UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
CENTRO DE ESTUDIOS FORESTALES Y AMBIENTALES DE POSTGRADO
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN MANEJO DE CUENCAS

Flujos de detritos y otros procesos hidrogeomorfológicos en dos cuencas de los Andes centrales venezolanos:

Una contribución a la zonificación de amenazas en abanicos aluviales

www.bdigital.ula.ve

Geóg. Vanessa Cuervo Zambrano

2011

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
CENTRO DE ESTUDIOS FORESTALES Y AMBIENTALES DE POSTGRADO
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN MANEJO DE CUENCAS

Flujos de detritos y otros procesos hidrogeomorfológicos en dos cuencas de los Andes centrales venezolanos:

Una contribución a la zonificación de amenazas en abanicos aluviales

www.bdigital.ula.ve

Geóg. Vanessa Cuervo Zambrano

Trabajo de Grado presentado ante el Centro de Estudios Forestales y Ambientales como requisito para optar al título de Msc. en Manejo de Cuencas

Tutor: Alex Barrios

MÉRIDA-VENEZUELA
2011

DIGITALIZADO
http://tesis.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Tabla de Contenido

	Pág.
Agradecimientos	x
Resumen	xi
Introducción	xii

Capítulo 1: El problema y su contexto

1.1. La situación de estudio	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. General	3
1.2.2. Específicos	3
1.3. Justificación	3
1.4. Eventos históricos relacionados con la ocurrencia de flujos de detritos en Venezuela	6
1.5. Marco de acción institucional relacionado con la reducción del riesgo de desastre	9
1.6. Desastres: ¿a qué se refieren?	11
1.7. Amenaza: definición, naturaleza y clasificación	13

Capítulo 2: Amenaza por movimientos de masa

2.1. Enfoques metodológicos de evaluación de amenaza por movimientos de masa	16
2.2. Algunas experiencias en la evaluación de amenaza por movimientos de masa: con énfasis en el estudio de flujos de detritos	19
2.3. Movimientos de masa	29
2.3.1. Aspectos de las clasificaciones de movimientos de masa	29
2.4. Flujo de detritos: causas y dinámica	30
2.5. Diferenciación reológica, geomorfológica y sedimentológica de flujos en canales	33

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

2.6. Características de la amenaza por movimientos de masa 34
2.7. Modelo de simulación FLO-2D 36

Capítulo 3. Materiales y métodos de trabajo

3.1. Área de estudio 39
3.2. Estructuración de la información espacial 42
3.3. Análisis geológico – geomorfológico 45
3.3.1. Inventario de movimientos de masa 45
3.3.2. Modelo de susceptibilidad 46
3.4. Análisis hidrológico 48
3.4.1. Morfometría de cuencas 48
3.4.2. Precipitación 50
3.4.3. Estimación de caudales máximos 55
3.5. Estudio del comportamiento de los procesos geomorfológicos en la superficie de los abanicos aluviales 64
3.5.1. Zonificación geomorfológica 65
3.5.2. Aplicación del modelo FLO- 2D 65
3.6. Zonificación de amenaza 68

www.bdigital.ula.ve

Capítulo 4. Resultados y análisis

4.1. Aspectos geológicos y geomorfológicos que controlan la ocurrencia de flujos de detritos y otros procesos en las vertientes 71
4.2. Aspectos hidrológicos de las cuencas 89
4.2.1. Análisis morfométrico 89
4.2.2. Precipitación 93
4.2.3. Caudales máximos simulados 97
4.3. Procesos geomorfológicos en los abanicos aluviales 100
4.3.1. Zonificación geomorfológica 100
4.3.2. Simulaciones con FLO-2D 108
4.4. Zonificación de amenaza preliminar 114

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Capítulo 5.
Discusión, conclusiones y recomendaciones

5.1. Dinámica de flujo de detritos y otros procesos hidrogeomorfológicos en relación con los niveles de amenaza en los abanicos aluviales 117
5.2. Consideraciones acerca de los métodos y técnicas utilizados: ventajas y limitaciones 122
5.2.1. Modelo de susceptibilidad a movimientos de masa 123
5.2.2. Modelo FLO-2D 124
5.2.3. Sistemas de Información geográfica 126
5.3. Recomendaciones 127
5.3.1. Investigaciones futuras 127
5.3.2. Medidas estructurales y no estructurales en las cuencas 128
Referencias citadas 131
Apéndice 143

www.bdigital.ula.ve

Lista de Cuadros

Cuadro 1. Movimientos de masa más importantes ocurridos en distintos países a nivel mundial, en el período comprendido entre 1992 y mayo de 2003 9
Cuadro 2. Clasificación de las amenazas de acuerdo con su origen 15
Cuadro 3. Técnicas de análisis de amenaza en relación con la escala del mapa 18
Cuadro 4. Características reológicas, geomorfológicas y sedimento-lógicas de flujos en canales 34
Cuadro 5. Principales características de la amenaza por movimientos de masa 35
Cuadro 6. Inventario de la información espacial utilizada a escala 1:25.000 para el área de estudio 42

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Cuadro 7.	Parámetros morfométricos estimados para las microcuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa	49
Cuadro 8.	Estaciones pluviométricas más cercanas a las microcuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa	50
Cuadro 9.	Estimación del hietograma de diseño por el método de los bloques alternos estación Mesa de Ejido (3042)	53
Cuadro 10.	Estimación del hietograma de diseño por el método de los bloques alternos estación La Punta (serial 8049)	54
Cuadro 11.	Números de curva (CN) estimados para el área de estudio, corregidos por pendiente para condición de humedad III	60
Cuadro 12.	Parámetros de entrada para la simulación de caudales máximos (onda cinemática) con HEC-HMS en la cuenca de la quebrada Montalbán	63
Cuadro 13.	Parámetros de entrada para la simulación de caudales máximos (onda cinemática) con HEC-HMS en la cuenca de la quebrada La Portuguesa	64
Cuadro 14.	Parámetros de entrada para la simulación de caudales sólidos con el modelo FLO-2D	68
Cuadro 15.	Algunas características geomecánicas de los macizos rocosos en las cuencas	77
Cuadro 16.	Densidad de movimientos de masa por factor considerado	83
Cuadro 17.	Potencial de volumen de sedimentos por la ocurrencia de deslizamientos superficiales	88
Cuadro 18.	Principales características hidrológicas de las microcuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa	91
Cuadro 19.	Intensidades máximas de precipitación para diferentes frecuencias y duraciones menores e iguales a veinticuatro horas estación La Punta (serial 8049)	96
Cuadro 20.	Intensidades máximas de precipitación para diferentes frecuencias y duraciones menores e iguales a veinticuatro horas estación Mesa de Ejido (serial 3049)	96
Cuadro 21.	Umbrales de intensidades de precipitación que detonan movimientos de masa para distintas duraciones	96
Cuadro 22.	Caudales máximos simulados en diferentes puntos de las cuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa	98
Cuadro 23.	Zonificación de la superficie de los abanicos aluviales en categorías de procesos hidrogeomorfológicos	107

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Cuadro 24. Valores estimados de velocidades y profundidades máximas para diferentes para cada período de retorno considerado 109
Cuadro 25. Valores estimados de área inundada y volumen total de flujos hiperconcentrados y de detritos para cada período de retorno considerado 114
Cuadro 26. Matriz de zonificación amenaza por crecidas máximas y otros procesos hidrogeomorfológicos en la superficie de los abanicos 117

Lista de Figuras

Figura 1. Clasificación de movimientos de masa en laderas en función del tipo de material y la fracción solida 33
Figura 2. Localización de las cuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa 40
Figura 3. Inventario de movimientos de masa 46
Figura 4. Flujograma para la evaluación de susceptibilidad a movimientos de masa aplicando el modelo estadístico bivariado (weight of evidence) 47
Figura 5. Área de influencia Polígonos de Thiessen 51
Figura 6. Esquema general de la superficie de los abanicos aluviales y representación de los puntos de simulación 56
Figura 7. Preprocesamiento del terreno 58
Figura 8. Modelo de cuenca generado con HEC-HMS 59
Figura 9. Datos de entrada para la aplicación del modelo FLO-2D 67
Figura 10. Flujograma para la zonificación de amenaza en los abanicos aluviales 69
Figura 11. Afloramiento de la Formación Aguardiente (Kag) 73
Figura 12. Afloramientos del Paleozoico 74
Figura 13. Afloramiento de la Formación La Quinta (Jq) 75
Figura 14. Afloramientos cretácicos 75
Figura 15. Inventario de movimientos de masa en las cuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa 79
Figura 16. Factores geoambientales considerados y ocurrencias de movimientos de masa en las categorías de dichos factores 83
Figura 17. Susceptibilidad a movimientos de masa superficiales y áreas ocupadas por niveles en las cuencas de las quebradas

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

	Montalbán y La Portuguesa	86
Figura 18.	Curva para la validación del modelo de susceptibilidad por la ocurrencia de movimientos de masa superficiales	88
Figura 19.	Perfiles longitudinales del cauce principal	92
Figura 20.	Precipitación media mensual estación Mesa de Ejido (1950-1998)	93
Figura 21.	Estación La Punta (serial 8049). Curvas PDF e IDF menores o iguales a 3 horas	94
Figura 22.	Estación Mesa de Ejido (serial 3049). Curvas PDF e IDF menores o iguales a 3 horas	94
Figura 23.	Umbrales de precipitación que detonan movimientos de masa	96
Figura 24.	Hidrogramas de caudales máximos simulados (método de onda cinemática) con el software HEC-HMS en las quebradas La Portuguesa y Aguas Calientes	98
Figura 25.	Hidrogramas de caudales máximos simulados (método de onda cinemática) con el software HEC-HMS en la quebrada Montalbán	99
Figura 26.	Condiciones de estabilidad en cauces con potencial a generar flujos de detritos antes y después de la ocurrencia de un evento	103
Figura 27.	Materiales gruesos, del tamaño de cantos, bloques y peñas, de gneises y granitos, subangulares a subredondeados, en una matriz de grava areno-limosa en la sección apical o proximal del abanico Don Luis	104
Figura 28.	Zonificación de áreas de procesos hidrogeomorfológicos en la superficie de los abanicos aluviales	107
Figura 29.	Velocidades de flujo en m x s^{-1} (caudal líquido) para los períodos de retorno (Tr) simulados.	109
Figura 30.	Velocidades de flujo en m x s^{-1} (caudal líquido) para los períodos de retorno (Tr) simulados.	110
Figura 31.	Profundidades de flujo no-newtonianos en metros (caudales con concentración de sedimentos) para los períodos de retorno (Tr) simulados	111
Figura 32.	Velocidades de flujo no-newtonianos en m x s^{-1} (caudales con concentración de sedimentos) para los períodos de retorno (Tr) simulados	112
Figura 33.	Niveles de amenaza en los abanicos aluviales de las cuencas estudiadas	115

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Apéndice

Apéndice 1.	Número de curvas para la escorrentía	143
Apéndice 2.	Número de curvas para la escorrentía para otras tierras agrícolas	144
Apéndice 3.	Corrección del CN por pendiente del terreno	145
Apéndice 4.	Triángulo de clases texturales de suelo	146
Apéndice 5.	Coeficiente de rugosidad n de Manning para canales y planicies aluviales	147
Apéndice 6.	Características de las unidades litológicas de los afloramientos en las cuencas Montalbán y la Portuguesa	148

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Agradecimientos

El quehacer diario del trabajo de investigación es una tarea ardua que siempre involucra la participación de numerosas personas en la elaboración de diversas tareas, desde las más complicadas hasta las más sencillas. Es por esta razón que la autora desea expresar sus más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron para el logro exitoso de este trabajo y en especial:

A la Universidad de Los Andes por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios en el Programa de Maestría en Manejo de Cuencas, así como permitir el uso de las licencias académicas.

A mi tutor y amigo Prof. *Alex Barrios* por su constancia durante el desarrollo del proyecto así como por sus enriquecedores comentarios en la lectura final del manuscrito.

www.bdigital.ula.ve

Al Prof. *Francisco Rivas* (Coordinador del Programa de Maestría) por su enorme colaboración en el proceso de culminación del trabajo.

A RedULA y a la Universidad de Calgary por su apoyo técnico en la realización de la videoconferencia.

Y finalmente a esa hermosa familia que siempre me acompaña:

- A ti *Albert* por ser mi compañero de vida y apoyarme incondicionalmente en todos los proyectos que decido emprender.
- A mis *padres* por ser bastión en mi proceso de formación para la vida.
- A mis hermanos: *Daniel* quien trabajó incansablemente en la digitalización de la cartografía además de hacerme reír incluso en los momentos de mayor estrés y *Eduardo* quien con mucha dedicación colaboró en la impresión de los documentos y actividades finales.

A todos mil gracias!

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Flujos de detritos y otros procesos hidrogeomorfológicos en dos cuencas de los Andes centrales venezolanos:

Una contribución a la zonificación de amenazas en abanicos aluviales

Vanessa Cuervo Zambrano[1]

Resumen

Los flujos de detritos representan una de las amenazas más importantes para las poblaciones que se localizan en los abanicos aluviales en las áreas montañosas. Su ocurrencia ha resultado en numerosas pérdidas de vidas y daños a bienes. En este estudio, se zonifica de manera preliminar, la amenaza por flujo de detritos y otros procesos hidrogeomorfológicos en los abanicos aluviales coalescentes de las cuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa. Áreas en las cuales, la evidencia geomorfológica sugiere, que dichos eventos han ocurrido con cierta frecuencia en el pasado. En la actualidad, la superficie de estos abanicos representa el sitio de localización de la ciudad de Ejido y otros centros poblados que forman parte del Área Metropolitana de Mérida. En este sentido, la ocurrencia de un evento de intensidad y magnitud considerable implicaría la afectación de dichas poblaciones. El método aplicado, consistió en un enfoque combinado de modelos de tipo heurístico, estadísticos y determinístico, desarrollado en cuatro fases: i) estructuración de la información espacial; ii) análisis geológico-geomorfológico e hidrológico, iii) estudio del comportamiento de los procesos geomorfológicos en la superficie de los abanicos aluviales y; iv) zonificación de amenaza. Los resultados obtenidos consisten en una zonificación de los abanicos en tres niveles de amenaza (*alta, moderada y baja*) con base en: la frecuencia, la intensidad, además de las características geomorfológicas de los procesos que pueden afectar la superficie de dichas áreas. Se concluye que el enfoque metodológico utilizado, ofrece buenos resultados para la zonificación preliminar de amenaza en abanicos aluviales y por lo tanto, puede ser replicado en otras cuencas altas de montaña. En este sentido, se considera una contribución a la zonificación de amenazas por procesos hidrogeomorfológicos en los abanicos aluviales de los Andes centrales venezolanos.

www.bdigital.ula.ve

Palabras clave: *amenaza, movimientos de masa, flujo de detritos, procesos hidrogeomorfológicos, abanicos aluviales, Andes centrales venezolanos.*

[1] Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado (CEFAP), Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela. Correo electrónico de contacto: vanessac@ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Introducción

Los desastres naturales son fenómenos extremos, de diferentes orígenes, que irrumpen en la dinámica físiconatural y socioeconómica de las cuencas hidrográficas e influyen de manera determinante en el desarrollo humano, así como en la calidad de vida de sus habitantes. De acuerdo con la magnitud del desastre, los daños y pérdidas que se registren (de vidas humanas, de infraestructura, de actividades económicas y empleo), la resiliencia de los lugares, así como la respuesta de los gobiernos y las instituciones; se acentúan los problemas inherentes a las cuencas hidrográficas tales como la pobreza, las enfermedades y la degradación ambiental.

www.bdigital.ula.ve

La planificación para la gestión de cuencas hidrográficas es, hoy día, un proceso político, económico, social, así como cultural, que busca justicia social y democracia en la gestión de los recursos naturales (FAO, 2007). El objetivo es, ciertamente, diseñar y orientar acciones de planificación para la conservación, manejo y uso sostenible - equitativo de los recursos naturales de las cuencas hidrográficas. Por esta razón, la gestión de cuencas hidrográficas debe considerar, dentro de sus enfoques actuales, la mitigación de amenazas y la reducción del riesgo de desastres, principalmente, aquellos asociados a la ocurrencia de eventos de tipo hidrometeorológicos que actúan como mecanismos detonantes de otros procesos tales como: inundaciones, crecidas, movimientos de masa y sequías, entre otros.

En este sentido, las zonificaciones de amenaza y el establecimiento de escenarios de riesgo, se constituyen como instrumentos fundamentales para la planificación y ordenación del territorio y, subsecuentemente para la gestión de cuencas hidrográficas. Debido, principalmente, a que permiten orientar acciones para la

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

reducción del riesgo de desastres por la ocurrencia de eventos naturales evitando así la aceleración de los procesos de degradación ambiental.

Los movimientos de masa, específicamente los de tipo flujo de detritos, forman parte de los eventos naturales que ocurren frecuentemente en las cuencas, y que mayor cantidad de vidas han cobrado en los últimos años. Su ocurrencia, ha resultado en desastre en diversas partes del mundo incluyendo Venezuela. Por lo tanto, la experiencia obliga a generar conocimiento acerca de la dinámica de estos procesos, su probabilidad de manifestarse, así como el grado de afectación una vez que ocurren.

Este documento, presenta los resultados de una investigación orientada a la evaluación preliminar de la amenaza por flujos de detritos en los abanicos aluviales de las microcuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa. Se realiza con la intención de contribuir al desarrollo e implementación de metodologías de análisis de amenazas en abanicos aluviales, que sirvan posteriormente, de base a los procesos de planificación territorial, bajo el enfoque de gestión de riesgo.

Se fundamenta en una metodología de carácter integral, basada en la aplicación de cuatro fases para la determinación de niveles de amenaza: i) estructuración de la información espacial; ii) análisis geológico-geomorfológico e hidrológico; iii) estudio del comportamiento de los procesos geomorfológicos en la superficie del abanico y finalmente; iv) zonificación de amenaza. El desarrollo de estas etapas, permitió obtener como producto final niveles preliminares de amenaza ante la ocurrencia de flujo de detritos (en términos de la intensidad, la magnitud y la frecuencia) de los abanicos de las microcuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa.

www.bdigital.ula.ve
C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Capítulo 1: El problema y su contexto

1.1. La situación de estudio

Los flujos de detritos, forman parte de los procesos geomorfológicos más frecuentes y destructivos que ocurren en las cuencas altas tropicales. Según su intensidad-magnitud, el daño que generan por lo general es devastador. Su origen, está asociado con la dinámica de los factores geológicos, geomorfológicos e hidrológicos en las cuencas y su ocurrencia impacta, en mayor medida, a los abanicos aluviales y de detritos adyacentes a las mismas.

www.bdigital.ula.ve

Los abanicos aluviales son ambientes sedimentarios en forma cónica, que se forman en lugares de pendiente suave, como consecuencia de la depositación de sedimentos provenientes de zonas erosionales, que son transportados por un flujo de agua. En los Andes centrales venezolanos conforman, junto con las terrazas aluviales, los espacios de ocupación territorial por excelencia. Fundamentalmente, porque sus condiciones topográficas favorecen el desarrollo de actividades humanas, entre las cuales actualmente predomina el urbanismo.

El acelerado proceso de ocupación que ha caracterizado a estas áreas, en conjunto con el limitado espacio, además de la falta de planificación territorial, se ha traducido en la localización de actividades en zonas que presentan condiciones naturales adversas, al ser susceptibles de ser afectadas por eventos que pueden culminar en desastre, así como también afectar en gran medida el estado de los

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

recursos naturales de las cuencas.

Los abanicos aluviales coalescentes que le sirven de sitio a la ciudad de Ejido, son depósitos formados, en su mayoría, por el aporte de sedimentos de las cuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa. Son áreas que presentan condiciones ideales para ser impactados por la ocurrencia de flujos de detritos. Principalmente, porque en las cuencas adyacentes a dichos abanicos, convergen factores geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y climáticos cuya dinámica favorece el origen de estos procesos.

Dentro de dichos factores destacan: pendiente accidentada (entre 25°- 40°), movimientos de masa superficiales, rocas altamente diaclasadas y en consecuencia con distintos grados de alteración, perfiles de meteorización profundos, materiales no consolidados, así como la presencia de material coluvial. Condiciones estas, que se traducen en un alto grado de susceptibilidad y amenaza por movimientos de masa en las vertientes de las cuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa (Cuervo, 2007).

www.bdigital.ula.ve

Sin duda, el carácter destructivo de los flujos de detritos, así como la frecuencia de eventos hidrometeorológicos que pueden detonarlos, sugiere que es necesario, cartografiar, modelar, e identificar las distintas zonas de amenaza por la ocurrencia de estos eventos. Por esta razón, se considera primordial conocer no sólo las áreas en las que potencialmente pueden manifestarse dichos eventos, sino también las áreas de impacto directo, velocidades y profundidades del flujo, que permiten delimitar niveles de intensidad de amenaza.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

En este sentido, esta investigación se plantea la determinación preliminar de niveles de amenaza por la ocurrencia de flujos de detritos y otros procesos hidrogeomorfológicos en los abanicos aluviales de las cuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Determinar la amenaza preliminar por flujos de detritos y otros procesos hidrogeomorfológicos en los abanicos aluviales de las cuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa, localizadas en los Andes centrales de Venezuela.

www.bdigital.ula.ve

1.2.2. Específicos

- Analizar los aspectos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos que controlan la ocurrencia de flujo de detritos en el área de estudio.

- Establecer el posible comportamiento de los procesos geomorfológicos en la superficie de los abanicos aluviales.

- Zonificar la amenaza por la ocurrencia de flujos de detritos en los abanicos aluviales.

1.3. Justificación

Los desastres naturales a escala mundial, específicamente los relacionados con fenómenos hidrometeorológicos, se han incrementado en un porcentaje

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

importante. CRED (2008) reporta que entre los años 1900 y 1909, se registraron 28 desastres a nivel mundial relacionados con este tipo de fenómenos, mientras que, en el período comprendido entre los años 2000 y 2005 esta cifra se incrementó a 2135. Por su parte, en Venezuela, entre los años 1999 y 2011, se han registrado más de dieciséis eventos importantes de naturaleza hidrometeorológica.

Los movimientos de masa, específicamente los de tipo flujos de detritos, son eventos controlados por factores de tipo geológico-geomorfológico. Sin embargo, tienen la particularidad de que son detonados por fenómenos de tipo hidrometeorológicos. En consecuencia, un incremento en estos últimos, implica un incremento en la probabilidad de ocurrencia de flujos de detritos.

www.bdigital.ula.ve

Es por esto, que la evaluación de amenaza en los abanicos aluviales de las cuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa, se considera un estudio pertinente y necesario, en vista de que en estudios anteriores (Cuervo, 2007; PMA: GCA-INGEOMIN, 2007) se han determinado altos niveles de susceptibilidad a movimientos de masa en las vertientes de dichas cuencas. Esto quiere decir, que en un porcentaje importante de la superficie de estos sistemas hídricos, es espacialmente posible que se desencadenen movimientos de masa, que pueden evolucionar como flujo de detritos.

Adicionalmente, el 27 octubre de 1947 se registró en la ciudad de Ejido, un flujo de detritos que afectó el abanico de La Vega. La magnitud de los daños, no indica que dicho evento se pueda catalogar como un desastre, especialmente porque para la época, el área afectada no contaba con un proceso de ocupación importante. Sin embargo, en la actualidad esa realidad ha cambiado y de originarse un evento similar al anterior los resultados serían distintos, afectando no sólo a la población

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

asentada en el área de los abanicos aluviales de Ejido, sino también la dinámica funcional de la población del Área Metropolitana de la ciudad de Mérida.

Del mismo modo, es importante señalar que los eventos de mayor magnitud e impacto ocurridos en el país hasta la fecha, específicamente en las zonas montañosas, están relacionados con la ocurrencia de movimientos de masa detonados por eventos hidrometeorológicos. Tal es el caso de la tragedia del Valle del Mocotíes en el año 2005, Santo Domingo-Pueblo Llano en el 2003 y el desastre de Vargas y Litoral Central en diciembre de 1999.

Desde el punto de vista metodológico se destaca que, actualmente en el país, son pocas las experiencias de evaluación de amenaza a escala local que utilicen modelos de simulación y herramientas de sistemas de información geográfica, como parte del método aplicado. Otras razones de relevancia se añaden a la realización de este estudio:

www.bdigital.ula.ve

- El marco legal venezolano contempla, desde el año 2009, la Ley Orgánica de Gestión Integral de Riesgos, norma jurídica orientada a conformar la plataforma para la gestión integral de riesgos socionaturales y tecnológicos en el país. Por lo tanto, estudios de esta naturaleza, sin duda constituyen aportes valiosos para el establecimiento de metodologías convencionales para la evaluación de amenazas a escalas locales en el país, que permitan instrumentar dicha norma.

- El Marco de Acción Hyogo (MAH) para 2005-2015, "es el instrumento más importante para la implementación de la reducción del riesgo de desastres que adoptaron los Estados miembros de las Naciones Unidas" (ONU-EIRD, 2005). Dentro de sus cinco áreas prioritarias para la toma de acciones, se encuentra la

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

de "conocer el riesgo y tomar medidas". En este sentido, investigaciones como esta, aportan conocimiento en los procesos de identificación y evaluación del riesgo a los desastres, para proponer alternativas y orientar la toma de decisiones.

- En otro orden de ideas, en la actualidad se observan cambios importantes en la frecuencia de ocurrencia de desastres que pueden estar relacionados con fenómenos climáticos. De acuerdo con el IPCC (2007), el incremento en las amenazas geomorfológicas con detonantes de tipo hidrometeorológico está relacionado, principalmente, con los efectos del cambio climático. De ser cierta esta tendencia, los países más susceptibles a ser afectados por este tipo de eventos, tales como Venezuela, deben prepararse a través de la elaboración de instrumentos para el establecimiento de los planes de gestión para la reducción del riesgo de desastre.

www.bdigital.ula.ve

En definitiva, la intención de la presente investigación, es contribuir en la creación de estándares metodológicos para la evaluación de amenazas por flujo de detritos en abanicos aluviales, además de consolidar instrumentos para la toma de decisiones en los procesos de planificación e implementación de políticas públicas para la gestión de cuencas hidrográficas y ordenación del territorio (a escala local), bajo un enfoque de reducción del riesgo de desastres.

1.4. Eventos históricos relacionados con la ocurrencia de flujos de detritos en Venezuela

En el contexto venezolano, se han registrado eventos de movimientos de masa y flujos de detritos que han causado pérdidas económicas cuantiosas y daños

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

significativos a las personas y a los bienes en las últimas décadas, entre estos destacan:

i) Los flujos de detritos y flujos hiperconcentrados que se desarrollaron en la cuenca del río Mocotíes en los años 2005, 2008 y 2011. La cuenca del río Mocotíes, es un área geográfica que frecuentemente se ve afectada por eventos de movimientos de masa y crecidas, como consecuencia de precipitaciones prolongadas. En el mes de febrero de 2005, el valle de la cuenca del río Mocotíes recibió importantes volúmenes de agua producto de una tormenta que ingresó en la zona y generó distintos procesos geomorfológicos; flujos y torrentes de detritos, represamiento, socavación y desborde; en varios sectores de la cuenca. Recientemente, crecidas y movimientos de masa se han desencadenado en distintos sectores de la cuenca, particularmente en los meses de octubre de 2008 y mayo de 2011.

www.bdigital.ula.ve

Ferrer (2005) afirma que la respuesta geomorfológica ante los eventos de lluvia de esta cuenca, está influenciada por dos aspectos en particular: la pronunciada asimetría de las vertientes y la distribución y caracterización geomecánica de los macizos montañosos. Este mismo autor destaca que los mayores impactos como consecuencia del evento de 2005 se concentraron en cuatro zonas principalmente: 1) sitio cercano a la Playa, 2) cuenca de la quebrada San Francisco - avenida perimetral de Tovar, 3) sector entre Tovar y Santa Cruz de Mora; 4) entre Santa Cruz y Puente Victoria.

ii) Los flujos y torrentes de detritos en la cuenca alta del río Santo Domingo en el año 2003. En el mes de junio de 2003, las cuencas de los ríos Santo Domingo, Pueblo Llano y Aracay, así como las quebradas La Sucia y Santa Filomena del municipio Cardenal Quintero del estado Mérida, fueron objeto de la concentración de

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

precipitaciones de alta intensidad en las vertientes que desencadenaron movimientos de masa que resultaron en la pérdida de vida de varias personas, además de la destrucción de parte de la infraestructura de vivienda de los asentamientos poblados aledaños.

iii) El desastre del estado Vargas que afectó el Litoral Central en el año 1999. Este evento fue catalogado como el más importante que se ha registrado en el país y probablemente en Latinoamérica (Wieczoreck et al., 2001). El 16 de diciembre de 1999, ocurrieron flujos de detritos simultáneos en 24 cuencas a lo largo de 50 km de las costas del estado Vargas, causando importantes daños a los desarrollos urbanos localizados en los abanicos aluviales al borde del mar Caribe (García y López, 2005).

www.bdigital.ula.ve

La magnitud-intensidad de este último evento fue tan importante que en las estadísticas del CRED (2008), Venezuela se encuentra de primero entre los diez países en los cuales se han registrado los movimientos de masa más importantes ocurridos a nivel mundial, en el período comprendido entre 1992 y mayo de 2003, tomando en consideración el número de muertes ocasionadas (Cuadro 1).

Los flujos torrenciales en el estado Vargas y Área metropolitana de Caracas, en diciembre de 1999, son una clara manifestación del grado de afectación de las poblaciones y sus actividades por la ocurrencia de flujos de detritos. "Aludes de barro, piedras y troncos, que descendían de la vertiente norte de la cadena del Litoral (serranía del Ávila), arrasaron con 807 hectáreas de zonas urbanizadas ubicadas a lo largo de una estrecha faja de unos 50 Km de longitud" (Andressen y Pulwarty, 2001, p. 149).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Cuadro 1. **Movimientos de masa más importantes ocurridos en distintos países a nivel mundial, en el período comprendido entre 1992 y mayo de 2003**

Rango	País	Número de eventos		Número de muertes
		totales	sin muertes reportadas	
1	Venezuela	7	2	30218
2	Nicaragua	1	-	2200
3	Colombia	15	1	1438
4	China	19	2	1173
5	Haití	2	-	777
6	El Salvador	3	1	712
7	India	17	3	624
8	Perú	11	4	356
9	México	11	4	276
10	Filipinas	25	2	256

Nota. Se modificó de "EM-DAT" por Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). Disponible en http://www.emdat.be/Database/terms.html

www.bdigital.ula.ve

1.5. Marco de acción institucional relacionado con la reducción del riesgo de desastre

La historia de desastres a nivel mundial, sus impactos, así como el incremento significativo en su ocurrencia, severidad e intensidad, especialmente durante la década de los 90, han obligado a las naciones del mundo a hacer frente a la situación, y para ello han estructurado diversos proyectos y marcos de acción, orientados a la reducción del riesgo de desastres.

La Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD), es uno de los ejemplos más claros de estas iniciativas. Tiene como propósito desarrollar comunidades resilientes, mediante la promoción de una mayor toma de conciencia sobre la importancia de la reducción del riesgo de desastre, como componente integral del desarrollo sostenible; con el objeto final de reducir las pérdidas

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

humanas, sociales, económicas y ambientales debido a amenazas de origen natural (ONU-EIRD, 2001).

Así mismo, el Marco de Acción Hyogo (MAH), es un instrumento, adoptado por los países miembros de las Naciones Unidas, cuyo propósito consiste en el aumento de la resiliencia de las naciones y las comunidades ante los desastres. Como meta se plantea, para el año 2015, una reducción considerable de las pérdidas que ocasionan los desastres, tanto en términos de vidas humanas como en términos de los bienes sociales, económicos y ambientales de las comunidades y los países.

El MAH ofrece cinco áreas prioritarias para la toma de acciones, al igual que principios rectores y medios prácticos para aumentar la resiliencia de las comunidades vulnerables a los desastres, en el contexto del desarrollo sostenible (ONU-EIRD, 2005). Las prioridades de acción que establece dicho marco de acción se describen a continuación:

www.bdigital.ula.ve

- Velar por que la reducción de los riesgos de desastre constituya una prioridad nacional y local dotada de una sólida base institucional de aplicación.
- Identificar, monitorear y evaluar los riesgos de desastres y potenciar la alerta temprana.
- Utilizar los conocimientos, las innovaciones y la educación para crear una cultura de seguridad y de resiliencia a todo nivel.
- Reducir los factores de riesgo subyacentes.
- Fortalecer la preparación para casos de desastre a fin de lograr una respuesta eficaz.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

En el contexto específico del área de estudio, existe el antecedente de un importante proyecto enmarcado en estas premisas. Se trata del Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, (PMA: GCA), cuyo objetivo principal, en los Andes venezolanos, se centra en proponer una intervención local pertinente frente a amenazas naturales en las subcuencas del río Montalbán y quebrada La Ceibita, en el estado Mérida, Venezuela.

En el marco de este programa, desarrollado en conjunto con INGEOMIN, se obtuvieron resultados importantes en cuanto a la susceptibilidad a movimientos de masa en las cuencas Montalbán - La Ceibita, así como a la vulnerabilidad Social en dichas cuencas. Los resultados de este estudio se compilan en un informe técnico que detalla los métodos y técnicas utilizadas en cada etapa (PMA: GCA-INGEOMIN, 2007).

www.bdigital.ula.ve

1.6. Desastres: ¿a qué se refieren?

El término desastre es definido como una seria interrupción en el funcionamiento de una comunidad o sociedad que ocasiona una gran cantidad de muertes al igual que pérdidas e impactos materiales, económicos y ambientales que exceden la capacidad de la comunidad o la sociedad afectada para hacer frente a la situación mediante el uso de sus propios recursos. Se clasifican de acuerdo con la velocidad con que ocurren (brusco o lento) y las causas que lo generan (naturales o antropogénicas) (ONU-EIRD, 1992; ONU-EIRD, 2004; ONU-EIRD, 2009).

> Con frecuencia, se describe a un desastre como el resultado de la combinación de la exposición a una amenaza, las condiciones de vulnerabilidad presentes, y capacidades o medidas insuficientes para reducir o hacer frente a las posibles consecuencias negativas. El impacto de los mismos puede incluir muertes, lesiones, enfermedades y otros efectos negativos en el bienestar físico, mental y social humano, conjuntamente con daños a la propiedad, la destrucción de

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

> bienes, la pérdida de servicios, trastornos sociales y económicos y la degradación ambiental (ONU-EIRD, 2009, p.14).

Alexander (1993) define el término como un evento extremo en el sistema terrestre (litósfera, hidrósfera, biósfera o atmósfera), el cual difiere del promedio de ocurrencia de este tipo de eventos y que resulta en la muerte y lesiones de seres humanos así como daños a los bienes, tales como infraestructura, sistemas de comunicación, cultivos, bosques y ambiente natural.

Por su parte, Blaikie et al. (1994) establece que un desastre ocurre cuando un número significativo de personas vulnerables, experimentan una amenaza y sufren daños severos o interrupción de la economía, de manera que no es posible recuperarse de los impactos sin ayuda externa. De acuerdo con las definiciones expuestas, así como con lo establecido por Van Westen (2009), las principales características de los desastres se resumen en que:

www.bdigital.ula.ve

- Está involucrada la ocurrencia de un fenómeno extremo de diferentes orígenes.
- Son de gran intensidad (medible: intensidad de terremotos o profundidad de agua).
- Tienen una duración limitada que puede variar de segundos a meses.
- Ocurren en un lugar determinado (en consecuencia el componente espacial es de suma importancia).
- Involucra una relación compleja entre los sistemas físicos y humanos.
- Causa pérdidas de vida y daños a la salud pública, así como también daños materiales.
- Implican una interrupción de las actividades sociales y económicas de un territorio.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

- Exceden las capacidades locales y los recursos disponibles.
- Se requiere de la asistencia externa para la recuperación de los territorios afectados.

1.7. Amenaza: definición, naturaleza y clasificación

El término amenaza en algunas ocasiones crea confusión. Ha sido utilizado de forma imprecisa y con diferentes significados implícitos (Graham y Burrel, 1997). Por esta razón, comprender la naturaleza de las amenazas naturales implica una consideración de casi cada fenómeno físico en el planeta. Las amenazas son dinámicas y con una alta variación de los impactos potenciales (ONU-EIRD, 2004).

www.bdigital.ula.ve

Cada región y cada país están expuestos a tipos de amenazas diferentes que varían en la escala global y local, dado por las características geográficas (latitudinales, geológicas e hidroclimáticas, principalmente) propias de cada una de los espacios en los cuales se pueden manifestar. Así mismo, los efectos de cada amenaza en particular también son diferenciales en el tiempo y en el espacio. PNUD-UNDRO (1991) plantean que para entender las amenazas es necesario comprender:

- La naturaleza, ¿cómo surgen?
- Probabilidad de manifestarse y magnitud.
- Mecanismos físicos de destrucción.
- Los elementos y actividades más vulnerables a los efectos.
- Consecuencias del daño.

En otras palabras se debe conocer: la noción de la naturaleza (origen) de un evento potencialmente dañino y la probabilidad de ocurrencia de ese evento en un período de tiempo. Esto sugiere, que abordar un estudio de amenaza implica estudiar: i) los

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

mecanismos detonantes, ii) la ocurrencia espacial, iii) la duración del evento así como, iv) el tiempo, la frecuencia, la magnitud y los eventos secundarios que pueden generarse producto de la manifestación inicial.

En la terminología actual, es preciso diferenciar amenaza y amenaza natural:

> La amenaza, se refiere a un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales" (ONU-EIRD, 2009, p. 7).

> La amenaza natural, alude a un proceso o fenómeno natural que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales (ONU-EIRD, 2009, p. 7). Pueden ser clasificadas de acuerdo con su origen: geológico, hidrometeorológico y biológico (ONU-EIRD, 2004, p. 39).

www.bdigital.ula.ve

Además, producto de la confusión que suele existir con el término amenaza socionatural en Venezuela, luego de la promulgación y publicación de la Ley de Gestión Integral de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos en el año 2009, se presenta la definición de este término:

> Amenaza socionatural, se define como "El fenómeno de una mayor ocurrencia de eventos relativos a ciertas amenazas geofísicas e hidrometeorológicas, tales como aludes, inundaciones, subsidencia de la tierra y sequías, que surgen de la interacción de las amenazas naturales con los suelos y los recursos ambientales explotados en exceso o degradados" (ONU-EIRD, 2009, p. 8).

A este respecto, es preciso destacar que la ONU-EIRD (2009) llama la atención acerca del uso del término, y plantea que esta denominación: "se utiliza para aquellas circunstancias en las que las actividades humanas están incrementando la ocurrencia de ciertas amenazas, más allá de sus probabilidades naturales" (p.9). Por

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

lo tanto, sólo debe emplearse cuando existe una evidencia real, de que el incremento en la ocurrencia de eventos que pueden desencadenar desastres, está asociado con las actividades humanas y los procesos de degradación ambiental.

Adicionalmente, se resalta que en el MHA para la reducción del riesgo de desastre, se consideran las amenazas de origen natural, relacionadas con el riesgo ambiental y tecnológico (ONU-EIDR, 2009). Estas incluyen las amenazas de origen geológico, hidro-meteorológico, hidrológico, oceánico, biológico y tecnológico, así como también combinaciones de estas (Cuadro 2).

Cuadro 2. **Clasificación de las amenazas de acuerdo con su origen**

Origen y definición	Ejemplos
Amenazas hidrometeorológicas: Procesos o fenómenos naturales de origen atmosférico, hidrológico u oceanográfico, que pueden causar la muerte o lesiones, daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental.	Inundaciones, flujos de lodo y detritos Ciclones tropicales, marejadas, vientos, lluvias y otras tormentas severas, ventiscas, rayerías, sequías, desertificación, incendios forestales, temperaturas extremas, tormentas de arena o polvaredas, heladas, avalanchas de nieve.
Amenazas geológicas: Procesos o fenómenos naturales terrestres, que puedan causar pérdida de vida o daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental.	Terremotos, tsunamis. Actividad y erupciones volcánicas. Movimientos de masa, deslizamientos, desprendimiento de rocas, licuefacción, deslizamiento de los fondos marinos. Colapso de superficies, actividad de fallas geológicas.
Amenazas biológicas: Procesos de origen orgánico o transportados por vectores biológicos, incluidos la exposición a microorganismos patógenos, toxinas y sustancias bioactivas, que pueden causar la muerte o lesiones, daños materiales, disfunciones sociales y económicas o degradación ambiental.	Brotes de enfermedades epidémicas, contagio de plantas y animales y pandemias.
Amenazas tecnológicas: Amenaza originada por accidentes tecnológicos o industriales, procedimientos peligrosos, fallos de infraestructura o de ciertas actividades humanas, que pueden causar muerte o lesiones, daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental.	Contaminación industrial, actividades nucleares y radioactividad, desechos tóxicos, rotura de presas; accidentes de transporte, industriales o tecnológicos (explosiones, fuegos, derrames).

Nota. Se modificó de "Viviendo con el riesgo" por ONU-EIRD, 2004, p 43.

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Capítulo 2: Amenaza por movimientos de masa

2.1. Enfoques metodológicos de evaluación de amenaza por movimientos de masa

Las evaluaciones de amenaza y susceptibilidad por movimientos de masa se han llevado a cabo bajo distintos enfoques y modelos. La aplicación de estos y su selección, dependen principalmente de la cantidad y calidad de datos disponibles así como de la experiencia del investigador.

www.bdigital.ula.ve

En la literatura, se establecen tres tipos modelos para evaluar la amenaza por movimientos de masa: i) modelos de caja blanca (*white box model*), se basan en modelos físicos de estabilidad de taludes y modelos hidrológicos, a estos, también se les conocen como modelos determinísticos; ii) modelos de caja negra (*black box model*), los cuales se fundamentan en análisis estadísticos solamente y, finalmente; iii) modelos de caja gris (*gray box model*), basados parcialmente en modelos físicos así como en el uso de la estadística (Carrara 1983; Hartlen y Viberg, 1988; Soeters y Van Westen, 1996).

Por otro lado, las técnicas de estudios de amenaza por movimientos de masa se pueden clasificar en: amenaza relativa y amenaza absoluta. Las técnicas para estudios de amenaza relativa diferencian la probabilidad de ocurrencia de movimientos de masa para diferentes áreas en el mapa, pero no proporcionan valores exactos. Por su parte, la amenaza absoluta, en su representación

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

cartográfica, muestra un valor absoluto para la amenaza por movimientos de masa, tal como un factor o una probabilidad de ocurrencia (Hartlen y Viberg, 1988).

En las últimas décadas, los métodos para la determinación de amenazas, utilizan enfoques combinados, beneficiándose de las bondades de los SIG para el procesamiento y análisis de los datos. Varnes (1984) analiza las técnicas más utilizadas para la zonificación de amenaza a nivel mundial, en su trabajo, encontró que el método de superposición cartográfica es uno de los más usados en los estudios de amenaza por movimientos de masa, debido a que es el método que produce los mejores resultados. Del mismo modo, con respecto al uso de las técnicas resalta la importancia del uso de tecnologías de sensores remotos en el desarrollo de métodos de zonificación.

www.bdigital.ula.ve

Soeters y Van Westen (1996) revisan las distintas técnicas y herramientas de análisis comúnmente aplicadas según el tipo y la escala cartográfica, para definir el tipo de información necesaria (Cuadro 3). Este documento reviste gran importancia desde el punto de vista teórico-práctico ya que guía el desarrollo de trabajos aplicados en cuanto a la pertinencia de los parámetros y variables que deben considerarse para cada técnica de zonificación en relación con la escala. Carrara et al. (1999) elaboran una revisión de métodos para el análisis y zonificación de movimientos de masa, así como sus tendencias, con énfasis en aquellas técnicas basadas en SIG.

Más adelante, Van Westen et al. (2008) discuten los aspectos relacionados con el uso de información espacial para la evaluación de susceptibilidad, amenaza y vulnerabilidad por movimientos de masa; elemento esencial para la toma de decisiones en cuanto a las escalas de trabajo y tipo de metodologías a implementar

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

en el análisis, sobre todo en los casos en los que se utilizan los Sistemas de Información Geográfica como herramienta para el procesamiento de la información.

Cuadro 3. **Técnicas de análisis de amenaza en relación con la escala del mapa**

Tipo de Análisis	Técnica	Características	Escala recomendada		
			Regional 1: 100.000	Media 1: 25.0000	Grande 1: 10.000
Inventario	Análisis de distribución de Mm	Distribución y clasificación de Mm	Si	Si	Si
	Análisis de actividad de Mm	Cambios temporales en los patrones de los Mm	No	Si	Si
	Análisis de densidad de Mm	Cálculo de la densidad de Mm por unidades de terreno	Si	No	No
Análisis Heurístico	Análisis Geomorfológico	Observación directa en el campo. Opinión de experto	Si	Si	Si
	Combinación de mapas cualitativos	Asignación de pesos a los mapas de parámetros, basado en la experiencia	Si	Si	No
Análisis estadístico	Análisis estadístico bivariado	Cálculo de la importancia de influencia de una combinación de dos factores	No	Si	No
	Análisis estadístico multivariado	Cálculo de la importancia de influencia de una combinación de factores	No	Si	No
Análisis determinístico	Análisis de factor de seguridad	Modelos de estabilidad de taludes y modelos hidrológicos	No	Si	No

Nota. Mm= movimientos en masa. Se modificó de "Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation", por Soeters y Van Westen, 1996, p. 137.

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

2.2. Algunas experiencias en la evaluación de amenaza por movimientos de masa: con énfasis en el estudio de flujos de detritos

La investigación en el campo de amenaza por movimientos de masa, específicamente por flujos de detritos en los abanicos aluviales, es un tema de investigación de larga data que ocupa a diversos investigadores del mundo. Debido, principalmente, a que las superficies de abanicos aluviales han sido frecuentemente afectadas por la ocurrencia de este tipo de procesos que han culminado en desastre.

Referidos a la elaboración de evaluaciones y mapas de amenaza a partir de modelos de simulación, se encuentran numerosos trabajos en el contexto mundial, la mayoría de estos utilizan modelos tanto unidimensionales como bidimensionales para simular eventos ocurridos en el pasado o predecir áreas de afectación por la ocurrencia de flujo de detritos. La mayoría de los trabajos se apoyan en el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el procesamiento y presentación de los resultados obtenidos.

www.bdigital.ula.ve

En este sentido, Jingjing et al. (2009) sobre la base de los datos de observación de los últimos cuarenta años en la quebrada Jiangjia, estudian la variación temporal de los incrementos intermitentes en las series de descarga de los flujos de detritos. En primer lugar, encontraron que las series de descarga tienen una distribución acumulativa en forma de una función exponencial, con exponentes que varían de acuerdo con el caudal pico. Consideran que un flujo de detritos en su conjunto, consiste en una sucesión de diversas resurgencias dominadas por el caudal pico. En segundo lugar, establecen que el promedio de dicha descarga varía con el progreso de las series y finalmente decae. Sostienen, que este hallazgo, en particular, representa la característica intrínseca de los flujos de de detritos.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Del mismo modo, las estadísticas de los datos de observación analizadas por estos autores, indicaron que los diferentes eventos estudiados tienen distribuciones similares en cuanto a los parámetros velocidad, profundidad del flujo, descarga, escorrentía e intervalo de tiempo, por lo tanto pueden considerarse como los signos de una dinámica subyacente. Adicionalmente, debido a que los datos analizados proceden del mismo valle y las secuencias de descarga analizadas se encuentran bajo las mismas circunstancias, las variaciones correspondientes deben determinarse dinámicamente pero no dependen de las influencias externas. Por lo tanto, consideran que las características presentadas en dicho trabajo, pueden ser de importancia universal para el estudio de los flujos de detritos en cualquier condición ambiental.

www.bdigital.ula.ve

Por su parte, Hürlimann et al. (2008) elaboran una evaluación de distintos enfoques para calcular parámetros de flujos de detritos que permitan determinar amenaza. En dicho trabajo, revisan datos de tipo empíricos, analíticos, rutas sencillas de flujo y técnicas numéricas; para recalcular un flujo de detritos que tuvo lugar en el año 1982 en la microcuenca La Guingueta de los Pirineos Orientales. En dicha estimación, utilizaron la reología de fluidos *Voellmy* para los procesos de análisis y simulación numérica.

El mencionado trabajo, además establece que los valores de los parámetros reológicos calibrados en La Guingueta concuerdan con los datos calculados anteriormente para otros flujos de detritos. Por lo tanto, consideran que las relaciones empíricas constituyen otro método para estimar la distancia de recorrido del flujo. Sin embargo, los resultados que obtuvieron confirmaron que estas relaciones contienen una incertidumbre importante, y son estrictamente válidas sólo para las condiciones que fueron base para su desarrollo.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Así mismo, presentan una sugerencia sobre cómo los diferentes métodos de predicción se pueden aplicar para generar mapas de amenaza por flujos de detritos. Sostienen que teniendo en cuenta la definición de amenaza e intensidad, la mejor opción para presentar los resultados es la de dividir los mapas de amenaza en dos tipos: "mapas de amenaza final" y "mapas de amenaza preliminar". Por último agregan, que sólo el uso de modelos numéricos proporciona mapas de amenaza final, ya que pueden incorporar diferentes magnitudes de eventos y suministrar valores de salida para el cálculo de intensidad. En cambio, las relaciones empíricas y las rutas de algoritmos de flujo, o una combinación de ambas, puede aplicarse para crear mapas de amenaza preliminares.

www.bdigital.ula.ve

En el mismo ámbito geográfico, Bateman et al. (2007) aplican un modelo bidimensional denominado FLATModel desarrollado en el GITS-UPC (Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos de la Universidad Politécnica de Cataluña), para simular flujos de detritos en una cuenca del Pirineo Catalán. Este modelo se basa en el esquema de Godunov para la evaluación del comportamiento dinámico de los flujos monofásicos de tipo detrítico. El modelo numérico está diseñado para trabajar con un Sistema de Información Geográfica (SIG), lo que permite una gran facilidad para recoger información e introducirla en el modelo hidrodinámico. Los autores destacan que el proceso se realizó a posteriori y, por tanto, la cartografía utilizada es post evento.

Carrara et al. (2008) comparan cinco modelos de susceptibilidad para predecir las localizaciones de las fuentes de suministro de flujos de detritos en ambientes alpinos. Los modelos se diferencian en los enfoques utilizados (estadístico vs. con base física), así como en la unidad cartográfica de referencia (unidades de pendiente vs. tamaño del píxel). Para el caso de los modelos estadísticos, se basaron en una

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

combinación de factores ambientales y clasificaron áreas con distintos niveles de susceptibilidad a flujos de detritos.

La superposición de mapas de susceptibilidad producidos por los diferentes métodos (estadística vs. con base física) para la unidad cartográfica de referencia, reveló una gran diferencia de casi un 25% de discrepancia espacial, entre los resultados de ambos modelos. Como reflexión final obtienen que aunque todas las técnicas aplicadas ofrecen resultados comparables en lo esencial, el modelo discriminante, basado en la partición del área de estudio en pequeñas unidades de pendiente, puede constituir el enfoque más adecuado para la evaluación regional de flujos de detritos en Los Alpes.

www.bdigital.ula.ve

Preocupados por la amenaza geológica por la ocurrencia de flujos de detritos en China, que a nivel nacional causan alrededor de 250 millones de dólares en daños y entre 300-600 muertes y lesiones cada año, Di et al. (2008) plantean que para mitigar las amenazas por estos procesos, es necesario cartografiar, modelar, e identificar las distintas zonas de amenaza y vulnerabilidad, con el propósito de informar a la población local sobre el riesgo potencial, a partir de la implementación de un sistema de información geográfica. Es por esto que presentan un estudio de caso, a escala regional, de modelado de riesgo por flujo de detritos (amenaza y vulnerabilidad) en la provincia de Sichuan, al suroeste de China, área en la que han sido identificados alrededor de 3290 flujos detritos.

La metodología utilizada por los investigadores, se centra en: i) la generación de un mapa de amenaza de flujo de detritos de cuatro niveles, mediante la comparación de los umbrales de precipitación con la intensidad de las lluvias de diseño de 50, 20, y 5 años promedio de los períodos de retorno, respectivamente y; ii) la

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

determinación del grado de vulnerabilidad de los flujos de detritos, a partir del análisis de las condiciones socioeconómicas de la cuenca. La fase final de la investigación consistió en la generación de un mapa de cuatro niveles de riesgo de flujo de detritos, a partir de la combinación del mapa de amenazas con el de vulnerabilidad. De la evaluación de riesgos resultante, la provincia de Sichuan se clasificó en cuatro regiones: ligera, moderada, severa y muy severa, que representa el 36%, 19%, 20% y el 25% de la superficie total estudiada respectivamente.

Hürliman et al. (2006) presentan un procedimiento multidisciplinario para evaluar la amenaza por flujo de detritos a una escala local, a partir del desarrollo de un enfoque de cuatro etapas, aplicado a cinco microcuencas torrenciales localizadas en los Pirineos, en el Principado de Andorra. El primer paso consistió en un análisis geomorfológico y geológico minucioso que proporcionó un mapa inventario de los últimos flujos de detritos, una relación de la magnitud-frecuencia, y un mapa geológico-geomorfológico. Con estos datos determinaron las zonas potenciales de inicio (áreas fuente) así como el volumen de detritos futuros para cada cuenca. Los principales resultados de esta primera etapa consistieron en un mapa de susceptibilidad así como el establecimiento de diferentes escenarios.

www.bdigital.ula.ve

El segundo paso de este método, se fundamentó en el análisis de la distancia recorrida, realizado a partir de la aplicación de un código numérico unidimensional para analizar los escenarios previamente definidos. Seguidamente, el tercer paso del enfoque, consistió en la zonificación de amenaza y la compilación de todos los resultados de los dos pasos anteriores, en un mapa de amenaza final. La base de este mapa fue una matriz de amenaza, que permitió combinar la intensidad de los flujos de detritos con su probabilidad de ocurrencia, con el propósito de determinar un cierto grado de amenaza.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Finalmente, el último paso aplicado en este enfoque, se refirió al desarrollo de propuestas de mitigación de amenaza para ser aplicadas en la superficie del abanico. De la investigación, concluyen que los mapas finales de amenaza, a escala 1:2000, proporcionan una herramienta obligatoria para la planificación local del uso del suelo, y que la experiencia adquirida durante el estudio demostró que la colaboración entre los geólogos, geomorfólogos, ingenieros, así como tomadores de decisiones, es fundamental. Además, agregan que sólo un enfoque multidisciplinario permite resolver todos los problemas de un proceso tan complejo como la evaluación de amenaza por flujos de detritos. Como uno de los aportes más importantes, establecen que el enfoque utilizado puede ser aplicado a otras zonas montañosas, a partir de la adaptación de la matriz de amenaza a las nuevas condiciones locales.

www.bdigital.ula.ve

En Venezuela, se cuenta con algunas experiencias interesantes en el ámbito de aplicación de modelos de simulación para la zonificación de amenazas en abanicos. Bello et al. (2003) realizan un análisis de tres fases, orientado a la simulación de flujos de detritos e inundaciones en el río Cerro Grande, comunidad de Tanaguarena, en Venezuela. En primer lugar, investigaron la intensidad y distribución de la tormenta de diciembre de 1999, así como los caudales generados.

Seguidamente, con el software hidrológico HEC-1, calcularon el hidrograma de 3 días de inundación y por último, aplicaron el modelo bidimensional FLO-2D con el propósito de simular los flujos de sedimentos hiperconcentrados en los abanicos aluviales. Como conclusiones establecen que con este modelo calibrado, se pueden diseñar medidas para la mitigación de inundaciones. Los resultados, indican que el modelo FLO-2D puede reproducir con exactitud las inundaciones de 1999 en el abanico aluvial de Cerro Grande.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

En este orden de ideas, García et al. (2004) proponen un método para zonificar amenaza por la ocurrencia de eventos de inundaciones, flujos de detritos y lodo, basado en la aplicación del modelo bidimensional FLO-2D. La metodología planteada, permite definir niveles de amenaza con base en la frecuencia y la intensidad de los eventos, fue probada en veintitrés lugares en Caracas y el estado Vargas de Venezuela. Sin embargo, este trabajo sólo describe la aplicación del modelo en la comunidad de Tanaguarena, abanico aluvial Cerro Grande. Los resultados del modelo arrojan que existe una correspondencia importante entre las profundidades máximas de flujo y el área afectada en el desastre de Vargas de 1999. Es importante destacar que el método propuesto, se promueve, actualmente, en otros lugares de Latinoamérica.

www.bdigital.ula.ve

Otras aplicaciones del modelo FLO-2D, ofrecen resultados similares a los descritos anteriormente. Valderrama et al. (2006) elaboran un mapa de peligros a partir de la aplicación del modelo de simulación FLO-2D en la quebrada Runtumayo (Cusco), con los datos de un evento ocurrido el 12 de octubre de 2005 en el área, así como con la cartografía previa existente de los diferentes abanicos aluviales. Como resultado obtienen, que el modelo teórico respecto a la ocurrencia de flujo de detritos, se comporta de manera similar a lo observado en el evento del 12 de octubre, por lo tanto, concluyen que a partir de dichos datos es posible validar el modelo.

Por su parte, Castillo (2006) calibra el modelo FLO-2D para estimar flujos de detritos y lodo en la quebrada Paihua, cercana a la ciudad de Matucana en Perú. El trabajo está orientado, principalmente, a brindar criterios para modelar este tipo de procesos, así como también definir un mapa de amenaza para la zona.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

La amenaza en abanicos aluviales por la ocurrencia de flujos de detritos, también ha sido evaluada a partir de enfoques distintos a los de tipo determinístico, es decir de aquellos basados en la aplicación de modelos de simulación. Dichas evaluaciones, se han concentrado en la aplicación de métodos de tipo heurísticos, basados en la experiencia del investigador para zonificar niveles de amenaza.

Interesados en comparar la capacidad de dos modelos numéricos para predecir la dinámica de flujos de detritos utilizando pocos parámetros de entrada, Armento et al. (2008) estudian dos flujos de detritos en el área de Cortina d' Ampezzo en Italia, utilizando los modelos de simulación DAN-W y FLO- 2D. Como resultados obtienen que el modelo FLO- 2D crea una representación más exacta de la amenaza, en términos del área inundada, mientras que el DAN-W, es más preciso para determinar la distancia recorrida por los flujos, así como el espesor de los depósitos.

www.bdigital.ula.ve

Rickenmann (1999) analiza las relaciones empíricas que pueden ser utilizadas para estimar los parámetros más importantes del comportamiento de flujos de detritos (volumen, caudal pico, velocidad media del flujo y distancia total recorrida). Establece que las evaluaciones orientadas a evaluar la amenaza por flujo de detritos, tienen que basarse en la aplicación de métodos semicuantitativos, debido a que los modelos de simulación numérica tienen limitaciones en lo que respecta a las aplicaciones prácticas. Propone algunas recomendaciones con respecto a la aplicación de dichas relaciones empíricas mediante la práctica de los ingenieros, y reconoce la importancia del trabajo de campo y la búsqueda de los acontecimientos históricos siempre que sea posible.

Además del uso de técnicas de simulación, cuyas aplicaciones son cada vez más frecuentes en la literatura, también abundan trabajos de tipo heurísticos, centrados

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

en la identificación de características sedimentológicas y geomorfológicas para el análisis de la dinámica de flujos en áreas geográficas diversas. Kellerhals y Church (1990) desarrollan un sistema de zonificación de amenaza por flujos de detritos y procesos de avulsión en abanicos aluviales, con ejemplos en la Columbia Británica. Los aportes más importantes de este trabajo, consisten en que presentan una serie de criterios de tipo geomorfológico, para reconocer áreas de posible impacto directo e indirecto por flujo de detritos, así como áreas de inundación por crecidas y torrentes de detritos. Aspectos acerca de las obras de mitigación recomendadas para cada tipo de proceso también son analizados.

Criterios morfométricos también han sido utilizados para identificar amenaza por flujos de detritos en los abanicos. Jackson et al. (1987) realizan un estudio en las montañas Rocallosas del Canadá, en el cual, a partir del análisis de las evidencias geomorfológicas y sedimentológicas, determinan que muchas de las superficies de abanicos han sido afectadas por flujo de detritos. Encuentran que por lo general, dichas superficies, se caracterizan por presentar: i) grados de pendiente superior a los 4°; ii) cuencas de primer o segundo orden con número de rugosidad mayor de 0,25-0,30. En contraste con los abanicos en los que dominan los procesos fluviales, en los cuales los grados de pendiente son menores, con menos rugosidad y cuencas del tercer orden o más.

Desde otra perspectiva, relacionada con la dinámica de flujos, Pelfini y Santilli (2008) estudian la frecuencia de los flujos de detritos y su relación con la precipitación en el Valle del Gallo (Alpes centrales de Italia), un típico ambiente de alta montaña dominado por procesos de movimientos de masa, en el cual los fondos de valle son ocupados por abanicos formados por flujos de detritos. Para ello utilizan técnicas de

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

datación dendrogeomorfológica, destacando su relación con las precipitaciones así como el análisis de los posibles cambios en su intensidad y frecuencia en el tiempo.

Los métodos de datación utilizados por estos autores, los establecieron con base en las anomalías de crecimiento de los árboles: cicatrices de abrasión, compresión de la madera y los cambios bruscos de crecimiento. Doscientos treinta y nueve eventos de flujos de detritos ocurridos entre los años 1875 y 2003 fueron registrados utilizando 757 árboles (*Pinus montana* Mill). Finalmente, indican que los resultados de la investigación se entienden como una contribución para la comprensión de la respuesta geomorfológica a los cambios climáticos.

Otros estudios relacionados con la ocurrencia de flujo de detritos, están orientados a determinar la influencia de los modelos de elevación digital en los procesos de simulación. Stolz y Huggel (2008) reflexionan acerca de la importancia de la calidad de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) así como la resolución del píxel para la delimitación de las áreas potencialmente afectadas por flujo de detritos y para la zonificación de movimientos de masa.

www.bdigital.ula.ve

En el contexto metodológico de zonificaciones de amenaza y susceptibilidad por movimientos de masa, existe una amplia variedad de trabajos, basados en el desarrollo de distintos enfoques. Modelos estadísticos para la evaluación de susceptibilidad han sido desarrollados por lo general a escalas medias y utilizando factores geológicos, geomorfológicos e hidrológicos, para determinar el grado de influencia de dichos factores (Carrara et al. 1991; Fonseca y Castro, 2001; Carrara et al., 2008, Thiery et al., 2007; Blahut et al.; 2010). Enfoques heurísticos y evaluaciones cuantitativas, se basan en el desarrollo de inventarios de movimientos de masa y evaluaciones multicriterio (Castellanos y Van Westen, 2008).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

2.3. Movimientos de masa

Las primeras definiciones de movimientos de masa, que se encuentran en la literatura se remontan a los trabajos presentados por Sharpe (1938). Este autor, define el término movimientos de masa, como la caída perceptible o movimiento descendente de una masa relativamente seca de tierra, roca, o ambas. Más adelante, Crozier (1986) establece que el concepto se refiere al movimiento gravitacional hacia el exterior de la ladera y descendente de tierras o rocas sin ayuda del agua como agente de transporte. Cruden (1991) sostiene que el término movimientos de masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad.

www.bdigital.ula.ve

2.3.1. Aspectos de las clasificaciones de movimientos de masa

Las clasificaciones de movimientos de masa se basan en un conjunto de criterios para distinguir las diferencias entre los mecanismos que adoptan los distintos tipos de movimiento, estos varían de autor a autor. Los criterios más utilizados se basan en: el tipo de proceso, morfología, geometría, tipo y tasa de movimiento, tipo de material y actividad (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996; Hungr et al., 2001).

Adicionalmente, otros autores consideran aspectos como: mecanismos detonantes, características de la cuenca, composición de los sedimentos, características de la fracción sólida, rugosidad, velocidad, duración, pendiente, comportamiento del material u otros procesos involucrados (Coussot y Meunier, 1996).

Los sistemas más empleados para clasificar movimientos de masa, son los propuestos por Varnes (1958, 1978), y Hutchinson (1968, 1988). Más adelante,

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Cruden y Varnes (1996) propusieron modificaciones a la clasificación de Varnes (1978) cuyo aporte más interesante consiste, en que introducen un marco taxonómico multidimensional para la definición de los nombres de los movimientos. Además de estas clasificaciones, Corominas y García (1997) proponen una adaptación de las clasificaciones anteriores.

El sistema de Varnes (1958) y (1978) emplea como criterio principal para la clasificación, el tipo de movimiento y en segundo lugar, el tipo de material. Así, divide los movimientos de masa en cinco tipos: caídas, vuelcos, deslizamientos, propagaciones y flujos (PMA: GCA, 2007). Adicionalmente, divide los materiales en dos clases: rocas y suelos, éstos últimos subdivididos en detritos y tierra. De esta manera, este investigador presenta definiciones para varias posibles combinaciones de tipo de movimiento y material.

www.bdigital.ula.ve

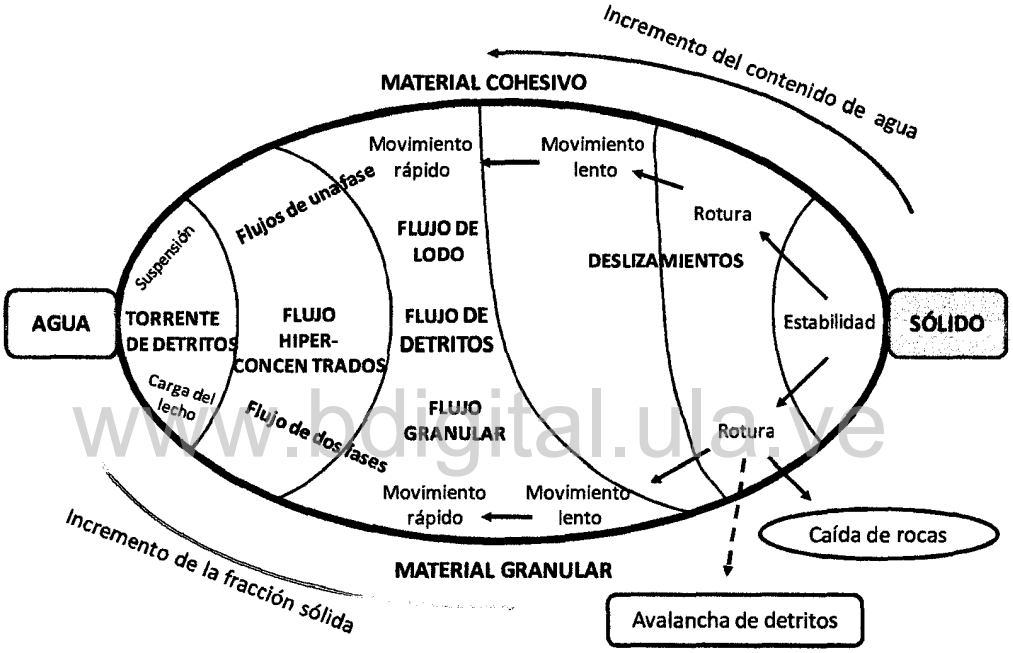
Sobre la base de dos criterios, el tipo y el porcentaje de fracción sólida, Coussot y Meunier (1996) proponen una clasificación, en forma de elipse, de movimientos de masa para diferenciar los distintos procesos. Los límites entre los distintos movimientos de masas son estrictamente conceptuales y cualitativos (Figura 1). Las bondades de esta clasificación, consisten en que los investigadores proponen una serie de criterios prácticos para el reconocimiento de los distintos procesos basados en una revisión de evidencias en el campo.

2.4. Flujo de detritos: causas y dinámica

Un flujo de detritos (*debris flow*) es una mezcla de material fino (arena, limos y arcillas) y material grueso (gravas y bloques), con una cantidad variable de agua, que se desplaza en sentido de la pendiente, por lo general en resurgencias inducidas por

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

la gravedad, así como por el colapso repentino de materiales en el cauce (Corominas et al., 1996). Coussot y Meunier (1996) consideran que los flujos de detritos son procesos intermedios entre los flujos hiperconcentrados y los movimientos de masa.



www.bdigital.ula.ve

Figura 1. Clasificación de movimientos de masa en laderas en función del tipo de material y la fracción solida. *Nota*. Se modificó de "Recognition, classification and mechanical description of debris flows", por Coussot y Meunier, 1996, p. 216.

A pesar de que los flujos de detritos se encuentran altamente saturados, difieren de las crecidas (flujos newtonianos) y flujos hiperconcentrados, en que los sedimentos que forman parte de la suspensión se comportan, casi exclusivamente, bajo principios de mecánica de fluidos. Por el contrario, en el caso de las crecidas los sedimentos en suspensión están en su mayoría relacionados con la dinámica de la ola de crecida que los contiene (Costa, 1988; Iverson, 2005).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Este movimiento se caracteriza por ser un "flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos (índice de plasticidad menor al 5%), que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada" (PMA: GCA, 2007, p. 19).

El origen de los flujos de detritos, puede ocurrir, como uno o varios deslizamientos superficiales de detritos en las cabeceras o por inestabilidad de segmentos del cauce en canales de pendientes fuertes (PMA: GCA, 2007). Las causas asociadas con la ocurrencia de flujos de detritos en las áreas fuente son: pendiente entre 25-40°, precipitaciones intensas, geometrías cóncavas (asociadas con cicatrices de deslizamientos), movimientos de masa, específicamente del tipo deslizamientos (rotacionales y traslacionales), material no consolidado, perfiles de meteorización profundos, presencia de material coluvial y líneas de drenaje (Corominas et al., 1996).

www.bdigital.ula.ve

Por su parte, el mecanismo detonante, de este tipo de procesos está asociado con la ocurrencia de precipitaciones intensas, de corta y larga duración, así como con el grado de humedad antecedente. En comparación con otros flujos, los flujos de detritos se caracterizan por su gran capacidad erosiva del lecho (Coussot y Meunier, 1996). Otra característica de este tipo de procesos, es que incorporan gran cantidad de material saturado en su trayectoria al descender en el canal y finalmente los depositan en abanicos de detritos.

La velocidad de los flujos de detritos, depende del tamaño y concentración de sedimentos, así como de la geometría del canal (Corominas et al., 1996). Por lo general, la mayoría de los flujos de detritos alcanzan velocidades en el rango de

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

movimiento extremadamente rápido, y por esta naturaleza son capaces de producir la muerte de personas (Hungr, 2005).

Las velocidades de los flujos se determinan, generalmente en el campo a partir de la observación de las elevaciones del flujo en las curvas del canal las cuales se reflejan en marcas de lodos o de vegetación afectada (Costa, 1984). En otras palabras, zonas con curvatura tipo meandro donde se presenta un borde de máxima destrucción y otro de mínima afectación.

2.5. Diferenciación reológica, geomorfológica y sedimentológica de flujos en canales

www.bdigital.ula.ve

Dentro de la investigación de amenazas en cuencas y abanicos aluviales, uno de los pasos más importantes consiste en identificar los tipos de procesos que pueden ocurrir en la cuenca y afectar la superficie de los abanicos. En el caso de los procesos de flujos, las variaciones son causadas principalmente por las características y tipo de sedimentos arrastrados por el flujo (Costa, 1988).

Adicionalmente a los procesos descritos anteriormente (Cuadro 4), se reconocen otro tipo de dinámicas, tales como los flujos de detritos, que ocurren en canales. Los torrentes de detritos se diferencian de los flujos de detritos principalmente porque: i) ocurren en pendientes fuertes, ii) son activados durante eventos de precipitaciones extremas por movimientos de masa en las vertientes o por acumulaciones de detritos en el cauce, que se desplazan corriente abajo y; iii) los sedimentos en suspensión de la descarga inicial se acompañan de material orgánico e inorgánico (Kellerhals y Church, 1990).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Cuadro 4. **Características reológicas, geomorfológicas y sedimentológicas de flujos en canales**

	Característica	Flujos de Agua	Flujos Hiperconcentrados	Flujos de Detritos
Reológicas	Concentración de sedimentos	1 - 40% por peso 0,4-20% por volumen	40-70% por peso 20-47% por volumen	70-90% por peso 47-77% por volumen
	Densidad aparente (g/cm^3)	1,01 – 1,33	1,33 – 1,80	1,80 – 2,30
	Tipo de fluido	Newtoniano	No newtoniano?	Viscoplástico?
Geomorfológicas y sedimentológicas	Formas y depósitos	Barras; abanicos; meandros; planicies de inundación; los canales pueden ser anchos y profundos.	Similares a los flujos de agua.	Diques marginales, lóbulos terminales, geometría del canal trapezoidal (Forma de U).
	Estructuras sedimentarias	Estratificación horizontal o inclinada a masiva, imbricación débil a fuerte, estructuras de corte y relleno, sin gradación a gradadas.	Estratificación débil a masiva, imbricación débil, lentes delgados de arena, gradación normal y reversa.	Sin estratificación, imbricación débil a inexistente, gradación inversa en la base, gradación normal cerca del tope.
	Características de los sedimentos	Coeficiente de selección promedio entre 1,8 y 2,7; clastos redondeados; amplio rango de tamaño de las partículas.	Valores entre 1,1 – 1,6 (pobremente clasificado) en gráficos de selección; predominan las arenas gruesas.	Coeficiente de calibrado promedio entre 3,6 y 12,3; valores entre 3,0 – 5,0 (extremadamente pobre clasificado) en gráficos de selección; matriz grano soportada; asimetría negativa; extremadamente amplio rango de tamaño de las partículas; puede contener megaclastos.

Nota. Se modificó de "Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows" por Costa, 1988, p. 114, 118.

www.bdigital.ula.ve

2.6. Características de la amenaza por movimientos de masa

En el capítulo anterior se discutieron algunos aspectos del término amenaza en el marco de la reducción del riesgo de desastres. Con base en dicha definición, se

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

puede establecer que la amenaza por movimientos de masa, consiste en la probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales.

En su concepción más sencilla, puede entenderse como "la probabilidad de que ocurra un deslizamiento particular en un determinado tiempo" (Suárez, 1998, p. 356). La importancia de comprender las características de este tipo de amenaza, reside en que en la medida en la que se reconozcan los distintos elementos que forman parte de la dinámica de estos procesos, en esa misma medida, será posible plantear métodos de evaluación de amenaza coherentes y criterios de zonificación adecuados para los propósitos planteados y en las escalas requeridas (Cuadro 5).

www.bdigital.ula.ve

Cuadro 5. **Principales características de la amenaza por movimientos de masa**

Mecanismos detonantes	**Exógenos:** Precipitaciones intensas, degradación del suelo, meteorización. **Endógenos:** Sismos **Inducidas por el hombre:** deforestación y conflictos de uso de la tierra.
Ocurrencia espacial	• Áreas de pendiente inclinada e inestabilidad geológica con actividad previa de movimientos de masa. • Superficies de abanicos aluviales. • Áreas bajo el efecto de precipitaciones intensas. • Suelos altamente meteorizados.
Duración del evento	Rápido: de segundos a minutos.
Tiempo de desarrollo	De segundos a meses
Frecuencia - Magnitud	Depende de la localización, pero por lo general siguen una relación inversa, mientras mayor sea la magnitud, menor es la frecuencia.
Eventos derivados	Inundaciones y crecidas de desborde, cuando la masa desplazada obtura los cauces de río, también pueden generar incendios en las ciudades. Cuando los movimientos de masa se originan en el talud oceánico se pueden originar tsunamis.

Nota. Se modificó de "Hazard Assessment" por Alkema et al. (2009) p. 17.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

2.7. Modelo de simulación FLO-2D

El modelo bidimensional de diferencias finitas FLO-2D es un modelo hidráulico, que simula flujo de agua y fluidos no-newtonianos, como flujos hiperconcentrados, en conos de deyección y abanicos aluviales. Fue desarrollado, inicialmente, por O'Brien, J. en 1989, más adelante se incorporan en el diseño y mejora del modelo García, R. y Craig, J., desarrollando nuevas herramientas para la simulación. Actualmente el software ya cuenta con la versión 2009 desarrollada por FLO-2D software.

Este modelo permite simular flujos en topografías complejas, tales como áreas urbanizadas y planicies de inundación, así como el intercambio de fluido entre los canales y la planicie de inundación-desborde. Una de las características más interesante del modelo es que permite modelar flujos de agua y flujos hiperconcentrados.

www.bdigital.ula.ve

Para el modelado de los flujos, la topografía de la superficie se discretiza en elementos de una cuadrícula (cuyo tamaño es definido por el usuario), y a cada uno de los elementos de dicha cuadrícula, se le asigna un valor de altitud y un factor de rugosidad. El detalle y la exactitud de la simulación, están relacionadas con el tamaño de la red. El hidrograma de de crecida y el área por donde transita el flujo se simula resolviendo la ecuación de conservación de momento (para detalles consulte el *Manual de Referencia FLO-2D*; FLO-2D Software, 2010).

Las ventajas de este modelo, para fines prácticos, se centran en que permite determinar profundidades y velocidades de flujo que sirven como base para: delimitar áreas de amenaza, ubicar vías de escape, ubicar lugares de refugio y

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

evaluar obras de control. Las características más importantes de este modelo se listan a continuación:

- Simula flujo en dos dimensiones y ocho direcciones.
- Permite simular secciones de canal rectangulares, trapezoidales y puntos topográficos.
- Calcula el intercambio de flujo entre el canal y la planicie de inundación.
- Calcula la infiltración y estima pérdidas por evaporación.
- Modela el flujo por calles y en la presencia de diques marginales.
- Simula transporte de sedimentos y flujos hiperconcentrados.
- Simula estructuras hidráulicas: (puentes, alcantarillas) y rotura de presas.

Adicionalmente, se destaca que este modelo ha sido utilizado en numerosos proyectos en más de 30 países, con diversos propósitos, así como en los estudios de abanicos aluviales de la Federal Emergency Management Agency (FEMA) (FLO-2D Software, 2010).

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Capítulo 3. Materiales y métodos de trabajo

El enfoque metodológico que se presenta a continuación, se fundamenta en la aplicación de un conjunto de técnicas y procedimientos en los cuales se combinan un modelo estadístico, soportado en un inventario de movimientos de masa para identificar áreas potenciales de inicio de flujo de detritos e indicadores de procesos geomorfológicos (a escala 1:25.000), con un análisis de tipo determinístico para la simulación de los procesos hidrológicos en la superficie de los abanicos aluviales (a escala 1:5.000).

www.bdigital.ula.ve

Dicho enfoque, se estableció con base en la revisión de la literatura, así como en el reconocimiento de los procesos que se generan en cada una de las zonas geomorfológicas de un sistema de abanicos aluviales: zonas de erosión y aporte de sedimentos (áreas de inicio de flujos de detritos y otros procesos); zona de transferencia (áreas en la que predominan mecanismos de transporte de sedimentos) y zona de depositación (áreas de menor pendiente del sistema en la que influye la dinámica de los procesos en la sección media y distal de los abanicos aluviales).

La metodología de investigación se desarrolló en cuatro fases: i) estructuración de la información espacial; ii) análisis geológico-geomorfológico e hidrológico, iii) estudio del comportamiento de los procesos geomorfológicos en la superficie de los abanicos aluviales y; iv) zonificación de amenaza.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

3.1. Área de estudio

El área de estudio comprende las cuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa (Figura 2), sistemas fluviales típicos de montaña de los Andes centrales venezolanos. La quebrada Montalbán, nace en el Páramo de los Conejos (Cerro Laguneta) a 3500 msnm y drena una superficie de 14 km^2 que confluye con el río Albarregas a los 1100 msnm, con un marcado desnivel de 2500 m. Por su parte, la microcuenca de la quebrada La Portuguesa, nace en la Loma del Viento a 3160 msnm, confluye con el río Chama a los 960 msnm y ocupa una superficie de 28 km^2 con un desnivel de 2200 m.

Se trata de microcuencas de forma alargada y ligeramente alargada respectivamente. Los valles tienen forma en "V" a través de los cuales fluyen quebradas con patrones dendríticos y rectilíneos, con regímenes permanentes y semipermanentes (Cuervo, 2007). El valle toma una orientación predominante NE-SO, transversal al río Chama.

www.bdigital.ula.ve

La morfología de las cuencas así como su orientación, está fuertemente influenciada por la tectónica regional, caracterizada por la presencia de la Zona de Falla de Boconó. Accidente transcurrente dextral que se extiende por más de 500 km en el occidente venezolano y se expresa morfológicamente por el alineamiento continuo de grandes valles de diversos ríos, desplazamiento de quebradas y ríos, escarpes, lomos de falla y cuencas de tracción. Estas expresiones morfológicas son más marcadas a cotas superiores a los 3.000 m (Schubert, 1982; Schubert y Vivas, 1993; Soulas, 1985; Ferrer, 1991; Audemard, 2009).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Cuervo, V. (2011)

Ambas microcuencas, representan el área de mayor aporte de sedimentos a los abanicos aluviales coalescentes donde se localizan los centros poblados de Ejido, Aguas Calientes y La Vega-Don Luís.

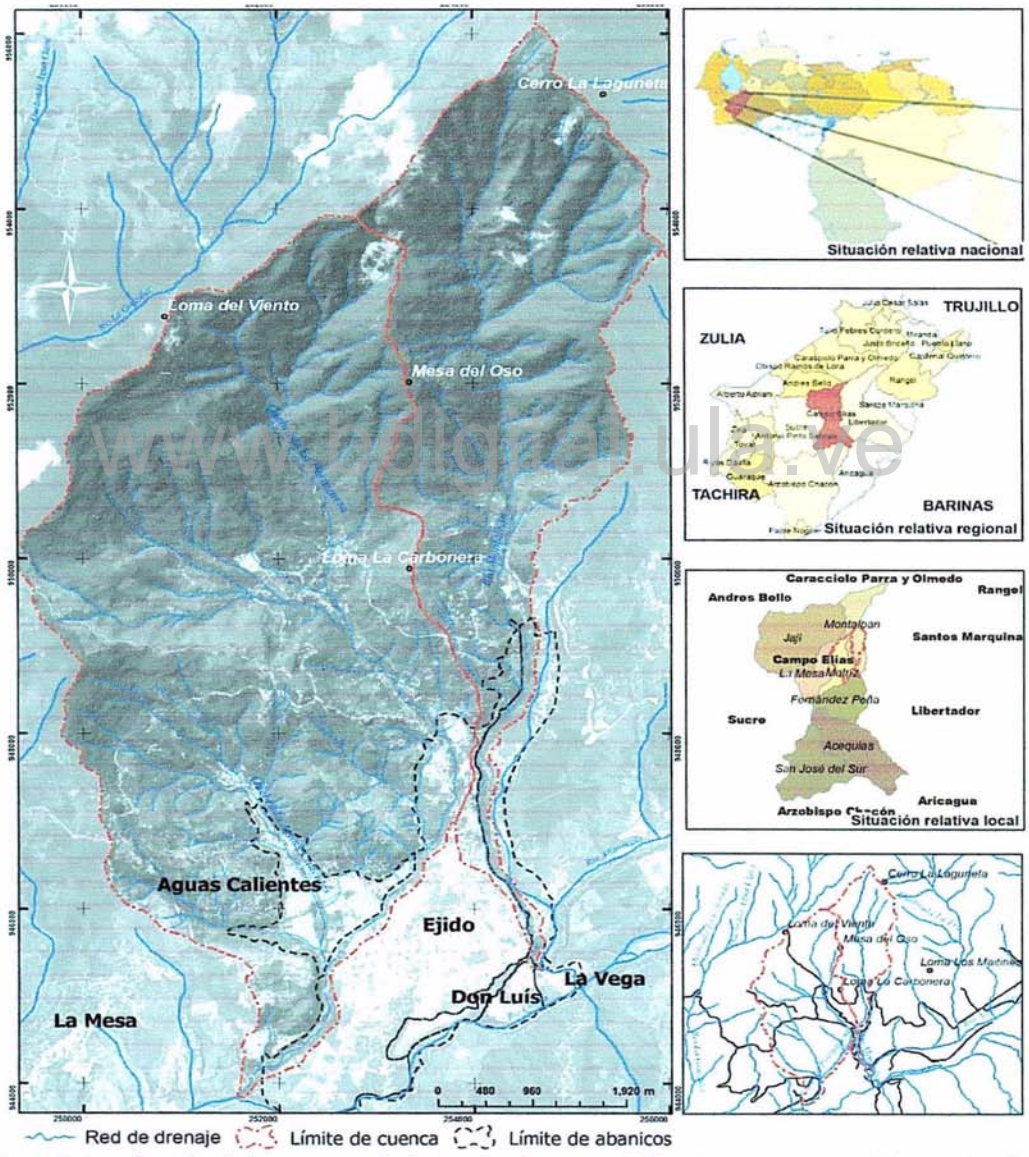


Figura 2. Localización de las cuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa. El área se localiza en los Andes centrales de Venezuela, al noroeste de la ciudad de Mérida (vertiente sureste de la Sierra de la Culata). Administrativamente forman parte del municipio Campo Elías del estado Mérida, parroquias Montalbán, Matriz y Fernández Peña.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

La litología del área está compuesta en su mayoría por rocas ígneo-metamórficas (granitos y gneises) de la Asociación Sierra Nevada (Precámbrico?), además de un porcentaje menor de rocas sedimentarias, con afloramientos de la Asociación Tostós (Paleozoico), Formaciones Sabaneta (Paleozoico), Palmarito (Paleozoico), La Quinta (Mesozoico), Río Negro (Mesozoico), Apón (Mesozoico), Aguardiente (Mesozoico) y Capacho (Mesozoico) (PMA:GCA -INGEOMIN, 2007; Cuervo, 2007).

El tipo de clima es mesotérmico húmedo (Andressen, 2007). La distribución mensual de la precipitación para las estaciones cercanas a las cuencas La Punta (serial 8049) y Mesa de Ejido (serial 3042), se caracterizan por presentar un régimen claramente bimodal, alcanzando los valores máximos en los meses de mayo y octubre (aspecto de suma importancia cuando se relaciona con la ocurrencia de eventos históricos en las cuencas).

www.bdigital.ula.ve

Las condiciones climáticas que se originan como consecuencia del gradiente altitudinal, se expresan en variaciones importantes de precipitación y temperatura. Estas variaciones, en conjunto con otros factores, permiten que se desarrollen diversos tipos de vegetación y unidades ecológicas. En el área se distinguen cuatro unidades ecológicas: selva semicaducifolia montana, selva nublada y páramo andino, en la vertiente húmeda; y en la vertiente seca la unidad de selva nublada es remplazada por el bosque siempre seco (Ataroff y Sarmiento, 2003).

Los suelos de esta región de los Andes en general se caracterizan por una evolución incipiente (salvo en los casos de materiales parentales heredados) y poco desarrollo. Los órdenes entisoles, inceptisoles, molisoles han sido identificados en perfiles asociados con los materiales litológicos que afloran en las cuencas (Oballos y Ochoa, 2008; Ochoa et al., 2008; y Ochoa et al., 2009).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

3.2. Estructuración de la información espacial

Esta etapa se considera preparatoria en la evaluación de amenaza, consiste fundamentalmente en la organización y sistematización de la información espacial que se utilizó como base en cada una de las etapas del análisis.

El enfoque metodológico presentado precisa de dos niveles de escala cartográfica. El primero de estos, a escala de semi-detalle (1:25.000) para el estudio de los procesos hidrogeomorfológicos en la cuenca y el segundo, a escala de detalle (1:5.000) para la simulación y zonificación de procesos hidrogeomorfológicos en los abanicos aluviales. Como producto final de esta fase se consolidó una base de datos espacial para el área de las microcuencas (1:25.000) y para el área de los abanicos (1:5.000) respectivamente (Cuadro 6).

www.bdigital.ula.ve

Cuadro 6. **Inventario de la información espacial utilizada en las distintas etapas del estudio**

Variable	Tipo	Técnica de colección	Descripción	Aplicabilidad
DEM25	Raster	Digitalización en pantalla de las hojas 5941-I-SO, 5941-I-NO, 5941 IV-NE, y 5941-IV-SE, a escala 1:25.000, elaboradas por la Dirección de Cartografía Nacional en el año 1975.	Raster generado de las curvas de nivel cada 20 m, con tamaño de pixel de 5 m	Generación de factores, dato de entrada en el HEC-GeoHMS para la creación del modelo de cuenca.
DEM5	Raster	Digitalización en pan-talla de las hojas ME-5f08 y ME-5g08, elaboradas por INPPRADEM (1996).	Raster generado de las curvas de nivel cada 5 m, con tamaño de pixel de 2,5 m.	Estimación de la pendiente en los abanicos, dato de entrada en formato ASCII para el modelo FLO- 2D.

... /... continúa

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

... /... continuación Cuadro 6

Variable	Tipo	Técnica de colección	Descripción	Aplicabilidad
		Factores		
Pendiente	Raster	DEM	Valores de inclinación de pendiente en grados, tamaño de pixel de 5 m.	Factor más importante que controla la ocurrencia de procesos gravitatorios.
Orientación	Raster	DEM	Orientación de las laderas	Refleja las diferencias en condiciones de humedad del suelo y tipo de vegetación
Curvatura (Profile)	Raster	DEM	Cálculo de la de la pendiente de la pendiente del terreno.	Aceleración y desaceleración del flujo (influencia erosión – depositación)
Litología	Raster	Digitalización del Mapa geológico (INGEOMIN, 2006), interpretación de imágenes.	Unidades litoestratigráficas: (Asociaciones y Formaciones que afloran en el área)	Inferir y analizar el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos.
Fallas (distancia)	Raster	Digitalización del Mapa geológico del (INGEOMIN, 2006), interpretación de imágenes.	Áreas buffer clasificadas en seis categorías	Influencia de tectónica en la estabilidad de los macizos rocosos.
Cobertura del suelo	Raster	Interpretación de imágenes satelitales y fotografías aéreas.	Mapa de clases de coberturas del suelo.	Grado de protección al suelo. Relación infiltración – escurrimiento. Movimientos de masa relacionados con causas antrópicas.
Curvatura (Planar)	Raster	DEM	Cálculo de la de la pendiente de la pendiente del terreno.	Áreas de convergencia y divergencia de flujos.
Inventario movimientos de masa	Vectorial –raster/ Tablas de datos	Interpretación de imá-genes - Mapas existen-tes - Trabajo de campo.	Sólo se incluyen deslizamientos superficiales activos y reactivados	Localización de las áreas potenciales de inicio de flujos de detritos.

... /... continúa

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

... /... continuación Cuadro 6

Variable	Tipo	Técnica de colección	Descripción	Aplicabilidad
		Otros datos		
Imagen satelital de alta resolución	SPOT 5	Satélite SPOT	Imagen SPOT pancromática (2008-09-02).	Interpretación de movimientos de masa y otros procesos geomorfológicos, clasificación de las coberturas de suelo y uso de la tierra, interpretación de estructuras geológicas.
Red de drenaje	Vectorial	Digitalización en pantalla de las hojas 5941-I-SO, 5941-I-NO, 5941I V-NE, y 5941-IV-SE, a escala 1:25.000, elaboradas por la Dirección de Cartografía Nacional del Ministerio de Obras Públicas en el año 1975.	Red de drenaje a escala 1:25.000 y 1:5000 para las cuencas.	Morfometría de la red de drenaje, características del sistema fluvial, rutas de arrastre de sedimentos.
N de Manning	Vectorial	Tablas de valores de n de Manning encontradas en la literatura	Valores asignados de n de Manning a las coberturas del suelo.	Los valores de rugosidad del canal, intervienen en la dinámica de desplazamiento de los flujos.
Precipitación	Tablas	Datos del MINAMB	Intensidades máximas registradas	Comparación con umbrales de precipitación. Cálculo de las curvas IDF, estimación de caudales máximos.

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

3.3. Análisis geológico – geomorfológico

Con el propósito de identificar áreas potenciales de movimientos de masa que pueden evolucionar como flujos de detritos se analizaron: las características geológicas que determinan aspectos acerca del comportamiento geomecánico de los macizos rocosos, los movimientos de masa y; las áreas con probabilidad espacial de ocurrencia de movimientos de masa superficiales (a partir de la aplicación de un modelo de susceptibilidad).

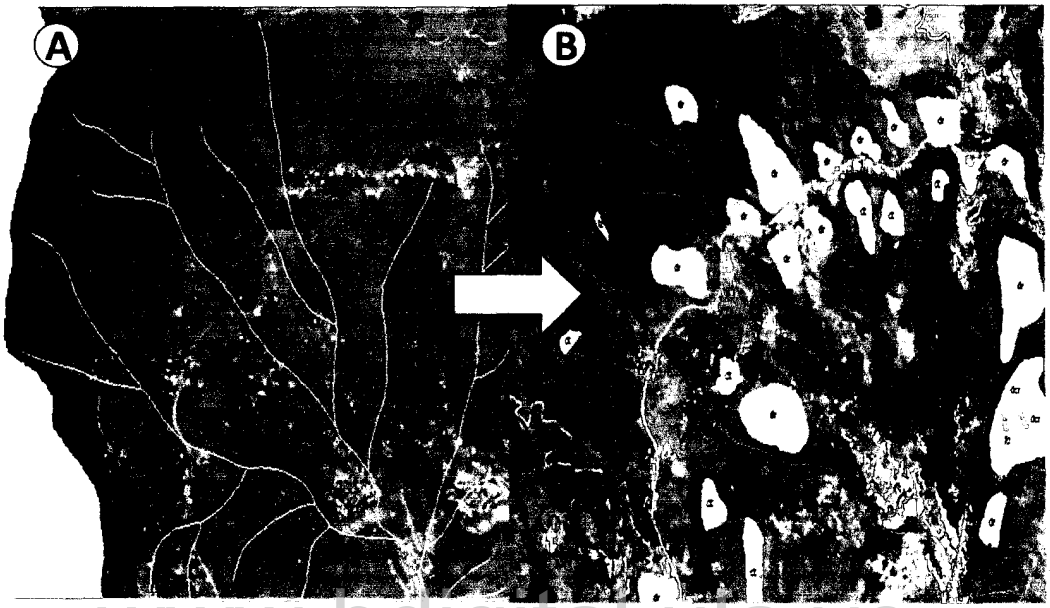
3.3.1. Inventario de movimientos de masa

El inventario de movimientos de masa es un instrumento fundamental en el proceso de predecir amenaza, principalmente porque proporciona información acerca de la localización y distribución de dichos movimientos. En este sentido, se considera que todo proyecto debe tener como punto de partida la elaboración de un inventario, tan completo como sea posible (Ibsen y Brunsden, 1996; Lang et al., 1999; Glade, 2001). En el área de estudio existen dos inventarios previos realizados con distintas técnicas (PMA: GCA, 2007; Cuervo, 2007).

www.bdigital.ula.ve

El inventario final, utilizado en esta investigación, se realizó combinando los inventarios mencionados anteriormente, con una nueva interpretación del material fotográfico e imágenes satelitales disponibles. El software ILWIS (ITC, 2010) se utilizó para la delimitación de los polígonos de los escarpes, a partir del uso de las fotografías aéreas e imágenes satelitales georreferenciadas (visualizadas como anaglifos) y el DEM (Figura 3). La base de datos originada, se configuró utilizando el formato propuesto por PMA: GCA (2007).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR



www.bdigital.uta.ve

Figura 3. Inventario de movimientos de masa. (A) Fragmento de imagen SPOT, visualizada como anáglifo con el software ILWIS; (B) Delimitación de los escarpes y áreas de movimientos de masa. Los polígonos en marrón representan áreas ocupadas por movimientos de masa.

3.3.2. Modelo de susceptibilidad

La probabilidad espacial de ocurrencia de movimientos de masa que pueden evolucionar como flujo de detritos, se obtuvo a partir de la aplicación de un método estadístico bivariado (*weight of evidence*). El mismo se diseñó utilizando siete mapas de factores o variables que controlan la ocurrencia y distribución de movimientos de masa (Figura 4). Dichos factores se seleccionaron tomando en cuenta: i) los resultados de investigaciones previas en el área, así como de otras investigaciones con objetivos similares (Thiery, et al. 2007; PMA: GCA-INGEOMIN, 2007; Cuervo, 2007; Blahut et al. 2010) y, ii) la aplicabilidad de los mismos de acuerdo con la escala de trabajo (Soeters y Van Westen, 1996; Van Westen et al. 2008), además de las características que por lo general influyen en la ocurrencia de movimientos de masa.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Este modelo de susceptibilidad, se diferencia de los aplicados por PMA-INGEOMIN (2007) y Cuervo (2007), en que se utilizan otros factores geoambientales y adicionalmente en que, durante el proceso de combinación de los mapas de factores con el inventario de movimientos de masa, sólo se consideran aquellos movimientos cuyas características y actividad sugieren que potencialmente puedan incorporar volúmenes importantes de sedimentos en los cauces.

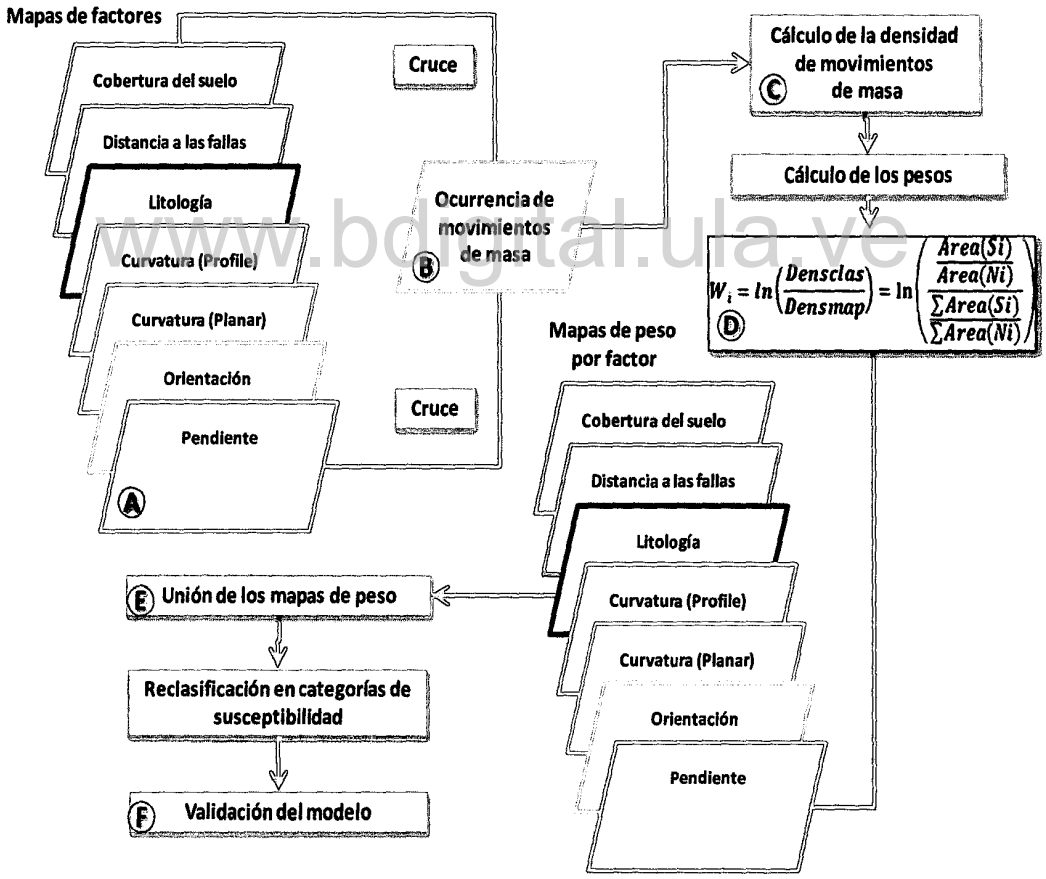


Figura 4. Flujograma para la evaluación de susceptibilidad a movimientos de masa aplicando el modelo estadístico bivariado. Los pasos realizados en este procedimiento contemplan: (A) Generación de los mapas de factores; (B) Inventario de movimientos de masa; (C) Cálculo de la densidad de movimientos de masa; (D) Cálculo de los pesos; (E) Combinación de los mapas de susceptibilidad y reclasificación; (F) Validación.

www.bdigital.ula.ve
C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

El mapa final de susceptibilidad se reclasificó en cinco clases (muy alta susceptibilidad, alta susceptibilidad, moderada susceptibilidad, baja susceptibilidad y nula). El funcionamiento del modelo y el poder de predicción de los mapas de susceptibilidad, se evaluó mediante la generación de curvas que relacionan el porcentaje acumulado de movimientos de masa con las áreas de susceptibilidad (Blahut et al., 2010).

3.4. Análisis hidrológico

Dentro de la clasificación de movimientos de masa, los flujos de detritos, son quizá uno de los mecanismos de movimientos de masa más complejos que existe, puesto que en su dinámica, además de los factores que controlan su ocurrencia en las áreas de inicio, intervienen otras características hidráulicas e hidrológicas, que definen aspectos tales como la distancia recorrida, el área de inundación e impacto por el flujo y la velocidad.

www.bdigital.ula.ve

En este sentido interesó conocer, además de los factores geológicos y geomorfológicos analizados en el apartado anterior, las características de la red de drenaje y los cauces principales de los sectores en estudio que influencian la dinámica fluvial, así como también las precipitaciones y caudales máximos esperados, en vista de que los flujos de detritos suelen observarse asociados a la ocurrencia de precipitaciones intensas y de larga duración.

3.4.1. Morfometría de cuencas

Como parte del análisis hidrológico de las cuencas en estudio, se determinaron una serie de parámetros morfométricos (Cuadro 7). Estos parámetros se analizaron con

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

el objeto de caracterizar el ambiente geomorfológico que incide en el sistema fluvial y, cuyas características determinan el comportamiento del escurrimiento así como el tránsito del hidrograma resultante de una precipitación dada.

Cuadro 7. **Parámetros morfométricos estimados para las microcuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa**

Parámetro	Método de cálculo	Definición	Unidad
Perímetro	Función de SIG	Longitud de la divisoria de aguas expresada	m o km^2
Longitud axial	Función de SIG	Distancia entre la confluencia o salida de la cuenca y el punto de la divisoria de agua más lejano al punto de salida.	m o km^2
Factor forma	$Ff = \frac{A}{Lax^2}$	Relación entre el área en km^2 de la cuenca y la longitud de la cuenca al cuadrado.	Adimensional
Longitud del cauce principal	Función de SIG	Es la distancia horizontal que recorre la corriente de mayor orden desde su inicio hasta el punto de salida.	m o km^2
Índice de compacidad	$K = 0{,}282\frac{P}{\sqrt{A}}$	Relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo que contenga la misma área de la cuenca hidrográfica.	Adimensional
Pendiente media del cauce principal	$\frac{(H1 - H2)}{L}$	Relación entre la altura total del cauce principal (cota máxima menos cota mínima) y la longitud del mismo.	m/m o %
Pendiente media de la cuenca	Función de SIG	Inclinación promedio de los cauces, indicador de la velocidad media de la escorrentía y su poder de arrastre y de erosión sobre la cuenca.	m/m o %
Velocidad media de escorrentía	$V = 3{,}668 \times i^{0{,}4886}$	Expresa el nivel de torrencialidad que puede presentar el cauce principal de una cuenca.	m/s
Relación de bifurcación	$Rb = \frac{Rb12 + Rb23}{2}$	Describe un aspecto de la organización de la red.	Adimensional
Densidad de drenaje	$Dd = \frac{\sum Lu}{A}$	Relación entre la longitud de los segmentos y el área	m/m o %

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

3.4.2. Precipitación

La precipitación se reconoce dentro de los eventos hidro-meteorológicos que generan mayor número de desastres en el mundo y es ciertamente, el principal detonante de flujo de detritos y deslizamientos superficiales. Por esta razón, su estudio se dirige a conocer los valores máximos probables y distribución dentro de la cuenca para determinar su influencia en los caudales máximos esperados y su relación con la ocurrencia de movimientos de masa.

a) Selección de las estaciones

En el análisis de la precipitación, el primer paso consistió en el inventario de estaciones cercanas a las cuencas. Una vez Se determinaron los polígonos de Thiessen (Figura 5) para establecer el área de influencia de cada una de las estaciones en el área de estudio.

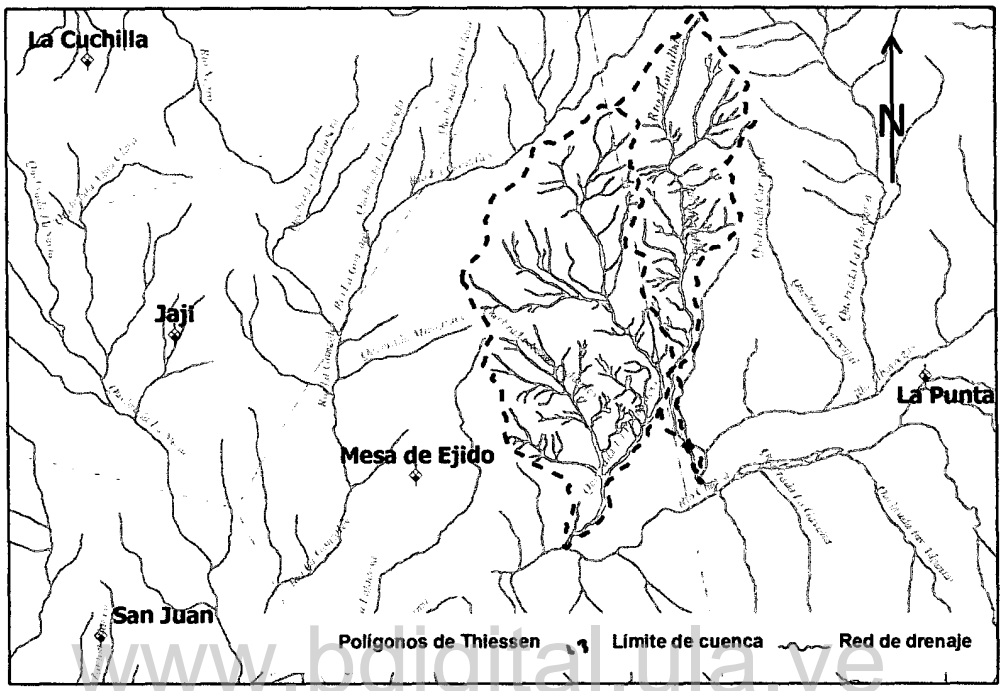
www.bdigital.ula.ve

Cuadro 8. **Estaciones pluviométricas más cercanas a las microcuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa**

Serial	Nombre	UTM WGS84	
		Norte	Este
3060	El Morro	934519,9646	259266,579
3169	Jají*	948723,2135	242796,709
3040	La Cuchilla*	955005,3552	240846,749
-	La Hechicera	954632,9304	262255,528
3045	La Punta*	947762,5692	259830,763
3047	Mérida-Aeropuerto	950960,7628	259481,871
3052	Mesa Bolívar	937771,5775	215186,876
3042	Mesa de Ejido*	945493,9566	248253,622
3170	San Juan*	941236,6962	240640,050
8057	Tostós*	931883,6547	242174,940

Nota. * Estaciones más cercanas a las cuencas en estudio.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR



www.bdigital.ula.ve

Figura 5. Área de influencia Polígonos de Thiessen. Calculados para las estaciones La Cuchilla (serial 3040), Jají (serial 3169), Mesa de Ejido (serial 3049), San Juan (serial 3170), La Punta (serial 8042) Tostós (serial 8057). Se observa como las estaciones Mesa de Ejido y La Punta, pueden tomarse como representativa de la precipitación en las cuencas de las quebradas La Portuguesa y Montalbán respectivamente.

b) *Análisis de frecuencia de lluvias extremas*

Se utilizaron los datos de las series de precipitación correspondientes a las estaciones Mesa de Ejido (serial 3049), La Punta (serial 8049), La Cuchilla (serial 3040), Jají (3169), San Juan (serial 3170) y Tostós (serial 8057), con el objeto de ajustar la función de probabilidad de Gumbel Tipo I utilizando el programa AJUSTEV3 (Duque, 2006) y obtener así: i) las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y Profundidad-Duración-Frecuencia (PDF) para duraciones de 15, 30, 60, 120 y 180 minutos y períodos de retorno (Tr) de 10, 20, 50, 100 y 500 años. La prueba de bondad de ajuste de la distribución de Gumbel se realizó con la probabilidad empírica de Weibull y el test de Smirnov-Kolmogorov; ii) la distribución espacial de

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

las lluvias máximas en las microcuencas (mapa de isoyetas) y; iii) los datos para la construcción de los hietogramas de diseño por el método del bloque alterno.

c) Distribución espacial de las lluvias máximas y umbrales de precipitación

Las lluvias (de corta o larga duración) son el factor detonante de la mayoría de flujo de detritos que se registran a nivel mundial. Esto ha conllevado a que gran parte de la investigación acerca de movimientos de masa, se concentre en la determinación de umbrales de movimientos de masa detonados por lluvias. Un umbral se puede definir como la intensidad de lluvia, la humedad del suelo o las condiciones hidrológicas, que cuando son alcanzadas o excedidas, detonan movimientos de masa (Crozier, 1996; Reichenbach et al., 1998; Guzzetti et al., 2008). Los parámetros generalmente utilizados, para la determinación de dichos umbrales son la intensidad y la duración.

www.bdigital.ula.ve

Con los datos de precipitación de lluvias máximas y el análisis de su distribución dentro de la cuenca, se evaluaron umbrales de precipitación seleccionados de la literatura (Guzzeti et al., 2008; CNR-IRPI, 2011), para determinar las áreas más susceptibles en las que se pueden detonar movimientos de masa por la ocurrencia de lluvias intensas.

d) Tormenta de diseño

Con el objeto de reflejar la distribución de la precipitación en el transcurso de las duraciones consideradas, se elaboraron dos hietogramas de diseño sólo para las estaciones de Mesa de Ejido (serial 3049) y La Punta (serial 8049) (Cuadros 9 y 10), a partir del método del bloque alterno (Chow et al., 1994). El procedimiento se basa en determinar los incrementos de lluvia entre duraciones sucesivas, a partir de las

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Cuadro 9. **Estimación del hietograma de diseño por el método de los bloques alternos estación Mesa de Ejido (serial 3042)**

MÉTODO DE LOS BLOQUES ALTERNOS							
Estación: Mesa de Ejido Serial: 3042							
Máximas lluvias de diseño según Gumbel (mm)							
Duración (min)	**Tr 2**	**Tr 5**	**Tr 10**	**Tr 20**	**Tr 50**	**Tr 100**	**Tr 500**
10	10,39	13,74	15,96	18,09	20,84	22,91	27,68
20	17,38	24,11	28,56	32,84	38,36	42,51	52,08
30	21,77	30,61	36,46	42,07	49,34	54,78	67,37
40	24,85	35,18	42,02	48,58	57,07	63,43	78,13
50	27,11	38,53	46,09	53,34	62,73	69,76	86,01
60	29,08	41,44	49,63	57,48	67,65	75,26	92,87
Incrementos de lluvia (mm)							
Duración (min)	**Tr 2**	**Tr 5**	**Tr 10**	**Tr 20**	**Tr 50**	**Tr 100**	**Tr 500**
0-10	10,4	13,7	16	18,1	20,8	22,9	27,7
10-20	6,99	10,37	12,6	14,75	17,52	19,6	24,4
20-30	4,39	6,50	7,9	9,23	10,98	12,27	15,29
30-40	3,08	4,57	5,56	6,51	7,73	8,65	10,76
40-50	2,26	3,35	4,07	4,76	5,66	6,33	7,88
50-60	1,97	2,91	3,54	4,14	4,92	5,5	6,86
Hietograma Alterno (mm)							
	Tr 2	**Tr 5**	**Tr 10**	**Tr 20**	**Tr 50**	**Tr 100**	**Tr 500**
5to	2,26	3,35	4,07	4,76	5,66	6,33	7,88
3ero	4,39	6,50	7,9	9,23	10,98	12,27	15,29
1ero	10,4	13,70	16,00	18,1	20,80	22,9	27,70
2do	6,99	10,37	12,6	14,75	17,52	19,6	24,40
4to	3,08	4,57	5,56	6,51	7,73	8,65	10,76
6to	1,97	2,91	3,54	4,14	4,92	5,50	6,86
Hietograma de diseño (mm/h)							
Duración (min)	**Tr 2**	**Tr 5**	**Tr 10**	**Tr 20**	**Tr 50**	**Tr 100**	**Tr 500**
10	13,56	20,10	24,42	28,56	33,96	37,98	47,28
20	26,34	39,00	47,40	55,38	65,88	73,62	91,74
30	62,40	82,20	96,00	108,60	124,80	137,40	166,20
40	41,94	62,22	75,60	88,50	105,12	117,60	146,40
50	18,48	27,42	33,36	39,06	46,38	51,90	64,56
60	11,82	17,46	21,24	24,84	29,52	33,00	41,16

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Cuadro 10. **Estimación del hietograma de diseño por el método de los bloques alternos estación La Punta (serial 8049)**

MÉTODO DE LOS BLOQUES ALTERNOS							
Estación: La Punta Serial: 8049							
Máximas lluvias de diseño según Gumbel (mm)							
Duración (min)	**Tr 2**	**Tr 5**	**Tr 10**	**Tr 20**	**Tr 50**	**Tr 100**	**Tr 500**
10	13,8	16,81	18,8	22,17	25	27,13	32,04
20	19,54	23,67	26,4	28,56	31,88	34,36	40,09
30	23,95	28,92	32,2	34,96	38,75	41,59	48,15
40	27,67	33,33	37,07	39,9	44,36	47,7	55,41
50	30,95	37,21	41,35	44,85	49,97	53,8	62,67
60	33,92	40,71	45,21	49,79	55,58	59,91	69,93
Incrementos de lluvia (mm)							
Duración (min)	**Tr 2**	**Tr 5**	**Tr 10**	**Tr 20**	**Tr 50**	**Tr 100**	**Tr 500**
0-10	13,8	16,8	18,8	22,2	25	27,1	32
10-20	5,74	6,86	7,6	6,39	6,88	7,23	8,05
20-30	4,41	5,25	5,8	6,4	6,87	7,23	8,06
30-40	3,72	4,41	4,87	4,94	5,61	6,11	7,26
40-50	3,28	3,88	4,28	4,95	5,61	6,1	7,26
50-60	2,97	3,5	3,86	4,94	5,61	6,11	7,26
Hietograma Alterno (mm)							
	Tr 2	**Tr 5**	**Tr 10**	**Tr 20**	**Tr 50**	**Tr 100**	**Tr 500**
5to	3,28	3,88	4,28	4,95	5,61	6,1	7,26
3ero	4,41	5,25	5,8	6,4	6,87	7,23	8,06
1ero	13,8	16,8	18,8	22,2	25	27,1	32
2do	5,74	6,86	7,6	6,39	6,88	7,23	8,05
4to	3,72	4,41	4,87	4,94	5,61	6,11	7,26
6to	2,97	3,5	3,86	4,94	5,61	6,11	7,26
Hietograma de diseño (mm/h)							
Duración (min)	**Tr 2**	**Tr 5**	**Tr 10**	**Tr 20**	**Tr 50**	**Tr 100**	**Tr 500**
10	19,68	23,28	25,68	29,7	33,66	36,6	43,56
20	26,46	31,50	34,8	38,4	41,22	43,38	48,36
30	82,8	100,80	112,8	133,2	150,00	162,60	192,00
40	34,44	41,16	45,06	38,34	41,28	43,38	48,30
50	22,32	26,46	29,22	29,64	33,66	36,66	43,56
60	17,82	21,00	23,16	29,64	33,66	36,66	43,56

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

precipitaciones calculadas en las curvas PDF, con el objeto de construir un hietograma "balanceado" para distintos períodos de retorno (Tr) seleccionados. El tiempo de duración de la tormenta (determinante sustancial del máximo caudal), se asumió igual al tiempo de concentración (Tc), el cual se calculó aplicando la ecuación empírica de Kirpich [1].

$$Tc = 0{,}9545\left(\frac{L^3}{H}\right)0{,}385 \quad [1]$$

Donde:

Tc= Tiempo de concentración en horas

L= Longitud del cauce principal, en km

H= Diferencia de elevación en m entre el comienzo del cauce principal y el punto estudiado.

3.4.3. Estimación de caudales máximos

www.bdigital.ula.ve

En esta fase se generaron los hidrogramas de entrada para cada uno de los puntos de simulación seleccionados. Dichos puntos se definieron tomando en consideración las características topográficas (pendiente), geomorfológicas (sección apical del abanico) e hidrológicas (caudales máximos obtenidos con el HEC-HMS), de la cuenca y red de drenaje, además de la disponibilidad de información cartográfica (Figura 6).

En la estimación de los hidrogramas, intervinieron numerosos métodos y técnicas, en su mayoría basados en la aplicación de herramientas de SIG, para la utilización del modelo de simulación hidrológica de distribución gratuita HEC-HMS 3.5 (US Army Corps of Engineers, 2010a).

El HEC-HMS (*Hydrologic Model System*) es un modelo de simulación hidrológica diseñado para simular caudales en sistemas de cuenca con patrones dendríticos. Puede ser utilizado en cuencas con diversas características geográficas, con el propósito de resolver diversos problemas de estudio entre los que destacan:

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

predicción de crecidas e inundaciones, mitigación de daños por inundaciones, disponibilidad de agua, drenajes urbanos (US Army Corps of Engineers, 2010b).

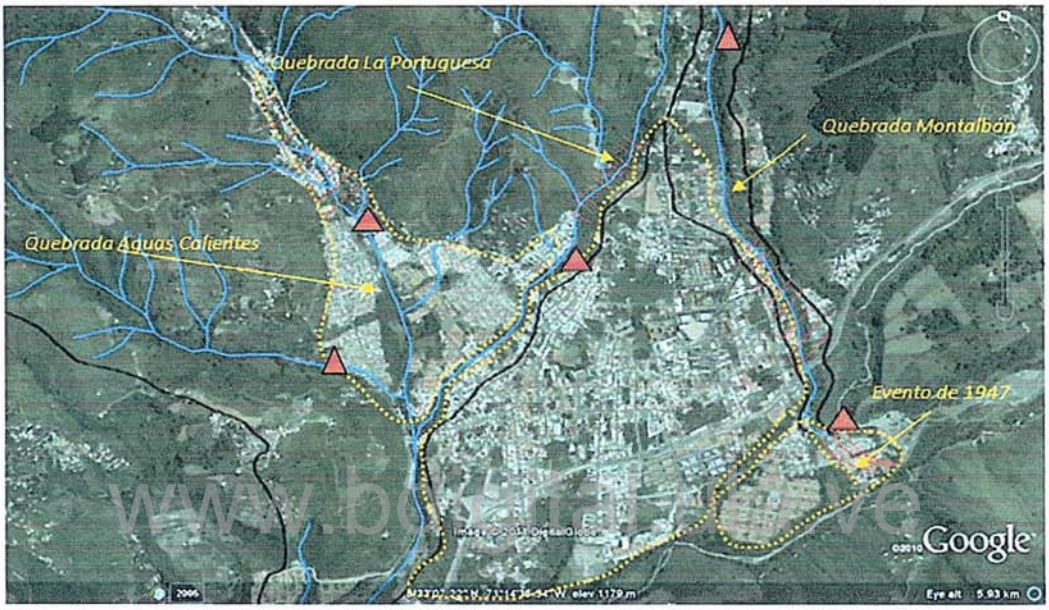


Figura 6. Esquema general de la superficie de los abanicos aluviales y representación de los puntos de simulación.

Puntos de simulación (Hidrograma de entrada FLO-2D)

Límite de abanico

Límite de cuenca

Red de drenaje

Para simular la respuesta hidrológica de una cuenca, HEC-HMS utiliza cuatro componentes diferentes: modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada. Una simulación calcula la transformación de lluvia a caudal en el modelo de la cuenca, dada la entrada del modelo meteorológico. Las especificaciones de control definen el periodo de tiempo durante el cual se realizará la simulación y el intervalo de tiempo a utilizar. Los componentes de los datos de entrada, tales como las series temporales, tablas y datos por celdas son requeridos como parámetros o condiciones de contorno tanto en el modelo de la cuenca como en el meteorológico.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

a) Datos de entrada para el modelo de cuenca

Como dato de entrada, se empleó un modelo de elevación digital (DEM). Es importante destacar que se trata del mismo DEM utilizado como insumo para la generación de los mapas de factores durante la aplicación del modelo de susceptibilidad a movimientos de masa, corregido a través de un procedimiento de reacondicionamiento del terreno.

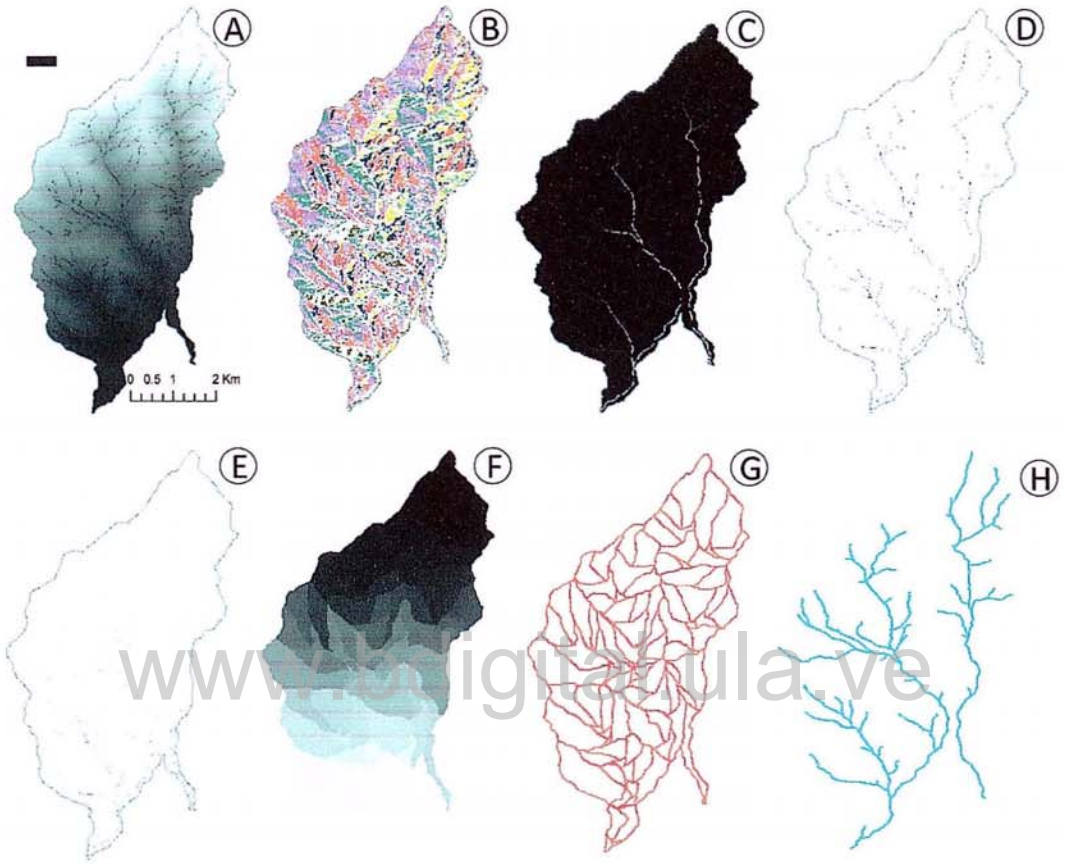
Con el objeto de visualizar la información espacial, documentar características de la cuenca, realizar análisis espaciales, delinear cuencas y ríos así como construir las entradas para la aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS 3.5 se utilizó la extensión HEC-GeoHMS 4.2 (US Army Corps of Engineers, 2009) desarrollada para ArcGis 9.2.

www.bdigital.ula.ve

b) Pre-procesamiento del terreno:

Los productos generados en esta fase, consistieron en ocho conjuntos de datos (en formato raster y vectorial) que describen los patrones de drenaje de las cuencas y a partir de los cuales se delinearon las subcuencas y segmentos de escurrimiento así como la red de drenaje (Figura7). Cada uno de estos productos, se generan secuencialmente, con la extensión *ArcGis* Hydrotools, para ArcGis 9.2 y *HEC-GeoHMS.*

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR



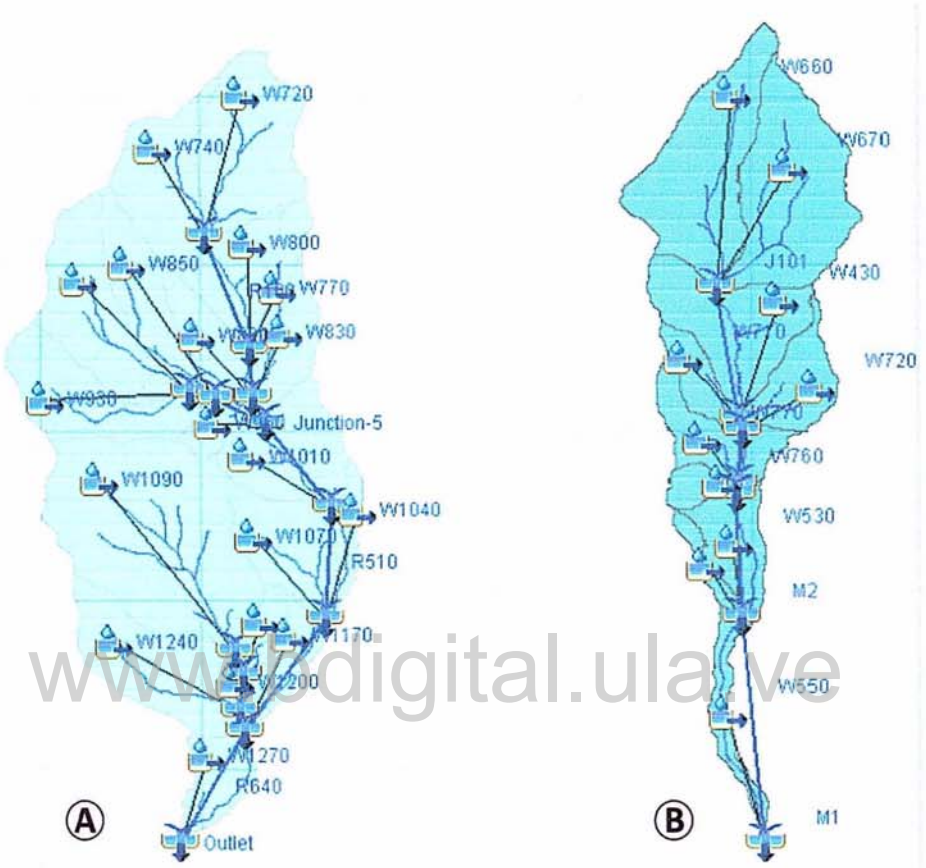
www.bdigital.ula.ve

Figura 7. Preprocesamiento del terreno. (A) DEM corregido; (B) Dirección de flujo; (C) Acumulación de flujo; (D) Definición de cauces; (E) Segmentación de cauces; (F) Delineación de cuencas; (G) Delineación de cuencas en polígonos; (H) Líneas de red de drenaje.

c) Características físicas de la cuenca y su red de drenaje (modelo de cuenca):

El modelo de la cuenca representa los elementos de la cuenca física (Figura 8). En este se incluyen y se conectan los elementos hidrológicos, a los cuales se les asignaron parámetros para simular los procesos físicos que se producen en la cuenca. En este caso, se utilizó como modelo de pérdidas el número de curva (CN) y el método de onda cinemática para el tránsito de los caudales.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR



www.bdigital.ula.ve

Figura 8. Modelo de cuenca generado con HEC-HMS. (A) Modelo de cuenca de la quebrada La Portuguesa; (B) Modelo de cuenca de la quebrada Montalbán.

d) Cálculo del número de curva (CN) para el modelo de pérdidas

Para el modelo de pérdidas se utilizó el método de número de curva. El método del número de curva (CN) fue desarrollado por el Servicio de Conservación de suelos de los Estados Unidos. Este método se basa en la asignación de un coeficiente, que permite establecer la relación lluvia-escorrentía, con el objeto de estimar la precipitación efectiva, es decir la cantidad de precipitación de la cuenca que se convierte en lámina escurrida, en una cuenca determinada.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

El valor de este coeficiente depende principalmente de tres factores: i) la cobertura vegetal, ii) los tipos de suelo y, iii) la humedad antecedente (Ver detalles en USDA-NRCS, 2004). En este trabajo, estos valores se obtuvieron siguiendo tres pasos que se describen a continuación:

- *Paso 1:* Estimación del CN, para las distintas coberturas de suelo identificadas en las cuencas. Se asignaron valores de las tablas desarrolladas por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos del año 1986 (Apéndices 1 y 2) a las distintas coberturas de suelo identificadas en las cuencas. Seguidamente, a partir de dichos valores, se estimaron los CN para una condición de humedad III (Chow et al., 1988), considerando que la mayoría de eventos de flujo de detritos registrados a nivel mundial se desarrollan bajo condiciones de humedad antecedente. Finalmente, los valores resultantes se corrigieron por pendiente del terreno (Arnold y Williams, 1995) (Cuadro 11, Apéndice 3).

www.bdigital.ula.ve

Cuadro 11. **Números de curva (CN) estimados para el área de estudio, corregidos por pendiente para condición de humedad III**

Subtipo de uso del suelo	Correspondencia con clasificación USDA-NRCS	Pendiente media (%)	Condición hidrológica	CN3s por Grupo Hidrológico de Suelos			
				A	B	C	D
Cultivos alineados y no alineados	Cultivos no alineados, o con surcos pequeños	37,06	Mala	86,10	91,73	95,02	96,45
Bosque fuertemente intervenido	Bosques	51,35	Mala	71,50	86,67	92,18	94,64
Bosque moderadamente intervenido	Bosques	52,36	Media	62,46	83,04	90,33	93,04
Bosque levemente intervenido	Bosques	73,73	Buena	55,32	79,62	88,84	92,18

... /... continúa

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

... /... continuación Cuadro 11

Subtipo de uso del suelo	Correspondencia con clasificación USDA-NRCS	Pendiente media (%)	Condición hidrológica	CN3s por Grupo Hidrológico de Suelos			
				A	B	C	D
Bosque sin intervención aparente	Bosques	63,36	Buena	55,32	79,62	88,84	92,18
Bosques intervenidos en margen de ríos	Bosques	36,92	Media	62,46	83,04	90,33	93,04
Pastizal – cultivos – forestal	Mezcla de bosques y hierba (huerto o árboles frutales)	44,68	Buena	57,81	81,72	89,84	93,04
Agrícola – forestal	Prados cubiertos permanentemente con hierba, protegidos del pastoreo	36,10	N/A	55,32	81,72	89,35	92,61
Ganadero – forestal (montes con pastos)	Montes con pastos (MP)	42,64	Media	62,46	83,04	90,33	93,04
Recreacional: espacios abiertos		26,59	N/A	74,97	88,31	93,04	95,02
Residencial de baja densidad	Distritos residenciales < 500 m	18,25	N/A	91,28	95,39	97,11	97,75
Cobertura vegetal pastizal	Pastos, prados o forraje permanente para pastoreo	41,74	Media	74,97	88,31	93,04	95,02
Cobertura vegetal paramo	Matorral, mezcla de matorral y maleza siendo el matorral el elemento prioritario	62,98	Buena	55,32	74,13	86,10	90,33
Sin cobertura vegetal – suelo desnudo	Suelos desnudos	39,48	N/A	92,18	95,75	97,44	98,35
Sin cobertura vegetal – afloramiento rocoso	Caminos en tierra	120,80	N/A	82,39	90,81	94,25	95,75

Nota. N/A= No aplica

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

- *Paso 2:* determinación del grupo hidrológico de suelos. Para el área de estudio, no están disponibles mapas de suelos a escala semi-detallada o detallada que permitan asignar los grupos hidrológicos de suelo, con base en la clase textural. Sin embargo, existen algunos trabajos en la literatura, en los cuales se han descrito perfiles de suelos originados bajo las mismas condiciones geológicas y climáticas que predominan en el área de las cuencas (Oballos y Ochoa, 2008; Ochoa et al., 2008; y Ochoa et al., 2009). En este sentido, se infirieron clases texturales (Apéndice 4) para cada una de las unidades litoestratigráficas que afloran en el área y se determinaron los grupos hidrológicos de suelo.

- *Paso 3:* como último paso, se realizó un proceso de análisis espacial (función incluida en el HEC-GeoHMS 4.2) para combinar espacialmente, los mapas de subtipo de uso del suelo y grupo hidrológico de suelos. Al resultado de la unión se le adjuntaron los valores por números de curva corregidos, para cada grupo hidrológico de suelos definidos en el Cuadro 11.

www.bdigital.ula.ve

e) Datos de entrada para el modelo HEC-HMS – Componentes del HEC-HMS

De los procedimientos aplicados para la creación del modelo de cuenca y la aplicación de los modelos matemáticos para la simulación de los procesos físicos en el HEC-GeoHMS, se generaron el conjunto de parámetros utilizados para la simulación de caudales máximos (Cuadros 12 y 13). Como modelo meteorológico se utilizaron los hietogramas de diseño descritos en los Cuadros 9 y 10, con series de precipitaciones para períodos de retorno (Tr) 10, 20, 50, 100 y 500 años. Se simularon caudales para intervalos de tiempo de un minuto durante 5 horas.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Cuadro 12. **Parámetros de entrada para la simulación de caudales máximos (onda cinemática) con HEC-HMS en la cuenca de la quebrada La Portuguesa**

ID	A	W-Sl	Pl	L	Pl-Sl	n	% A	CN-pl	Imp-pl	Ch-L	Ch-Sl
W720	2,50	71,95	1	275,39	0,78	0,761	33	78,70	0,00	3016,74	0,39
			2	554,03	0,69		67	82,98	0,00		
W740	1,84	77,40	1	640,82	0,78	0,735	89	79,05	0,00	2559,26	0,43
			2	78,55	0,70		11	81,14	0,00		
W770	0,45	57,63	1	69,27	0,51	0,717	37	82,70	0,00	2409,58	0,32
			2	116,84	0,61		63	83,93	0,00		
W800	1,39	64,46	1	412,69	0,70	0,646	69	84,24	0,00	2341,18	0,36
			2	183,06	0,53		31	84,29	0,00		
W820	0,98	49,75	1	55,59	0,50	0,328	16	82,70	0,00	2778,31	0,17
			2	297,7	0,50		84	85,63	0,00		
W830	0,95	43,53	1	98,91	0,43	0,445	29	87,32	0,00	2750,94	0,1
			2	245,13	0,44		71	86,79	0,00		
W840	2,25	53,63	1	499,27	0,53	0,641	80	80,89	0,00	3592,01	0,26
			2	128,26	0,54		20	84,34	0,00		
W850	1,35	55,13	1	130,07	0,53	0,660	35	81,86	0,00	3635,51	0,29
			2	241,43	0,56		65	84,04	0,00		
W930	1,95	34,85	1	301	0,34	0,190	57	85,71	0,00	3688,20	0,17
			2	228,27	0,36		43	85,10	0,00		
W960	0,50	38,38	1	120,17	0,42	0,198	38	84,16	0,00	1554,20	0,21
			2	199,77	0,36		62	89,54	0,00		
W1010	1,77	46,49	1	344,03	0,47	0,334	50	81,44	0,00	2584,53	0,16
			2	339,85	0,46		50	83,14	4,68		
W1040	0,58	22,22	1	100,74	0,21	0,268	46	89,82	25,54	2620,11	0,09
			2	120,46	0,23		54	92,29	28,51		
W1070	1,49	47,00	1	247,74	0,53	0,244	42	78,49	0,00	2523,28	0,13
			2	343,75	0,43		58	82,64	1,30		
W1090	5,47	49,25	1	611,15	0,7	0,358	49	84,24	8,35	4359,00	0,19
			2	644,68	0,53		51	84,29	3,84		
W1170	0,72	24,42	1	206,82	0,27	0,104	68	86,59	62,95	2383,28	0,14
			2	95,83	0,19		32	89,88	51,04		
W1190	0,41	43,80	1	154,14	0,46	0,131	57	83,82	22,64	1523,42	0,14
			2	115,12	0,33		43	77,32	21,03		
W1200	0,12	9,00	1	99,43	0,1	0,310	56	87,52	21,30	663,42	0,04
			2	77,48	0,33		44	88,43	33,29		
W1240	2,30	39,79	1	303,6	0,37	0,253	47	88,32	3,43	3566,51	0,18
			2	342,11	0,42		53	85,72	12,24		
W1270	0,89	28,84	1	282,3	0,33	0,191	79	92,58	17,28	2513,44	0,09
			2	73,47	0,12		21	88,24	22,82		

Nota. ID = sector de escurrimiento; A = área (km^2); W-Sl = pendiente de sector de escurrimiento (%); Pl = segmento de escurrimiento; L = longitud de segmento (m); Pl-Sl = pendiente de segmento (m/m); n = n de Manning; % A = porcentaje de área; CN-pl = número de curva de segmento; Imp-pl = % de impermeabilidad de segmento; Ch-L = longitud del canal (m); Ch-Sl = pendiente del canal (m/m).

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Cuadro 13. **Parámetros de entrada para la simulación de caudales máximos (onda cinemática) con HEC-HMS en la cuenca de la quebrada Montalbán**

ID	A	W-Sl	Pl	L	Pl-Sl	n	% A	Cn-Pl	Imp-pl	Ch-L	Ch-Sl
W660	3,25	82,72	1	558,60	0,86	0,593	71	77,84	0,00	4115,3	0,37
		82,72	2	226,01	0,74	0,597	29	81,69	0,00		
W670	3,25	69,1	1	238,12	0,69	0,608	27	82,67	0,00	3724,23	0,33
		69,1	2	642,11	0,69	0,707	73	82,39	0,00		
W430	2,25	81,14	1	374,98	0,82	0,797	51	83,58	0,00	3033,87	0,11
		81,14	2	367,50	0,80	0,799	49	82,28	0,00		
W710	0,63	65,36	1	223,27	0,67	0,683	74	86,23	0,00	2071,15	0,42
		65,36	2	73,80	0,63	0,787	24	84,81	0,00		
W720	1,07	61,22	1	115,61	0,66	0,715	27	82,96	0,00	2445,26	0,37
		61,22	2	324,90	0,59	0,667	73	81,90	0,00		
W770	1,18	49,53	1	163,55	0,46	0,390	36	88,23	8,77	2575,44	0,33
		49,53	2	294,51	0,52	0,522	64	85,85	0,00		
W760	0,37	48,05	1	54,06	0,43	0,327	16	85,73	0,00	1114,04	0,18
		48,05	2	274,68	0,49	0,322	84	85,57	0,00		
W540	0,29	39,39	1	53,81	0,39	0,515	36	88,91	0,00	1946,09	0,14
			2	94,47	0,40	0,380	64	81,59	0,00		
W530	1,09	39,72	1	267,37	0,46	0,193	67	85,37	0,00	2761,47	0,11
		39,72	2	128,96	0,28	0,368	33	84,02	3,13		
W550	0,68	21,27	1	96,69	0,24	0,107	52	94,64	28,28	3702,26	0,14
			2	88,02	0,18	0,208	48	89,00	47,65		

Nota. ID = sector de escurrimiento; A = área (km^2); W-Sl = pendiente de sector de escurrimiento (%); Pl = segmento de escurrimiento; L = longitud de segmento (m); Pl-Sl = pendiente de segmento (m/m); n = n de Manning; % A = porcentaje de área; CN-pl = número de curva de segmento; Imp-pl = % de impermeabilidad de segmento; Ch-L = longitud del canal (m); Ch-Sl = pendiente del canal (m/m).

www.bdigital.ula.ve

3.5. Estudio del comportamiento de los procesos geomorfológicos en la superficie de los abanicos aluviales

Los procesos geomorfológicos en la superficie del abanico, se zonificaron tomando en consideración dos enfoques: i) *heurístico*, en el cual se analiza la evidencia geomorfológica en la superficie de los abanicos, con base en la observación de diferentes indicadores; ii) *determinístico*, en el cual se simula el comportamiento de los flujos de detritos y crecidas máximas con el modelo FLO 2D, a partir de un conjunto de datos de entrada de tipo hidráulico y topográfico, principalmente.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

3.5.1. Zonificación geomorfológica

Con el fin de comprender las características de los eventos históricos que han influido en la geomorfología actual del área e inferir aspectos acerca de la dinámica de los procesos, se interpretaron conjuntamente los datos de los afloramientos de los depósitos sedimentarios en distintas secciones del abanico (levantados en campo por PMA: GCA-INGEOMIN, 2007), con la evidencia geomorfológica de indicadores de flujos de detritos identificados en imágenes y fotografías aéreas. Esta interpretación permitió clasificar la superficie de los abanicos aluviales, en distintas categorías asociadas a la dinámica de los procesos fluviotorrenciales y su posible impacto en la superficie de los abanicos.

www.bdigital.ula.ve

En este sentido, se utilizaron algunos aspectos de la zonificación propuesta por Kellerhals y Church (1990), que se basa fundamentalmente en el reconocimiento de indicadores (evidencias) de flujos de detritos e inundaciones por crecidas de desborde, para clasificar la superficie del abanico aluvial en diferentes zonas de impacto y probabilidad de ocurrencia. La revisión de la literatura y la interpretación de las fotografías aéreas a escala detallada (1:5.000), constituyen las técnicas más importantes utilizadas en esta etapa.

3.5.2. Aplicación del modelo FLO- 2D

Con la intención de simular caudal líquido y con concentraciones de sedimentos en la superficie de los abanicos aluviales, para los diferentes Tr (10, 50 y 100), se utilizó el modelo bidimensional de diferencias finitas FLO-2D versión 2003.6.30 (O'Brien, 2003a).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Como datos de entrada para la ejecución del modelo se emplearon (Figura 9): i) la topografía digital del terreno, representada por un DEM con un tamaño de pixel de 2,5 m, desarrollado a partir de la interpolación de las curvas de nivel de un mapa topográfico (INPRADEM, 1996), para equidistancias de 5 m; ii) coeficientes de la rugosidad de la planicie de inundación (en formato shapefile), establecidos a partir de diferentes tablas para las coberturas del suelo (Apéndice 5). Los coeficientes de n de Manning asignados varían entre 0,012 y 0,08; iii) hidrogramas de caudales líquidos (generados en punto 3.4.3) y sólidos (concentración por volumen) para los diferentes puntos de simulación (ver datos en carpeta Hidrogramas para FLO-2D en CD anexo) y; iv) propiedades reológicas de la mezcla agua-sedimento (Cuadro14).

A partir de los datos de entrada descritos en el párrafo anterior, se generaron los archivos del FLO-2D en el entorno GDS (Grid Developer System GDS): FPLAIN.DAT, CADPTS.DAT, CONT.DAT, TOLER.DAT e INFLOW.DAT (Ver detalles para la estructuración de archivos en *Manual del Usuario FLO-2D versión 2003.06*; O'Brien, 2003b).

www.bdigital.ula.ve

El procedimiento en el GDS para la creación del proyecto de simulación consistió en: i) importar el DEM en formato ASCII y archivo shapefile de los n de Manning; ii) creación de la cuadrícula (grid) con un tamaño de 20 m; iii) establecimiento del dominio computacional (se tomó como criterio para su definición la pendiente del terreno); iv) interpolación de las elevaciones del terreno; v) asignación de elementos de entrada (hidrogramas de caudales líquidos y sólidos) y salida y; v) cómputo de los n de Manning para la planicie y el canal en la cuadrícula.

Con el fin de optimizar los resultados del modelo y comprobar que las simulaciones ejecutadas no tuvieran errores, se realizaron en principio, un conjunto de

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

simulaciones simples para el ajuste de parámetros por ensayo y error aplicando una serie de prácticas recomendadas para la optimización del modelo (FLO-2D Software, 2010): i) *verificación de la conservación del volumen*. En el archivo SUMMARY.OUT el error de la conservación del volumen no puede ser mayor de 0,001%; ii) *ajuste del número de Froude*. En los casos en los que la simulación preliminar presentaba problemas de estabilidad numérica se asignó un valor comprendido entre 0,7 – 0,95 de número de Froude, adecuados para simulaciones en superficies de abanicos aluviales con pendiente pronunciada (FLO-2D Software, 2010).

www.bdigital.ula.ve

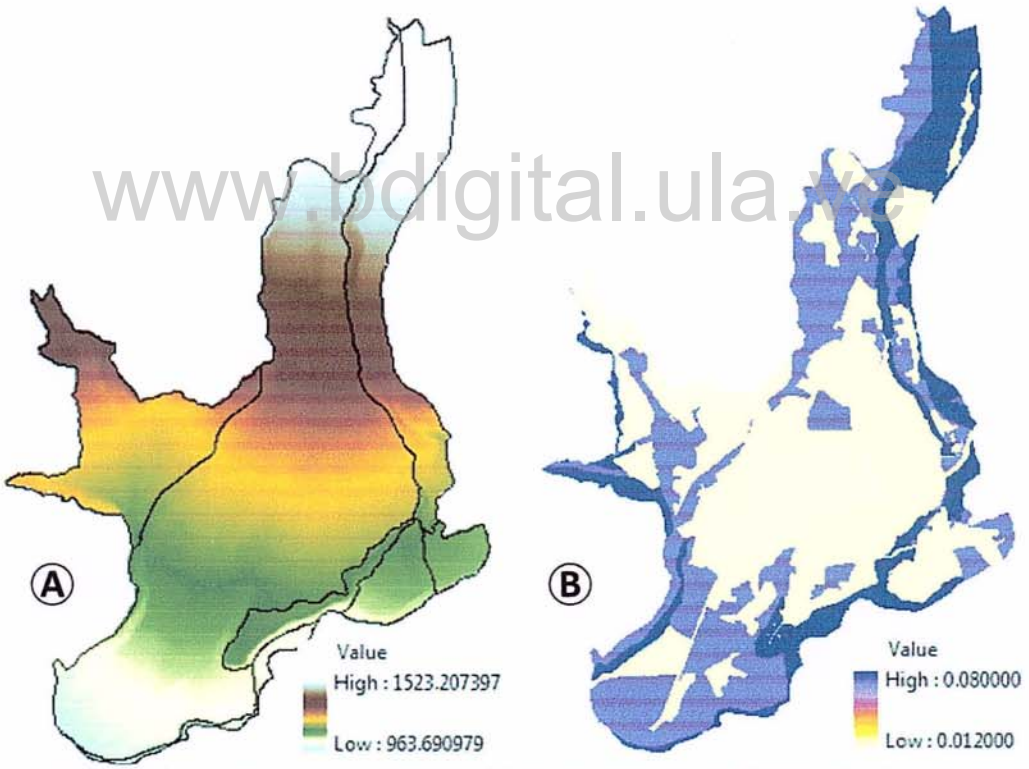


Figura 9. Datos de entrada para la aplicación del modelo FLO-2D. (A) Modelo de elevación digital (DEM 5); (B) n de Manning asignados a las coberturas de uso en el área de los abanicos.

Finalmente, con los resultados de la simulación, se generaron los mapas de profundidades de flujo y velocidades máximas de caudal líquido y sólido, para cada

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

período de retorno (10, 20, 50 y 100 años), a través de la interfaz MAPPER del FLO-2D. Los mapas finales se integraron en el software ArcGis 9.2.

Cuadro 14. **Parámetros de entrada para la simulación de caudales sólidos con el modelo FLO-2D**

Tipo de Proceso[1]	Concentración por volumen[2] (Cv)	Características del flujo	Esfuerzo de fluencia [3]		Viscosidad dinámica [3]	
			α	β	A	B
Flujos de detritos	0.50	Valores de transición entre flujos hiper-concentrados y de detritos. Los materiales están algo mezclados y se dispersan en la superficie del abanico.	0,000707	29,8	0,00632	19,9
Flujos hiper-concentrados	0.35	Las gravas y cantos rodados viajan como carga de fondo; difu-sión casi completa en la superficie. Flujo de dos fases.	0,000707	29,8	0,00632	19,9

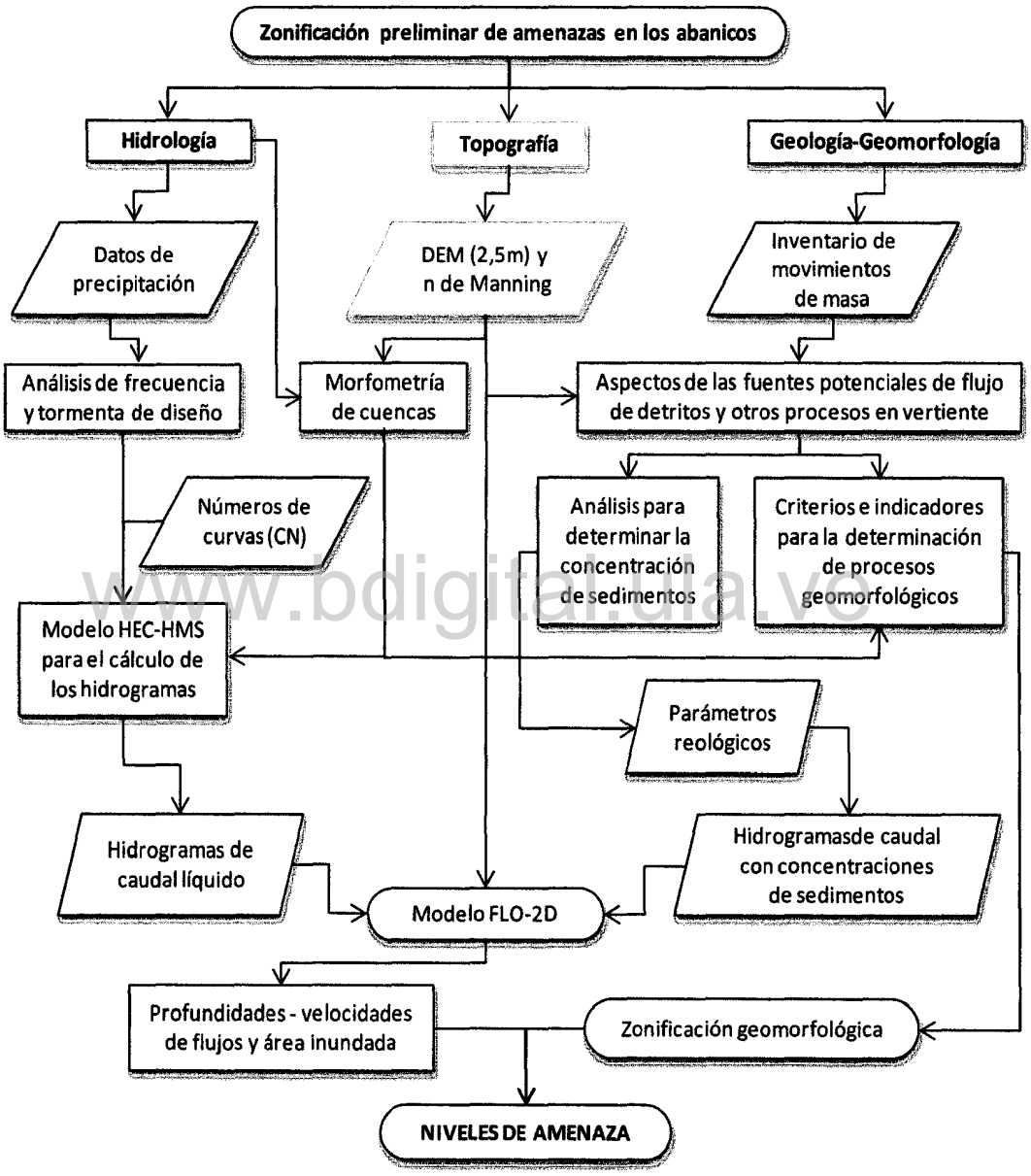
Nota. (1) Los tipos de proceso se definieron con base en la clasificación de Costa (1988). (2) Valor utilizado para calcular el volumen total de la mezcla agua-sedimento en el hidrograma. (3) Los valores reológicos de la mezcla se establecieron probando distintas reologías (FLO-2D Software, 2010, p. 53), y fundamentándose en la relación encontrada por Hsu et al. (2010); en la que después de varias pruebas de calibración encontraron que existe una relación entre la pendiente en el ápice del abanico, la litología predominante y el esfuerzo de fluencia.

www.bdigital.ula.ve

3.6. Zonificación de amenaza

En la última etapa de la metodología, se generó una zonificación de amenazas, en la cual se expresa la probabilidad espacial y temporal de ocurrencia de los procesos hidrogeomorfológicos en el abanico, así como el tipo, intensidad-magnitud, la velocidad y la distancia de desplazamiento de dichos procesos. Los criterios para la definición de los niveles de amenaza, se establecieron combinando la propuesta de

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR



www.bdigital.ula.ve

Figura 10. Flujograma para la zonificación de amenaza en los abanicos aluviales.

la Agencia Suiza (OFEE et al., 1997), con criterios definidos por otros autores (Kellerhals y Church, 1990; Jakob, 2005).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

La cartografía final, es el resultado de la combinación de la zonificación obtenida en la aplicación del modelo numérico (clasificados en niveles de acuerdo con la matriz de amenaza), con los resultados de la zonificación geomorfológica. Como producto de esta etapa, se obtuvo un mapa de amenaza preliminar con información para los distintos períodos de retorno (Tr) de 50 y 100 años. En la Figura 10 se presenta el flujograma de de los pasos realizados.

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Capítulo 4. Resultados y análisis

La dinámica de los flujos de detritos y otros procesos hidrogeomorfológicos que afectan la superficie de los abanicos aluviales, es absolutamente compleja si se compara con otros tipos de movimientos de masa. Principalmente, porque además de los factores que controlan la ocurrencia de dichos movimientos en las laderas, intervienen una serie de características hidrológicas e hidráulicas que definen aspectos tales como: la velocidad del flujo, el desplazamiento, las características y tipo de depósitos, así como su capacidad de daño.

En este capítulo, se analizan algunos de los aspectos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos, relacionados con la probabilidad espacial y temporal de ocurrencia de flujos de detritos y otros procesos geomorfológicos, a partir de los resultados de la metodología descrita en el capítulo anterior.

www.bdigital.ula.ve

4.1. Aspectos geológicos- geomorfológicos que controlan la ocurrencia de flujos de detritos y otros procesos en las vertientes

La litología del área de estudio está compuesta por afloramientos de edades y composiciones mineralógicas variadas (Apéndice 6). Por lo tanto, el comportamiento geomecánico de los macizos es también variado y está controlado tanto por el tipo de roca y su composición mineralógica, como por las características estructurales del área (Cuadro 15).

Las rocas duras del Precámbrico? (Asociación Sierra Nevada) afloran en la mayor parte del área de estudio, las mismas presentan un alto grado de metaformismo

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

como consecuencia de las deformaciones que sufrió este complejo litológico durante los procesos de orogénesis.

La presencia de amplios afloramientos de gneises bandeados, gneises graníticos y augengneises de la Asociación Sierra Nevada en la sección alta, que superan el 60,88% del área en la cuenca de Montalbán y 39,11% en la cuenca de La Portuguesa, aunado al diaclasamiento de los macizos, propicia la generación de volúmenes importantes de detritos, principalmente de fragmentos de roca en su mayoría de gran tamaño, posiblemente controlados por el espaciamiento de los planos de diaclasas (PMA: GCA –INGEOMIN, 2007).

Esta condición favorece por un lado, la generación de grandes bloques que se movilizan como caídas y avalanchas de rocas (apreciable particularmente en la cuenca alta de Montalbán) que se incorporan a los cauces, y por otro la infiltración de agua por las discontinuidades acelerando los procesos de alteración y profundizando así los perfiles de meteorización.

www.bdigital.ula.ve

Otro aspecto relevante de la estabilidad de los macizos en esta sección de la cuenca, es la presencia de un afloramiento rocoso (secuencia arenisca - lutita) de la Formación Aguardiente que define un escarpe con inclinaciones superiores a los 40°. En general, se trata de una roca competente, por lo tanto, la estabilidad de estos macizos está definida por la estructura geológica y por las discontinuidades que presentan. Entre las que destacan, el diaclasamiento y las zonas de contacto de la secuencia lutita-arenisca (Figura 11).

En la sección media de las cuencas la litología es más variada, particularmente en la quebrada La Portuguesa, donde aflora un mayor porcentaje de rocas sedimentarias,

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

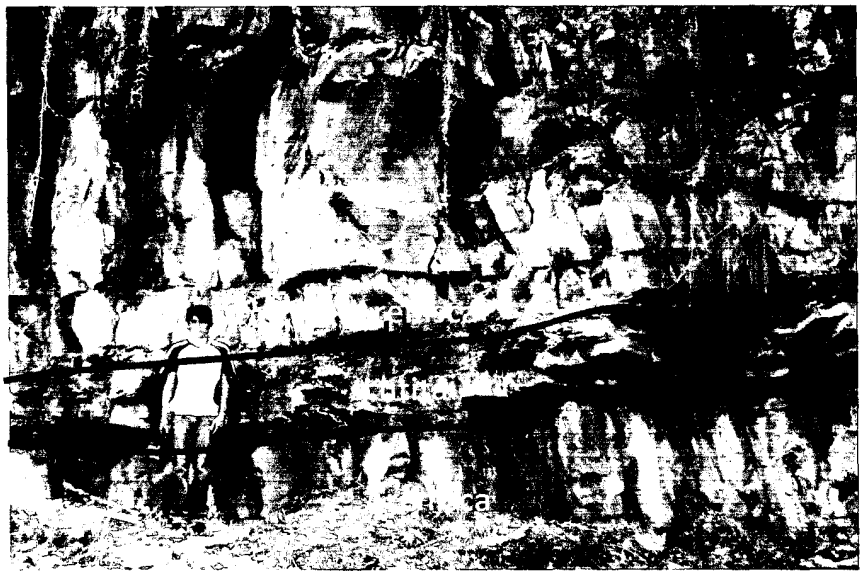


Figura 11. Afloramiento de la Formación Aguardiente (Kag). Obsérvese el tamaño diferencial de los bloques debido a la diferencia en los espesores de los estratos (arenisca estratocreciente) y su relación con la orientación y el espaciamiento de las diaclasas. Las líneas negras representan el contacto de los estratos de la secuencia arenisca-lutita.

www.bdigital.ula.ve

pertenecientes a las eras Paleozoica (Asociación Tostós, Formación Sabaneta y Formación Palmarito) (Figura 12) y Mesozoica, esta última representada por la Formación La Quinta (Jurásico) (Figura 13) así como algunas de las unidades litológicas de la secuencia Cretácica que aflora en los Andes venezolanos (Formaciones Río Negro, Apón, Aguardiente, Capacho y La Luna) (Figura 14).

Las condiciones de estabilidad de los macizos en esta sección de las cuencas, está controlada no sólo por aspectos estructurales, sino también por las características mineralógicas de la roca. La mayor extensión de afloramientos está conformada por las areniscas-areniscas conglomeráticas de la formación La Quinta, ocupando un 28,99 % del área de La Portuguesa y 16,60 % del área de Montalbán. Las calizas y lutitas de las formaciones Capacho y La Luna ocupan un 3,43% y 2,61%, los metaconglomerados de la Formación Sabaneta 3,93% y 2,01%, los esquistos de la

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Asociación Tostós 3,90% y, las lutitas y filitas de la Formación Palmarito ocupa menos del 1% de la superficie de dichas cuencas, respectivamente.

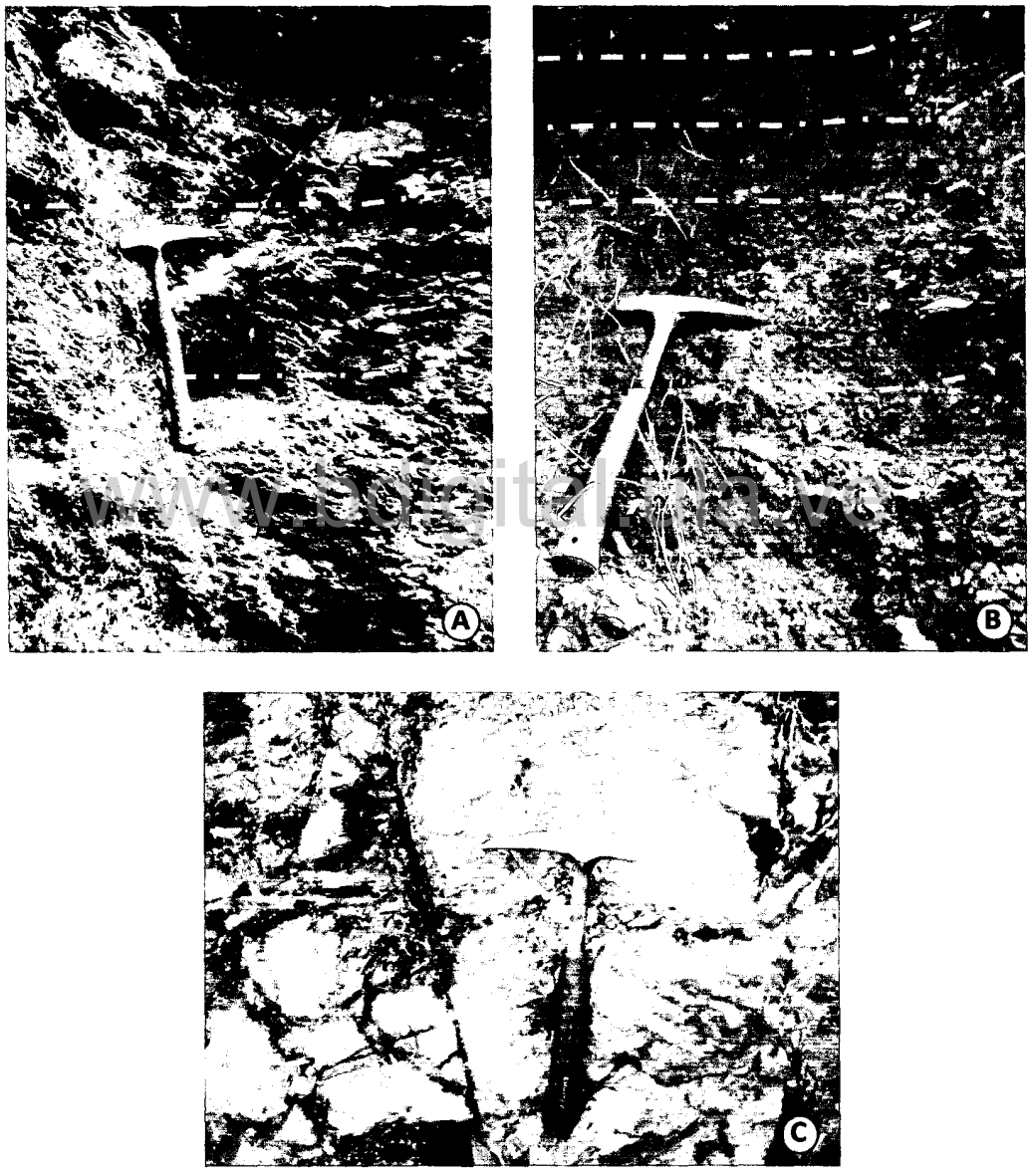


Figura 12. Afloramientos del Paleozoico. Las líneas punteadas separan horizontes con diferentes grados de meteorización. (A) Afloramiento de la Asociación Tostós (Pt). Fracturación muy intensa; (B) Afloramiento de la Formación Palmarito (Pp). Perfil de meteorización con distintos grados (roca desintegrada y descompuesta) Fracturación muy intensa, macizo completamente meteorizado; (C) Afloramiento de la Formación Sabaneta (Ps).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Figura 13. Afloramiento de la Formación La Quinta (Jq). Obsérvese que el macizo rocoso se ha meteorizado prácticamente por completo conservando algunos elementos de la estructura original. Destaca además, la susceptibilidad de la roca a ser afectada por procesos de escurrimiento concentrado, debido a los altos contenidos de elementos finos en la matriz.

www.bdigital.ula.ve

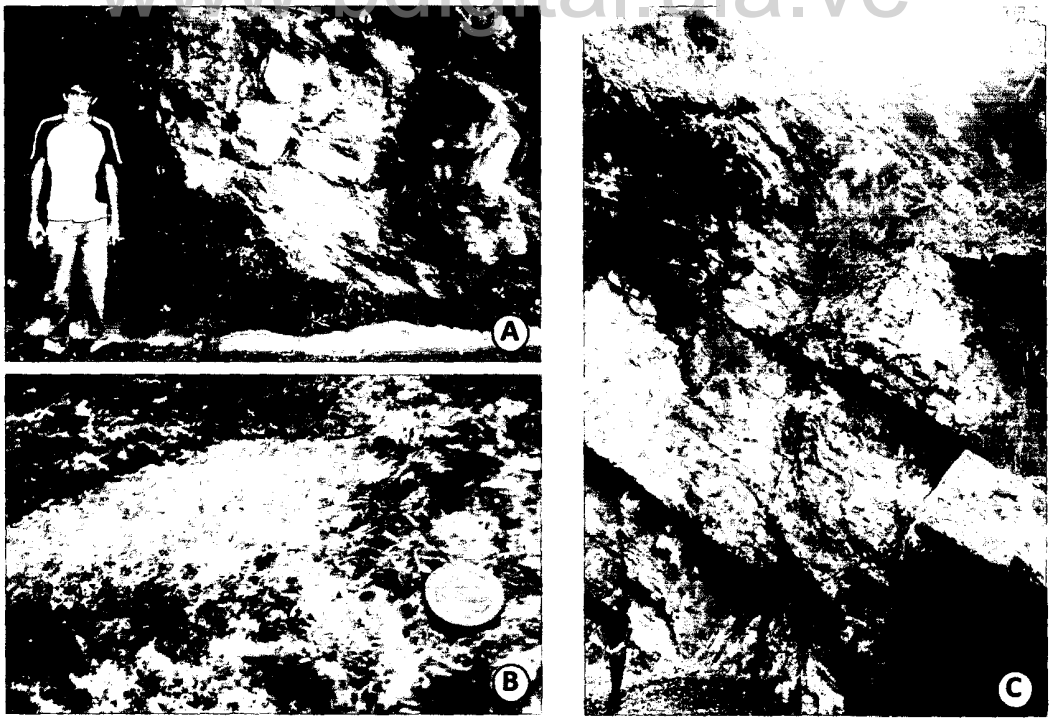


Figura 14. Afloramientos cretácicos. (A) Conglomerados oligomícticos de la Formación Río Negro (Krn); (B) Calizas fosilíferas tipo wackstone de la Formación Capacho (Kc); (C) Calizas tipo packstone de la Formación Apón (Ka).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Cuadro 15. **Algunas características geomecánicas de los macizos rocosos en las cuencas**

Tipo y características de la Roca	Tamaño de bloque y grado de fracturación [1]	Condiciones que favorecen la Meteorización	Condiciones de estabilidad	Unidad litológica
Gneis bandeado, gneis granítico y augengneis. Rocas metamórficas muy duras y extremadamente duras de grano grueso	Estructuras de bloques irregulares, bloques y capas. El tamaño de los bloques está definido por el espaciamiento y orientación de las diaclasas	El bandeamiento típico de los gneises favorece y acelera la meteorización en las bandas con minerales menos resistentes (feldespatos y piroxenos). Adicionalmente, la abertura de las diaclasas permite la infiltración de agua en la roca. Macizos con grados de meteorización variable que oscilan entre moderadamente meteorizado y espesores delgados de suelos residuales.	Moderadamente estables e inestables	Asociación Sierra Nevada
Esquistos verdes con altos contenidos de sílice	Estructuras de fracturación intensa. Macizos muy fracturados con altos contenidos de finos producto del control tectónico.	Fisibilidad marcada a lo largo de la esquistosidad, favorece la meteorización. Macizos con grados de meteorización de completamente meteorizado y suelos residuales (roca desintegrada y descompuesta).	Inestables y muy inestables	Asociaciones Tostós y Sierra Nevada
Calizas grices foliferas. Rocas duras y muy duras	En el área se observan estructuras de bloques regulares e irregulares. La formación de bloques está controlada por los planos de discontinuidad y su relación con la orientación del talud.	En este tipo de rocas los procesos de meteorización están influenciados por el agua que circula por los planos de discontinuidad, así como por disolución de los compuestos de carbono. Macizos con grados ligeramente meteorizados.	Estables y moderadamente inestables, particularmente en condiciones de pendiente escarpada y muy escarpada	Formaciones Apón y Capacho
Conglomerados (oligomícticos) y metaconglomerados brechoides (polimícticos) en matriz arcillosa. Rocas duras y muy duras	En el área se observan estructuras de bloques regulares e irregulares. La formación de bloques está controlada por los planos de discontinuidad y su relación con la orientación del talud.	En este tipo de rocas los procesos de meteorización están influenciados por el agua que circula por los planos de discontinuidad. Moderada y ligeramente meteorizado (roca decolorada).	Moderadamente inestables e inestables bajo condiciones de pendiente muy escarpada.	Formaciones Río Negro y Sabaneta

... /... continúa

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

... /... continuación Cuadro 15

Tipo y características de la Roca	Tamaño de bloque y grado de fracturación [1]	Condiciones que favorecen la Meteorización	Condiciones de estabilidad	Unidad litológica
Areniscas calcáreas duras	Estructuras de bloques irregulares. La formación de los bloques está controlada por los planos de discontinuidad, específicamente con la abertura y su relación con la orientación del talud.	La meteorización está influenciada por el grado de fracturación del macizo. Moderada y ligeramente meteorizado (roca decolorada)	Inestables bajo condiciones de pendiente muy escarpada.	Formaciones Aguardiente, Sabaneta
Areniscas y areniscas conglomeráticas	Estructuras de fracturación intensa.	El grado de meteorización de la roca está influenciado por características hidrogeológicas (alta permeabilidad), completamente meteorizado (roca desintegrada) y suelos residuales profundos (roca descompuesta).	Muy inestables, particularmente en inclinaciones de pendiente superiores a los 20°.	Formación La Quinta
Lutitas (rocas sedimentarias blandas de grano fino con altos contenidos de sílice), pizarras y filitas (rocas metamórficas derivadas de las lutitas anteriormente descritas)	Estructuras de fracturación intensa.	La fisilidad característica de la textura de este tipo de rocas favorece la meteorización. Adicionalmente, el alto contenido de sílice, propicia que este tipo de rocas se fracture en astillas generando zonas de debilidad que favorece la acción del agua dentro de los perfiles. La unidad se observa con grados variables de meteorización: Completamente meteorizado (roca desintegrada) y suelos residuales (roca descompuesta). Arcillas expansivas	Muy inestables, particularmente en inclinaciones de pendiente superiores a los 26°.	Formaciones Capacho, Palmarito, La Luna

Nota. (1) Elementos para la caracterización de macizos rocosos con base en el grado de fracturación y estado de las diaclasas (Hoek y Brown, 1997).

www.bdigital.ula.ve

En relación con las unidades geomorfológicas en el área, se identifican unidades de origen estructural y fluvial. Las primeras, conformadas por un sistema de vertientes con laderas cuyos estratos buzan a favor y en contra de la pendiente y las segundas, representadas por un sistema de abanicos aluviales coalescentes y planicies de

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

desborde, originados por la influencia tanto de procesos de depositación normal como por eventos de flujos hiperconcentrados y de detritos (detalles de las unidades geomorfológicas pueden verse en Cuervo, 2007).

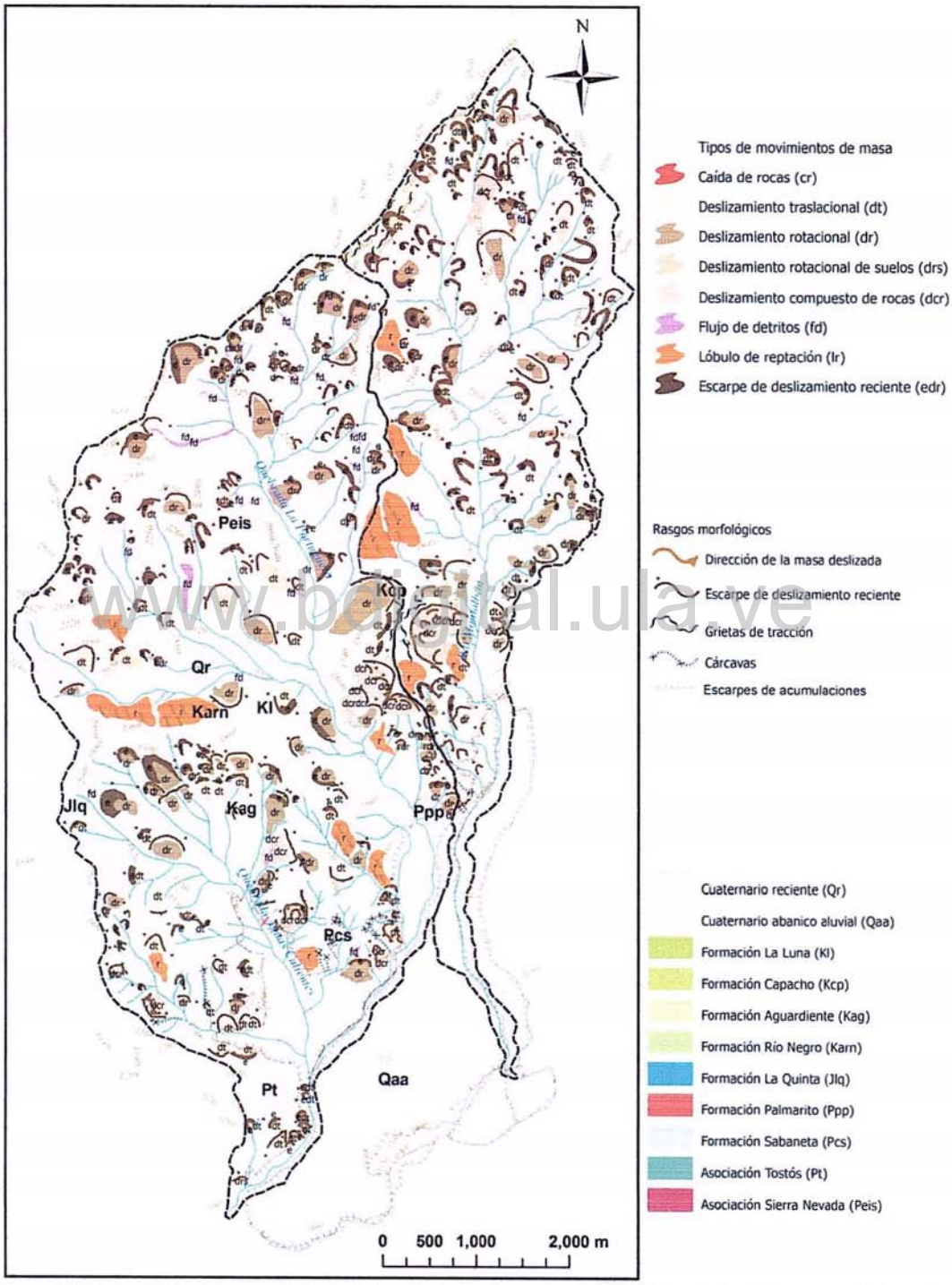
Los procesos geomorfológicos predominantes en las unidades de vertiente son los movimientos de masa, específicamente deslizamientos superficiales de tipo rotacional y traslacional. Sin embargo, en los sectores en los cuales la pendiente es muy escarpada y los macizos se encuentran muy fracturados, se identificaron procesos de caídas y avalanchas de rocas.

En el área de estudio se observaron más de 400 movimientos de masa activos (Figura 15), principalmente en las categorías de deslizamientos rotacionales y traslacionales, además de algunas superficies de lóbulos de reptación. De estas categorías, el 22% del área ocupada por movimientos de masa se corresponde con escarpes, 47% con masas deslizadas (algunas con escarpes secundarios menores), 18% lóbulos de reptación y 3% por otras categorías.

www.bdigital.ula.ve

Es importante destacar, que en algunas áreas de deslizamientos rotacionales, específicamente en los escarpes, se interpretaron grietas de tracción cóncavas hacia la ladera, claros indicadores de la actividad de estas superficies. Además, son notorios los cambios en la vegetación y la morfología ondulada en las masas deslizadas. En contraste, los escarpes de los deslizamientos traslacionales se presentaron con formas más rectas, casi verticales y con un comportamiento más uniforme en la masa deslizada.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR



www.bdigital.ula.ve

Figura 15. Inventario de movimientos de masa en las cuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa. La simbología se adaptó de "Movimientos en masa en la Región Andina" por PMA –GCA (2007), p. 111.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Adicionalmente, en el sector medio de ambas cuencas, se identificaron una serie de deslizamientos compuestos que se caracterizan por un escarpe principal y una serie de escarpes menores, cuyas masas deslizadas actualmente conforman coronas de deslizamientos activos. Dichos deslizamientos ocupan un área de 4785 m^2, equivalente al 10% del total de área ocupada por movimientos de masa en las cuencas estudiadas y se consideran una fuente importante de aporte de sedimentos a los cauces.

A partir de los resultados de densidad de movimientos de masa obtenidos (Cuadro 16 y Figura 16), se considera que los factores que ejercen mayor control en la ocurrencia de movimientos de masa en las cuencas son: la pendiente, la litología (tipo de roca y comportamiento geomecánico de los macizos); la orientación de los taludes y la cobertura del suelo.

www.bdigital.ula.ve

a) Pendiente

La mayor densidad de movimientos de masa se registra entre valores de inclinación comprendidos entre los 26,6° y los 45°. Estos valores son los típicos registrados por otros autores para la ocurrencia de deslizamientos superficiales que progresivamente evolucionan como flujo de detritos (Nilsen, 1979; Takahashi et al., 1981, Lorente et al. 2003, Varnes, 1984; DeGraff, 1994; Corominas et al., 1996; Soeters y Van Westen, 1996).

b) Litología

El análisis de este factor es primordial como elemento para explicar la ocurrencia de movimientos de masa en el área de estudio, además de las características de los sedimentos que se movilizan de la sección alta de la cuenca (áreas de erosión y generación de sedimentos) hacia la sección baja (áreas de depositación). Su

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

influencia está definida por la calidad geotécnica de los macizos, como respuesta tanto a la composición y características de la roca como al control tectónico en el área.

El grado de meteorización de los macizos rocosos en los que se registran mayores densidades de movimientos de masa, afloramientos de rocas de tipo areniscas-areniscas conglomeráticas, conglomerados y calizas localizadas en áreas de debilidad estructural por contacto litológico, está influenciado por dos aspectos principalmente: i) el grado de fracturación del macizo y las características de los planos de discontinuidad (principalmente orientación y espaciamiento de las diaclasas) y; ii) la composición mineralógica de la roca y sus elementos texturales, este aspecto a destaca específicamente en el caso de areniscas y areniscas conglomeráticas de La Quinta, cuyas características favorecen la generación de perfiles de meteorización en grados de *completamente meteorizados* (roca desintegrada) y *suelos residuales* profundos (roca descompuesta), que al ser afectados por precipitaciones fácilmente evolucionan como movimientos de masa.

www.bdigital.ula.ve

c) Orientación de los taludes

Aún existe discrepancia en cuanto a la fiabilidad de este factor como causal de movimientos de masa. Sin embargo, ha sido utilizado en varios trabajos (Carrara et al., 1991; Gokceoglu y Aksoy, 1996; Dai et al. 2001, Lee y Taalib, 2004; Lee y Sambath, 2006; Blahut et al. 2010) proporcionado resultados adecuados. De los valores de densidad obtenidos, se interpreta que macizos orientados al norte-noroeste y macizos orientados al sur-suroeste, parecieran estar asociados con la presencia de deslizamientos. Lo anterior sugiere, que las laderas que reciben menos cantidad de luz en el día, es decir laderas en las que existe mayor humedad, son más propensas a desarrollar movimientos de masa.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Cuadro 16. **Densidad de movimientos de masa por factor considerado**

Factor	Clase		Densidad de clase
Pendiente	Suave	0 - 8,5°	0.0389
	Moderada	8,5 - 16,7°	0.0997
	Accidentada	16,7 - 26,6°	**0.1808**
	Escarpada	26,6 – 45°	**0.1894**
	Muy escarpada	> 45°	0.1698
Orientación de los taludes	Norte	1	**0.3206**
	Noreste	22,5	0.1664
	Este	90	0.1394
	Sureste	112,5	0.1582
	Sur	135	**0.1844**
	Suroeste	157,5	**0.1781**
	Oeste	180	0.1386
	Noroeste	202,5	0.1643
Curvatura (profile)	Cóncava	-15 – 0	0.1599
	Convexa	0 -14,74	0.1686
Curvatura (planar)	Cóncava	-9- 0	0.1700
	Convexa	0-7,5	0.1666
Litología	Gneis bandeado, gneis granítico y augengneis		0.1593
	Esquistos		0.1554
	Caliza		**0.5658**
	Conglomerados y metaconglomerados		**0.2143**
	Areniscas, meta-areniscas y areniscas conglomeráticas		**0.3615**
	Lutitas y filitas		0.1915
	Sedimentos		0.0261
Distancia a las fallas	0-25 m		0.1502
	25-50 m		0.1521
	50-100 m		0.1596
	100-250 m		0.1678
	250-500 m		0.1623
	> 500 m		0.1483
Cobertura del suelo	Agrícola		0.0979
	Bosques intervenidos		**0.1996**
	Bosques sin intervención aparente		0.0827
	Mixtos		**0.1378**
	Áreas construidas		0.0094
	Sin cobertura vegetal		**0.3542**
	Páramo-Pastizal		**0.1771**

Nota. Los valores resaltados en negro representan las categorías con mayor ocurrencia de movimientos de masa. Las clases de litología y cobertura del suelo fueron simplificadas del mapa original para facilitar el análisis.

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

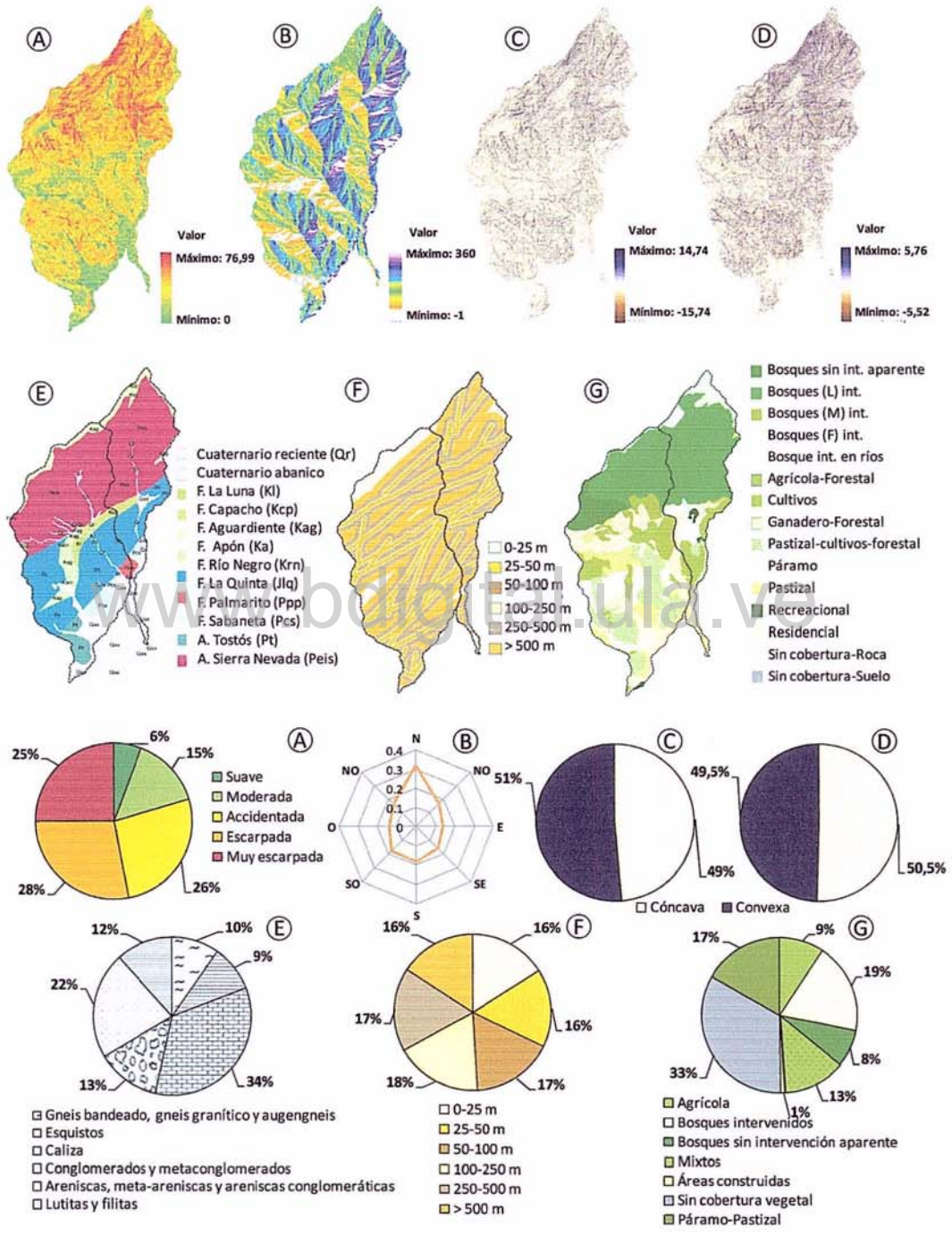


Figura 16. Factores geoambientales considerados y ocurrencias de movimientos de masa en las categorías de dichos factores. (A) Pendiente; (B) Orientación de los taludes; (C) Curvatura (profile); (D) Curvatura (planar); (E) Litología; (F) Distancia a las fallas; (G) Cobertura del suelo.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

d) *Cobertura del suelo*

El mayor número de ocurrencias de movimientos de masa, se registró en áreas en las cuales no existe cobertura vegetal, o la cobertura vegetal ha sido fuerte y moderadamente intervenida (bosques intervenidos y usos mixtos). Estos resultados sugieren la importancia de la densidad de cobertura vegetal como protectora del suelo, para atenuar los efectos erosivos de la precipitación.

Por otro lado, en el caso de los factores curvatura y distancia a las fallas, también considerados en el análisis de susceptibilidad, no se observan mayores diferencias en los valores de densidad de movimientos de masa en las distintas categorías seleccionadas. Las estimaciones de densidad en las clases *cóncavas* y *convexas* del factor curvatura de la pendiente, pudieran estar sugiriendo que existe una relación más o menos equivalente entre las áreas que ocupan los escarpes (pendiente cóncava) con las áreas que ocupan las masas deslizadas (pendiente convexa).

www.bdigital.ula.ve

Del mismo modo, los valores de densidad obtenidos en el factor de distancia a las fallas, no son representativos para explicar la ocurrencia de movimientos de masa. Sin embargo, esto no indica que la tectónica no ejerza ninguna influencia en el área. Por el contrario, de acuerdo con las características geotécnicas analizadas para los macizos, pudiera decirse que la tectónica influye localmente en cada uno de los macizos que conforman la ladera y que su grado de influencia depende del tipo de roca que sufre los distintos esfuerzos, independientemente de la distancia a la que se encuentran los macizos de los planos de falla.

Ahora bien, con respecto al potencial de generación de deslizamientos superficiales en las cuencas, se puede decir que los macizos con mayor probabilidad espacial de ocurrencia conjugan los siguientes factores: pendiente accidentada y escarpada, con

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

taludes orientados principalmente hacia el norte-noroeste o sur-suroeste, en rocas con estructuras de fracturación intensa y composiciones litológicas asociadas con areniscas y areniscas conglomeráticas de la Formación La Quinta, así como de conglomerados y en menor proporción de calizas/lutitas (en áreas de debilidad estructural por contacto litológico) así como, áreas en las cuales la cobertura vegetal presenta fuertes grados de intervención.

De los resultados derivados del análisis de susceptibilidad (Figura 17), se obtuvo que las áreas con mayor probabilidad espacial de inicio de flujos de detritos por la ocurrencia de deslizamientos superficiales (escarpes inferiores a los 5 m), se encuentran localizadas principalmente en el límite inferior de la sección alta y sección media de las cuencas Montalbán y La Portuguesa. Dichas áreas, se corresponden con el nivel de susceptibilidad *muy alta* y ocupan una superficie total de 8,41 km^2.

www.bdigital.ula.ve

Destaca además, que la superficie ocupada por el nivel de susceptibilidad *muy alta* en la microcuenca de Aguas Calientes, es mayor en relación con los otros niveles de susceptibilidad dentro de dicha microcuenca, así como con las cuencas estudiadas. De allí, la importancia de este sistema hidrológico como productor de sedimentos por procesos en vertientes, con el potencial de incorporar volúmenes importantes que se pueden desplazar por los cauces y afectar la superficie del abanico aluvial.

El nivel de susceptibilidad *alta* ocupa una superficie de 14,8 km^2, en esta zona también existe una alta probabilidad espacial para que se detonen movimientos de masa superficiales, sin embargo, se considera que debido al comportamiento

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

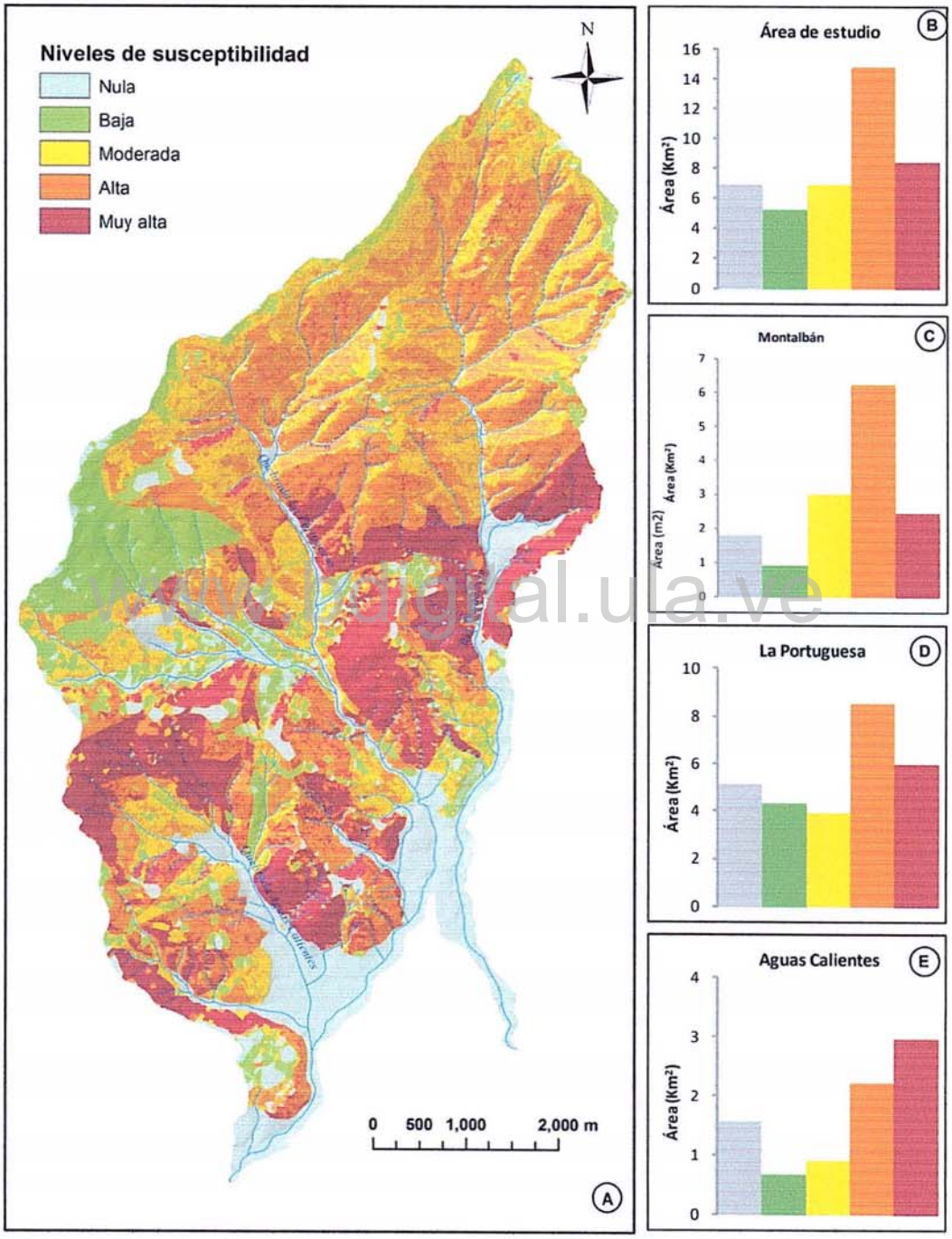


Figura 17. Susceptibilidad a movimientos de masa superficiales y áreas ocupadas por niveles en las cuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa. (A) Mapa de niveles de Susceptibilidad; (B) Área de estudio; (C) Cuenca de la quebrada Montalbán; (D) Cuenca de la quebrada La Portuguesa; (E) Aguas Calientes.

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

geomecánico de las rocas, la probabilidad de que los deslizamientos superficiales evolucionen progresivamente como movimientos de masa es menor. No obstante, ante la ocurrencia de precipitaciones prolongadas, que mantengan los perfiles en condiciones de alta saturación, es perfectamente posible la generación de flujo de detritos a partir de deslizamientos superficiales. Del mismo modo, estas áreas juegan un rol primordial en la incorporación de sedimentos que colmatan los cauces.

Considerando el área que ocupa el nivel de susceptibilidad *muy alta* como las áreas potenciales de inicio de flujo de detritos, y su relación con las áreas activas de movimientos de masa en este nivel, se obtuvo la siguiente relación empírica en cuanto al volumen potencial de sedimentos que podrían ser desplazados por deslizamientos superficiales y transformados progresivamente en flujos de detritos/hiperconcentrados en las cuencas (Cuadro 17). Estos valores son de suma importancia, puesto que pueden compararse más adelante con los volúmenes de sedimentos resultantes de la aplicación del modelo FLO-2D.

www.bdigital.ula.ve

Cuadro 17. **Potencial de volumen de sedimentos por la ocurrencia de deslizamientos superficiales**

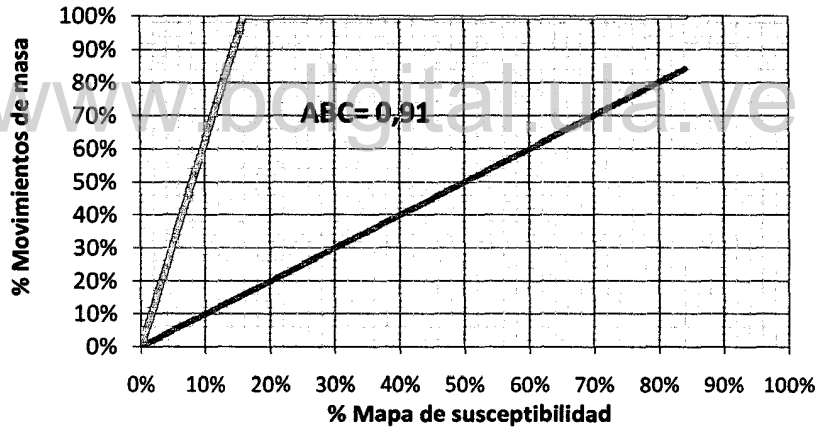
Cuenca	Áreas potenciales de inicio de flujos[1] (m^2)	Áreas activas[2] (m^2)	Profundidad de deslizamientos[3] (m)	Volumen potencial de sedimentos[4] (m^3)
Montalbán	2432050	751703,16	1,5	1127554,74
La Portuguesa[5]	3011700	935560,66	2	1871121,32
Aguas Calientes	2970500	569708,82	2	1139417,64

Nota. (1) Superficie en m^2 en el nivel de susceptibilidad *muy alta*; (2) Superficie de movimientos de masa activos dentro del nivel de susceptibilidad *muy alta* (3) Se calculó considerando un valor promedio ponderado de las características de los perfiles de meteorización (contacto entre la roca más meteorizada y la menos meteorizada) y la superficie que ocupan las distintas litologías; (4) Es el resultado del producto de la profundidad de deslizamientos y las áreas activas; (5) Sin considerar las áreas activas en la microcuenca de la quebrada Aguas Calientes.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Con base en los resultados del Cuadro 17, se visualiza que cerca del 31% de las áreas potenciales de inicio de flujos de de detritos en las cuencas Montalbán y La Portuguesa, se encuentran activas, es decir con presencia de deslizamientos de escarpes recientes. Por su parte, alrededor del 19% de las áreas potenciales de flujo presentan actividad en la microcuenca de Aguas Calientes.

Finalmente, en la Figura 18 se presenta la curva para la estimar la precisión del modelo de susceptibilidad a deslizamientos superficiales generado. Este método estadístico, permite determinar la capacidad que tiene el mapa de susceptibilidad resultante para clasificar las áreas de deslizamientos activos, con niveles altos de susceptibilidad.



www.bdigital.ula.ve

Figura 18. Curva para la validación del modelo de susceptibilidad por la ocurrencia de movimientos de masa superficiales. ABC = Área bajo la curva. El área bajo la curva es un valor entre 0,5 y 1. Cuanto más próximo a 1 mejor es el modelo.

De la lectura del gráfico se obtiene que el área bajo la curva es igual a 0,91. Como es un valor cercano a 1, puede decirse que los niveles seleccionados están bien clasificados y por lo tanto el modelo logra explicar los niveles de susceptibilidad en el área de estudio. Otras validaciones de este modelo, con el propósito de estimar su poder predictivo, pudieran involucrar la realización del algoritmo nuevamente sin incluir el área total de deslizamientos, sino sólo una muestra aleatoria, para luego comparar los niveles obtenidos, con las áreas de los deslizamientos que no fueron incluidos en la muestra.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

4.2. Aspectos hidrológicos de las cuencas

4.2.1. Análisis morfométrico

Las cuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa, nacen en la Sierra de La Culata de Mérida y forman parte de la cuenca del río Albarregas y Chama, respectivamente. Estos sistemas hidrológicos, comparten las características típicas de las cuencas torrenciales de este sector de los Andes venezolanos: i) un fuerte control estructural (producto de la influencia de la tectónica ejercida por la Falla de Jají y Falla Los Ángeles, rupturas asociadas a la Zona de Fallas de Boconó), que determina drenajes de alineamientos rectos (índice de sinuosidad < 1,25) así como tipologías de la red de drenaje de tipo paralelos y subparalelos principalmente; ii) vertientes asimétricas (característica observada particularmente en la cuenca de la quebrada La Portuguesa) y; iii) valores de pendiente media de la cuenca escarpada (26,6° -45°) y muy escarpada (> 45°) (Cuadro 18).

www.bdigital.ula.ve

Las cuencas mencionadas, ocupan una superficie de 14,37 km^2 y 26, 13 km^2, respectivamente. En esta investigación, además de considerar las características hidrológicas de Montalbán y La Portuguesa, se analiza por separado la microcuenca de la quebrada Aguas Calientes, afluente de la quebrada La Portuguesa, en vista de que esta área ha experimentado eventos de crecidas frecuente y, adicionalmente es la principal fuente de aporte de sedimentos del abanico de Aguas Calientes. Esta última, ocupa una superficie de 8,35 km^2.

En general, la forma de las cuencas tiene un efecto determinante en la respuesta del hidrograma. En el caso de los sistemas hidrológicos estudiados, predominan formas ligeramente alargadas en la quebrada Aguas Calientes (0,32), alargada en la quebrada

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Cuadro 18. **Principales características hidrológicas de las microcuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa**

Parámetro	Montalbán	La Portuguesa	Aguas Calientes	Característica
Área (km^2)	14,37	26,13	8,35	N/A
Perímetro (km)	26,12	27,94	18,89	N/A
Longitud axial (km)	10,8	10,11	4,47	N/A
Factor forma	0,12	0,27	0,32	< 0,10= Muy alargada 0,10 – 0,29= Alargada 0,30 – 0,40 = Ligeramente alargada
Índice de compacidad	1,94	1,54	1,84	Oval-oblonga a rectangular oblonga
Longitud del cauce principal (km)	11,72	12,15	4,39	N/A
Cota mínima (m)	1060	960	1100	N/A
Cota máxima (m)	3540	3080	2010	N/A
Desnivel (m)	2480	2120	910	N/A
Pendiente media del cauce principal (%)	21,16	17,45	20,73	Valores altos de inclinación de la pendiente, indicador clave del comportamiento torrencial de las cuencas
Pendiente media de la cuenca (°)	30,95	25,10	25,12	
Pendiente del cauce en el ápice (°)	17	17	12	
Índice de sinuosidad (Is)	0,99	1,05	1,04	> 1,25 Alineamiento recto. Indicador del control estructural
Relación de bifurcación promedio	2,60	2,39	2,09	Valores cercanos a 2 suelen indicar que el patrón de drenaje es de tipo paralelo
Densidad de drenaje	3,2	3,19	3,56	> 3 Muy alta. Cuencas excepcionalmente bien drenadas < 10 predominio del escurrimiento Subterráneo sobre el escurrimiento superficial
Tiempo de concentración (Kirpich-horas)	0,81	0,9	0,38	Tiempo de concentración considerado para el cálculo de la tormenta de diseño

www.bdigital.ula.ve

La Portuguesa (0,27) y muy alargada en la quebrada Montalbán (0,12) (Cuadro 18). En este sentido, los tiempos de concentración son variables en diferentes puntos de la cuenca por lo tanto, las crecidas tienden a ser menos violentas (esto sin

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

considerar el poder de arrastre de sedimentos y las velocidades que pueden ser alcanzadas por los caudales, por efecto del comportamiento torrencial).

Por otro lado, los valores de densidad de drenaje obtenidos, son claros indicadores del predominio de materiales geológicos duros en las cuencas (granito, gneis, areniscas duras). Como consecuencia de lo anterior, los materiales son muy permeables y poseen alta capacidad de infiltración. Aspecto este, que incide en el comportamiento hidrogeológico del macizo, para soportar las variaciones de las presiones intersticiales y peso del terreno ante eventos de precipitación.

A partir de la interpretación del perfil longitudinal (Figura 19), se pueden diferenciar las secciones alta, media y baja de las cuencas de la siguiente manera:

www.bdigital.ula.ve

a) Cuenca de la quebrada Montalbán

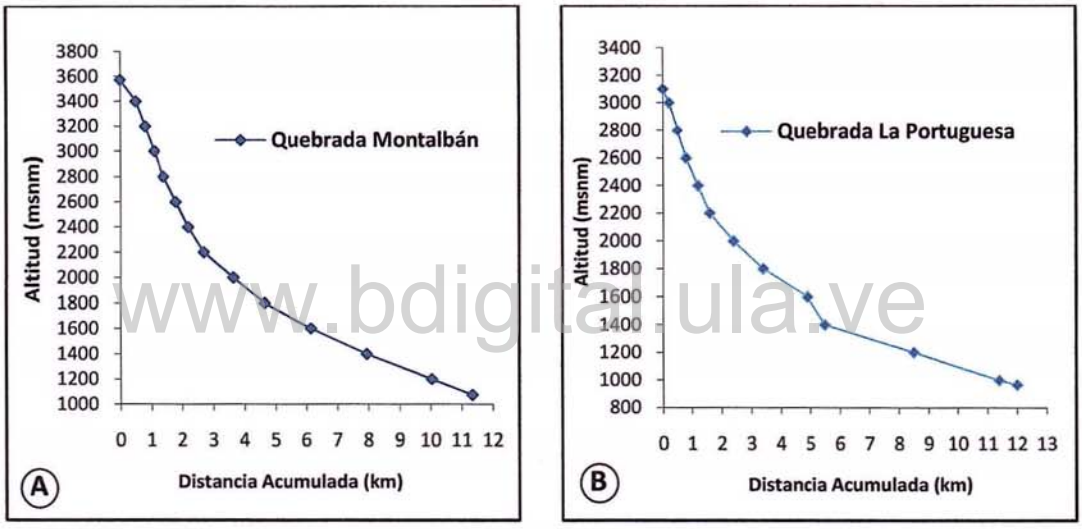
La *sección alta* comprende un tramo de 2,7 km desde los 3600 hasta los 2200 msnm, en la *sección media* el cauce de la quebrada transita por una distancia de 5,25 km desde los 2200 hasta los 1400 msnm. En este tramo destaca el control estructural de la quebrada a los 1800 msnm por la presencia de una falla. La *sección baja* o área de depositación está definida por un tramo de 6,1 km de longitud desde los 1400 hasta los 1075 msnm en la desembocadura con el río Albarregas.

b) Cuenca de la quebrada La Portuguesa

La *sección alta* se define por el tramo comprendido entre los 3100 y 2200 msnm con un recorrido de 1,6 km desde los 3600 hasta los 2200 msnm. Si se compara el recorrido del cauce en la sección alta de Montalbán con respecto al de La Portuguesa, destaca la cercanía de este último dren con las fuentes de suministro localizadas en esta sección. La *sección media* se define por el tramo comprendido

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

entre los 2200 y los 1400 msnm, se observan al menos dos controles estructurales importantes que definen cambios en la pendiente del cauce producto del fallamiento activo, el primero a los 1800 msnm y el segundo aproximadamente a los 1600msnm. El cauce recorre 3,9 km en este punto. La *sección baja* está comprendida por un tramo de 8,1 km de longitud desde los 1400 hasta los 965 msnm en la desembocadura con el río Chama.



www.bdigital.ula.ve

Figura 19. Perfiles longitudinales. (A) Quebrada Montalbán; (B) Quebrada La Portuguesa.

En cuanto a la pendiente media del cauce principal se encuentran inclinaciones de 21,16 % en la quebrada Montalbán, 17,45% en la quebrada La Portuguesa y 20,73% en la quebrada Aguas Calientes (Figura 19). Estos valores demuestran, que se trata de sistemas hidrológicos torrenciales con alta capacidad de arrastre de sedimentos, en los cuales las crecidas toman grandes velocidades (indicador que será analizado más adelante como criterio para definir niveles de amenaza en las superficies de los abanicos).

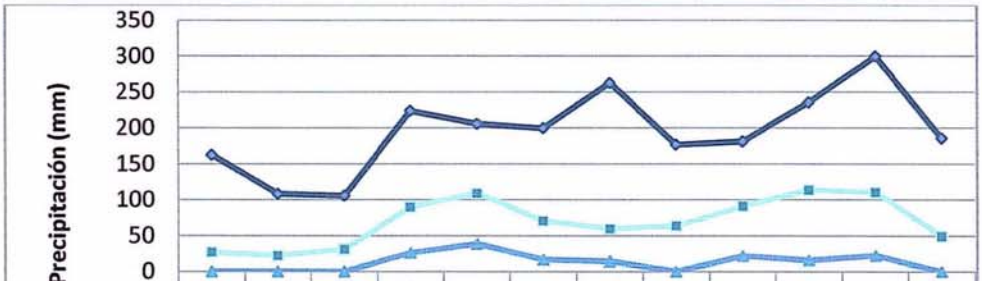
C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

4.2.2. Precipitación

Los eventos meteorológicos han sido el principal detonante de movimientos de masa y, particularmente, de flujos de detritos en la región de los Andes. En el área de estudio, los eventos históricos más importantes registrados, (la crecida de la quebrada La Portuguesa en 1932 y el flujo de detritos? que afectó el abanico de La Vega de Ejido en 1947), están relacionados con la precipitación como factor detonante.

Así mismo, eventos menores de deslizamientos y crecidas, han sido registrados con mayor frecuencia durante los meses de mayo, julio, octubre y noviembre. La ocurrencia de dichos eventos, coincide con los máximos de precipitación medidos en las estaciones cercanas a la cuenca (Figura 20). En consecuencia, se puede decir que se trata de eventos estacionales, que dependen del patrón de precipitaciones en el área. Por esta razón, la intensidad de los eventos (crecidas máximas, movimientos de masa y flujos) están relacionados con la intensidad de las tormentas, su duración, así como las lluvias acumuladas los días previos al evento.

www.bdigital.ula.ve

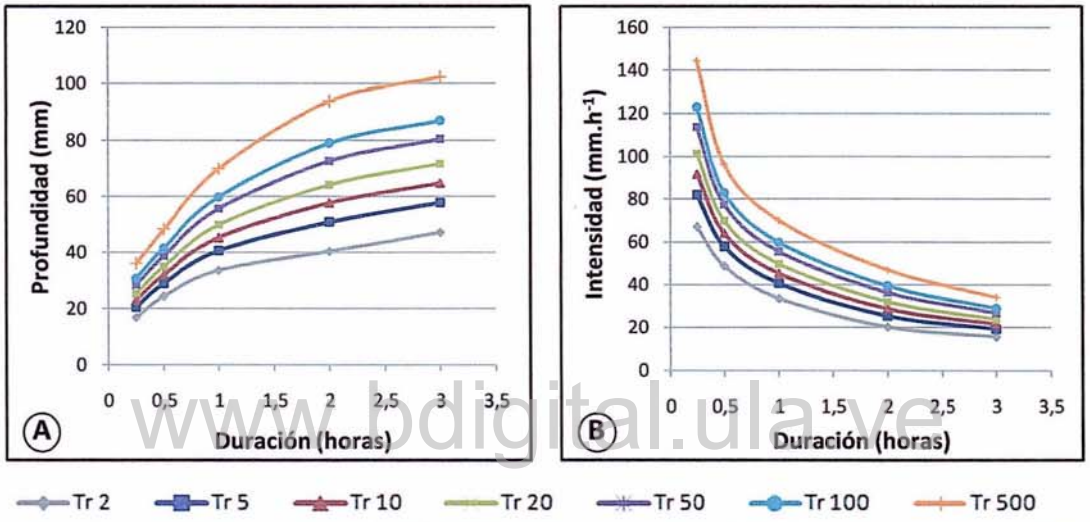


	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
máx	162,	108,	105,	223,	205,	199,	262,	176,	181,	235,	299,	185,
media	26,9	22,2	31,3	89,8	109,	70,7	59,4	63,4	91,2	113,	110,	49,1
min	0,0	0,0	0,0	26,3	38,7	16,8	14,5	0,0	21,9	15,8	22,3	0,0

Figura 20. Precipitación media mensual estación Mesa de Ejido (1950-1998).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Las curvas IDF y PDF estimadas, para duraciones menores a tres horas en las estaciones seleccionadas se muestran en las Figuras 20 y 21. De dichas estimaciones, se desprenden análisis interesantes en cuanto a la influencia de la precipitación como detonante de movimientos de masa.



www.bdigital.ula.ve

Figura 21. Estación La Punta (serial 8049). (A) Curvas Profundidad-Duración-Frecuencia (PDF) duraciones menores e iguales a tres horas; (B) Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) duraciones menores e iguales a tres horas.

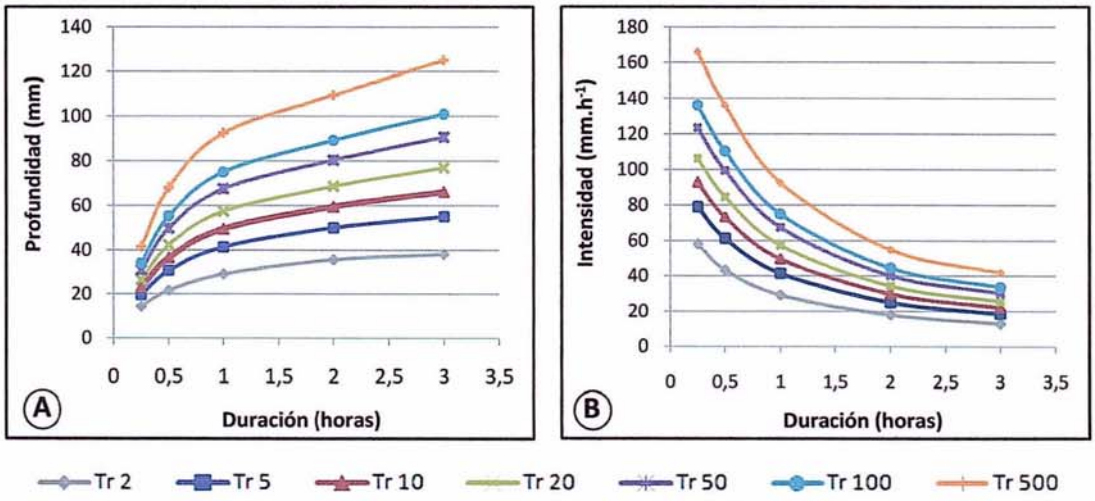


Figura 22. Estación Mesa de Ejido (serial 3049). (A) Curvas Profundidad-Duración-Frecuencia (PDF) duraciones menores e iguales a tres horas; (B) Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) duraciones menores e iguales a tres horas.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Cuadro 19. **Intensidades máximas de precipitación en mm/h para diferentes frecuencias y duraciones menores e iguales a veinticuatro horas estación La Punta (serial 8049)**

Tr	Duración en minutos		Duración en horas						
	15	30	1	2	3	6	9	12	24
2	67,10	48,74	33,63	20,23	15,71	8,70	5,93	4,50	2,50
5	82,05	57,96	40,67	25,40	19,28	10,89	7,40	5,62	3,05
10	91,96	64,06	45,33	28,82	21,64	12,33	8,38	6,36	3,42
20	101,46	69,92	49,79	32,10	23,91	13,72	9,32	7,07	3,77
50	**113,75**	**77,50**	**55,58**	36,35	26,84	15,52	10,53	7,99	4,23
100	**122,97**	**83,18**	**59,91**	39,53	29,04	16,87	11,44	8,68	4,57
500	**144,26**	**96,31**	**69,93**	46,89	34,12	19,98	13,54	10,27	5,35

Cuadro 20. **Intensidades máximas de precipitación en mm/h para diferentes frecuencias y duraciones menores e iguales a veinticuatro horas estación Mesa de Ejido (serial 3049)**

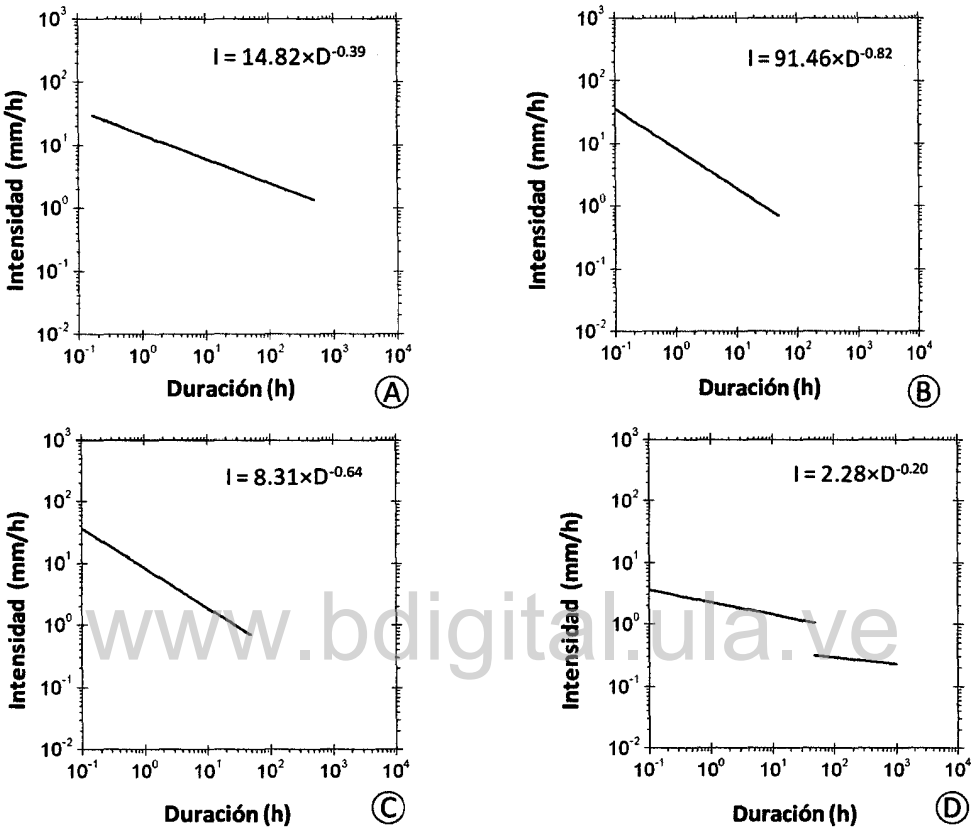
www.bdigital.ula.ve

Tr	Duración en minutos		Duración en horas						
	15	30	1	2	3	6	9	12	24
2	58,09	43,26	29,15	17,86	12,73	7,17	4,93	3,71	1,99
5	79,03	61,26	41,43	25,03	18,35	10,03	6,78	5,08	2,72
10	92,89	73,18	49,56	29,77	22,07	11,92	8,00	5,99	3,21
20	106,19	84,61	**57,37**	34,33	25,64	13,74	9,17	6,86	3,68
50	**123,40**	**99,40**	**67,47**	40,22	30,26	16,10	10,68	7,98	4,29
100	**136,30**	**110,49**	**75,03**	44,64	33,72	17,86	11,82	8,82	4,74
500	**166,10**	**136,11**	**92,52**	54,84	41,72	21,93	14,44	10,77	5,79

Cuadro 21. **Umbrales de intensidades de precipitación en mm/h que detonan movimientos de masa para distintas duraciones**

Autor	Ámbito geográfico	15	30	1	2	3	24
Caine (1980)	Mundial	25,41	19,40	14,80	11,29	9,64	4,29
Larsen y Simon (1993)	Puerto Rico (Clima tropical)	285,1	161,5	91,5	51,8	37,2	67,6
Guzzetti et al., (2008)	Mundial (Clima de montaña)	20,18	12,95	8,31	5,33	4,11	1,09
Guzzetti et al., (2008)	Mundial	3,01	2,62	2,28	1,98	3,75	1,21

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR



www.bdigital.ula.ve

Figura 23. Umbrales de precipitación que detonan movimientos de masa. (A) Caine (1980); (B) Larsen y Simon (1993); (C) Guzetti et al., (2008); (D) Guzetti et al., (2008), áreas montañosas.

Del análisis de las tormentas estimadas (Cuadros 19 y 20), se encuentra que tanto las tormentas de corta duración (menores a 1 hora) como las de larga duración (24horas), superan la mayoría de los umbrales de precipitación que detonan movimientos de masa superficiales (Cuadro 21 y Figura 23), incluso en períodos de retorno de dos y cinco años. Dados estos resultados, podría esperarse una frecuencia muy alta de movimientos de masa. Sin embargo, a pesar de que no existe monitoreo, los eventos observados parecen estar relacionados con el patrón de lluvias y su relación con la intensidad de tormentas más que con eventos específicos. Esto quiere decir que interesa conocer no sólo la lluvia evento, sino las precipitaciones previas acumuladas que son las que le confieren el grado de saturación a los suelos.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

4.2.3. Caudales máximos simulados

Los caudales máximos simulados con el software HEC-HMS se presentan en el Cuadro 22. Estos caudales fueron generados para una condición de humedad III, y los resultados se registraron para siete puntos distintos que se consideraron claves para la simulación de caudales líquidos y sólidos con el modelo numérico FLO-2D.

A partir de los caudales máximos simulados (Cuadro 22) e hidrogramas de crecidas máximas (Figura 25 y 26), se encuentra que de las cuencas estudiadas, la cuenca de la quebrada La Portuguesa es la que tiene el mayor potencial para desarrollar crecidas máximas. Los caudales simulados para este sistema hidrológico, son comparables con los estimados por Dávila y Requena (2004) para la misma condición de humedad en la cuenca del río La Pedregosa (cuenca adyacente al área de estudio por el noreste de la cuenca de la quebrada Montalbán).

www.bdigital.ula.ve

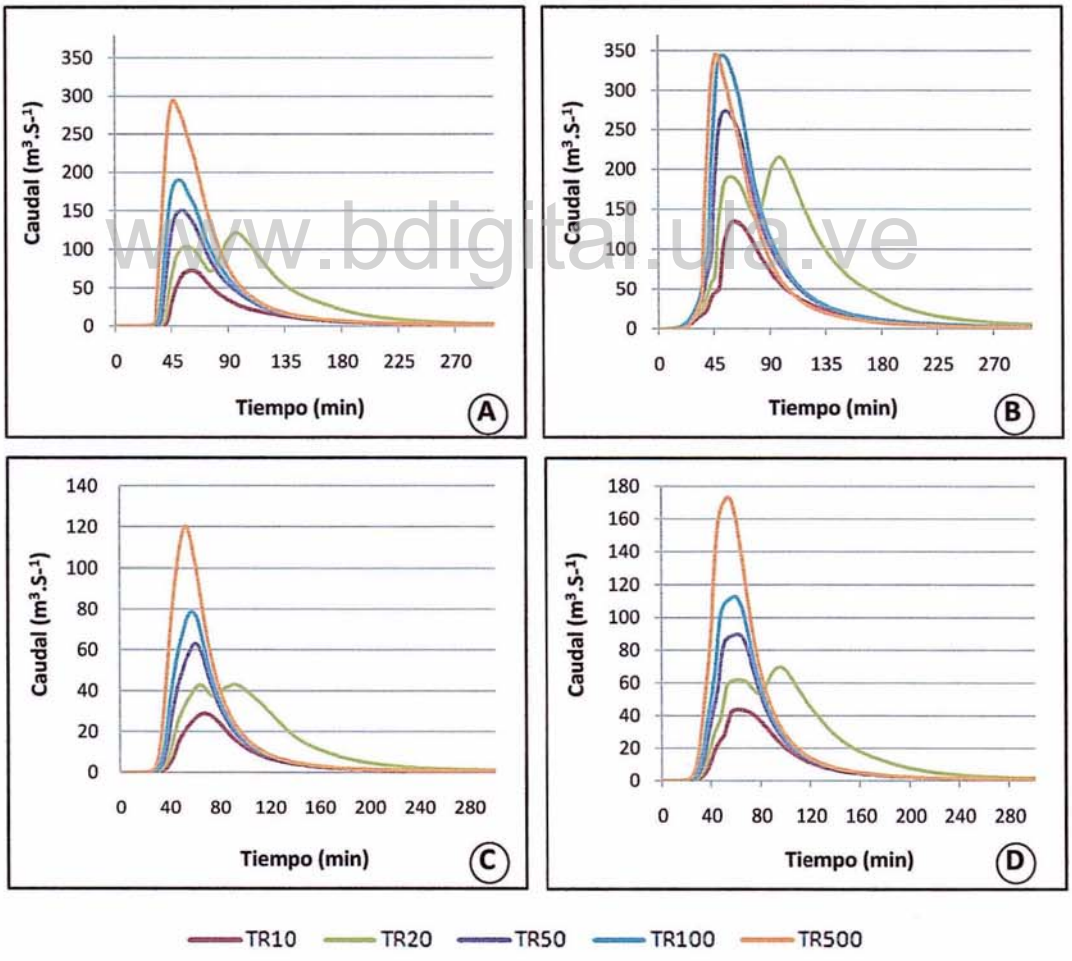
Cuadro 22. **Caudales máximos simulados en diferentes puntos de las cuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa**

Cuenca	Punto de simulación	Caudales máximos simulados (m^3xs^{-1})				
		Tr 10	Tr 20	Tr 50	Tr 100	Tr 500
Montalbán	M-1	40,4	52,1	68,6	81,4	112,6
	M-2	37,5	48,7	64,3	76,4	106,2
	M-3	31,8	41,8	55,6	66,4	93,9
La Portuguesa	LP-1	72,3	122,3	150,9	190	294,4
	LP-2	134,6	215,4	273,9	344,4	345,4
Aguas Calientes	AC-1	29	43,1	62,9	78,7	120,2
	AC-2	9,57	22,14	16,01	18,93	25,91

Nota. Puntos de simulación definidos. Montalbán: M-1: ápice del abanico La Vega (1085 msnm); M-2: sección media de la cuenca (1385 msnm); M-3 sección media (1500 msnm); LP-1: sección media de la cuenca (1365 msnm); LP-2: confluencia con el río Chama (960 msnm); AC-1: ápice hidrológico del abanico de Aguas Calientes (1200 msnm); AC-2: torrente de la microcuenca Aguas Calientes (1170 msnm).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

De la misma manera, en la microcuenca de la quebrada Aguas Calientes, se obtiene que los valores de caudales máximos estimados son cercanos a los valores estimados en la cuenca de la quebrada Montalbán, aún cuando la primera ocupa una superficie menor. Esto quiere decir, por lo tanto, que el volumen de agua durante eventos de crecidas en la microcuenca es muy alto, comparado con el potencial de generación de sedimentos y en consecuencia flujos con concentraciones superiores al 40% por volumen son muy poco probables.

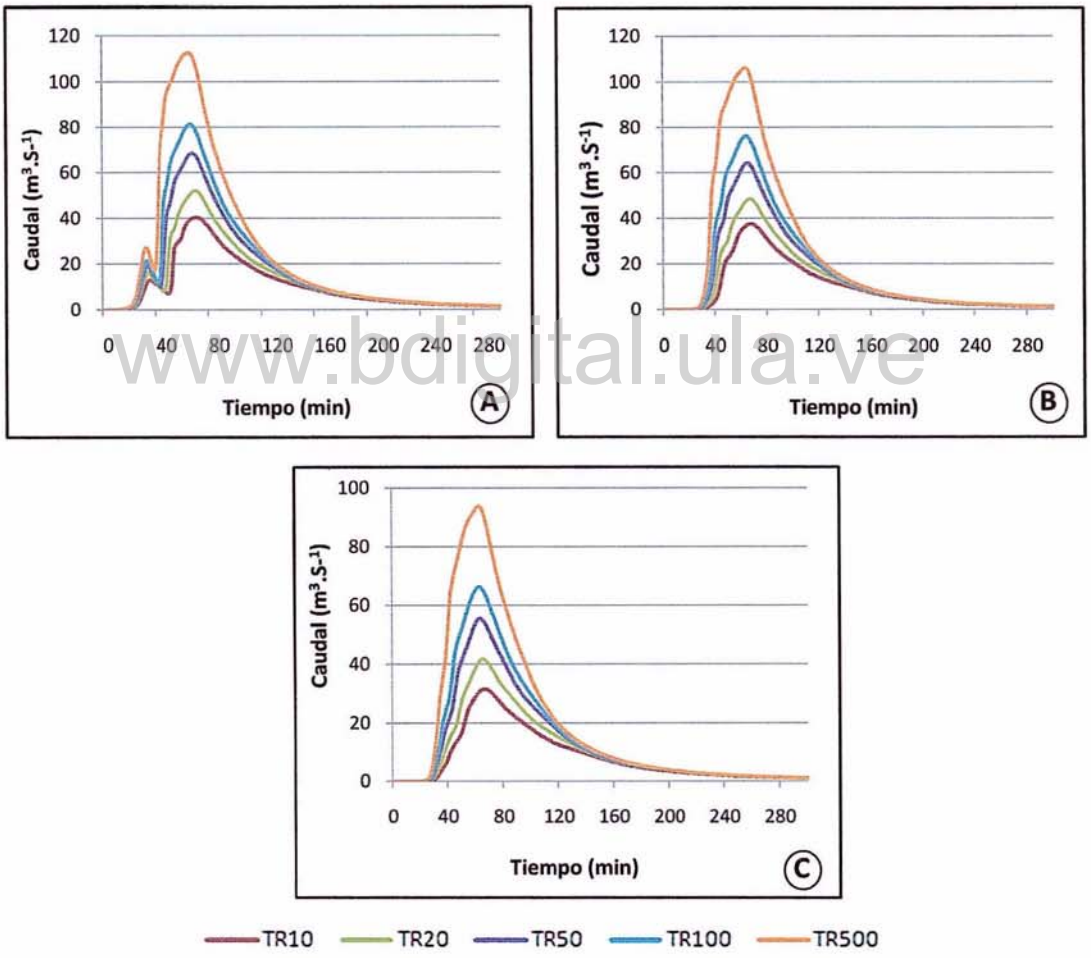


www.bdigital.ula.ve

Figura 24. Hidrogramas de caudales máximos simulados (método de onda cinemática) con el software HEC-HMS en las quebradas La Portuguesa y Aguas Calientes. (A)- Punto de simulación LP-1; (B) Punto de simulación LP-2; (C) Punto de simulación AC-1; Punto de simulación AC-2.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Las diferencias encontradas en los caudales máximos simulados para cada una de las cuencas, se explican a partir de los contrastes morfométricos, morfológicos, litológicos e hidrológicos discutidos en los apartados anteriores, que influyen en los picos de crecidas y la forma del hidrograma.



www.bdigital.ula.ve

Figura 25. Hidrogramas de caudales máximos simulados (método de onda cinemática) con el software HEC-HMS en la quebrada Montalbán. (A)- Punto de simulación M-1; (B) Punto de simulación M-2; (C) Punto de simulación M-3.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

4.3. Procesos geomorfológicos en los abanicos aluviales

4.3.1. Zonificación geomorfológica

En general, los procesos de depositación en la superficie de los abanicos aluviales y de detritos están determinados por aspectos tales como: la disponibilidad de agua, la cantidad y características de los sedimentos, así como la inclinación de la pendiente en la superficie del abanico (de allí la importancia de este factor para zonificar áreas de ocurrencia e impacto por eventos fluviotorrenciales). En este sentido, el grado de influencia de dichos factores, definen también el tipo de procesos dominantes y su comportamiento.

www.bdigital.ula.ve

En el sistema de abanicos coalescentes que conforman el área de estudio, se identificaron depósitos de sedimentos de diferentes edades y originados por procesos hidrogeomorfológicos distintos. Es por esto que la superficie de los mismos pudo ser fácilmente clasificada en áreas activas (superficie del abanico aluvial en la cual la erosión, presencia de canales inestables y depositación es posible) e inactivas, sobre la base del reconocimiento de indicadores morfológicos y de actividad (Kellerhals y Church, 1990; DeGraff, 1994; FEMA, 2000). Las evidencias identificadas en el área se describen a continuación.

a) Ocurrencia de eventos históricos recientes

La ocurrencia de eventos de flujos (eventos con concentraciones de sedimentos superiores al 20% por volumen) así como de crecidas de desborde por efecto de lluvias intensas en el pasado reciente, son claros indicadores de actividad en abanicos aluviales. La literatura reporta dos eventos importantes, el primero de naturaleza hidrológica, ocurrido en el año 1933 en la cuenca de la quebrada La

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Portuguesa; y el segundo en el año 1947 que afectó específicamente al abanico de La Vega (Ferrer y Lafaille, 2002; Villamizar, 2007; PMA:GCA-INGEOMIN, 2007).

El evento ocurrido en el mes de octubre de 1947, es probablemente la mejor evidencia con la que se cuenta para comprender la dinámica de procesos hidrogeomorfológicos y amenazas en el área de estudio, los aspectos más importantes de este evento se listan a continuación.

- La detonación de movimientos de masa en laderas producto de la ocurrencia de lluvias intensas y acumuladas?
- El represamiento de la quebrada Montalbán-río Chama y posterior ruptura en el cauce con la consecuente ola de descarga (Ferrer y Lafaille, 2002; PMA: GCA-INGEOMIN, 2007).
- La incisión y profundización del cauce por donde transita la quebrada Montalbán.
- La morfología posterior al evento, reflejada por formas lobuladas, un depósito de detritos en forma de abanico y depósitos laterales o súper-elevaciones de flujo en las curvaturas del canal (evidencia además de las altas velocidades de desplazamiento).

www.bdigital.ula.ve

b) *Potencial de generación de flujos*

Además de la evidencia histórica en cuanto a la ocurrencia de eventos históricos, las cuencas en estudio tienen un área significativa con alta probabilidad espacial de ser afectadas por movimientos de masa superficiales que pueden evolucionar como flujo de detritos, tal y como se discutió en el apartado 4.1. Conjuntamente, el aporte de material a los cauces producto de los deslizamientos activos en la sección alta y media, así como los sedimentos que se incorporan por otros movimientos de masa como caídas de rocas en la sección alta, propician un escenario de alta inestabilidad

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

del cauce, que puede dar lugar a flujos por socavación y arrastre de material grueso del lecho o rupturas de obturaciones y posterior ola de descarga.

c) *Valores de pendiente accidentada;*

En el apartado 4.1 y Cuadro 18, se presentaron los valores de inclinaciones y características de pendiente, de lo cual se destacó su importancia como factor causal de movimientos de masa (dada su condición de muy accidentada y escarpada como valores promedios) además del comportamiento torrencial de los drenes principales de las cuencas (pendiente del cauce principal superior al 15%).

Del mismo modo, destaca que en el ápice de los abanicos la pendiente supera los 10° con valores promedios de 5°, lo cual incide en la velocidad con la que pueden transitar los flujos en la superficie de los mismos, así como los lugares donde puede comenzar la depositación.

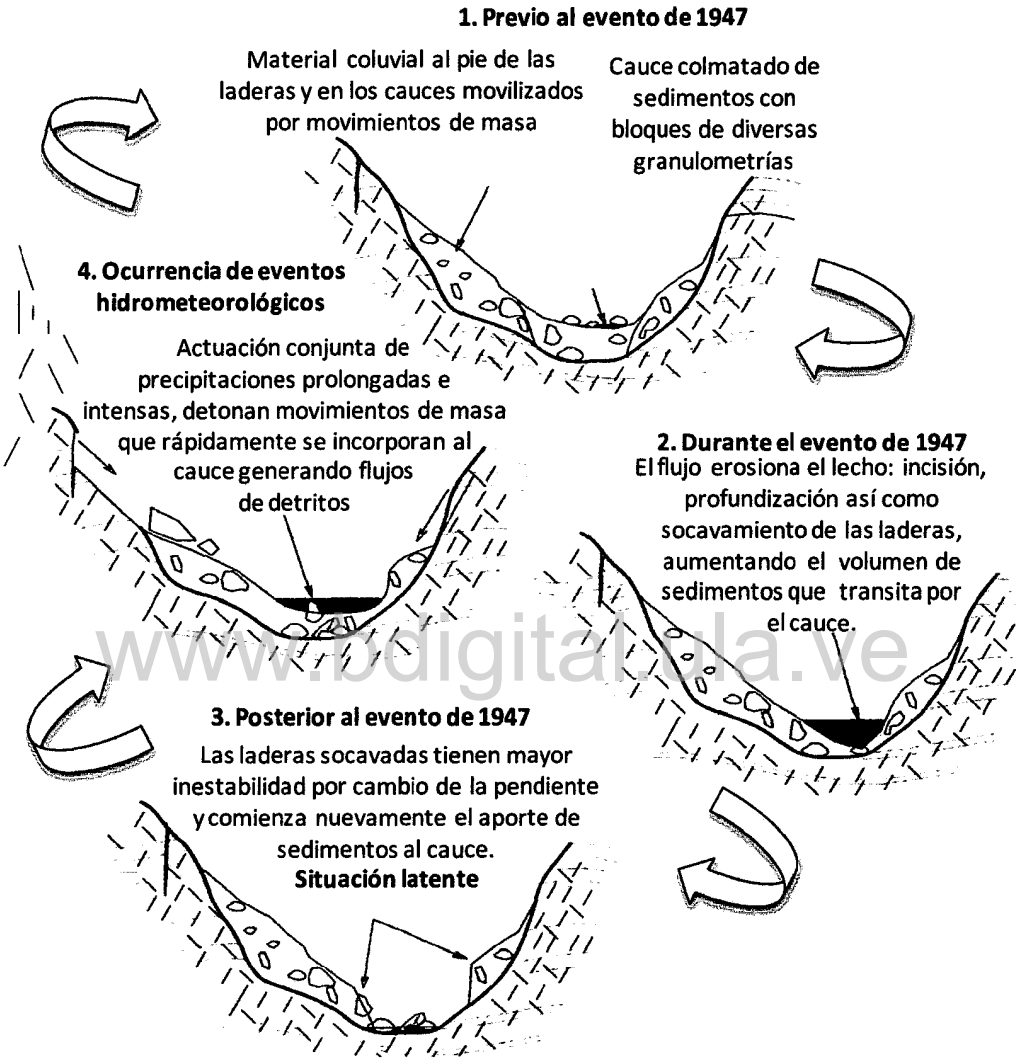
www.bdigital.ula.ve

d) Canales de incisión profunda

Canales de incisión profunda han sido reportados por otros autores como evidencia geomorfológica de la ocurrencia de flujos (Kellerhals y Church, 1990; Friele y Clague, 2005). En el área de estudio, esta característica se observa de manera acentuada en la quebrada Montalbán, sin embargo, también se evidencia en los cauces por donde transitan las quebradas de La Portuguesa y Aguas Calientes.

Esta condición, es de suma importancia, puesto que posterior al evento registrado en el año 1947, el cauce de la quebrada Montalbán se encuentra en condición de inestabilidad y latente, con potencial de desarrollar flujos de detritos, por la ocurrencia de caudales con suficiente capacidad de erosionar el lecho y arrastrar sedimentos acumulados en el cauce (Figura 26).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR



www.bdigital.ula.ve

Figura 26. Condiciones de estabilidad en cauces con potencial a generar flujos de detritos antes y después de la ocurrencia de un evento. Ejemplo de abanico de La Vega (1947). Se adaptó de Muguerza (2001).

e) Características de los depósitos sedimentarios

El análisis de las facies sedimentarias revela numerosos aspectos sin duda interesantes, en cuanto al origen y procesos involucrados en la formación de un depósito sedimentario. En el área de estudio, se han descrito algunas características de las facies sedimentarias de perfiles localizados en los distintos depósitos (PMA:

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

GCA-INGEOMIN, 2007) y como aspecto relevante, en términos de la ocurrencia de flujos de detritos en el área, destaca la identificación de facies del tipo Gcm con espesores de 3,50 m y de depositación reciente, así como también facies del tipo Gmm con espesores inferiores a 1 m en el abanico de La Vega (Figura 27), facies estas definidas por Miall (1996), como gravas masivas clasto soportadas y matriz soportadas respectivamente, relacionadas con depósitos de fluidos no-newtonianos y concentraciones de sedimento por volumen superiores al 50%.

Lo anterior implica que las características de la arquitectura fluvial de los depósitos, respaldan la evidencia geomorfológica de la ocurrencia de flujos hiperconcentrados y de detritos en la cuenca Montalbán, además de proporcionar un marco de referencia para la simulación de posibles escenarios de flujos con la aplicación de modelos numéricos (detalles en el apartado 4.3.2)

www.bdigital.ula.ve

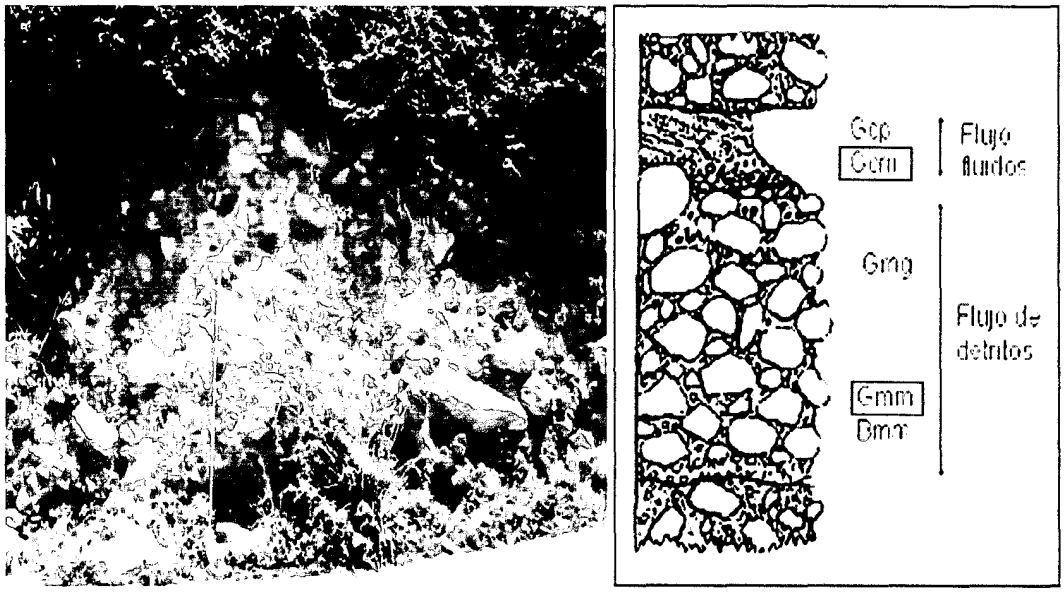


Figura 27. Materiales gruesos, del tamaño de cantos, bloques y peñas, de gneises y granitos, subangulares a subredondeados, en una matriz de grava areno-limosa en la sección apical o proximal del abanico La Vega. Obsérvese La fotografía se modificó de de PMA: GCA-INGEOMIN (2007).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Los perfiles de depósitos descritos en los abanicos de Aguas Calientes y Ejido, asociados con los aportes de sedimentos de las cuencas de Aguas Calientes y La Portuguesa respectivamente, muestran una dinámica con predominio hidrológico. Es decir, facies formadas por depósitos de fluidos newtonianos con concentraciones de sedimentos menores al 20%, originadas por procesos de depositación normal y crecidas máximas. Esto sugiere que para que se generen eventos de flujos de detritos e hiperconcentrados en estas cuencas, el volumen de sedimentos movilizados debe ser muy alto (períodos de retorno superiores a los 50 años).

f) Otras evidencias

Canales abandonados y desviados, depósitos laterales y super-elevaciones de flujo (evidencia de las velocidades que adquieren los flujos en su trayectoria), amplios depósitos en forma de abanicos por eventos de flujos de detritos ocurridos en el pasado (abanicos coalescentes de Ejido y abanico Don Luis), son otras muestras de la dinámica hidrogeomorfológica de las cuencas y su potencial para desarrollar flujos de detritos e hiperconcentrados en el área.

www.bdigital.ula.ve

Por otro lado, la superficie de los depósitos más antiguos, lucen aparentemente estables y sin indicadores de actividad fluviotorrencial reciente. Sin embargo, esta condición de estabilidad cambia, hacia los bordes de acumulación de dichos depósitos, en los cuales la inclinación de la pendiente es mayor y por lo tanto es posible la ocurrencia de movimientos de masa activos y procesos escurrimiento concentrado.

Como resultado de la zonificación geomorfológica, se distinguieron ocho categorías distintas de áreas que pueden ser potencialmente afectadas por la ocurrencia de flujos hiperconcentrados y de detritos, así como crecidas de desborde (Cuadro 23 y Figura 28).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Cuadro 23. **Zonificación de la superficie de los abanicos aluviales en categorías de procesos hidrogeomorfológicos**

Categoría	Descripción	Factores determinantes de riesgo[1]
Zona de impacto directo por flujos hiperconcentrados y de detritos *(Idf)*	Áreas potencialmente ocupadas por la trayectoria del flujo. Los materiales transportados pueden incluir bloques y megabloques, así como restos vegetales. El riesgo de daño por impacto es alto.	-Volumen y profundidad del flujo. -Velocidad de movimiento. -Distancia a la fuente de suministro. -Tamaño de los bloques transportados.
Zona de impacto indirecto por flujos hiperconcentrados y de detritos *(Iif)*	Áreas en las cuales las resurgencias de los flujos pueden dispersarse. El tamaño de los materiales transportados es variable, pero por lo general incluye restos vegetales y rocas menores a 1 m. El riesgo de daño por impacto es menor que en la categoría anterior.	-Volumen y profundidad del flujo. -Impacto por energía cinética y velocidad de movimiento. -Distancia a la fuente de suministro. -Tamaño de los bloques transportados. -Inclinación de la pendiente.
Zona de potencial depositación de detritos *(Adf)*	Áreas en las cuales se espera que ocurra la depositación de los sedimentos transportados por pérdida de energía cinética. El riesgo de impacto es bajo.	-Volumen y profundidad del flujo. -Tamaño de los bloques transportados.
Zona de impacto potencial por ruptura de obturaciones en el cauce *(Airp)*	Áreas en la que potencialmente se espera que ocurra impacto por la ola de descarga producida, luego de la obturación del cauce y posterior ruptura.	-Volumen y profundidad del flujo. -Impacto por energía cinética y velocidad de movimiento. -Distancia al punto de obturación. -Relación en el contenido de agua y sedimentos.
Zona de alta amenaza de desborde por crecidas *(AAcd)*	Alta probabilidad de afectación por la ocurrencia de crecidas de desborde. Potencial ocurrencia de procesos de avulsión.	-Distancia al cauce. -Volumen y profundidad del flujo. -Velocidad de movimiento.
Zona de moderada amenaza de desborde por crecidas *(Amcd)*	Moderada probabilidad de afectación por la ocurrencia de crecidas de desborde. Baja probabilidad de ocurrencia de procesos de avulsión.	-Distancia al cauce. -Volumen y profundidad del flujo. -Velocidad de movimiento.
Zona de baja amenaza de desborde por crecidas *(Abcd)*	Baja probabilidad de afectación por la ocurrencia de crecidas de desborde. No se espera que ocurran procesos de avulsión.	-Distancia al cauce. -Volumen y profundidad del flujo. -Velocidad de movimiento.
Áreas aparentemente estables-inactivas *(Ae)*	Áreas en las cuales no se espera afectación por eventos de flujos o procesos normales de depositación en la superficie del abanico, debido a que en la actualidad no presentan signos de actividad.	N/A

Nota. Se adaptó para de: "Hazard management on fans, with examples from British Columbia" por Kellerhals y Church, 1990, p. 350. (1) Factores que afectan a los elementos bajo riesgo.

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

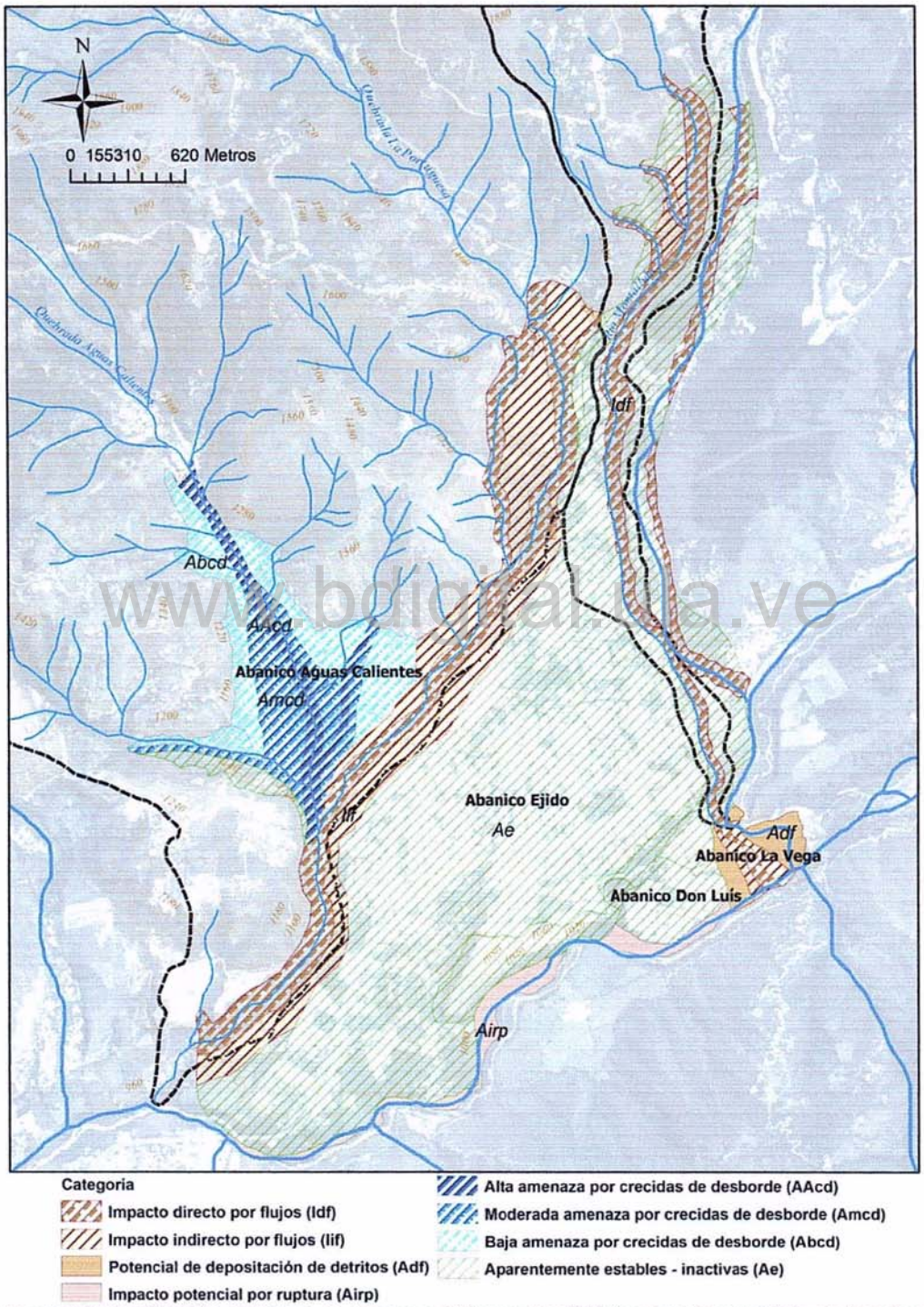


Figura 28. Zonificación de áreas de procesos hidrogeomorfológicos en la superficie de los abanicos aluviales.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

4.3.2. Simulaciones con FLO-2D

El modelo FLO-2D se aplicó para simular escenarios con caudales líquidos y con concentraciones de sedimentos para los períodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años. Los resultados de las estimaciones de profundidad máxima (tirante) y velocidad para caudales líquidos y sólidos se presentan en el Cuadro 24 y Figuras 29-32.

Como resultado de las estimaciones de los distintos escenarios de simulación, se encontraron las siguientes características de flujos newtonianos y no-newtonianos en los abanicos aluviales: i) *La Vega*, el área inundada ocupó la totalidad del abanico, las velocidades más altas de la trayectoria de flujos, se estimaron en el área de desplazamiento confinada al cauce y sección apical del abanico; ii) *Ejido*, el área inundada está confinada al cauce y la velocidad es variable durante su trayectoria, sin embargo se registran valores promedios superiores a los 5 m x s^{-1} y; iii) *Aguas Calientes*, las velocidades son altas en el ápice del abanico y alcanzan valores de hasta 6 m x s^{-1}, luego disminuyen progresivamente hacia la sección proximal. El área inundada ocupa un máximo del 20% de la superficie del abanico, y la intensidad del flujo desplazado disminuye conforme se aleja del cauce principal de la quebrada.

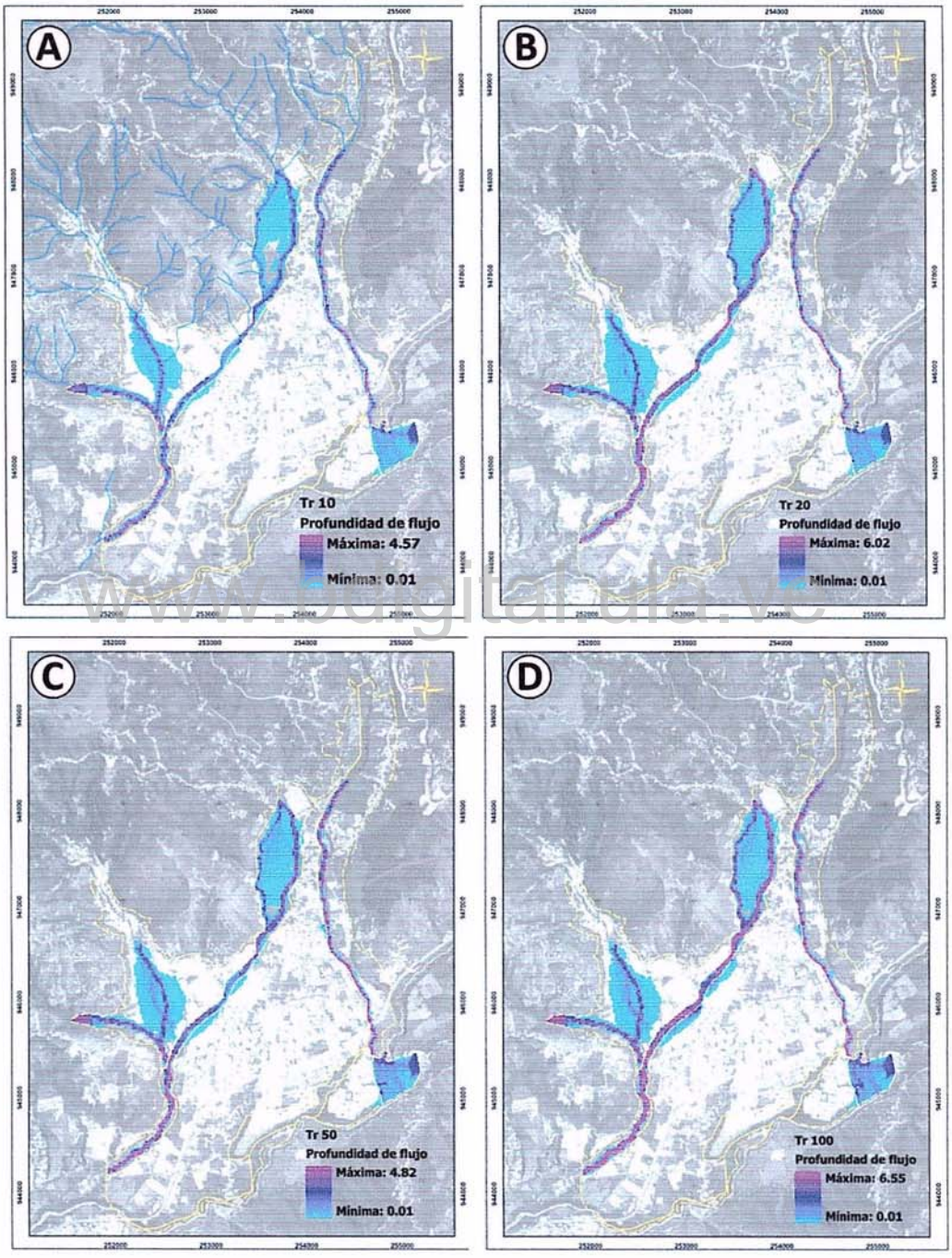
www.bdigital.ula.ve

Cuadro 24. **Valores estimados de velocidades y profundidades máximas para diferentes para cada período de retorno considerado**

Característica del flujo	Parámetro	Período de retorno (Tr)			
		10	20	50	100
Newtoniano	Profundidad máxima (m)	4,57	6,02	4,82	6,55
	Velocidad máxima (mxs^{-1})	14,12	15,3	16,37	17,57
No newtoniano(1)	Profundidad máxima (m)	6,13	7,02	5,9	6,26
	Velocidad máxima (mxs^{-1})	22,28	21,46	30,82	20,89

Nota. (1) Se consideró una concentración por volumen de 50% en los puntos de simulación de las quebradas La Portuguesa y 35% en el punto de simulación de la quebrada Aguas Calientes.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR



www.bdigital.ula.ve

Figura 29. Profundidades de flujo newtonianos en metros (caudal líquido) para los períodos de retorno (Tr) simulados. (A) Tr= 10 años; (B) Tr= 20 años; (C) Tr= 50 años y (D) Tr= 100 años.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

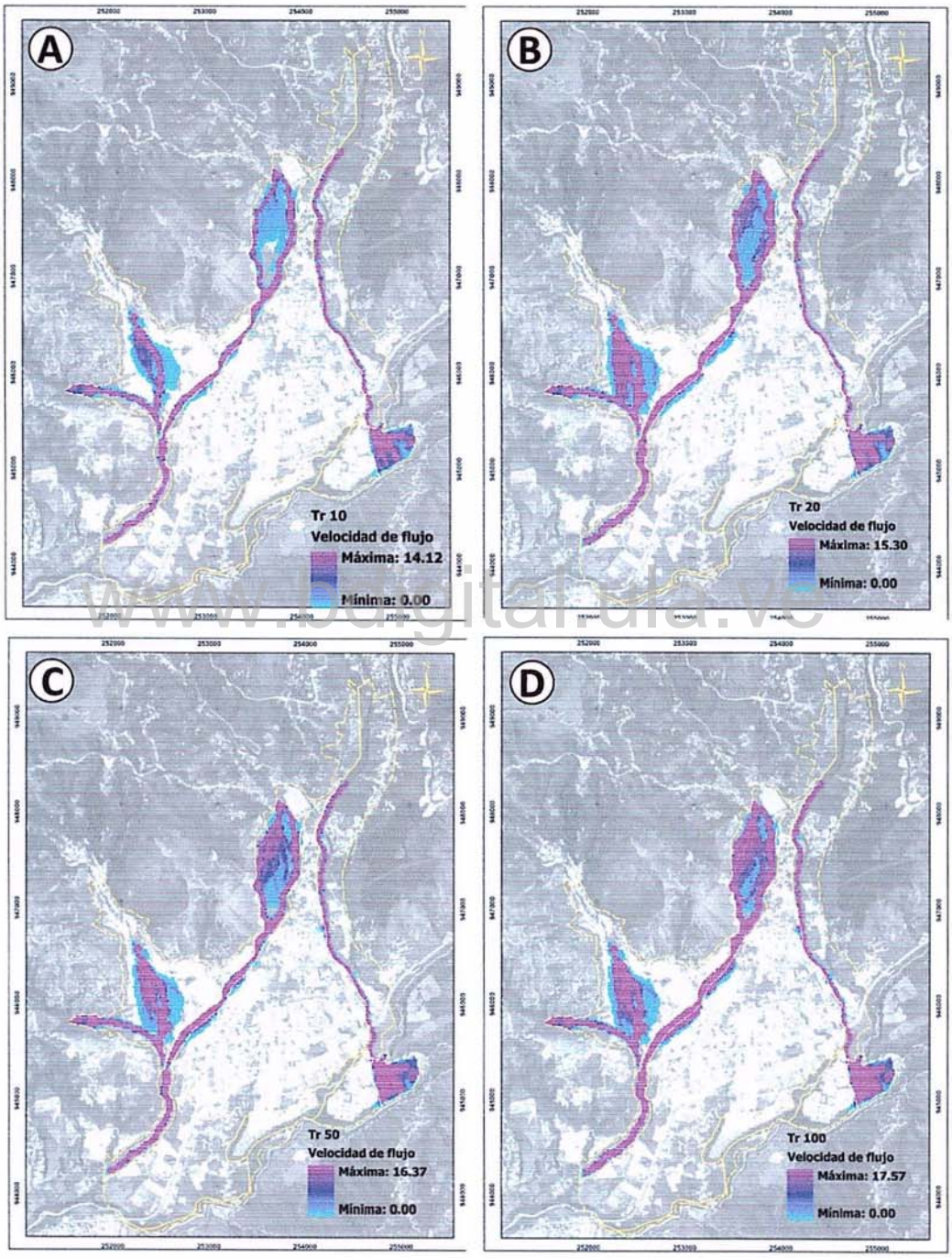


Figura 30. Velocidades de flujo en m x s^{-1} (caudal líquido) para los períodos de retorno (Tr) simulados. (A) Tr= 10 años; (B) Tr= 20 años; (C) Tr= 50 años y (D) Tr= 100 años.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

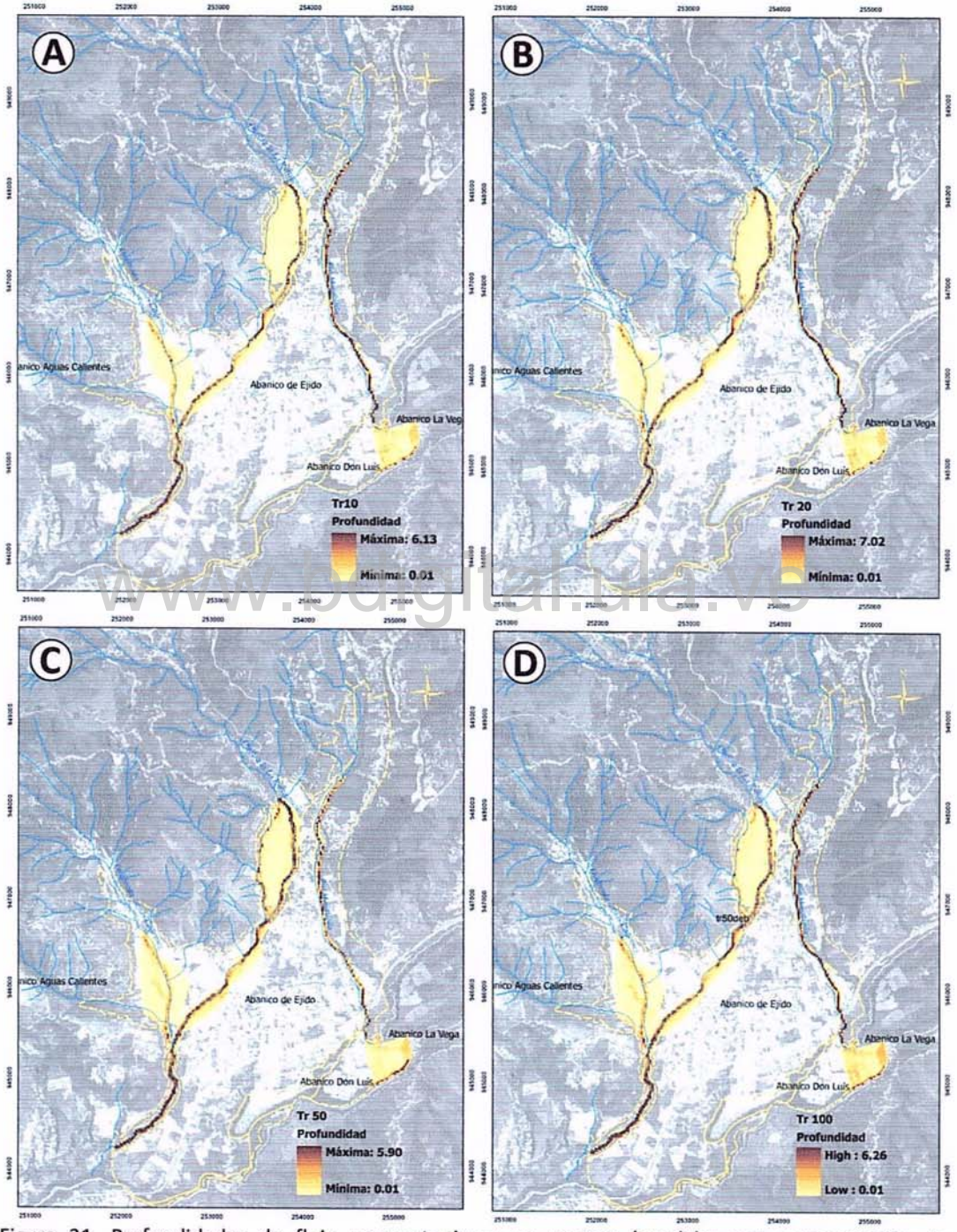


Figura 31. Profundidades de flujo no-newtonianos en metros (caudales con concentración de sedimentos) para los períodos de retorno (Tr) simulados. (A) Tr= 10 años; (B) Tr= 20 años; (C) Tr= 50 años y (D) Tr= 100 años.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

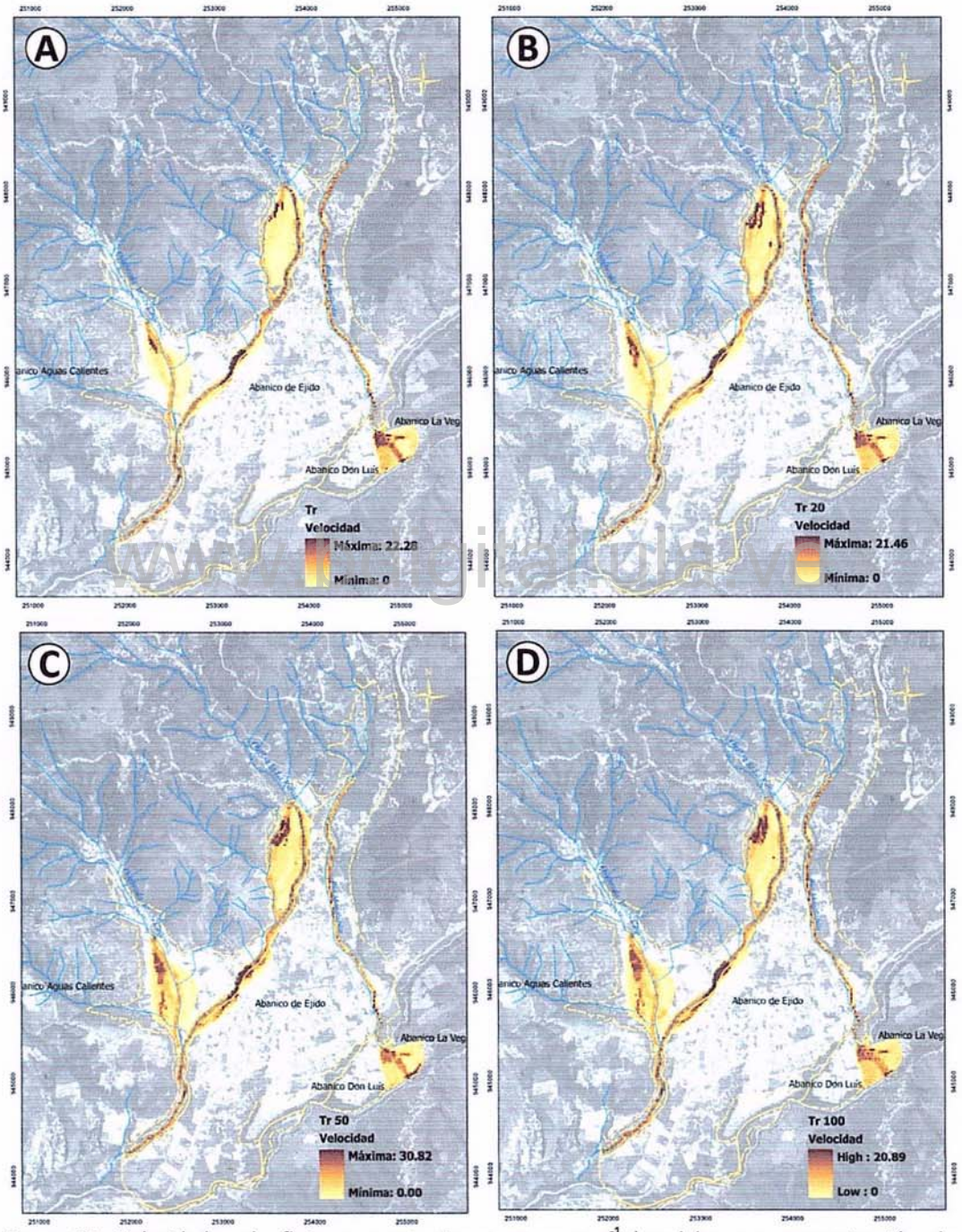


Figura 32. Velocidades de flujo no-newtonianos en m x s^{-1} (caudales con concentración de sedimentos) para los períodos de retorno (Tr) simulados. (A) Tr= 10 años; (B) Tr= 20 años; (C) Tr= 50 años y (D) Tr= 100 años.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Por otro lado, al comparar los valores del Cuadro 25, con los estimados en el Cuadro 17, se encuentra que para que se desplacen volúmenes de sedimentos equivalentes a los estimados por el modelo FLO-2D, es necesario que se activen en promedio el 34% de las áreas potenciales de flujos de detritos en la cuenca de la quebrada Montalbán, 41% en la cuenca de la quebrada La Portuguesa y 33% en la microcuenca de la quebrada Aguas Calientes. Lo anterior significa entonces, que deben activarse áreas extensas de deslizamientos para que puedan ocurrir flujos, que se infiere que sólo podrán ser detonadas por eventos con frecuencias superiores a los 50 años. Por consiguiente, mapas de amenaza por la ocurrencia de flujos hiperconcentrados y de detritos para períodos de retorno con frecuencias menores a los 50 años, pudieran no tener mayor significancia en el área.

www.bdigital.ula.ve

Cuadro 25. **Valores estimados de área inundada y volumen total de flujos hiperconcentrados y de detritos para cada período de retorno considerado**

Punto de simulación	Tr	Área Inundada	Flujos Volumen total	Flujos Caudales máximos (m^3xs^{-1})	Magnitud[(1)]
M-2	10	296000,00	282905,68	60,6	N/A
	20	302400,00	340274,25	78,15	N/A
	50	**282400,00**	**420376,47**	102,9	4
	100	**320800,00**	**477219,95**	122,1	4
LP-1	10	590000,00	431072,64	108,45	N/A
	20	690000,00	1061488,86	183,45	N/A
	50	**689200,00**	**724684,24**	226,35	4
	100	**667200,00**	**864266,43**	285	4
AC-1	10	219200,00	141045,02	37,7	N/A
	20	324400,00	320473,63	56,03	N/A
	50	**315600,00**	**222196,84**	81,77	4
	100	**342000,00**	**257609,54**	102,31	4

Nota. (1) Se asignó el valor de magnitud de acuerdo con lo establecido en "A size classification for debris flows" por Jakob (2005), p. 155. Los valores resaltados en negro, representan los valores de los flujos esperados de acuerdo con el potencial de producción de sedimentos estimados.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

4.4. Zonificación de amenaza preliminar

A partir de los resultados derivados de las simulaciones con el modelo FLO-2D, se determinó que para definir la intensidad de los eventos, la velocidad de los flujos es el criterio que mayor importancia para delimitar amenazas en los abanicos, tanto en el caso de crecidas máximas de desborde como flujos hiperconcentrados y de detritos (Figura 33). En el Cuadro 26, se especifican los criterios utilizados para delimitar los niveles de amenaza y en la Figura 33 se presentan los mapas de niveles de amenaza de acuerdo con dichos criterios. Las características de cada uno de los niveles definidos se explican a continuación.

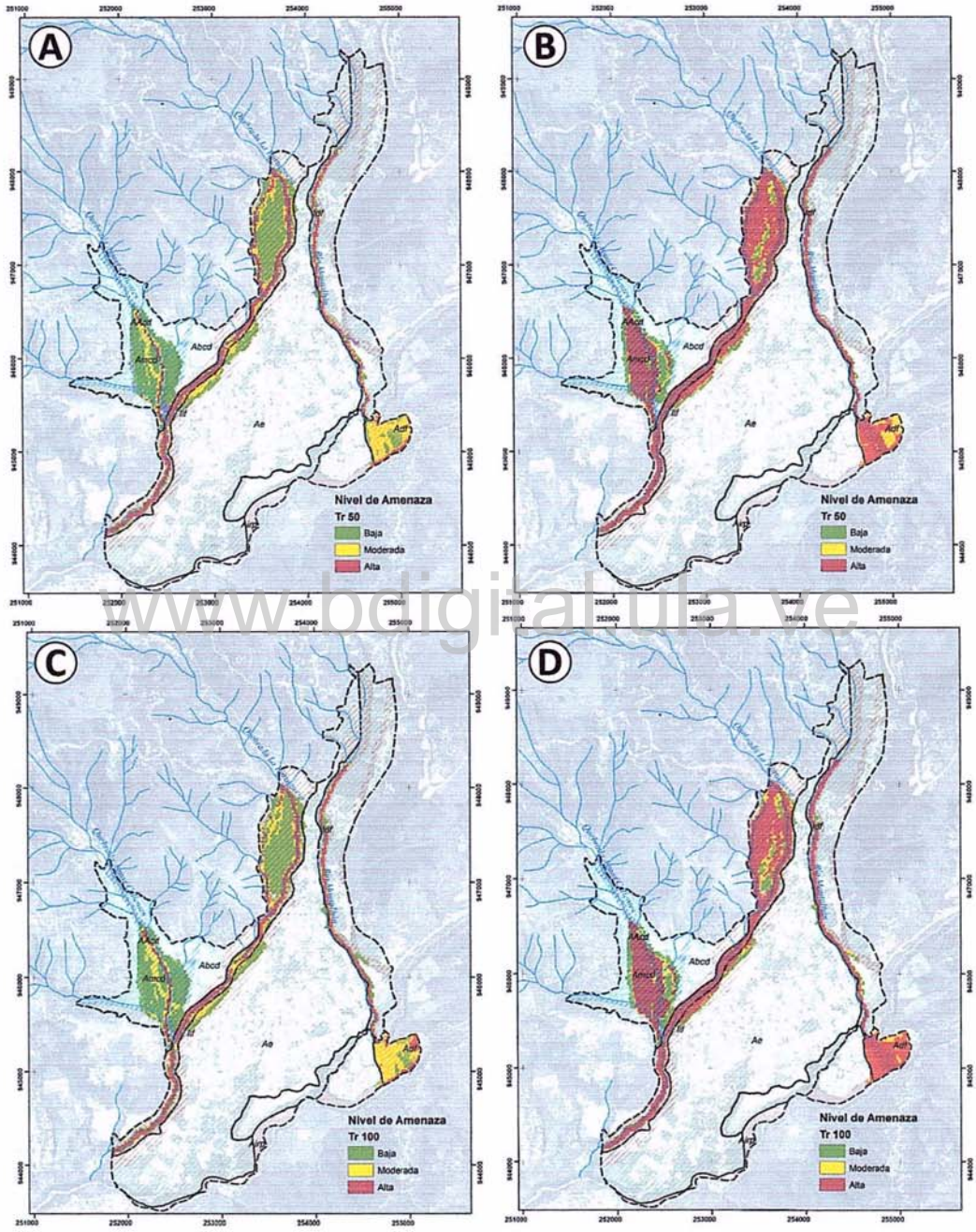
a) Nivel de amenaza alta

www.bdigital.ula.ve

La intensidad de los eventos es muy alta con frecuencias superiores a los 50 años (más probables con períodos de retorno de 100 años). Se estima la movilización de volúmenes de sedimentos superiores a los 200000 m^3, que pueden tener su origen en la ocurrencia de deslizamientos superficiales, desplazamiento de material en tránsito por erosión del lecho y socavación de laderas y taludes o una combinación de ambas. Las profundidades alcanzan tirantes de hasta 6 metros en las zonas de depósitos y velocidades de hasta 25 m x s^{-1} en las zonas de impacto directo.

En este nivel, se esperan la ocurrencia de eventos de magnitudes entre 3 y 4 (Jakob, 2005), con alta probabilidad de que la infraestructura sufra daños e incluso destrucción total, principalmente por el impacto directo por energía cinética y la velocidad del flujo durante la ocurrencia de flujos hiperconcentrados y de detritos de alta intensidad. Las personas pueden sufrir daños dentro y fuera de la infraestructura.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR



www.bdigital.ula.ve

Figura 33. Niveles de amenaza en los abanicos aluviales de las cuencas estudiadas. (A)Tr 50 años, criterio de intensidad: profundidad o tirante de flujo (m); (B) Tr 50 años, criterio de intensidad: velocidad de flujo (m x s^{-1}); (C) Tr 100 años, criterio de intensidad: profundidad o tirante de flujo (m) y (D) Tr 100 años, criterio de intensidad: velocidad de flujo (m x s^{-1}).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

b) Nivel de amenaza moderada

La infraestructura puede sufrir daño moderado y posible destrucción dependiendo de las características de la construcción. Las personas pueden sufrir daños fuera de las edificaciones. Los factores asociados con el riesgo están relacionados con el volumen y profundidad del flujo (profundidades con espesores menores a 1 m).

c) Nivel de amenaza baja

Los daños son muy localizados. La infraestructura puede ser afectada producto del ingreso de bajos volúmenes de sedimento y agua a las edificaciones. No se esperan daños a personas.

Cuadro 26. **Matriz de zonificación de amenaza por crecidas máximas y otros procesos hidrogeomorfológicos en la superficie de los abanicos**

www.bdigital.ula.ve

Niveles de intensidad	Profundidad máxima [1]	Velocidad Máxima [1]	Profundidad máxima [2]	Velocidad Máxima [2]
Alta	$h > 1{,}5\,m$	$vh > 1{,}5\,m^2/s$	$h > 1{,}0\,m$	$vh > 1{,}0\,m^2/s$
Media	$0{,}5\,m < h \leq 1{,}5\,m$	$0{,}5\,m^2/s < vh \leq 1{,}5\,m^2/s$	$0{,}2\,m < h \leq 1{,}0\,m$	$0{,}2\,m^2/s < vh \leq 1{,}0\,m^2/s$
Baja	$0{,}1\,m < h \leq 0{,}5\,m$	$0{,}1\,m^2/s < vh \leq 0{,}5\,m^2/s$	$0{,}2\,m < h \leq 1{,}0\,m$	$vh < 0{,}2\,m^2/s$

Nota. Se modificó de OFFE et al. 1997. (1) Criterio de profundidad y velocidad de flujo utilizado para crecidas máximas en la microcuenca de Aguas Calientes; (2) Criterio de profundidad y velocidad de flujo utilizado para flujos hiperconcentrados y de detritos en las cuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa.

Finalmente, de los resultados de esta investigación se destaca que dada la incertidumbre que caracteriza a los flujos de detritos, los mapas de amenaza generados sólo pueden ser considerados predictivos para los escenarios simulados, de allí la calificación de amenaza preliminar. Lo anterior no significa que no puedan utilizarse como herramienta de planificación, por el contrario, el contraste de la evidencia geomorfológica con lo simulado, validan los resultados obtenidos.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Capítulo 5. Discusión, conclusiones y recomendaciones

5.1. Dinámica de flujo de detritos y otros procesos hidrogeomorfológicos en relación con los niveles de amenaza en los abanicos aluviales

Las cuencas de las quebradas Montalbán y La Portuguesa, son sistemas hidrológicos torrenciales, con un alto potencial de generación y arrastre de sedimentos. Esta dinámica fluviotorrencial, en conjunto con la geología y los procesos geomorfológicos que predominan en las vertientes (movimientos de masa), explican en buena medida el origen y dinámica del sistema de abanicos aluviales coalescentes de Aguas Calientes- Ejido- Don Luis - La Vega.

www.bdigital.ula.ve

Estas condiciones, convierten a este pequeño sector de los Andes centrales venezolanos, en una oportunidad interesantísima para el estudio de amenaza y riesgo en un área que ha experimentado un crecimiento acelerado en los últimos años y que forma parte funcional del Área metropolitana de la ciudad de Mérida.

De los factores ambientales analizados, se considera que el factor pendiente, condiciona con mayor fuerza los procesos geomorfológicos que generan amenazas en el área de estudio. En las laderas, propician el desarrollo de movimientos de masa, sobre todo en inclinaciones comprendidas entre los 26° y los 50°. En los cauces (sección media de transporte), este factor favorece la evolución de eventos fluviotorrenciales, que adquieren grandes velocidades de desplazamiento, así como poder de socavación y erosión del lecho. En los abanicos, el cambio abrupto de la inclinación del terreno de *abrupta* a *moderada* y *suave*, contribuye a la pérdida de

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

energía cinética y por lo tanto conforman las áreas de desborde producto de crecidas excepcionales y la depositación de los volúmenes de sedimentos desplazados.

El factor geología, interpretado en términos de la calidad geotécnica de los macizos rocosos, tiene una influencia determinante en las características de los sedimentos que se movilizan por los distintos mecanismos de transporte. Dicho factor está controlado en las cuencas por las variaciones en la composición litológica y la influencia de los aspectos estructurales que modifican la calidad de los materiales litológicos.

Por ejemplo, en el caso de los macizos en los que afloran gneises y granitos (rocas que ocupan la mayor proporción dentro de las cuencas), la calidad de la roca se ve afectada principalmente por una combinación de elementos estructurales (aspectos de las discontinuidades) y las características de la roca (texturas foliadas con bandas de minerales menos resistentes). Mientras que, en el caso de los macizos en los que afloran areniscas de la formación La Quinta, la alta inestabilidad de los macizos responde más a las características texturales y mineralógicas de la roca, para determinar el comportamiento geotécnico de la misma así como sus condiciones de estabilidad.

www.bdigital.ula.ve

Por otro lado, el análisis de las características hidrogeomorfológicas así como la evidencia de los eventos históricos registrados en el área, sugiere que dentro de los mecanismos detonantes de procesos hidrogeomorfológicos en las cuencas estudiadas, las precipitaciones (intensas y de larga duración), son las que mayor importancia tienen.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Sin embargo, se presume que sólo se incorporarán volúmenes importantes de sedimentos a los cauces, que puedan evolucionar como flujos hiperconcentrados y de detritos, bajo la actuación conjunta de los dos tipos de precipitación, intensa y acumulada. En otras palabras, el material debe estar altamente saturado, para que una precipitación intensa (que supere los umbrales descritos en el capítulo anterior), pueda detonar movimientos de masa.

Con el propósito de sintetizar lo observado a partir de los resultados de la investigación y respondiendo al enfoque metodológico planteado, se divide la cuenca en tres secciones, que facilitan la explicación de la dinámica de los procesos hidrogeomorfológicos en relación con los niveles de amenaza en los abanicos aluviales.

www.bdigital.ula.ve

a) *Sección alta (generación de sedimentos)*:

Las fuentes de aporte de sedimentos en las cuencas altas, son principalmente los movimientos de masa. Las áreas potenciales de inicio de flujos de detritos y flujos hiperconcentrados por ocurrencia de deslizamientos superficiales se caracterizan en esta sección por pendiente con inclinaciones comprendidas entre los 26° y los 45° y macizos con comportamientos geomecánico controlados por aspectos estructurales. Los perfiles de meteorización son en general, poco profundos y las rupturas están influenciadas por las características de las continuidades. Las áreas con mayor probabilidad espacial de generación de flujos por evolución de deslizamientos superficiales, se encuentran localizadas en la parte inferior de la sección alta (límite con la sección media).

Por otra parte, en la cuenca de la quebrada Montalbán, el aporte de material coluvial por caída de rocas, en la parte alta, ha jugado un rol muy importante en la

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

colmatación y sedimentación del cauce de la quebrada. Esencialmente, porque una vez que la cuenca experimente un aumento de caudal, el tamaño de los bloques que potencialmente pueden desplazarse por dicho cauce durante un evento, tiene la capacidad de obturar secciones del río y generar flujos, posterior a la ruptura y consecuente ola de descarga.

b) *Sección media (generación de sedimentos y transporte):*

Los procesos geomorfológicos predominantes en esta sección están influenciados por el grado de inclinación del terreno y el comportamiento geomecánico de la roca. En inclinaciones superiores a los 20°, se registran numerosos deslizamientos en laderas muy inestables, con la particularidad de que las áreas fuentes de inicio de flujo de detritos se encuentran muy cercanas a los cauces. En consecuencia, la distancia de desplazamiento de los sedimentos es reducida y la probabilidad de que se incorporen sedimentos a los drenajes es mayor. Las áreas potenciales de inicio de flujo de detritos en esta sección, son las que mayor capacidad tienen de generar flujos de detritos en las cuencas.

www.bdigital.ula.ve

En los cauces, predominan los procesos de transporte así como de socavación y erosión del lecho. Los valores de pendiente del cauce le confieren una alta capacidad de arrastre de sedimentos y desarrollo de velocidades de hasta 20 m/s, para el caso de los flujos de detritos simulados.

Entre otros mecanismos de aporte de sedimentos en esta sección se destacan además: i) la socavación de laderas inestables por parte de las quebradas Montalbán y La Portuguesa en su margen derecha; ii) la inestabilidad de los cauces debido a la disponibilidad de sedimentos en tránsito con granulometrías que varían desde arenas y gravas hasta grandes bloques; iii) el poder de socavación y erosión del

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

lecho producto de los aspectos morfológicos e hidráulicos del canal y; iv) el potencial de obturación por la estrechez de las secciones en algunos sectores de la cuenca, así como el tamaño de los bloques que pueden ser desplazados. Por los aspectos anteriormente descritos, la amenaza en el cauce y en sus márgenes es muy alta en esta sección por impacto directo de flujos.

c) *Sección baja (depositación)*:

Comprende las unidades geomorfológicas de abanicos aluviales coalescentes. Los niveles de amenaza son altos por efecto del impacto de los procesos geomorfológicos, específicamente en las zonas identificadas como áreas de impacto directo e indirecto de flujos. De la distinción de niveles de amenaza, se encontró que flujos de detritos con concentraciones por volumen (*Cv*) iguales a 50% pueden alcanzar velocidades máximas superiores a los 6 m/s en el ápice de los abanicos y profundidades entre 1 y 3,5 m en las áreas de depósito para períodos de retorno de 100 años en el caso de los abanicos de La Vega y Ejido. Del mismo modo, en el caso del abanico de Aguas Calientes, flujos hiperconcentrados con concentraciones por volumen (*Cv*) iguales al 35% y períodos de retorno de 100 años alcanzan velocidades de 7 m/s en el ápice del abanico.

www.bdigital.ula.ve

De los resultados obtenidos, se debe llamar la atención, sobre los niveles de amenaza y riesgo de los elementos expuestos de las poblaciones localizadas en los sectores Aguas Calientes, La Vega y márgenes de las quebradas Montalbán y La Portuguesa (en una franja superior a los 50 m).

Finalmente, del estudio del comportamiento y posible dinámica de flujos de detritos, se concluye que flujos de detritos producidos por la socavación y arrastre de sedimentos en los cauces pueden tener frecuencias comprendidas entre los 50,

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

los 50, 100 y 500 años, tiempo en los cuales se espera que exista nuevamente suministro de sedimentos y ocurran precipitaciones intensas que generen picos de crecida con suficiente poder de arrastre de grandes volúmenes de sedimentos.

Por otro lado, flujos hiperconcentrados y de detritos, que tengan como origen deslizamientos superficiales, están controlados principalmente, por la profundidad de los perfiles de meteorización, así como por la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos de lluvias intensas y prolongadas. Estos pueden tener frecuencias con períodos de retorno de 50, 100 y 500 años, siempre y cuando se detonen movimientos de masa superficiales, por la combinación de precipitaciones intensas y acumuladas. En otras palabras, precipitaciones que superen los umbrales establecidos con perfiles de meteorización en condiciones de saturación muy alta.

www.bdigital.ula.ve

5.2. Consideraciones acerca de los métodos y técnicas utilizados: ventajas y limitaciones

De la evaluación de los resultados obtenidos se determinó que el uso de modelos de simulación para analizar el posible comportamiento de eventos que generan amenazas, combinados con enfoques heurísticos, basados en la interpretación de la geología y la evidencia geomorfológica, produce resultados oportunos para la zonificación preliminar de niveles de amenaza en la superficie de abanicos aluviales en cuencas altas de montaña. En este sentido, se considera que el enfoque metodológico utilizado en esta investigación, ofrece buenos resultados y por lo tanto, puede ser replicado en otras cuencas.

Por otro lado, mapas de amenaza definitivos son difíciles de lograr, dado el alto grado de incertidumbre relacionado con los eventos de flujos de detritos y otros

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

procesos que afectan la superficie de los abanicos aluviales. En el entendido de que, un mismo abanico puede ser afectado por eventos con concentraciones y tipos de sedimento distintos (dependiendo de la fuente de suministro), además de manifestarse con intensidades variables (de acuerdo con intensidad de los mecanismos detonantes). Consecuentemente, los escenarios evaluados pueden ser innumerables. Sin embargo, muy buenas aproximaciones se pueden lograr incorporando paneles de expertos, en el análisis de los resultados finales, interpretación de la evidencia de campo y discusión de diferentes hipótesis de trabajo.

Finalmente, se concluye que los modelos de simulación pueden ser considerados como herramientas para la evaluación de amenaza y creación de mapas predictivos siempre que: i) estén diseñados conceptualmente bajo los principios físicos y leyes que gobiernan la dinámica de los procesos que se pretenden simular; ii) existan parámetros de entrada adecuados, con preferencia determinados específicamente para el área de estudio y; iii) exista claridad en que las interpretaciones realizadas de los resultados del modelo, deben considerarse válidas, sólo bajo los supuestos sobre los cuales se definieron los distintos escenarios de simulación. A continuación se exponen una serie de argumentos en torno a los métodos y técnicas utilizadas que pueden ser considerados como premisas para la aplicación de métodos similares como el aquí propuesto.

www.bdigital.ula.ve

5.2.1. Modelo de susceptibilidad a movimientos de masa

La calidad del inventario de movimientos de masa, así como la elección de factores ambientales son los aspectos más importantes para determinar áreas susceptibles a movimientos de masa. En este sentido, la selección de la información espacial debe

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

ser muy cuidadosa, de manera que las interpretaciones que se deriven de la misma sea la más adecuada. A este respecto, autores como Soeters y Van Westen (1996), PMA: GCA (2007), Van Westen et al. (2008), Blahut et al. (2010) han llamado la atención sobre las características que deben tener los inventarios de movimientos de masa, las técnicas de análisis, la información cartográfica, así como las variables geoambientales de acuerdo con la escala de trabajo.

De la experiencia obtenida en esta investigación, se considera que los modelos de elevación digital DEM y las variables derivadas de los mismos (pendiente, orientación de taludes, curvatura, acumulación y dirección de flujo) tuvieron un rol fundamental para el análisis en interpretación de la dinámica hidrogeomorfológica en las cuencas. Por esta razón, su uso es imprescindible en este tipo de trabajos. Del mismo modo, las imágenes satelitales y las fotografías aéreas, constituyeron los instrumentos utilizados para la identificación de los tipos de movimiento y actividad.

www.bdigital.ula.ve

5.2.2. Modelo FLO-2D

El modelo FLO-2D, utilizado para la simulación de crecidas máximas y flujos (hiperconcentrados y de detritos), se considera una herramienta útil e interesante para la zonificación de amenazas hidrogeomorfológicas en la superficie de los abanicos aluviales estudiados. Desde el punto de vista de su selección sus principales ventajas son:

- Es un modelo matemático bidimensional y por lo tanto, considera los posibles bloqueos temporales de las secciones de flujo, los cambios de concentraciones durante el tránsito del hidrograma, entre otros, que por lo general no son considerados en los modelos unidimensionales.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

- Ha sido utilizado en numerosas investigaciones, en las que se simulan flujos hiperconcentrados y de detritos ocurridos en el pasado generando resultados muy similares a las evidencias encontradas en campo (Bello et al. 2003; García et al. 2004; Valderrama et al., 2006; Stolz y Huggel, 2008; Hsu et al., 2010). Sobre todo al momento de determinar el área inundada (aspecto fundamental para delimitar amenazas).
- Permite generar diferentes escenarios para la ocurrencia de flujos de detritos e hiperconcentrados, lo cual posibilita la zonificación de amenaza para distintas frecuencias de ocurrencia (períodos de retorno), que pueden ser utilizadas como instrumentos para la planificación y ordenación territorial en zonas urbanas, bajo enfoques de gestión de riesgo.

www.bdigital.ula.ve

Ahora bien, existen aspectos importantes que sin duda deben ser tomados en cuenta a la hora de decidir aplicar el modelo:

a) Calidad de los datos topográficos y otros datos de entrada

Se recomienda el uso de modelos de elevación digital (DEM) de alta resolución (tamaño de grid menor a 5 m). A este respecto, Stolz y Huggel (2008) encontraron que, al utilizar DEM de 1 m y 4 m de resolución, los resultados de la simulación fueron más acordes a lo observado en el campo, que cuando utilizaron un DEM de 25 m de resolución. Como consecuencia de lo anterior, la información requerida se puede transformar en costos muy altos para el proyecto. Sin embargo, en caso de no contar con DEM de alta resolución, los levantamientos topográficos detallados también ofrecen buenos resultados.

Por otro lado, el estudio de los mecanismos detonantes, es de estricta importancia para determinar frecuencias, intensidades y magnitudes de los eventos analizados.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Lamentablemente, es muy frecuente encontrarse con que no existen datos disponibles para estudiarlos. En este sentido, se considera que en estudios para determinar el comportamiento de eventos hidrogeomorfológicos detonados por eventos meteorológicos, la existencia de datos de precipitación para la cuenca, con series estadísticas largas, siempre será garantía de mejores estimaciones del modelo, frente a la necesidad de ajustar datos provenientes de estaciones cercanas al área de estudio.

La cuantificación real de los sedimentos, con el propósito de zonificar flujos hiperconcentrados y de detritos, supone una tarea más compleja que requiere el desarrollo de modelos para determinar el volumen de sedimentos en las áreas potenciales de inicio así como en el lecho.

www.bdigital.ula.ve

b) Tiempo de preparación de los datos

Cuando no se cuenta con datos acerca de los distintos parámetros que se requieren en los modelos, el tiempo de preparación es largo y supone que se incluyan más etapas en los procesos metodológicos. Esto implica, que grandes esfuerzos deben concentrarse en la preparación de dichos datos y la determinación de la calidad de los mismos, limitando muchas veces el tiempo para el análisis y discusión en los últimos estadios de la investigación.

5.2.3. Sistemas de Información geográfica

Sin lugar a duda, los SIG juegan un papel primordial en las evaluaciones de amenaza. La aparición explosiva de investigaciones aplicando metodologías soportadas en el uso de herramientas de SIG, así lo confirman. Por una parte, su importancia radica en que, ciertamente, facilitan el procesamiento de los datos y presentación de la información disminuyendo los tiempos de procesamiento. No obstante, su

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

importancia radica en la potencialidad que tienen estos sistemas, para la realización de procedimientos de análisis espacial que facilitan la consideración de gran cantidad de factores para fines específicos.

En esta investigación, los SIG comprendieron un aspecto fundamental como herramienta metodológica para: la delimitación de áreas de movimientos de masa y determinación de áreas susceptibles; la fotointerpretación de unidades geomorfológicas y coberturas del suelo, la creación del modelo de cuenca para la estimación de caudales máximos con HEC-HMS y la generación de los mapas finales.

5.3. Recomendaciones

www.bdigital.ula.ve

5.3.1. Investigaciones futuras

La investigación en el campo de la amenaza por eventos de origen natural, aun es un universo de respuestas inconclusas, principalmente porque el estudio de los mecanismos que detonan eventos, cuentan con un alto grado de incertidumbre y los modelos que se han desarrollado hasta ahora, no logran representar por completo las variables que intervienen en el comportamiento de los mismos. Por esta razón, existe una amplia gama de oportunidades de investigación, en este campo de estudio tan importante para el desarrollo planificado de actividades humanas. A continuación se listan una serie de aspectos que pudieran ser objeto de investigaciones posteriores en el área de estudio:

- Elaborar análisis determinístico de susceptibilidad a movimientos de masa en las áreas de mayor susceptibilidad.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

- Realizar caracterizaciones en el laboratorio, de la reología de los materiales que conforman los diferentes abanicos estudiados.
- Efectuar análisis de sensibilidad del modelo para parámetros tales como: n de manning y reología de la mezcla agua-sedimentos.
- Determinar hidrogramas con concentraciones por volumen (Cv) variables durante la duración del evento, basados en el análisis de los depósitos de sedimentos y estudios reológicos.
- Elaborar la cartografía reconstructiva del evento de 1947 y calibrar el modelo FLO-2D para simular dicho evento.
- Desarrollar modelos que permitan determinar escenarios en cuanto al volumen potencial de sedimentos que puede ser incorporado a los cauces durante diferentes eventos de lluvia.

www.bdigital.ula.ve

- La importancia de la lluvia como detonante de movimientos de masa, sugiere la necesidad de realizar investigaciones orientadas al establecimiento de modelos que permitan pronosticar la lluvia detonante, no sólo en términos de la lluvia evento, sino también de la lluvia acumulada y establecer así umbrales de precipitación a escala local.
- Plantear diferentes escenarios de simulación con el modelo FLO-2D. Especialmente, variando elementos de la reología de posibles flujos que pudieran desencadenarse en distintas secciones de las cuencas.

5.3.2. Medidas estructurales y no estructurales en las cuencas

Desde la perspectiva del manejo de cuencas se recomienda la aplicación de medidas estructurales y no estructurales para la mitigación de amenaza por flujo de detritos y otros procesos hidrogeomorfológicos. Algunas de estas medidas se listan a continuación.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

a) Medidas estructurales

Las recomendaciones para el desarrollo de medidas estructurales deben ser resultados de estudio detallado de los canales. No obstante, en las áreas con mayor amenaza, pudiera plantearse la posibilidad de implementarse obras de control de torrente orientadas a incrementar la capacidad de transporte de los canales, construcción de diques o ampliación de canales.

b) Medidas no estructurales

Tomando en consideración la planificación para el manejo de cuencas bajo enfoques de gestión de riesgo, las medidas no estructurales representan las medidas más importantes que se deben implementar. Esencialmente, porque son las que están orientadas a reducir la vulnerabilidad de los elementos bajo riesgo. Adicionalmente, se considera que son menos costosas y de fácil ejecución, una vez que se tienen claros los objetivos para los cuales son diseñadas. Algunas de las medidas no estructurales que se consideran importantes son:

www.bdigital.ula.ve

- Zonificación y cartografía de riesgo en el área de los abanicos aluviales, con una caracterización detallada de los elementos bajo riesgo.
- Implementar planes de conservación en las áreas boscosas. Se reconoce que la presencia de la cobertura vegetal densa en la sección alta de la cuenca ha contribuido a la disminución del potencial de desarrollo de movimientos de masa.
- Instalación de estaciones de precipitación en el área de las cuencas y monitoreo de la red de estaciones. Participialmente porque, a partir de una información pluviométrica sólida, es posible cuantificar las distintas relaciones entre la cantidad de lluvia que detonan movimientos de masa y crecidas máximas.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

- Consolidar un registro histórico de movimientos de masa que identifique con la mayor precisión posible, aspectos acerca de: la localización espacial, tipo, litología, volumen desplazado, así como las características de los eventos que actuaron como mecanismos detonantes del movimiento. Con la intención de desarrolla una base de datos integrada en un SIG que pueda ser objeto de actualización y revisión.
- Diseños de sistemas de alerta temprana en el área de las cuencas.
- Aplicación de normativas regulatorias para el uso del territorio en áreas de alta y moderada amenaza.
- Planes de gestión de riesgo de desastre local, articulados con planes de gestión estadal.

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Referencias Citadas

Alexander, D. (1993). *Natural disasters.* Holanda: UCL Press.

Alkema, D., Rusmini, M., Lubczynska, M., Van Westen, C., Kerle, N., Damen, M. et al. (2009). Hazard Assessment. En C. Van Westen (Ed.), *Multi-hazard risk assessment: Distance education course Guide book* (pp. 1-78). Enschede, Holanda: United Nations University – ITC Scholl on Disaster Geoinformation Management.

Andressen, R. (2007). Circulación atmosférica y tipos de climas. En Fundación Empresas Polar (Ed.), *Geo Venezuela 2. Medio físico y recursos ambientales* (pp. 238-328). Caracas: Autor.

Andressen, R. y Pulwarty, R. (2001). Análisis de las lluvias excepcionales causantes de la tragedia del estado Vargas, Venezuela, en diciembre de 1999. *Memorias del IV Simposio Internacional de Desarrollo Sustentable. Cambios Climáticos, Recursos Hídricos, Geo-Riesgos y Desastres Naturales* (pp.148-167). Mérida, Venezuela.

Arcement, J., y Schneider, V. (1989). *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains* [versión electrónica]. Recuperado el 13 de marzo de 2011 de http://www.engr.colostate.edu/~bbledsoe/CIVE413/Arcrement&Schneider.pdf

Armento, M., Genevois, R. y Tecca, P. (2008). Comparison of two debris flows in the Cortina d'Ampezzo area, Dolomites, Italy. *Landslides 5* (1), 143-150.

Arnold J.G., Williams J.R., (1995). SWRRB - A Watershed Scale Model for Soil and Water Resources Management. En V. Singh (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology* (pp. 847-908). Highlands Ranch, Colorado, EE.UU: Water Resources Publications.

Ataroff, M. y Sarmiento, L. (2003). *Diversidad en Los Andes de Venezuela. Mapa de Unidades Ecológicas del estado Mérida* [CD-ROM]. Mérida, Venezuela: Ediciones Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE).

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Audemard, F. (2009). Falla de Boconó. En Proyecto Multinacional Andino: Geociencia para las Comunidades Andinas (Ed.), *Atlas de deformaciones cuaternarias de los andes* (pp. 259-271) (Publicación Geológica Multinacional No. 7). Canadá: Servicio Nacional de Geología y Minería.

Bateman, A. Medina, V., Hürlimann, M. y Velasco, D. (2007). Modelo bidimensional para simulación de flujos detríticos: FLATModel. Aplicación a una cuenca del Pirineo Catalán. *Ingeniería hidráulica en México 22* (4), 5-20.

Bello, M., López, J., García, R., y O'Brien, J. (2003). Simulation of flooding and debris flows in the Cerro Grande River. *Acta Científica Venezolana 54*, 22-32.

Blaikie, P., Cannon, T. Davis, I. y Wisner, B. (1994). *At risk: natural hazards, people vulnerability and disasters.* London: Routledge.

Blahut, J., Van Westen, C., y Sterlacchini, S. (2010). Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology 119*, 36–51.

www.bdigital.ula.ve

Caine, N. (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler Series A-Physical Geography* 62: 23–27.

Carrara, A. (1983). A multivariate model for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology 15*, 403-426.

Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., y Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms 16*, 427–445.

Carrara, A., Crosta, G. y Fratini, P. (2008). Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. *Geomorphology 94*, 353-378.

Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M. y Reichenbach, P. (1999). Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. *Natural Hazards and Earth System Sciences 20*, 117–135.

Castellanos, E. y Van Westen, C. (2008). Qualitative landslide susceptibility assessment bymulticriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba. *Geomorphology 94*, 453–466.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Castillo, L. (2006). *Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú*. Trabajo Especial de Grado no publicado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Chow, V. y Maidment, D. (1988). *Applied Hydrology*. EE.UU.: Mc Graw Hill.

CNR-IRPI (2011). *Rainfall thresholds for the ignition of landslides*. Recuperado el 11 de junio de 2011 de http://rainfallthresholds.irpi.cnr.it/

Corominas, J. y García, A. (1997). Terminología de los movimientos de ladera. *Memorias del IV Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables* (pp. 1051-1075). Granada, España.

Corominas, J., Remondo J., Farias, P., Estevao, M., Zézere, J., Díaz, J. et al., (1996). Debris Flow. En R. Dikau, D. Brunsden, Schorott, L. y Ibsen, M. (Eds.). *Landslide recognition: identification, movement and causes* (pp. 161-180). Chichester: John Wiley & Sons Inc.

www.bdigital.ula.ve

Costa, J. (1984). Physical geomorphology of debris flow. En J. Costa y P. Fleisher (Eds). *Developments and application in geomorphology* (pp. 268-317). New York: Springer Verlag.

Costa, J. (1988). Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows. En: V. Baker, R. Kochel y P. Patton (Eds.), *Flood geomorphology* (pp. 113-122). New York: John Wiley & Sons.

Coussot, P. y Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews 40*, 209-227.

CRED (2008). *Emergency events Database* (EM-DAT). Recuperado el 13 de mayo de 2009 de http://www.emdat.be/Database/terms.html

Crozier, M. (1986). *Landslides: Causes, Consequences and Environment*. London: Croom Helm.

Crozier, M. (1996). The climate-landslide couple: a Southern Hemisphere perspective. *Paleoclimate Research 19* (12), 329-350.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Cruden, D. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment 43* (1), 27-29.

Cruden, D. y Varnes, D. (1996). Landslides types and processes. En: K. Turner y R. Schuster (Eds.), *Landslides. Investigation and Mitigation* (pp. 36-75). Washington, D.C, EE.UU: National Academy Press.

Cuervo, V. (2007). *Zonificación de amenaza por movimientos de masa con aplicación de tecnología de sistemas de información geográfica. Caso: cuencas del río Montalbán y quebrada La Portuguesa. Ejido estado Mérida*. Trabajo Especial de Grado no publicado, Escuela de Geografía, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Dai, F. y Lee, C. (2001). Frequency–volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. *Engineering Geology* 59 (3-4), 253-266.

Dávila, M. y Requena, M. *Zonificación de la amenaza hidrológica en un cono de deyección usando modelos de simulación hidrológica e hidráulica: aplicación a la Quebrada la Pedregosa, sector la Pedregosa, Estado Mérida*. Trabajo Especial de Grado no publicado, Escuela de Ingeniería Forestal, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

DeGraff, J. (1994). The geomorphology of some debris flows in the southern Sierra Nevada, California. *Geomorphology 10*, 231-252.

Di, B., Chen, N., Cui, P., Li, Z., He, Y. y Gao, Y. (2008). GIS-based risk analysis of debris flow: an application in Sichuan, southwest China. *International Journal of Sediment Research 23*, 138-148.

Duque, R. (2006). AJUSTE V3 programa para el análisis estadístico de una serie de datos historico [Software]. Mérida, Venezuela: CIDIAT, Universidad de Los Andes.

FAO (2007). *La nueva generación en programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas*. Roma: Estudio FAO; Montes N°150.

Ferrer, C. (1991). Características geomorfológicas y neotectónicas de un segmento de la falla de Boconó entre la ciudad de Mérida y la Laguna de Mucubají, Estado Mérida. *Guía de la excursión. II Escuela Latinoamericana de Geofísica* (pp. 25). Merida, Venezuela.

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Ferrer, C. (2005). Impacto geomorfológico del evento ocurrido el 11 de febrero en el Valle del Mocotíes y en la vía Mérida-Panamericana. *Foro Tragedia en el Valle del Mocotíes, causas y medidas para una gestión de riesgos* (pp. 9-16). Mérida, Venezuela.

Ferrer, C. y Laffaille, J. (2002). Ejido 1947: Un interesante ejemplo de formación y ruptura de laguna de obturación en la cuenca media del río Chama (Mérida-Venezuela). *Memorias de las III Jornadas de Sismología Histórica* (pp. 200-203). Caracas, Venezuela.

FLO-2D Software (2010). *FLO-2D Reference Manual 2009* [versión electrónica]. Recuperado el 13 de marzo de 2011 de http://www.flo-2d.com/wp-content/uploads/FLO-2D-Reference-Manual-2009.pdf

Fonseca, S. y Castro, E. (2001). Aplicación de un SIG para zonificación de amenazas por fenómenos de remoción en masa. En: J. Lemoine (Ed.), *Evaluación del riesgo por fenómenos de remoción en masa. Guía metodológica* (pp. 89-102). Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Friele, P. y Clague, J. 2005. Multifaceted hazard assessment of Cheekye fan, a large debris flow fan in Southwestern British Columbia. En: M. Jakob, y O. Hungr (Eds), *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena* (pp. 659-683). Berlín: Springer.

García, R. y López, L. (2005). Debris flow of December 1999 in Venezuela. En: M. Jakob y O. Hungr (Eds.), *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena* (pp. 519-538). Berlín: Springer.

García, R., Rodríguez, J. y O'Brien, J. (2004). *Hazard zone delineation for urbanized alluvial fans* [Versión electrónica]. Recuperado el 09 de marzo de 2009 de: www.flo-2d.com/information/ papers.htm

Glade, T. (2001). Landslide hazard assessment and historical landslide data—an inseparable couple? En T. Glade, P. Albini y F. Frances (Eds.), *The Use of Historical Data in Natural Hazards Assessment (Advances in Natural and Technological Hazard Research)* (pp. 153–168). Dordrecht, Holanda: Kluwer Academic Publications.

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Graham, T. y Burrel, E. (1997). *Natural hazards: explanation and integration*. New York, EE.UU: Guilford Press.

Guzzetti, F., Peruaccacci, S., Rossi, M. y Stark, C. (2008). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides 5*, 3-17.

Hartlen J. y Viberg, L. (1988). General report: evaluation of landslide hazard. *Fifth International Symposium on Landslides* (pp. 995-1000). Christchuchr, New Zeland.

Hungr, O. (2005). Debris flow hazard analysis. En: M. Jakob, y O. Hungr (Eds), *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena* (pp. 9-21). Berlín: Springer.

Hungr, O., Evans, S., Bovis, M. y Hutchinson (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental & Engineering Geocience 7* (3), 221-238.

www.bdigital.ula.ve

Hürliman, M., Copons, R. y Altimir, M. (2006). Detailed debris flow hazard assessment in Andorra: A multidisciplinary approach. *Geomorphology 78*, 359-372.

Hürlimann, M., Rickenmann, D., Medina, V. y Bateman, A. (2008). Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment. *Engineering Geology 102*, 152-163.

Hutchinson, J. (1968). Mass Movements. En: R. Fairbridge (Ed.). *The Encyclopedia of Geomorphology* (pp. 688–695). New York: Reinhold Book Corporation.

Hutchinson, J. (1988). Morphology and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides* (Vol 1. pp. 3-36). A.A. Balkema, Rotterdam.

Hsu, S., Chiou, L., Lin, G., Chao, C., Wen, H. y Ku, C. (2010). Applications of simulation technique on debris-flow hazard zone delineation: a case study in Hualien County, Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10, 535-545.

Ibsen, M., y Brunsden, D. (1996). The nature, use and problems of historical archives for the temporal occurrence of landslides, with specific reference to the south coast of Britain, Ventnor, Isle of Wight. *Geomorphology 15*, 241–258.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

IPCC (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis.* Ginebra, Suiza: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

ITC (2009). ILWIS (Versión 3.7) [Software]. Disponible en http://www.ilwis.org/open_source_gis_ilwis_download.htm

Iverson, R. (2005). Debris flow of December 1999 in Venezuela. En: M. Jakob, y O. Hungr (Eds.), *Debris-Flow Hazards mechanics* (pp. 105-134). Berlín: Springer.

Jackson, L., Kostaschuk, R., MacDonald, G. (1987). Identification of debris flow hazard on alluvial fans in the Canadian Rocky Mountains. *Reviews in Engineering Geology 7*, 115-124.

Jakob, M. (2005). A size classification for debris flows. *Engineering Geology 79,* 151–161.

Jakob, M. y Hungr, O. (2005). Debris flow hazard analysis. En: M. Jakob, y O. Hungr (Eds.), *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena* (pp. 1-7). Berlín: Springer.

www.bdigital.ula.ve

Jingjing, L., Yong, L., Pengcheng, S., Zunlan, C. y Peng, C. (2009). Temporal variation of intermittent surges of debris flow. *Journal oh Hydrology* 365, 322-328.

Kellerhals, R. y Church, M. (1990). Hazard management on fans, with examples from British Columbia. En: A. Rachocki y Church, M. (Eds.), *Alluvial fans: a field approach* (pp. 335- 355). Chichester: John Wiley & Sons Inc.

Lang, A.,Moya, J., Corominas, J., Schrott, L., y Dikau, R. (1999). Classic and newdatingmethods for assessing the temporal occurrence of mass movements. *Geomorphology 30* (1–2), 33–52.

Larsen, M., Simon, A. (1993). A rainfall intensity-duration threshold for landslides in a humid-tropical environment, Puerto Rico. *Geografiska Annaler Series A-Physical Geography* 75(1-2): 13-23.

Lee, S. y Sambath, T. (2006). Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models. *Environmental Geology*, 50 (6), 847-855.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Lee, S. y Taalib, J. (2004). Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology* 47 (7), 982-990.

Ley de Gestión Integral de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos (2009). *Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela Nº 39.095 del 9 de enero de 2009.*

Lorente, A., Beguería, S., Bathurst, J., García, J. (2003). Debris flow characteristics and relationships in the Central Spanish Pyrenees. Natural Hazards and Earth System Sciences, 3(6), 683-691.

Muguerza, A. (2001). *Aguas Arriba del flujo torrencial.* Caracas, Venezuela: Fundación Polar.

Nilsen, T. Wright, T., Vlasic, T., Spangle, W. (1979). Relative slope stability and land-use planning in the San Francisco Bay region, California. *U. S. Geological Survey. Prof. Pap. 944*, 96 pp.

www.bdigital.ula.ve

Oballos, J. y Ochoa, G. (2008). Caracterización de ultisoles en la cuenca del río Capaz, Mérida-Venezuela. *Agronomía Tropical 58* (4), 369-382.

O' Brien, J. (2003a). FLO-2D two-dimensional flood routing model software (Versión 2003.6.30) [Software]. Nutrioso, Arizona, EE.UU: FLO-2D Software Inc.

O'Brien, J. (2003b). *FLO-2D Users' Manual Version 2003.06.* Nutrioso, Arizona, EE.UU.: FLO-2D Software Inc.

Ochoa, G., Malagón, D. y Oballos, J. (2008). Influencia del material parental y del bioclima en la pedogénesis de la cuenca media y alta del río motatán. Mérida-trujillo. Venezuela. *Agronomía Tropical 58* (2), 125-140.

Ochoa, G., Oballos, J., Velásquez, J., López, I. y Manrique, J. (2009). Characteristic of dystrustepts in the venezuelan Andes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo 33* (6), 1777-1784.

OFEE, OFAT, ODEFP Ed. (1997). *Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire.* Bienne, Switzerland: Office fédéral de l'économie des aux (OFEE), Office fédéral de l'aménagement du

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

territoire (OFAT), Office fédéral de l'environnent, des forets et du paysage (OFEFP).

Ojeda, J. y Muñoz, F. (2001). Elementos conceptuales generales. En: J. Lemoine (Ed.), *Evaluación del riesgo por fenómenos de remoción en masa. Guía Metodológica.* (pp.17-28). Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

ONU-EIRD (1992). *Glosario multilingüe de términos convenidos internacionalmente para la gestión de desastres* [Versión electrónica]. Recuperado el 13 de mayo de 2005 de http://www.reliefweb.int/rw/lib.nsf/db900SID/LGEL-QNZV/$FILE/dha-glossary-1992 .pdf?Open Element

ONU-EIRD (2001). *Marco de acción Para la aplicación de la Estrategia Internacional de Reducción de Desastres (EIRD)* [Versión electrónica]. Recuperado el 30 de septiembre de 2009 de http://www.eird.org/fulltext/marco-accion/framework-espa nol.pdf

ONU-EIRD (2004). *Vivir con el riesgo: Informe mundial sobre las iniciativas para la reducción de desastres* [Versión electrónica]. Recuperado el 13 de mayo de 2005 de http://www.unisdr.org/eng/about_isdr/bd-lwr-2004-spa.htm

ONU-EIRD (2005). *Marco de Acción de Hyogo 2005-2015: Aumento de la resiliencia de las naciones y las comunidades ante los desastres* [Versión electrónica]. Recuperado el 30 de septiembre de 2009 de http://www.unisdr.org/hfa

ONU-EIRD (2009). *Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastre* [Versión electrónica]. Recuperado el 30 de septiembre de 2009 de http://www.unisdr.org/eng/terminology/UNISDR-Terminology-Spanish.pdf

Pelfini, M. y Santilli, M. (2008). Frequency of debris flows and their relation with precipitation: A case study in the Central Alps, Italy. *Geomorphology 121*, 721-730.

PNUD-UNDRO (1991). *Mitigación de desastres* [Versión electrónica]. Recuperado el 13 de mayo de 2005 de http://www.crid.or.cr/digitalizacion/pdf/spa/doc3846/doc3846.pdf

PMA: GCA (2007). *Movimientos en masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas* (Publicación Geológica Multinacional No. 4). Canadá: Servicio Nacional de Geología y Minería.

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

PMA:GCA-INGEOMIN (2007). *Estudio de susceptibilidad ante movimientos en masa. Caso subcuencas Montalbán-La Ceibita, Municipio Campo Elías edo. Mérida* (Inf. Téc.). Mérida, Venezuela: Autor.

Reichenbach, P., Cardinali, M., De Vita, P. y Guzzetti, F. (1998). Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tibet River Basin (Central Italy). *Environ Geol* 35 (2-3), 146-159.

Rickenmann, D. (1999). Empirical relationships for debris flow. *Natural Hazards and Earth System Sciences 19*, 47-77.

Rivas, M., Ovalles, Y., Soto, A., Ramirez, G., Ripanti, F. y González, J. (2009). Determinación de niveles de potencialidad torrencial de la cuenca del río Mocotíes, Merida, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana 53* (1), 33 – 41.

Schubert, C. (1982). Neotectonics of the Boconó fault, western Venezuela. *Tectonophysics 85*, 205–220.

www.bdigital.ula.ve

Schubert, C. y Vivas, L. (1993). *El Cuartenario de la cordillera de Mérida, Andes venezolanos.* Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes y Fundación Polar.

Sharpe, C. (1938). *Landslides and related phenomena.* New York: Columbia University press.

Soeters, R. y Van Westen, C. (1996). Slope instability. Recognition, analysis, and zonation. En: K. Turner y R. Schuster (Eds.), *Landslides. Investigation and Mitigation* (pp. 129-177). Washington, D.C, EE.UU: National Academy Press.

Soulas, J. (1985). Neotectónica del flanco occidental de los Andes de Venezuela entre 70°30 y 71°00W (Fallas de Boconó, Valera, Piñango y del Piedemonte). *VI Congreso Geológico Venezolano* (pp. 2690-2711). Caracas, Venezuela.

Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales.* [Libro en línea]. Recuperado el 13 de mayo de 2005 de http://albatros.uis.edu.co/~pagina/profesores/planta/jsuarez/publicaciones/librotaludes/index.html#1

Stolz, A. y Huggel, C. (2008). Debris flows in the Swiss National Park: the influence of different flow models and varying DEM grid size on modeling results. *Landslides 5* (1), 311-319.

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Thiery, Y., Malet, J., Sterlacchini, S., Puissant, A. y Maquaire, O. (2007). Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: Application to a complex mountainous environment. *Geomorphology 92* (1-2), 38-59.

TWRRC y TDEC. (2003). *Guide to the Selection & Design of Stormwater Best Management Practices (BMPs).* Recuperado 11 de marzo de 2011 de http://eerc.ra.utk.edu/divisions/wrrc/BMP/BMP%20PhaseII.pdf

USDA-SCS (1972). *National Engineering Handbook* (Section 4: Hydrology). Washington, DC, EE.UU: Department of Agriculture. Soil Conservation Service.

USDA-SCS (1986). *Urban Hydrology For Small Water Sheds* (Inf. Téc.). Washington, DC, EE.UU: Department of Agricultura. Soil Conservation Service. Engineering Division.

USDA-NRCS. (2004). *National Engineering Handbook* (Part 630-Hydrology) [versión electrónica]. Recuperado el 13 de marzo de 2011 de http://www4.ncsu.edu/~rcborden/CE383/References/nehhydro.pdf

US Army Corps of Engineers (2009). HEC-GeoHMS (Versión 4.2). [Sotfware]. Disponible en http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/download.html

US Army Corps of Engineers (2010a). HEC-HMS (Versión 3.5) [Sotfware]. Disponible en http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/download.html

US Army Corps of Engineers (2010b). *Quick Start Guide version 3.5* [versión electrónica]. Recuperado el 13 de marzo de 2011 de http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_QuickStart_Guide_3.5.pdf

Van Westen, C. (2009). Introduction to Disaster Risk Asessment. En: C. Van Westen (Ed.) *Multi-hazard risk assessment: Distance education course Guide book* (pp. 1-29). United Nations University – ITC School on Disaster Geoinformation Management.

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Van Westen, C., Castellanos, E. y Kuriakose, S. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Engineering Geology 102*, 112-131.

Varnes, D. (1958). Landslides types and processes. En E. Eckel (Ed.), *Landslides and engineering practice, Special Report 28* (pp 20–47). Washington, D.C, Highway Research Board, National Academy of Sciences.

Varnes, D. (1978). Slope movements. Type and processes. En: R. Shuster y R. Krizek (Eds.), *Landslides: Analysis and control* (pp 11-33). Washington, D.C, EE.UU: National Research Council, Special Report 176.

Varnes, D. (1984). Landslides hazard zonation: a review of principles and practice. En: UNESCO, *Natural hazard*: Vol. 3.

Valderrama, P., Castillo, L., Cárdenas, J., Carlotto, V., Fidel, L. (2006). Mapa de peligros y simulación del flujo FLO-2D en la quebrada Runtumayo (Cusco): alud y flujo de detritos del 12 de octubre del 2005. *Memorias del XIII Congreso Peruano de Geología* (pp. 12). Lima, Perú.

Ven Te Chow, Maidment, D., Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogota, Colombia: McGraw-Hill.

Wieczorek, G., Larsen, M., Eaton, L. Morgan, B., y Blair, J. (2001). *Debris-flow and Flooding Hazards Caused by the December 1999 Storm in Coastal Venezuela* (Inf. Téc. No. 01-144). Reston, EE.UU.: US Geological Survey.

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Apéndice

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Apéndice 1. **Número de curvas para la escorrentía para otras tierras agrícolas**

Cubierta del Suelo			Número de curva (CN) GHS			
Clase	Laboreo	Condición hidrológica para la infiltración	A	B	C	D
– Barbecho	---	---	77	86	91	94
– Cultivos alineados	R	Pobres	72	81	88	91
	R	Buenas	67	78	85	89
	C	Pobres	70	79	84	88
	C	Buenas	65	75	82	86
	C – T	Pobres	66	74	80	82
	C – T	Buenas	62	71	78	81
– Cultivos no alineados, o con surcos pequeños o mal definidos	R	Pobres	65	76	84	88
	R	Buenas	63	75	83	87
	C	Pobres	63	74	82	85
	C	Buenas	61	73	81	84
	C – T	Pobres	61	72	79	82
	C – T	Buenas	59	70	78	81
– Cultivos densos de leguminosas o prados en alternativa	R	Pobres	66	77	85	89
	R	Buenas	58	72	81	85
	C	Pobres	64	75	83	85
	C	Buenas	55	69	78	83
	C - T	Pobres	63	73	80	83
	C - T	Buenas	51	67	76	80
– Pastizales (pastos naturales)	---	Pobres	68	79	86	89
	---	Regulares	49	69	79	84
	---	Buenas	39	61	74	80
	C	Pobres	47	67	81	88
	C	Regulares	25	59	75	83
	C	Buenas	6	35	70	79
– Prados permanentes	---	---	30	58	71	78
– Montes con pastos (ganadero – forestal)	---	Pobres	45	66	77	83
		Regulares	36	60	73	79
		Buenas	25	55	70	77
– Bosques (forestales)	---	Muy Pobres	56	75	86	91
		Pobres	46	68	78	84
		Regulares	36	60	70	76
		Buenas	26	52	63	69
		Muy Buenas	15	44	54	61
– Caseríos	---	---	59	74	82	86
– Caminos en tierra	---	---	72	82	87	89
– Caminos en firme	---	---	74	84	90	92

Nota. Modificado de "National Engineering Handbook" por USDA-SCS (1972).

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Apéndice 2. **Número de curvas para la escorrentía para otras tierras agrícolas**

DESCRIPCION DE LA CUBIERTA		Nº de Curva para cada Grupo Hídrico de Suelo			
Tipo de Cubierta	**Estado Hidrológico**	**A**	**B**	**C**	**D**
Pastos, prados o forraje permanente para pastoreo.	Malo	68	79	86	89
	Medio	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
Prados cubiertos permanentemente con hierba, protegidos del pastoreo y normalmente segados para heno (prados de siega).	---------	30	58	71	78
Matorral, mezcla de matorral y maleza siendo el matorral el elemento prioritario.	Malo	48	67	77	83
	Medio	35	56	70	77
	Bueno	30	48	65	73
Mezcla de bosques y hierba (huerto o árboles frutales).	Malo	57	73	82	86
	Medio	43	65	76	82
	Bueno	32	58	72	79
Bosque	Malo	45	66	77	83
	Medio	36	60	73	79-
	Bueno	30	55	70	77
Granjas, construcciones, caminos, carreteras y alrededores.	------ --	59	74	82	86

Nota. Modificado de "Urban Hydrology For Small Water Sheds" por USDA-SCS (1986).

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Apéndice 3. **Corrección del CN por pendiente del terreno**

S	CN2				CN3				CN2s				CN3s			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
0,37	65,00	76,00	84,00	88,00	82,26	89,32	93,55	95,40	70,69	80,39	87,15	90,44	86,10	91,73	95,02	96,45
0,51	45,00	66,00	77,00	83,00	65,16	82,97	89,89	93,06	51,64	71,59	81,25	86,31	71,50	86,67	92,18	94,64
0,52	36,00	60,00	73,00	79,00	55,38	78,54	87,55	90,99	42,38	66,11	77,79	82,95	62,46	83,04	90,33	93,04
0,74	30,00	55,00	70,00	77,00	48,05	74,45	85,66	89,89	35,95	61,41	75,16	81,25	55,32	79,62	88,84	92,18
0,63	30,00	55,00	70,00	77,00	48,05	74,45	85,66	89,89	35,95	61,41	75,16	81,25	55,32	79,62	88,84	92,18
0,37	36,00	60,00	73,00	79,00	55,38	78,54	87,55	90,99	42,38	66,11	77,79	82,95	62,46	83,04	90,33	93,04
0,45	32,00	58,00	72,00	79,00	50,57	76,95	86,93	90,99	38,12	64,24	76,92	82,95	57,81	81,72	89,84	93,04
0,36	30,00	58,00	71,00	78,00	48,05	76,95	86,30	90,45	35,95	64,24	76,04	82,10	55,32	81,72	89,35	92,61
0,43	36,00	60,00	73,00	79,00	55,38	78,54	87,55	90,99	42,38	66,11	77,79	82,95	62,46	83,04	90,33	93,04
0,27	49,00	69,00	79,00	84,00	69,07	85,01	90,99	93,55	55,61	74,27	82,95	87,15	74,97	88,31	93,04	95,02
0,18	75,00	85,00	90,00	92,00	88,74	94,03	96,27	97,09	79,53	87,97	92,06	93,68	91,28	95,39	97,11	97,75
0,42	49,00	69,00	79,00	84,00	69,07	85,01	90,99	93,55	55,61	74,27	82,95	87,15	74,97	88,31	93,04	95,02
0,63	30,00	48,00	65,00	73,00	48,05	68,11	82,26	87,55	35,95	54,63	70,69	77,79	55,32	74,13	86,10	90,33
0,39	77,00	86,00	91,00	94,00	89,89	94,50	96,68	97,87	81,25	88,80	92,87	95,28	92,18	95,75	97,44	98,35
1,21	59,00	74,00	82,00	86,00	77,75	88,15	92,56	94,50	65,18	78,66	85,48	88,80	82,39	90,81	94,25	95,75

Nota. (S) pendiente media; (CN2) Condición II de humedad antecedente; (CN3) Condición III de humedad antecedente [1]; (CN2s) Condición II de humedad antecedente y corrección por pendiente del terreno [2]; (CN3s) Condición III de humedad antecedente y corrección por pendiente del terreno [3].

$$CN3 = CN2 \times e^{[0{,}00673\ (100-CN2)]} \qquad [1]$$

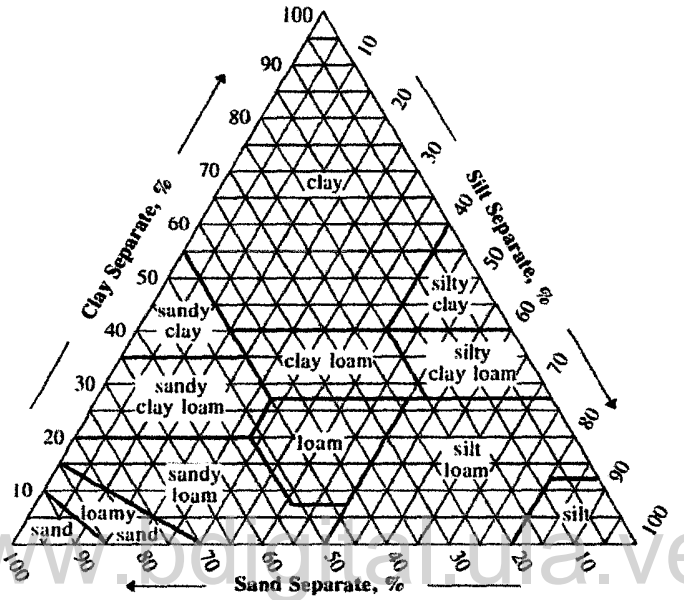
$$CN2s = \frac{1}{3}(CN3 - CN2) \times \left(1 - 2e^{(-13{,}86S)}\right) + CN2 \qquad [2]$$

$$CN3s = CN2s \times e^{[0{,}00673\ (100-CN2s)]} \qquad [3]$$

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Apéndice 4. **Triangulo de clases texturales de suelo**



www.biblioteca.ve

Clase textural		Grupo Hidrológico del Suelo
Sand	Arenoso	A
Loamy sand	Areno francoso	A
Sandy loam	Franco arenoso	B
Loam	Franco	B
Silt loam	Franco limoso	C
Sandy clay loam	Fran arcillo arenoso	C
Clay loam	Franco arcilloso	D
Silty clay loam	Franco arcillo limoso	D
Sandy clay	Arcillo arenoso	D
Silty clay	Arcillo limoso	D
Clay	Arcilloso	D

Nota. Modificado de *"Guide to the Selection & Design of Stormwater Best Management Practices (BMPs)."* por TWRRC y TDEC. (2003).

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Apéndice 5. **Coeficiente de rugosidad n de Manning para canales y planicies aluviales**

Descripción	Valores ajustados de n de manning	Valor asignado	Fuente
Cauce y planicies de inundación con vegetación y rocas	0,04 – 0,07	0,07	Arcement y Schneider (1989)
Concreto y asfalto	0,012 – 0,018	0,013	Arcement y Schneider (1989)
Urbanismo	–	0,012	Chow (1988)
Áreas de moderada a densa vegetación (se espera que la profundidad del flujo es menor a la altura de la vegetación)	0,05 – 0,10	0,08	Arcement y Schneider (1989)

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR

Apéndice 6. **Características de las unidades litológicas de los afloramientos en las cuencas Montalbán y la Portuguesa**

Era	Período	F/A	Litología UNIDADES LITOLÓGICAS QUE AFLORA EN EL ÁREA DE ESTUDIO	Contactos
CENOZOICO	CUATERNARIO		Sedimentos de origen aluvial, gravas y limos provenientes de las formaciones y asociaciones adyacentes, depositados en forma de abanicos y abanicos-terraza de cronoestratigrafías distintas.	Formaciones Sabaneta, La quinta y Asociación Tostós.
MESOZOICO	CRETÁCICO	Capacho	Lutitas duras de color gris oscuro a negro, calizas duras de colores claros, frecuentemente fosilíferas, y ocasionales limolitas que se diferencian de las areniscas macizas de la Formación Aguardiente infrayacente y de las capas delgadas de calizas y lutitas negras de la Formación La Luna suprayacente.	Concordante con las Formaciones Aguardiente y La Luna.
		Aguardiente	Areniscas calcáreas duras, de color gris a verde claro, grano variable y estratificación cruzada, localmente glauconíticas, con intercalaciones de lutitas micáceas y carbonáceas y algunos lechos de caliza en la parte inferior; localmente las areniscas son tan calcáreas que se aproximan a calizas arenosas.	Concordante y diacrónico sobre la Formación Apón; sin embargo, cerca de los núcleos andinos, descansa sobre un delgado conglomerado basal (Formación Río Negro), y transgresivo sobre la Formación La Quinta y la Asociación Mucuchachí.
		Apón	Calizas arenosas, lutitas areniscas cuarzosas, calizas puras, limolitas y margas, lutitas y limolitas que presentan rombos de dolomita y arenisca fina.	*Basal:* Transicional y diacrónico en la base. Infrayacente, con la Formación Río Negro. *Superior:* Transicional a la Formación Aguardiente.
		Río Negro	Areniscas blancas, generalmente de grano grueso, conglomerados heterogéneos; arcillas y lutitas variables, típicamente en tonos brillantes de amarillo, rojo y morado.	*Basal: Discordante* sobre rocas precámbricas, paleozoicas y mesozoicas. *Superior*: Concordante y ligeramente diacrónico con las calizas de la Formación Apón.
	URÁSICO TRIÁSICO	La Quinta	Toba vítrea de color violáceo (sección inferior), secuencia interestratificada de toba (sección media) arenisca gruesa y conglomerática, limolita y algunas capas delgadas de caliza, de color verde, blanquesino, gris o violáceo un intervalo superior, formado por limolita y arenisca, intercaladas con algún material tobáceo (sección superior).	Discordante con filitas de la Asociación Mucuchachí (Paleozoico superior) y discordante paralelo o transicional con la Formación Río Negro (Cretáceo Inferior)
PALEOZOICO	CARBONÍFERO INFERIOR	Sabaneta	Areniscas gruesas a guijarrosas, de color gris a marrón, limolitas y areniscas de color rojo a rojo violeta, brecha de peñones recubierta por una secuencia de areniscas y conglomerados, bloques angulares de filitas de la Asociación Mucuchachí, metamorfismo de bajo grado, con el desarrollo de pizarras.	*Basal:* Discordante sobre rocas del Paleozoico inferior. *Superior:* Transicional a la Formación Palmarito; cerca de Mérida existe un contacto de falla con la Formación La Quinta del Jurásico
	PALEOZOICO TARDÍO	Tostós	Secuencia de sedimentos metamorfizados, formados por pizarras, filitas, esquistos, gneises de grano fino, rocas silíceas masivas y anfibolitas. Las litologías predominantes son las filitas y esquistos, seguidos por rocas silíceas masivas, pizarras, gneises y anfibolitas.	Superior: discordante a la Asociación Sierra Nevada. Inferior: discordante sobre formaciones Paleozoicas (Sabaneta) y cretácicas (Río Negro).
PRECÁMBRICO	PRECAMBRICO SUPERIOR	Sierra Nevada	Micaesquistos y gneises, gneises migmatíticos, anfibolitas, gneises graníticos y localmente mármoles y cuarcitas.	*Basal:* No ha sido determinado *Superior*: Discordante con unidades Paleozoicas y Mesozoicas.

www.bdigital.ula.ve

C.C. RECONOCIMIENTO-NO COMPARTIR