 14), en los valores de profundidad hidráulica y velocidad del flujo, así como ponderar los efectos en las variables hidrodinámicas de la incertidumbre en el verdadero valor de la concentración de sedimentos y a partir de esta cuantificación, extrapolar conclusiones que interesen en el diseño de medidas de control y o mitigación.

También se han estudiado flujos viscosos en pequeñas cuencas torrenciales en Austria (Hubl y Steinwendtner, 2001), flujos de barros en el valle de Yosemite en California (Bertolo, y Wiczorek, 2005), numerosos deslizamientos disparados por lluvias en depósitos del SE de Italia (Aleotti y Polloni, 2003), entre otros.



Figura 44. Efectos del alud torrencial sobre los edificios de las costas de Vargas, Venezuela.

Obsérvese el tamaño de los bloques de roca metamórfica movilizados y el daño importante a grandes estructuras, en el cono aluvial.

En México es una herramienta poco conocida e inclusive puede decirse que prácticamente inexplorada, solo se encuentran casos del uso de este modelo por un reducido número de investigadores del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), dichos trabajos se mencionarán a continuación.

IV.1. USO DE FLO-2D EN MÉXICO.

En el año de 1998, por iniciativa del Dr. Polioptro F. Martínez Austria, se abrió una línea de investigación en el IMTA para estudiar fenómenos relacionados con los flujos de lodo y de detritos o “*debris*”.

Se desarrolló una metodología para el análisis de este tipo de eventos. Consistiendo ésta, principalmente, en la recopilación y procesamiento de información disponible en nuestro país, así como en la aplicación del modelo numérico FLO 2D y la obtención de los parámetros reológicos de muestras de suelo.

El modelo FLO-2D fue aplicado para simular el evento del huracán “Paulina”, que afectó el puerto de Acapulco en 1997; también en el diagnóstico integral de la cuenca hidrológica del Cañón de los Laureles, en Tijuana, B.C., (Figuras 45 y 46) y en el proyecto de cooperación internacional “Zonificación de la ciudad de Managua por niveles de vulnerabilidad en cuanto a deslizamientos, flujo de lodos y *debris*”.



Figura 45. Flujo de detritos, evento de Tijuana, B.C., 1998.

En este trabajo realizado en Tijuana, B.C., se tuvo como finalidad aportar una metodología particular para analizar, evaluar y prevenir o mitigar el peligro por flujos hiperconcentrados en la República Mexicana conforme a la información disponible, y ser punta de lanza en la elaboración de mapas de peligro y/o susceptibilidad a estos fenómenos, que grandes daños ocasionan cuando se presentan.

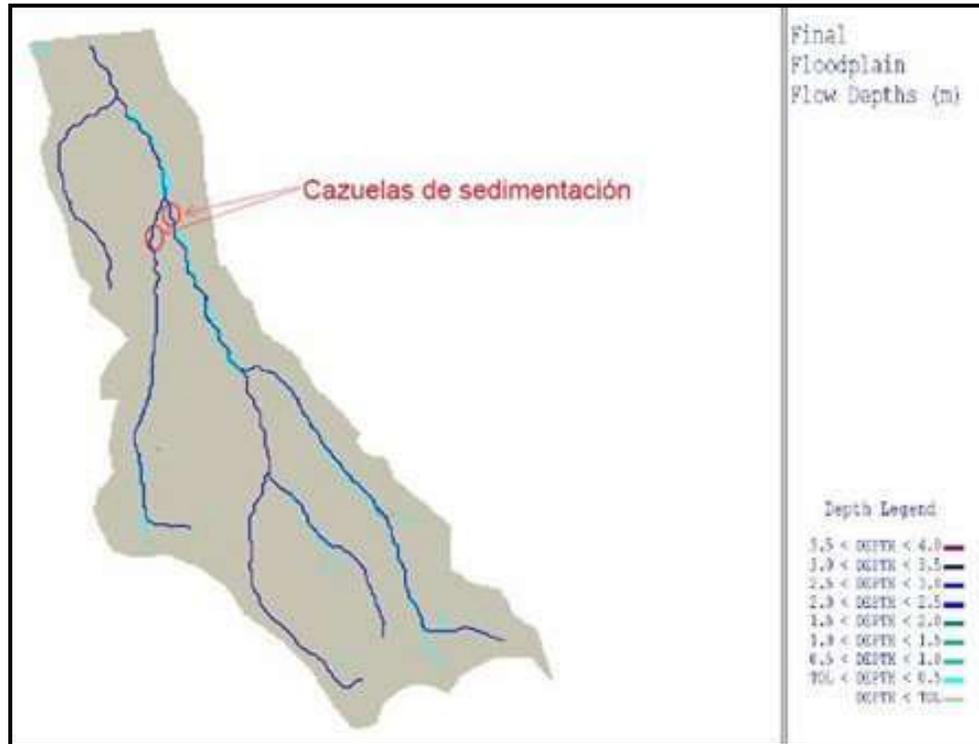


Figura 46. Resultados del estudio para la cuenca del Cañón de los Laureles, en Tijuana, Baja California.

Los trabajos analizados y comentados en este capítulo, tienen varias similitudes o más bien están encaminados a lograr el mismo fin. Sin embargo para llegar a la elaboración de un mapa de peligrosidad, se toman distintos caminos donde la mejor decisión es tomada a partir de la cantidad y calidad de los datos recopilados en literatura y en campo. Es importante recordar que cada caso es especial debido a las características propias de la zona de estudio y del daño causado por el evento. Aquí, es donde este trabajo toma importancia en demasía, y además no dejando de agregar que se estimula la percepción del peligro y en consecuencia del riesgo a través de un mapa, de los pobladores de las comunidades afectadas. Y que con esto se sienten las bases para la implementación de medidas preventivas.

CAPÍTULO V.

MATERIALES Y METODOLOGÍA.

En este capítulo se detallará los materiales y metodología seguida para alcanzar los objetivos planteados al inicio.

V.1. MATERIALES.

Los materiales que se utilizaron para la elaboración de este trabajo son:

I. PROGRAMAS:

FLO-2D versión 2009.06, ArcGIS 9.3, Global Mapper 9, ArcView 3.2, programa AX, Google Earth, HEC-HMS 3.2, AutoCAD 2010, Office 2007 (Excel).

II. MATERIAL CARTOGRÁFICO:

Carta geológico-minera E14A26 escala 1:50,000.

Carta edafológica E14A26 escala 1:50,000.

Carta topográfica E14A26 escala 1:50,000

Mapas temáticos en formato *.shp, de vegetación, temperatura, precipitación y uso de suelo escala 1:1, 000,000.

Imágenes de satélite de Google Earth posteriores y anteriores, al evento simulado.

MDE tomado de INEGI con resolución de 30 m, para la zona E14A26.

MDE con resolución de 1m, de la zona de simulación.

III. EQUIPO DE TOPOGRAFÍA:

Estación Total Leica y aditamentos, GPS Geodésico.

IV. EQUIPO PARA CLASIFICACIÓN DE SUELOS:

Horno con temperatura constante ($105^{\circ} \pm 5^{\circ}$), juego de tamices para suelos finos (No. 4, 10, 20, 40, 60, 140 y 200), Copa de Casagrande y aditamentos (ranurador, espátula, capsulas de porcelana, placas de vidrio, cápsulas herméticas y aditamentos).

Para prueba de textura: hidrómetro, termómetro, cronometro, probetas de 1,000 mL, balanza de precisión, pipetas y agitadores manuales y eléctricos.

V.2. METODOLOGÍA.

Para realizar este trabajo se llevó a cabo trabajo de campo y trabajo de gabinete. El trabajo de campo se describe en la Figura 47.

V.2.1. Trabajo de campo.

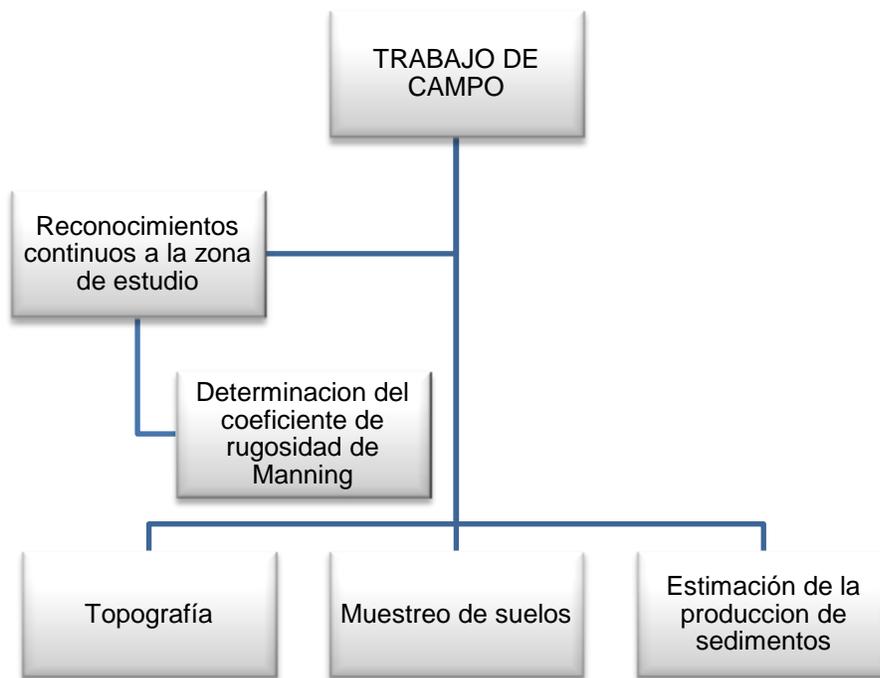


Figura 47. Cuadro sinóptico que desglosa los trabajos realizados en campo.

Se efectuaron visitas de campo a distintos sectores del área de estudio con el fin de recabar información sobre la topografía de la zona, el tipo de sedimentos movilizados, cuantificación de los desprendimientos y deslizamientos ocurridos, observar evidencia de los efectos causados por los flujos detríticos, tomar muestras de suelo y capturar algunas fotografías que nos permitieran determinar algunos parámetros necesarios para la simulación como el coeficiente de rugosidad de Manning en la zona del cauce.

La n de Manning se determinó tanto para el cauce del río San Pedro, como para las calles de Mineral de Angangueo, ya que estas funcionaron como canales conduciendo los flujos hiperconcentrados hacia aguas abajo.

En base a los recorridos realizados a lo largo del cauce del río San Pedro, del cual se tiene evidencia en la Figura 49, la experiencia propia y de personas expertas en el tema, las cuales fueron consultadas se determinó que el río de la microcuenca en estudio (solo en su parte baja, que se utiliza en simulación), se asemeja a la corriente Clear Creek ubicada cerca de Golden, Colorado, la cual fue estudiada por el U.S *Geological Survey* (USGS), y se le determinó un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.05, según resultados publicados en USGS *Water Supply Paper*, 1849.



Figuras 48 (izquierda) y 49 (derecha). Corriente Clear Creek. Río San Pedro.

Puede observarse la semejanza de las corrientes, ambas cuentan con bloques de roca angulosas con diámetros de hasta 50 cm, tanto en el fondo como en los taludes.

Entonces, mediante comparación de características e imágenes (Figuras 48 y 49) se tiene que el coeficiente de rugosidad de Manning para el tramo del río San Pedro determinado para simular en FLO-2D es:

$$n = 0.050.$$

En cuanto al valor de n para las calles, es de nuestro conocimiento que las calles y callejones de Mineral de Angangueo estaban en condiciones normales antes del evento, el revestimiento de estas calles es de concreto, como puede verse en la Figura 50. De igual manera que en el caso del cauce se recurrió a la Tabla 30 (ver Anexo I), que muestra distintos valores de n para diversos tipos de superficies, aplicados generalmente para canales.

De acuerdo al tipo de acabado que tiene el concreto en las calles de Mineral de Angangueo, el cual es concreto terminado con llana de madera, se tiene según la **Tabla 30** un valor de:

$$n = 0.015.$$



Figura 50. Fotografía de una de las calles de Angangueo, tomada posterior al evento.

Puede observarse la calle revestida de concreto hidráulico, aun con vestigios de detritos sobre el pavimento. Al fondo se observa el deslizamiento del Cerro Melón.

El trabajo de topografía fue realizado en dos partes:

En la primera se levantaron puntos GPS sobre el cuerpo y el escarpe del deslizamiento San Pedro, este trabajo puede verificarse en las Figuras 51 y 52. Este trabajo fue fundamental para estimar el volumen desplazado hacia aguas abajo, aportado al flujo líquido y posteriormente a los flujos de detritos, además con ayuda de imágenes de Google Earth se determinó el volumen aportado por otros deslizamientos de menor magnitud, de lo cual se hablará en capítulos subsecuentes.

La segunda parte del trabajo de topografía fue el levantamiento de puntos GPS a lo largo del cauce San Pedro y parte del cono de deyección (zona urbana de Mineral de Angangueo), el levantamiento constó de 3084 puntos y una longitud aproximada de 2.5 km. Este levantamiento fue base para la elaboración de un MDE de alta resolución (1 m), el cual se generó a través de

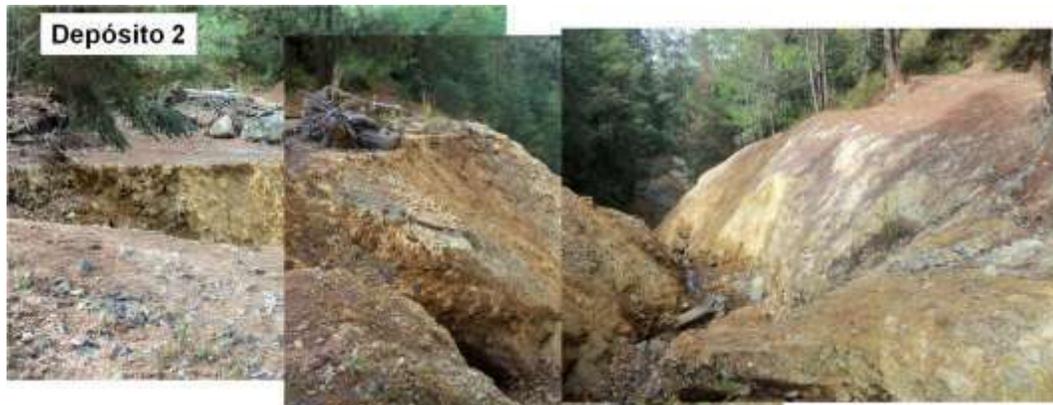
ArcGIS con el método de interpolación *Spline* del cual se obtuvieron los mejores resultados, este MDE fue plataforma para la modelación de los flujos de detritos en FLO-2D.



Figuras 51 (izquierda) y 52 (derecha). Trabajos de levantamiento topográfico con Estación Total sobre el cauce del río San Pedro.

El muestreo de suelos se llevó a cabo en todos los depósitos de escombros de mina encontrados a lo largo del cauce, sin embargo solo se utilizaron las muestras de los depósitos más representativos para realizar los análisis. En las Figuras 53, 54 y 55 se muestran tres de los depósitos más grandes encontrados en la parte alta de la MCSP. También se muestrearon y analizaron los suelos desprendidos en el deslizamiento San Pedro. Estos muestreos fueron vitales para posteriormente realizar las respectivas pruebas de clasificación de suelos, para determinar posteriormente parámetros reológicos del flujo a simular.

Los reconocimientos continuos a la zona de estudio conformaron una aglomeración sólida de información, para realizar simulaciones lo más semejantes a lo sucedido en la realidad y por consecuencia obtener una aceptable calibración del modelo en FLO-2D.



Figuras 53 (arriba), 54 (en medio) y 55 (abajo). Imágenes de tres depósitos de escombros mineros en la parte alta de la microcuenca.

Estos depósitos fueron muestreados, para conocer su granulometría, límites de consistencia y porcentajes de arcilla, ya que estos aportaron la mayor parte de los sólidos a los torrentes de agua.

V.2.2. Trabajo de gabinete.

En lo que se refiere al trabajo de gabinete (Figura 56), este fue más extenso y minucioso; se inicio con la recopilación de la información bibliográfica y cartográfica disponible, tanto de manera impresa como en formato electrónico, esta información fue revisada, analizada, valorada y procesada para su posterior uso.

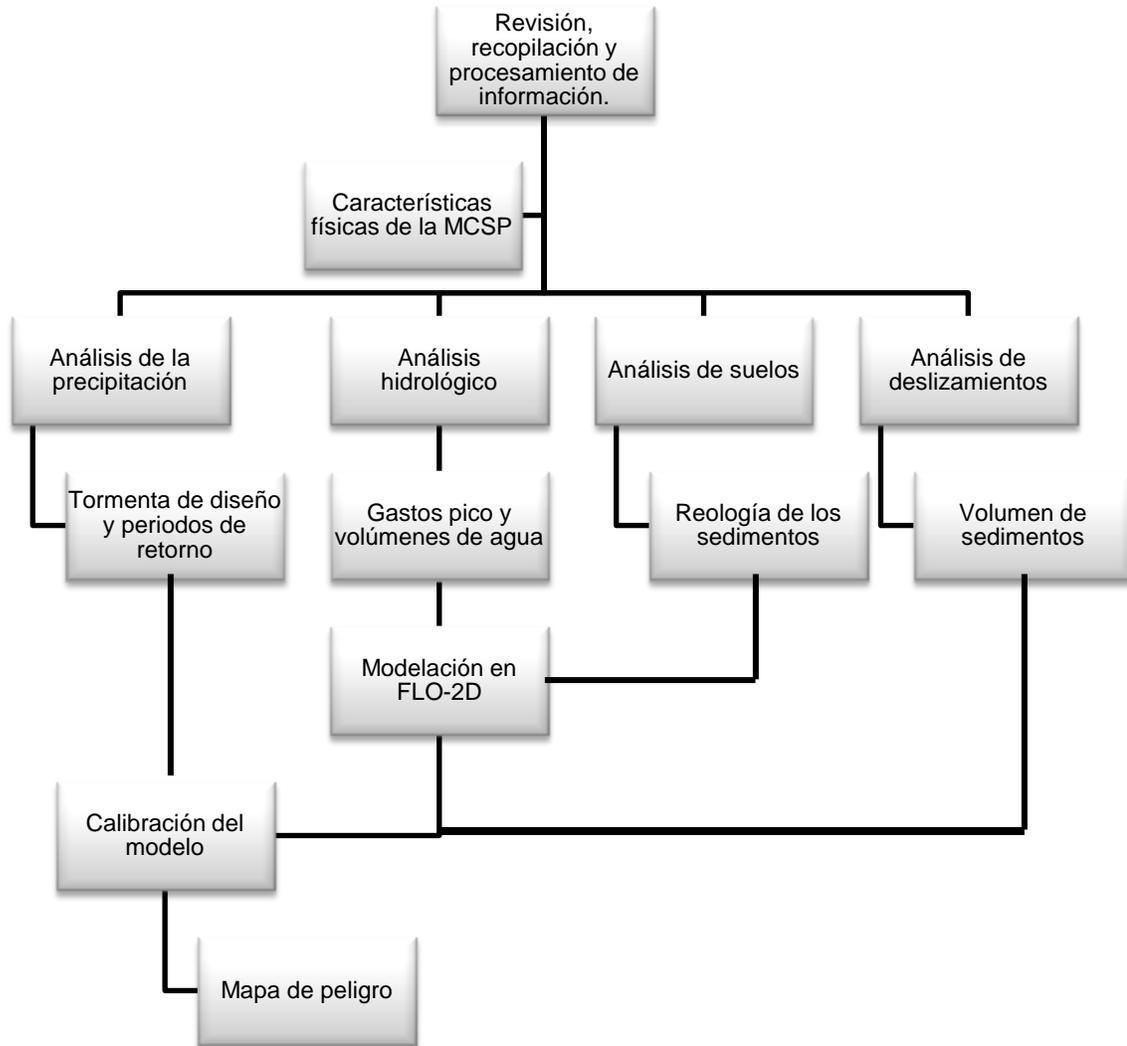


Figura 56. Esquema que muestra la metodología general realizada en gabinete.

Características físicas de la MCSP.

El inicio de las cuestiones analíticas y de resultados se dio con la caracterización de la microcuenca San Pedro. Esta caracterización se logró a partir de un MDE con tamaño de pixel de 5 m (modificado de INEGI), mapas temáticos de topografía, hidrografía, vegetación, entre otros y tablas de atributos. A través de diversas plataformas de SIG (ArcGIS, ArcView y Global Mapper), se digitalizó y procesó la información. De manera automatizada con el uso de herramientas de ArcGIS 9.3, se obtuvo el parteaguas de la microcuenca, el sistema de drenaje y demás características que se pueden generar con un MDE, como las elevaciones y las pendientes. Con la determinación de estas características se calcularon los índices o coeficientes de forma y de drenaje (Tabla 3). Para concluir esta sección se realizó un análisis de la morfometría y la caracterización de la microcuenca, cerrando con la interpretación de la respuesta hidrológica ante la ocurrencia de lluvias.

Análisis de la precipitación.

El análisis de lluvias se realizó usando los registros históricos de 8 estaciones climatológicas (con pluviómetro como aparato para medir las laminas de lluvia) proporcionadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Con esta información se realizaron minuciosos análisis para determinar el régimen pluviométrico en la zona, encontrar eventos similares pasados al ocurrido en febrero de 2010, y determinar la aleatoriedad de las lluvias ocurridas en la parte oriente de Michoacán, tanto en el ámbito de lluvia máxima en 24 h, como en máximo histórico acumulado de cinco días.

Mediante el trazo de polígonos de Thiessen, se ubicó a la estación que tiene influencia pluvial sobre la MCSP; con la información histórica pluviométrica de la estación, se realizaron determinaciones de periodos de retorno para el registro histórico máximo en 24 h y el histórico acumulado de cinco días, estas determinaciones fueron hechas con el auxilio del programa AX. Con el objetivo de ser más minuciosos en el análisis, se examinaron los registros históricos de la estación pluviográfica "Chincua", los cuales datan del 2004. Con esta información comparamos valores de duración, intensidad y cantidad de agua precipitada para las tormentas ocurridas de 2004 a la fecha, es importante recordar que estos registros son horarios. Todos estos análisis se llevaron a cabo en hojas de cálculo del programa Excel, en donde además de análisis estadístico también se realizaron gráficas de hietogramas, hietogramas acumulados y demás gráficos necesarios.

Análisis hidrológico.

Una vez que se analizaron las lluvias y en específico la tormenta de diseño (lluvia caída del tres al cuatro de febrero, fue indispensable determinar el escurrimiento superficial líquido directo producto de la tormenta mediante un análisis hidrológico.

El primer paso fue determinar la precipitación efectiva o en exceso que produce escurrimiento directo y la distribución temporal de las pérdidas o abstracciones, esto se hizo mediante el método de las abstracciones del U. S. *Soil Conservation Service* (SCS), el cual tiene como sustento teórico la siguiente la fórmula:

$$Pe = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \quad [\text{Ec. 21}]$$

Donde las variables de la fórmula son:

Pe es la precipitación efectiva en pulgadas.

P es la precipitación caída durante la tormenta en pulgadas.

S es la retención potencial máxima en pulgadas, que se calcula como:

$$S = \frac{1000}{N} - 10 \quad [\text{Ec. 22}]$$

Donde:

N es el número de escurrimiento del SCS, valor adimensional. Se determina a partir de la cobertura de la tierra, el tipo de suelo y las condiciones antecedentes iniciales de humedad, mediante las Tablas 24, 25 y 26 (ver Anexo I).

La distribución temporal de las abstracciones se determinó con:

$$Fa = \frac{S(P-Ia)}{P-Ia+S} \quad [\text{Ec. 23}]$$

Donde:

Fa es la abstracción continuada en pulgadas.

S y P son las variables antes mencionadas e Ia es la abstracción inicial (en pulgadas) la cual se obtiene como $0.2S$.

Toda vez que se calculó la Pe , se adoptó un modelo hidrológico de relación lluvia-escorrimento, como lo es el hidrograma unitario. De la gran variedad de métodos para determinar estos, se utilizaron los que comúnmente se usan en México, a causa de la información que en nuestro país generalmente se dispone, estos métodos fueron:

El hidrograma unitario triangular de Mockus o U. S. *Bureau of Reclamation*. Mockus dice que el tiempo base (tb) y el tiempo de pico (tp), para la generación del hidrograma se relacionan mediante la expresión:

$$tb = 2.67tp \quad [\text{Ec. 24}]$$

A su vez el tiempo pico se expresa como:

$$tp = \frac{de}{2} + tr \quad [\text{Ec. 25}]$$

Donde de es la duración en exceso y tr el tiempo de retraso, el cual se estima mediante el tiempo de concentración tc . El tiempo de concentración se calculó mediante la conocida fórmula de Kirpich:

$$tc = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad [\text{Ec. 26}]$$

Donde:

tc es el tiempo de concentración en horas.

L es la longitud del cauce principal en metros.

S es la pendiente del cauce principal en decimales.

El tiempo de retraso tr está dado por la fórmula:

$$tr = 0.6 tc \quad [\text{Ec. 27}]$$

Debido a que la MCSP se considera como cuenca pequeña (<50 km²) de acuerdo a la clasificación del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2006), la duración efectiva se toma como $de = tc$. Y por último el gasto pico se obtiene:

$$Qp = \frac{0.208 A * Pe}{tp} \quad [\text{Ec. 28}]$$

Donde A es el área de la cuenca en km^2 y Pe precipitación efectiva en mm.

Hidrograma unitario adimensional del U.S. *Soil Conservation Service*. Este método sirve para suavizar el hidrograma triangular de Mockus, mediante los valores de la Tabla 27, que se encuentran en el Anexo I. El gasto pico esta dado por:

$$Qp = qp * Pe \quad [\text{Ec. 29}]$$

Donde qp es el gasto pico unitario, en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$:

$$qp = \frac{A}{4.878 tp} \quad [\text{Ec. 30}]$$

Estos métodos fueron aplicados también dentro del software de simulación hidrológica HEC-HMS 3.2, para determinar caudales pico y volúmenes de agua de la tormenta de diseño.

Análisis de suelos.

Con la finalidad de clasificar los suelos en cuanto al tamaño de sus partículas de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y determinar algunas de sus características reológicas, se llevaron a cabo las siguientes pruebas de laboratorio en las muestras recolectadas de los depósitos de escombros mineros y el deslizamiento San Pedro.

Granulometría. Con esta prueba se determinó la proporción en tamaño de los granos del suelo. Para ello se utilizaron en orden descendente las mallas (tamices) No. 4 (4.75 mm), 10 (2 mm), 20 (0.85 mm), 40 (0.425 mm), 60 (0.25 mm), 140 (0.106 mm) y 200 (0.075 mm).

Arenas. Corresponden a tamaños de grano que son retenidos en la malla no. 200 según la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) y el SUCS.

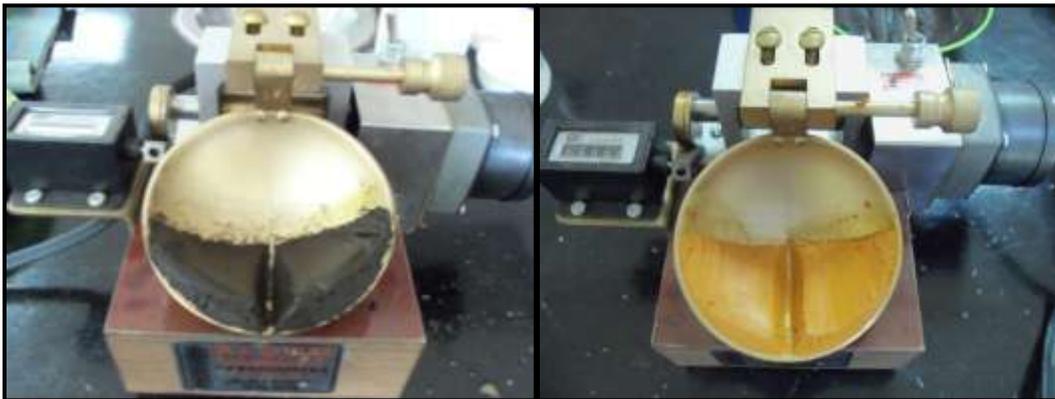
Limos y arcillas. Corresponden a tamaños menores a 0.075 mm según ASTM y SUCS, es decir, es material que pasa la malla no. 200. Para determinar el porcentaje de estas partículas se utilizó el método de la Textura de Bouyoucus, el cual se basa en la velocidad de caída de

partículas por sedimentación (Figura 57). El material suelo utilizado en esta prueba se pasó por la malla No. 40 según especificaciones de esta prueba.



Figura 57. Prueba de sedimentación, para conocer el porcentaje de granos finos (limos y arcillas), en las muestras recolectadas en campo.

Límites de consistencia (límite líquido y límite plástico). Usando también el material que pasó por la malla no. 40, se determinaron los límites de consistencia (límite líquido y límite plástico), con el fin de lograr una mejor clasificación de los suelos de acuerdo con el SUCS. Para el límite líquido (LL) se usó el método de Casagrande (Figuras 58 y 59) y para el límite plástico (LP) la metodología de los rollitos de tres milímetros.



Figuras 58 (izquierda) y 59 (derecha). Aplicación de la prueba de Casagrande para determinar el límite líquido.

Figura 60: muestra MD1. Figura 61: muestra MD2.

La granulometría del suelo y los límites de consistencia antes mencionados, sirvieron de base para determinar los parámetros reológicos que fueron ingresados al modelo para simular los flujos de detritos generados en la microcuenca de estudio. Dichos parámetros se determinaron en función de las siguientes tablas propuestas por O'Brien y Julien en 1988.

Tabla 7. Propiedades de las matrices de flujos de lodo (sólo limo y arcilla). Fuente: O'Brien y Julien (1988).

| Sample | Distribución del tamaño de sedimento | | | | Límite líquido | Índice plástico |
|----------------------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|-----------------|
| | Arcilla (%) | D ₁₆ (mm) | D ₅₀ (mm) | D ₈₄ (mm) | | |
| Glenwood original | 4.8 | 0.010 | 0.034 | 0.062 | - | - |
| Glenwood sample 1 | 6.8 | 0.009 | 0.023 | 0.050 | - | - |
| Glenwood sample 2 | 3.0 | 0.016 | 0.035 | 0.061 | - | - |
| Glenwood sample 3 | 4.8 | 0.011 | 0.025 | 0.053 | - | - |
| Glenwood sample 4 | 7.6 | 0.001 | 0.018 | 0.032 | - | - |
| Aspen Pit 1 | 31.3 | 0.001 | 0.011 | 0.032 | 0.32 | 0.11 |
| Aspen natural soil | 27.0 | 0.001 | 0.012 | 0.028 | 0.25 | 0.06 |
| Aspen mine fill | 27.8 | 0.001 | 0.013 | 0.030 | 0.24 | 0.06 |
| Aspen natural soil sourcec | 31.6 | 0.001 | 0.016 | 0.039 | - | - |
| Aspen mine fill sourcec | 25.2 | 0.001 | 0.018 | 0.061 | - | - |

Tabla 8. Esfuerzo de cedencia y viscosidad en función de la concentración volumétrica. Fuente: O'Brien y Julien (1988).

| Fuente | $\tau_y = \alpha e^{\beta C_v}$ | | $\eta = \alpha e^{\beta C_v}$ | |
|---|---------------------------------|---------|-------------------------------|---------|
| | α | β | α | β |
| Correlaciones de mediciones en Campo | | | | |
| Aspen Pit 1 | 0.181 | 25.7 | 0.0360 | 22.1 |
| Aspen Pit 2 | 2.72 | 10.4 | 0.0538 | 14.5 |
| Aspen Natural Soil | 0.152 | 18.7 | 0.00136 | 28.4 |
| Aspen Mine Fill | 0.0473 | 21.1 | 0.128 | 12.0 |
| Aspen Watershed | 0.0383 | 19.6 | 0.000495 | 27.1 |
| Aspen Mine Source Area | 0.291 | 14.3 | 0.000201 | 33.1 |
| Glenwood 1 | 0.0345 | 20.1 | 0.00283 | 23.0 |
| Glenwood 2 | 0.0765 | 16.9 | 0.0648 | 6.20 |
| Glenwood 3 | 0.000707 | 29.8 | 0.00632 | 19.9 |
| Glenwood 4 | 0.00172 | 29.5 | 0.000602 | 33.1 |

La matriz fluida compuesta de sedimentos finos (sólo limos y arcillas) de las muestras de las tablas anteriores fueron preparadas para ensayarse en un viscosímetro; de 10 a 15 mediciones de esfuerzos cortantes contra tasa de deformación fueron realizadas para cada concentración. La concentración volumétrica fue variándose añadiendo agua después de cada ensayo. Finalmente de los resultados se concluyó que la viscosidad (η) y el esfuerzo de cedencia (τ_y) se incrementan potencialmente con la concentración de sedimentos (C_v), según muestran las Ecuaciones 18 y 19.

Análisis de deslizamientos.

En cuanto a los deslizamientos; debido al difícil acceso a los diferentes desprendimientos, y zonas de erosión presentadas en la MCSP, los desprendimientos pequeños se evaluaron mediante imágenes de satélite de Google Earth; para el caso del deslizamiento San Pedro, se realizó un levantamiento topográfico a detalle (Figura 60). Posteriormente con el uso de herramientas de SIG y hojas de cálculo en Excel, se determinó el volumen movilizado de sedimentos, considerando solo deslizamientos.



Figura 60. Trabajo topográfico sobre el deslizamiento San Pedro.

Modelación en FLO-2D.

Una vez determinados los parámetros necesarios para las modelaciones, se comenzó con la aplicación de FLO-2D. La modelación en FLO-2D incluye la predicción del comportamiento o las características del movimiento del flujo, análisis del flujo y cálculo de velocidades, profundidades de flujo y distancia del recorrido, entre otros elementos.

Las simulaciones o “corridos” en FLO-2D comienzan dentro de la interfaz GDS, en esta parte se agregan los archivos con extensión *.DAT*, tales como: *FPLAIN.DAT*, *CADPTS.DAT*, *CONT.DAT*, *TOLER.DAT*, *INFLOW.DAT*, *OUTFLOW.DAT*, *SED.DAT*. La Figura 61 muestra un diagrama de flujo sobre la metodología que se sigue dentro de FLO-2D para realizar una simulación y entregar resultados

Una vez ingresados todos los parámetros correspondientes y bajo cierto criterio del tipo de flujo a simular, se procedió a realizar el *run* o simulación del flujo hiperconcentrado para la MCSP. Los resultados de las simulaciones fueron calibradas de acuerdo a imágenes de satélite de Google Earth y evidencias en campo, hasta obtener el modelo correcto. Es importante mencionar que cada vez que la calibración no fue consistente, se requirió repetir el proceso para determinar las imprecisiones y corregirlas.

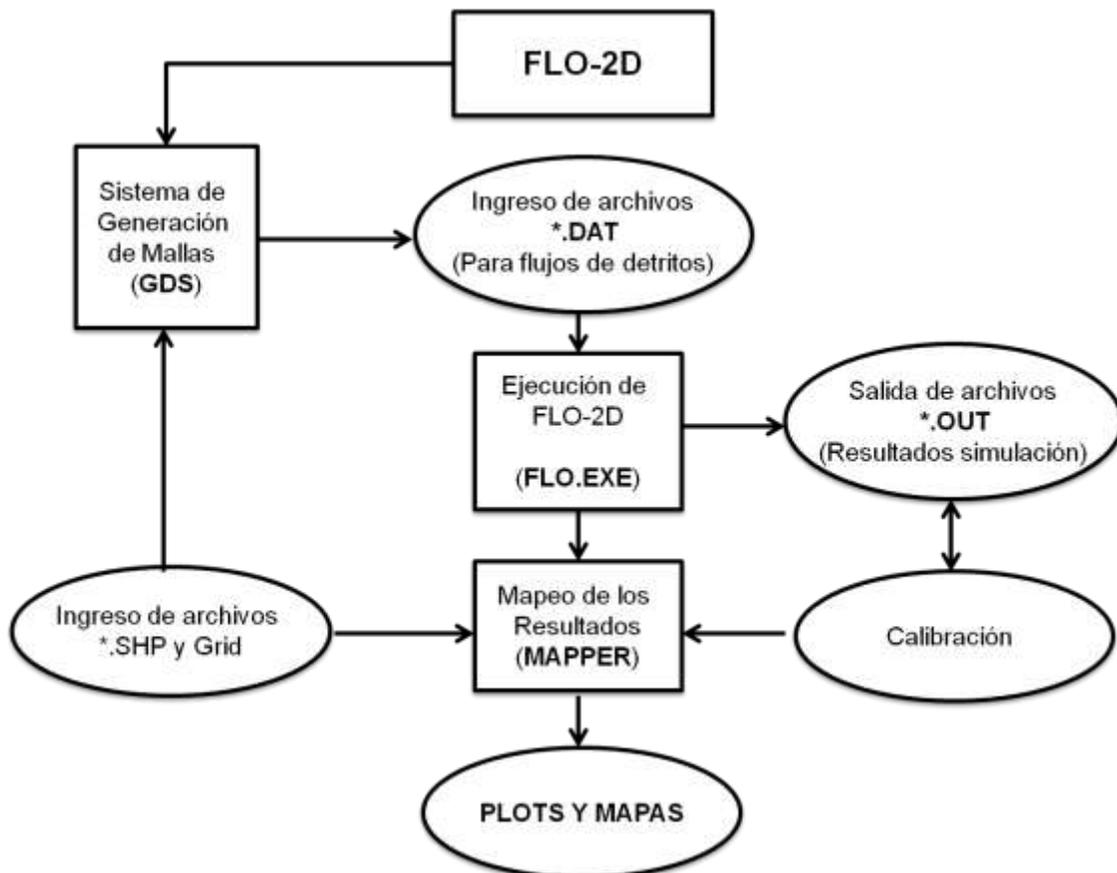


Figura 61. Grafico que ilustra la metodología seguida para la modelación del flujo de detritos a través de FLO-2D.

Finalmente los resultados fueron graficados en el post-procesadores *MAPPER* perteneciente al programa FLO-2D. Los resultados obtenidos por el programa fueron las elevaciones del terreno, tirantes, velocidades y volúmenes de agua, volúmenes de la mezcla agua-sedimento, entre otros.

Mapa de peligro.

La metodología que se utilizó para generar el mapa de peligro es una extensión de las regulaciones y criterios para mapas de amenaza utilizados en Suiza (OFEE et al. 1997, Fiebigler 1997). Estos criterios indican que el peligro por flujos de detritos depende de: la profundidad del flujo, velocidad del flujo, tipo de fluido y frecuencia del evento.

Las zonas con diferentes amenazas se diferencian entre sí mediante los colores rojo, naranja y amarillo según la amenaza sea alta, media o baja respectivamente.

- Peligro alto (rojo). Las personas están en peligro tanto dentro como fuera de las viviendas o edificios. Las edificaciones están en peligro de destrucción parcial a total. Zona de prohibición.
- Peligro medio (naranja). Las personas están en peligro fuera de las viviendas y de los edificios. Las edificaciones pueden sufrir daños parciales. Zona de reglamentación, donde daños severos pueden reducirse con medidas de precaución apropiadas.
- Peligro bajo (amarillo). El peligro para las personas es bajo o inexistente. Las edificaciones pueden sufrir daños leves. Zona de sensibilización.

Debido a la alta concentración de rocas y detritos, un alud torrencial es potencialmente más destructivo que un flujo de agua. Por lo tanto, para flujos de lodo y detritos se utilizaron las siguientes relaciones:

Tabla 9. Intensidades de eventos para flujos de lodo y detritos.

| Intensidad de eventos para flujos de lodo y detritos | Profundidad máxima h (m) | | Producto de profundidad máxima h (m) por velocidad máxima v (m^2/s) |
|--|----------------------------|---|---|
| Alto | $h > 1.0m$ | O | $vh > 1.0 m$ |
| Medio | $0.2m < h < 1.0m$ | Y | $0.2 < vh < 1.0 m^2/s$ |
| Bajo | $0.2m < h < 1.0m$ | Y | $vh < 0.2 m^2/s$ |

CAPÍTULO VI. RESULTADOS.

En los últimos años se ha visto a la precipitación pluvial como un peligro meteorológico, ya que debido al inminente calentamiento global, las lluvias se han presentado con mayor intensidad y duración, en zonas y épocas del año inusuales. Estas dos características de las lluvias son los factores detonantes de la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa alrededor del mundo, sobre todo en zonas de clima tropical; se sabe que la lluvia es el factor detonante por excelencia de los flujos hiperconcentrados y de detritos. En el caso que nos ocupa, es de la misma manera, ya que fue un fenómeno meteorológico atípico (Figura 62) el que provocó las persistentes lluvias que originaron los deslizamientos y flujos de detritos en las microcuencas del municipio de Angangueo.

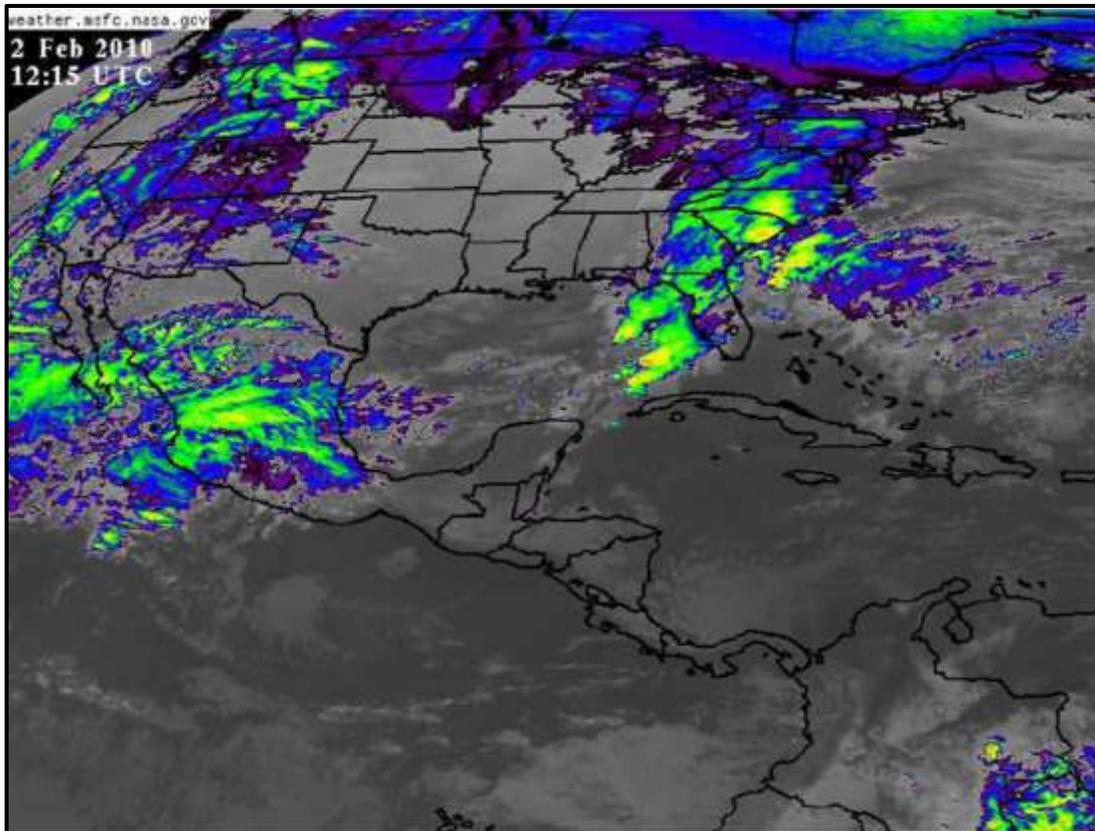


Figura 62. Imagen infrarroja obtenida del satélite GOES, a las 6:15 AM, el 02 de febrero de 2010. Fuente: Aguilar-Garduño (2010).

VI.1. PRECIPITACIÓN.

Conforme a la información disponible se realizó un exhaustivo y minucioso análisis de este fenómeno atmosférico; se evaluó en la medida de los alcances propios, el régimen de ocurrencia e intensidad en la zona de estudio.

VI.1.1. Análisis de lluvias históricas.

Mediante la consulta de ocho estaciones meteorológicas (con pluviómetro como instrumento de medición de lluvia) cercanas al municipio de Angangueo (Tabla 10 y Figura 63), se realizó un análisis del régimen pluviométrico que se ha presentado en la zona a lo largo de los años de los que se tiene registro, con el fin de conocer la aleatoriedad de la ocurrencia del fenómeno lluvioso ocurrido en febrero de 2010, que culminó con la consecución de una serie de deslizamientos y flujos de detritos, que causaron graves daños en la comunidad anganguense; también en base a información de una estación cercana con pluviógrafo (Figura 63), se analizó cuidadosamente la tormenta detonante la cual se consideró de diseño, para análisis hidrológicos posteriores.

Es importante no dejar de mencionar que la poca cercanía de las estaciones a la zona de estudio, es un factor que afecta la precisión de la información que aquí se presenta, considerando la controvertida y desordenada distribución espacial de la lluvia. Sin embargo, dadas las circunstancias, también se cree que se determinaron resultados confiables, y que dichas condiciones meteorológicas pueden ser aplicadas a la zona en estudio.

Tabla 10. Estaciones pluviométricas utilizadas para el análisis de lluvias históricas.

DESCRIPCIÓN. En las últimas dos columna se muestran el número de años con registro y el periodo que comprenden estos registros.

| Clave | Nombre | Ubicación | Altura (msnm) | Años de registro | |
|-------|--------------------------------|-------------------|---------------|------------------|-----------|
| 16033 | Chincua, Senguio. | 19°46'N, 100°17'O | 2415 | 43 | 1967-2010 |
| 16002 | Agostitlán (CFE), Cd. Hidalgo. | 19°32'N, 100°37'O | 2520 | 54 | 1950-2006 |
| 16152 | Cd. Hidalgo (SMN). | 19°36'N, 100°34'O | 2060 | 67 | 1922-1988 |
| 16213 | Irimbo, Irimbo. | 19°41'N, 100°28'O | 2235 | 24 | 1978-2004 |
| 16061 | Laguna del Fresno, Maravatío. | 19°28'N, 100°25'O | 2070 | 52 | 1947-2008 |
| 16514 | Jaripeo, Irimbo. | 19°27'N, 100°30'O | 1880 | 17 | 1987-2006 |
| 16134 | Tuxpan, Tuxpan. | 19°34'N, 100°27'O | 1800 | 37 | 1941-1984 |
| 16121 | Senguio, Senguio. | 19°44'N, 100°21'O | 2260 | 19 | 1969-2000 |

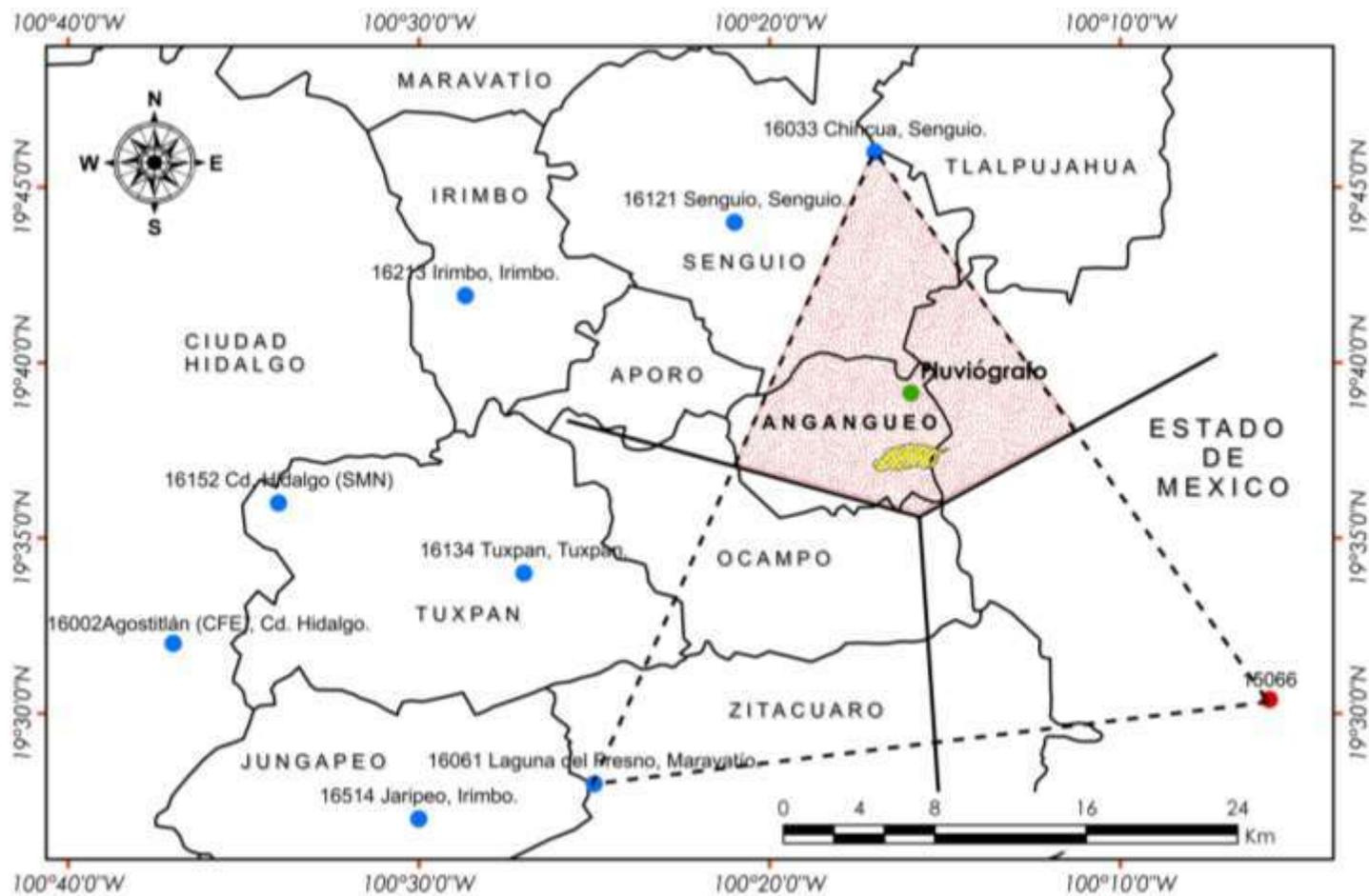


Figura 63. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis pluviométrico.

En puntos azules se ubican las estaciones. Se trazan los polígonos de Thiessen para elegir la estación de influencia. En amarillo se observa la MCSP. En rojo la estación 15066 (Edo. de México) usada para proyectar los polígonos de Thiessen.

Los resultados de la primera revisión de los datos históricos de lluvia de las estaciones pluviométricas, se muestran en la Tabla 11, esta en su tercera columna contiene la altura de precipitación máxima en 24 h, de mayor magnitud registrada en todo el periodo de datos de cada estación.

Tabla 11. Altura de precipitación máxima registrada en cada una de las estaciones pluviométricas, a lo largo de su periodo de registros.

| Clave | Nombre | hp máx. en 24 h | Fecha de ocurrencia |
|-------|--------------------------------|-----------------|---------------------|
| 16033 | Chincua, Senguio. | 104 mm | 04/02/2010 |
| 16002 | Agostitlán (CFE), Cd. Hidalgo. | 100.4 mm | 23/01/1980 |
| 16152 | Cd. Hidalgo (SMN). | 211.2 mm | 13/05/1959 |
| 16213 | Irimbo, Irimbo. | 71 mm | 24/01/1980 |
| 16061 | Laguna del Fresno, Maravatío. | 91 mm | 21/08/1995 |
| 16514 | Jaripeo, Irimbo. | 229 mm | 30/07/1995 |
| 16134 | Tuxpan, Tuxpan. | 68mm | 1951 |
| 16121 | Senguio, Senguio. | 62mm | 1975 |

En función a la tabla anterior, se puede realizar el siguiente análisis: En la estación 16152 Cd. Hidalgo (SMN), se tiene un registro de 211.2 mm (máxima en 24 h), ocurrida el 13 de mayo de 1959, sin embargo los 5 días posteriores también registraron lluvia: 1.3, 4.8, 0.2, 3.3 y 4 mm respectivamente; para conformar un total de 224.8 mm de lluvia en 6 días. Esto resulta una cantidad de agua importante, que posiblemente haya estado asociada a la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa en las regiones cercanas. Sin embargo surgen incógnitas como: ¿la caída de lluvia fue continua?, ¿qué intensidades de tormenta se presentaron? Estas interrogantes ponen al descubierto la primordial deficiencia que se encuentra en este tipo de instrumentos de medición de lluvia (pluviómetros); es imposible valorar la magnitud (intensidad y duración) de la tormenta detonante de un evento de remoción en masa. Dejando vacíos en el estudio de la relación lluvia-deslizamiento, cuando las medidas de la lluvia se analizan como factores disparadores.

La estación 16514 Jaripeo, Irimbo, es una estación mucho más cercana a la MCSP; dicha estación muestra los siguientes registros de lluvia: 27 de julio, hp = 210 mm, 29 de julio, hp = 229 mm y 30 de julio, hp= 52 mm, ocurridos en el año 1995. Los tres registros alcanzan una altura de lluvia de 481 mm, esta cantidad de lluvia puede asociarse a la causa de flujos de detritos y lodo ocurridos en algunas zonas cercanas a Angangueo, según evidencias de campo como lo mostraron las columnas estratigráficas de la Figura 4 y relatos de pobladores de Zitácuaro, Angangueo y Crescencio Morales. Aunque de igual manera que en el caso anterior

se desconoce la continuidad de la lluvia, si puede observarse una mayor cantidad de agua precipitada en un lapso más corto de tiempo, lo que de cierta manera resulta en una mayor intensidad de la lluvia.

La estación Laguna del Fresno también muestra su máxima lámina de lluvia en el mismo año, con una diferencia de veintidós días con respecto al registro de la estación Jaripeo. Esto es indicativo de que en esa época se presentaron lluvias importantes, al menos en cuanto a la cantidad de agua precipitada.

Con este análisis es aún muy complicado determinar un umbral característico de lámina de lluvia (hp) o volumen de lluvia caída que provoca la generación de deslizamientos y flujos hiperconcentrados en la zona. Pero puede dejarse ver una línea de investigación donde se asocie la hp caída con la ocurrencia de remociones en masa, considerando también las características físicas de los suelos y determinar así el umbral de lluvia detonante. Las características duración y cantidad de lluvia sobresalen en importancia para disparar los deslizamientos, aun cuando se desconocen las intensidades de las tormentas. También puede verse que no existe un patrón indicativo de que cada cierto tiempo se presentan láminas de lluvia significativas.

Para concebir más acordemente la variación temporal de las lluvias, se elaboraron hietogramas de precipitación máxima en 24 h acumulada anual para cada estación. En estos hietogramas, se observaron saltos o variaciones significativas, estos saltos en las curvas, son debidos a periodos de 1, 2 y hasta 4 años sin información en los registros de la mayoría de las estaciones. Estos vacíos hacen exageradamente deficiente el análisis. Sin embargo, se tomó para mostrar como ejemplo el hietograma de la estación que tiene registros completos, estación Chincua-Senguio (Figuras 64 y 65) y que además registró las lluvias de febrero de 2010. Se observa una gráfica sin variación significativa, excepto al final que se muestra un ligero incremento en la pendiente de la recta debido a la gran cantidad de agua precipitada el día cuatro de febrero, con respecto a los registros anteriores.

Otro más de los análisis que se realizó en base a la información de estas ocho estaciones fue determinar con qué frecuencia llueve en los días 1-5 de febrero y que cantidad de lluvia se precipita. Este análisis queda explicado en la Tabla 12, donde es evidente que los primeros días del mes de febrero (uno al cinco), no son días lluviosos, ya que máximo llueve una vez cada diez años, tomando un periodo de registros de 43 años, y las alturas de lluvia que se presentan han sido a lo mucho 29.6 mm, en día 2. Y considerando un acumulado de los cinco días, encontramos que el máximo histórico para las estaciones en estudio es de 51 mm, en el año de

1991. Estos valores resultan bajos en comparación con los que se registraron en 2010, en varias de las estaciones cercanas y que registraron la lluvia.

Tabla 12. Frecuencia con que llueve los días 1, 2, 3, 4 y 5 de febrero, en la zona de estudio según las ocho estaciones pluviométricas.

| Análisis | Febrero | | | | |
|---|--|---------|-------|---------|-------|
| | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | Día 5 |
| Probabilidad de que llueva en un periodo de 10 años: | 1% | 0.75% | 1% | 1% | 0.50% |
| Altura de lluvia máxima registrada: | 25 mm | 29.6 mm | 20 mm | 14.5 mm | 20 mm |
| Altura de lluvia máxima acumulada, de los cinco días: | 51 mm, registrado en la estación 16033, en 1991. | | | | |

La magnitud de la anomalía climática (Suarez, 2009) se puede medir como la relación entre la precipitación de la anomalía y la lluvia promedio. Y puede determinarse como:

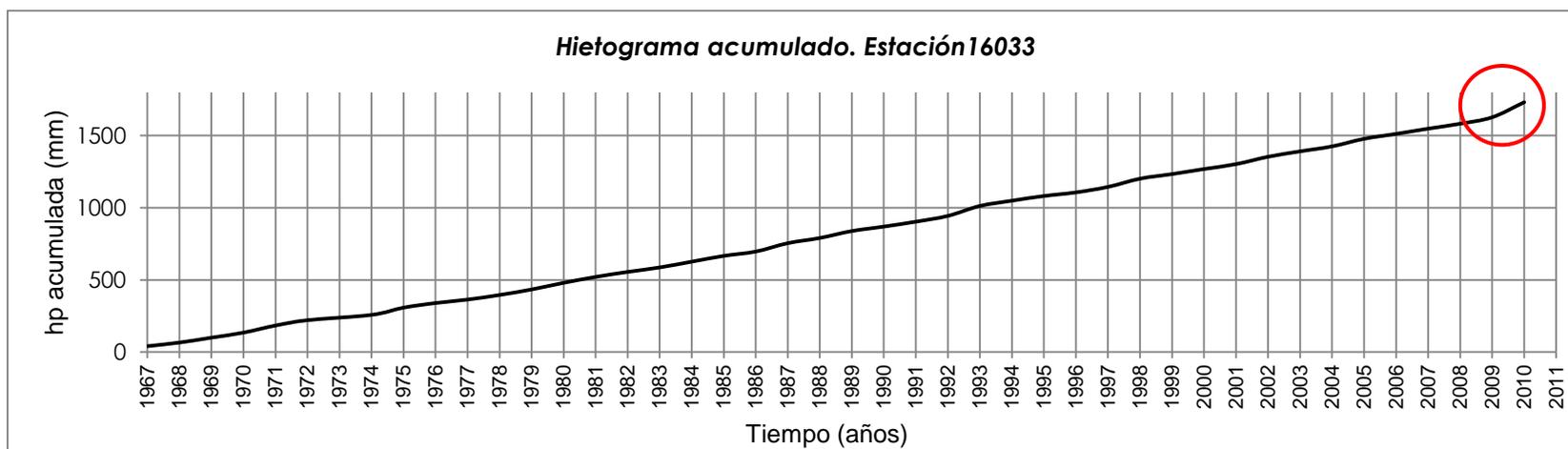
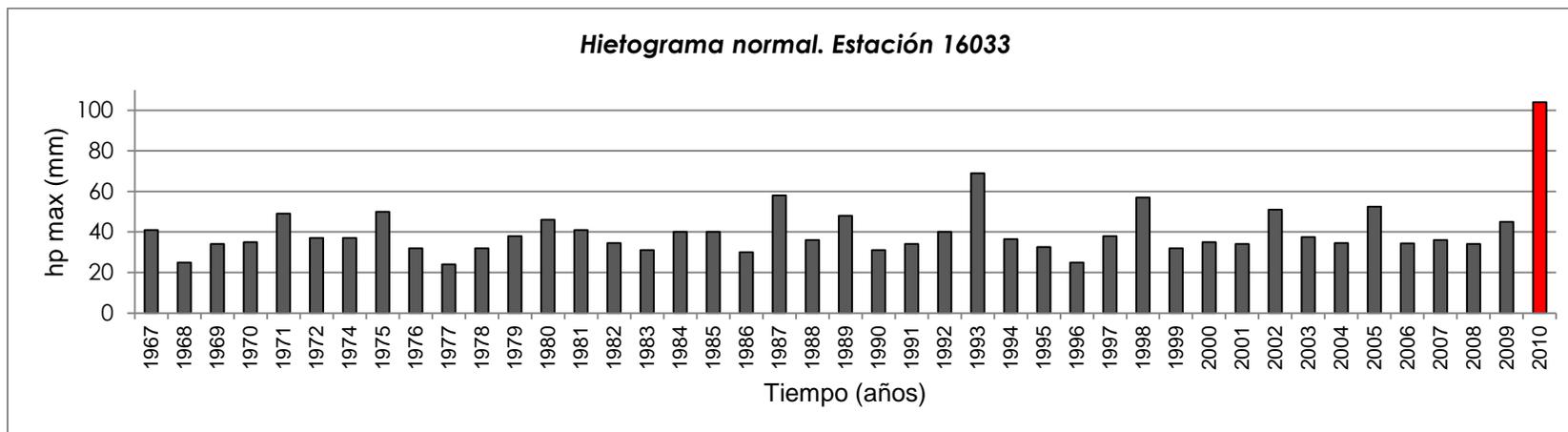
$$M_A = \frac{\text{lluvia máxima en 24 horas del fenómeno activador}}{\text{promedio de máximos anuales para 24 horas}} \quad [\text{Ec. 30}]$$

Donde M_A es la magnitud de la anomalía climática.

Con la información de la estación 16033 Chincua-Senguio, la anomalía climática para este caso es:

$$M_A = \frac{104 \text{ mm}}{38.74 \text{ mm}} = 2.68$$

Este valor indica una anomalía climática importante en relación a la generación de deslizamientos y flujos, ya que para que ocurra denudación general que conduzca a una avalancha, generalmente se requiere que M_A sea mayor de 2; y entre mayor sea M_A , la denudación es mayor. Además resulta una anomalía extraordinaria con respecto al régimen de lluvias típico en la zona. Y Aunque pueden ocurrir avalanchas de tierra en zonas de alta pluviosidad casi permanente, como es el caso de la zona oriente de Michoacán; la probabilidad de ocurrencia es mayor en zonas normalmente secas, y donde el período de recurrencia de las grandes lluvias es mayor. Entre mayor sea la diferencia entre la lluvia máxima esperada y la lluvia promedio la posibilidad de avalanchas es mayor.



Figuras 64 (arriba) y 65 (abajo). Hietograma normal y acumulado de la estación 16033 Chincua-Senguio.

La estación 16033 es la única estación con registro continuo de las lluvias. Se observa claramente que la hp caída el 4 de febrero de 2010 (104 mm) sobresale en los registros ya que no se había tenido lluvia de tal magnitud, esto nos da indicios de un fenómeno meteorológico anómalo.

Con los análisis anteriores queda en evidencia que la zona oriente de Michoacán es una región que se caracteriza por un régimen pluvial alto; se presentan alturas de precipitación máximas en 24 h de magnitud importante y con cierta frecuencia, pero estas no se habían presentado con magnitudes tan relevantes en el mes de febrero en periodos de tiempo relativamente importantes (67 años, el máximo). A pesar de la dificultad de poder encontrar una periodicidad o recurrencia de este tipo de eventos debido al tipo de información en estas ocho estaciones (pues no se conoce la continuidad de las tormentas), si se puede afirmar que se confirma que el evento meteorológico de febrero de 2010 es atípico, aleatorio y/o aislado.

Los niveles de las láminas de lluvia en años anteriores también resultan extremadamente bajos en relación a los presentados en febrero de 2010, con lo que se concluye que además de atípica fue una lluvia extraordinaria. Esta aleatoriedad y grande magnitud puede tener su origen en el cambio climático, que se sabe a tenido influencia importante en la climatología y meteorología mundial, sin embargo resulta osada una aseveración semejante, ya que la información pluviométrica es deficiente para un contundente análisis estadístico. La única evidencia que se puede tener de la influencia del calentamiento global, en base a la precipitación caída es lo que se observa en el hietograma acumulado de la Figura 65, pues el cambio de pendiente de la recta puede significar injerencia del calentamiento global.

VI.1.2. Periodos de retorno.

Para calcular periodos de retorno confiables, son necesarios al menos ocho años de registro de lluvia. Las ocho estaciones meteorológicas de la Tabla 10, cumplen con esta condición, sin embargo se utiliza una sola estación para el análisis, dicha estación debe ser la que tenga influencia o mayor influencia de registros pluviales sobre la cuenca, lo que se identifica mediante el trazo de polígonos de Thiessen. Como puede observarse en la Figura 65, la estación que tiene influencia sobre la MCSP es la 16033 Chincua- Senguio.

Se determinaron periodos de retorno tanto para altura de precipitación máxima histórica en 24 h, como para el acumulado histórico de cinco días. Así también para el evento de febrero del 2010, para realizar la respectiva comparación.

La Tabla 13 muestra que en 41 años no se habían presentado valores de h_p mayores a los ocurridos en febrero de 2010, tanto para la h_p máxima en 24 h como para el acumulado en cinco días.

Tabla 13. Cantidad de lluvia caída con duración de uno y cinco días, para los dos periodos en análisis.

| Estación 16033 | | |
|-----------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Duración | Periodo 1968-2010 | Periodo 1-5 febrero 2010 |
| 24 horas | 58 mm | 104 mm |
| 5 días | 122.5 mm | 243.5 mm |

El análisis probabilístico para determinar los periodos de retorno se realizó a través del software AX, el cual determinó los siguientes periodos de retorno para el lapso temporal 1968-2009:

Para 58 mm.....Tr= 13 años

Para 122.5 mm.....Tr= 36 años

Es decir, 58 mm de lluvia en un día caen en promedio cada 13 años y 122.5 mm en cinco días son igualados o excedidos en promedio cada 36 años.

Para la precipitación pluvial de febrero de 2010, el programa AX determinó que para la hp de 104 mm los datos se ajustan a una distribución de probabilidad tipo doble Gumbel, para la hp de 243.5 mm los datos se ajustan a una distribución probabilística de tipo Log- Normal y realizando una extrapolación a ambos conjuntos de datos se obtienen las siguientes lluvias de diseño para los correspondientes periodos de retorno:

Tablas 14 (izquierda) y 15 (derecha). En la tabla 14 se observan resultados para hp=104 mm. Tabla 15 muestra los resultados extrapolados para hp=243.5 mm.

| No | Tr | Dato cal |
|----|--------|----------|
| 1 | 2. | 35.67 |
| 2 | 5. | 44.12 |
| 3 | 10. | 56.05 |
| 4 | 20. | 68.45 |
| 5 | 50. | 83.04 |
| 6 | 100. | 93.51 |
| 7 | 200. | 103.78 |
| 8 | 500. | 117.23 |
| 9 | 1000. | 127.35 |
| 10 | 2000. | 137.52 |
| 11 | 5000. | 150.93 |
| 12 | 10000. | 161.21 |

| No | Tr | Dato cal |
|----|--------|----------|
| 1 | 2. | 80.38 |
| 2 | 5. | 96.97 |
| 3 | 10. | 106.97 |
| 4 | 20. | 116. |
| 5 | 50. | 127.09 |
| 6 | 100. | 135.06 |
| 7 | 200. | 142.79 |
| 8 | 500. | 152.76 |
| 9 | 1000. | 160.26 |
| 10 | 2000. | 167.69 |
| 11 | 5000. | 176.69 |
| 12 | 10000. | 184.24 |

De manifiesto queda en la Tabla 14, que el periodo de retorno para una lluvia de 104 mm, se encuentra entre 200 y 500 años. Y que el periodo de retorno para la lluvia de 243.5 mm, sobrepasa los 10,000 años. Graficando el primer caso en papel probabilístico tipo Gumbel tenemos como resultado un periodo de retorno de 225 años. En el segundo caso (Tabla 15) es difícil afirmar que el acumulado de cinco días de lluvia, tengan un periodo de retorno superior a 10,000 años, ya que la cantidad de registros es pequeño como para darle confiabilidad a este resultado. Entonces tenemos que para el periodo 1-5 de febrero de 2010, usando la estación 16033:

Para 104 mm.....Tr= 225 años
Para 243.5 mm.....Tr > 10,000 años

VI.1.3. Análisis de la tormenta de febrero de 2010, con base en el pluviógrafo “Chincua”.

El pluviógrafo “Chincua” hasta este momento cuenta con ocho años de registro de lluvias, y aunque es factible realizar análisis de periodos de retorno con esta estación, no se elaboraron por tratarse de información deficiente, para la magnitud del evento de febrero de 2010. La relevancia de esta estación es el registro horario completo del fenómeno meteorológico (Figura 66). A continuación se muestra un análisis de la tormenta específica que detonó los deslizamientos y los flujos hiperconcentrados en las zonas de alta montaña de las microcuencas del municipio de Angangueo y de regiones cercanas en los municipios de Tuxpan y Zitácuaro.

Las primeras gotas de lluvia (1mm) que se registraron en el pluviógrafo, fueron a las 00:00 h del día 1 de febrero, pero la tormenta comenzó a tomar importancia ese mismo día a las 5:00 h (Figura 66), sin embargo para fines de análisis hidrológico y modelado en FLO-2D se tomó como tormenta de diseño la lluvia registrada a partir de las 17:00 h del día dos de febrero (Figura 67), y la lluvia caída cinco días atrás se consideró como lluvia antecedente, según el método de la US. SCS.

Para iniciar el análisis de la tormenta de diseño se realizaron los hietogramas respectivos, el normal en formato de barras (Figura 70) y el acumulado en formato de líneas (Figura 71), observando que: la tormenta solo cesó a las 18:00 h del día dos y las 3:00 h del día tres, pero a excepción de esas dos horas la precipitación mantuvo su caída constante a lo largo de 56 h.

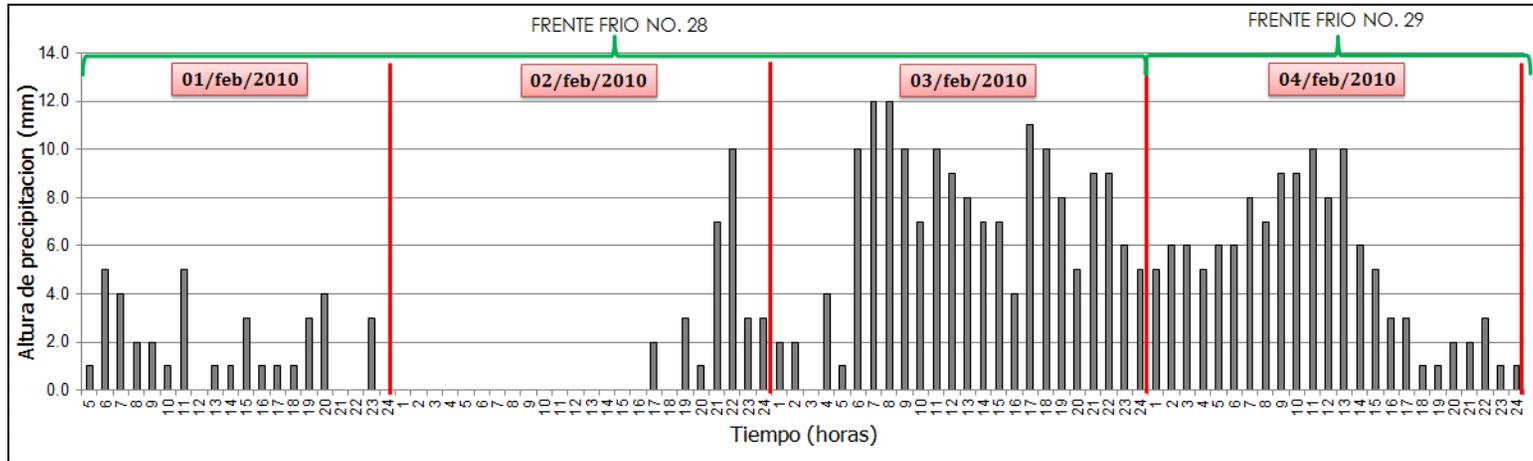


Figura 66. Hietograma completo de las lluvias producto de los frentes fríos no. 28 y 29, registrado por el pluviógrafo “Chincua”. Lluvia total 358 mm.

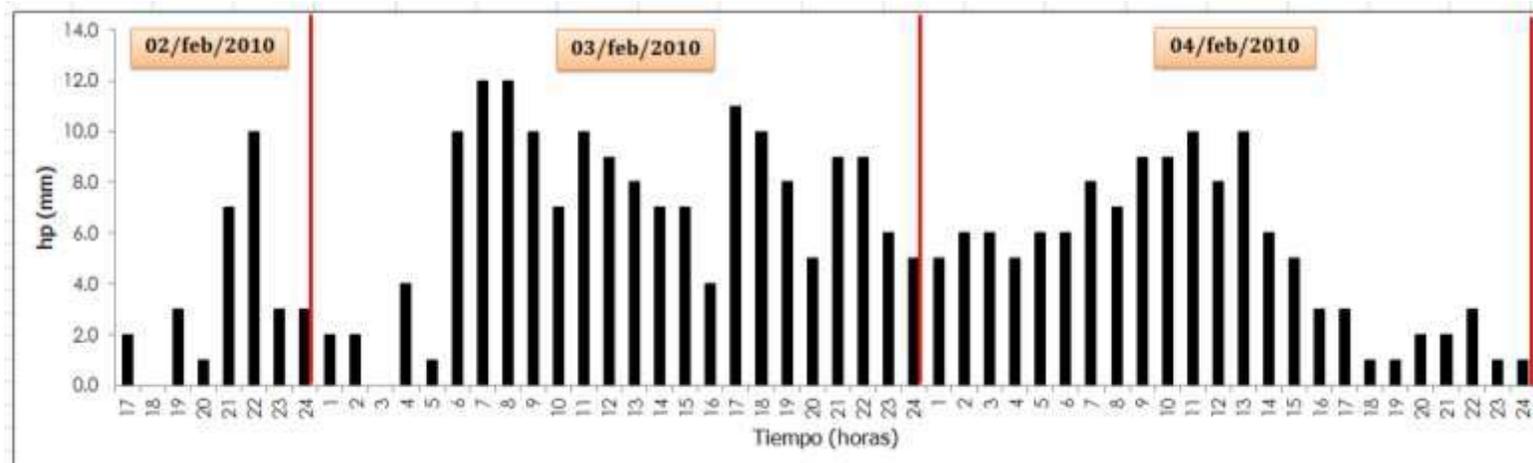


Figura 67. Hietograma de la tormenta de diseño. Lluvia total 320 mm.

En el hietograma de barras se distinguen tres máximos importantes: 12 mm a las 7:00 y 8:00 h ($i= 12 \text{ mm h}^{-1}$) y 11 mm a las 17:00 hrs ($i= 11 \text{ mm h}^{-1}$), estos en el día tres de febrero. También se puede observar que las mayores intensidades de la tormenta oscilan entre los 8 y 12 mm h^{-1} , dichas intensidades son significativas de manera particular, pero incrementan su importancia cuando se vuelven frecuentes en lapsos cortos de tiempo dentro de una tormenta duradera, la cual es el caso con dos días y ocho horas de duración.

El hietograma de precipitación acumulada que se muestra en el siguiente capítulo proporciona una mejor visualización de la variación temporal de la lluvia. Éste muestra un ascenso constante de la lluvia en el tramo que inicia a las 5:00 h del día tres y termina a las 15:00 h del día cuatro. En este tramo se tiene una intensidad de 7.62 mm h^{-1} (pendiente de la recta), es decir, precipitaron 259 mm de lluvia en 34 h. Pero si analizamos el hietograma completo, la tormenta tiene una intensidad de 5.71 mm h^{-1} ; cayeron 320 mm en 56 h.

Si consideramos la lluvia caída desde el uno hasta el cinco de febrero (358 mm) registrada por el pluviógrafo (Tabla 16) podemos decir que este valor de lámina de lluvia significa casi la mitad de la precipitación media anual que cae en Angangueo, la cual oscila entre los 800 y 1200 mm.

Tabla 16. Registro de la lluvia de febrero de 2010 por el pluviógrafo “Chincua”, para los días del uno al cinco.

| hp registrada por el pluviógrafo “Chincua” | | | | | |
|--|-------|--------|--------|-------|---------------|
| Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | Día 5 | Total |
| 38 mm | 29 mm | 168 mm | 123 mm | 0 mm | 358 mm |

Con el fin de profundizar en el análisis de la tormenta de diseño, se echó un vistazo a los registros horarios del pluviógrafo, esto con el fin de encontrar y determinar tormentas similares, que den la pauta para especificar el factor detonante de los deslizamientos y flujos. Los resultados del análisis se resumen en las Tablas 17 y 18.

Tabla 17. Tormentas de mayor intensidad por hora, durante el periodo 2006-2009, según registros del pluviógrafo "Chincua".

| Fecha | Duración de la tormenta | Mayor intensidad durante la tormenta | Intensidad total de la tormenta |
|--------------------------|-------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| | h | mm h ⁻¹ | mm h ⁻¹ |
| 31 de agosto de 2006 | 4 | 18 | 6 |
| 18 de agosto de 2007 | 3 | 32 | 13 |
| 14 de septiembre de 2008 | 6 | 18 | 4 |
| 14 de mayo de 2009 | 5 | 26 | 8 |
| 3 de febrero de 2010 | 56 | 12 | 6 |

Tabla 18. Registro de mayor altura de precipitación total en una tormenta, durante el periodo 2006-2009, según registros del pluviógrafo Chincua.

| Fecha | Duración de la tormenta | Altura de precipitación total | Mayor intensidad durante la tormenta |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| | h | mm | mm h ⁻¹ |
| 15 de julio de 2006 | 7 | 34 | 14 |
| 30 de abril de 2007 | 11 | 62 | 11 |
| 2 de julio de 2008 | 8 | 28 | 9 |
| 4 de septiembre de 2009 | 13 | 53 | 12 |
| 2,3 y 4 de febrero de 2010 | 56 | 320 | 12 |

La Tabla 17 nos muestra que se han presentado tormentas con intensidades por hora de mayor envergadura que la tormenta de diseño, sin embargo las duraciones de esas tormentas no exceden las 6 h. Este es un primer paso para demostrar que no fue la intensidad el factor detonante de los deslizamientos, desprendimientos y erosión ocurridos en la microcuenca. Para reforzar lo anterior se muestra la Tabla 18, en donde se tienen las tormentas de mayor duración y mayor altura de precipitación total; centrándonos en estos dos parámetros se observa que la tormenta de febrero fue la más duradera y de mayor registro de lluvia precipitada. Con lo anterior podemos concluir que:

1. A lo largo de los ocho años de registro con que cuenta el pluviógrafo, se ha observado la presencia de tormentas más intensas e intensidades en una hora de mayor trascendencia, las cuales al parecer no han tenido la potencia o poder suficiente para provocar la inestabilidad de las laderas de la zona.

2. Enfocándonos en las duraciones, es notable que durante el periodo analizado no se hayan presentado tormentas que duren más de 13 h consecutivas: resulta más relevante la duración que la intensidad y/o intensidades de la tormenta. Pero más que la duración aún, es trascendente la cantidad de lluvia caída (320 mm). Esto significa un acercamiento importante para afirmar que la cantidad de agua precipitada fue el detonante principal de los deslaves. Esta cantidad de agua resulta un excedente importante, que provocó la saturación y en consecuencia el incremento en la presión de poro en los suelos, causando la reducción de la resistencia al esfuerzo cortante y pérdida de cohesión, incrementando la favorabilidad a ser movilizados ladera abajo.

3. Otra observación que cabe resaltar es que estas tormentas mencionadas en las Tablas 17 y 18, se presentaron en la época de lluvias de la región que comprende los meses de mayo, junio, julio y agosto, que en algunas ocasiones puede iniciar en abril y puede terminar en el mes de septiembre, tanto para altura de precipitación máxima caída en una hora, como para tormentas duraderas.

Los días críticos de esta tormenta de diseño son el tres y cuatro de febrero (168 y 123 mm precipitados, respectivamente), donde las cantidades caídas exceden los 100 mm de lluvia, valores que resultan atípicos para los días en que se presentan y si comparamos el valor de lluvia acumulado de 358 mm (fenómeno meteorológico completo, no solo tormenta de diseño) registrado en el pluviógrafo Chincua, con varias de las estaciones pluviométricas cercanas que registraron el mismo evento, tales como: Pucuat, Sabaneta, Agostitlán, Cd. Hidalgo, Villa Victoria, Valle de Bravo, El bosque, Los Berros, Colorines, Chilesdo, se observa que ninguna supera este valor, siendo Los Berros la que más se acerca con 306.5 m.

VI.2. HIDROLOGÍA.

La infiltración juega un papel de primer orden en la relación lluvia-escurrimiento. Existen diversos métodos para su predicción, sin embargo debe usarse el que se adapte a la información con que se cuenta. En nuestro caso usamos el criterio del US. SCS y el método de los números de escurrimiento, ya que la microcuenca en análisis no tiene alguna estación de aforo en su salida.

VI.2.1. Precipitación efectiva y abstracciones.

Después del estudio de las lluvias históricas y la tormenta de diseño, fue necesario convertir las alturas de precipitación caídas, en gastos y volúmenes líquidos, que nos proporcionen una magnitud más comprensible en términos de peligro.

La falta de estaciones hidrométricas dificulta la obtención de volúmenes de escurrimiento directo, o en su caso la cantidad de precipitación efectiva de la tormenta, de manera más o menos precisa. Por esta razón se recurrió al método de las abstracciones del US. SCS, el cual además es el primer avance para obtener los hidrogramas de la MCSP.

Al aplicar el método se determinó la variación temporal de la precipitación efectiva de la tormenta la cual se observa graficada en la Figura 68; simultáneamente se obtuvieron las pérdidas iniciales y las continuas. Los valores de estas variables se obtuvieron considerando condiciones antecedentes húmedas, ya que la precipitación antecedente (cinco días antes) indica una altura de lluvia de 40 mm, que son indicativo que el suelo se encuentra en esas condiciones.

Entonces, de acuerdo a los resultados obtenidos se tiene que la lluvia efectiva resulta de 247.63 mm, la abstracción inicial de 14.33 mm y las abstracciones continuas suman un valor de 58.04 mm, con lo que aplicando el principio de continuidad, se tiene el total de la lluvia caída durante la tormenta de diseño que es de 320 mm.

Del principio de continuidad: $P = Pe + Ia + Fa$

Donde P es la precipitación total, Pe la precipitación efectiva, Ia la abstracción inicial y Fa las abstracciones o pérdidas continuas.

| | | | | |
|-----------------------------|------------------|--------------|---|----------------------------------|
| La abstracción inicial | 14.33 mm | 4.5% | ⇒ | PÉRDIDAS |
| Las abstracciones continuas | 58.03 mm | 18.2% | ⇒ | ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL |
| La lluvia efectiva | 247.63 mm | 77.3% | ⇒ | |
| | <hr/> | | | |
| | 320.00 mm | 100.0 % | | |

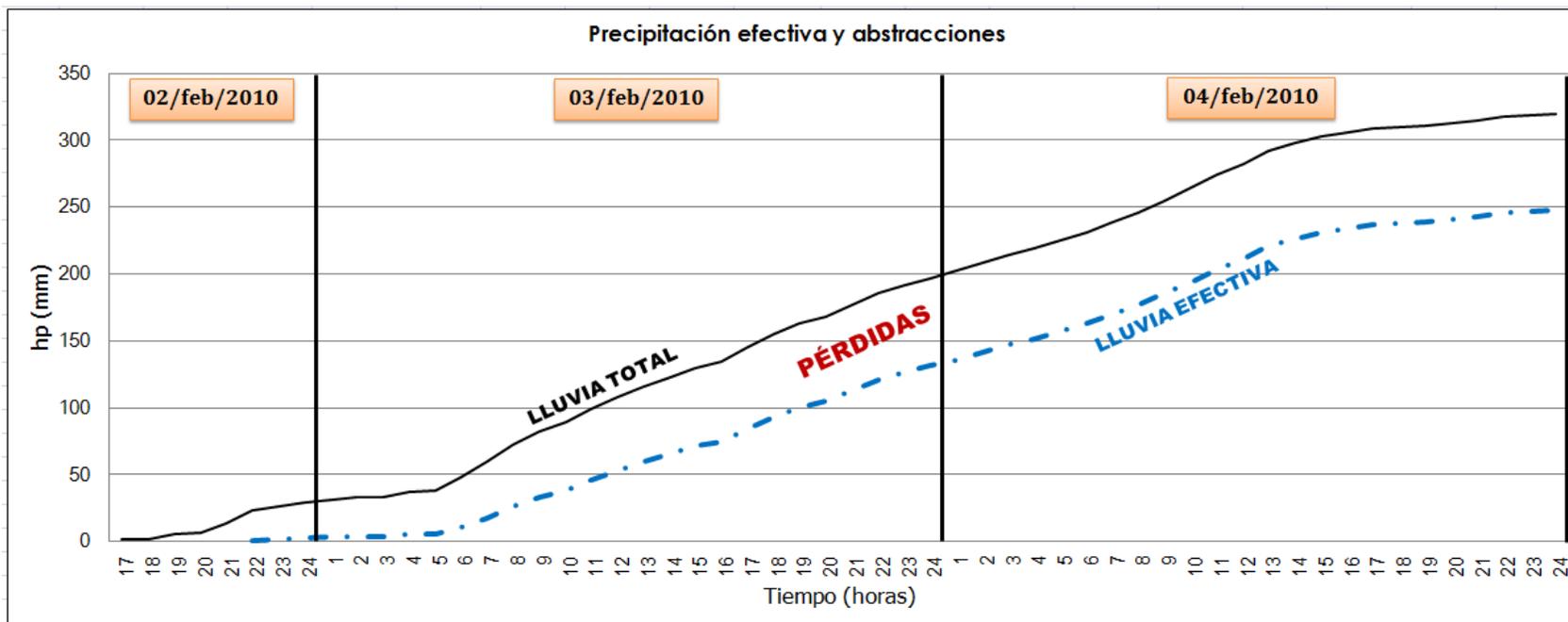


Figura 68. Hietograma acumulado con precipitación efectiva y pérdidas, sin considerar las nevadas (capas de hielo de hasta 20 cm, Aguilar-Garduño, 2010).

Con lo anterior podemos mencionar que el estado de sobresaturación del suelo se alcanzó después de haber recibido:

- La lluvia antecedente (40 mm).
- La abstracción inicial de la tormenta (14.33 mm).
- La abstracción continua hasta las 9 hrs del día 4 (55.21 mm).
- La precipitación efectiva hasta las 9 hrs del día 4 (185.46 mm).

Con lo que se obtiene un total de 295 mm de lluvia, esto mas la capa de hielo de 20 cm (Aguilar-Garduño, 2010,). Esto nos indica que los suelos que componen las laderas de la MCSP recibieron más de 295 mm de lluvia para poder ser movilizados ladera abajo y ser incorporados al escurrimiento directo para formar torrentes de lodo y de detritos. Esto indica la capacidad de infiltración de los suelos Andosol ócrico (Carta Edafológica E14-A26 de 1978) del que se componen las laderas de la región, sin embargo para reforzar esta idea es importante realizar análisis en laboratorio para determinar la capacidad de campo, permeabilidad, propiedades reológicas y mecánicas, de estos suelos.

VI.2.2. Hidrogramas y caudales pico.

VI.2.2.1. Gasto pico en la microcuenca San Pedro.

Una vez determinada la precipitación efectiva, es decir, la altura de lluvia remanente, luego que, de la lluvia total de precipitación aportada por la tormenta, se ha gastado una porción en procesos hidrológicos como infiltración y evapotranspiración; se procedió a determinar el escurrimiento superficial (gasto o caudal) generado en el punto de salida de la microcuenca como producto de la tormenta de diseño.

Para fines de este trabajo como anteriormente se dijo, para determinar los gastos se utilizó el modelo hidrológico: hidrogramas unitarios, específicamente los sintéticos triangular y adimensional.

Aplicando la metodología tradicional y usando la altura de precipitación máxima en 24 h de la estación 16033 Chincua-Senguio (que es la que generalmente se utiliza, en estos métodos, ya que la mayoría de las veces no se tienen registros horarios, si no diarios) que se muestra en la Tabla 19, se determinaron los hidrogramas y los caudales picos correspondientes a:

- La altura de precipitación máxima en 24 h (104 mm el día 4 de febrero, Figura 69), y
- La altura de precipitación acumulada de los cinco días (243.5 mm; Figura 70).

Tabla 19. Precipitación máxima en 24 horas registrada por la estación 16033.

| Estación 16033 | |
|----------------|----------------|
| Día/2010 | hp máxima (mm) |
| 01-feb | 5.5 |
| 02-feb | 26 |
| 03-feb | 75 |
| 04-feb | 104 |
| 05-feb | 33 |
| Total: | 243.5 |

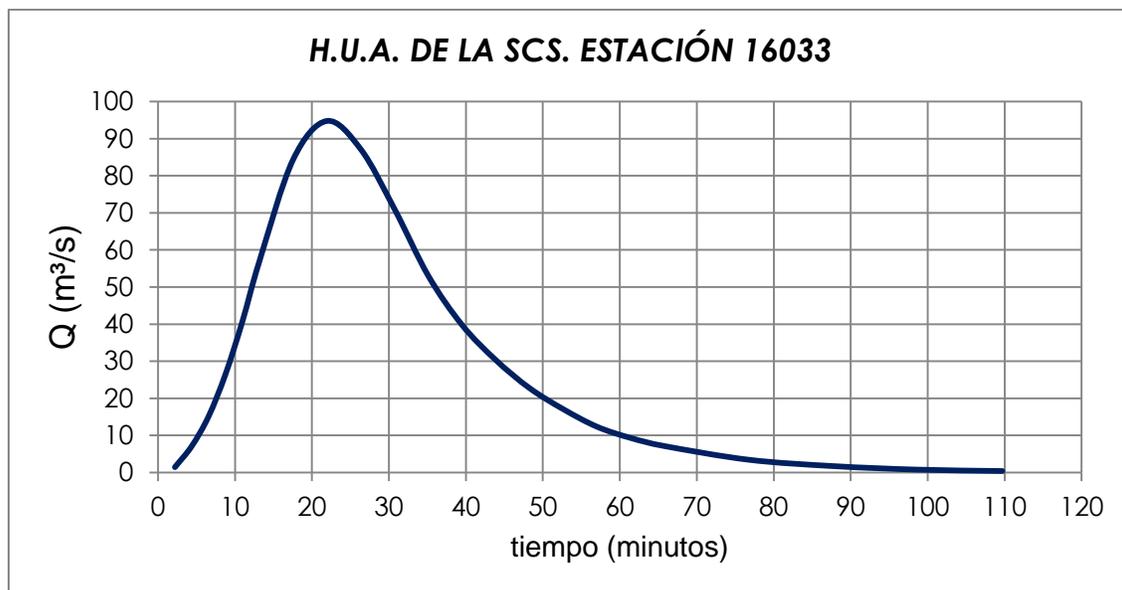


Figura 69. Hidrograma para la MCSP para una hp máxima de 104 mm caída el 4 de febrero de 2010.

Se presenta un gasto pico de $94.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. También indica que el gasto pico en la microcuencia-simulación, ante la ocurrencia de una tormenta se presenta a los 23 minutos.

El hidrograma anterior indica que una lamina de lluvia de 104 mm, dan un caudal pico en el río San Pedro de $94.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y un volumen de agua de $162,897.36 \text{ m}^3$. De estos 104 mm, 54.15 mm son perdidas y 49.85 mm son precipitación en exceso que producen escurrimiento. El hidrograma de la Figura 70 indica que la lluvia acumulada de los cinco días, genera un caudal pico de $331.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y un volumen de $570,544.6 \text{ m}^3$. De los 243.5 mm 174.59 mm son lluvia efectiva y 68.91 mm son perdidas.

Es importante mencionar que de no haber tenido la fortuna de contar con la información del pluviógrafo “Chincua” los resultados anteriores se hubieran usado para simular los flujos hiperconcentrados en FLO-2D, sin embargo se muestran para contrastar resultados, ya que a continuación se presenta lo obtenido con el registro horario de la lluvia y utilizando el software HEC-HMS.

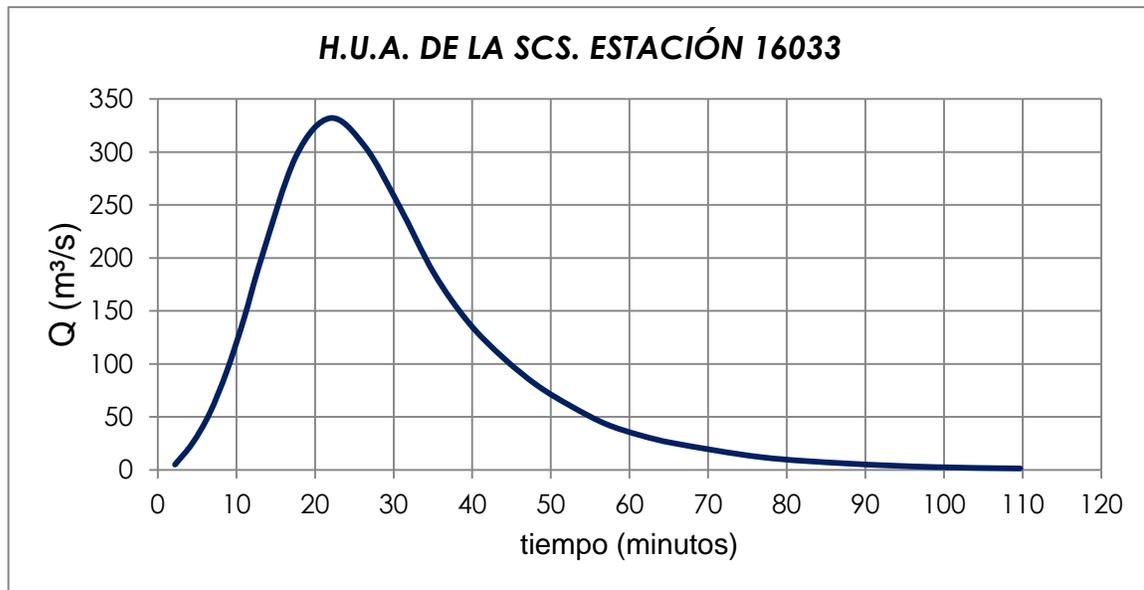


Figura 70. Hidrograma para la MCSP para una hp acumulada de cinco días de 243.5 mm.

Se presenta un gasto pico de $331.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

El proceso completo de calcular el escurrimiento que provocó la tormenta de diseño es complejo, es por eso que para reducir esta complejidad se utilizó un modelo de computadora como lo es HEC-HMS 3.2. Los resultados computados por el software, se muestran en la Tabla 20 y en la Figura 71.

Tabla 20. Resultados del análisis hidrológico mediante HEC-HMS, para la microcuenca San Pedro, usando el registro de horario de la lluvia del pluviógrafo “Chincua”.

| | |
|---|----------------------------------|
| Precipitación total ingresada: | 320 mm |
| Precipitación perdida (inicial + continua): | 74.30 mm |
| Precipitación en exceso: | 245.70 mm |
| Gasto pico: | $8.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ |
| Fecha y tiempo del pico: | 04/feb/2010, 11:00 h |
| Volumen total de escurrimiento directo: | 834 800 m^3 |

Los resultados indican que la tormenta generó un pico de caudal líquido de $8.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, el día cuatro de febrero a las 11:00 h y un volumen de agua de $834,800 \text{ m}^3$. Puede notarse de inmediato y a simple vista la diferencia de resultados, comparando los obtenidos con el análisis que dio la información de la estación 16033, considerando los cinco días de tormenta y que se presentan en la Figura 70. Estos últimos resultados además de sobrestimar el pico del gasto y mostrar diferencia significativa en el volumen, es deficiente en la información que entrega, ya que no indican el día ni la hora en que se presenta el caudal pico. A esto hay que agregar que el registro de la lluvia es menos confiable, ya que la estación 16033 se encuentra mucho más lejos de la MCSP, que el pluviógrafo “Chincua”.

Según algunas versiones de pobladores de la región, los deslizamientos más importantes ocurrieron el día cuatro de febrero cerca del mediodía, con lo que puede dejarse ver una relación entre el pico del escurrimiento y la ocurrencia de los deslizamientos. Sin duda el desfase en tiempo puede deberse a diversos factores que no considera HEC-HMS, como la ubicación del pluviógrafo con respecto a la zona del deslizamiento, sin olvidar la variación que presenta la lluvia en el tiempo y en el espacio. Pero sin duda el pico del gasto guarda relación con la cantidad de lluvia precipitada en ese momento ya que puede observarse en la Figura 74, que la lluvia antes del pico mantuvo su intensidad y la infiltración o pérdidas eran prácticamente nulas, lo que aceleró la detonación de los deslizamientos.

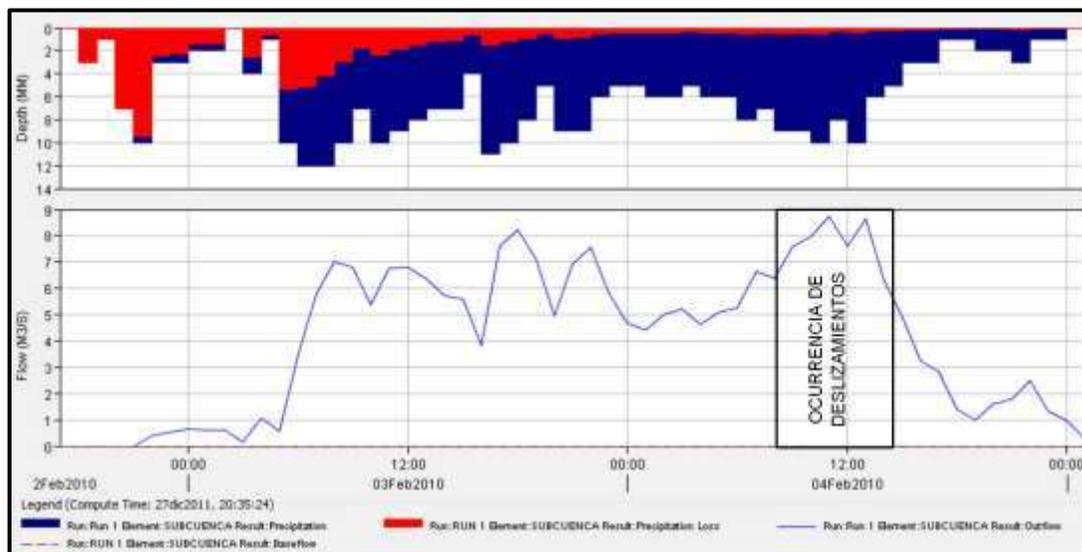


Figura 71. Hidrograma obtenido desde HEC-HMS para la microcuenca San Pedro usando el registro del pluviógrafo “Chincua”.

La imagen corresponde a los valores mostrados en la tabla 20. Se marca en recuadro un rango de tiempo en el que ocurrieron los deslizamientos, según versiones de los vecinos afectados. La ocurrencia de los deslizamientos corresponde con el pico del hidrograma, donde la infiltración de la lluvia es casi nula.

VI.2.2.2. Gasto pico para simulación en FLO-2D.

Nos interesaba conocer el comportamiento del flujo hiperconcentrado en la zona urbana de Mineral de Angangueo, de tal manera que para fines de simulación el punto de salida de la MCSP (Figura 73), fue movido unos 800 m hacia aguas arriba siguiendo el cauce. Este nuevo punto se marca en la misma figura como “punto de salida microcuenca de simulación”. La referencia que se tiene de este nuevo punto de salida es un socavón de mina y donde después del desastre se ha construido un vertedor rompe picos que se observa en la parte inferior derecha de la figura. A esta nueva microcuenca, le llamaremos, de ahora en adelante microcuenca-simulación.

Al mover el punto de salida de la microcuenca San Pedro consecuentemente cambia el hidrograma (y sus características), de esta forma los resultados para la microcuenca-simulación son los mostrados en la Tabla 21 y la Figura 72.

Tabla 21. Resultados del análisis hidrológico mediante HEC-HMS, para la microcuenca-simulación.

| | |
|---|------------------------------------|
| Precipitación total ingresada: | 320 mm |
| Precipitación perdida (inicial + continua): | 74.30 mm |
| Precipitación en exceso: | 245.70 mm |
| Gasto pico: | 7.1 m ³ s ⁻¹ |
| Fecha y tiempo del pico: | 4/feb/2010; 11:00 h |
| Volumen total de escurrimiento directo: | 685,081.07 m ³ |

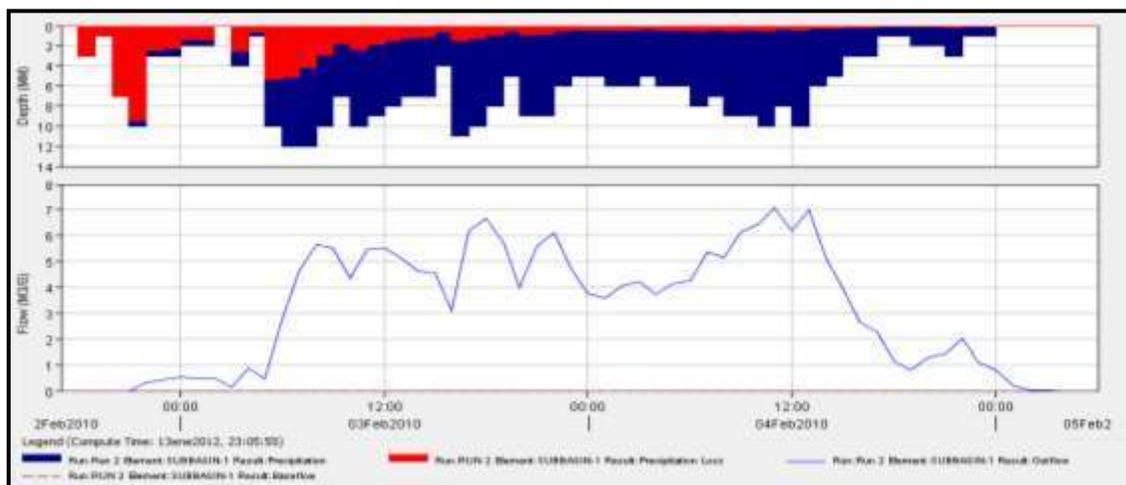


Figura 72. El hidrograma obtenido con HEC-HMS para la microcuenca-simulación.

Este es utilizado como insumo de entrada para simular el comportamiento del flujo líquido y de detritos a lo largo de la zona que se muestra en la Figura 76.

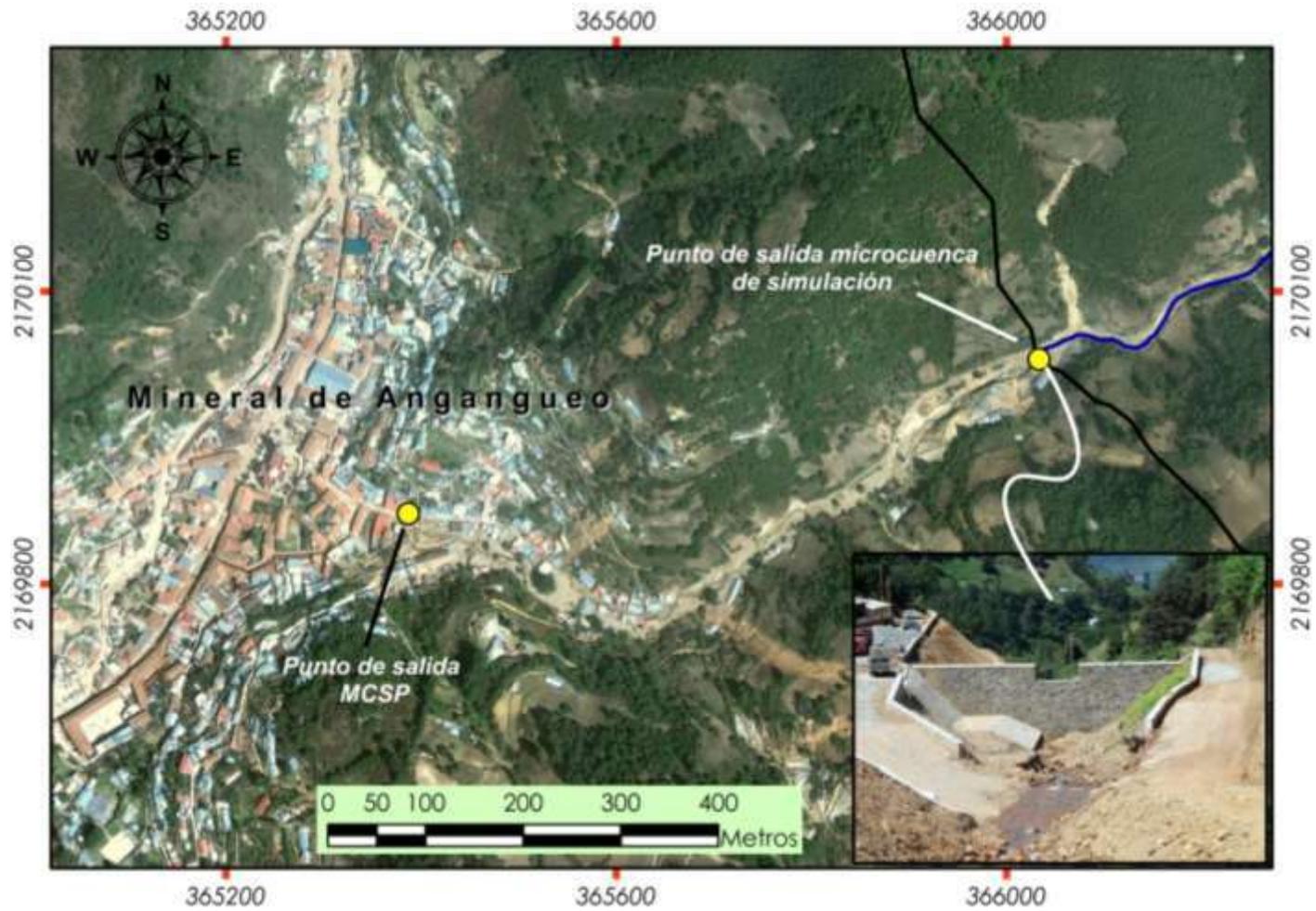


Figura 73. Zona simulada mediante FLO-2D.

Esta zona tiene como inicio: el punto de salida microcuenca de simulación. Se observa también el vertedor rompe-pico que se construyó en ese punto posterior al desastre de 2010. Se coloca como referencia el punto que se tomó para salida de la MCSP.

VI.3. ANÁLISIS DE SEDIMENTOS.

VI.3.1. Deslizamientos, erosión y desprendimientos.

Disparados por la gran cantidad de agua precipitada, en las tres microcuencas que afectan a Mineral de Angangueo se presentaron diversos deslizamientos superficiales, desprendimientos de suelo, erosión y arrastre de sedimentos del fondo de los ríos, y de depósitos de escombros mineros. En particular, en la MCSP se originaron cinco deslizamientos superficiales relativamente pequeños, tres evidencias de erosión y el deslizamiento San Pedro (Figura 74), el cual es el de mayor magnitud. Algo importante que cabe resaltar, contrario a lo que se pudiera pensar los deslizamientos más importantes en las microcuencas, e incluso el deslizamiento San Pedro no sucedieron en zonas deforestadas por lo que se ha descartado como factor condicionante del desastre la falta de vegetación o deforestación.

Se materializó una visita al lugar del deslizamiento San Pedro, para determinar las causas, tipo y geometría del deslizamiento. En base a las observaciones y a las pruebas realizadas a los suelos encontrados en el deslizamiento, se determinó que este ocurrió debido a que la cantidad de agua precipitada fue tal que, después de saturar el suelo superficial comenzó a infiltrarse a zonas profundas hasta alcanzar una zona mas impermeable, generándose así una región de nula resistencia al esfuerzo cortante, que se convirtió en la zona de falla del deslizamiento. También se piensa que el agua pudo haber alcanzado la zona mas sana de la andesita (zona impermeable) que dio pie a la formación de la zona de ruptura del deslizamiento. Es claro, que el detonante fue el volumen de lluvia precipitado, aunado a factores condicionantes como la pendiente de la ladera y el peso que agrega la vegetación.

Una vez en el lugar también se realizó un levantamiento topográfico, que consistió en la toma de puntos sobre el cuerpo del deslizamiento con el fin de determinar su geometría y estimar el volumen desplazado.

El deslizamiento que se presenta es un deslizamiento subsuperficial de tipo rotacional, el cual tiene una longitud de 140 metros desde la corona hasta el pie, un ancho de 60 metros y una profundidad máxima de 15 metros (Figura 75).

Se calculó un volumen de sedimentos desplazado de 52,778 m³. Gran parte del material deslizado se quedó a pocos metros del escarpe, sin embargo se cree que este deslizamiento aportó una parte pequeña de la matriz fina de los flujos de detritos que impactaron a las viviendas del barrio de San Pedro.



Figura 74. Imagen tomada desde el flanco izquierdo del deslizamiento San Pedro. Fotografía: Víctor Manuel Hernández Madrigal (2012).

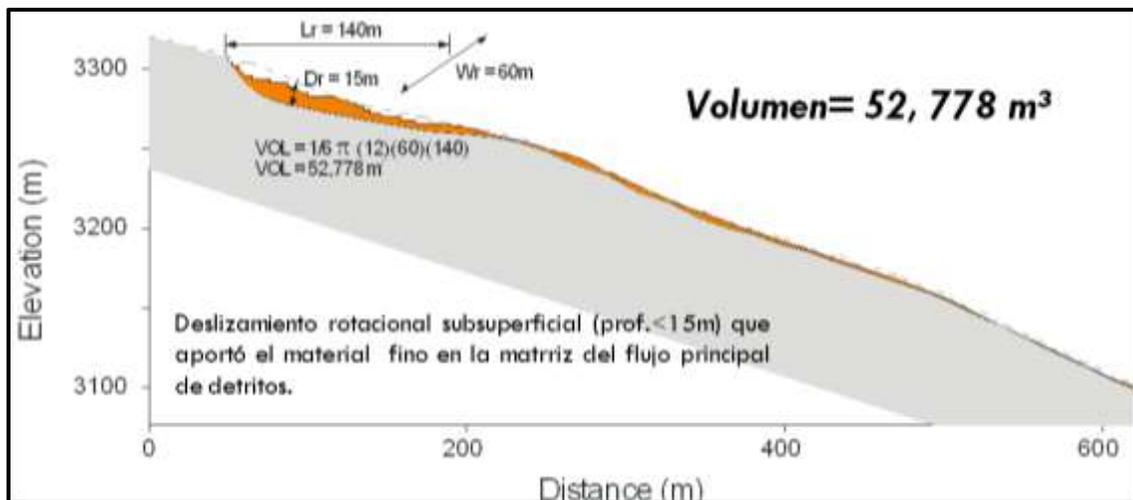


Figura 75. Características morfométricas del deslizamiento San Pedro. Ilustración: Víctor Manuel Hernández Madrigal (2012).

Mediante análisis de imágenes de satélite de Google Earth, y recorridos a pie en la microcuenca se determinaron los volúmenes de cinco deslizamientos superficiales de pequeña magnitud y tres zonas de desprendimiento y/o erosión que evolucionaron a flujos de lodo y detritos (Figuras 76 y 77), una vez que fueron incorporados al torrente principal. Tras sumar la totalidad del volumen de los sedimentos aportados por los deslizamientos se registra un volumen total de 60,107.8 m³ (volumen que no llegó en su mayoría a Mineral de Angangueo) de los cuales cabe mencionar no

se considera la erosión del fondo del cauce, ni de los depósitos de escombros mineros (material granular), volumen que se considera mas importante que el antes calculado, sin embargo fue complicado hacer un estimado de este volumen.

En la Figura 76 se muestran la movilidad potencial del deslizamiento principal y los secundarios, a partir del coeficiente de fricción equivalente (CFE). Es evidente que el deslizamiento San Pedro (el No. 1 en las Figuras 78 y 79), tiene un CFE menor, lo que es indicativo de una mayor movilidad potencial tanto en desnivel como en longitud en proyección horizontal, es decir, cuanto mayor es el volumen del deslizamiento menor será el CFE, debido a que el recorrido horizontal es mucho mayor que el vertical.

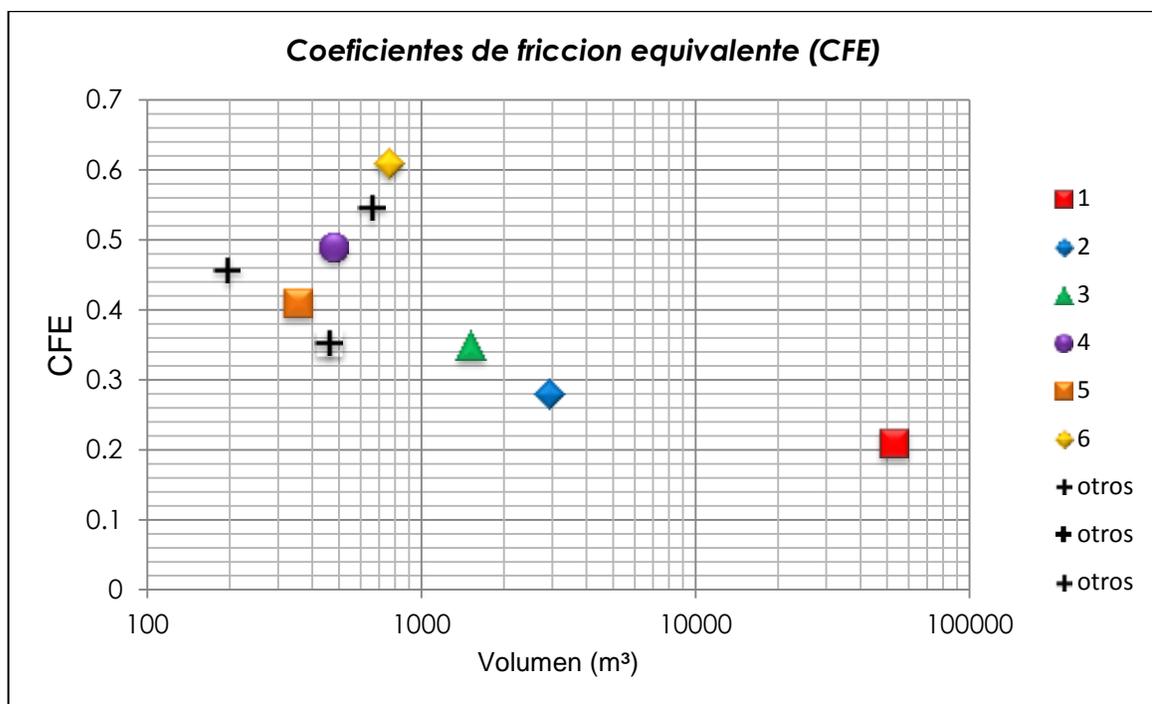


Figura 76. Coeficientes de fricción equivalente para los deslizamientos de La microcuenca San Pedro.

Los deslizamientos que tienen un menor coeficiente de fricción equivalente, indican una mayor movilidad potencial y por ende un mayor volumen desplazado.

Primordial recalcar que el volumen aportado por los deslizamientos resulta poco y no todo llegó a las viviendas en barrio San Pedro, esto en cuanto a material solido aportado a la formación de flujos de detritos y lodo. Pero se conoce que el mayor aporte de sedimentos (gruesos y finos) al flujo del río y a la composición de los flujos de detritos estuvo a cargo de siete depósitos de escombros de mina (Figura 77) que se encuentran ubicados en las márgenes e incluso

obstaculizando el paso del agua, esto fue corroborado en campo de acuerdo con la evidencia erosiva encontrada en todos los depósitos. Es en estos depósitos donde se observan tamaños de suelo de distintas variedades desde arcillas hasta bloques de roca. También fue arrastrado y desprendido material del fondo del río sobre todo granular y de las paredes que fue incorporado a los torrentes de agua.

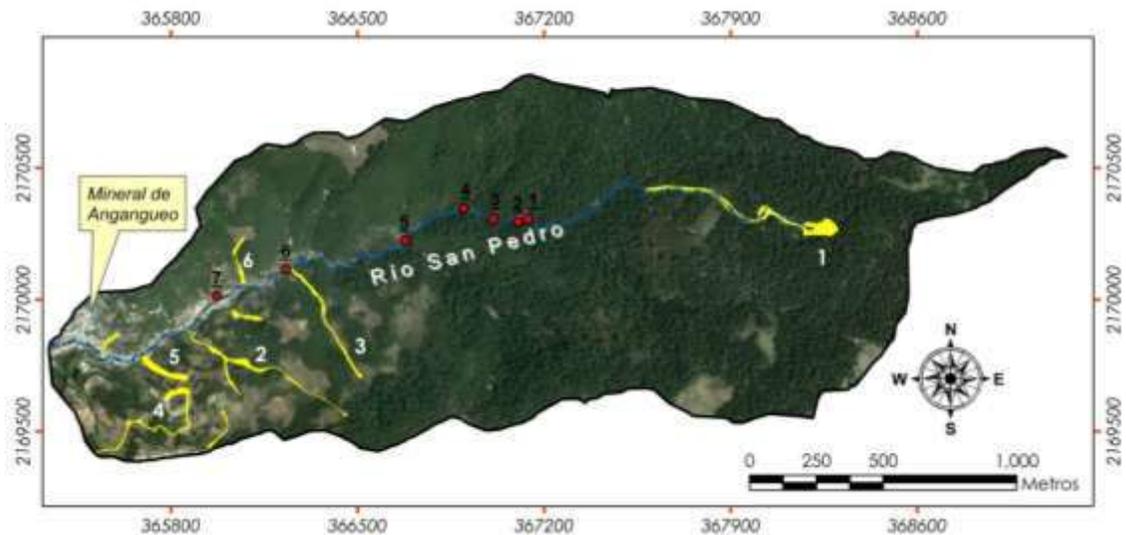


Figura 77. Ubicación en planta del deslizamiento San Pedro (No. 1), deslizamiento Cerro Melón (No. 5), y demás deslizamientos superficiales y evidencias de erosión en la MCSP.

Los deslizamientos se observan en color amarillo. En puntos de color rojo se muestra la ubicación de los depósitos de escombros mineros a lo largo del cauce

Otro aporte que incrementó la concentración volumétrica del flujo fueron los restos de vegetación (truncos y árboles) producto de la explotación de los bosques de las partes altas (Figura 78). Los troncos de árbol y los detritos incrementan exponencialmente la concentración volumétrica del flujo, lo que cambia sus propiedades reológicas, las fuerzas de impacto, la turbulencia del flujo, etc., lo que deviene en eventos mucho más peligrosos. Tal fue el caso de Angangueo.

A forma de conclusión se puede decir que el grado de saturación de los suelos fue suficiente para que se aumentara la presión de poro, provocando la disminución del esfuerzo efectivo de los materiales, generándose un descenso en la resistencia de los materiales lo que propició la ocurrencia de los fenómenos de remoción en masa que observamos en la microcuenca de estudio.



Figura 78. Troncos de madera dejados sobre las laderas inclinadas de la microcuenca San Pedro.

Muchos de estos troncos fueron movilizados hacia aguas abajo y llegaron hasta el centro histórico de Mineral de Angangueo.

VI.3.2. Clasificación de suelos.

Con el objeto de determinar el tipo y características del material fino (menor a 4.75 mm) que fue aportado a los escurrimientos de la MCSP, se aplicó la prueba de granulometría de suelos a muestras de los depósitos de escombros mineros 2, 3, 5 y al deslizamiento San Pedro.

En base al conocimiento del tipo y cantidad de material fino que conforman la matriz de los flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas se puede caracterizar reológicamente el tipo de flujo, tomando como referencia la información mostrada en las Tablas 7 y 8 que corresponden a estudios aplicados a muestras de suelo de distintos lugares de Estados Unidos analizadas por Julien y O'Brien en 1988. En el presente estudio las tablas ayudaron a determinar la viscosidad y esfuerzo de cedencia del flujo de detritos que se presentó en la microcuenca San Pedro.

Como parte de los análisis, se realizaron pruebas de granulometría, límites de consistencia y para reforzar la veracidad de los resultados se determinó la textura por el método de Bouyoucus.

VI.3.2.1. Granulometría.

Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos se tiene que las muestras MD1 y MD2 (Figuras 79 y 80, respectivamente) que corresponden al deslizamiento San Pedro de acuerdo a su granulometría (Figura 81), están dentro del rango de las arenas limpias y con finos; en base solo a la granulometría se tiene:

Muestra MD1= Arena bien graduada (SW)

Muestra MD2= Arena mal graduada (SP)



Figuras 79 (izquierda) y 80 (derecha). Muestra MD1 y muestra MD2.

Para las muestras MR2, MR3 y MR5 (correspondientes a los depósitos de escombros mineros 2, 3 y 5, respectivamente), pasan más del 50% la malla No. 4 por lo que corresponden también a las arenas y evaluando el porcentaje que pasa la malla No. 200, considerando que contienen más del 15% de grava y de acuerdo a sus coeficientes de uniformidad (Cu) y de compacidad (Cc), se tiene que:

Muestra MR2= Arena bien graduada con grava (SW)

Muestra MR3= Arena bien graduada con grava (SW)

Muestra MR5= Arena mal graduada con grava (SP)

El que este material y los suelos del deslizamiento sean arenosos es un factor importante para que hayan sido fácilmente incorporados a los torrentes de agua, ya que las arenas son más susceptibles a ser erosionadas (Hjulstrom, 1935).

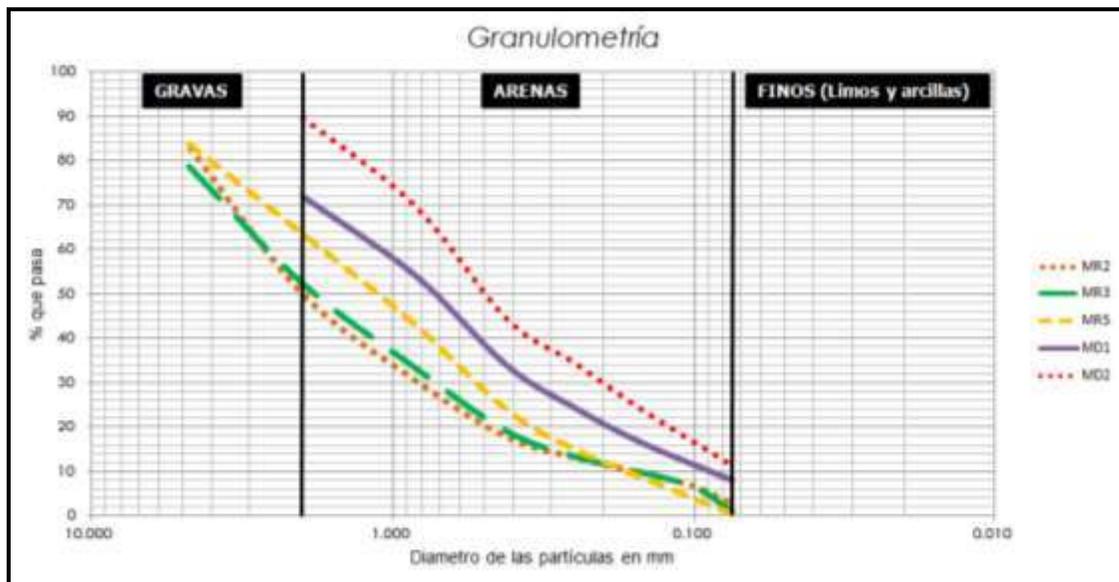


Figura 81. Curvas granulométricas de las muestras analizadas.

Se observa que las muestras de residuos mineros contienen granos del tamaño de las gravas, según clasificación ASTM, e incluso tamaños mayores, que en este caso no fueron analizados. Las muestras del deslizamiento solo tienen arena y finos.

VI.3.2.2. Límites de Atterberg.

Para conocer las características de los finos encontrados en las muestras antes mencionadas, se determinaron los límites de consistencia. De acuerdo con el SUCS, se tomó material menor a 0.425 mm de las muestras antes mencionadas, los resultados de estas pruebas se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22. Resultados de las pruebas de límites de consistencia.

| Muestra | Límite Líquido | Límite Plástico | Índice Plástico | Clasificación |
|---------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|
| MR2 | 38 | 23.11 | 14.89 | Limo de baja plasticidad (ML) |
| MR3 | 33 | 22.93 | 10.07 | Limo de baja plasticidad (ML) |
| MR5 | 38 | 26.86 | 11.14 | Limo de baja plasticidad (ML) |
| MD1 | 56 | 54.29 | 1.71 | Limo de alta plasticidad (MH) |
| MD2 | 60 | 45.06 | 14.94 | Limo de alta plasticidad (MH) |

Estos resultados indican que los finos se refieren a limos y que para las muestras MR2, MR3 y MR5 son de baja plasticidad y el limo de las muestras del deslizamiento MD1 y MD2 es de alta plasticidad. De esta manera y resumiendo se tiene:

Muestra MD1: Arena bien graduada con limo de alta plasticidad (SW-SM)

Muestra MD2: Arena mal graduada con limo de alta plasticidad (SP-SC)

Muestra MR2: Arena bien graduada con grava (SW) / sus finos son limos de baja plasticidad.

Muestra MR3. Arena bien graduada con grava (SW) / sus finos son limos de baja plasticidad.

Muestra MR5. Arena mal graduada con grava (SP) / sus finos son limos de baja plasticidad.

Quiero recordar que la clasificación de las muestras (SUCS) y la determinación de los tipos de granos finos, son conforme a las pruebas de granulometría y límites de consistencia. Más adelante se reportan los resultados de una prueba de sedimentación para conocer con detalle la proporción de finos que tienen las muestras.

Los suelos con plasticidad alta tienen un potencial de expansión alto, presentan cohesión alta y ángulo de fricción bajo. La plasticidad está directamente relacionada con la succión. A igual contenido de humedad, la succión aumenta con la plasticidad. Entonces, un suelo con alta plasticidad significa un suelo cohesivo. Los suelos cohesivos son impermeables, a mayor plasticidad menor es la permeabilidad del suelo.

Con la aplicación de las pruebas de granulometría y límites de consistencia se concluyó que el suelo superficial (Figura 79) tienen una importante cantidad de limo, lo que provoca que no sea un suelo agregado (que forme grumos) y sea altamente inestable, por lo que se desprendió con la lluvia recibida, además al observar el deslizamiento San Pedro se puede ver que la porosidad y la permeabilidad disminuyen con la profundidad, ya que bajo el suelo superficial se encuentra la andesita, lo que implica zonas más impermeables y menos porosas.

En cuanto al material fino de los escombros mineros son limos de baja plasticidad (según estas pruebas) por lo que la cohesión no es tan alta, esto provoca que no sean depósitos consolidados y fueran más susceptibles a desprendimientos y se unieran al cauce para formar los flujos de detritos.

VI.3.3. Parámetros reológicos.

Reología es el estudio del flujo de materia: principalmente líquidos, pero también sólidos blandos bajo condiciones en las cuales ellos fluyen en vez de deformarse elásticamente (Schowalter, 1978). Sin duda en el estudio de los flujos hiperconcentrados es muy importante conocer las características reológicas de la mezcla agua-sedimento, ya que son estas características las que darán cuenta de la viscosidad, esfuerzo de cedencia y por ende comportamiento dinámico del flujo. Por ejemplo: la viscosidad crece con la concentración, para concentraciones relativamente pequeñas la viscosidad crece suavemente y para valores importantes crece en forma muy pronunciada y para valores elevados el crecimiento es muy fuerte.

Debido a la falta de equipo especializado para la determinación precisa en laboratorio de los parámetros reológicos de los sedimentos, se optó por determinar estos en base a tablas propuestas por O'Brien (Tablas 7 y 8), en donde el tipo de muestra a usar para el modelo FLO-2D se determina mediante la distribución del tamaño del sedimento fino (porcentaje de arcilla, D_{16} , D_{50} , D_{84}) y el límite líquido e índice plástico.

La determinación del porcentaje de arcillas se obtuvo mediante una prueba de sedimentación muy usada en el ámbito edafológico. Esta prueba recomienda usar partículas de suelo con tamaño menor a 4.75 mm. Con la realización de este ensayo se eligió más adecuadamente el tipo de muestra, o mejor dicho los parámetros reológicos de la muestra tipo para construir el modelo en FLO-2D.

Se omitió la prueba de sedimentación para las muestras de suelo MD1 y MD2 ya que de acuerdo a nuestra percepción y observación estos suelos no fueron importantes en la reología de los flujos de detritos. En este análisis se le dio mas peso a las muestras recolectadas de los escombros mineros, es por ello, que en lugar de las muestras omitidas se analizó una muestra a la que llamaremos MR6, y que corresponde a material del depósito minero No. 6 localizado cerca del socavón de la mina (Figura 73 y 77).

De acuerdo a nuestra percepción el poco material fino encontrado en los escombros mineros representa de mejor manera la reología que pudo presentar el flujo hiperconcentrado de la microcuenca San Pedro, sobre todo por la gran cantidad de depósitos de este tipo a lo largo del cauce. Pero no hay que olvidar que el fondo del cauce, sus paredes y los antiguos aluviones también aportaron parte importante de finos.

Los análisis hechos a estas cuatro muestras dieron la pauta, para obtener los coeficientes de las ecuaciones que se ingresan en FLO-2D, para calcular la concentración de los sedimentos, la viscosidad y el esfuerzo de cedencia.

Los valores promedio para porcentaje de arcilla, LL e IP que se muestran en la Tabla 23, se compararon con los valores de la Tabla 7, encontrando que el promedio de las características de estas muestras se asemeja a la muestra tipo *Aspen Pit 1*.

Tabla 23. Porcentajes de arcilla de las muestras mediante el método de sedimentación.

Se agrega también los respectivos límites líquidos e índices plásticos.

| MUESTRA | Arcilla (%) | Límite Líquido (LL) | Índice plástico (IP) |
|------------------|-------------|---------------------|----------------------|
| MR2 | 30.2 | 0.38 | 0.15 |
| MR3 | 34.2 | 0.33 | 0.10 |
| MR5 | 38.2 | 0.38 | 0.11 |
| MR6 | 18.2 | 0.35 | 0.02 |
| Promedio: | 30.2 | 0.36 | 0.09 |

A la muestra tipo *Aspen Pit 1* le corresponden los siguientes valores de coeficientes:

$$\text{Para } \tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C} ; \alpha_1 = 0.181 \text{ y } \beta_1 = 25.7$$

$$\text{Para } \eta = \alpha_2 e^{\beta_2 C} ; \alpha_2 = 0.0360 \text{ y } \beta_2 = 22.1$$

Por lo que las ecuaciones utilizadas para el modelo son:

$$\tau_y = 0.181e^{25.7Cv} \quad [\text{Ec. 31}]$$

$$\eta = 0.036e^{22.1Cv} \quad [\text{Ec. 32}]$$

Antes de iniciar el modelado del flujo en FLO-2D, es importante mencionar algunos aspectos relevantes en cuanto a las propiedades reológicas de este. Al momento de mencionar que los escombros mineros, y el material del fondo del cauce fueron el mayor aporte de sedimentos, es claro que el tipo de flujo generado en la MCSP (de acuerdo a la corriente de la hidráulica torrencial descrita en el subcapítulo III.2 y en particular a Takahashi) es un flujo de detritos de tipo pedregoso (*stony type*). La matriz de este flujo de detritos (en base a las pruebas de granulometría, límites de consistencia y sedimentación) es arenosa, ya que predominan los porcentajes de arena en todas las muestras de escombros (Figura 82) e incluso en las del deslizamiento, pero en segundo lugar tenemos arcillas. Y debido a que FLO-2D no permite ingresar material granular y solo podemos elegir la muestra tipo en base al porcentaje de arcilla y límites de consistencia, es que se priorizó en determinar estas propiedades.

Entonces, el tipo de flujo generado en la microcuenca San Pedro es un flujo de detritos *stony type* con matriz areno-arcillosa, por lo que no fue un flujo viscoso, sino más bien granular friccional.

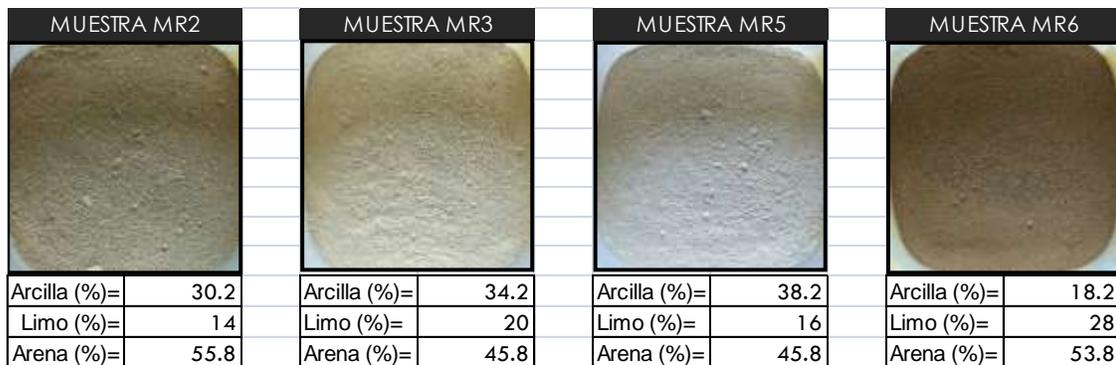


Figura 82. Resultados de la prueba de sedimentación.

Se reportan los porcentajes de finos encontrados en las muestras usadas para determinar los parámetros reológicos ingresados a FLO-2D.

Estos parámetros reológicos de la muestra *Aspen Pit 1*, fueron recolectadas de depósitos naturales de flujos de lodo en Colorado Rocky Mountain cerca de las ciudades de *Aspen* y *Glenwood Springs, USA*.

VI.4. SIMULACIÓN EN FLO-2D.

Un elemento fundamental sobre el cual se desarrollan todos los componentes que simula FLO-2D, es un Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Un MDE de buena calidad (elaborado a partir de una buena cantidad de puntos GPS) llevará a tener mayor detalle en la circulación del flujo a través del cauce, la llanura de inundación y las calles de Mineral de Angangueo. Por esta razón uno de los trabajos de campo fundamentales fue la realización de un levantamiento topográfico sobre el cauce y parte de la zona urbana de Mineral, dicho levantamiento topográfico constó de 3,084 puntos. Es importante mencionar que esta topografía ha sido ya modificada por la ocurrencia del evento de 2010.

Una vez procesados y analizados estos puntos, fueron ingresados al programa ArcGIS para generar un MDE con resolución de 1m. Dicho modelo fue creado con el método de interpolación *Spline* que estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada.

VI.4.1. Simulación con hidrograma líquido.

Análisis de los resultados.

Una vez conocidas las características principales de la microcuenca San Pedro y el tipo de flujo que discurre por ella, procedemos al ingreso de datos en el software FLO-2D, para iniciar las simulaciones.

La primera simulación se realiza sin considerar el gasto sólido, es decir, no se ingresaron las características de los sedimentos. Solo se simula gasto líquido, ingresando el hidrograma de la tormenta de diseño, el cual se observa en la Figura 72. Debido a que se ingresó un hidrograma muy confiable, gracias a la información del pluviógrafo "Chincua", los resultados tenderían a ser muy buenos. Esta simulación fue de ayuda para calibrar el modelo, observar la manera en que trabaja FLO-2D y tener una mejor percepción de las inundaciones de gasto líquido que puede ocasionar esta cuenca y como hubiese sido la afectación ante la tormenta de diseño, si no hubieran ocurrido los deslizamientos que aportaron los sedimentos.

Los parámetros de entrada para esta simulación fueron:

- Imagen de satélite de Google Earth de la zona de estudio.
- MDE con resolución de 1m, de la zona a simular.
- Hidrograma líquido, con pico máximo de $7.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.
- Coeficiente de rugosidad de Manning para la llanura del río de 0.05.
- Coeficiente de rugosidad de Manning para las calles 0.015.
- Componentes urbanos (calles y edificaciones).
- Tamaño de celda de los elementos finitos de $5 \times 5 \text{ m}$.
- Tiempo de simulación de 70 horas.

Anteriormente se ha explicado la forma en que se han determinado cada uno de los parámetros de entrada, con excepción del tiempo de simulación, este fue elegido en base a la duración del hidrograma y el tiempo necesario para que la totalidad de la lluvia sea desalojada de la cuenca una vez finalizada la tormenta, es decir, hasta tener la recesión completa del hidrograma. En cuanto al tamaño de celda elegido de 5 m^2 , fue para obtener el mejor detalle posible.

El terreno a evaluar se dividió en 8126 celdas, el hidrograma líquido fue ingresado en la celda 5918, la cual tiene una elevación de 2,687.84 msnm. En esta simulación las viviendas y edificios han sido agregados para tener en cuenta la pérdida por almacenamiento y redirección de flujo.

El volumen de agua ingresado en el hidrograma líquido fue de 685,081.07 m^3 del cual según resultados de FLO-2D 683,334.32 m^3 ocasionaron inundación y los restantes 1,746.75 m^3 fue volumen almacenado y/o perdido. La tormenta generó una área de inundación máxima (sin importar el tiempo de ocurrencia) de 26,275 m^2 (2.68 ha). Y el tiempo total de simulación fue de 157.77 horas (6.57 días).

Posterior a la simulación los resultados fueron graficados en el post-procesador MAPPER perteneciente al programa FLO-2D. Los resultados obtenidos por el programa son las elevaciones del terreno, tirantes, velocidades y volúmenes de agua y sedimento del flujo, entre otros. Los resultados para la simulación del gasto líquido son:

Profundidades máximas de flujo líquido.

Es importante hacer mención que FLO-2D en sus informes finales entrega las profundidades (tirantes) máximas alcanzadas por el flujo, una vez alcanzado el pico del hidrograma. Considerando esto se tiene que:

Las zonas en donde el cauce alcanza su mayor profundidad (talweg), se registran tirantes que oscilan entre 0.5 y 1.0 m (Figura 83), alcanzándose tirantes de hasta 1.5 m en zonas más profundas, estos valores resultan relevantes comparados con los escasos 30 cm máximos que alcanza el río en época de estiaje.

En el poblado se observan tres zonas de conflicto (ZC) importantes (Figura 83), donde debido al estrechamiento del cauce, ya sea por su topografía o por invasión de viviendas, se alcanzan tirantes de flujo elevados, dichos tirantes varían entre 1 y 4 m, el máximo (valores que se consideran de alta peligrosidad, para inundaciones de agua, (OFEE et al. 1997, Fiebiger, 1997), alturas que fácilmente podrían haber cubierto de agua las viviendas adyacentes provocando inundación por anegación y por desbordamiento, las estructuras estarían en peligro de ser destruidas y el peligro para las personas es alto, tanto fuera como dentro de las estructuras.

El flujo en calles como en Av. Nacional, Melchor Ocampo, Libertad (Figura 86) registra tirantes en su mayoría de 50 cm, alcanzándose en algunas zonas el metro de profundidad (valor que se considera de mediana peligrosidad, OFEE et al. 1997, Fiebiger, 1997), aquí las personas corren peligro fuera de sus viviendas y estas últimas pueden ser dañadas o destruidas dependiendo del material de construcción, también puede generar pánico en la población. Es importante recordar que estos tirantes son producto del pico del gasto, pico que no ha sido alto debido a que las intensidades de lluvia tampoco lo fueron. Sin embargo si se presenta una tormenta con mayores intensidades, generará picos más importantes y por consiguiente tirantes más profundos en toda la zona de simulación.

Velocidades máximas de flujo líquido.

Al elaborar el mapa de velocidades en formato de vectores que permitiera una mejor visualización, se logra observar que las velocidades más importantes se presentan en las calles Melchor Ocampo, Av. Nacional y parte final de calle Libertad (Figuras 84 y 86), también en la parte final del río, donde actualmente se ha encauzado el río. Este incremento de velocidades puede deberse sin duda a la pendiente pronunciada, al coeficiente de rugosidad más bajo (0.015) con respecto al del cauce y el estrechamiento de las zonas. Aquí las velocidades rondan entre los 3.46 y los 9.24 m s⁻¹ (velocidades de alta peligrosidad para inundaciones de agua, según criterios de OFEE et al. 1997, Fiebiger, 1997. En la zona del cauce las máximas velocidades se presentan en el talweg (como debiera de esperarse) y se tienen velocidades de entre 1.15 y 5.77 m s⁻¹.

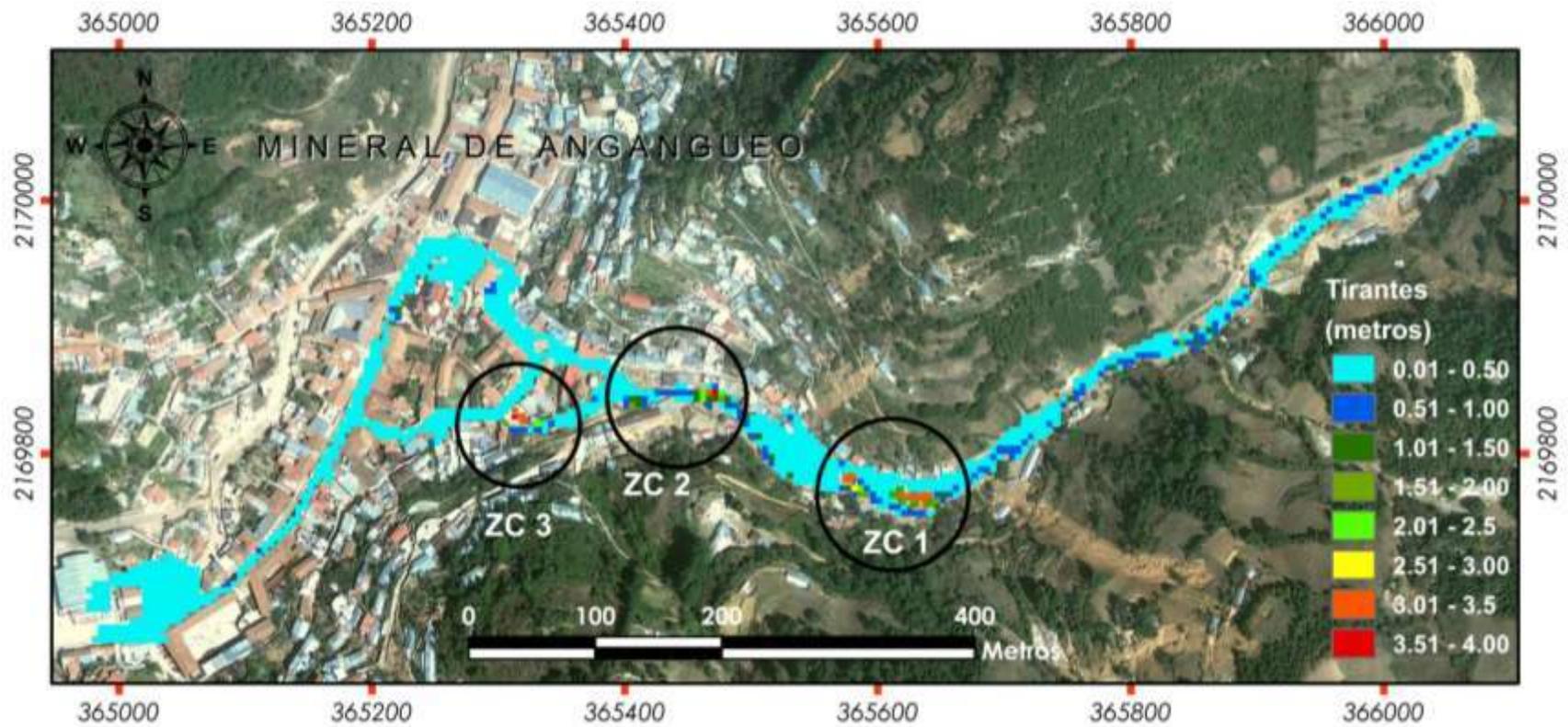


Figura 83. Tirantes máximos de flujo líquido.

Se marcan las tres zonas en donde el flujo se encajona provocando tirantes superiores a un metro, hasta llegar a los cuatro metros de profundidad, valores que se consideran de alta peligrosidad para una avenida de agua.

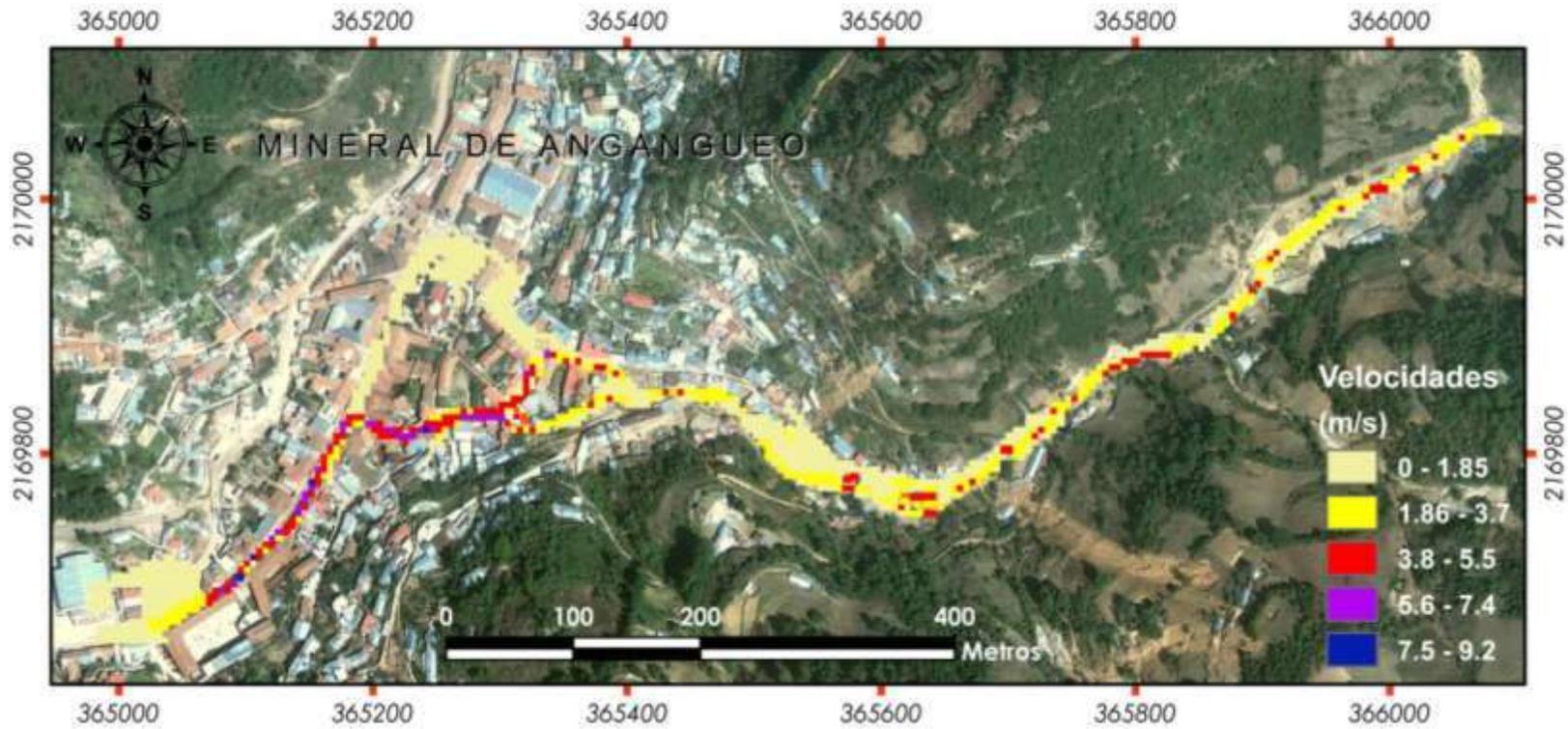


Figura 84. Velocidades máximas del flujo líquido.

Las mayores velocidades se presentan en la zona urbana donde la pendiente es mas pronunciada, el coeficiente de rugosidad de Manning menor y donde los callejones hacen de cauce. La velocidad máxima de 9.24 m/s es equivalente a una velocidad de 33.12 km/h.

Fuerzas de impacto por flujo líquido.

En general, en toda la zona de simulación se tienen fuerzas de impacto de entre 0.01 y 13,314 N m^{-2} (Figura 85). Se presentan 4 zonas donde se incrementan las fuerzas de impacto o se consideran zonas más vulnerables (ZV) por impacto. La zona vulnerable 1 (ZV 1) es donde el cauce cambia de dirección, aquí el mayor impacto es de 53,256 N m^{-2} , era de esperarse aquí un incremento en el impacto debido a que el flujo viene recto después de recorrer un largo tramo. La ZV 2 (66,570 N m^{-2}) se encuentra 150 m aguas abajo de la ZV 1, es precisamente en esta zona donde se presentaron los mayores daños a las viviendas. Sin embargo, estos valores de fuerzas de impacto debidas al gasto líquido no son suficientes para generar los daños que se observaron en campo ya que dichas pérdidas fueron causadas por los detritos y bloques de roca, como se verá mas adelante. Según FLO-2D la zona 3 también alcanza el mayor valor de fuerza de impacto, en esta zona el cauce encuentra la obstrucción casi total por las viviendas y un túnel. Este valor de 66,570 N m^{-2} equivale aproximadamente a la presión de 6.8 columnas de agua a 4°C. La zona 4 con una fuerza de impacto de 53, 256 N m^{-2} se encuentra al final de la Av. Nacional donde existe el cambio de pendiente de fuerte a suave, esta zona puede considerarse altamente vulnerable a impactos, por la aportación de flujo por parte de la microcuenca Catingón.

Presión estática y energía específica.

A lo largo de todo el modelo se tiene una presión estática de 8,844.7 N m^{-2} y los incrementos considerables de este parámetro se presentan en la zona de conflicto 2 de la Figura 83, alcanzándose valores de 79,962.1 N m^{-2} . En el talweg del cauce San Pedro se presentan valores de energía específica que varían de 1 a 3.1 metros. En la zona de conflicto 2, la energía específica alcanza los 4.7 metros. En las calles los valores también oscilan entre los 1 y 4.7 m, estos últimos valores se presentan en el cambio de pendiente de la avenida Nacional, lo que es indicativo de mayor fuerza de impacto en esa zona.

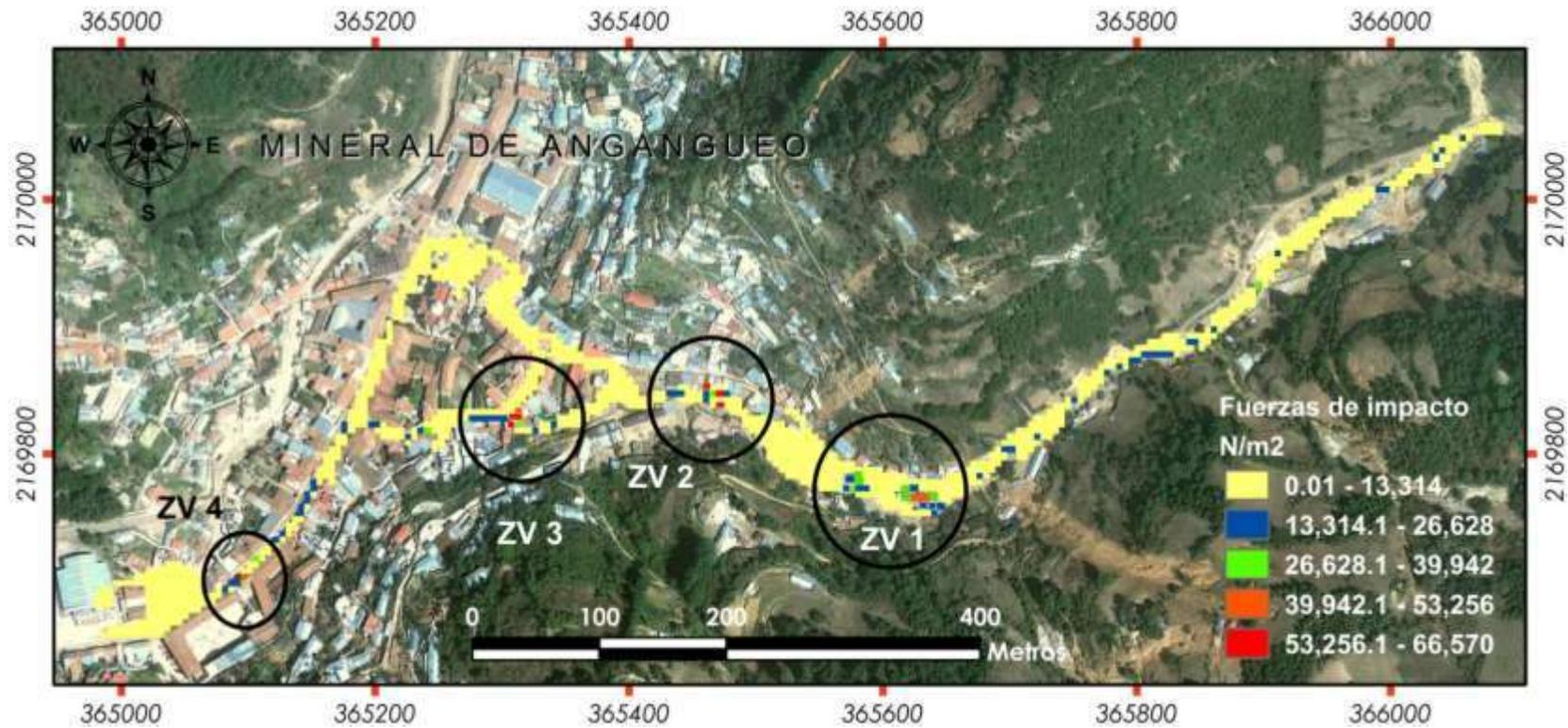


Figura 85. Fuerzas de impacto provocadas por la avenida de flujo líquido.

Se observan cuatro zonas vulnerables a las fuerzas de impacto, estas se ubican donde existe una reducción importante del cauce o donde es obstruido por las viviendas.

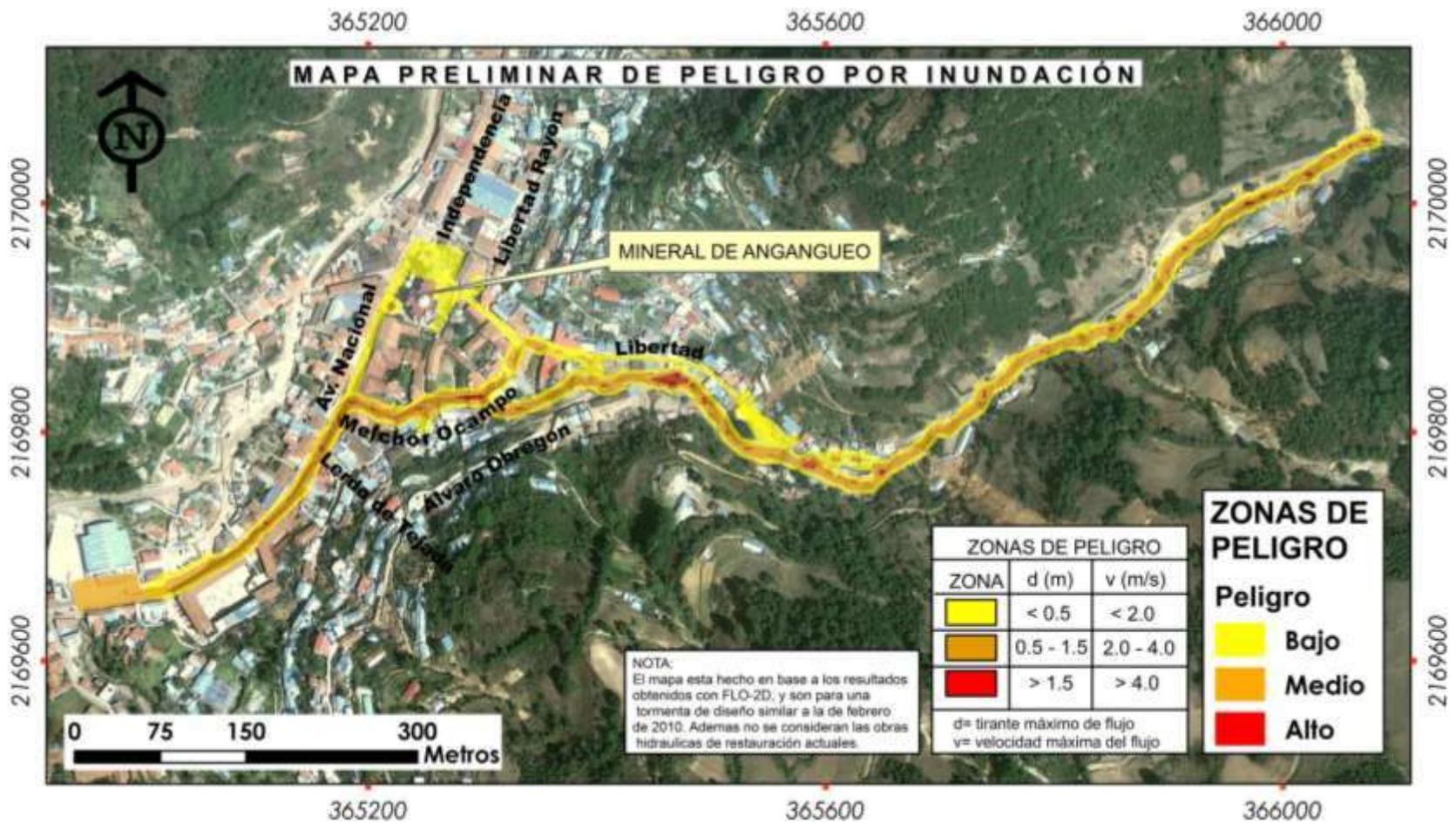


Figura 86. Mapa preliminar de peligro por inundación, para un evento de lluvias similar al ocurrido en febrero de 2010.

Las zonas de peligro se han definido en base a los estándares de Suiza y Austria (ver OFEE et al. 1997, Fiebigler 1997). Predominan zonas con peligrosidad media.

VI.4.2. Simulación hidrograma líquido + hidrograma sólido.

Análisis de los resultados.

La simulación de flujo de lodo incluye la concentración de sedimento variable y el cálculo de la viscosidad y esfuerzo de cedencia. Un flujo de detritos implica la adición de un hidrograma de sólidos al hidrograma líquido antes simulado. El gasto sólido se ingresa como una concentración volumétrica de sedimentos, el cual debe variar de 0.2 (20%) a máximo 0.45, 0.55 o 0.60 (45%, 55% o 60%) que es el rango en que se presenta un flujo hiperconcentrado, ya sea de lodos o de detritos. Una vez ingresado el hidrograma de gasto sólido el programa se encarga de calcular el hidrograma de la mezcla para después proceder a transitarlo hacia aguas abajo.

Además de los parámetros de entrada mencionados en el subcapítulo anterior, para esta simulación se ingresaron: la gravedad específica del sedimento igual 2.65 (valor promedio para el tipo de suelos encontrados en la microcuenca de estudio) y una resistencia de la planicie al flujo laminar igual 2285 (empleado en otros estudios de flujos de escombros).

Hasta este momento se han estado realizando varios intentos por encontrar una simulación que se ajuste a lo registrado en campo, haciendo variaciones en la concentración volumétrica de sedimentos en el hidrograma de gasto sólido. Los resultados han sido escasos, debido a la lentitud con que FLO-2D avanza en el modelado y entrega resultados. Sin embargo, los resultados que a continuación se presentan son para una simulación donde se ingresó una concentración volumétrica de sedimentos que varía de 0.2 a 0.375 en intervalos de 0.02 cada hora (Figura 87).

De la simulación terminada FLO-2D arrojó los siguientes resultados, los cuales se ajustan de manera más o menos adecuada a lo sucedido en campo, sobre todo en lo que se refiere a las características dinámicas, no así para el volumen de sólidos reportado:

Volumen total agua + sedimento: 1, 587,444.51 m³.

Almacenamiento de flujo dentro de la zona de estudio (inflow):

- Volumen de agua: 685,081.05 m³.
- Volumen de sedimentos/escombros: 902,363.46 m³.

Almacenamiento de flujo fuera de la zona de estudio (outflow):

- Agua: 1,589.87 m³.
- Escombros/sedimentos: 1,952.64 m³.

Antes de continuar con el análisis, es importante mencionar que el valor de volumen de sedimentos reportado por FLO-2D nos deja insatisfechos ya que nos parece un valor sobrestimado, sin embargo, el volumen de agua y las características dinámicas son muy satisfactorios como se verá a continuación.

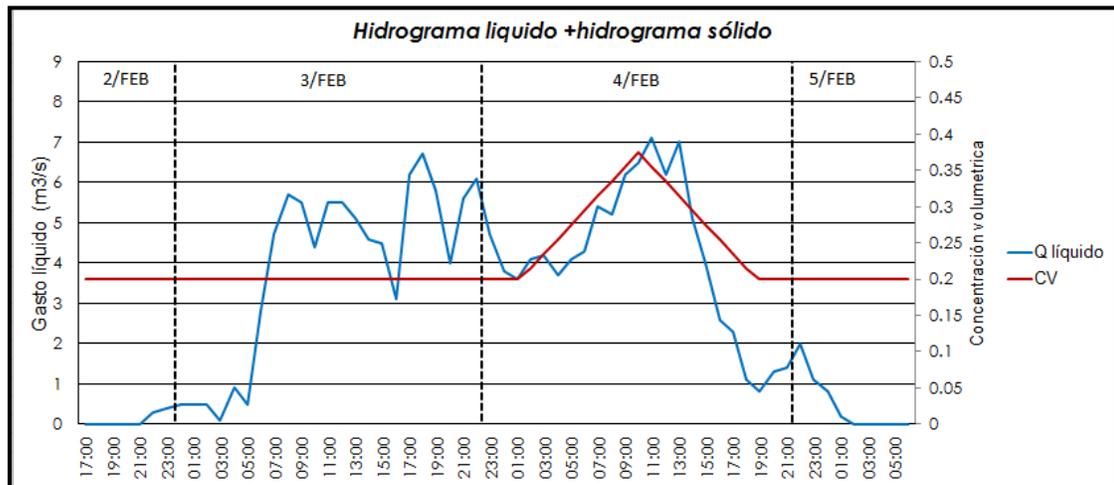


Figura 87. Hidrograma líquido e hidrograma sólido.

Ambos hidrogramas se ingresaron a FLO-2D para simular el flujo de detritos de febrero de 2010, ocurrido en la microcuenca San Pedro.

El pico de la concentración de sedimentos concuerda con el pico máximo del gasto líquido, debido a que, es en esta parte del hidrograma donde ya no se presenta infiltración y el suelo es susceptible a desprenderse.

De acuerdo al hidrograma de salida producto de la mezcla agua-sedimento, el gasto pico pasó de $7.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $11 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, es decir, una Cv máxima de 0.375, incrementó el pico del hidrograma en un 55%.

Profundidades máximas del flujo de lodo y detritos.

Las profundidades máximas del flujo de detritos varían de 0.01 a 6 m, a lo largo de todo la zona simulada, incrementaron en un 50% con respecto a las obtenidas con flujo líquido.

En el tramo del río los tirantes máximos (una vez alcanzado el pico del hidrograma de la mezcla) varían desde 1 hasta 4 m en zonas donde el talweg es pronunciado (Figura 88). Aproximadamente 100 m aguas arriba de la zona de conflicto 1, una marca de lodo indica un tirante de aproximadamente 3 m (Figura 89), FLO-2D en la misma zona registra tirantes entre 2 y 3 m.

En la zona de conflicto 1 (ZC 1), según resultados de FLO-2D se presentan tirantes del flujo de detritos que varían de 1 hasta 5 m. En campo se observa una marca de lodo (Figura 90) que alcanza los 4 m de altura, valor muy parecido al reportado en la simulación. En esta zona se depositó una parte del material sólido y troncos de árbol (Figura 101), también una vivienda fue totalmente sepultada (Figura 93), y hubo daños importantes a las construcciones aledañas.

En la ZC 2 se registra el mayor tirante (6 m) según el modelo, y aunque no tenemos evidencia de que el flujo alcanzó esa altura, los daños en esta zona fueron los más severos, las viviendas y una iglesia fueron semi destruidas, como puede verificarse en la Figura 94. Es importante mencionar que en esta zona ocurrió el mayor depósito de los detritos y bloques de roca (Figura 95).

La ZC 3 se presenta aproximadamente 150 m aguas abajo de la ZC 2, aquí se alcanzan tirantes de hasta 5 m según FLO-2D, en campo se tiene evidencia de una marca de lodo que se registró a una altura de aproximadamente 6 m (Figura 91). Esta zona es muy conflictiva debido a un encauzamiento del río y la presencia de un túnel, sin embargo el flujo al llegar a esta zona no llevaba sedimentos gruesos pues la mayoría ya habían sido depositados en ZC 2, pero el flujo hiperconcentrado se abrió paso entre las viviendas para seguir circulando por la calle Melchor Ocampo hacia aguas abajo.

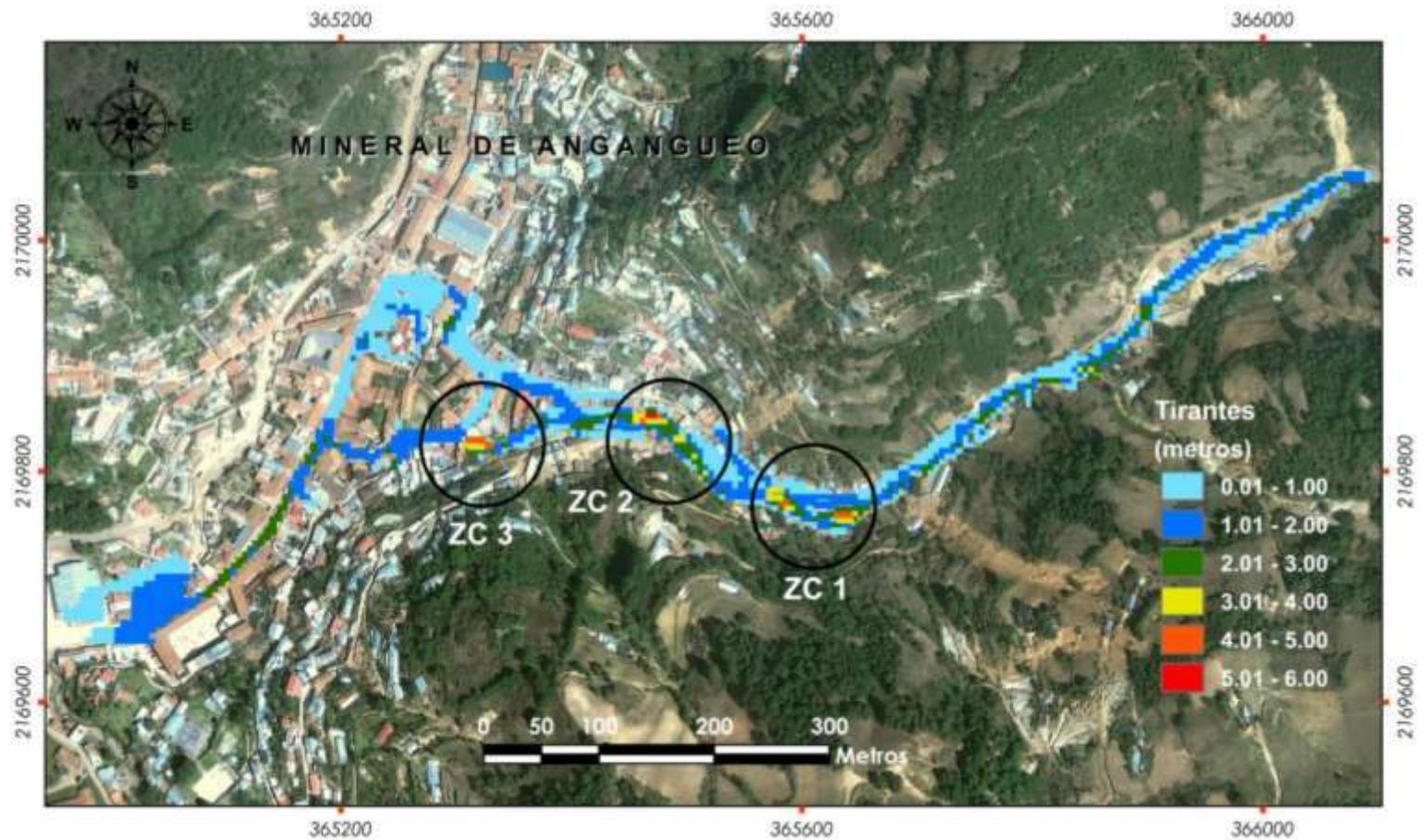


Figura 88. Tirantes máximos para el flujo de detritos.

Los tirantes del flujo de detritos se incrementaron en un 50% con respecto a la simulación por inundación. Sin embargo las zonas conflicto se mantienen, donde se estrecha el cauce por obras antropogénicas.



Figura 89. Fotografía donde se observa el nivel que alcanzó el flujo de lodo en una zona del cauce 100 m aguas arriba de la ZC 1.

También se observa el daño a la vivienda y depósito de detritos y bloques de roca.



Figura 90. Marca de lodo con altura de cuatro metros en una vivienda ubicada en la ZC 1.

Se observan los daños y depósitos de madera en la cochera de la casa. Al pie de la casa se observa el escurrimiento del río San Pedro.



Figura 91. Marca de lodo de seis metros de altura en una vivienda ubicada en la zona de conflicto 3.

En cuanto a los tirantes reportados en la Av. Nacional se consideran exagerados, esto puede deberse a la topografía irregular en la ZC 3, que permitió la circulación del flujo hacia aguas abajo, cuando en la realidad gran parte del material sólido quedó retenido ahí, este paso del flujo incrementa los tirantes en esa zona debido a la pendiente pronunciada de la calle.

Velocidades máximas del flujo de detritos.

Las velocidades del flujo de detritos obtenidas en FLO-2D en las zonas de conflicto 1, 2 y hacia aguas arriba en el talweg del río varían de 0.01 hasta un máximo de 5.7 m s^{-1} . Se observa una pequeña disminución del 2% con las obtenidas simulando solo el gasto líquido; esta ligera disminución en la velocidad es producto de la concentración de sedimentos, ya que el flujo se vuelve más viscoso por el contenido de arcilla y limo, también se hace lento debido a la fricción de las partículas granulares con el lecho y las paredes del río. Sin embargo en la zona de calles (Melchor Ocampo, Libertad y Av. Nacional) las velocidades se incrementaron en aproximadamente un 58%. Ya que aquí la pendiente es más pronunciada que en el cauce, el empuje de las partículas sólidas logra que el flujo viaje más rápido y la superficie de las calles y callejones, no oponen resistencia al movimiento, es decir, hay menos fricción que evite el movimiento.

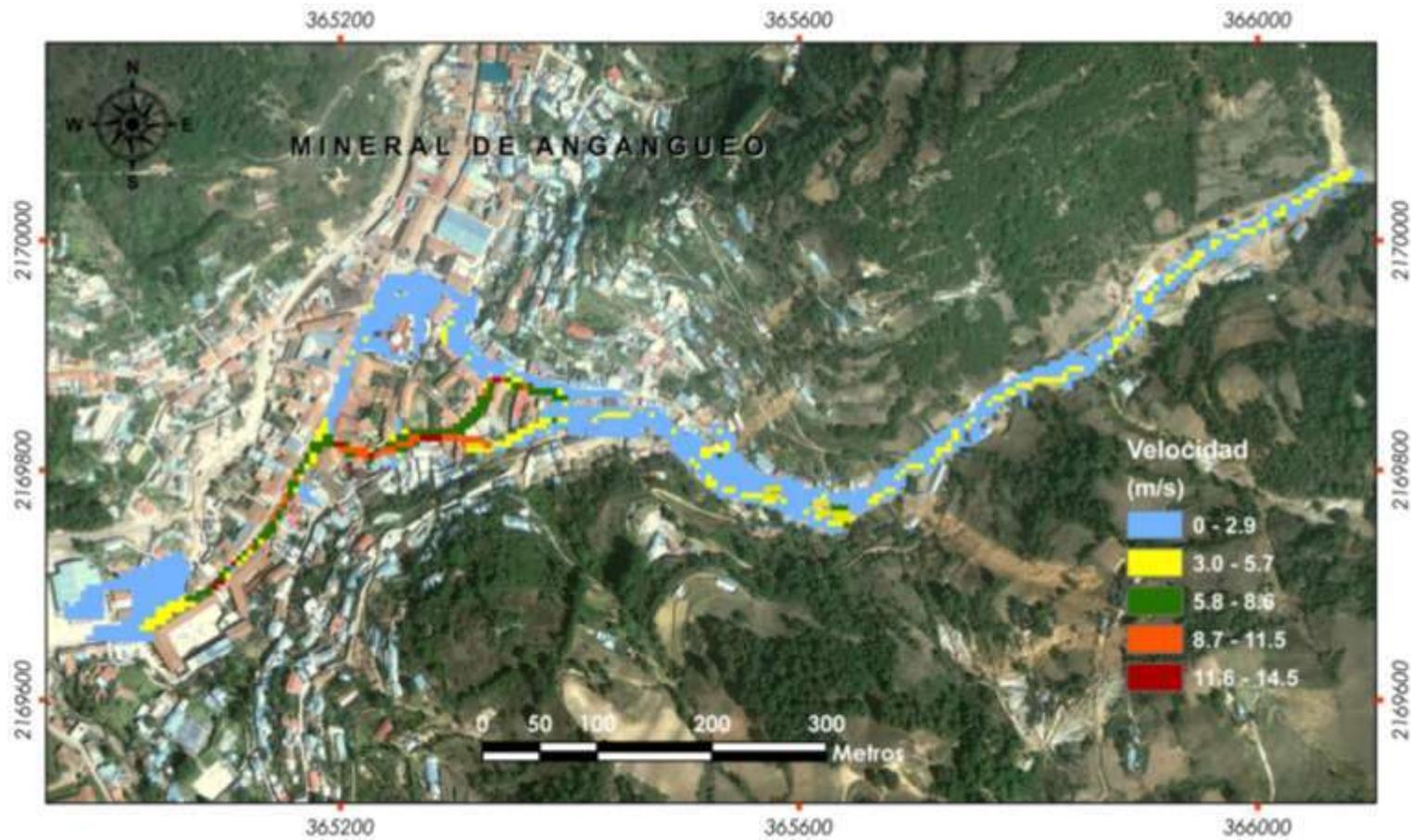


Figura 92. Velocidades máximas del flujo de detritos.

Al igual que en la simulación de flujo líquido, las velocidades se incrementan al final de la calle Libertad, en la Melchor Ocampo y en la Av. Nacional. Este incremento respecto a la simulación anterior es del 58%.

La fuerzas de impacto del flujo de detritos.

Comparando las fuerzas de impacto de la simulación con el hidrograma líquido y la simulación con el hidrograma de la mezcla, se contemplan valores que se incrementan en un 735.7%. El mayor valor de fuerza de impacto se presenta en la ZV 2 (Figura 96), intersección del río con la calle Melchor Ocampo con un valor de $556,356 \text{ N m}^{-2}$ (5.7 kg cm^{-2} o 56.7 columnas de agua de presión).

Los fuerzas de impacto ejercidas por el flujo de detritos fueron tales que tuvieron la capacidad de generar el fracturamiento y colapso de las viviendas que encontró a su paso, es importante mencionar que varias de las casas fracturadas estaban construidas de adobe, madera y lamina. La resistencia a la compresión del adobe es de alrededor de $980,665 \text{ N m}^{-2}$ (10 kg cm^{-2}), y aunque las presiones de impacto arrojadas por FLO-2D no alcanzan esas cifras, el reblandecimiento de los materiales por la gran cantidad de agua precipitada, y la presencia de detritos y bloques de roca en el flujo pudieron incrementar los impactos generándose así los colapsos de las paredes de las casas. Recordando además que FLO-2D no contempla material granular, solo finos.

En resumen, analizando los resultados obtenidos con ambas simulaciones se puede decir que al agregar el hidrograma de sólidos, se incrementan los tirantes, las velocidades y sobre todo las fuerzas de impacto. Los resultados antes mostrados se acercan mucho a lo visto en campo, sobre todo en cuanto a tirantes y fuerzas de impacto se refiere, pero el volumen de sedimentos reportado por FLO-2D, lo consideramos aun muy alto. Posterior a este trabajo se seguirá trabajando para encontrar un modelo mejor calibrado.



Figura 93. Una vivienda ubicada sobre la margen del río San Pedro en la zona de conflicto 1, quedó totalmente sepultada por el depósito del flujo de detritos.



Figura 94. Los bloques de roca, detritos y sedimentos atravesaron las paredes de la iglesia ubicada en la ZC 2 para depositarse en el interior de esta.

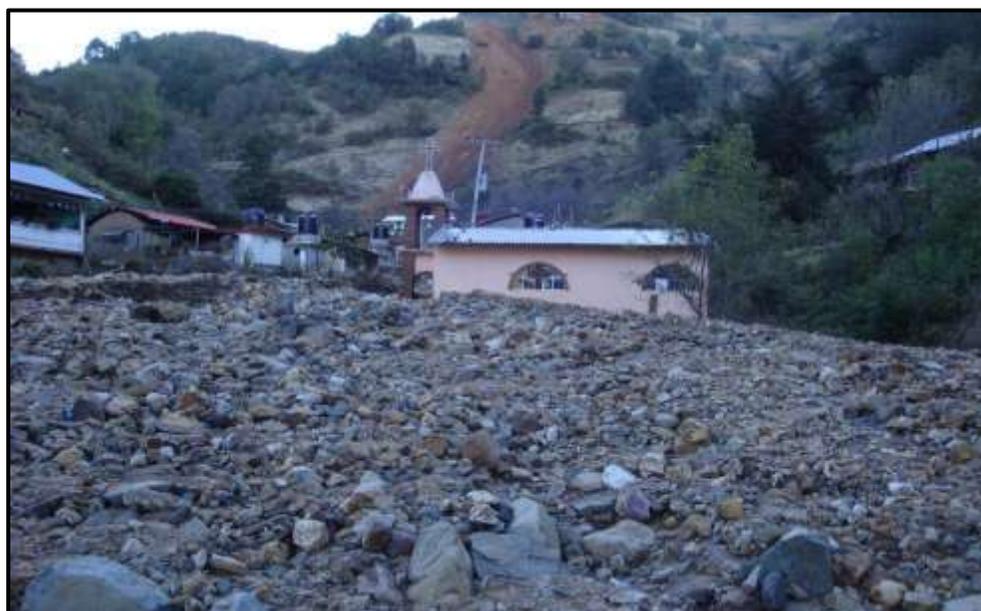


Figura 95. Se muestra el depósito de los detritos y el daño a la iglesia, al fondo se observa el deslizamiento en el Cerro Melón.

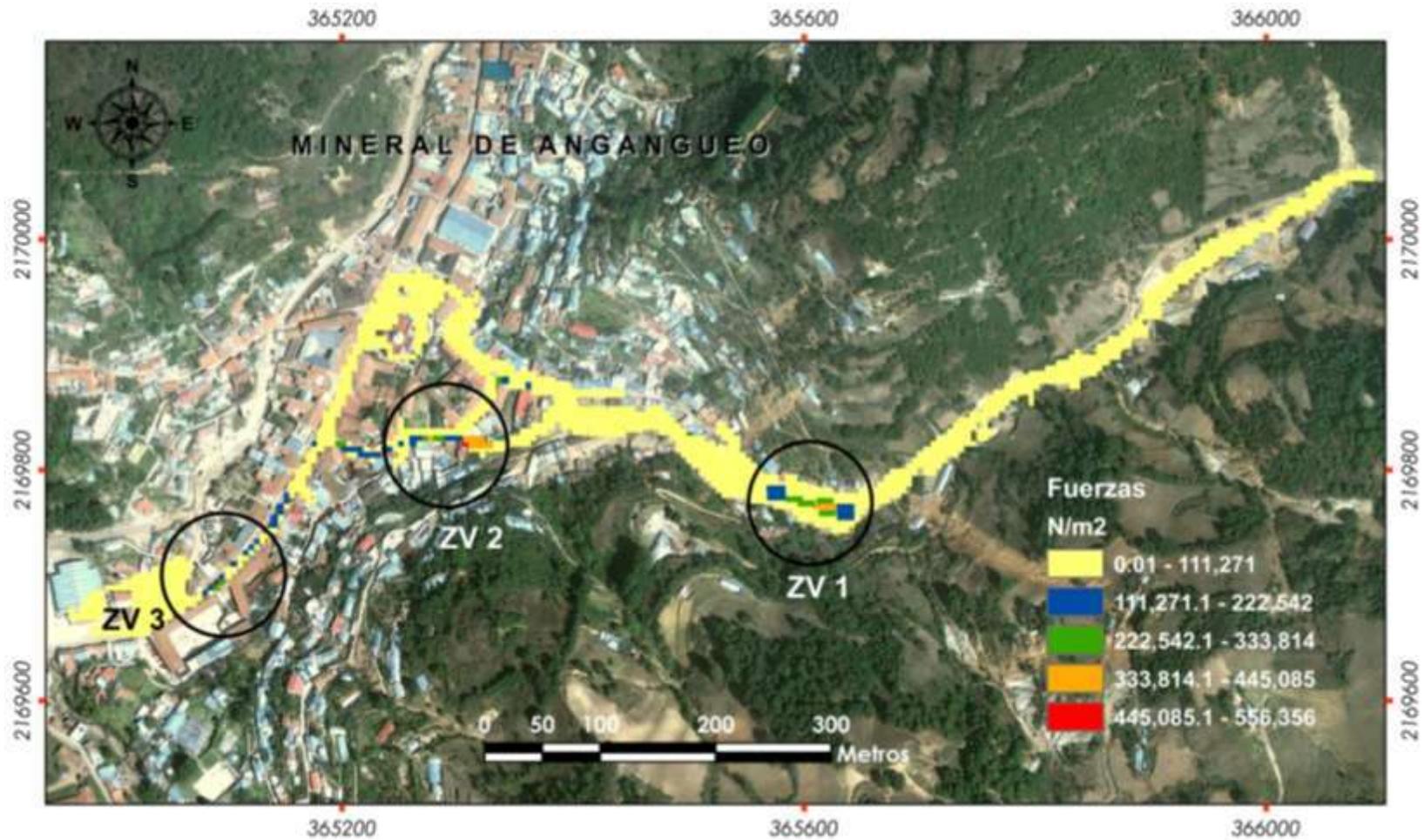


Figura 96. Fuerzas de impacto del flujo de detritos.

Las zonas vulnerables para flujos de detritos coinciden con las de simulación con flujo netamente de agua, pero en este caso existe un incremento de 735.7%, lo que se reflejó durante el desastre en el colapso parcial y total de las viviendas.

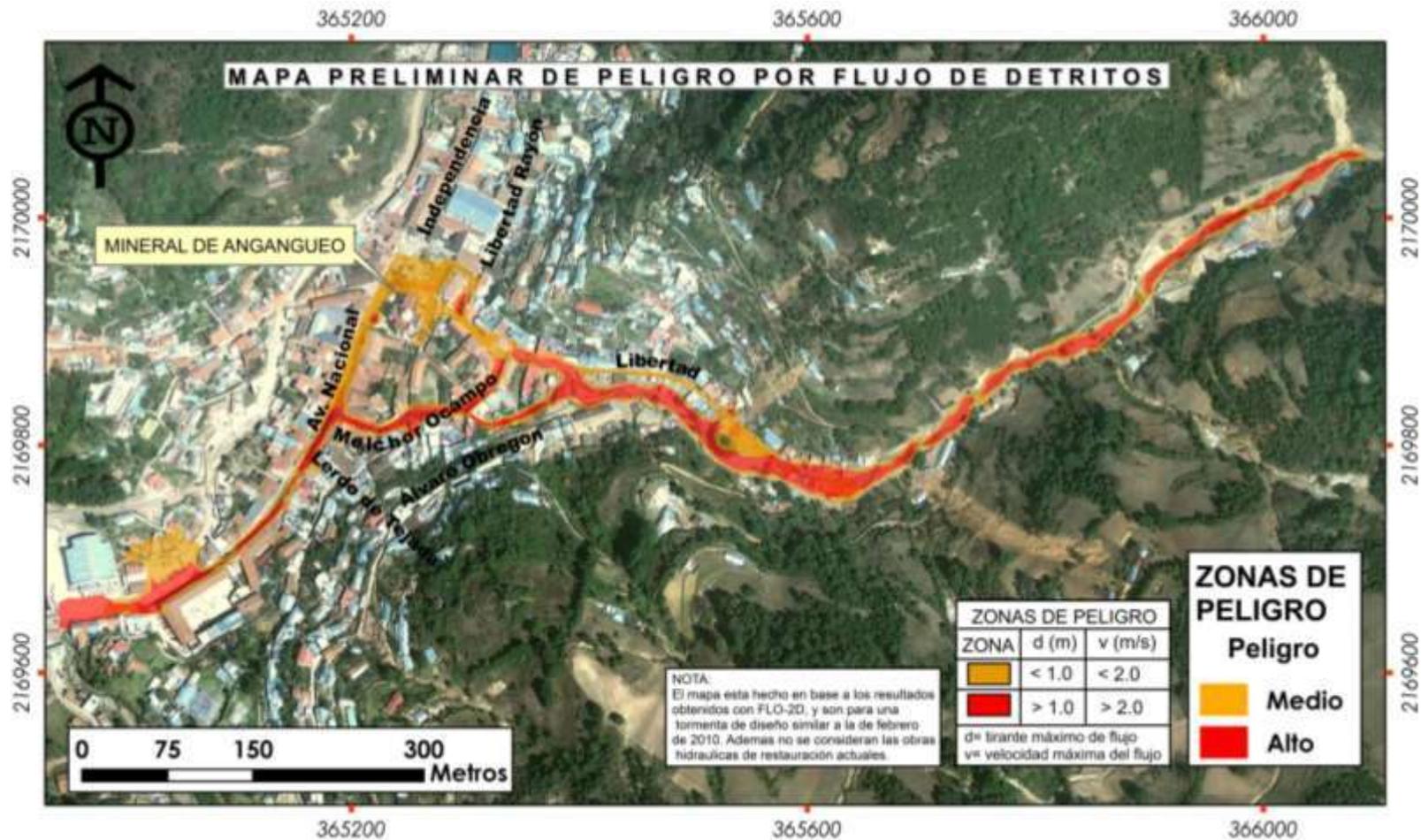


Figura 97. Figura 86. Mapa preliminar de peligro por flujo de detritos, para un evento de lluvias similar al ocurrido en febrero de 2010.

Las zonas de peligro se han definido en base a los estándares de Suiza y Austria (ver OFEE et al. 1997, Fiebigler 1997). Y con base a los resultados de FLO-2D. Predominan zonas con peligrosidad alta en los márgenes del río-canal San Pedro, calle Melchor Ocampo y Av. Nacional-Independencia; y con peligrosidad media-baja la calle Libertad y calles perimetrales del atrio del templo de la Inmaculada Concepción de María.

CAPÍTULO VII.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Conclusiones.

El relieve de las microcuencas de Angangueo y en este caso la del río San Pedro ayudó a promover los desprendimientos y deslizamientos de tierra en zonas de alta montaña. Además de propiciar mayor velocidad a las corrientes. Los troncos producto de la deforestación fueron arrastrados hacia aguas abajo a lo largo de los cauces provocando mayor fuerza de impacto, obstrucción de puentes, túneles y colapso de viviendas. La geología del cuaternario fue material sólido de aporte a los flujos de detritos. Las características hidrológicas de las microcuencas de Angangueo muestran una rápida respuesta ante las precipitaciones, por lo que Mineral de Angangueo es una zona propensa a inundaciones y flujos hiperconcentrados. En general los factores condicionantes naturales y antrópicos jugaron un papel importante en el desastre de 2010.

La obstrucción de obras de encauzamiento e invasión de los cauces generó desbordamiento e inundación, extendiéndose así la afectación. Los varios depósitos de escombros de mina a lo largo de los cauces, debido a su erosión y transporte incrementaron la fuerza, los tirantes y la velocidad del flujo líquido convirtiéndolo en un flujo de detritos.

Las lluvias ocurridas en febrero de 2010 en Angangueo, son un evento totalmente atípico y extraordinario, tanto para las láminas de lluvia registradas como para los días de ocurrencia. No así la ocurrencia de flujos detríticos, ya que se observó evidencia de antiguos aluviones en los cortes dejados por este evento.

El volumen de agua generado por la lluvia fue el factor detonante de los deslizamientos, no así las intensidades. Debido a tal cantidad de lluvia los deslizamientos evolucionaron a flujos de detritos.

De 320 mm de lluvia caídos, el 77.3% de la lluvia (247.63 mm) generó escurrimiento superficial, reportándose caudales pico bajos, pero volúmenes extraordinarios

El volumen de sedimentos calculado de los deslizamientos, no refleja la cantidad real de sólidos que se generó, ya que el arrastre de material del fondo, de las paredes del río San Pedro, y los desprendimientos de residuos mineros generaron al menos el doble del volumen que generaron los deslizamientos.

Los suelos de la microcuenca San Pedro superaron el umbral de saturación a los ± 295 mm, esto, aunado a las fuertes pendientes de las laderas motivaron los deslizamientos.

El flujo generado por la microcuenca San Pedro, es un flujo de detritos de tipo pedregoso con matriz granular friccionante del tipo arenas y aporte de troncos de madera de tamaños considerables.

La simulación en FLO-2D considerando solo el flujo líquido presenta resultados confiables, ya que el hidrograma ingresado se elaboró con información horaria de la tormenta. Y se observa que incluso si la avenida solo hubiese sido de agua, se hubieran tenido tirantes, velocidades y fuerzas de impacto importantes, que hubiesen causado, desbordamiento e inundación, daños medianos y pánico en la población.

El ingreso de un hidrograma de sólidos al hidrograma líquido incrementó el gasto pico en un 55%. Las consecuencias de este aumento se reflejaron en todas las variables dinámicas, los tirantes 50%, 58% las velocidades y 735.7% las fuerzas de impacto, esto significó mayor poder destructivo que pudo observarse con el colapso de viviendas, arrastre de vehículos y calles sepultadas por escombros.

Las zonas de conflicto en el barrio San Pedro, donde se generan profundidades de flujo, velocidades y fuerzas de impacto importantes se ubican donde el cauce se estrecha debido a la invasión de las construcciones o la topografía propia del río. Ya sea considerando flujo líquido o flujo de detritos. En general los resultados para concentraciones de sedimentos crecientes indican la tendencia sostenida de aumento de la profundidad hidráulica y la velocidad máxima así como de la magnitud del volumen de material depositado.

FLO-2D indica que las zonas de mayor peligro son las que durante el evento fueron las mayormente afectadas por el flujo de detritos: los márgenes del río San Pedro, calle Melchor Ocampo, Av. Nacional-Independencia; calle Libertad y calles perimetrales del atrio del templo de la Inmaculada Concepción de María.

En base a la observación, los recorridos en la zona posteriores al desastre y los resultados de FLO-2D se estima que las áreas hidráulicas de los canales de restauración están subestimadas, pues su construcción no ha sido en base a modelaciones de eventos similares al de 2010. Se prevé que Mineral de Angangueo sigue en peligro por la ocurrencia de inundaciones y flujos hiperconcentrados, considerando además que los muros gavión de prevención, construidos

sobre las corrientes están colmatados de sedimentos y ante lluvias extraordinarias es material sólido de aporte a los ríos principales. La historia se vuelve a repetir.

Con base en lo anterior, se concluye finalmente que la hipótesis planteada en este trabajo si se cumple.

Recomendaciones.

Es indispensable la instrumentación de las microcuencas con estaciones pluviométricas e hidrométricas, que permitan el registro de los eventos hidrometeorológicos y un mejor análisis de lluvias y caudales. Esto para el mejor diseño de las obras de control de avenidas.

Es importante que en la proyección o diseño de las obras de restauración y mitigación se considere el aporte importante de sedimentos que se tiene cuando se presentan lluvias atípicas.

Se recomienda seguir con las simulaciones en la cuenca San Pedro hasta calibrar lo mas adecuadamente el evento de 2010, lo cual se logrará variando la concentración de sedimentos y extendiendo el detalle topográfico a más zonas. Una vez lograda la calibración optima, modelar las demás microcuencas hasta obtener un análisis integral y completo del evento.

Se recomienda también elaborar simulaciones con las condiciones actuales de la zona, considerando las obras hidráulicas de restauración posteriores al evento y proyectando tormentas de distintos períodos de retorno, tanto con información pluviométrica, como pluviográfica.

Se recomienda promocionar el uso de esta herramienta para definir mapas de riesgo por flujos hiperconcentrados y/o de detritos. Con el mapa de riesgo será más fácil crear un ambiente de conciencia frente a los fenómenos naturales e informar a la población de manera fácil y técnica sobre las consecuencias de estos desastres.

Se recomienda que las obras de control y prevención por inundaciones y flujos hiperconcentrados se proyecten en base a resultados de modelos numéricos como FLO-2D.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- AGUILAR-GARDUÑO E., Santillán H., Salgado M. y Martínez M. Análisis técnico de la vulnerabilidad hidrológica ante el crecimiento urbano. Caso de Angangueo, Mich. IMTA, 2010.
- ALCÁNTARA-AYALA I., López-García J., Garnica R. J. (2011). On the landslide event in 2010 in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Angangueo, Michoacán, México. Landslides. Publicado en la web el 27 de agosto de 2011.
- ALEOTTI, P., Polloni, G. (2003). Two-dimensional model of the 1998 Sarno debris flows (Italy): preliminary results, Debris Flows Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment. Ed. Rickermmann D. y Chen, C., Millpress, Rotterdam, 553-563.
- ALEOTTI, P., (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. Engineering Geology No. 73, Elsevier, p. 247-265.
- BAGNOLD, R.A. (1954). "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear," Proc. of the Royal Society of London, Series A, V. 249, 235-297.
- BERTOLO P. y Wieczorek, G. (2005). Calibration of numerical models for small debris flows in Yosemite Valley, California, USA, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 5, 993-100.
- BROSCOE A. J., Thomson S. (1969). Observations on an alpine mudflow. Steel Creek, Yukon. Can J Earth Sci 6:219-229.
- CAMPA, M. F., Campos, Mario, Flores, Roberto, y Oviedo, Amador, 1974(1975), La secuencia mesozoica volcanosedimentaria metamorfizada de Ixtapan de la Sal, Mex., Teloloapan, Gro.: Bol. Soc. Geol. Mexicana, v. 35, p. 7-28.
- CAMPA-Uranga, M.F., y Ramírez, J., 1979, La evolución geológica y la metalogénesis del noroccidente de Guerrero: Universidad Autónoma de Guerrero, serie Técnico-Científica 1, 101 pp.

- CASTILLO-NAVARRO. L. F. (2006). Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Perú. Lima, Perú 2006.
- CENAPRED, (2006), Secretaría de Gobernación. Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de peligros y riesgos. Fenómenos hidrometeorológicos. Serie: Atlas nacional de riesgos. 1ª edición, noviembre 2006. Pág. 485.
- CHIEN Xingkui, Ning (1989). "Turbulence Characteristics of Sediment-laden Flow". J. Hydraulic Engineering, ASCE pp.781-800.
- CHIEN N., Wan Z. (1999) "Mechanics of Sediment Transport". ASCE Reston Virginia p.913.
- CHOW, Ven Te. Hidráulica de Canales Abiertos. Editorial Diana. Primera Edición. México, D.F. 1982
- CONAGUA, 2010. Restauración hidrológica ambiental de la microcuenca de aporte a la población de Mineral de Angangueo, Michoacán, (microcuenca El Charco); mediante la implementación de prácticas MAPS. 2010.
- COSTA, J. E. (1984). Physical Geomorphology of Debris Flows, in: Development and Applications of Geomorphology, Ed Costa, J. E. and Fleisher, P. J., Springer-Verlag, New York, 268-317.
- CRUDEN, D., Varnes, D. (1996). Landslide types and processes. In Turner A.K. & Schuster R.L., 1996. Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press, Washington D.C. 675 p.
- CRUZ, P. T., Massad, F. (1997). "Debris-flows: Na Attempt to Define Design Parameters". Int. Symp. Recent Develop. In Soil and Pavem. Mech., COPPE/UFRJ, R. Janeiro, Balkema. pp. 409-414.
- DEMANT, A. (1982), "Interpretación geodinámica del vulcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano", Revista del Instituto de Geología, Vol 5, N° 2, UNAM, México, pp 217-222.

- EPN (Escuela Politécnica Nacional) (2008) Base de datos histórica de desastres de Ecuador 1970-2007. Disponible en: <http://www.desinventar.org>
- EPOCH. (1993). The temporal occurrence and forecasting of landslides in the European community (Ed: Flageollet, J. C.). Contract No. 90 0025, 3 Volumes.
- FIEBIGER, G., 1997, "Hazard Mapping in Austria", Journal of Torrent, Avalanche, Landslides and Rockfall Engineering, 61(134), 121-133.
- GARCÍA, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- GREENWOOD, J., Norris, J., (2006). Assessing the role of vegetation on soil slopes in urban areas. IAEG2006 Paper N° 744, Inglaterra.
- GUERRERO-Suastegui, M., 2004, Depositional and Tectonic History of the Guerrero Terrane, Sierra Madre de Sur; with Emphasis on Sedimentary Successions of the Teloloapan Area, southwestern Mexico: [Tesis de Doctorado], Department of Earth Sciences, Memorial University, Newfoundland, Canadá, 600 pp.
- GUERRERO S.M., Ramírez E. J., Talavera M. O., Richard H. (1992). Análisis de facies, paleocorrientes y proveniencia de los conglomerados de las formaciones Angao y San Lucas en la región de Huetamo, Michoacán. XI Convención Geológica Nacional (Veracruz).
- HENDERSON, F. M., Open Channel Flow, 522 pp., Macmillan, New York, 1966.
- HUBL J. and Steinwendtner, H. (2001). *Two dimensional simulation of two viscous debris flows in Austria*, Phys. Chem, Part C, 26, 9, 639-644.
- HAUSER, A., (1997). Los aluviones del 18 de junio de 1991 en Antofagasta: Un análisis crítico a cinco años del desastre. Boletín N° 49. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- HAUSER, A., (1993). Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín No. 45, p. 7-29.

- HJÜLSTROM, F. The morphological activity of rivers as illustrated by river Fyris. Bulletin of Geological Institute. 1935.
- INTERNATIONAL FEDERATION OF RED CROSS AND RED CRESCENT SOCIETIES (IFRC), 2010. China: Floods and landslides. Information bulletin n° 7 GLIDE: FL-2010-000122-CHN. 10 August 2010.
- IVERSON, R. M., (1997). Hydraulic modeling of unsteady debris-flow surges with solid-fluid interactions, in Proceedings of the First International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Am. Soc. of Civ. Eng., New York, in press.
- JACKSON, L.E. (1987). Debris flow hazard in the Canadian Rocky Mountains. Geological Survey of Canada, Paper 86-11.
- JACOBY, D., 2001. Vulnerabilidad del sector urbano de La Reina frente a desbordes de la Quebrada de Ramón. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- JOHNSON A.M., Rodine J.R. (1984) "Debris Flow" Slope Instability Edited by D. Brunsten and D. B. Prior, Jhon Wiley & Sons Ltd. p 257-361.
- KIM, J., Jeong, S., Park, S., Sharma, J., (2004). Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils. Engineering Geology No. 75, Elsevier, p. 251-262.
- LAMBE, W., Whitman, R., (1972). Mecánica de suelos. Instituto Tecnológico de Massachusetts, Editorial Limusa-Wiley S.A., 583 p.
- LARSEN, M.C., Wieczorek, G.F., Eaton, L.S., Morgan, B.A., Torres-Sierra, H., 2002, Peligros Naturales en los Abanicos Aluviales: El Desastre Ocasionado por Flujos Detríticos e Inundaciones Repentinas en Venezuela: U.S. Geological Survey Fact Sheet, FS 103-01s, 4 p.
- LEGROS, F., (2001). The mobility of long runout landslides. Engineering Geology 63 (3-4), 301- 331.

- LUGO Hubp, J., Ortiz Pérez, M., Palacio Prieto, J.L. Y Bocco Verdinelli, G. (1985). "Las zonas más activas en el Cinturón Volcánico Mexicano (Entre Michoacán y Tlaxcala)", Geofísica Internacional, Volúmen especial sobre el Cinturón Volcánico Mexicano, Parte 1, Ed. S.P. Verma, Vol. 24-1, pp 83-96.
- O'BRIEN, J.S., Julien, P. (1985). "Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows." Proc. ASCE H.D. Delineation of landslides, flash flood and debris flow Hazards.
- O'BRIEN, J. Julien, P. (1988). "Laboratory Analysis of Mudflow properties". Journal of Hydraulic Engineering. ASCE 114, 8, 877-887.
- O'Brien, J. 2000. FLO-2D User's manual, version (2000.01). Nutrioso, Ariz.
- OFEE, OFAT, ODEFP (Switzerland) Ed. 1997. "Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire". Bienne, 1997. Office fédéral de l'économie des eaux (OFEE), Office fédéral de l'aménagement du territoire (OFAT), Office fédéral de l'environnement, des forets et du paysage (OFEFP) (in French).
- OKUDA, S., Suwa, H., Okunishi, K., Yokoyama, K., and Nakana, M., (1980). Observations on the motion of a debris flow and its Geomorphological effects, Zeitschrift Geomorph. N.F., Suppl. Bd., 35, 142-163.
- PASQUARÉ G., Ferrari L., Garduño V.H., Tibaldi A. y Vezzoli L. (1991). Geology of the Central sector of Mexican Volcanic Belt, state of Guanajuato and Michoacán. Geological Society of America Map and Chart series, MCH072, p. 22.
- PIERSON, T. C., (1981). Dominant particle support mechanisms in debris flows at Mt. Thomas, New Zealand, and implications for flow mobility, Sedimentology, 28, 49-60.
- PONCE, V.M. y F.D. Theurer, (1982). "Accuracy Criteria in Diffusion Routing," J. of Hyd. Eng., ASCE, 108(6), 747-757.
- PRIETO, C., (1985). Inestabilidades y erosión de laderas asociadas a riadas. Geología y prevención de riesgos por inundaciones, Instituto Geológico y Minero de España, p. 117-192.

- RAMÍREZ, I. (2001). Cambios en las cubiertas del suelo en la Sierra de Angangueo, Michoacán y Estado de México, 1971-1994-200. *Inv. Geogr.* 45: 39-55.
- RAMÍREZ, I. (2001). Los espacios forestales de la sierra de Angangueo (estados de Michoacán y México), México: una revisión geográfica. Tesis de doctorado.
- SAURET, B., (1987). Coulées de débris canalisées. *Compte rendu bibliographique. In Risques Naturels. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, No.150-151, p.65-77.
- SEPÚLVEDA, S.A., (1998). Metodología para Evaluar el Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos: Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- SELBY, M.J., (1993). *Hillslope materials and processes*. Second Edition, Oxford University Press, 451 p.
- SCHOWALTER, W.R.(1978):” Mechanics of Non-Newtonian Fluids”, Pergamon, citado por Wikipedia–Rheology.
- SHARP, R. P. y Nobles, L. H. (1953). Mudflow of 1941 at Wrightwood, southern California. *Geological Society of America Bulletin*, 64: 547-560.
- SHARPE, C.F.S. (1960). “Landslides and related phenomena.” Columbia University Press, 138 pp. New York.
- SUAREZ, J., (2009). Deslizamientos. Análisis geotécnico Vol. 1. Editorial: Universidad Industrial de Santander, UIS. Edición: febrero de 2009.
- SUÁREZ N. R. y Suárez J. (2006). “Caracterización, análisis y diagnóstico de los flujos de lodos y detritos cuenca quebrada Angulito – Girón (Santander). Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander.
- TAKAHASHI, T. (1981). Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: soft countermeasures for a disaster. *J. Nat. Disaster Sci.* 3(1):p. 57-89.

- TAKAHASHI T. (1991). "Debris flow". International Association for Hydraulic Research. AA. Balkema. Rotterdam 165p.
- U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 1849. Roughness Characteristics of Natural Channels by Harry H. Barnes, Jr.
- VARNES, D.J., (1978). Slope movement types and processes. In Landslides, Analysis and Control, Special Report N°176. Schuster, R.L., Krizek, R.J., edits. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., p.11-33.
- WAN, Z., Wang, Z., (1994). "Hyperconcentrated Flow". IAHR Monograph Series. A.A. Balkema.
- WIECZOREK, G. F., 1996. Landslide Triggering Mechanisms in Landslides – Investigations and Mitigation. Special Report 247. A. K. Turner y R. L. Schuster, Editores. Transportation Research Board. National Research Council, National Academic Press, Washington, DC,USA, p.76-90.
- WILLIAMS, R. (2006). "Modeling Lahars using titan2D for the southern drainage of volcan Cotopaxi: impact on the city of Latacunga". Thesis graduate school of the State University of New York at Buffalo. Pp. 1 – 75.
- YELLOW River soil water Conservation planning Office, River water conservation committee. (1977). "Analysis of sediment Entering the Yellow River Basin", China p.23.
- YOSHIDA, Y., Kuwano, J., Kuwano, R., (1991). Rain-induced slope failures caused by reduction in soil strength. Soil and Foundations, vol. 31, No. 4, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, p. 187-193.

ANEXOS.

ANEXO I. TABLAS Y FIGURAS.

Tabla 24. Selección del número de escurrimiento (N).

| Uso de la tierra y cobertura | Tratamiento del suelo | Pendiente del terreno en % | Tipo de suelo | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------|----|----|----|
| | | | A | B | C | D |
| Sin cultivo | Surcos rectos | - | 77 | 86 | 91 | 94 |
| Cultivos en surco | Surcos rectos | >1 | 72 | 81 | 88 | 91 |
| | Surcos rectos | <1 | 67 | 78 | 85 | 89 |
| | Contorneo | >1 | 70 | 79 | 84 | 88 |
| | Contorneo | <1 | 65 | 75 | 82 | 86 |
| | Terrazas | >1 | 66 | 74 | 80 | 82 |
| | Terrazas | <1 | 62 | 71 | 78 | 81 |
| Cereales | Surcos rectos | >1 | 65 | 76 | 84 | 88 |
| | Surcos rectos | <1 | 63 | 75 | 83 | 87 |
| | Contorneo | >1 | 63 | 74 | 82 | 85 |
| | Contorneo | <1 | 61 | 73 | 81 | 84 |
| | Terrazas | >1 | 61 | 72 | 79 | 82 |
| | Terrazas | >1 | 59 | 70 | 78 | 81 |
| Leguminosas o praderas con rotación | Surcos rectos | >1 | 66 | 77 | 85 | 89 |
| | Surcos rectos | <1 | 58 | 72 | 81 | 85 |
| | Contorneo | >1 | 64 | 7 | 83 | 85 |
| | Contorneo | <1 | 55 | 69 | 78 | 83 |
| | Terrazas | >1 | 63 | 73 | 80 | 83 |
| | Terrazas | <1 | 51 | 67 | 76 | 80 |
| Pastizales | | >1 | 68 | 79 | 86 | 89 |
| | | <1 | 39 | 61 | 74 | 80 |
| | Contorneo | >1 | 47 | 67 | 81 | 88 |
| | Contorneo | <1 | 6 | 35 | 70 | 79 |
| Pradera permanente | | <1 | 30 | 58 | 71 | 78 |
| Bosques naturales | Muy ralo | | 56 | 75 | 86 | 91 |
| | Ralo | | 46 | 68 | 78 | 84 |
| | Normal | | 36 | 60 | 70 | 77 |
| | Espeso | | 26 | 52 | 62 | 69 |
| | Muy espeso | | 15 | 44 | 54 | 61 |
| | Camino | De terracería | | 72 | 82 | 87 |
| Con superficie dura | | | 74 | 84 | 90 | 92 |

Tabla 25. Selección del tipo de suelo, para determinar N.

| Tipo de Suelo | Textura del suelo |
|---------------|--|
| A | Arenas con poco limo y arcilla; Suelos muy permeables. |
| B | Arenas finas y limos. |
| C | Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla. |
| D | Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos con subhorizontes de roca sana; suelos muy impermeables. |

Para tomar en cuenta las condiciones iniciales de humedad del suelo, se hace una corrección al número de escurrimiento obtenido de la tabla 19, según la altura de precipitación acumulada cinco días antes de la fecha de interés (hp_5), conforme al siguiente criterio:

- a) Si $hp_5 < 2.5$ cm se hace la corrección A.
- b) Si $2.5 < hp_5 < 5$ cm no se hace corrección.
- c) Si $hp_5 > 5$ cm se hace la corrección B.

Tabla 26. Corrección al valor de N, según precipitación antecedente.

| N | N con corrección A | N con corrección B |
|-----|--------------------|--------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 10 | 4 | 22 |
| 20 | 9 | 37 |
| 30 | 15 | 50 |
| 40 | 22 | 60 |
| 50 | 31 | 70 |
| 60 | 40 | 78 |
| 70 | 51 | 85 |
| 80 | 63 | 91 |
| 90 | 78 | 96 |
| 100 | 100 | 100 |

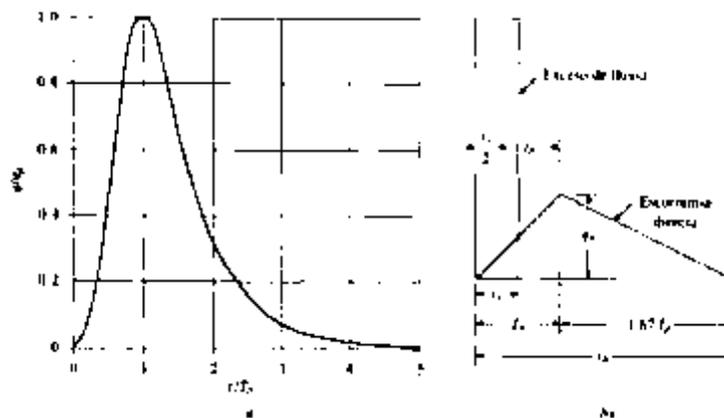


Figura 98. Hidrogramas unitarios sintéticos del SCS, a) hidrograma adimensional y b) hidrograma triangular (Fuente: U.S. SCS 1972).

Tabla 27. Valores del hidrograma unitario adimensional, del SCS.

| T/tp | q/qu |
|------|-------|
| 0.1 | 0.015 |
| 0.2 | 0.075 |
| 0.3 | 0.16 |
| 0.4 | 0.28 |
| 0.5 | 0.43 |
| 0.6 | 0.6 |
| 0.8 | 0.89 |
| 1 | 1 |
| 1.2 | 0.92 |
| 1.4 | 0.75 |
| 1.6 | 0.56 |
| 1.8 | 0.42 |
| 2 | 0.32 |
| 2.2 | 0.24 |
| 2.4 | 0.18 |
| 2.6 | 0.13 |
| 2.8 | 0.098 |
| 3 | 0.075 |
| 3.5 | 0.036 |
| 4 | 0.018 |
| 4.5 | 0.008 |
| 5 | 0.004 |

Un factor importante a tener en cuenta en estas curvas son las condiciones antecedentes de humedad (*Antecedent Moisture Conditions*), las cuales se agrupan en tres condiciones básicas (Tabla 23):

Tabla 28. Condiciones antecedentes de humedad básicas empleadas en el método SCS.

| | |
|-----------|----------------------|
| AMC (I) | Condiciones secas |
| AMC (II) | Condiciones normales |
| AMC (III) | Condiciones húmedas |

Tabla 29. Rangos para la clasificación de las condiciones antecedentes de humedad.

| Grupo AMC | Lluvia antecedente total de 5 días (pulg) | |
|-----------|---|-----------------|
| | Estación inactiva | Estación activa |
| I | Menor que 0.5 | Menor que 1.4 |
| II | 0.5 a 1.1 | 1.4 a 2.1 |
| III | Sobre 1.1 | Sobre 2.1 |

Tabla 30. Coeficientes de rugosidad de Manning para diferentes superficies. Chow V. T., 1982.

| Tipo de cauce y descripción | Valor de <i>n</i> | | |
|--|-------------------|--------|--------|
| | Mínimo | Normal | Máximo |
| g) Mampostería en ladrillo | | | |
| Barnizada o lacada | 0.011 | 0.013 | 0.015 |
| Revestida con mortero de cemento | 0.012 | 0.015 | 0.017 |
| h) Alcantarillados sanitarios recubiertos con limos y babas de aguas residuales, con curvas y conexiones. | 0.012 | 0.013 | 0.016 |
| i) Alcantarillado con batea pavimentada, fondo liso. | 0.016 | 0.019 | 0.020 |
| j) Mampostería de piedra, cementada. | 0.018 | 0.025 | 0.030 |
| B) Canales revestidos o desarmables | | | |
| B1) Metal | | | |
| a) Superficie lisa de acero | | | |
| Sin pintar | 0.011 | 0.012 | 0.014 |
| Pintada | 0.012 | 0.013 | 0.017 |
| b) Corrugado | 0.021 | 0.025 | 0.030 |
| B2) No metal | | | |
| a) Cemento | | | |
| Superficie pulida | 0.010 | 0.011 | 0.013 |
| Mortero | 0.011 | 0.013 | 0.015 |
| b) Madera | | | |
| Cepillada, sin tratar. | 0.010 | 0.012 | 0.014 |
| Cepillada, creosotada | 0.011 | 0.012 | 0.015 |
| Sin cepillar | 0.011 | 0.013 | 0.015 |
| Láminas con listones. | 0.012 | 0.015 | 0.018 |
| Forrada con papel impermeabilizante | 0.010 | 0.014 | 0.017 |
| c) Concreto | | | |
| Terminado con llana metálica (palustre) | 0.011 | 0.013 | 0.015 |
| Terminado con llana de madera | 0.013 | 0.015 | 0.016 |
| Pulido, con gravas en el fondo | 0.015 | 0.017 | 0.020 |
| Sin pulir. | 0.014 | 0.017 | 0.020 |
| Lanzado, sección buena | 0.016 | 0.019 | 0.023 |
| Lanzado, sección ondulada | 0.018 | 0.022 | 0.025 |
| Sobre roca bien excavada | 0.017 | 0.020 | |
| Sobre roca irregularmente excavada | 0.022 | 0.027 | |

ANEXO II. FOTOGRAFÍAS DEL DESASTRE. ANGANGUEO, 2010.



Figura 99. Automóviles arrastrados por los torrentes de agua y lodo en febrero de 2010.



Figura 100. Destrucción total de una vivienda de dos niveles sobre la margen derecha del río San Pedro.



Figuras 101. Panorámica desde aguas arriba de los daños en la ZC 1.



Figura 102. Pequeño deslizamiento rotacional en el ápice de la MCSP detonado por las atípicas lluvias de febrero de 2010.



Figura 103. Vista frontal del deslizamiento del Cerro Guadalupe, el cual cobró la vida de una familia.



Figura 104. Labores de limpieza, evacuación y rescate por parte del Ejército Mexicano.



Figura 105. Escombros y troncos de madera sobre la avenida Nacional, Mineral de Angangueo.



Figura 106. Afectación sobre la calle Libertad en el barrio de San Pedro, Mineral de Angangueo.



Figura 107. Destrucción total de una capilla ubicada en la margen derecha del río Catingón. Fue afectada por los flujos de detritos provenientes del cauce y el deslizamiento del Cerro Guadalupe.



Figura 108. Acumulación de madera, basura y sedimentos en una zona de túnel del río Puercos, esto generó represas que motivaron el desbordamiento del cauce.