



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:

MODELACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO HIPERCONCENTRADO EN CAUCES TORRENCIALES

QUE PARA OBTENER EL GRADO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

Miguel Ángel Rodríguez Velázquez

ASESOR:

**Dr. en Ing. Constantino
Domínguez Sánchez**

CO-ASESOR:

**Dr. Francisco Javier Domínguez
Mota**

Junio de 2017, Morelia, Michoacán

MODELACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO HIPERCONCENTRADO EN CAUCES TORRENCIALES

Miguel Ángel Rodríguez Velázquez

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, personas grandiosas que han enseñado a mis hermanos y a mí a enfrentar la vida con dignidad. Espero que este trabajo sea un pequeño reconocimiento a los grandes sacrificios que han hecho para lograr darnos a sus hijos, la oportunidad de conseguir nuestras “herramientas académicas”. Muchas veces nunca supimos cómo lo hacían, sin embargo, nunca nos fallaron. Muchísimas gracias mamá y papá.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi familia ya que, sin su apoyo incondicional y confianza, no hubiese logrado alcanzar esta meta. Las palabras siempre serán pocas cuando hay tanto que agradecer; así, que el presente trabajo espero sea un pequeño reconocimiento para ustedes, por cada sacrificio realizado, palabra de ánimo y “gota” de confianza depositada en mí. Muchísimas gracias por todo.

Quiero agradecer de manera muy especial a una persona muy importante en mi vida, que ha logrado hacer que mis metas y sueños adquieran sentido y me ha inspirado a plantear nuevos sueños y metas; a mi novia, Luz María, que ha estado siempre a mi lado y ha visto muy de cerca cada uno de los malos y buenos momentos durante todo este tiempo de mis estudios. Muchísimas gracias por brindarme tu amor, paciencia, comprensión y apoyo ilimitado.

Agradecer a todos mis profesores que me han honrado con sus enseñanzas durante mi preparación académica, sin duda, debo de reconocerles que cada uno de ellos ha sembrado un grano de curiosidad sobre el aprendizaje en mí, que ahora considero valiosos conocimientos. Sin embargo, quiero hacer un agradecimiento muy especial a mis asesores de tesis, el Dr. Constantino Domínguez Sánchez y el Dr. Francisco Javier Domínguez Mota, y a quien considere como mi tutora durante varios años, la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe, por todo su apoyo académico, comprensión y confianza, muchísimas gracias. Expresarles lo agradecido que estoy hacia ustedes, sinceramente, las páginas del presente texto serían insuficientes.

Me siento muy contento de haber decidido ingresar al Departamento de Hidráulica a realizar mi servicio social, ahí fue donde todo esto comenzó, al conocer a la gran familia de hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil, agradecer a cada uno de mis compañeros y amigos, y especialmente, reconocer el apoyo incondicional de Daniel Araiza Salcedo, María del Mar Navarro Farfán que me brindaron y lo siguen haciendo, muchas gracias por todo.

Posteriormente conocí a una nueva familia, tal vez no tan numerosa como lo es en el Departamento de Hidráulica, pero si igual de relevante en mi vida. Estoy en deuda con el profesor Dr. Francisco Javier Domínguez Mota, por sus constantes, inspiradoras y sabias sugerencias, orientaciones e ideas, además, por permitirme convivir y trabajar al lado de tan

apreciadas personas, Martha Leticia Ruiz Zavala, Daniel Santana Quinteros y Gerardo Tinoco Guerrero, muchas gracias por todo Dr. Mota. Me sentí muy feliz cuando por primera vez me reconocieron como un “hermano” más, el adoptado claro, pero ya era parte de su familia de trabajo. Gracias a cada uno de ustedes, con gran respeto les digo que aprecio mucho esta relación de trabajo, y aún más, la relación de amistad que se ha labrado como expresión por la afinidad de ideas, o tal vez, de tipo espiritual, durante el intercambio de conocimientos.

Agradecer al Dr. Álvaro Alberto Aldama Rodríguez por sus observaciones y comentarios para el presente trabajo de tesis.

Agradecer al M.C. Sócrates Figueroa Miranda y al Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal por la información y datos brindados.

Agradecer a aquellas personas que me han impulsado a forjar mis sueños y que han estado a mi lado desde el principio de este camino académico, mis amigos, especialmente agradecer a José Daniel Hernández Saavedra y Martin Aguilar Aguilar.

RESUMEN

Debido a sus condiciones geográficas, el estado de Michoacán experimenta el embate de ciclones tropicales de tal forma que al menos, uno de éstos toca o pasa cerca de sus costas al año (CENAPRED, 2004); dichos fenómenos producen lluvias intensas en las partes altas como sierras o montañas que, a su vez, generan grandes avenidas en los ríos, deslizamientos de laderas y flujo de lodos o de derrubios que llegan producir inundaciones y desastres en poblaciones cercanas.

Los deslizamientos constituyen uno de los procesos geológicos con mayor repercusión social y económica en el mundo, de aquí la necesidad por estudiar y analizar este fenómeno.

Desde hace algunas décadas se han producido flujos hiperconcentrados o de derrubios y fenómenos similares, que han ocasionado trágicos desastres en poblaciones cercanas a la zona de iniciación del fenómeno, registrando numerosas pérdidas humanas y económicas. Tal fue el caso en el municipio de Angangueo, Michoacán, en febrero del 2010.

La propagación del movimiento del geo-material, dadas sus características dinámicas puede describirse empleando mecánica de fluidos. En este trabajo, se muestra un análisis de las ecuaciones diferenciales de Navier-Stokes, las cuales gobiernan el movimiento de los fluidos y se muestran soluciones aproximadas mediante el método numérico de volúmenes finitos. El esquema de modelación debe complementarse con una ecuación que represente la ley reológica, y para ello se ha propuesto el Modelo de Takahashi.

Mediante este trabajo se implementará una metodología que contribuya a la predicción del comportamiento de los flujos hiperconcentrados o de derrubios. El cual puede orientarse hacia el desarrollo de una herramienta que proporcione información acerca de las características de interés en el diseño y formulación de medidas de protección, prevención y mitigación.

Palabras clave: Modelación numérica, flujo hiperconcentrado, cauces torrenciales, volúmenes finitos, flujo debris.

ABSTRACT

Due to its geographical conditions, the state of Michoacan experiences the onslaught of tropical cyclones so that at least one of these touches or passes near its shores every year (CENAPRED, 2004); such phenomena produce intense rainfalls in the highlands such as hills or mountains which, generate large currents in rivers, landslides slopes and flow of sludge or debris arriving to produce flood and disaster in nearby towns.

Landslides constitute one of the geological processes with great social and economic impact in the world, here arises the need to study and analyse this phenomenon.

Since some decades ago there have been hyperconcentrated or debris flows and similar phenomenona, which caused tragic disasters in towns near the area of the initiation of the phenomenon, producing numerous human and economic losses. Such was the case in the town of Angangueo, Michoacan, in February of the year 2010.

The spread of the movement of geo-material, given its dynamic characteristics, can be described using fluid mechanics. This thesis shows an analysis of the Navier-Stokes differential equations, which govern the movement of fluids, as well solutions obtained by finite volume numerical method. The modeling scheme is complemented with Takahashi's constitutive equation that represents the rheological law.

Through this work, a methodology to contribute to the prediction of the behaviour of hyperconcentrated flow or flow debris will be implemented. This can be oriented towards the development of a tool that provides information about the features of interest in the design and formulation of protection, prevention and mitigation measures.

Key words: Numerical modelling, hyperconcentrated flow, torrential riverbeds, finite volumes.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria.....	2
agradecimientos	3
Resumen	5
Abstract.....	6
Capítulo 1	12
1. Introducción	12
1.1-Objetivos.....	15
1.1.1-Objetivos particulares	15
Capítulo 2	16
2. Antecedentes	16
2.1-Inestabilidad de laderas	16
2.1.1.-Tipos de movimientos de ladera	16
2.1.1.1. Caídos o desprendimientos.....	17
2.1.1.2. Vuelcos.....	18
2.1.1.3. Deslizamientos	18
2.1.1.4. Expansiones o desplazamientos laterales.....	19
2.1.1.5. Flujos.....	20
2.1.2.-Factores influyentes en la inestabilidad de laderas.	21
2.2-Tipos de fluidos y su clasificación	23
2.3-Características de los flujos hiperconcentrados de derrubios.	30
2.4-Reología de los flujos hiperconcentrados.	32
Capítulo 3	37
3. Ecuaciones Gobernantes	37

3.1.- Ecuaciones Hidrodinámicas	37
3.2.- Modelo Reológico	41
Capítulo 4	44
4. Esquema de numérico de solución	44
4.1.-Dominio físico	46
4.2.-Discretización	48
4.3.-Condiciones iniciales y de frontera	58
4.3.1.-Condiciones iniciales	58
4.3.2.-Condiciones de frontera	58
4.4.-Resultados preliminares.....	60
Capítulo 5	74
5.Conclusiones y recomendaciones.....	74
5.1.-Conclusiones.....	74
5.2.-Recomendaciones	75
Referencias Bibliográficas.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Trayectoria histórica de ciclones tropicales en territorio mexicano (1851-2016) ..	13
Figura 2.1 Caída de rocas (Varnes, 1978).	17
Figura 2.2.- Esquema de un desprendimiento.	17
Figura 2.3.- Esquema de un vuelco	18
Figura 2.4.- Esquema de deslizamiento rotacional (izquierda) y traslacional (derecha).	18
Figura 2.5.- Esquema de expansiones laterales.	19
Figura 2.6.- Alternativa de clasificación de tipo de flujos (Corominas y Garcia Yagüe, 1997).	20
Figura 2.7.- Clasificación de flujos en función de la concentración volumétrica de finos.	27
Figura 2.8.- Perfil característico de una oleada de flujos hiperconcentrados de derrubios.	30
Figura 2.9.- Esquema de la zona de depósito, vista en planta y perfil.	31
Figura 3.1.- Sección longitudinal del dominio ocupado por el fluido en un plano vertical.	39
Figura 4.1.- Representación gráfica del proceso de formación de una discontinuidad.	44
Figura 4.2.- Ubicación geográfica del municipio Mineral de Angangueo y la microcuenca del río San Pedro.	46
Figura 4.3.- Malla de cálculo escalonada o “Staggered Cell”.	48
Figura 4.4.- Ejemplo de la discretización espacial sobre el dominio físico (3500 elementos).	49
Figura 4.5.- Detalle del método de volúmenes finitos para actualizar el valor de $W_{in} + 1$ con un método explícito en tiempo para un caso unidimensional.	56
Figura 4.6.- Forma esquemática de la aproximación numérica en una celda mediante el método de volúmenes finitos.	57
Figura 4.7.- Hidrograma de precipitación para la microcuenca del río San Pedro.	61
Figura 4.8.- Tirantes alcanzados en la simulación del flujo en condiciones de agua clara en el paso de tiempo 800.	62

Figura 4.9.- Tirantes alcanzados en la simulación del flujo en condiciones de agua clara en el paso de tiempo 1500.	63
Figura 4.10.- Tirantes alcanzados en la simulación del flujo en condiciones de agua clara en el paso de tiempo 5800.	64
Figura 4.11.- Velocidades alcanzadas en la simulación del flujo en condiciones de agua clara en el paso de tiempo 800.	65
Figura 4.12.- Velocidades alcanzadas en la simulación del flujo en condiciones de agua clara en el paso de tiempo 1400.	66
Figura 4.13.- Velocidades alcanzadas en la simulación del flujo en condiciones de agua clara en el paso de tiempo 4700.	67
Figura 4.14.- Tirantes alcanzados en la simulación de flujo hiperconcentrado en el paso de tiempo 700.	68
Figura 4.15.- Tirantes alcanzados en la simulación de flujo hiperconcentrado en el paso de tiempo 1200.	69
Figura 4.16.- Tirantes alcanzados en la simulación de flujo hiperconcentrado en el paso de tiempo 5400.	70
Figura 4.17.- Velocidades alcanzadas en la simulación de flujo hiperconcentrado en el paso de tiempo 700.	71
Figura 4.18.- Velocidades alcanzadas en la simulación de flujo hiperconcentrado en el paso de tiempo 1400.	72
Figura 4.19.- Velocidades alcanzadas en la simulación de flujo hiperconcentrado en el paso de tiempo 4800.	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.- Escala de velocidades de deslizamientos propuesta por Cruden y Varnes (1996).	21
Tabla 2.2.- Factores influyentes en la inestabilidad de las laderas y taludes.	22
Tabla 2.3.- Clasificación de deslizamientos en forma de flujo propuesta por Hungr et al. (2001).	23
Tabla 2.4.- Clasificación generalizada de los deslizamientos en forma de flujos	25
Tabla 2.5.- Comportamiento del flujo en función de la concentración de sedimentos.	28
Tabla 2.6.-Clasificación cualitativa de los regímenes para los flujos hiperconcentrados y de detritos.	33
Tabla 4.1. Parámetros morfométricos de la microcuenca del río San Pedro.	47
Tabla 4.2.- Condiciones impuestas en contornos abiertos.....	59

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Ante la generación de fenómenos naturales, el desarrollo rápido de la población, con su característica concentración en densos centros urbanos, es un factor más para que los daños en vidas y materiales se noten cada vez con mayor intensidad, transformándolo en un desastre. Los desastres naturales están inducidos, en casi su totalidad, por los seres humanos, ya que cada vez más se desencadenan a causa de actividades humanas como la deforestación, la rápida urbanización, la degradación ambiental y el cambio climático. En las décadas de los ochentas y noventas los efectos causados por los desastres en México significaron, en promedio anual, pérdidas de 500 vidas humanas y daños materiales por 700 millones de dólares (CENAPRED, 2006).

En numerosas ocasiones, la humanidad ha sido azotada por sequías, heladas, granizadas, nevadas, lluvias y vientos huracanados etc., dando señales que el planeta es y seguirá siendo muy dinámico en ese aspecto, sin embargo, investigaciones demuestran que existe actividad “anormal” en diferentes fenómenos climatológicos a partir de fechas críticas para el desarrollo tecnológico, como lo fue a partir de la Revolución Industrial. La incidencia de desastres naturales se ha triplicado en la década de los noventa, en comparación con la década de los setenta; además, desde 1860, siete de los diez años más calurosos se presentaron durante la década de los noventa. No se puede ligar directamente la mayor incidencia de los desastres naturales con el cambio climático global, sin embargo, de acuerdo con los Informes de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), existen datos que indican potenciales daños en escenarios futuros como consecuencia de la alteración climática que se está generando en el planeta.

En épocas recientes, se han producido fenómenos hidrometeorológicos en el estado de Michoacán, el cual, por sus condiciones geográficas y orográficas, se ve afectado por el desarrollo de tormentas tropicales de gran intensidad, ocasionando inundaciones, inestabilidades de laderas y otros efectos. En la Figura 1.1 se muestran las trayectorias históricas

de tormentas tropicales y huracanes que han tocado territorio nacional desde 1851 hasta el 2016. El pronóstico de la trayectoria de los ciclones tropicales sirve de guía para la toma de decisiones sobre la protección a la población, sin embargo, históricamente demuestra que no solo el estado de Michoacán experimenta el embate de estos fenómenos meteorológicos sino prácticamente todo el país.

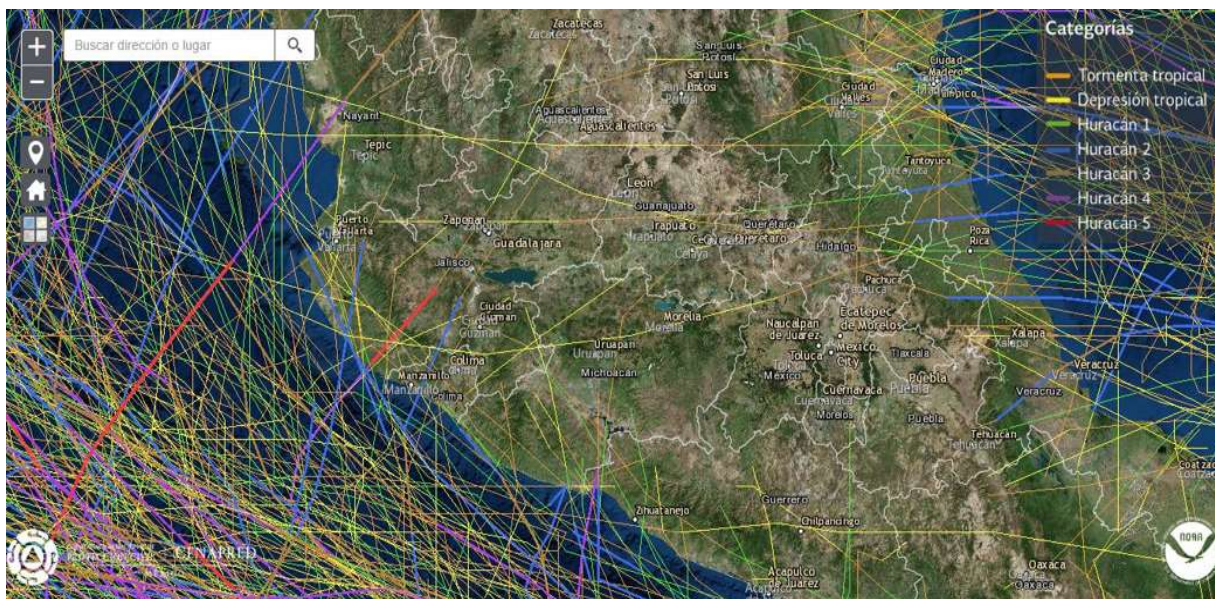


Figura 1.1.-Trayectoria histórica de ciclones tropicales en territorio mexicano (1851-2016)

Fuente: CENAPRED & Protección civil, 2016 (<http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/app/hurTime>)

Las inundaciones se cuentan entre los desastres naturales que han ocasionado más pérdidas de vidas humanas y materiales, y que cada año parecen ser más frecuentes y severas. Algunos autores suelen clasificar las inundaciones en dos grandes categorías, según ocurran en zonas montañosas o en llanuras, aunque, las últimas suelen ser continuación de las primeras y se estudian mediante las teorías y conceptos desarrollados por la hidráulica fluvial. Las inundaciones de zonas montañosas o de las partes altas de las cuencas traen consigo otros fenómenos, como deslizamiento de tierras y flujos de escombros, los cuales no son meramente resultado de un flujo de agua, sino que dependen de la geología y la geomorfología del sitio donde ocurren (Li Liu, 2002).

Los deslizamientos de laderas están asociados a una serie de factores, tales como, geometría, características geomorfológicas, propiedades de los materiales y agentes desencadenantes (Sánchez, 2009). De los cuales, los flujos hiperconcentrados de escombros son un caso

particular. Éstos ocurren principalmente a causa de lluvias intensas sobre suelos saturados de laderas, deforestación, sismos, erupciones volcánicas, entre otros factores.

Los flujos de derrubios o escombros son mezclas que contienen altas concentraciones de material sólido suelto heterogéneo impulsadas por la gravedad; tal como lo menciona Sánchez (2009), lo hace un flujo entre rápido y extremadamente rápido de derrubios saturados plásticos dentro de un canal de drenaje existente, pudiendo alcanzar velocidades superiores a 20 m/s.

Como se ha mencionado ya, desde hace algunas décadas se han producido flujos hiperconcentrados o de derrubios y fenómenos similares, que han ocasionado trágicos desastres en poblaciones cercanas a la zona de iniciación del fenómeno, registrando numerosas pérdidas humanas y económicas. Tal fue el caso en el municipio de Mineral de Angangueo, Michoacán, en febrero del 2010.

Relativamente, han sido pocos los trabajos de investigación involucrados en esta área, posiblemente por la complejidad del tema, además, no poder realizar fácilmente estudios y análisis experimentales en tiempo real y a escala natural obstaculiza la oportunidad de ampliar los conocimientos sobre los flujos hiperconcentrados de derrubios. En este sentido, en los últimos años se ha aprovechado el avance en las técnicas computacionales y numéricas, las cuales ofrecen una alternativa de modelación de los procesos fluviales y evitan algunas limitaciones de la modelación física.

En este trabajo, se muestra un análisis de las ecuaciones diferenciales de Navier-Stokes, las cuales gobiernan el movimiento de los fluidos y se muestran soluciones aproximadas mediante el método numérico de volúmenes finitos. El esquema de modelación, el cual se describe en el Capítulo 4, debe complementarse con una ecuación constitutiva que represente las tensiones y velocidad de deformación del flujo, para ello, en el Capítulo 2 se exponen los principales modelos reológicos existentes y las ecuaciones constitutivas que proponen. Para nuestro caso de estudio se ha propuesto utilizar el Modelo de Takahashi (1991).

El trabajo requerido para la modelación de este tipo de flujos es muy basto por lo que, se propone acotarlo, para lo cual se considera solamente la modelación de flujo hiperconcentrado en una región empleando un modelo reológico descriptivo. Es importante resaltar que los resultados que se muestran son preliminares debido a la complejidad del problema y a la limitación de los datos disponibles. Se empleo para realizar las modelaciones preliminares el software IBER v.

2.4.3, las cuales, en conjunto con el trabajo desarrollado por Figueroa (2013), permitirán un punto de comparación. Para trabajos futuros se espera tomar en cuenta la modelación en tres dimensiones y otros modelos reológicos.

1.1-Objetivos

El objetivo principal es desarrollar una metodología para la modelización numérica de geo-materiales fluidificados, aplicable a la simulación de la propagación de los flujos hiperconcentrados y de derrubios en cauces torrenciales.

1.1.1-Objetivos particulares

- Revisar el estado del arte sobre la metodología existente para la modelación numérica de flujos hiperconcentrados de derrubios. Con ello se espera la selección de los modelos y ecuaciones que se adaptan a las condiciones de la zona de estudio y zonas similares.
- Aplicación de un modelo que contenga una metodología de volúmenes finitos, para estudiar los fenómenos de flujo de hiperconcentrado, como el registrado en febrero del 2010 en el municipio Angangueo, Michoacán; región del Estado susceptible a fenómenos de esta índole.

CAPÍTULO 2

2. ANTECEDENTES

Este capítulo presenta una clasificación generalizada de los tipos de movimientos de laderas, los conceptos básicos de los tipos de fluidos y su clasificación; además, describir brevemente los modelos reológicos que permiten representar la dinámica de fluidos hiperconcentrados.

2.1-Inestabilidad de laderas

Los movimientos de laderas son procesos geológicos que implican un movimiento gravitacional a lo largo de la ladera, de materiales como roca, derrubios o detritos (naturales y artificiales), y suelo, el cual no siempre ocurre sobre una superficie definida y puede incluir diferentes mecanismos como desprendimiento, deslizamiento y flujo. Sin embargo, pueden entenderse como los reajustes del terreno para conseguir un estado de equilibrio ante un cambio de condiciones (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002). Los fenómenos se vuelven bastante complejos y relativamente habituales, ya que existe una gran diversidad de factores y condiciones que pueden incitar la inestabilidad de laderas. Muchas de las laderas en México se encuentran potencialmente inestables, es decir, están en condiciones para que los movimientos pueden iniciar con gran facilidad. Por un lado, los materiales térreos formadores pueden ser poco resistentes o estar caracterizados por la presencia de sistemas de debilidad como diaclasas, fracturas, fallas, etc. O bien, estar expuestas a factores externos, que son pieza fundamental para lograr el desequilibrio de las propias laderas, tales como la erosión y deforestación (Alcántara, A. I., Echavarría L. A., Gutiérrez M. C., Domínguez M. L. & Noriega R. I., 2001).

2.1.1.-Tipos de movimientos de ladera

Existe una gran variedad de fenómenos incluidos como movimientos de ladera y con una compleja clasificación. De acuerdo con Copons y Tallada (2009) diferentes autores (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996; Corominas y Yagüe, 1997) clasifican los movimientos de ladera según el tipo de movimiento y naturaleza de los materiales inestabilizados.

De manera análoga González de Vallejo et al. (2002), indica que los movimientos de laderas suelen clasificarse de acuerdo a los tipos de materiales involucrados (materiales rocosos, derrubios y suelos) y al mecanismo y tipo de rotura; además de algunos otros factores, por ejemplo, el contenido de agua en el terreno, la velocidad y magnitud del movimiento.

En este trabajo se ha utilizado la clasificación de Varnes (1978), que describe de forma adecuada los movimientos de ladera generados en el municipio de Angangueo en febrero del 2010. De manera generalizada se pueden identificar cinco tipos de mecanismos de rotura: los desprendimientos o caídos, vuelcos, deslizamientos, expansiones o desplazamientos laterales y los flujos. Cuando el mecanismo inicial de un movimiento se transforma en otro, se dice que es un “movimiento complejo” (Copons & Tallada 2009).

2.1.1.1. Caídos o desprendimientos

Es un bloque o masa rocosa, que se separa de una vertiente con pendientes abruptas y planos de discontinuidad preexistentes como tectónicos, superficies de estratificación, grietas de tracción, etc. Generalmente son frecuentes en paredes rocosas con varias familias de discontinuidades (González de Vallejo et al., 2002). El movimiento es prácticamente a caída libre, rodando y rebotando. La masa inestabilizada impacta en el terreno fragmentándose en porciones más pequeñas que siguen una trayectoria particular. (Ver figuras 2.1 y 2.2). Las caídas de los bloques pueden desarrollar velocidades relativamente muy altas, aunque frecuentemente sea poco el volumen desprendido, el impacto de un desprendimiento puede herir mortalmente a una persona, aplastar vehículos y destruir casas habitación y edificios.



Figura 2.2.- Esquema de un desprendimiento.

Modificado de: Copons & Tallada, 2009.

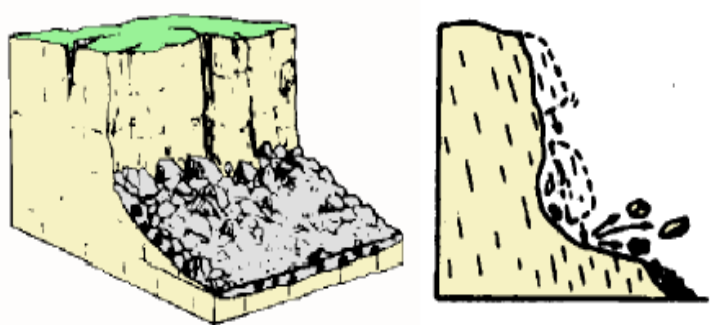


Figura 2.1 Caída de rocas (Varnes, 1978).

2.1.1.2. Vuelcos

Los vuelcos de estratos o de fragmentos de masa rocosa pueden incluirse como tipos de desprendimientos, ya que las características del mecanismo de rotura coinciden con las de ese tipo de movimiento de laderas (González de Vallejo et al., 2002).

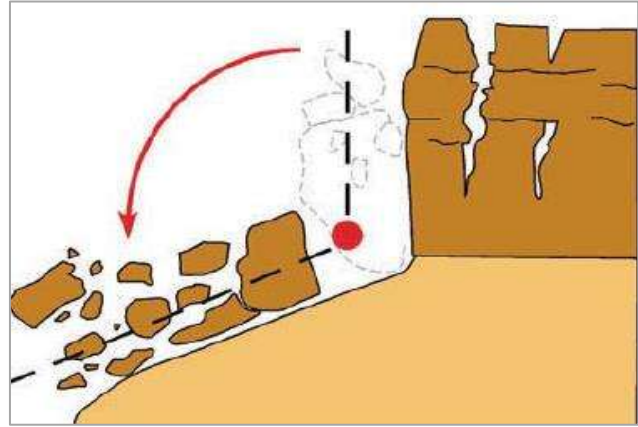


Figura 2.3.- Esquema de un vuelco

Modificado de: Copons & Tallada, 2009

Los vuelcos muestran un movimiento de rotación hacia delante y hacia el exterior de una ladera, alrededor de un eje situado por debajo de su centro de gravedad. Los vuelcos se producen principalmente en zonas escarpadas, lugares donde predominan fracturas verticales y que son las causantes de fragmentar la masa rocosa o de tierras; además, pueden generar los efectos destructivos de un caído a pesar de que su movimiento inicie con una velocidad relativamente baja (Copons & Tallada, 2009).

2.1.1.3. Deslizamientos

Este tipo de movimientos de masa de roca o suelos están delimitados por una o varias superficies, planas o cóncavas, sobre las que se desliza el material inestable. Por lo que se pueden diferenciar dos tipos de deslizamientos: los deslizamientos rotacionales, que se generan sobre una superficie de rotura circular o curva; y los deslizamientos traslacionales, cuya superficie de rotura es relativamente plana. (Ver figura 2.4).

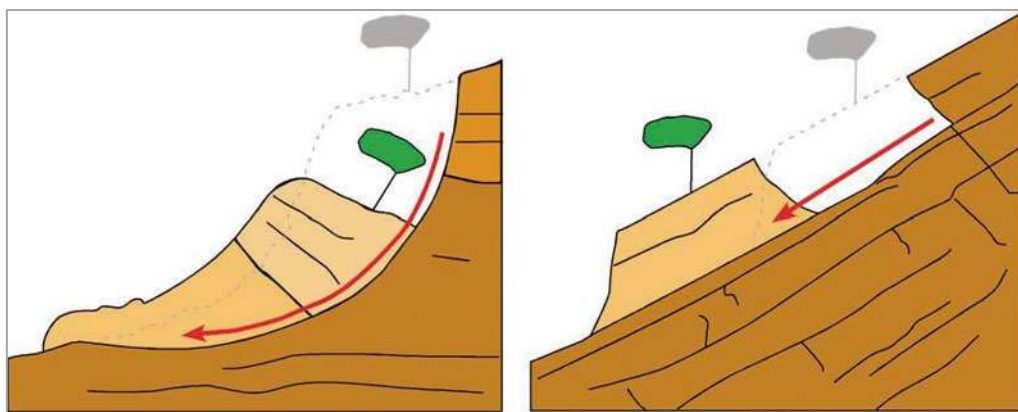


Figura 2.4.- Esquema de deslizamiento rotacional (izquierda) y traslacional (derecha).

Fuente: Copons & Tallada, 2009.

Regularmente los deslizamientos se generan en laderas con pendientes de 20 a 50 grados, y con formaciones geológicas poco resistentes y cohesivas, rocas estratificadas con delgadas capas intercaladas de arcillas o lignitos (Copons & Tallada, 2009). La masa inestable generalmente se desplaza en conjunto y se comporta como una unidad con velocidad variable, desde unos pocos centímetros al año hasta varios metros por día.

2.1.1.4. Expansiones o desplazamientos laterales

Son movimientos de bloques rocosos o masas de suelos que ocurren en pendientes relativamente muy suaves, por lo que su desplazamiento es casi horizontal. Los movimientos son debidos a la pérdida de resistencia del material subyacente, el cual se deforma o en la mayoría de los casos, por el fenómeno de licuefacción, fluye (Figura 2.5b); o bien, el material se extruye lateralmente bajo el peso de bloques rígidos u otras masas superiores (Figura 2.5a). Las capas superiores se fragmentan generándose grietas, desplazamientos diferenciales, vuelcos, etc. (González de Vallejo et al., 2002). Este tipo de fluido es bastante complejo, sin embargo, es demasiado común en algunos materiales y condiciones geológicas, por lo que se considera conveniente tenerlo identificado como un tipo más de movimiento de ladera bien definido. El movimiento en este tipo de inestabilidades suele ser extremadamente lento.

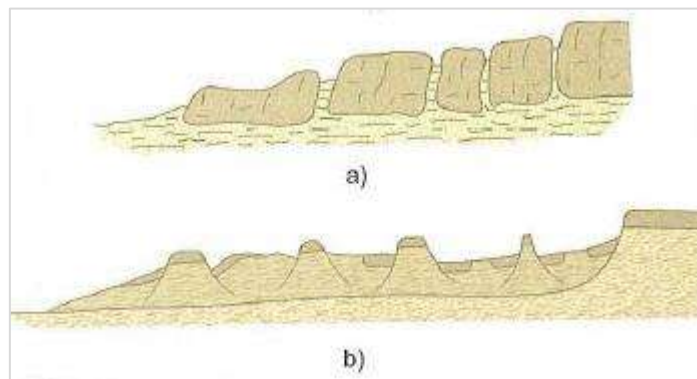


Figura 2.5.- Esquema de expansiones laterales.

Modificado de: González de Vallejo et al. 2002.

2.1.1.5. Flujos

Los flujos son movimientos de masas de suelo, derrubios o bloques rocosos con abundante presencia de agua, donde el material está disgregado y se comporta como un fluido, sufriendo una deformación continua. Los movimientos de ladera en forma de flujo son poco profundos en relación a la extensión adoptada y pueden desarrollarse en pendientes relativamente bajas, inclusive menos de 10° (González de Vallejo et al., 2002). Este proceso de remoción de masa es muy complejo ya que puede evolucionar en diversas variantes, esto debido a las propiedades físicas y químicas del material inestable, el contenido agua, variaciones de pendientes topográficas de la zona de descenso, así como el mezclado de otros elementos al paso del flujo la interacción de otros factores que pueden alterar la movilidad del fluido.

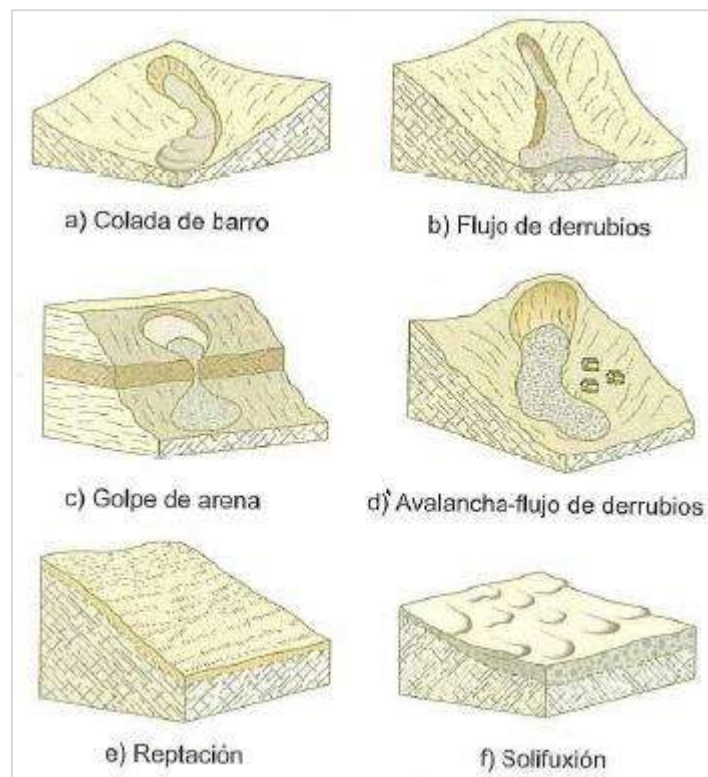


Figura 2.6.- Alternativa de clasificación de tipo de flujos (Corominas y Garcia Yagüe, 1997).

Tomado de: González de Vallejo et al., 2002.

De acuerdo con otros autores (e.g. González de Vallejo et al., 2002, Sánchez, 2009 & Figueroa, 2013) las velocidades que pueden alcanzar están relacionadas a ese tipo de variaciones y

factores, variando dentro de un rango de lentas a extremadamente rápido (ver tabla 2.1). En consecuencia, algunos autores sugieren subclasificaciones de este tipo de movimiento de ladera en forma de flujos, algunos toman el contenido de agua en la masa deslizante como parámetro de clasificación otros el tipo de material, concentración de sedimentos, etc.

Tabla 2.1.- Escala de velocidades de deslizamientos propuesta por Cruden y Varnes (1996).

<i>Clase</i>	<i>Descripción</i>	<i>Velocidad (m/s)</i>	<i>Velocidad típica</i>
7	Extremadamente rápida	$> 5 \times 10^3$	> 5 m/s
6	Muy rápida	Entre 5×10^3 y 5×10^1	Entre 5 m/s y 0.05 m/s
5	Rápida	Entre 5×10^1 y 5×10^{-1}	Entre 0.05 m/s y 1.8 m/h
4	Moderada	Entre 5×10^{-1} y 5×10^{-3}	Entre 1.8 m/h y 13 m/mes
3	Lenta	Entre 5×10^{-3} y 5×10^{-5}	Entre 13 m/mes y 1.6 m/año
2	Muy lenta	Entre 5×10^{-5} y 5×10^{-7}	Entre 1.6 m/año y 16 mm/año
1	Extremadamente lenta	$< 5 \times 10^{-7}$	< 16 mm/año

Tomado de: Sánchez, 2009.

2.1.2.-Factores influyentes en la inestabilidad de laderas.

La estabilidad de las laderas en general está determinada por factores geométricos, altura e inclinación; geológicos, que condicionan la presencia de planos y zonas de debilidad y anisotropía del talud o ladera; hidrogeológicos, presencia de agua; y geotécnicos, resistencia y deformabilidad (González de Vallejo et al., 2002). La combinación de estos factores puede determinar la rotura o inestabilidad de un talud o ladera. Estos factores se pueden clasificar en dos grupos, factores condicionantes y desencadenantes, de los cuales los primeros “condicionan” la zona para la inestabilidad y por otro lado los factores desencadenantes o también denominados activos, son factores extremos que “detonan” el movimiento de laderas como respuesta a un incremento rápido de esfuerzos, modificación de las características y propiedades del material y en sí, la reducción de la resistencia del material de una ladera

(Wieczorek, 1996). En la tabla 2.2 se muestran los principales factores condicionantes y desencadenantes.

Tabla 2.2.- Factores influyentes en la inestabilidad de las laderas y taludes.

Factores		Influencias y efectos
Condicionantes	Relieve (pendiente, geometría)	Distribución del peso del terreno.
	Litología (composición, textura)	Densidad, resistencia. Comportamiento hidrogeológico.
	Estructura geológica y estado tensional	Resistencia, deformabilidad. Comportamiento discontinuo y anisotrópico. Zonas de debilidad
	Propiedades geomecánicas de los materiales	Comportamiento hidrogeológico. Generación de presiones intersticiales.
	Deforestación	Modificaciones en el balance hídrico. Erosión.
	Meteorización	Cambios físicos y químicos, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad.
Desencadenantes	Precipitaciones y aportes de agua	Variación de las presiones intersticiales y del peso del terreno.
	Cambio en las condiciones hidrológicas	Saturación en suelos. Erosión.
	Aplicación de cargas estáticas o dinámicas	Cambio en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera. Incremento de presiones intersticiales.
	Cambios morfológicos y de geometría en las laderas	Variación de las fuerzas debidas al peso. Cambio en el estado tensional.
	Erosión o socavación del pie	Cambios geométricos en la ladera. Cambios en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera.
	Acciones climáticas (procesos de deshielo, heladas, sequías)	Cambio en el contenido de agua del terreno. Generación de grietas y planos de debilidad. Disminución de las propiedades resistentes.

Tomado de: González de Vallejo et al., 2002.

2.2-Tipos de fluidos y su clasificación

El tema de inestabilidad de laderas es un fenómeno bastante interesante y complejo, del cual pueden destinarse diversas líneas de investigación, desde estudiar y analizar el origen del proceso de remoción de masa, la simulación de la propagación del movimiento de la masa deslizando y el proceso de deposición del material.

La presente tesis se centra en la simulación de deslizamientos de flujos hiperconcentrado y de detritos (*debris flow* en inglés) por lo que es necesario identificar la subclasificación de los mismos en los procesos de remoción de masa.

Como se ha indicado en líneas anteriores, el tema de inestabilidades es un fenómeno bastante complejo, por lo que existe una interacción de diferentes disciplinas y áreas del conocimiento. En particular, en lo que concierne a la manera de percibir y clasificar las inestabilidades en forma de flujos, el tema comprende un amplio rango de posibilidades de movimiento, por lo que su clasificación se puede realizar desde dos puntos de vista, el de la geotecnia y la hidráulica, tomando en cuenta diversos criterios como la concentración de sedimentos, la velocidad de movimiento, el comportamiento mecánico, reológico o hidráulico.

Estas disciplinas han forjado caminos paralelos en la investigación del fenómeno y cada una ha logrado establecer una gama amplia de diferentes conceptos y enfoques (Figueroa, 2013). Desde la perspectiva de la geotecnia, y de manera más puntualizada en el área de inestabilidades de laderas o *Landslide*, los flujos son divididos en dos campos de acuerdo a su velocidad, lentos o rápidos; o bien, pueden ser también secos o húmedos y contener además rocas y residuos de suelo. (Ver Tabla 2.3).

Tabla 2.3.- Clasificación de deslizamientos en forma de flujo propuesta por Hungr et al. (2001).

Material	Contenido de agua¹	Condición especial	Velocidad	Denominación	Designación en inglés
Limo, arena, derrubios	Seco, húmedo o saturado	-No hay exceso de presión intersticial, -volumen limitado	Varias	Flujo de arenas (limo, grava o derrubios) no licuables	Non-liquefied sand (silt, gravel, debris) flow

Limo, arena, derrubios, roca débil²	Saturado en la superficie de rotura	-Material licuable ³ , -contenido de humedad constante	Extremadamente rápida	Flujo deslizante o fluidización de arenas (limo, derrubios, rocas)	Sand (silt, debris, rock) flow slide
Arcilla sensitiva	En o por encima del límite líquido	-Licuefacción <i>in situ</i> ³ , -contenido de humedad constante ⁴	Extremadamente rápida	Flujo deslizante o fluidización de arcillas	Clay flow slide
Turba	Saturado	-Exceso de presión intersticial	Lenta a muy rápida	Flujo de turbas	Peat flow
Arcilla o Tierra	Cercano a límite plástico	-Movimiento lento, -flujo rígido sin deformación cortante	Menor que rápida	Flujo (alud) de tierra	Earth flow
Derrubios	Saturado	-Canal establecido ⁵ , -incremento en del contenido de agua	Extremadamente rápida	Flujo de derrubios	Debris flow
Lodo	En o por encima del límite líquido	-Flujo de derrubios de granos finos	Mayor que rápida	Flujo (alud) de lodo	Mud flow
Derrubios	Presencia de agua libre	-Avenida (crecida) ⁶	Extremadamente	Torrente (crecida) de derrubios	Debris flood
Derrubios	Parcial o totalmente saturado	-Canal no establecido ⁵ , -relativamente superficial, pendiente fuerte en el origen	Extremadamente rápida	Avalancha de derrubios	Debris Avalanche
Roca fragmentada	Varios, principalmente seco	-Roca intacta en el origen, -gran volumen ⁷	Extremadamente rápida	Avalancha de rocas	Rock avalanche

1.-Contenido de humedad del material en las inmediaciones de la superficie de rotura en el momento de la rotura.

2.- Alta porosidad, roca débil (ejemplo: caliza débil, toba meteorizada, piedra pómez).

3.-Puede observarse directa o implícitamente la presencia *in situ* de la licuefacción total o parcial del material, en el flujo deslizante.

4.- Relativo al material originario del sitio.

5.- Presencia o ausencia de un canal definido sobre una gran parte de la trayectoria, y una forma de depósito establecida (abanico). Los flujos de derrubios son fenómenos recurrentes con su trayectoria, mientras que las avalanchas de derrubios no lo son.

6.- Descarga pico del mismo orden que la de la mayor avenida (crecida) o una avenida accidental. Fuerzas de tracción significativas del fluido de agua libre. Presencia de derrubios flotando.

7.-Volumen mayor que 10 000 m³ aproximadamente. Flujo de masa, en constante con la caída fragmentada de roca.

Traducido de: Hungr et al. (2001).

Figuerola (2013) realiza una exhaustiva revisión de las metodologías existentes para la predicción del comportamiento en el fallo y las características de propagación, y en base a lo desarrollado por otros autores (e.g., Cruden & Varnes, 1996, Varnes, 1978, Hungr, Evans, Boris, & Hutchinson, 2001) se tiene la siguiente clasificación de las inestabilidades en forma de flujo:

Tabla 2.4.- Clasificación generalizada de los deslizamientos en forma de flujos

Tipo de Flujo		Clase	Observaciones
Flujo Imperceptibles o Lentos		Reptación	-Baja percepción de su movimiento, entre $1.6 \text{ m}\cdot\text{año}^{-1}$ a $16 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$, -pueden preceder a movimientos más rápidos (deslizamientos o flujos).
		Solifluxión	-Es similar a la reptación, aunque ligeramente más rápido su movimiento. -debido a sus características similares a la anterior, es común generalizar esta clase como <i>solifluxión-reptación</i> .
Flujos Rápidos o Perceptibles	No Cohesivos (Flujos granulares)	Flujo de arena seca	-Movimiento entre Lento y Rápido.
		Avalancha de rocas	-Movimiento extremadamente rápido, -poca o nula composición de finos.
	Cohesivos	Flujo de suelo o tierra	-Contenido de arcillas y rápido, -pueden ser secos o saturados, -presentándose si más del 80% de las partículas de suelo son menores a 2 mm.
		Flujo de detritos	-Movimiento entre rápido y extremadamente rápido, -presentados si más del 20% del material sedimentado en peso son mayores de 20 mm.

*Criterio de velocidad basado en la escala propuesta por Cruden y Varnes (1996).

Modificado de: Figuerola, 2013.

Como se ha indicado, es posible encontrar deslizamientos que se desarrollan en forma de flujo, especialmente en los casos en los que existe agua que se mezcla con suelo, y por tal motivo, la masa móvil no se comporta como un bloque rígido. Es por ello que el tema inestabilidades en forma de flujo, específicamente los flujos hipercontrados, se puede abordar desde el punto de vista de la hidráulica.

Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando se somete una tensión de cortadura, por muy pequeña que ésta sea (Streeter, 1972). Ahora bien, los fluidos líquidos pueden clasificarse en *newtonianos* y *no newtonianos* dependiendo de su velocidad de deformación ante un esfuerzo de cortadura. Los fluidos ofrecen una pequeña, o nula resistencia a fuerzas tangenciales o cortantes, por lo que, de manera muy generalizada, los fluidos que presentan una resistencia muy pequeña o nula a ser deformados se les conoce como fluidos *newtonianos*, y aquellos que presentan mayor resistencia se conocen como fluidos *no newtonianos*; los primeros mantienen una relación lineal entre la tensión de cortadura aplicada y su deformación resultante, mientras que los segundos no establecen esta relación lineal. En el caso de estudio de la presente investigación, debido a la mezcla del agua con geo-material sólido, los flujos resultantes tienden a comportarse de forma peculiar y caen dentro de la clasificación de un flujo no newtoniano, y para poder establecer la relación de velocidad deformación y tensiones de cortadura que adopta el flujo es conveniente establecer un modelo reológico.

De acuerdo con Figueroa (2013), el tema presentado resulta conveniente atenderlo bajo la teoría de la hidráulica, ya que ésta tiene mayor injerencia en el tema del desarrollo y comportamiento de los flujos al usar una amplia gama de herramientas para explicar la dinámica del movimiento. El presente trabajo adopta la clasificación propuesta bajo la teoría y conceptos de la hidráulica (Figura 2.7), la cual está en función de la concentración volumétrica, relación entre el agua y partículas de sedimentos finos, debido a que la cohesión existente en los sedimentos controla el comportamiento de los líquidos no newtonianos (O'Brien & Julien, 1988). Es indispensable hacer énfasis sobre el criterio de clasificación, debido a que otros autores no consideran a los flujos de detritos como parte de los flujos hiperconcentrados por contener un exceso de sedimentos generados por las cantidades de diferentes materiales mezclados (gravas, cantos rodados, detritos y rocas); sin embargo, pueden considerarse como flujo hiperconcentrado, ya

que, aunque tenga una mezcla considerable de diferentes materiales, mantienen una alta concentración de sedimentos y su mecánica es similar, por lo tanto los flujos de derrubios se consideran como parte de los hiperconcentrados.

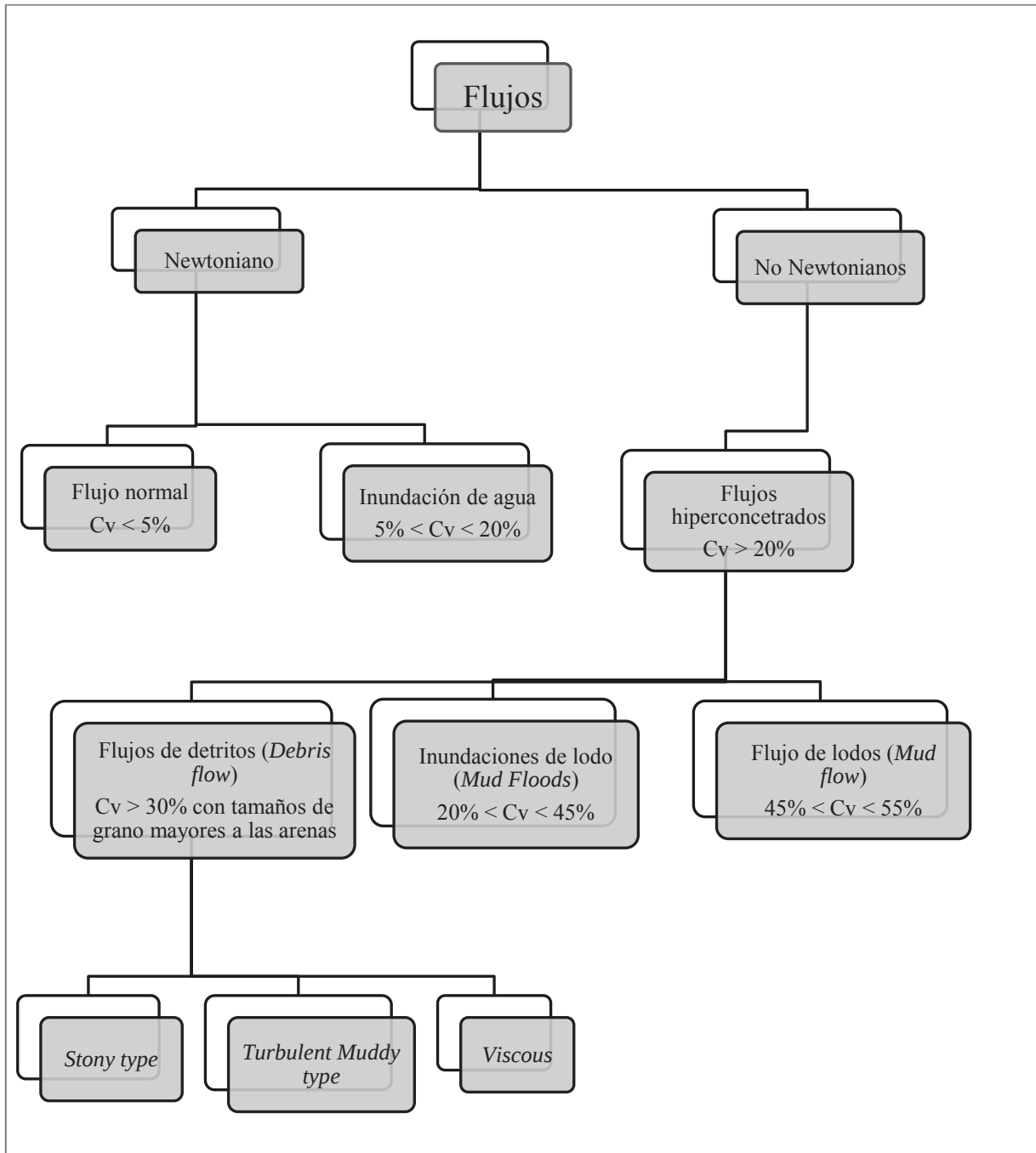


Figura 2.7.- Clasificación de flujos en función de la concentración volumétrica de finos.

Fuente: Figueroa, 2013.

Los flujos hiperconcentrados por sedimentos implican el complejo proceso de interacción de líquido y sedimento incluyendo turbulencia, esfuerzo cortante viscoso, intercambio de ímpetu de partículas de sedimento del líquido y colisión de partículas de sedimento. Las partículas del sedimento pueden chocar, fraccionar y girar unas con otras en su movimiento. De acuerdo con O'Brien (2006), en la tabla 2.5 se describen algunas de las características del flujo en función de la cantidad de sedimentos

Tabla 2.5.- Comportamiento del flujo en función de la concentración de sedimentos.

	Concentración de sedimentos		Características del flujo
	Por volumen	Por peso	
Deslizamiento (<i>landslide</i>)	0.65 - 0.80	0.83 - 0.91	No fluiría; falla por bloque deslizante
	0.55 - 0.65	0.76 - 0.83	Falla por bloque de deslizamiento con deformación interna; fluencia lenta (reptación) antes de la falla.
Flujo de lodos (<i>Mudflow</i>)	0.48 - 0.55	0.72 - 0.76	Flujo evidente; fluencia lenta sostenido flujo de lodo; deformación plástica por su propio peso; cohesivo; no se extenderá en una superficie nivelada.
	0.45 - 0.48	0.69 - 0.72	Flujo con difusión sobre superficie plana; flujo cohesivo; mezclado.
Inundación de lodo (<i>Mud Flood</i>)	0.40 - 0.45	0.65 - 0.69	Flujo mezclado fácilmente; demuestra deformaciones en las propiedades del fluido; deposición de grandes bloques; ocurren ondas, pero se disipan rápidamente.
	0.35 - 0.40	0.59 - 0.65	Deposición marcada de gravas y cantos rodados; se expande casi por completo sobre superficies planas; dos fases en superficie con ondas viajando.
	0.30 - 0.35	0.54 - 0.59	Separación del sobre la superficie; las ondas (olas) viajan fácilmente; las partículas más grandes, como arenas y gravas, se colocan hacia afuera y se mueven como carga.
	0.20 - 0.30	0.41 - 0.54	Se distingue la acción de las ondas (olas); todas las partículas reposan en una capa o cama en condiciones de flujo calmado.

Inundación (Water Flood)	< 0.20	< 0.41	Inundación de agua con posibilidad de sedimento en suspensión u carga de fondo.
-------------------------------------	--------	--------	---

Traducido de: O'Brien, J. S., 2006.

De acuerdo con O'Brien (2006), si se tienen altas concentraciones de sedimentos finos los efectos de turbulencia y colisión de las partículas puede descartarse, y por efectos cohesivos el flujo puede considerarse laminar.

Los flujos de detritos son una mezcla de agua con sedimentos en altas concentraciones, mezclados a su vez con gravas, fragmentos de rocas y material orgánico arrastrado durante su movimiento. Estos tipos de flujos son complejos de entender y analizar ya que, existe una gran variedad de materiales que pueden mezclarse con el agua, alterando de manera radical sus propiedades. Razón principal por la que varios investigadores (e.g. Bagnold, O'Brien, Julien, Takahashi, Pierson, etc.) han dedicado años de investigación para tratar describirlos. Según Takahashi (1991) los flujos de detritos pueden clasificarse en cuatro grupos, esto en función de los esfuerzos predominantes como efecto de la mezcla del líquido sólidos:

- i. **Flujo de derrubios tipo pedregoso (*Stony-type flow debris*).** En éstos la matriz de flujo está compuesta por partículas gruesas, fragmentos de rocas y cantos rodados. En la dinámica de estos flujos, que mantienen un régimen casi estático, se generan esfuerzos por la colisión entre los componentes de la matriz de flujo, estos esfuerzos son responsables de la dispersión de las partículas.
- ii. **Flujo de derrubios fangosos turbulentos (*Turbulent-muddy type*).** La matriz de flujo está compuesta por materiales finos cohesivos. Estos flujos son dominados por esfuerzos provocados por la turbulencia de la mezcla.
- iii. **Flujos de detritos viscosos (*Viscous-type*).** La matriz de flujo es cohesiva, compuesta principalmente por arcillas. En los flujos viscosos predominan los esfuerzos viscoplásticos.
- iv. **Flujos de derrubios híbridos (*Hybrid-type*).** Los flujos de derrubios generalmente se presentan como un conjunto, es decir, en combinación de dos o más de los flujos mencionados anteriormente, siendo esta situación el caso más general. Los flujos

híbridos consisten generalmente de una capa inferior de partículas en colisión y en contacto, y de otra capa superior turbulenta con partículas en suspensión.

En el presente proyecto se tratará de manera específica a los flujos hiperconcentrados de derrubios tipo híbridos.

2.3- Características de los flujos hiperconcentrados de derrubios.

De los fenómenos de flujos hiperconcentrados se pueden distinguir tres fases, la de iniciación, propagación y depósito. La zona iniciación de este tipo de fenómenos, además de presentar algunos de los factores condicionantes expuestos anteriormente, generalmente las pendientes pronunciadas, entre 20 y 45°, son un factor relevante en la etapa de iniciación del fenómeno. El movimiento es desencadenado, principalmente, por la saturación del terreno natural, producto de precipitaciones de gran intensidad. Enfocándonos en la etapa de propagación, diversas investigaciones de fenómenos ocurridos en otras partes del mundo y del país, indican que durante su movimiento se generan grandes y numerosas ondas u oleadas de los materiales sólidos y fluidos mezclados, viajando a velocidades relativamente altas. Los materiales y, de manera específica, la composición litológica de las rocas y agregados pétreos en los flujos de derrubios es determinada de las áreas disponibles de la fuente del fenómeno, así como, de los canales por donde se desplaza el flujo, por lo que la mezcla de materiales puede ser bastante diversa. En la figura 2.8 se muestra un perfil característico de una oleada de escombros, lográndose definir tres regiones específicas.

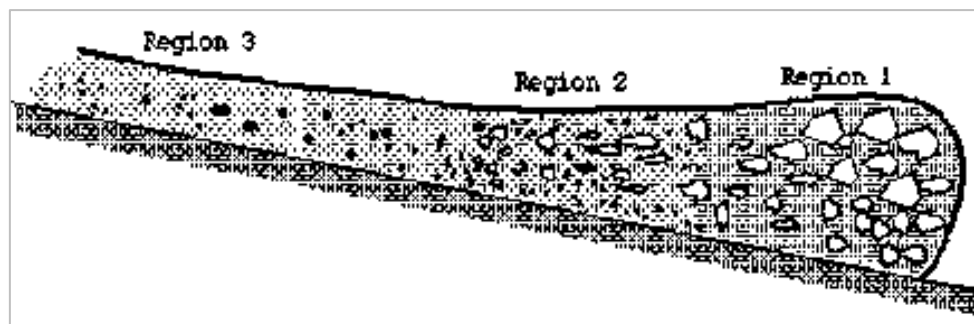


Figura 2.8.- Perfil característico de una oleada de flujos hiperconcentrados de derrubios.

Fuente: Castillo, (2006).

De acuerdo con Castillo (2006) y Takahashi (1981), en la primera región, conocida como *frente*, está compuesto por partículas relativamente grandes, básicamente rocas y fragmentos de rocas, altamente desordenadas que parecen “extenderse” hacia el exterior ocasionando que la velocidad tienda a bajar y aumentar de volumen. La longitud de esta zona varía de unos cuantos metros y su altura está en función de la pendiente que tiene el conducto por donde se desplaza el flujo. La segunda región, llamada por algunos autores como *cuerpo*, está compuesta por una porción de masa fina y materiales granulares de mayor tamaño, cargados ligeramente hacia el frente. Finalmente está la región tres, conocida como *cola*, donde el flujo es diluido con altas concentraciones de sedimentos y turbulento.

La zona de depósito, conocida como *cono* o *abanico de deyección* (Ver Figura 2.9), se presenta en zonas con pendientes bajas. Este proceso de depósito se genera en los flujos de derrubios por los efectos combinados de reducción de la pendiente, presencia de obstáculos, que aumentan la resistencia al flujo, y la pérdida del confinamiento otorgado por los canales por donde se desplaza el flujo (Sánchez, 2009), al ocurrir esto último, la velocidad del flujo disminuye y algunos de los materiales de mayor tamaño mezclados son depositados en la zona de propagación, convirtiéndose en un obstáculo.

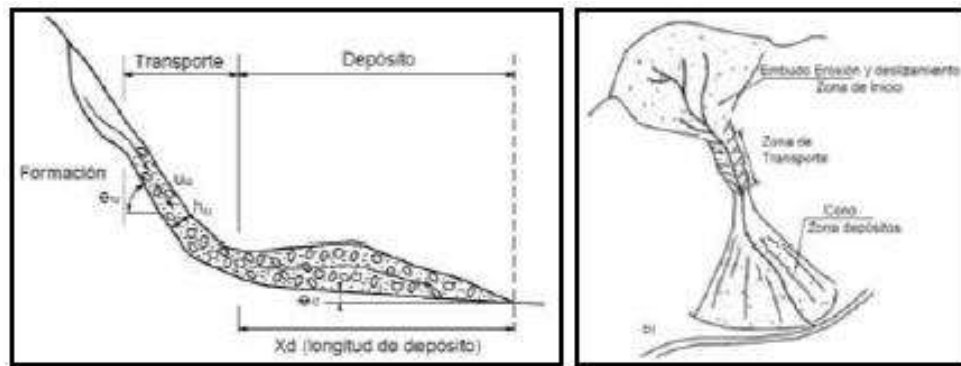


Figura 2.9.- Esquema de la zona de depósito, vista en planta y perfil.

Fuente: Figueroa, 2013.

2.4-Reología de los flujos hiperconcentrados.

De acuerdo a lo expuesto en líneas anteriores, los flujos hiperconcentrados y de detritos no pueden ser tratados de la forma tradicional dentro del campo de la hidráulica, debido a sus altas concentraciones de sedimentos que alteran las propiedades físicas del agua por lo que, requieren un análisis diferente. Por ejemplo, la viscosidad dinámica μ de los flujos torrenciales (flujos hiperconcentrados y de detritos) puede ser varias veces mayor a la del agua en condiciones normales (Castillo, 2006). Para poder realizar esto, es indispensable apoyarse de la teoría derivada de la reología.

La reología es el estudio de la deformación y flujo de la materia, la cual deriva de la mecánica de los medios continuos y su objetivo principal es determinar ecuaciones constitutivas, relación tensión- deformación, capaces de reproducir adecuadamente las mezclas de materiales granulares, agua y/o aire (Castillo, 2006). Las ecuaciones definidas en este sentido se conocen como modelos o leyes reológicas; y en lo concerniente a los flujos hiperconcentrados y de detritos, se han desarrollado diversos modelos, muchos de los cuales al pasar los años y en base a la experimentación, diferentes autores han modificado, esto en consecuencia de la complejidad de la mecánica de los flujos mencionados.

Se sabe que sí se tienen ciertas condiciones y la concentración de sedimentos mezclados, así como los tamaños de partículas, es posible intuir que pueden predominar algunos esfuerzos, por ejemplo:

- a) Debido a la colisión entre las partículas.
- b) Debido a la turbulencia generada por la mezcla del cuerpo del fluido compuesta por partículas y lodo.
- c) Por soportar la fricción de la partícula entre partículas cuando las concentraciones de partículas gruesas se encuentran por encima de un valor límite.
- d) Debido a la deformación del fluido intersticial o del aparente fluido viscoso compuesto por la mezcla de partículas y lodos.
- e) Por la propia interacción de partículas y el flujo resultante del movimiento relativo de los componentes sólidos y líquidos.

Por consiguiente, los modelos reológicos desarrollados para la representación de la deformación de los flujos hiperconcentrados y de detritos han sido clasificados de manera cualitativa en diferentes regímenes, propuesta por Jan & Shen en 1997.

En la Tabla 2.6 se muestra sólo una antología de las características de los diferentes regímenes propuestos por Jan & Shen (1997) que pueden presentarse en flujos hiperconcentrados y de derrubios, además, se muestran los principales modelos reológicos propuestos por diferentes autores para las condiciones e hipótesis de cada régimen, así como sus ecuaciones constitutivas, que relacionan las tensiones tangenciales necesarias para vencer la resistencia al flujo y las velocidades de deformación.

Tabla 2.6.-Clasificación cualitativa de los regímenes para los flujos hiperconcentrados y de detritos.

Régimen del flujo de detritos	Características	Modelos reológicos propuestos.	*Ecuación constitutiva tensión-deformación.
Friccional	El movimiento de la masa tiende a ser lento, de modo que las partículas se mantienen en contacto casi siempre y el intercambio de momento se debe principalmente al mecanismo de fricción.	Modelo Friccional Puro	$\tau = \sigma_n \tan \phi$
	En este régimen no interviene la cohesión.		
	Está basado en la ley de fricción de Coulomb.		
	La distribución de tamaños de las partículas sólidas es muy amplia. La deformación es rápida.	-Modelo Dilatante O Dispersivo de Bagnold (1954).	$\tau = \alpha \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 ;$ $\alpha = \alpha_1 \rho_s \lambda^2 d^2 \sin \phi_d$
	Los contactos entre partículas tienen una duración muy corta, pero es relevante en el intercambio de momentum.		$\sigma_{nd} = \frac{\tau}{\tan \phi_d}$ $= \alpha_1 \rho_s \lambda^2 d^2 \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 \cos \phi_d ;$

Régimen del flujo de detritos	Características	Modelos reológicos propuestos.	*Ecuación constitutiva tensión-deformación.
Colisional o Granular-inercial	Los choques entre partículas generan presiones del líquido en dirección radial, llamadas tensiones dispersivas (σ_{nd}) y son proporcionales a las tensiones tangenciales (τ).		$\alpha_1 = 0.042$
	El mecanismo de dispersión proporciona, además de una tendencia de expansión del material, una fuente de suspensión adicional a las partículas.	-Modelo de Takahashi (1991).	$\tau = \alpha_1 \rho_s \lambda^2 d^2 \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 \sin \phi_d;$ $\sigma_{nd} = \frac{\tau}{\tan \phi_d}$ $0.35 \leq \alpha_1 \leq 0.5$ $\tan \phi_d = \left(\frac{C_0}{C} \right)^{1/3} \tan \phi$
Friccional-Colisional	Amobos efectos influyen en el comportamiento de la mezcla.	McTigue (1982).	$\tau = \tau_y + \alpha \left(\frac{dv}{dz} \right)^2$
	Se trata de una mezcla muy diluida de partículas suspendidas en un flujo Newtoniano.	Einstein (1956).	$\tau = \mu_m \frac{dv}{dz};$ $\mu_m = \mu_f (1 + 2.5C)$
	La relación de esfuerzo y la deformación es similar a la del fluido Newtoniano con una concentración de sedimentos cerca del 9%.	Chu (1983)	$\tau = \mu_m \frac{dv}{dz};$ $\mu_m = \mu_f (1 + 2.5KC)$
	En este régimen el flujo puede ser tratado de manera general como flujo Newtoniano con viscosidad efectiva (μ_m), la cual depende de las propiedades del fluido, temperatura y concentración de sedimentos.	Krone (1984)	$\tau = \mu_m \frac{dv}{dz};$ $\mu_m = \mu_f (1 + \epsilon KC)^{-2.5}$
Macro-Viscoso		Krieger & Dougherty (1986)	$\tau = \mu_m \frac{dv}{dz};$ $\mu_m = \mu_f (1 + KC)^{-B/K}$

Régimen del flujo de detritos	Características	Modelos reológicos propuestos.	*Ecuación constitutiva tensión-deformación.
	Los modelos reológicos propuestos pueden ser modificados debido a la manera en que se determina la viscosidad efectiva.	Bagnold (1954)	$\tau = \mu_m \frac{dv}{dz};$ $\mu_m = 2.25 \lambda^{1.5} \mu_f$
	Su comportamiento está dominado por los efectos viscosos.	Bingham & Green (1919).	$\tau = \tau_y + \eta \frac{dv}{dz}$
Visco-Plástico	La concentración de sedimentos que incrementa la viscosidad está dada por la parte fin, que proporciona cohesión, y las partículas gruesas, que generan un rozamiento interno; este incremento de viscosidad contribuye a la resistencia del corte del flujo.	Herschel & Bulkley (1926).	$\tau = \tau_y + \kappa \frac{\partial v^n}{\partial z}$
		Coulomb-Viscoso	$\tau = \tau_c + \sigma \tan \varphi + \mu_b \frac{d}{dz}$
Visco-Plástico-Colisional	Se mantiene en flujos de derrubios gruesos con una granulometría amplia.	Modelo Cuadrático de O'Brien & Julien (1985).	$\tau = \tau_y + \mu \left(\frac{dv}{dz} \right) + \zeta \left(\frac{dv}{dz} \right)^2$
	El intercambio de momento se afecata tanto por la interacción de las partículas, como por la viscosidad del fluido.	Modelo Viscoplastico Generalizado	$\tau = \tau_y + \mu_1 \left(\frac{dv}{dz} \right)^n$ $= C_c \cos \varphi + p \sin \varphi + \mu_1 \left(\frac{dv}{dz} \right)^n$
	Es el régimen más general en el caso de flujos hiperconcentrados y de detritos.		

En las ecuaciones constitutivas mostradas en la tabla 2.6 τ es el esfuerzo de cortadura o tensiones tangenciales del flujo, σ_n la tensión normal, ϕ_d el ángulo de fricción dinámico que depende de las condiciones de colisión, φ el ángulo de fricción interno del material granular

mezclado, μ_f la viscosidad dinámica del flujo, μ_m es la viscosidad dinámica de la mezcla liquido-sólidos, d representa el diámetro de la partícula, α es un coeficiente que depende fuertemente de la densidad (ρ_s), tamaño y distribución de las partículas, concentración de las partículas sólidas (C), así como del ángulo de fricción interno; C_0 es el mínimo valor de concentración, λ la distribución granular lineal definida por Bagnold en 1954, α_1 una constante experimental, τ_y representa el esfuerzo de fluencia o cedencia del flujo, K el cociente entre el volumen de partículas de sedimentos más el agua adherida y el volumen de sólidos, B es una constante con valor de 2.5, η parámetro viscoplástico de Bingham, κ el coeficiente de consistencia, n índice de comportamiento de flujo, $n < 1$, ζ el coeficiente de tensión inercial que superpone las tensiones turbulentas y dispersivas, C_c la cohesión y μ_1 el coeficiente de consistencia.

La descripción de cada modelo reológico, sin duda alguna, es todo un tema de investigación, en el cual se pueda analizar y explicar lo que investigadores y autores de las leyes o modelos reológicos han tardado varias décadas en determinar y describir; así que, con el fin de resumir la información, se presenta solamente la tabla anterior. Si el lector considera necesario conocer mayores detalles de los modelos reológicos mencionados, puede consultar las fuentes bibliográficas citadas.

CAPÍTULO 3

3. ECUACIONES GOBERNANTES

Para la simulación de flujo hiperconcentrado o de detritos es necesario identificar que se trata generalmente de un flujo turbulento de dos fases. La fase líquida o “*slurry*” consistente en agua y partículas finas y la base propiamente sólida son partículas gruesas (Figuroa, 2013). Adicionalmente, es necesario identificar tres componentes esenciales: un modelo matemático, un modelo reológico y el método numérico. Estas componentes, integradas en un esquema numérico, nos permiten reproducir adecuadamente el comportamiento dinámico de los flujos en estudio.

De esta manera, es conveniente que en este capítulo se identifiquen y traten por separado las ecuaciones que integran el modelo matemático hidrológico y reológico; para el primero se describen las ecuaciones hidrodinámicas que cumplen con los principios fundamentales de conservación de masa y movimiento, y para el segundo, una ecuación constitutiva, la cual aporta una expresión matemática adicional, como se ha mencionado en líneas anteriores, relaciona las tensiones y las velocidades de deformación del geo-material fluidificado para un punto determinado.

3.1.- Ecuaciones Hidrodinámicas

Las ecuaciones fundamentales para el estudio de los fluidos en movimiento son las llamadas *ecuaciones de Navier-Stokes*, junto con la ecuación de conservación de masa, las cuales cumplen los principios de conservación de la masa a un fluido encerrado en un volumen de control de dimensión finita y con la ley de cantidad de movimiento de Newton.

La ecuación diferencial de la conservación de masa o ecuación de continuidad en un sistema de coordenadas cartesianas se escribe como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad \dots (3.1)$$

donde, u , v y w son las componentes del vector velocidad en las direcciones x , y , z , respectivamente y ρ es la densidad del fluido.

La ecuación de conservación de masa es de fundamental importancia ya que, para el caso de fluidos, ésta impone restricciones al movimiento (Fay, 1996).

Las ecuaciones de cantidad de movimiento en su forma conservativa para tres dimensiones en coordenadas cartesianas, se expresan como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho uw) - \rho f v + \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \quad \dots (3.2.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho vw) + \rho f u + \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0 \quad \dots (3.2.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w^2) + \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = 0 \quad \dots (3.2.3)$$

donde, u , v , w representan la componente de velocidad en las direcciones x , y , z , respectivamente. t representa al tiempo, P a la presión, ρ a la densidad, g la aceleración de la gravedad, τ_{ij} representa los esfuerzos de cortante ocasionados por las tensiones viscosas, en forma indicial (tensorial) para un flujo newtoniano están dados por (Alavez, 2013)

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad i, j = 1, 2, 3.$$

y $f = 2\Omega \sin \phi$, el parámetro de Coriolis, indicando el efecto de la rotación de la Tierra, $\Omega \cong 7.292 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$, la velocidad angular de la Tierra y ϕ la latitud.

Estas ecuaciones son irresolubles analíticamente en casos generales debido a la amplia gama de escalas de velocidades que ocurren en los fluidos en movimientos (Moreles & Botello, 2008), y teniendo en cuenta lo que menciona Alavez et al. (2013), se tendría un sistema de cuatro ecuaciones y cinco incógnitas, una por cada componente de velocidad y dos adicionales correspondientes a la presión y a la viscosidad turbulenta, la cual se genera por las tensiones viscosas.

Para generar la solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes, que es una aproximación a la solución analítica si existiese, es conveniente realizar algunas suposiciones, la principal de ellas es considerar que la variación de la velocidad y deformación del flujo en el eje vertical son irrelevantes en comparación a los sufridos en los planos horizontales. (Ver Figura 3.1).

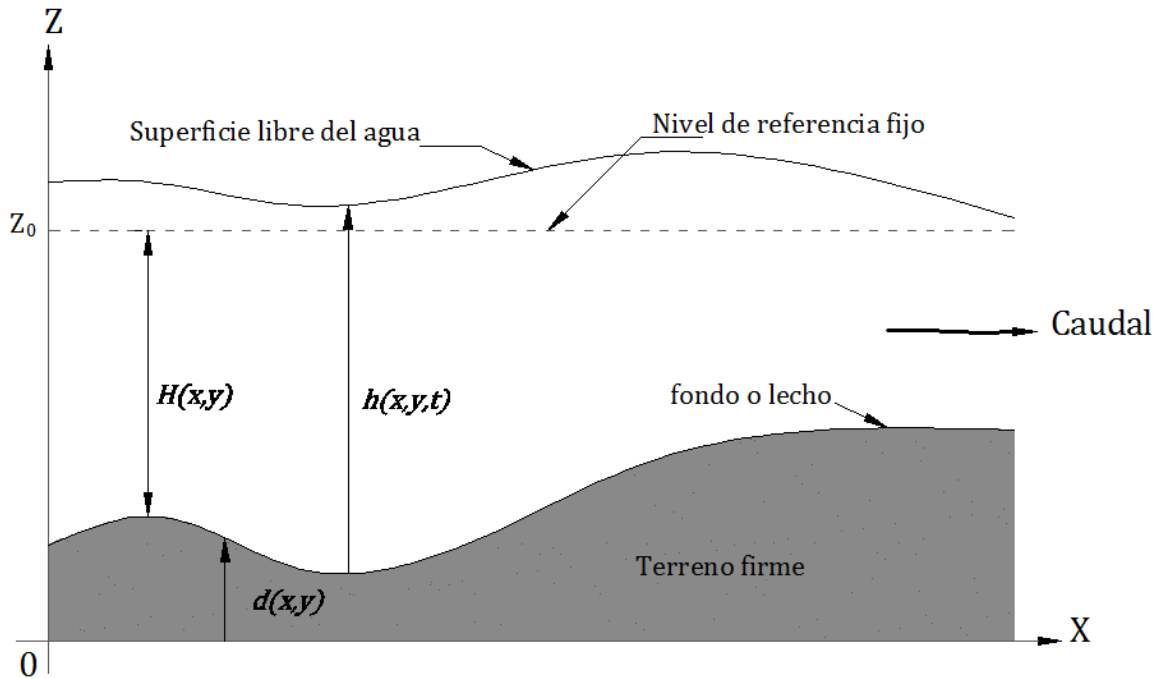


Figura 3.1.- Sección longitudinal del dominio ocupado por el fluido en un plano vertical.

Fuente: Alavez et al., 2013.

En este sentido, es conveniente suponer que el flujo es *somero*, lo que indica que el movimiento principal de las partículas ocurre en planos horizontales. Esto debido que, las escalas de las longitudes horizontales son mucho mayores que la escala de longitud vertical, lo cual implica que la velocidad y deformación del fluido será mayor en el plano horizontal. Sin embargo, es necesario realizar un promedio de las velocidades sobre el vertical, para ello, se integra la ecuación (3.1) con respecto a z entre el fondo y la superficie libre del agua. Posteriormente, aplicando la regla de Leibnitz, la ecuación se puede transformar en

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = M_s, \quad \dots (3.3)$$

en donde h representa el tirante o la profundidad del fluido y M_s es un término fuente, el cual puede ser fuente (*source*) o sumidero (*sink*) de masa.

De manera análoga se determina un promedio en las ecuaciones dinámicas de cantidad de movimiento, 3.2.1, 3.2.2 y 3.2.3, obteniéndose entonces

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g}{p} \frac{h^2}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + fv + \frac{\partial h\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{xy}}{\partial y} + M_x$$

... (3.4.1)

$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2) + \frac{\partial}{\partial x}(huv) = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g}{p} \frac{h^2}{2} \frac{\partial p}{\partial y} - fu + \frac{\partial h\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{yy}}{\partial y} + M_y$$

... (3.4.2)

donde Z_s es la elevación de la lámina libre del flujo; M_x y M_y representan los términos fuente de momento, y que en conjunto con M_s , permiten realizar la modelización de precipitación, infiltración y sumideros (IBER, 2014). Los esfuerzos laterales, $\frac{\partial h\tau_{ij}}{\partial x}$ y $\frac{\partial h\tau_{ij}}{\partial y}$, en las direcciones x y y , respectivamente. Con frecuencia estos esfuerzos son despreciables en cauces muy anchos, además, bajo estas circunstancias los últimos términos corresponden a la tasa de deformación, que para nuestro caso es la definida por el modelo de reológico propuesto.

Las ecuaciones anteriores obtenidas a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes, 3.3, 3.4.1 y 3.4.2, forman un sistema que se conoce como *ecuaciones de Saint-Venant en 2D* o *ecuaciones de las aguas someras, shallow water equations (SWE)* en inglés, y sus demostraciones, a interés del lector, se pueden encontrar en algunos textos (e.g., Vreugdenhil, 1994; Moreles & Botello, 2008 & Alavez et al., 2013). Estas ecuaciones siguen siendo irresolubles analíticamente; sin embargo, en el siguiente capítulo se propone una solución numérica mediante el método de volúmenes finitos.

3.2.- Modelo Reológico

Los flujos hiperconcentrados de derrubios implican variabilidad de su composición en el espacio y tiempo, como resultado de la dispersión granulométrica y de la incorporación y pérdida de componentes sólidos y fluidos durante el movimiento del flujo (Sánchez, 2009). Así, estas características plantean muchas complicaciones en la comprensión de la mecánica que los gobierna y en la predicción de su comportamiento, lo cual se ha descrito previamente en el Capítulo 2.

Durante años, ante la diversidad de la mezcla entre el agua y detritos sólidos que se puede generar en diversas circunstancias, varios investigadores enfocaron sus conocimientos para poder determinar alguna manera que permitiese simular este tipo especial de fluidos. El producto resultante tras años de investigación y experimentación, radica en los modelos reológicos propuestos hasta la fecha, en los cuales se presentan ecuaciones constitutivas que relacionan los esfuerzos de cortadura de los fluidos con la deformación sufrida.

Han sido varias las propuestas realizadas durante los últimos sesenta años, pero las aportaciones realizadas por Bagnold en 1954 sobre los flujos viscosos destacan entre otras, esto debido a que él indica de forma clara la física del fenómeno, además, la teoría utilizada es la base teórica de algunos modelos reológicos propuestos algunos años después. Bagnold es considerado como el primer investigador en incluir en sus modelos, los efectos por las colisiones entre partículas, llamándolos *presiones o tensiones dispersivas*.

Como se ha indicado en líneas anteriores, la presente investigación se centra en los flujos hiperconcentrados de detritos tipo híbrido, ya que las características de éstos se asemejan a las características del flujo originado en Angangueo, Michoacán, en febrero del 2010. (Ver Figura 2.7). Estas características de flujo, corresponden a un régimen de tipo colisional o granular inercial (Tabla 2.6), por lo que se propone realizar las simulaciones tomando en cuenta las ecuaciones constitutivas presentadas en el modelo reológico propuesto por Takahashi en 1991, el cual se basa en el modelo y concepto de tensiones dispersivas desarrollado por Bagnold en 1954.

Las ecuaciones constitutivas en este modelo se expresan como

$$\tau = \alpha \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 \quad \dots (3.5)$$

y

$$\sigma_{nd} = \frac{\tau}{\tan \phi_d}, \quad \dots (3.6)$$

donde τ representa las tensiones tangenciales o de cortadura, σ_{nd} las tensiones dispersivas, y éstas son proporcionales a las tensiones tangenciales; α es un coeficiente que está en función de parámetros y valores experimentales; ϕ_d es el ángulo de fricción dinámico que depende de las condiciones de colisión, y $\frac{dv}{dz}$ representa la velocidad de deformación del fluido sobre el eje vertical del sistema coordenado.

El coeficiente α está dado por

$$\alpha = \alpha_1 \rho_s \lambda^2 d^2 \sin \phi_d \quad \dots (3.7)$$

donde α_1 es una constante experimental, $0.35 \leq \alpha_1 \leq 0.5$; ρ_s representa la densidad de las partículas sólidas, λ la concentración lineal de Bagnold o concentración de sedimentos sólidos y d es el diámetro de la partícula.

La concentración lineal de Bagnold está dada por

$$\lambda = \frac{1}{\left(\frac{C_{max}}{C} \right)^{1/3} - 1} \quad \dots (3.8)$$

donde C_{max} es la máxima concentración posible (en partículas esféricas $C_{max} \cong 0.74$ y en materiales granulares $C_{max} \cong 0.69$) y C la concentración en volumen de la fracción de sólidos en el flujo de detritos (debe de ser menor a $0.9C_{max}$).

Las principales aportaciones que hizo Takahashi (1991) al modelo propuesto por Bagnold (1954), están relacionadas con los valores que pueden tomar algunos parámetros, principalmente el coeficiente α_1 , el cual está dado por

$$\tan \alpha_1 = \left(\frac{C_{max}}{C} \right)^{\frac{1}{3}} \tan \varphi \quad \dots (3.9)$$

donde φ representa el ángulo de fricción interna del material sólido. En varias variables la relación entre las velocidades de deformación y los esfuerzos de cortadura vienen dadas por una forma cuadrática, como la siguiente

$$\mathbf{T}\boldsymbol{\sigma} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\sigma}^T\hat{\mathbf{T}}\boldsymbol{\sigma} = \tau$$

Ahora, por simplicidad y dado que el flujo es somero, emplearemos la ecuación (3.5), cuya forma es más elemental para un flujo no newtoniano, de esta manera se complementan las ecuaciones diferenciales que rigen el flujo hiperconcentrado y de escombros, para su solución numérica, se implementará un esquema numérico basado en el método numérico de volúmenes finitos, el cual se describirá en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 4

4. ESQUEMA DE NUMÉRICO DE SOLUCIÓN

Las ecuaciones descritas son no lineales, lo cual dificulta su solución numérica. Debido a su aplicabilidad, se emplean diversos métodos como las diferencias finitas, los volúmenes finitos, los elementos finitos, los elementos virtuales, los métodos de partículas, etc. Pero en todos ellos, para describir de manera adecuada las condiciones de estabilidad numérica requiere tener presente el manejo adecuado de la aproximación espacial con la linealización de la derivada advectiva, que es el término no lineal más importante, y que puede conducir como en el caso de la ecuación de Burgers (4.1), a soluciones no continuas, incluso con condiciones iniciales suaves. (Ver Figura 4.1).

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{w^2}{2} \right) = 0 \quad \dots (4.1)$$

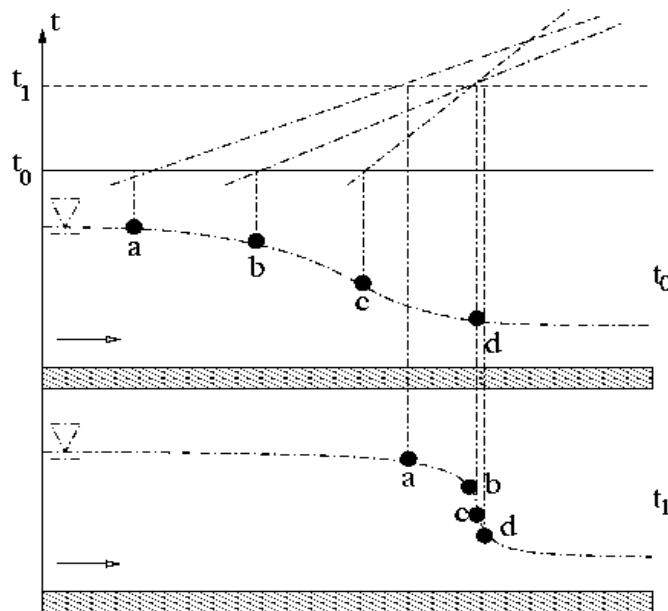


Figura 4.1.- Representación gráfica del proceso de formación de una discontinuidad.

Fuente: Vázquez (2014).

De acuerdo con Vázquez (2014) y LeVeque (1992), soluciones de este tipo muestran que no se verifican las ecuaciones en derivadas parciales en el sentido clásico en todos los puntos, ya que las derivadas no están definidas en las discontinuidades (en el caso de las ecuaciones hidrodinámicas dichas discontinuidades corresponden a cambios bruscos de tirante, por ejemplo, en saltos hidráulicos). En este sentido, es conveniente utilizar la forma integral de las ecuaciones hidrodinámicas ya que, de esta manera las soluciones continúan siendo válidas incluso en discontinuidades, existiendo así, la posibilidad de mantener las propiedades conservativas de las ecuaciones.

Para el caso de flujo hiperconcentrado y flujos similares el esquema de modelación, que es el entorno por el cual se logra la aproximación numérica de las ecuaciones gobernantes de flujo, se conforma, en situaciones generales, de tres elementos principales:

- i. Modelo matemático
- ii. Modelo reológico
- iii. Modelo numérico

El modelo matemático es un conjunto de ecuaciones gobernantes, que por medio de ellas se describen o representan los aspectos más importantes de un fenómeno físico. Para nuestro caso de interés dicho modelo matemático está integrado por las ecuaciones de conservación de momento y conservación de masa, simplificadas bajo el concepto de *flujo somero*.

El modelo reológico, como se ha mencionado en líneas anteriores, aporta una expresión física adicional al sistema de ecuaciones correspondientes al modelo matemático, con ella se relacionan las tensiones y velocidades de deformación. Para el caso en estudio, se ha usado la ley reológica de Takahashi (1991).

El modelo numérico permite realizar la integración en espacio y en el tiempo de las ecuaciones diferenciales gobernantes, para ello, se propone utilizar volúmenes finitos. Los métodos de volúmenes finitos nos permiten mantener las propiedades conservativas de las ecuaciones, ya que provienen inicialmente de la forma integral de la ley de conservación, un punto de partida para obtener mayores ventajas ante otros métodos numéricos (LeVeque, 2002). De acuerdo con Vázquez (2014), este método numérico está estrechamente relacionado con el método de diferencias finitas, por tal motivo es interpretado en múltiples ocasiones como una aproximación de diferencias finitas de la ecuación diferencial.

Así, una vez establecidos estos elementos, es indispensable definir el espacio donde se generan las aproximaciones de las ecuaciones hidrodinámicas, el cual se obtiene al *discretizar* el *dominio físico* en elementos geométricos más pequeños, además, de plantear las condiciones iniciales y de contorno o frontera para el caso físico en estudio.

4.1.-Dominio físico

La zona de estudio o dominio físico se ubica en el municipio de Angangueo, al noroeste del estado de Michoacán. Al inicio del presente texto se indicaba que el estado de Michoacán experimenta año con año el embate de diversos fenómenos de tipo meteorológico, los cuales pueden ocasionar otros fenómenos que ponen en riesgo a alguna población, y en febrero de 2010 Angangueo fue sometido por la capacidad destructiva del agua mezclada con algunos sedimentos, geo-materiales y otras partículas sólidas.

De acuerdo con datos del INEGI, la localidad contaba en 2010 con una población de 4601 habitantes y siendo Mineral de Angangueo su cabecera municipal.

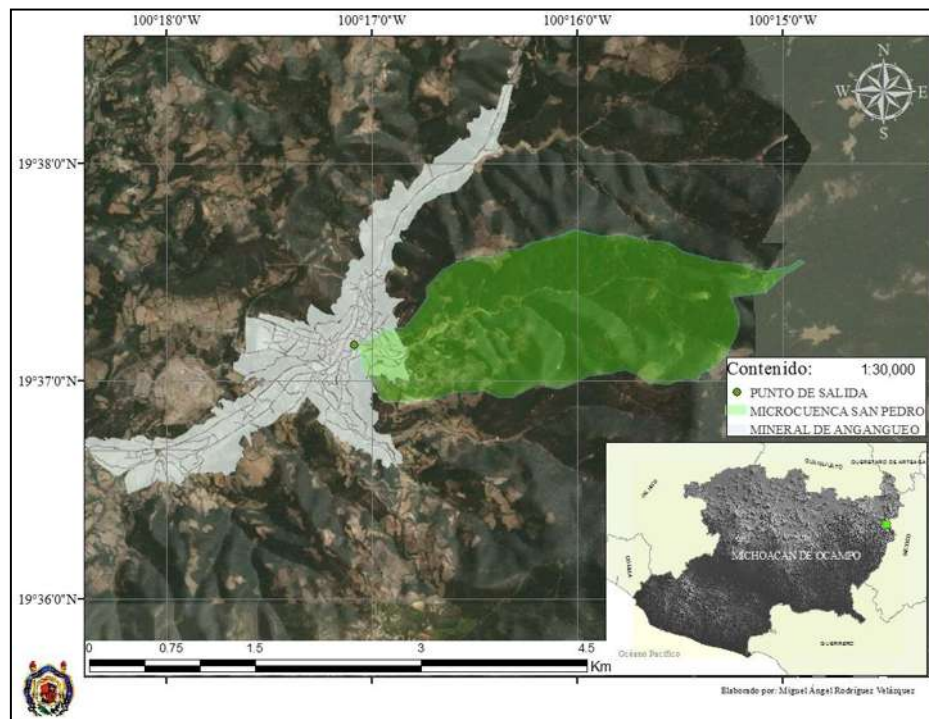


Figura 4.2.- Ubicación geográfica del municipio Mineral de Angangueo y la microcuenca del río San Pedro.

Es importante mencionar que la localidad se encuentra situada dentro del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (Figueroa, 2013), lo cual indica que existe una orografía formada por valles,

montañas y cerros, y de acuerdo a lo expuesto en los apartados del capítulo dos, es un entorno favorable para que los flujos hiperconcentrados de detritos se desarrollen. Sabiendo esto, es necesario aclarar que existen varias corrientes, cuyas microcuencas hidrográficas forman parte de las zonas más susceptibles a deslizamientos en forma de flujos cerca de la localidad; sin embargo, algunos registros y trabajos de campo desarrollados en el Municipio (e.g., Figueroa, 2013) indican que el aporte de la microcuenca del río San Pedro, con una superficie de 3.39 km², causó mayor afectación en la localidad durante el evento en febrero de 2010 (ver Figura 4.2). Esta es la razón principal por la cual nos enfocaremos en analizar esta zona, además, ha sido un fenómeno relativamente reciente, lo cual resulta conveniente en la búsqueda de registros o informes que indiquen las marcas de los niveles de agua alcanzados y otros datos relevantes para la simulación y la calibración del propio modelo. En la tabla 4.1 se muestran las características y parámetros morfométricos más relevantes de la microcuenca del río San Pedro definidos por Figueroa (2013).

Tabla 4.1. Parámetros morfométricos de la microcuenca del río San Pedro.

Parámetros morfométricos	Valor	Clasificación
Área (km²)	3.39	Muy pequeña
Perímetro (km)	9.36	-
Longitud del cauce principal (km)	3.45	Corto
Ancho medio de la cuenca (km)	1.04	-
Pendiente media de la cuenca (%)	44.85	Alta-Muy alta
Elevación media (msnm)	3,017	-
Altitud mínima (msnm)	2,597	-
Altitud máxima (msnm)	3,448	-
Desnivel altitudinal (m)	851	-
Coeficiente de forma (kf)	0.32	Achatada
Coeficiente de compacidad (kc)	1.42	Oval redonda a oval oblonga
Coeficiente de masividad (km)	889.5	Montañosa
Orden de corrientes	3	Bajo

Numero de escurrimientos	23	Bajo-Medio
Longitud de escurrimientos (km)	13.50	-
Densidad de drenaje (km/km ²)	4	Media-alta
Pendiente del cauce principal (%)	18	Fuerte
Sinuosidad del cauce principal	1.2	Poco sinuoso

Fuente: Figueroa, 2013.

4.2.-Discretización

Para poder dar solución a una ecuación diferencial mediante este método numérico es necesario realizar una discretización espacial de la zona de estudio, lo cual se logra elaborando una malla de cálculo, es decir, dividir el dominio en *volúmenes finitos*, también llamados celdas, los cuales son de menor tamaño. Existen varias maneras de realizar la discretización espacial, lo cual está directamente relacionado con el método numérico a utilizar; por ejemplo, cuando se utiliza el método de diferencias finitas, regularmente se utiliza una malla de cálculo conformada por nodos, como se muestra en la figura 4.3. En este trabajo para dicha discretización se emplean triangulaciones adaptivas de tipo Delaunay, las cuales conforman celdas de tres o cuatro lados, permitiendo optimizar el tiempo modelación y representar adecuadamente superficies irregulares y accidentadas. (Ver figura 4.4).

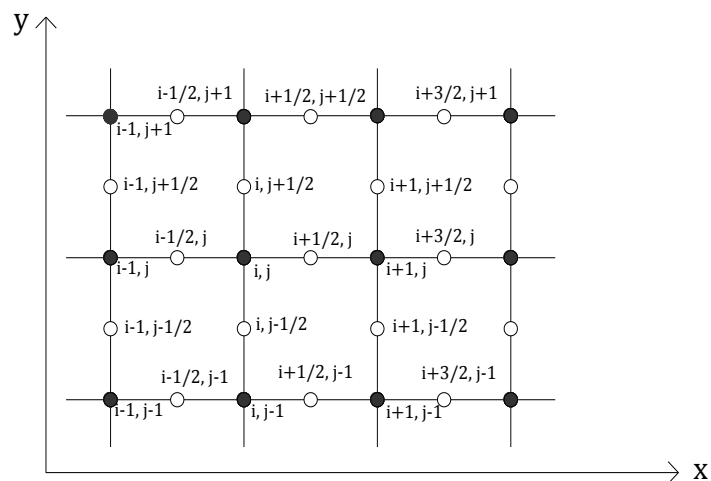


Figura 4.3.- Malla de cálculo escalonada o "Staggered Cell".

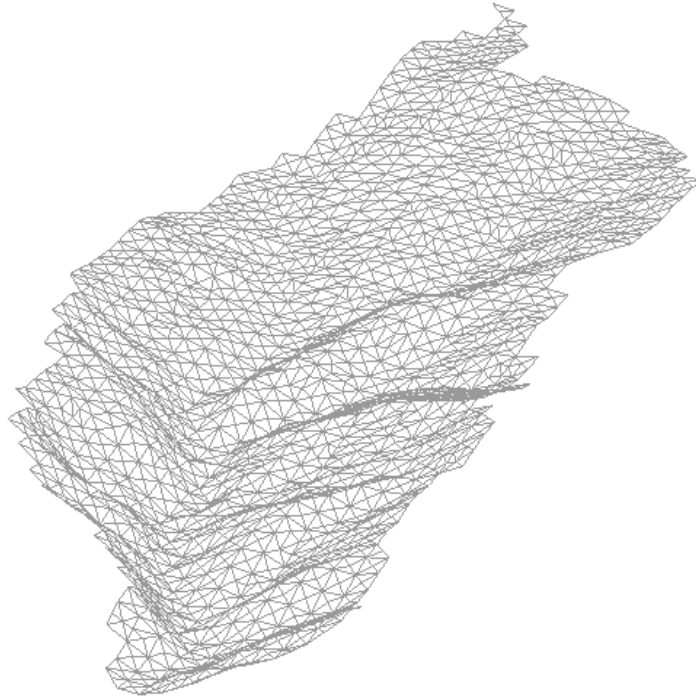


Figura 4.4.- Ejemplo de la discretización espacial sobre el dominio físico (3500 elementos).

4.2.1.- Discretización en volúmenes finitos de las ecuaciones de Saint-Venant 2D

Una vez realizada la discretización del dominio físico se debe realizar la discretización temporal y espacial de las ecuaciones, es decir, una discretización de la derivada temporal y una discretización de los términos flujo y fuente. Esto se logra a través del método numérico, para el caso en estudio se aplica el método de volúmenes finitos para discretizar el sistema de ecuaciones de Saint-Venant en dos dimensiones espaciales.

Con el fin de simplificar la notación, las ecuaciones de Saint-Venant en dos dimensiones, ecuaciones 3.3, 3.4.1 y 3.4.2, se pueden expresar en forma vectorial como

$$\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_y}{\partial y} = \sum_k \mathbf{G}_k \quad \dots (4.1)$$

en donde $\mathbf{W}$ representa el vector de variables conservativas, $\mathbf{F}_x$ y $\mathbf{F}_y$ el vector de los términos de flujo en la dirección x y y , respectivamente. Estos vectores están dados por

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{pmatrix} \quad \mathbf{F}_x = \begin{pmatrix} q_x \\ \frac{q_x^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \\ \frac{q_x q_y}{h} \end{pmatrix} \quad \mathbf{F}_y = \begin{pmatrix} q_y \\ \frac{q_x q_y}{h} \\ \frac{q_y^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \end{pmatrix}$$

y los términos $\mathbf{G}$, representan la contribución de los términos fuente, los cuales están dados por (Alavez, 2013)

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 \\ fhv + \frac{\tau_{sx}}{\rho} + gh(S_{0x} - S_{fx}) + S_{t_1} \\ -fhv + \frac{\tau_{sy}}{\rho} + gh(S_{0y} - S_{fy}) + S_{t_2} \end{pmatrix},$$

donde τ_{sx} , τ_{sy} representan las tensiones tangenciales de superficie debidas a la acción del viento sobre la superficie del agua en las direcciones x y y , respectivamente. S_{0x} y S_{0y} representan a las variaciones del fondo del cauce en forma de pendiente y se llaman pendiente geométrica según x y y , respectivamente. La cual es positiva si el fondo desciende con respecto a x o y y negativa si el fondo es creciente. Si z_b representa la cota en el fondo del cauce, lo anterior se puede expresar como (Alavez, 2013)

$$S_{0x} = \frac{\partial z_b}{\partial x} \quad y \quad S_{0y} = \frac{\partial z_b}{\partial y},$$

S_{fx} , S_{fy} son los términos (o pendientes) de fricción del agua con el fondo del cauce en cada una de las direcciones coordenadas x , y , respectivamente, los cuales están dados por (Alavez, 2013)

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} \quad y \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}},$$

y los términos S_{t_1} , S_{t_2} representan a los términos turbulentos, dados por

$$S_{t_1} = \frac{\partial}{\partial x} \left(2v_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_e h \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right]$$

y

$$S_{t_2} = \frac{\partial}{\partial y} \left(2v_e \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[v_e h \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right],$$

donde $v_e = \mu_e / \rho$ es la viscosidad cinemática turbulenta.

Los efectos debidos al modelo reológico se encuentran en el término $\mathbf{G}$ de la ecuación vectorial 4.1, y debido a las simplificaciones realizadas, están de manera implícita en los términos de fricción y turbulentos, S_f y S_t , respectivamente.

Para poder hacer la discretización espacial de las ecuaciones de conservación de masa y movimiento en dos dimensiones por el método de volúmenes, se usa el teorema de Gauss para realizar la integral de las ecuaciones diferenciales en cada una de las celdas de la malla de cálculo, con ello se busca una aproximación de la integral de la variable conservativa, $\mathbf{W}$, permitiendo resolver las ecuaciones en forma integral, y así, establecer de manera más sencilla métodos conservativos. Dicha discretización está dada por la siguiente expresión en forma vectorial

$$\frac{\mathbf{W}_i^{n+1} - \mathbf{W}_i^n}{\Delta t} A_i + \oint_{L_i} (\mathbf{F}_x \tilde{n}_x + \mathbf{F}_y \tilde{n}_y) dL = \sum_k \mathbf{G}_{k,i} A_i, \quad \dots (4.2)$$

En cada paso de tiempo se actualizan los valores de la variable conservativa, para lo cual se utilizan aproximaciones del flujo a través de las fronteras de los volúmenes finitos. En la discretización, la integral de contorno indica el balance de entradas y salidas en las celdas, y corresponde a los términos de flujo. Esta aproximación se calcula a partir de una *función flujo numérico* Φ , que tiene la forma

$$\oint_{L_i} (\mathbf{F}_x \hat{n}_x + \mathbf{F}_y \hat{n}_y) dL \approx \sum_{j \in k_i} \Phi_{LR}(\mathbf{W}_L, \mathbf{W}_R, \mathbf{n}_{ij}) \quad \dots (4.3)$$

en donde Φ_{ij} es una función de flujo numérica, definida para cada arista LR de la malla de cálculo, donde L y R son los nodos izquierda (*Left*) y derecha (*Right*) de la arista considerada.

Una función de flujo consistente viene dada por el esquema descentrado de Roe (IBER, 2004), la cual se puede expresar en el caso unidimensional como

$$\Phi_{LR} = \frac{\mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_R}{2} - \frac{1}{2} |\mathbf{J}|_{LR} (\mathbf{W}_R - \mathbf{W}_L) \quad \dots (4.4)$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{F}_x \mathbf{n}_x + \mathbf{F}_y \mathbf{n}_y$$

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{Z}}{\partial \mathbf{w}}$$

donde $\mathbf{Z}_L$ y $\mathbf{Z}_R$ representan el flujo normal al contorno a ambos lados de la arista LR . La matriz $|\mathbf{J}|_{LR}$ es la matriz Jacobiana del flujo $\mathbf{Z}$, que se obtiene como

$$|\mathbf{J}| = \mathbf{X} |\mathbf{D}| \mathbf{X}^{-1}$$

donde $|\mathbf{D}|$ es la matriz diagonal de los valores absolutos de los eigenvalores de $\mathbf{J}$, y $\mathbf{X}$ es la matriz cuyas columnas son los eigenvectores correspondientes a cada eigenvalor. Evaluada en el estado medio de Roe, está definida por

$$\tilde{h} = \sqrt{h_L \cdot h_R}$$

$$\tilde{c} = \sqrt{g \frac{h_L + h_R}{2}}$$

$$\tilde{U}_x = \frac{\sqrt{h_L} U_{x,L} + \sqrt{h_R} U_{x,R}}{\sqrt{h_L} + \sqrt{h_R}}$$

$$\tilde{U}_y = \frac{\sqrt{h_L} U_{y,L} + \sqrt{h_R} U_{y,R}}{\sqrt{h_L} + \sqrt{h_R}}$$

los eigenvalores (λ) y eigenvectores ($\mathbf{e}_m$) de la matriz Jacobiana $\mathbf{J}$, se pueden escribir como

$$\tilde{\lambda}_1 = \tilde{\lambda}_2 + \tilde{c} \sqrt{n_x^2 + n_y^2}; \quad \tilde{\lambda}_2 = n_x \tilde{U}_x + n_y \tilde{U}_y;$$

$$\tilde{\lambda}_3 = \tilde{\lambda}_2 - \tilde{c} \sqrt{n_x^2 + n_y^2}$$

$$\tilde{\mathbf{e}}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ \tilde{U}_x + \tilde{c}\tilde{n}_x \\ \tilde{U}_y + \tilde{c}\tilde{n}_y \end{pmatrix} \quad \tilde{\mathbf{e}}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ -\tilde{c}\tilde{n}_y \\ \tilde{c}\tilde{n}_x \end{pmatrix} \quad \tilde{\mathbf{e}}_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ \tilde{U}_x - \tilde{c}\tilde{n}_x \\ \tilde{U}_y - \tilde{c}\tilde{n}_y \end{pmatrix}$$

Para la implementación del cálculo del flujo numérico se descompone la diferencia entre ($\mathbf{W}_R - \mathbf{W}_L$) a izquierda y derecha de la arista considerada en la base de eigenvectores $\mathbf{e}_m$

$$\mathbf{W}_R - \mathbf{W}_L = \sum_{m=1}^3 \alpha_m \tilde{\mathbf{e}}_m \quad \dots (4.5)$$

Esto nos permite reescribir el flujo numérico como

$$\Phi_{LR} = \frac{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_j}{2} - \frac{1}{2} \sum_{m=1}^3 |\tilde{\lambda}_m| \alpha_m \tilde{\mathbf{e}}_m, \quad \dots (4.6)$$

y los coeficientes α son calculados como

$$\alpha_1 = \frac{h_R - h_L}{2} + \frac{1}{2\tilde{c}} [(U_{x,R}h_R - U_{x,L}h_L) \cdot \tilde{n}_x + (U_{y,R}h_R - U_{y,L}h_L) \cdot \tilde{n}_y - (\tilde{U}_x\tilde{n}_x + \tilde{U}_y\tilde{n}_y) \cdot (h_R - h_L)]$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{\tilde{c}} \{ [U_{y,R}h_R - U_{y,L}h_L - \tilde{U}_y(h_R - h_L)] \cdot \tilde{n}_x - [U_{x,R}h_R - U_{x,L}h_L - \tilde{U}_x(h_R - h_L)] \cdot \tilde{n}_y \}$$

$$\alpha_3 = \frac{h_R - h_L}{2} - \frac{1}{2\tilde{c}} \left[(U_{x,R}h_R - U_{x,L}h_L) \cdot \tilde{n}_x + (U_{y,R}h_R - U_{y,L}h_L) \cdot \tilde{n}_y - (\tilde{U}_x\tilde{n}_x + \tilde{U}_y\tilde{n}_y) \cdot (h_R - h_L) \right].$$

Para este tipo de discretización de los términos de flujo, se recomienda utilizar mallas relativamente finas, con el objetivo de disminuir el error introducido por la difusión numérica, el cual es generado por la introducción de términos de segundo orden durante la discretización.

Para la discretización del termino fuente es necesario distinguir las partes del término fuente $\mathbf{G}$, que para el caso de interés será la parte que contiene la pendiente geométrica (S_0), la parte que la pendiente de fricción (S_f), así como la parte de términos por turbulencia (S_t), asociados por simplificación a la parte que contiene los términos de fricción. Para ello despreciaremos los términos de tensión tangencial por efecto del viento, τ_{Sx} , τ_{Sy} , que de acuerdo a algunos autores generan efectos muy pequeños; además, no tomaremos en cuenta el término de Coriolis f , por mismas razones. De tal modo que el término $\mathbf{G}$ está definido por

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) + S_{t_1} \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) + S_{t_2} \end{pmatrix};$$

la diferencia ante otros trabajos es que se desprecian los términos turbulentos, lo cual, debido al caso de interés no se hará. De esta manera se puede reescribir $\mathbf{G}$ de manera similar como lo hace Alavez et al. (2013), de esta forma se tiene

$$\mathbf{G} = \mathbf{G}_0 + \mathbf{G}_f,$$

donde

$$\mathbf{G}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ ghS_{0x} \\ ghS_{0y} \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad \mathbf{G}_f = \begin{pmatrix} 0 \\ -ghS_{fx} + S_{t_1} \\ -ghS_{fy} + S_{t_2} \end{pmatrix},$$

la fuente discreta bidimensional en cada celda se define como

$$\Psi = X(I - |D|D^{-1})X^{-1}\hat{\mathbf{G}}_0 + \hat{\mathbf{G}}_f, \quad \dots (4.7)$$

$\widehat{\mathbf{G}}_0$ aproxima la pendiente geométrica en el término fuente y está dada por

$$\widehat{\mathbf{G}}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ g \frac{h_i^n + h_j^n}{2} \frac{H_j - H_i}{d_{ij}} \tilde{\alpha} \\ g \frac{h_i^n + h_j^n}{2} \frac{H_j - H_i}{d_{ij}} \tilde{\beta} \end{pmatrix},$$

Donde los coeficientes $\tilde{\alpha}$ y $\tilde{\beta}$ son componentes del vector normal de cada arista del volumen finito, H representa la distancia al fondo desde un nivel de referencia fijo $z = z_0$, con sentido positivo hacia abajo (ver Figura 3.1). De esta manera las pendientes son positivas si el fondo desciende y negativas si el fondo asciende (Alavez, 2013),

$$S_{0_x} = \frac{\partial H}{\partial x} \quad y \quad S_{0_y} = \frac{\partial H}{\partial y},$$

y $\widehat{\mathbf{G}}_f$ aproxima la pendiente de fricción en el centro de cada celda que a su vez está dada por (Alavez et al., 2013)

$$\widehat{\mathbf{G}}_f = \begin{pmatrix} 0 \\ gh_i^n (-S_{fx})_i^n + (S_{t1})_i^n \\ gh_i^n (-S_{fy})_i^n + (S_{t2})_i^n \end{pmatrix},$$

entonces la discretización del termino fuente estará dado por

$$\sum_{j \in K_1} \iint_{C_{ij}} \mathbf{G} dA \cong \sum_{j \in K_1} A_{ij} \Psi_{ij}^n,$$

donde A_{ij} es el área de la celda C_{ij} .

Así, la solución numérica del sistema de ecuaciones de Saint-Venant, ecuaciones 3.3, 3.4.1 y 3.4.2, mediante el método de volúmenes finitos se aproxima por

$$\mathbf{w}_i^{n+1} = \mathbf{w}_i^n + \frac{\Delta t}{A_{ij}} \left(\sum_{j \in K_1} A_{ij} \Psi_{ij}^n - \sum_{j \in K_1} \Phi_{ij}^n \right), \quad \dots (4.8)$$

donde $\mathbf{W}_i^{n+1}$ es el vector de variables cuyos elementos son

$$\mathbf{W}_i^{n+1} = \begin{pmatrix} h_i^{n+1} \\ (q_x)_i^{n+1} \\ (q_y)_i^{n+1} \end{pmatrix}.$$

De acuerdo con Vázquez (2014), la ecuación 4.9 dice: dadas $\mathbf{W}_i^n$, las aproximaciones promedio en las celdas en el tiempo t_n , queremos aproximar $\mathbf{W}_i^{n+1}$, los valores promedios en las celdas en el siguiente tiempo t_{n+1} , después de un paso de tiempo de longitud $\Delta t = t_{n+1} - t_n$, más una actualización dada por un balance de masas entre los términos de flujo y fuente.

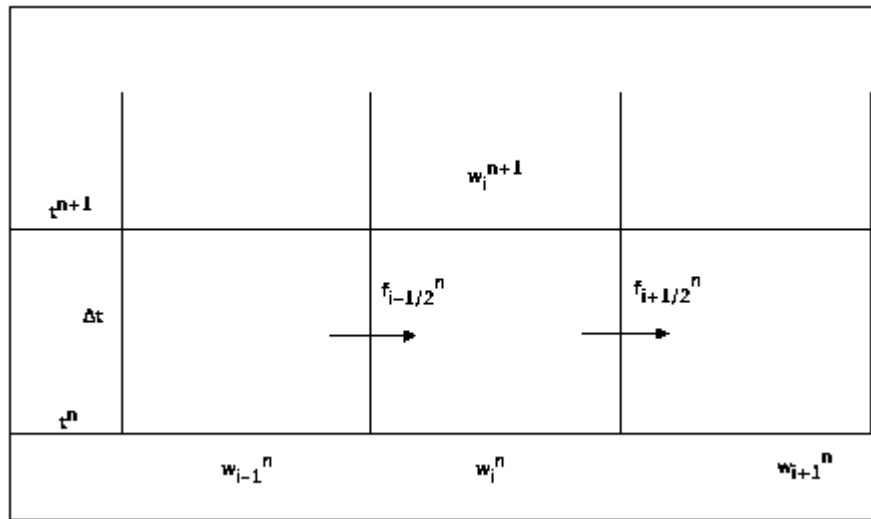


Figura 4.5.- Detalle del método de volúmenes finitos para actualizar el valor de $\mathbf{W}_i^{n+1}$ con un método explícito en tiempo para un caso unidimensional.

Fuente: Vázquez (2014).

De esta manera se obtiene un método iterativo explícito que permite calcular el valor de las variables desconocidas de las ecuaciones de Saint-Venant en cada volumen finito o celda, expresado por algunos textos como C_i , y en cada instante de tiempo t_n . (Ver Figura 4.6).

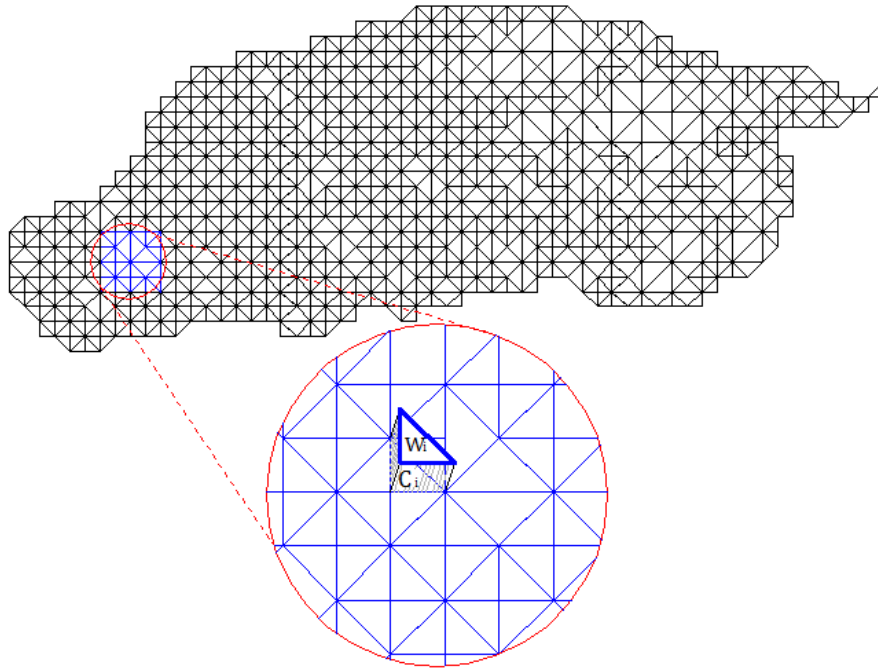


Figura 4.6.- Forma esquemática de la aproximación numérica en una celda mediante el método de volúmenes finitos.

Es necesario verificar algunas condiciones que permitan que la información tenga oportunidad de propagarse a las velocidades físicas correctas, determinadas por los autovalores de la matriz jacobiana del flujo (Vázquez, 2014), es decir, que se cumpla la condición de convergencia, y con ello se espera que el método sea estable y consistente en la solución de las ecuaciones. La condición de convergencia está dada por la condición de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), que para un caso en dos dimensiones adopta la siguiente forma (Alcrudo, 1992)

$$\Delta t \leq \min_{i,j \in K_i} \left[\frac{d_{ij}}{2(\sqrt{u^2 + v^2} + c)_{ij}} \right],$$

donde c es la celeridad de la onda, dada por $c = \sqrt{gh}$ y d_{ij} son las distancias entre los nodos (baricentros de las celdas) i y nodos vecinos $j \in K_i$.

4.3.-Condiciones iniciales y de frontera

Son necesarias condiciones iniciales y de contorno para la solución numérica única del sistema de ecuaciones de Saint-Venant. Para ello, es importante distinguir las condiciones iniciales y de contorno.

4.3.1.-Condiciones iniciales

Como condiciones iniciales se considera que no existe un tirante inicial o condiciones de terreno seco y la velocidad inicial es nula en las dos direcciones de la superficie de modelación. Es decir,

$$h(x, y, 0) = 0, \quad u(x, y, 0) = 0 \quad \text{y} \quad v(x, y, 0) = 0,$$

para todo $(x, y) \in \Omega$.

4.3.2.-Condiciones de frontera

Para este tipo de condiciones se definen contornos abiertos y cerrado o tipo pared, de las últimas se pueden mantener condiciones de deslizamiento libre (tensión tangencial nula) y condiciones de fricción en la pared (funciones de pared). Las tensiones de deslizamiento son las que se impondrán en este caso, ya que se ha supuesto que, por la relación de las escalas horizontales y vertical, los contactos con los contornos laterales son mucho más pequeños que la superficie de contacto con el fondo, por ello se consideran despreciables para simplificación del modelo.

Para el caso de condiciones de contornos abiertos (entrada y salida), es necesario suponer un tipo de régimen del flujo (turbulento o laminar), en forma esquemática se muestran en la tabla 4.2 las opciones en función del tipo de régimen.

Tabla 4.2.- Condiciones impuestas en contornos abiertos.

Contorno		Régimen	Condiciones impuestas
Entrada	Caudal total	Subcrítico	Caudal total en dirección normal al contorno
		Supercrítico	Caudal total en dirección normal al contorno y velocidad media
	Caudal específico	Subcrítico	Caudal específico en dirección normal al contorno
		Supercrítico	a) Caudal específico en dirección normal al contorno y tirante b) Caudal específico en dirección normal al contorno y cota de agua
Salida	Subcrítico		a) Tirante
			b) Cota de agua
			c) Vertedero (cota y cociente de descarga)
			d) Curva de gasto
	Supercrítico		No es necesario imponer una condición.

Fuente: Iber, 2014.

De esta manera la aplicación del esquema y los resultados que se obtengan pasa por la realización de un código de programación que al momento supera los alcances del trabajo.

Sin embargo, con el propósito de conocer la aplicabilidad de los volúmenes finitos se buscó qué software existente contempla este tipo de métodos de resolución, encontrándose el denominado software Iber.

Iber es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El modelo Iber consta actualmente de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares y/o cuadriláteros (Iber, 2014).

El empleo del software mencionado se hace para la cuenca del río San Pedro del municipio de Angangueo, en donde en el año de 2010 las lluvias presentadas ocasionaron flujos hiperconcentrados, que ocasionaron pérdidas humanas y daños materiales. Los resultados de la simulación se muestran en los párrafos siguientes.

4.4.-Resultados preliminares

En el presente subcapítulo se muestran resultados de simulaciones preliminares con el fin de delimitar la zona en donde se harán simulaciones detalladas mediante el modelo propuesto para el caso de flujo hiperconcentrado y de detritos, además, se considerará como un antecedente que permitirá comparar resultados.

Las simulaciones preliminares se realizaron en el modelo Iber v. 2.4.3, el cual utiliza la formulación planteada en las secciones anteriores. Para las simulaciones se construyó un mallado de la zona en estudio, expuesta en el apartado 4.1, a través del software mencionado. Lo anterior se logra a partir de un archivo de formato *.txt*, el cual contiene las coordenadas y cotas del terreno natural de un modelo digital de elevaciones con resolución de 1 m. El modelo digital de elevaciones fue generado a partir de un levantamiento topográfico realizado por Figueroa (2013). Para ello, los puntos levantados se transformaron a un archivo de código *ascii* mediante el software ARC-MAP 10.1.

La discretización de la zona fue mediante una malla con 180,217 elementos triangulares de tipo Delaunay. Mediante un modelo de lluvia-escurrimiento, se determinó el hidrograma de precipitación (figura 4.7) con un gasto pico de 94.8 m³/s correspondiente a una altura de precipitación (*hp*) máxima de 104 mm Figueroa (2013).

El tiempo de simulación fue de 7500 segundos (125 minutos), similar al tiempo de duración del hidrograma (figura 4.7), el incremento de paso fue de 100 segundos. Las simulaciones se realizaron a través de un equipo de cómputo portátil con capacidad de 4 GB en memoria RAM y procesador Intel(R) Core(TM) i3-2350M CPU @ 2.30GHz.

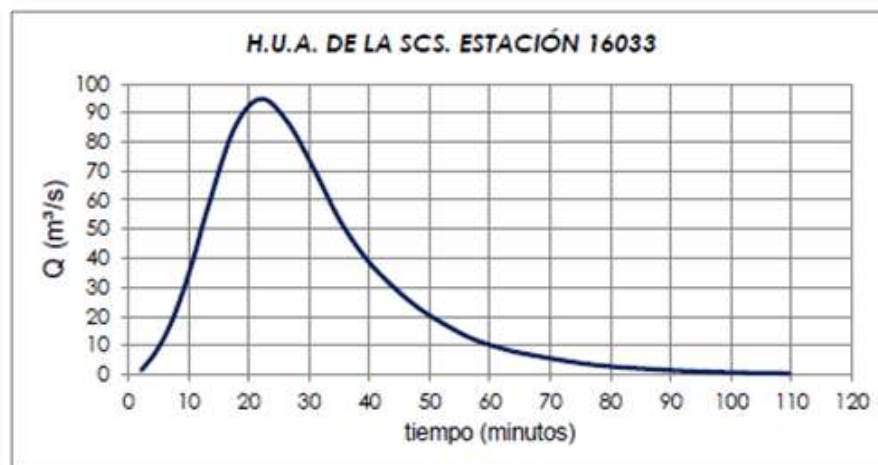


Figura 4.7.- Hidrograma de precipitación para la microcuenca del río San Pedro.

Fuente: Figueroa, 2013.

Se realizaron simulaciones en condiciones de agua clara y flujo hiperconcentrado, para la primera se utilizaron únicamente los datos antes mencionados; para el segundo caso se tomaron valores de concentración volumétrica (C_v) definidos por Figueroa (2013), utilizando como concentración pico 0.375. De manera preliminar se usó un valor constante para el coeficiente de rugosidad de Manning, dado por $n(x, y) = 0.050$, dato que fue obtenido de Figueroa (2013).

En las figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se muestra, vista en planta, la simulación en condiciones de agua clara para los tiempos de paso 800, 1500 Y 5800, respectivamente. En las cuales se observa que el flujo alcanza tirantes superiores a un metro; en las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se observa que se alcanzan velocidades mayores a un metro por segundo, lo cual implica que aun siendo solamente agua clara la que desciende por zona montañosa del río San Pedro puede causar fuertes problemas de inundación a la población.

En las figuras 4.14, 4.15 y 4.16 se muestran, respectivamente, los tirantes alcanzados en la simulación de flujo hiperconcentrado cuando el flujo toca la zona urbana, cuando aproximadamente el hidrograma de entrada alcanza el gasto pico y cuando el gasto desciende. En las figuras 4.17, 4.18 y 4.19 se muestran las velocidades alcanzadas en las mismas etapas de la simulación.

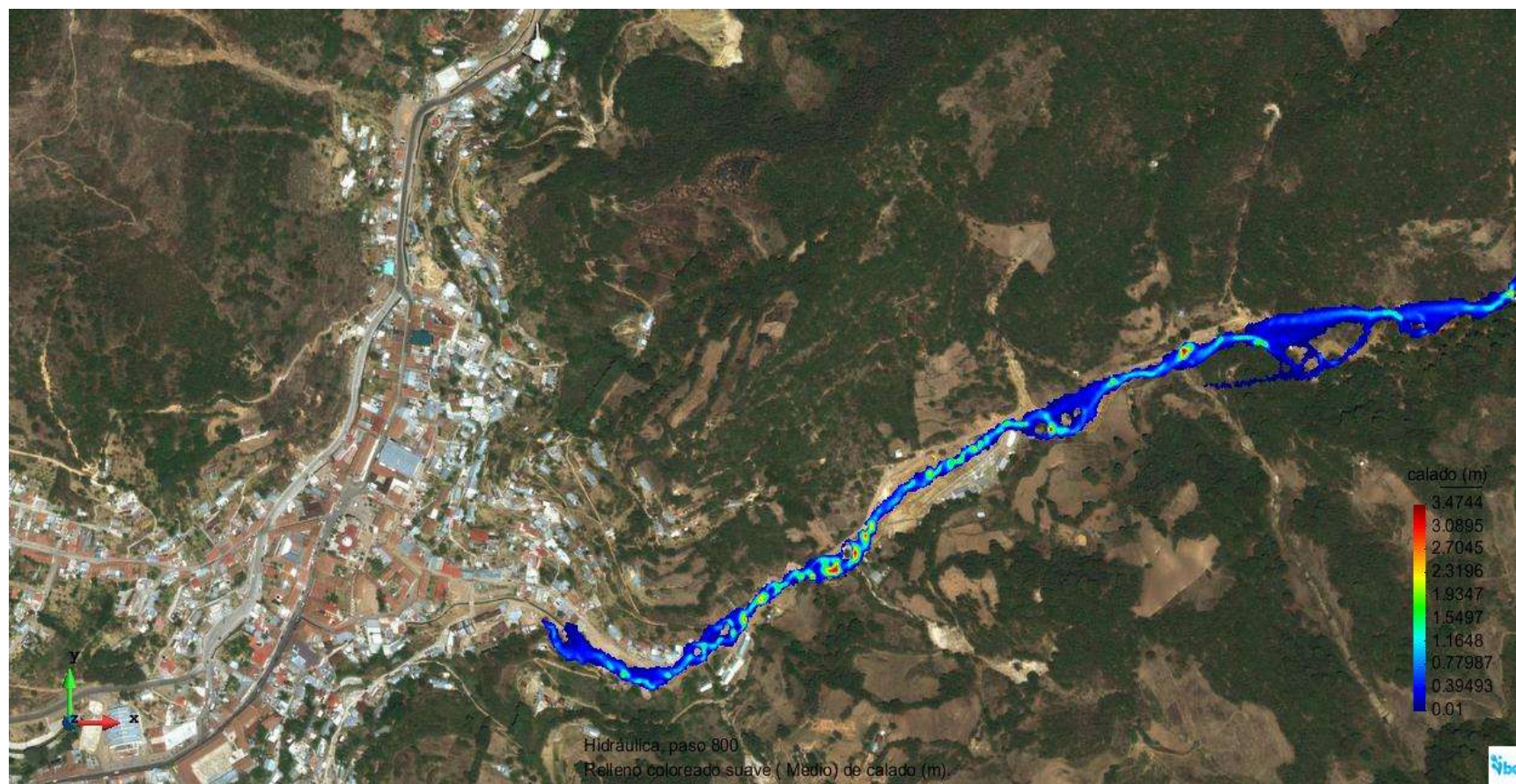


Figura 4.8.- Tirantes alcanzados en la simulación del flujo en condiciones de agua clara en el paso de tiempo 800.

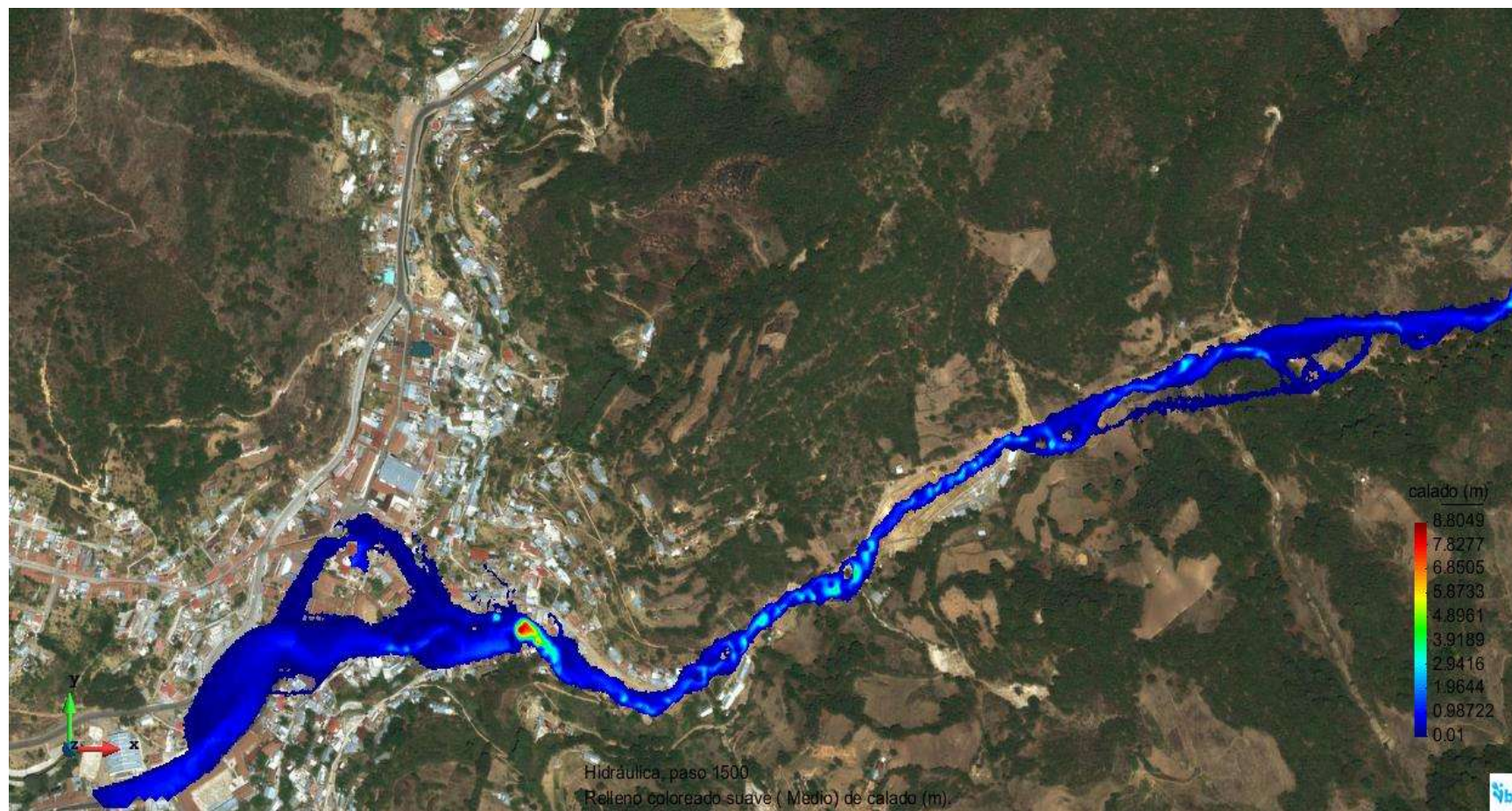


Figura 4.9.- Tirantes alcanzados en la simulación del flujo en condiciones de agua clara en el paso de tiempo 1500.

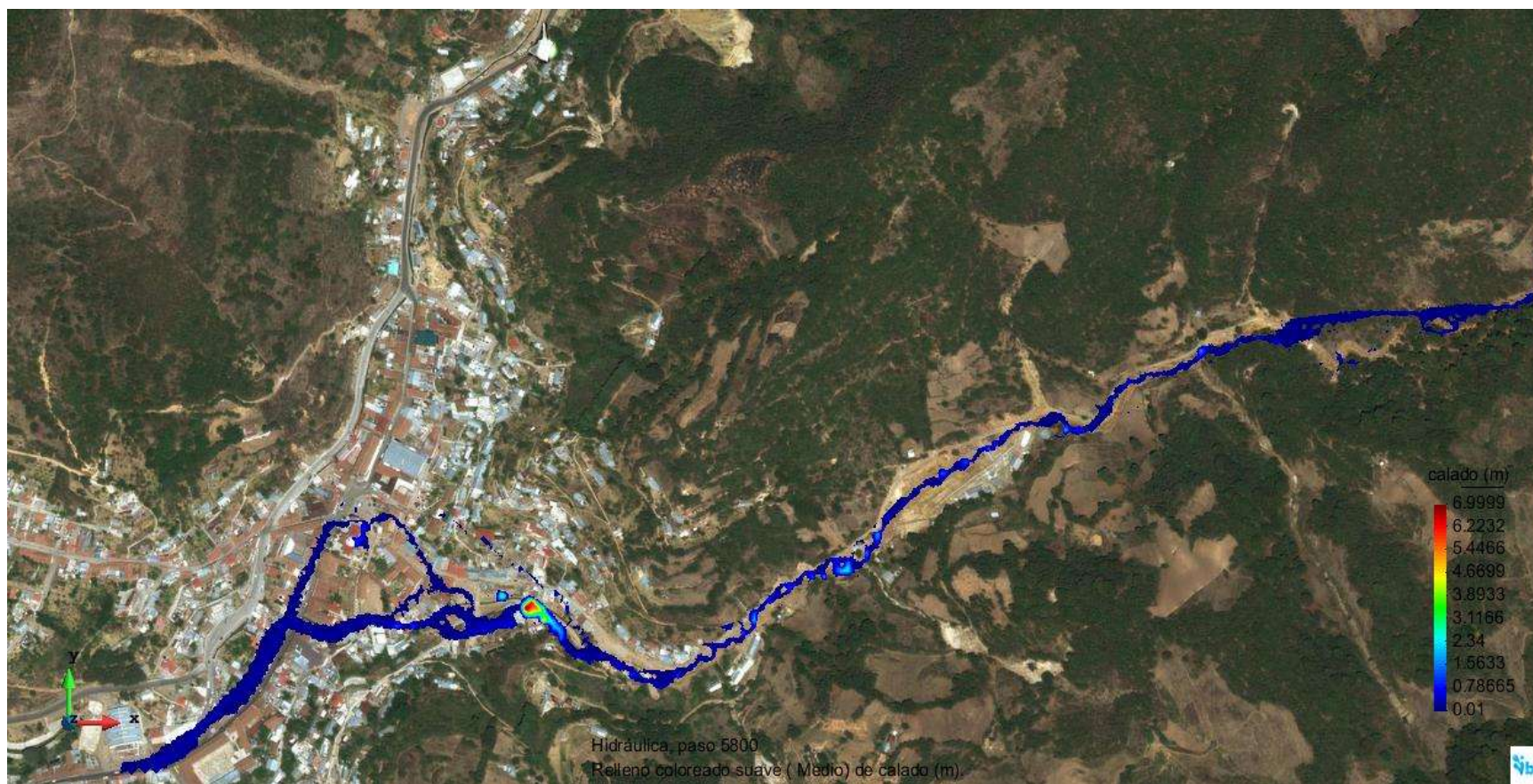


Figura 4.10.- Tirantes alcanzados en la simulación del flujo en condiciones de agua clara en el paso de tiempo 5800.

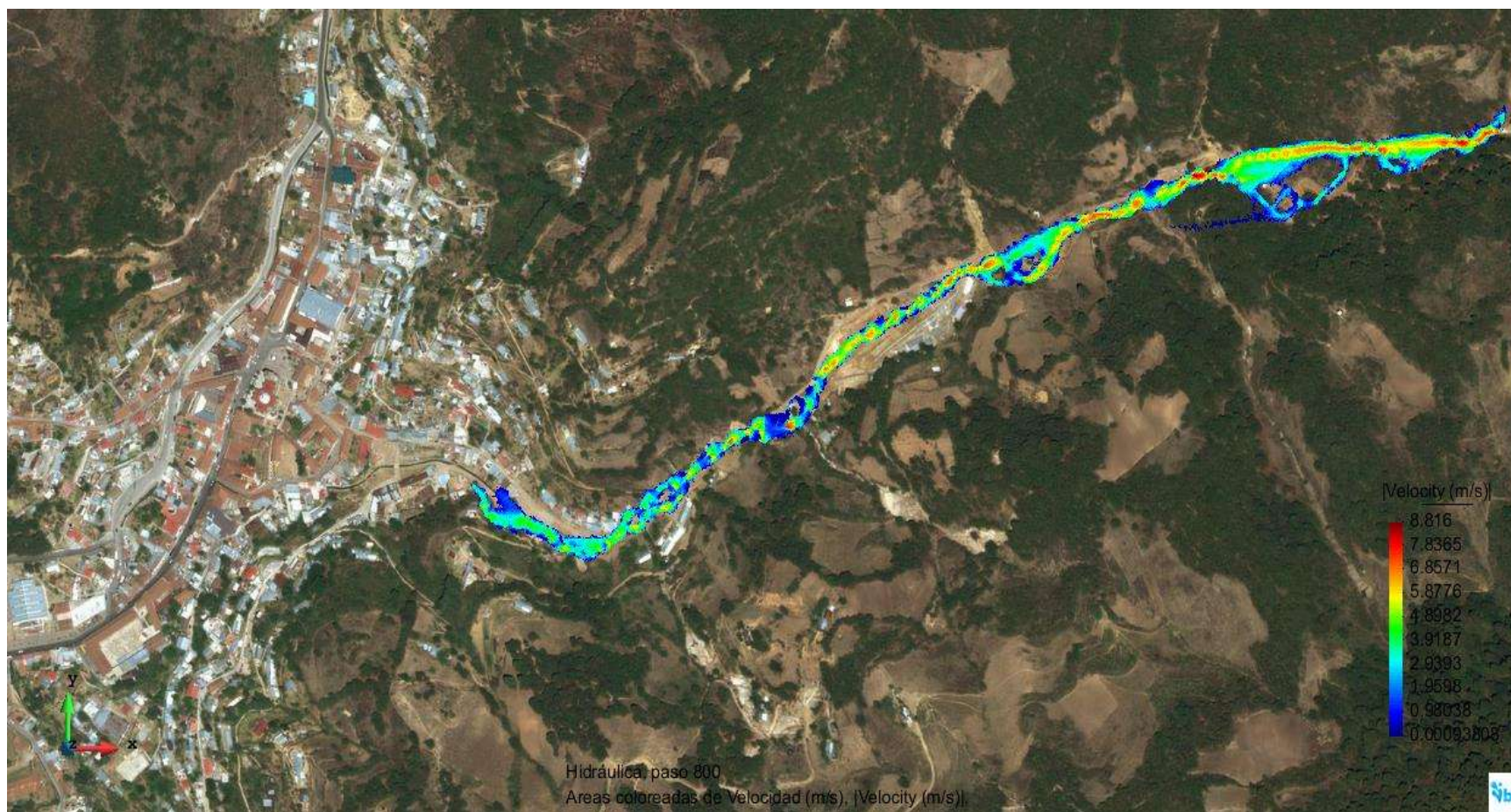


Figura 4.11.- Velocidades alcanzadas en la simulación del flujo en condiciones de agua clara en el paso de tiempo 800.

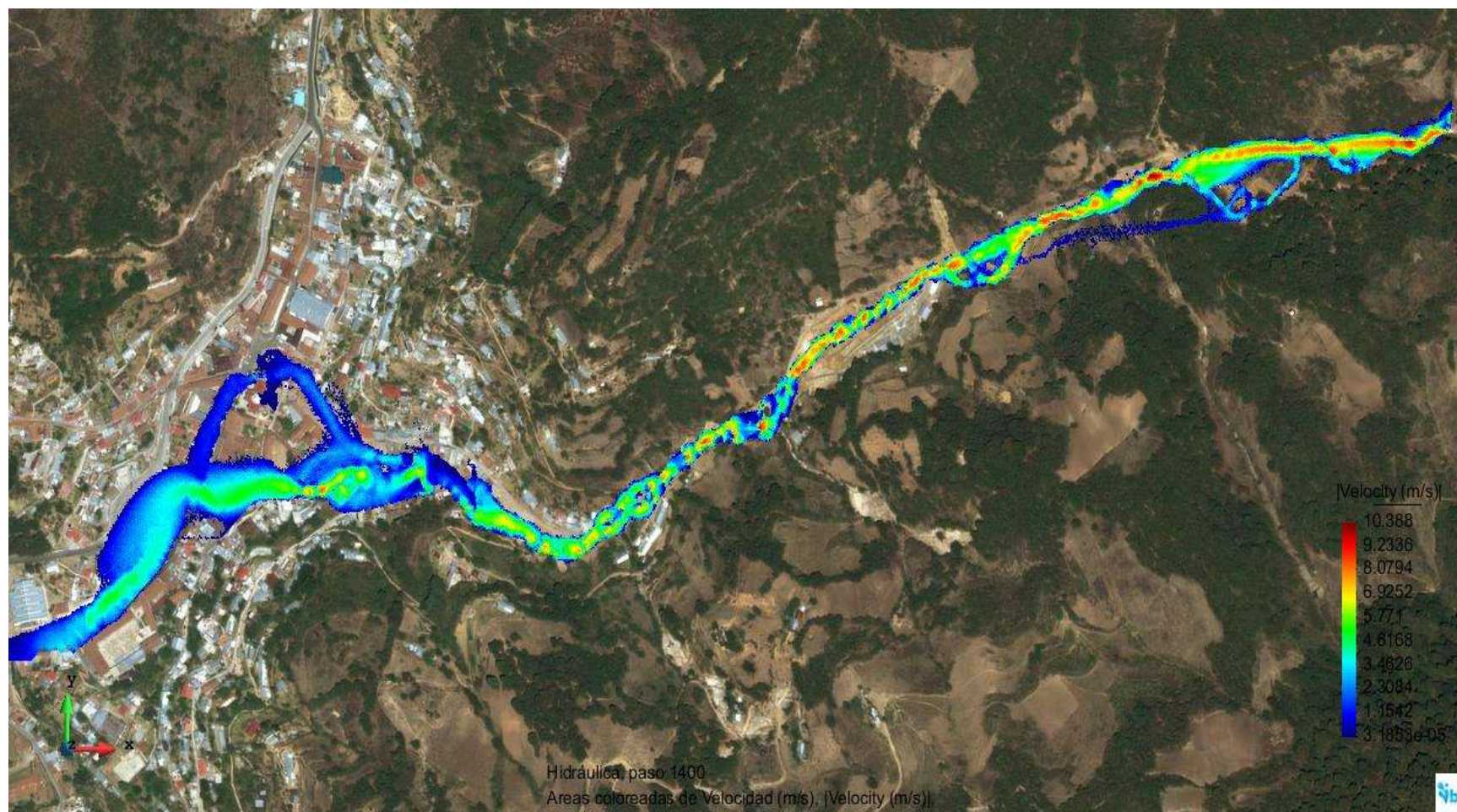


Figura 4.12.- Velocidades alcanzadas en la simulación del flujo en condiciones de agua clara en el paso de tiempo 1400.

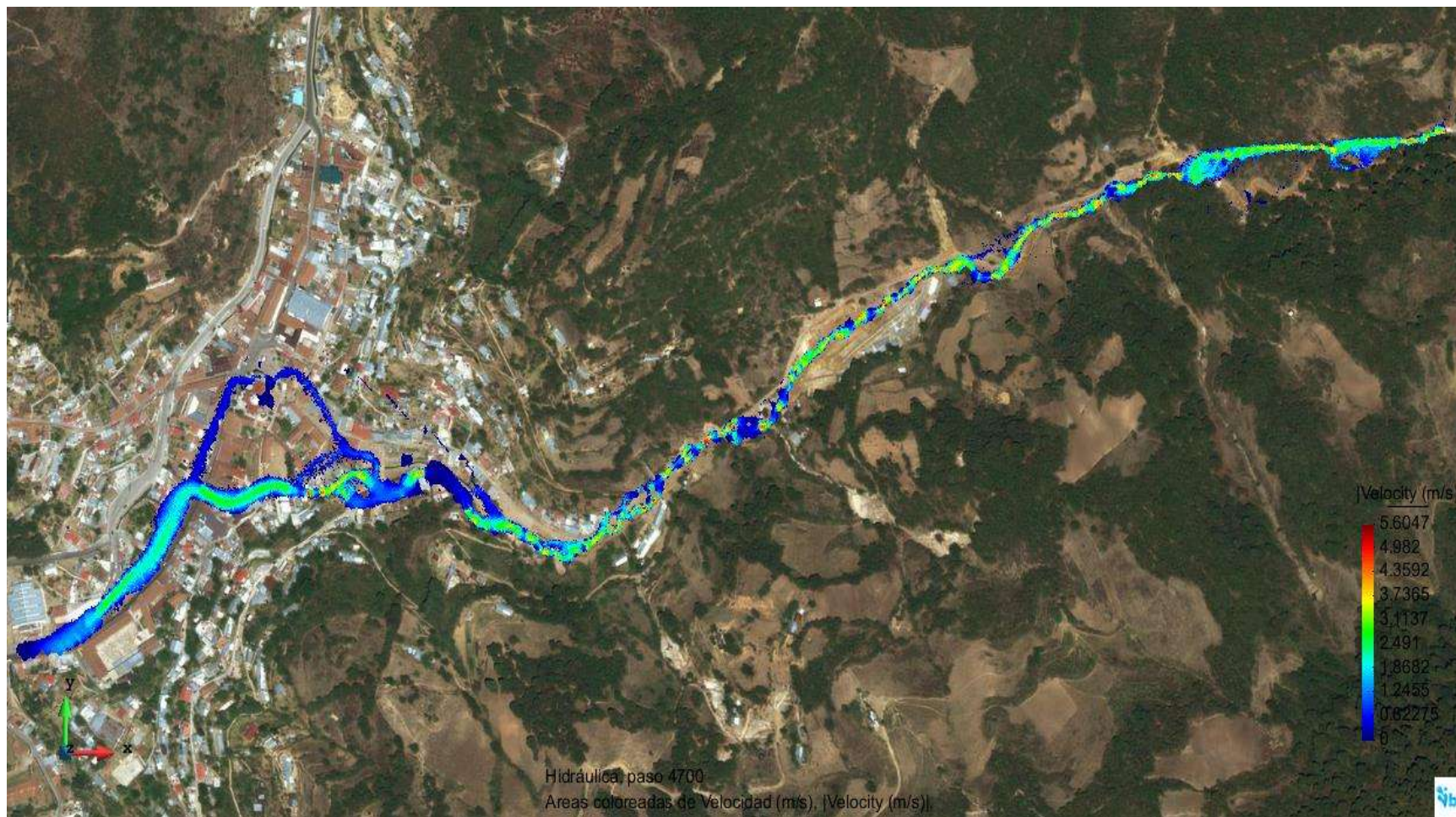


Figura 4.13.- Velocidades alcanzadas en la simulación del flujo en condiciones de agua clara en el paso de tiempo 4700.

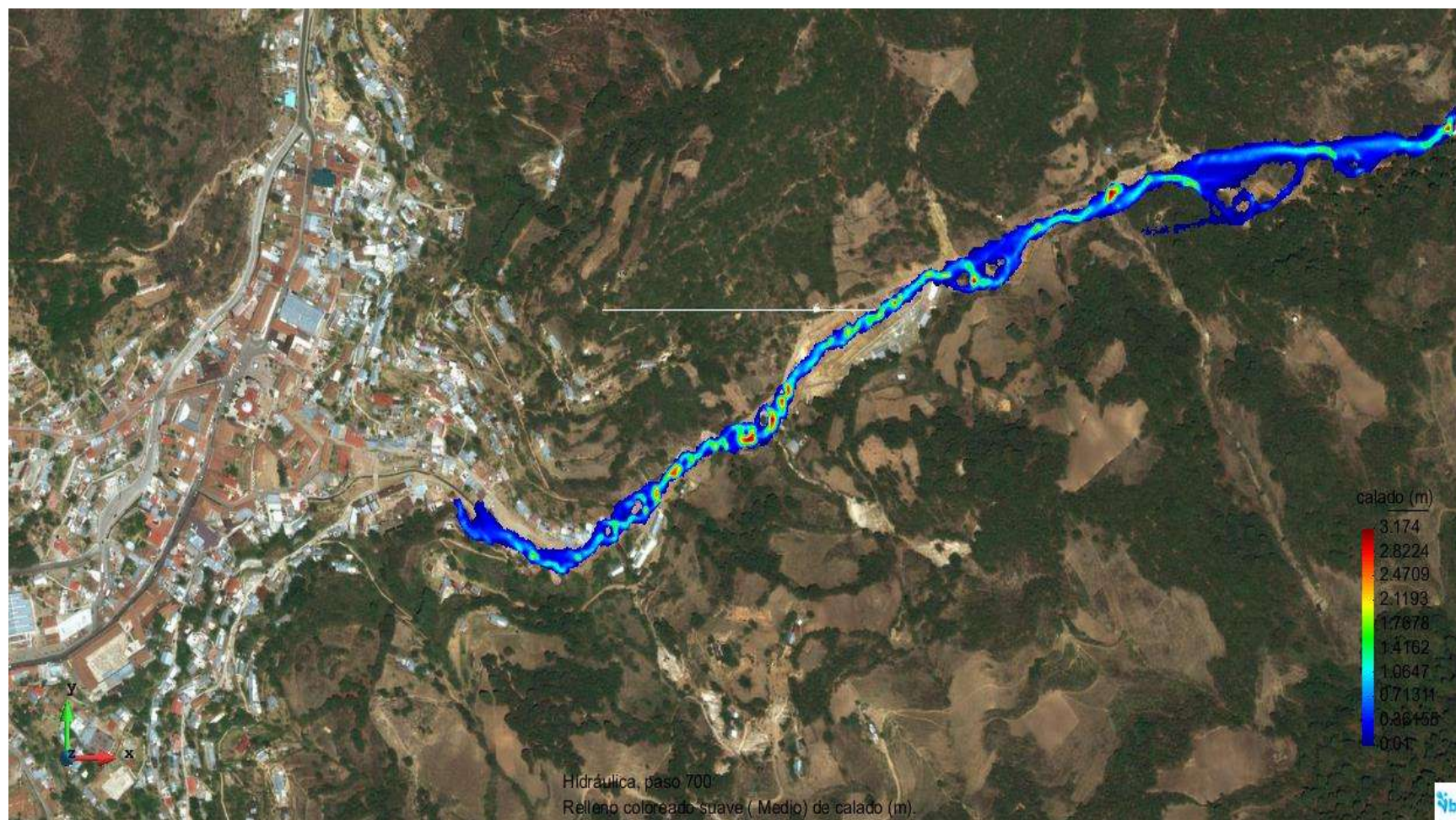


Figura 4.14.- Tirantes alcanzados en la simulación de flujo hiperconcentrado en el paso de tiempo 700

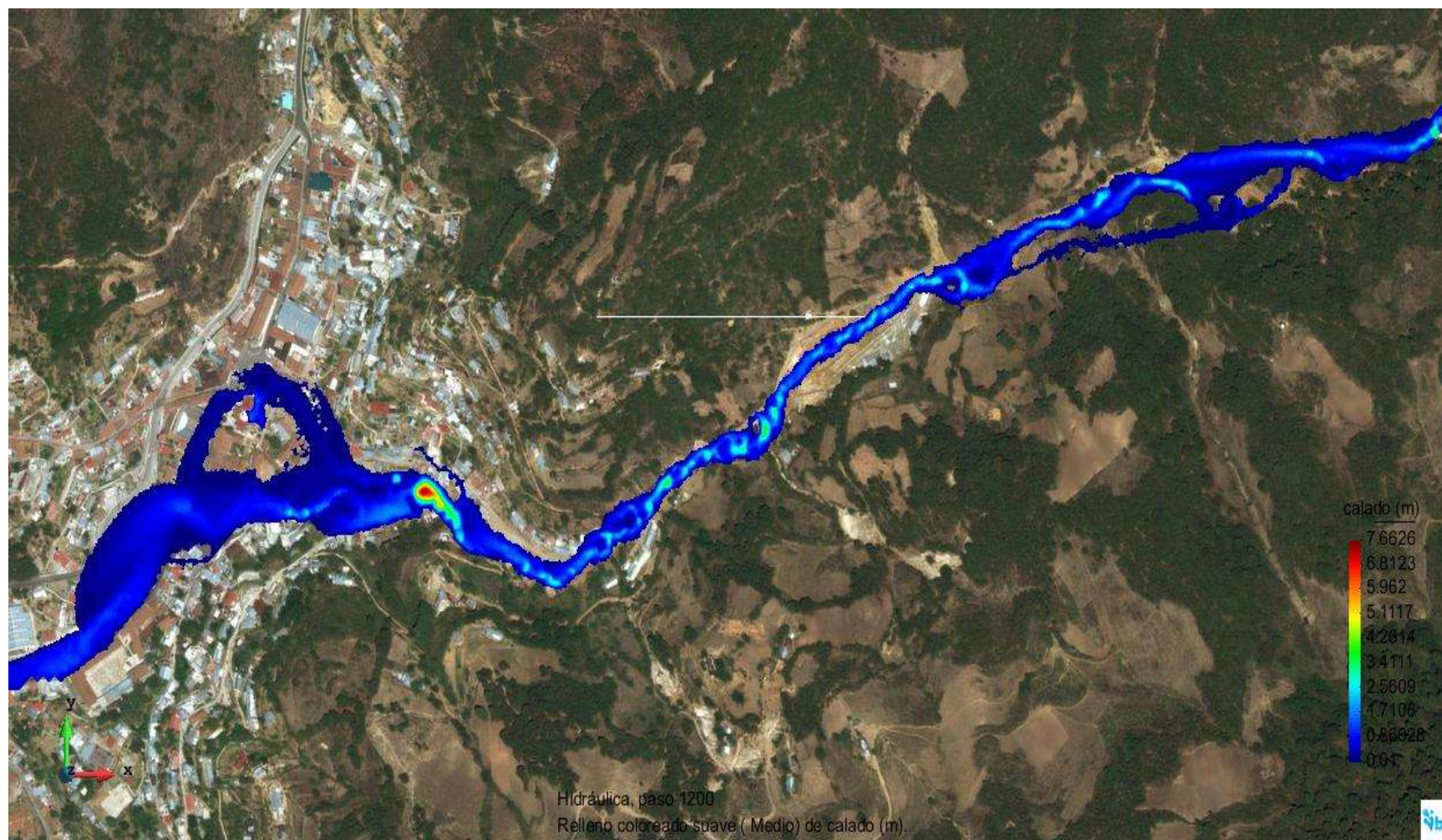


Figura 4.15.- Tirantes alcanzados en la simulación de flujo hiperconcentrado en el paso de tiempo 1200.

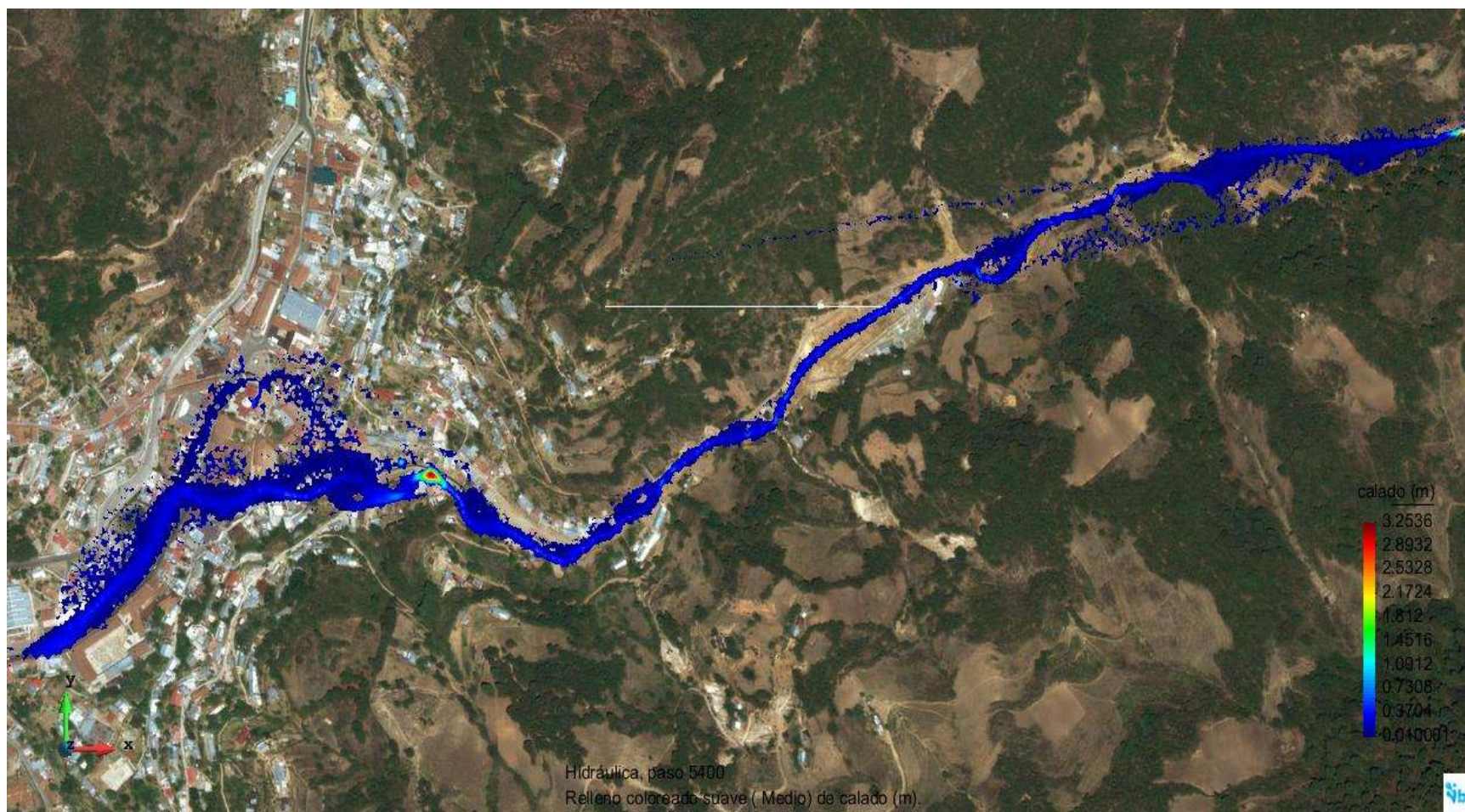


Figura 4.16.- Tirantes alcanzados en la simulación de flujo hiperconcentrado en el paso de tiempo 5400.

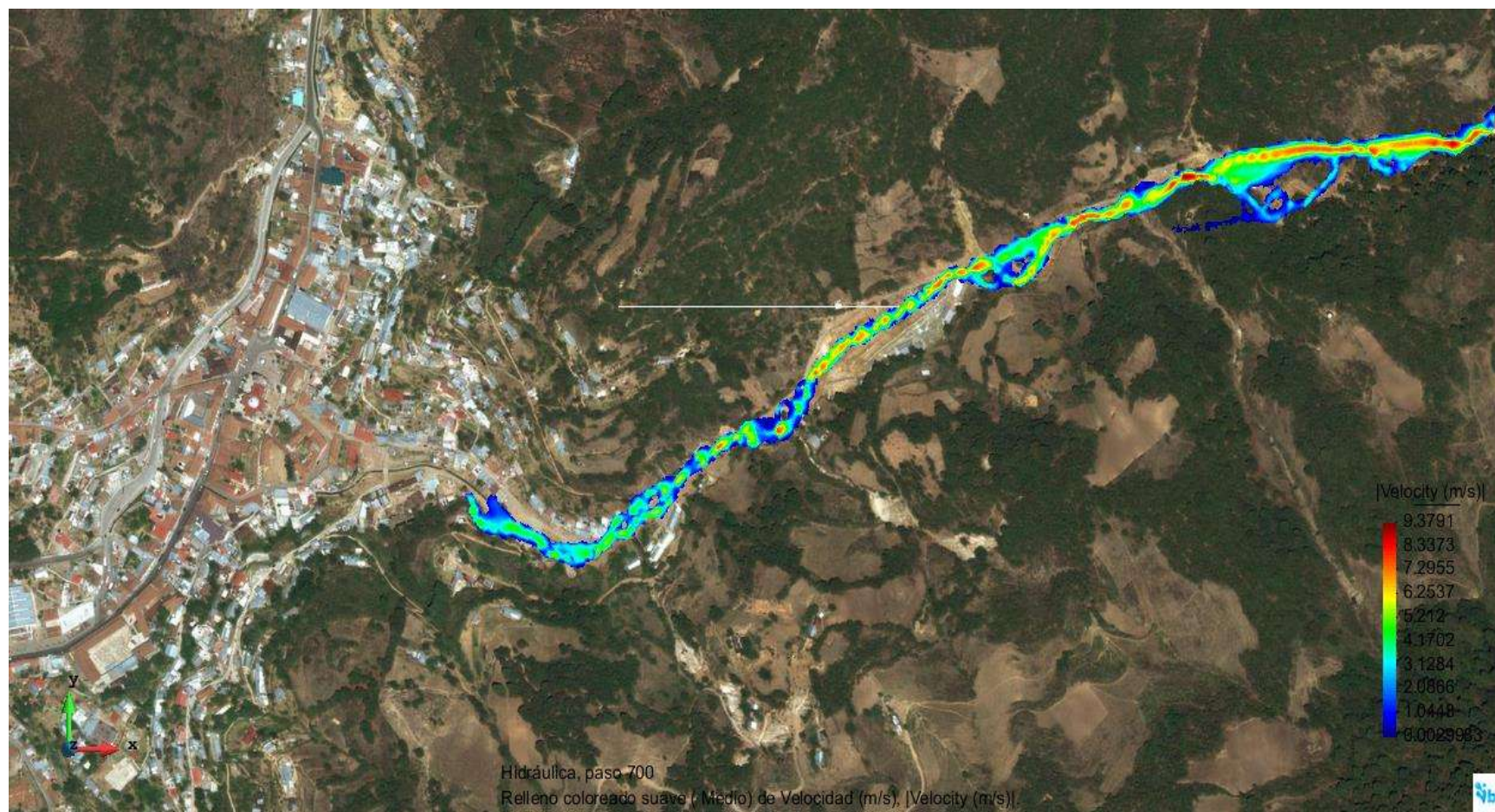


Figura 4.17.- Velocidades alcanzadas en la simulación de flujo hiperconcentrado en el paso de tiempo 700.

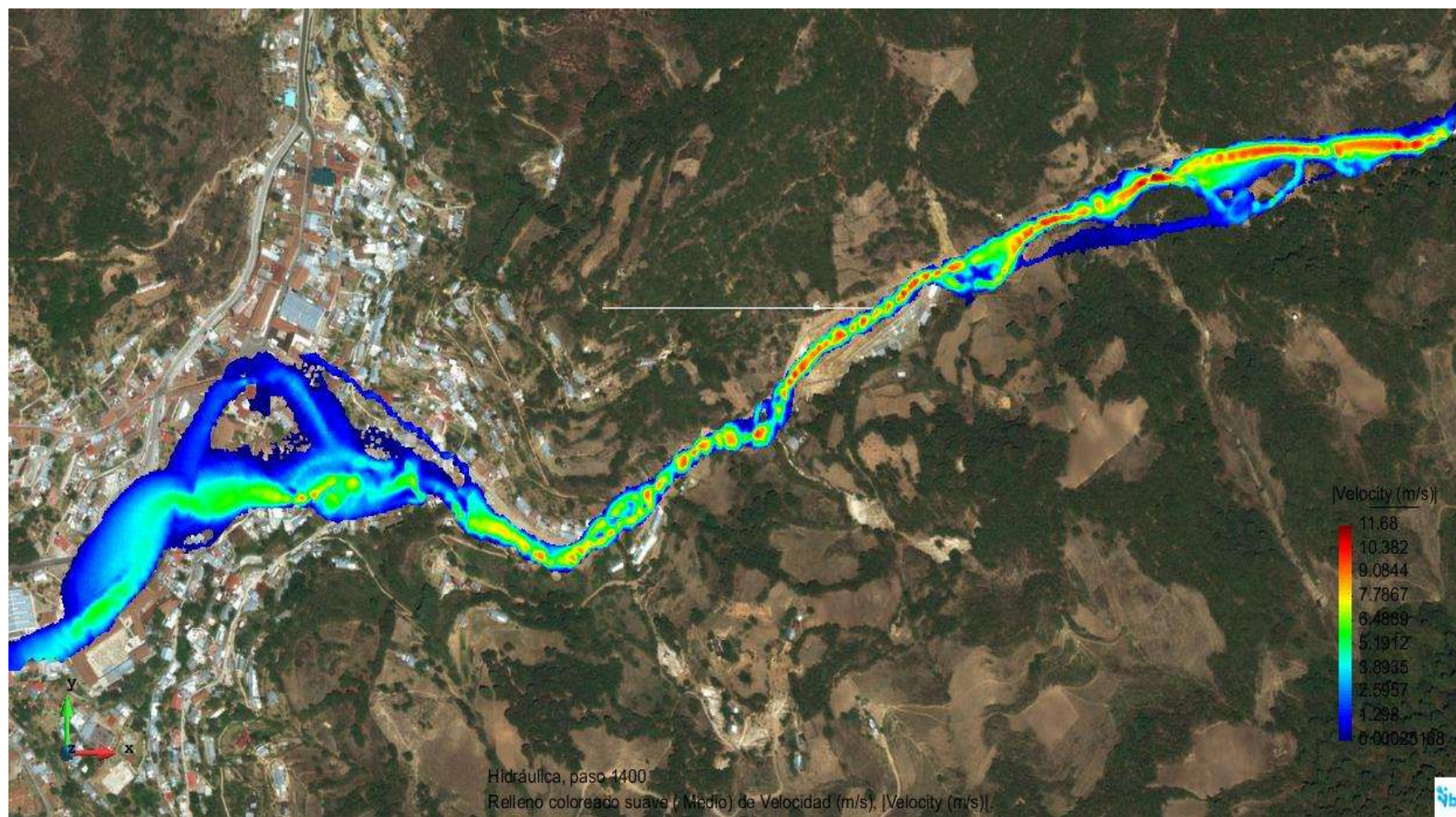


Figura 4.18.- Velocidades alcanzadas en la simulación de flujo hiperconcentrado en el paso de tiempo 1400.

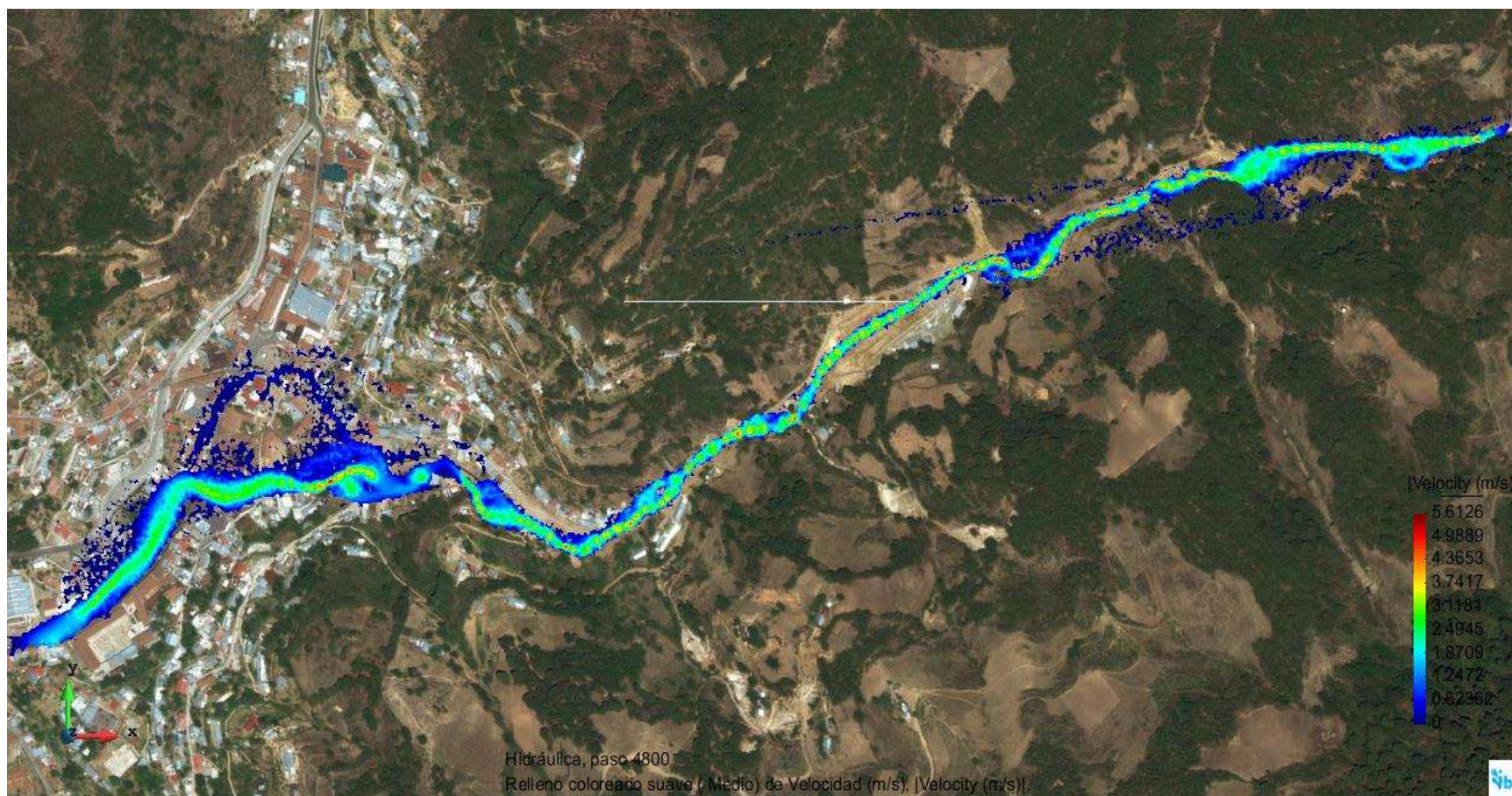


Figura 4.19.- Velocidades alcanzadas en la simulación de flujo hiperconcentrado en el paso de tiempo 4800.

CAPÍTULO 5

5.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.-Conclusiones

Para definir las ecuaciones gobernantes de flujo hiperconcentrado, y en general de flujos no newtonianos, es conveniente comenzar la formulación de manera análoga como se hace para flujos newtonianos, es decir, plantear hipótesis, por ejemplo, la del medio continuo, flujo incompresible, etc., de tal forma que nos permitan simplificar las ecuaciones del caso general de fluidos. La diferencia relevante en las ecuaciones que gobiernan a los flujos newtonianos y no newtonianos radica en el tensor de esfuerzos efectivos, el cual se modificará de acuerdo a las ecuaciones constitutivas planteadas para la relación de la tasa de deformación, o leyes reológicas, y las suposiciones realizadas.

Las diferencias finitas, a pesar de que es otro método utilizado para aproximar soluciones a las ecuaciones de flujo, se emplearon para facilitar la introducción a la metodología de cálculo empleada en la tesis; sin embargo, se optó por utilizar volúmenes finitos ya que estos surgen de leyes de conservación. La diferencia entre ambos métodos es que el primero aproxima derivadas situándose en los nodos sobre la malla del dominio, mientras que el segundo aproxima el valor de las variables conservadas tomando un promedio de las mismas en cada celda de la malla, en nuestro caso estas variables son tirantes y gastos.

El comportamiento de la superficie libre del agua y la velocidad del flujo obtenida mediante la resolución de las ecuaciones gobernantes con la metodología de volúmenes finitos reproduce cualitativamente bien el comportamiento del flujo.

Al comparar las características hidráulicas para flujos hiperconcentrados contra los flujos en condiciones de agua clara se nota un aumento significativo en la velocidad de la simulación de flujo para los primeros. No obstante, en ambos casos la respuesta de la velocidad de la onda del flujo en la microcuenca es rápida.

Un factor importante y que tiene que ver con la magnitud de los resultados es el denominado coeficiente de rugosidad de Manning. Se debe asegurar la calidad de su valor mediante trabajo de campo y experimental.

Otro elemento importante en la calidad de los resultados es el que tiene que ver con el mallado. Así, con malla densas se obtendrán mejores resultados que aquellas con menores elementos. Sin embargo, debemos tener presente que esto implica demasiado tiempo computacional.

El esquema numérico de solución planteado puede orientarse hacia el desarrollo de una herramienta que proporcione información acerca de las características de interés en el diseño y formulación de medidas de protección, prevención y mitigación.

5.2.-Recomendaciones

Sería deseable continuar con el proyecto de investigación hacia el desarrollo de una herramienta computacional mediante la elaboración de un código de programación que involucre la metodología planteada, además, de incorporar algunos de los modelos reológicos mencionados, o bien, implementar valores efectivos de las propiedades de los flujos, dichas opciones no están contenidas en el software utilizado.

Es conveniente también realizar una parametrización del flujo mediante trabajos de experimentación en laboratorio que proporcionen un conocimiento certero de la interacción del esfuerzo cortante con los flujos hiperconcentrados y que algunos investigadores vienen sugiriendo.

Con lo anterior se lograría comparar el modelo reológico de Takahashi y contar con un modelo más sencillo al establecer propiedades efectivas de la mezcla ya que, en el sentido estricto se tiene un flujo multifásico, y algunas propiedades, como la densidad, se toman como constantes a través de parámetros globales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Alavez, R. J., López, L. J., Hernández, L. J. L. & De la Fuente, V. D.** (2013). *Modelación matemática y computacional de una inundación de Villahermosa, Tabasco, México*. 1ª edición. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Tabasco, México. ISBN 978-607-606-122-0.
- [2] **Alcántara, A. I., Echavarría L. A., Gutiérrez M. C., Domínguez M. L. & Noriega R. I.** (2001). Inestabilidad de laderas. *Serie Fascículos*. SEGOB, CENAPRED.
- [3] **Alcrudo, F.** (1992). *Esquema de Alta Resolución de Variación Total Decreciente para el Estudio de Flujos Discontinuos de Superficie Libre*. Tesis Doctoral. España: Universidad de Zaragoza.
- [4] **Castillo, N. L. F.** (2006). *Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Perú. Lima, Perú 2006.
- [5] **Copons, L. R. & Tallada, M. A.** (2009). Movimiento de ladera (Landslides). *Enseñanza de las Ciencia de la Tierra*. (173) 284-294 ISSN: 1132-9157
- [6] **Fay, A. J.** (1996). *Mecánica de fluidos*. 1ª edición. CECSA, México. ISBN 0-262-06165-1.
- [7] **Figuerola, M. S.** (2013). *Estudio del peligro por flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas mediante simulación numérica en FLO-2D, caso de estudio: Anganguero, Mich.* (Tesis de Maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.
- [8] **González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C.** (2002). *Ingeniería geológica*. Prentice Hall. Madrid, España.
- [9] **Hungr O., Evans, S.G., Boris, M. & Hutchinson, J.N.** (2001). *Review of the classification of landslides of the flow type*. *Environmental and Engineering Geoscience*, VII (3):221-238
- [10] **IBER.** (2014). *Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas*. Manual de referencia hidráulico. Recuperado de: <http://iberaula.es/modelo-iber/descarga>
- [11] **Jan, C. D. & Shen, H. W.** (1997). *Review Dynamic Modeling of Debris Flows*. *Recent Developments on Debris Flows*, (93-116). Springer-Verlag, Berlin, Alemania.

- [12] **LeVeque, R. J.** (2007). *Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations*. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), Philadelphia.
- [13] **LeVeque, R. J.** (2002). *In Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*. Volume 31, Cambridge Texts in Applied Mathematics. Cambridge University Press.
- [14] **LeVeque, R. J.** (1992). *Numerical Methods for Conservation Laws*. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser.
- [15] **Li Lue, X.** (2002). *Deslizamientos de tierras y flujos de escombros en lluvias intensas*. TLÁLOC. AMH 25, 32-37.
- [16] **Melendo, A. and Coll, A. and Pasenau, M. and Escolano, E. and Monros, A** (2016). www.gidhome.com. Online; accessed Jun-2016., <http://www.gidhome.com>
- [17] **Moreles V. M. A. & Botello, R. S.** (2008). *Notas de Modelación y Métodos Numéricos II. La ecuación de advección-difusión-reacción en problemas hidrológicos*. CIMAT & CIMNE.
- [18] **O'Brien, J. & Julien, P.** (1988). *Laboratory Analysis of Mudflow properties*. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE 114, 8, 877-887.
- [19] **O'Brien, J. S.** (2006). *FLO-2D User's manual, version 2006.01*. Flo-2D Software. Inc., Nutrioso.
- [20] **Salas, S. M. A. & Jiménez, E. M.** (2004). *Informe técnico de la visita realizada al municipio de Coalcomán de Vázquez Pallares, Mich. Los días 10 a 12 de septiembre de 2003, para identificar su problemática de inundaciones y proponer algunas soluciones*. Recuperado de: [CENAPRED.http://www.cenapred.unam.mx/es/Transparencia/FAQ/SISI/Anexo8.2/04_21_DIRH_25112004.pdf](http://www.cenapred.unam.mx/es/Transparencia/FAQ/SISI/Anexo8.2/04_21_DIRH_25112004.pdf)
- [21] **Sánchez, M. M.** (2009). *Modelación de flujos de derrubios empleando el método SPH. Aplicación a casos reales*. (Tesis de Doctorado). Universidad Politécnica de Madrid, E. T. S. de ingenieros de caminos, canales y puertos. Madrid, España.
- [22] **Stancanelli, L. M., S. Lanzoni, and E. Foti** (2015). "Propagation and deposition of stony debris flows at channel confluences". *Water Resour. Res.*, 51,5100–5116, doi:10.1002/2015WR017116
- [23] **Streeter V. L** (1972). *Mecánica de los fluidos*. 4a Edición, McGraw-Hill. México.
- [24] **Takahashi T.** (1991). *Debris Flow*. International Association for Hydraulic Research (IAHR). A. A. Balkema. Rotterdam

- [25] **Takahashi T.** (1991). *Debris Flow*. International Association for Hydraulic Research (IAHR). A. A. Balkema. Rotterdam
- [26] **Varnes, D.J.** (1978). *Slope Movement: Types and Proceses*. In Scuster & Krizek, 1978: Landslides: Analysis and Control. Special report 176. Transportation Research Board, Comisión on Sociotechnical Systems, National Research Council. National Academy of Sciences, Washungton, D.C. 234 p.p.
- [27] **Vázquez, C. M. E.** (2014). *Introducción al método de volúmenes finitos*. Universidad de Santiago de Compostela, España.
- [28] **Vreugdenhil, B. C.** (1994). *Numerical methods for shallow-water flow*. Institute for Marine and Atmosfheric Research Utrecht (IMAU), Utrecht University. Utrecht, The Netherlands. ISBN 978-94-015-8354-1
- [29] **Wieczorek, G. F.** (1996). Landslide triggering mechanisms. *Landslides: Investigation and mitigation*, 247, 76-90.