

**Modelado del flujo del fenómeno de remoción de masas mediante un modelo analítico
bidimensional**

Trabajo de Grado para optar al título de Magister en Ingeniería Civil

Daniel Camilo Román Quintero

Director

Gustavo Chio Cho

Doctor en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Codirector

Jorge Alejandro Mendoza Rizo

Doctor en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería Civil

2019

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Dedicatoria

A Pricila Quintero y Celso Román, por su apoyo y confianza sin condición. A mi hermana, Mariana Monroy, porque representa la alegría y la esperanza de un mejor porvenir. A Beatríz Becerra, por su amor y cariño infinito.

En memoria de Ángela Ascanio, como fruto de su legado sobre la tierra.

Agradecimientos

Agradecimientos a los Profesores de la Escuela de Ingeniería Civil (UIS), a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (UIS) y a Colciencias. A los estudiantes de Ingeniería Civil Vinculados al estudio: Santiago Gómez, Edwar Merchán, Germán Remolina, Blass Troncoso, Daivy Prada, Eladio Silva y Mario Reyes. Y un agradecimeinto especial a los profesores: Gustavo Chio (Esc. Ing. Civil), Jorge Mendoza (Esc. Ing. Civil), Vladimir Merchán (Esc. Ing. Civil), Jader Guerrero (Esc. Física), quienes han sido un apoyo académico fundamental para el desarrollo del proyecto.

Tabla de contenido

Introducción.....	23
1. Objetivos.....	26
1.1. Objetivo general.....	26
1.2. Objetivos específicos	26
2. Marco teórico.....	27
2.1. Modelos empíricos.....	28
2.2. Modelos analíticos	31
2.2.1. Modelos de bloque o de masa concentrada.	32
2.2.2. Modelos bidimensionales.	35
2.2.3. Modelos de flujo tridimensional.....	40
2.3. Método de Volúmenes Finitos (MVF).....	48
3. Sistema de Ecuaciones Simplificado	54
4. Discretización de la ecuación de conservación de momentum lineal	57
5. Discretización de la ecuación de conservación de masa	62
6. Procedimiento de solución del sistema de ecuaciones	63
7. Análisis de sensibilidad	67
8. Campaña experimental	69
8.1. Materiales empleados	69
8.2. Diseño y ejecución del muestreo	70
8.3. Procesamiento de datos.....	72
8.4. Comparación con resultados numéricos	79
9. Caso de estudio: Deslizamiento en la vía Lebrija – Girón, Santander	85
9.1. Toma de datos en campo	87
9.2. Procesamiento de datos.....	88
9.3. Comparación con resultados numéricos	92
10. Conclusiones, comentarios y recomendaciones	98
Referencias bibliográficas	102
Anexo 1	107
Método de Jacobi.....	107
10. Anexo 2	108

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Discretización del término transitivo.....	108
Discretización del término convectivo	108
Discretización del término difusivo.....	111
Discretización del término fuente.....	112
Coeficientes del sistema	113
11. Anexo 3	115
Discretización de la ecuación de conservación de masa	115
12. Anexo 4	117
Ecuaciones especiales: Ecuación de conservación del momentum.....	117
Para $i = 1$	117
Para $i = 2$	118
Para $i = nn - 1$	120
Para $i = nn$	123
Ecuaciones especiales: Ecuación de conservación de la masa	123
$I = 1$	123
$I = nf$	124
Anexo 5	125
Variación de ϕ_{bed}	125
Variación de ϕ_{int}	126
Variación de μ	127
Variación de ρ	128
Variación de νf	129
Anexo 6	130
Especificaciones del canal	130
Sistema de adquisición de datos	136
a. Protocolo de carga y uso del canal para una unidad experimental	140
b. Muestreos S1 y S2	142
13. Anexo 7	149
Potencia de la prueba: aplicación en el muestreo S2.....	149
Tamaño de la muestra: muestreo S3.....	150
Anexo 8	155
Equipos para el levantamiento de eventos de deslizamiento.....	155

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Escáner láser terrestre	155
Levantamiento con Vehículo Autónomo No Tripulado	157
Clasificación del suelo	158
14. Anexo 9	160

Lista de figuras

Figura 1. Tipos de modelos desarrollados para el estudio del flujo de escombros	28
Figura 2. Método del ángulo de alcance para la predicción de la distancia de recorrido de un deslizamiento Fuente:Adaptado de (Finlay, Mostyn, & Fell, 1999)	29
Figura 3. Derivación gráfica de las ecuaciones de deslizamiento del bloque: a) Vista en perfil de la caída del bloque; b) Relaciones geométricas de la pendiente c) Diagrama de fuerzas	32
Figura 4. Esquema en 2D de una ola de material en estado dinámico deslizándose a lo largo de un plano inclinado.....	36
Figura 5. Esquema de volumen de control del flujo para la reología de materiales mixtos.	38
Figura 6. Corte isométrico esquemático de un material deslizante a lo largo de una pendiente curva donde se muestran las componentes de la velocidad y el espesor del deslizamiento (v_x , v_y , h)	42
Figura 7. Esquema general para la solución numérica de ecuaciones diferenciales	49
Figura 8. Discretización del dominio mediante celdas rectangulares: Representación de una malla escalonada.....	50
Figura 9. Detalle representativo de los flujos que llegan y abandonan su celda a través de las caras	51
Figura 10. Esquema para la discretización del dominio para el modelo completo	54
Figura 11. Esquema para la discretización del dominio para el modelo simplificado con la nomenclatura {P, E, W, WW} y {e, w}	57

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Figura 12. Esquema para la discretización del dominio para el modelo simplificado con la nomenclatura {P, E, W} y {e, w} empleada en el proceso de discretización de la ecuación de conservación de masa	62
Figura 13. Representación de la variación porcentual en $t = 0.5$ s y en $t = 1$ s	68
Figura 14. Representación de la variación de la semblanza 0.5 s y en $t = 1$ s.....	68
Figura 15. Tres materiales empleados en el muestreo S3: a) Material pétreo b) Partículas de cristal c) Partículas plásticas.....	70
Figura 16. Secuencia para el procesamiento de las imágenes del muestreo S3	73
Figura 17. Unidad experimental S3P1 en $t = 0$	74
Figura 18. Distribución de frecuencias de las intensidades de la imagen aislada en $t = 0$ s para S3P1.....	75
Figura 19. a) Imagen aislada para S3P1 en $t = 0$ s b) Imagen binarizada para S3P1 en $t = 0$ s	75
Figura 20. Distribución de alturas en el ensayo S3P1 en $t = 0.049$ s	77
Figura 21. Distribución de alturas promedio y su error típico para algunos tiempos en el bloque S3P1 – S3P15	78
Figura 22. Comparación numérica y experimental de la evolución de un evento de deslizamiento en el canal de flujo: Pre – Calibración	81
Figura 23. Calibración de los parámetros ϕ_{bed} y ϕ_{int}	82
Figura 24. Comparación del alcance experimental con: a. Modelo sin calibrar b. Modelo calibrado	82
Figura 25. Comparación numérica y experimental de la evolución de un evento de deslizamiento en el canal de flujo: Post – Calibración.....	83

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Figura 26. Desarrollo de la respuesta del modelo (alturas y velocidades) para el modelo calibrado	84
Figura 27. Deslizamiento en la vía Girón-Lebrija Fuente: (Silva Ardila & Reyes Chinchilla, 2018).....	86
Figura 28. Localización relativa en planta de las estaciones de medición y los puntos de toma de muestras	88
Figura 29. Ortomosaico del área de estudio con detalles de la vía existente Lebrija – Girón Fuente: (Silva Ardila & Reyes Chinchilla, 2018).....	89
Figura 30. Nube de puntos: a. Puntos únicamente b. Puntos con información de elevación c. Puntos con elevación y relieve d. puntos con relieve.....	90
Figura 31. Ubicación en planta y los perfiles obtenidos a partir de la nube de puntos	91
Figura 32. Hipótesis de deslizamiento del material en sus posiciones inicial y final.....	91
Figura 33. Dimensiones características del lugar donde se presentó el deslizamiento	92
Figura 34. Desplazamiento del frente del material en el deslizamiento	93
Figura 35. Espesores de material en las condiciones inicial y final para el deslizamiento de la vía Lebrija – Girón	94
Figura 36. Comparación de los estados inicial y final entre las profundidades reales y las simuladas mediante el modelo de deslizamiento en bloque	95
Figura 37. Comparación de los estados inicial y final entre las profundidades reales y las simuladas mediante el modelo de deslizamiento bidimensional	97
Figura 38. Comparación del estado final entre las profundidades reales y las simuladas mediante los modelos de deslizamiento en bloque y bidimensional	98
Figura 39. Extrapolación del nodo ‘WW’ para el valor de velocidad en función de los nodos internos	118

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Figura 40. Extrapolación del nodo ‘EE’ para el valor de velocidad en función de los nodos internos	121
Figura 41. Análisis de sensibilidad del modelo ante variaciones en el ángulo de fricción de la base	125
Figura 42. Análisis de sensibilidad del modelo ante variaciones en el ángulo de fricción interno	126
Figura 43. Análisis de sensibilidad del modelo ante variaciones en el coeficiente de viscosidad	127
Figura 44. Análisis de sensibilidad del modelo ante variaciones en la densidad de la mezcla	128
Figura 45. Análisis de sensibilidad del modelo ante variaciones en la porción de fluido..	129
Figura 46. Detalle de las piezas componentes del canal Collapses V1.0: A. Piezas 1 y 2, B. Piezas 3 y 4, C. Piezas 7 y 8, D. Piezas 5 y 6, E. Pieza 9, F. Pieza 10	131
Figura 47. Montaje general del canal Collapses V1.0 mediante la unión de las piezas de la Figura 46: A. Corte A – A de la parte C, B. Corte B – B de la parte C, C. Vista lateral del canal Collapses V1.0.....	133
Figura 48. Detalles del montaje del canal Collapses V1.0: A. Detalles de conexión entre el canal y los soportes, B. Esquema de detalle de montaje de la compuerta.....	134
Figura 49. Evolución del proceso de construcción del canal Collapses V1.0: A. Etapa 1 Montaje del canal Collapses V1.0, B. Recubrimiento de las piezas 2, 4 y 6 con vinilo negro, C.Aplicación de pintura en los soportes de aluminio, D. Instalación de marcas de gradación cada 5 cm	135
Figura 50. Distribución del montaje experimental: (A) en perfil y (B) En planta	136

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Figura 51. Algoritmo de adquisición de datos del sistema secundario para ensayos en el canal Collaptes	137
Figura 52. Disposición de los sensores del sistema secundario de adquisición de datos ...	138
Figura 53. Testigo para la calibración de las medidas de la cámara Guppy.....	139
Figura 54. Instrumentación del canal para captura de datos. 1. Sensor ultrasonido en la sección horizontal. 2. Sensor ultrasonido en la sección inclinada. 3. Cámara CCD y estación laser. 4. Motor, sensor óptico y compuerta de retención. Fuente: adaptado de (Remolina Reyes, 2018)	140
Figura 55. Proceso de apertura de la compuerta accionada por el motor eléctrico de 120 V en el ensayo S1P32.....	141
Figura 56. Proceso de movimiento en el ensayo S1P1 en los tiempos (en el orden descendiente) 0.258 s, 0.559 s, 0.903 s y 2.322 s	142
Figura 57. Materiales pétreos del 1 al 6 notados por las letras de la ‘A’ a la ‘F’ respectivamente	143
Figura 58. Materiales sintéticos 7 y 8 notados por las letras ‘A’ y ‘B’ respectivamente ...	143
Figura 59. Campanas de Gauss con las probabilidades de error tipo 1 (α) y tipo 2 (β)	150
Figura 60. Clasificación del suelo según la carta de plasticidad de Casagrande Fuente: (Silva Ardila & Reyes Chinchilla, 2018)	159

Lista de tablas

Tabla 1. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de ‘u’ en el nodo $i = \{3, 4, \dots, nn - 3, nn - 2\}$ (a).....	60
Tabla 2. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de ‘u’ en el nodo $i = \{3, 4, \dots, nn - 3, nn - 2\}$ (b).....	60
Tabla 3. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de ‘u’ en el nodo $i = 1 \dots 60$	
Tabla 4. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de ‘u’ en el nodo $i = 2$ (a)	61
Tabla 5. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de ‘u’ en el nodo $i = 2$ (b)	61
Tabla 6. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de ‘u’ en el nodo $i = nn - 1$ (a).....	61
Tabla 7. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de ‘u’ en el nodo $i = nn - 1$ (b)	61
Tabla 8. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de ‘u’ en el nodo $i = nn$.	62
Tabla 9. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de ‘h’ en el nodo $I = \{2, 3, \dots, nf - 2, nf - 1\}$ (a)	63
Tabla 10. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de ‘h’ en el nodo $I = 1$.	63
Tabla 11. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de ‘h’ en el nodo $I = nf$.	63
Tabla 12. Parámetros numéricos para construir el modelo para el análisis de sensibilidad.	67
Tabla 13. Parámetros físicos base para el análisis de sensibilidad	68
Tabla 14. Propiedades generales de los materiales empleados en el muestreo S3.....	70
Tabla 15. Arreglo de las réplicas para el tercer muestreo (S3).....	71

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Tabla 16. Parámetros numéricos para el modelo bidimensional que simula los ensayos S3P1 – S3P15.....	79
Tabla 17. Parámetros físicos de entrada para el modelo de deslizamiento bidimensional...	80
Tabla 18. Parámetros físicos para el modelo de deslizamiento en bloque	95
Tabla 19. Parámetros físicos de entrada para el modelo de deslizamiento bidimensional...	96
Tabla 20. Parámetros numéricos para la simulación mediante el modelo bidimensional....	97
Tabla 21. Detalles y dimensiones de cada una de las piezas mostradas en la Figura 46....	132
Tabla 22. Características técnicas de la cámara Guppy.....	139
Tabla 23. Propiedades de los materiales empleados para los ensayos en el canal Collapses	143
Tabla 24. Configuración de los 32 ensayos del primer muestreo ‘S1’	145
Tabla 25. Arreglo de las réplicas para el segundo muestreo (S2)	147
Tabla 26. Parámetros estadísticos para el cálculo del tamaño de la muestra	151
Tabla 27. Datos promedio y desviación estándar de las variable VMF derivados de la campaña experimental S2 Fuente: Adaptado de (Roman, 2017)	152
Tabla 28. Datos promedio y desviación estándar de las variable VMF derivados de la campaña experimental S2 Fuente: Adaptado de (Roman, 2017)	153
Tabla 29. Especificaciones técnicas del escáner láser terrestre usado en el levantamiento del deslizamiento Lebrija - Girón.....	156
Tabla 30. Especificaciones técnicas del VANT usado en el levantamiento del deslizamiento Lebrija - Girón	157
Tabla 31. Límites de Atterberg para la clasificación del suelo del deslizamiento Lebrija – Girón. Fuente:(Silva Ardila & Reyes Chinchilla, 2018)	159

Lista de Ecuaciones

Ecuación (2.1).....	30
Ecuación (2.2).....	33
Ecuación (2.3).....	34
Ecuación (2.4).....	36
Ecuación (2.5).....	36
Ecuación (2.6).....	37
Ecuación (2.7).....	38
Ecuación (2.8).....	38
Ecuación (2.9).....	39
Ecuación (2.10).....	39
Ecuación (2.11).....	39
Ecuación (2.12).....	44
Ecuación (2.13).....	44
Ecuación (2.14).....	45
Ecuación (2.15).....	45
Ecuación (2.16).....	45
Ecuación (2.17).....	46
Ecuación (2.18).....	46
Ecuación (2.19).....	52
Ecuación (2.20).....	52
Ecuación (2.21).....	52
Ecuación (2.22).....	52
Ecuación (2.23).....	53

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Ecuación (3.1).....	54
Ecuación (3.2).....	55
Ecuación (3.3).....	55
Ecuación (3.4).....	55
Ecuación (3.5).....	56
Ecuación (3.6).....	56
Ecuación (3.7).....	56
Ecuación (4.1).....	59
Ecuación (4.2).....	59
Ecuación (5.1).....	62
Ecuación (9.1).....	94
Ecuación (10.1).....	108
Ecuación (10.2).....	109
Ecuación (10.3).....	109
Ecuación (10.4).....	109
Ecuación (10.5).....	109
Ecuación (10.6).....	109
Ecuación (10.7).....	110
Ecuación (10.8).....	110
Ecuación (10.9).....	110
Ecuación (10.10).....	110
Ecuación (10.11).....	111
Ecuación (10.12).....	111
Ecuación (10.13).....	111

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Ecuación (10.14).....	112
Ecuación (10.15).....	112
Ecuación (10.16).....	112
Ecuación (10.17).....	113
Ecuación (10.18).....	113
Ecuación (10.19).....	114
Ecuación (10.20).....	114
Ecuación (10.21).....	114
Ecuación (10.22).....	114
Ecuación (10.23).....	114
Ecuación (10.24).....	114
Ecuación (11.1).....	115
Ecuación (11.2).....	115
Ecuación (11.3).....	116
Ecuación (12.1).....	117
Ecuación (12.2).....	117
Ecuación (12.3).....	117
Ecuación (12.4).....	117
Ecuación (12.5).....	117
Ecuación (12.6).....	117
Ecuación (12.7).....	118
Ecuación (12.8).....	119
Ecuación (12.9).....	119
Ecuación (12.10).....	120

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Ecuación (12.11).....	120
Ecuación (12.12).....	120
Ecuación (12.13).....	120
Ecuación (12.14).....	120
Ecuación (12.15).....	120
Ecuación (12.16).....	121
Ecuación (12.17).....	121
Ecuación (12.18).....	122
Ecuación (12.19).....	122
Ecuación (12.20).....	122
Ecuación (12.21).....	122
Ecuación (12.22).....	122
Ecuación (12.23).....	122
Ecuación (12.24).....	122
Ecuación (12.25).....	123
Ecuación (12.26).....	123
Ecuación (12.27).....	123
Ecuación (12.28).....	123
Ecuación (12.29).....	123
Ecuación (12.30).....	123
Ecuación (12.31).....	123
Ecuación (12.32).....	124
Ecuación (12.33).....	124
Ecuación (13.1).....	149

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Ecuación (13.2).....	149
Ecuación (13.3).....	152
Ecuación (14.1).....	160
Ecuación (14.2).....	160
Ecuación (14.3).....	160
Ecuación (14.4).....	160

RESUMEN

TÍTULO: MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS
MEDIANTE UN MODELO ANALÍTICO BIDIMENSIONAL*

AUTOR: DANIEL CAMILO ROMÁN QUINTERO**

PALABRAS CLAVE: DESLIZAMIENTO DE TIERRA; FLUJO DE ESCOMBROS,
ÁNGULO DE FRICCIÓN, LÍNEA DE ENERGÍA, MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS

DESCRIPCIÓN:

El presente estudio propone la solución numérica de un modelo de flujo de escombros en dos dimensiones mediante el Método de Volúmenes Finitos. Se usan esquemas de discretización cuadráticos y de Diferencias Centrales para discretizar los términos de la ecuación de conservación del momentum lineal, así como también los términos de la ecuación de conservación de la masa. También se lleva a cabo una campaña experimental en un canal que permite el análisis del flujo de un material granular, empleando técnicas de adquisición y procesamiento de imágenes. Con los datos obtenidos de la campaña experimental, se hace una comparación mediante la simulación numérica del flujo y se lleva a cabo un proceso de calibración del modelo numérico. Adicionalmente se muestra un caso de estudio de un evento de flujo de escombros ocurrido en el municipio de Girón, Santander. En el estudio se realizaron levantamientos topográficos con Vehículo Aéreo No Tripulado y con Escáner Láser Terrestre, cuyos datos se procesaron para simular la superficie de flujo del material. Finalmente se compara la respuesta numérica tras simular el caso de estudio con dos modelos; mediante un modelo 1D y mediante el modelo 2D aquí mencionado.

* Trabajo de grado de Maestría

** Facultad de ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Gustavo Chio Cho, Doctor en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Codirector: Jorge Alejandro Mendoza Rizo, Doctor en Ingeniería Civil

ABSTRACT

TITLE: MASS REMOVAL FLOW MODELLING THROUGH AN ANALYTICAL
BIDIMENSIONAL MODEL *

AUTHOR: DANIEL CAMILO ROMÁN QUINTERO **

KEY WORDS: LANDSLIDE, DEBRIS FLOW, FRICTION ANGLE, ENERGY LINE,
FINITE VOLUMEN METHOD

DESCRIPTION:

This study aims to show the numerical solution of a bidimensional Debris Flow model throughout the Finite Volume Method. The terms in the continuity and linear momentum conservation equations (*i.e.* Convection and Diffusion) are approached by Central Differencing and quadratic schemes. It is also carried out an experimental campaign in a channel that allows the analysis of the flow of a granular material, using image acquisition and image processing techniques. With the data of the experimental campaign a comparison is made by means of the numerical simulation of the flow and a process of calibration of the numerical model is carried out. Additionally, it is shown a case study of a debris flow event occurred in the municipality of Girón, Santander. In the study, topographic surveys were carried out with an Unmanned Aerial Vehicle and with a Terrestrial Laser Scanner, which data has been processed to simulate the surface bed of the material flow. Finally, the numerical simulation in the case study is compared with two models, using a 1D model and using the 2D model mentioned here.

* MSc. Thesis

** Facultad de ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Gustavo Chio Cho, Doctor en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Codirector: Jorge Alejandro Mendoza Rizo, Doctor en Ingeniería Civil

Introducción

El desprendimiento de laderas o taludes es un problema histórico, y en el departamento de Santander, evidentemente, ha generado pérdidas cuantiosas desde todo punto de vista; por ejemplo, en la temporada invernal del 2010 la capital del departamento se vio incomunicada por vía terrestre a causa de la falla de taludes aledaños a las carreteras de acceso. En el análisis de la gestión del riesgo de desastres como aporte para la construcción de políticas públicas en el país, realizado en 2012, se determinó que excluyendo los daños debido a la erupción del volcán Nevado del Ruiz en 1985, los mayores porcentajes de pérdidas de vidas en el período de 1970 a 2011 fueron generadas por deslizamientos (Banco Mundial, 2012). Debido a la aparente incertidumbre en la ocurrencia del fenómeno natural, se ha hecho necesario el estudio riguroso del comportamiento de dicho fenómeno. Una de las manifestaciones del fenómeno de remoción de masas es el flujo de escombros, lo que incluye flujos como avalanchas, lahares y flujos de lodos, entre otros. Una forma de mitigar estos desastres es condicionar el uso del suelo evitando construir en sectores de amenaza alta. Por tal razón lo que se plantea en materia de investigación se ciñe (dado que existen zonas habitadas en condición de vulnerabilidad) a las herramientas existentes que permiten la predicción de la distancia de recorrido y la velocidad los movimientos en masa (que naturalmente se encuentran activos) tipo flujo que se desplazan a altas velocidades, con tamaños de volumen que van de menor a mediano (Suárez, 1998), y que cuya secuencia pueda ser progresiva o pueda ampliarse o alargarse según sea el caso de estudio. En síntesis, la presente investigación busca dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿Cuál es el alcance y la velocidad de la masa de tierra, lodos o flujo de escombros que se desliza por una ladera?

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

La pregunta planteada anteriormente ha percolado en las sociedades científicas alrededor del mundo y se ha intentado responder dicha pregunta con diversos propósitos, uno de ellos es la estimación de la amenaza y la vulnerabilidad ante el fenómeno en estudio; esto lo vemos de manera evidente en la '*Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa*' del Servicio Geológico Colombiano. En dicha guía, por ejemplo, se plantea que la velocidad de flujo se puede calcular por medio de un modelo de deslizamiento en bloque con la fricción de Coulomb como única fuerza resistiva. Como se evidencia en la sección 2.2.1 del presente documento, este modelo de deslizamiento en bloque data del año 1932 y su derivación es bastante simple, por lo cual se ha hecho necesaria y pertinente la investigación de otros modelos que pronostiquen la velocidad y de más parámetros cinemáticos del flujo del fenómeno. Uno de los modelos más novedosos es el modelo de Iverson y Denlinger (2001), el cual se basa en teorías desarrolladas más recientemente. Por lo cual la pregunta planteada anteriormente sufriría la siguiente mutación: ¿cuál es el alcance y la velocidad de la masa de tierra, lodos o escombros que se desliza por una ladera al ser calculado por medio de un modelo de deslizamiento en bloque respecto a un modelo de deslizamiento más complejo? y ¿cuál sería la diferencia en las respuestas en comparación con un caso de estudio real? Lo que se hipotetiza es que la respuesta obtenida mediante un modelo de deslizamiento más complejo tendrá mejores ajustes a la realidad, mientras que el modelo de deslizamiento en bloque sobreestimaré las variables de respuesta.

Por lo mencionado anteriormente, es importante la generación de herramientas aplicables que permitan la obtención de las variables cinemáticas de los deslizamientos. En aras de alcanzar dicho objeto, se requieren metodologías de evaluación de amenaza que incluyan modelos matemáticos confiables que predigan los efectos de las avalanchas de media y alta

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

velocidad. Por esta razón esta investigación tiene como propósito la evaluación de la respuesta de los modelos matemáticos utilizados para predecir velocidades, profundidades y distancias de recorrido del fenómeno de remoción de masas, a partir de la generación de herramientas computacionales para realizar las evaluaciones correspondientes y el estudio de casos físicos para comparar los modelos matemáticos con datos cercanos a la realidad.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Modelar el fenómeno de remoción de masas mediante el modelo de Iverson y Denlinger del 2001, modificado para flujo en dos dimensiones, aplicando el Método de Volúmenes Finitos para la simulación del alcance, el espesor y la velocidad de la masa deslizante en un caso de estudio, y así poder evaluar su precisión en comparación con el modelo de deslizamiento en bloque propuesto por la Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa del Servicio Geológico Colombiano.

1.2. Objetivos específicos

Desarrollar la solución del modelo de flujo bidimensional del fenómeno de remoción de masas a partir del modelo propuesto Iverson y Denlinger en el 2001, mediante el Método de Volúmenes Finitos.

Comparar la profundidad estimada por el modelo teórico de flujo tridimensional de Iverson y Denlinger de 2001, aplicado en 2D, empleando los datos experimentales de una campaña realizada en el canal de flujo Collapses V1.0 desarrollado por el grupo INME de la escuela de Ingeniería Civil de la UIS.

Evaluar la precisión de la distancia de recorrido de un movimiento en masa calculado mediante el modelo de flujo tridimensional propuesto por Iverson y Denlinger en 2001,

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

aplicado en 2D, tomando como referencia el valor real registrado del levantamiento de un caso de estudio, y compararlo con la distancia obtenida mediante el modelo de deslizamiento en bloque presentado en la Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa del Servicio Geológico Colombiano.

2. Marco teórico

El proceso de búsqueda de información mediante la revisión en la literatura existente sobre el modelado del flujo de escombros (específicamente en los modelos enfocados en la estimación de los mecanismos de movimiento, como distancia de recorrido y velocidad de la masa deslizante) permite evidenciar las orientaciones acerca de la investigación del tema en cuestión, y con base en dicha literatura se pueden clasificar los métodos o modelos empleados en el estudio de la dinámica de avalanchas como modelos analíticos y modelos empíricos, como se aprecia en la Figura 1 (Hung, Corominas, & Eberhardt, 2005).

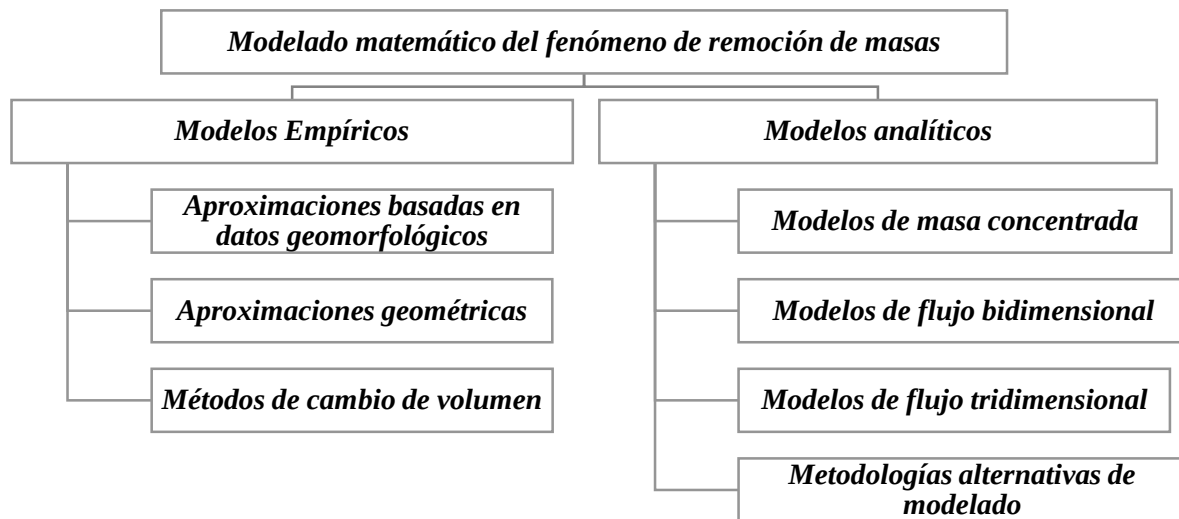


Figura 1. Tipos de modelos desarrollados para el estudio del flujo de escombros

2.1. Modelos empíricos

Los métodos empíricos son una herramienta sencilla, relativamente fácil de utilizar y se encuentran clasificados básicamente en tres grupos: primero están aquellos basados en la geomorfología, segundo aquellos métodos basados en aproximaciones geométricas y finalmente los métodos de cambio de volumen (Hungr et al., 2005).

En primer lugar, los métodos de evaluación geomorfológica utilizan la fotogrametría y el análisis geológico en campo como herramientas principales para evaluar posibles deslizamientos para estimar el depósito final de los escombros (Hungr et al., 2005). Básicamente se trata de hallar las máximas distancias que han recorrido los deslizamientos en ciertas zonas durante varios miles de años a partir de características como la litología, la presencia de diaclasas, y factores erosivos; de tal manera se obtienen los lineamientos para

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

la delimitación del recorrido máximo para avalanchas potencialmente catastróficas. El método de evaluación de la susceptibilidad ante movimientos en masa propuesto por el Servicio Geológico Colombiano presenta un sincretismo entre varias técnicas; entre las que se emplean técnicas cuantitativas y semicuantitativas como la clasificación heurística por un panel de expertos (IDEAM, 2012), todo con el fin de construir mapas con códigos de colores, mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica, para clasificar la susceptibilidad ante deslizamientos de tierra (Ávila et al., 2015).

En segundo lugar, los métodos geométricos se enfocan en hallar la distancia total de viaje ‘L’ definida como la proyección horizontal de la línea que une la parte más alta del deslizamiento con su parte más externa, como se puede observar en la Figura 2, cuyo ángulo formado entre la línea nombrada anteriormente y la proyección entre el pie del deslizamiento y la corona se denomina *Fahrböschung* (según Albert Heim en 1932) o ángulo de alcance (Corominas, 1996).

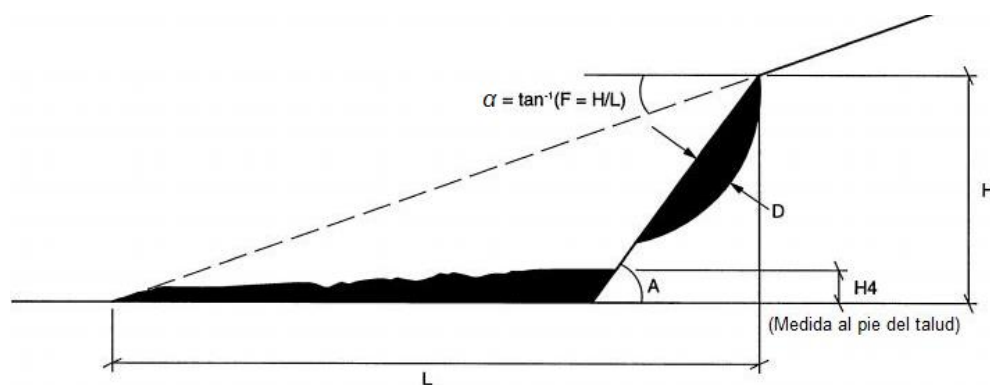


Figura 2. Método del ángulo de alcance para la predicción de la distancia de recorrido de un deslizamiento

Fuente: Adaptado de (Finlay, Mostyn, & Fell, 1999)

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Teóricamente si se tiene una vista en perfil de la masa que se desliza como la mostrada en la Figura 2, se conoce la altura relativa (H) y el *ángulo de alcance* α , la distancia recorrida se puede expresar como $L = H/\tan \alpha$ pero en la práctica no se conocen de antemano tales variables, sobre todo el ángulo de alcance; con base en ello, Scheidegger propuso por primera vez una correlación empírica que relaciona el ángulo de fricción con el volumen del deslizamiento; Scheidegger encuentra que existe una relación entre el logaritmo del volumen desencadenado y el logaritmo del coeficiente de fricción para deslizamientos de tierra catastróficos (Scheidegger, 1973). Tal correlación fue propuesta como una relación logarítmica de la forma expresada en la ecuación (2.1).

$$\log(\tan(\phi)) = A + B * \log(V) \quad (2.1)$$

Donde A y B son los coeficientes de correlación, ϕ es el ángulo de fricción entre el material y la superficie de deslizamiento y V es el volumen del deslizamiento expresado en 10^3 m^3 . Scheidegger en 1973 dio los valores para $A=0.624$ y $B=0.157$ (Scheidegger, 1973). En ese orden de ideas, Corominas realiza varias correlaciones con datos más confiables y exactos, teniendo en cuenta diferentes tipos de deslizamientos y sus trayectorias (Corominas, 1996). A su vez Finlay et al (1999) emplean un método que correlaciona el volumen del deslizamiento y la distancia recorrida L , además de su ancho y el ángulo de la pendiente con el tipo de deslizamiento (Finlay et al., 1999). Tales métodos solo son funcionales cuando los deslizamientos son pequeños o cuando los escombros discurren sobre superficies aproximadamente horizontales, y existe una discusión sobre la dependencia entre el volumen del deslizamiento y su ángulo de alcance (Hung et al., 2005).

Finalmente, los modelos de cambio de volumen nacen como una herramienta de predicción empírica de la distancia de viaje de los deslizamientos de tierra, por ejemplo, para estudios puntuales de mapeo de la amenaza ante deslizamientos en Hawái, realizados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos. Una de las referencias tempranas de esta filosofía de solución para la estimación empírica fue propuesta en 1993 por S. H. Cannon (Fannin & Wise, 2001), donde se presenta un modelo estadístico para estimar la distancia de recorrido analizando la variación del volumen a lo largo de la ruta. Es decir. En síntesis, en el modelo Cannon (1993), se realizan relaciones estadísticas de análisis multivariado, cuyo producto son ecuaciones de regresión multilíneal que incluyen variables que describen la ruta de viaje de la masa como el ángulo de la pendiente, el radio de curvatura del lecho, entre otras (Fannin & Wise, 2001).

2.2. Modelos analíticos

Los modelos analíticos para el estudio del fenómeno de flujo de escombros se basan en leyes físicas desarrolladas, fundamentalmente, dentro de dos paradigmas: el de la mecánica clásica y el de la mecánica de medios continuos, brindando la posibilidad de entender las relaciones existentes entre las variables involucradas, es decir que se puede alcanzar un entendimiento físico más profundo del tema analizado, con relación a los métodos empíricos introducidos en la sección 2.1.

2.2.1. Modelos de bloque o de masa concentrada. Los modelos de bloque o de masa concentrada son las primeras aproximaciones a la explicación del fenómeno. Son modelos físicos basados en la mecánica clásica que consideran a los deslizamientos de tierra como cuerpos rígidos cuya masa se concentra en el centro de masa. Se basan en el principio de conservación del momentum lineal, derivado de la segunda ley del movimiento Newton y del principio de trabajo, para idealizar el fenómeno como un bloque que se desliza a lo largo de una ruta como se observa en la Figura 3a, aunque en la práctica es definida como un plano inclinado.

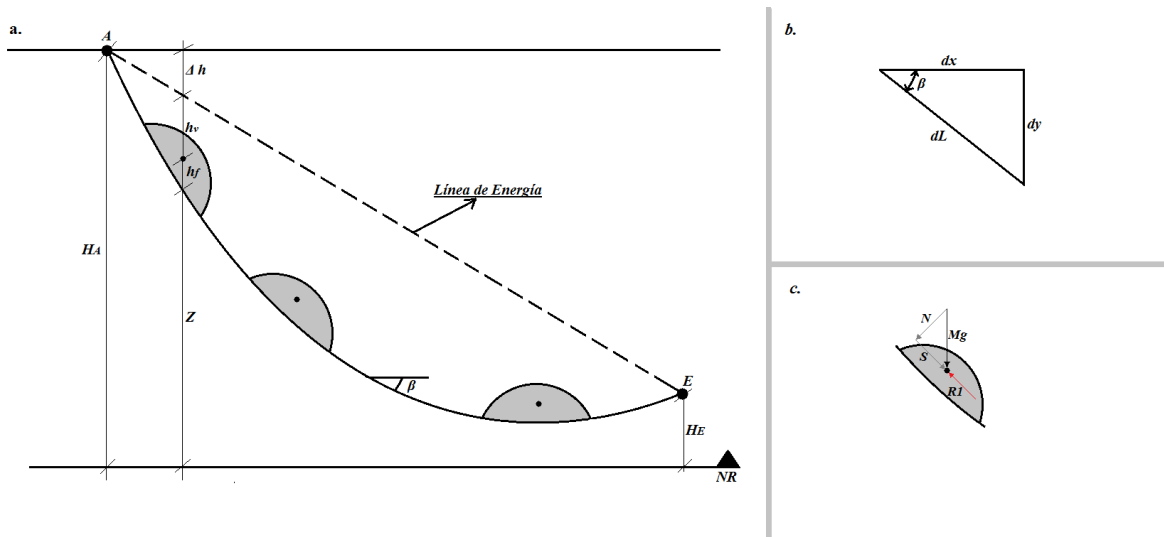


Figura 3. Derivación gráfica de las ecuaciones de deslizamiento del bloque: a) Vista en perfil de la caída del bloque; b) Relaciones geométricas de la pendiente c) Diagrama de fuerzas

Fuente: (Román & Ruiz, 2015)

Los físicos E. Müller-Bernet y Albert Heim presentan el primer modelo de deslizamiento en bloque registrado. Éste es un modelo uniparamétrico lo que quiere decir que considera que un solo parámetro aporta al término resistivo, y mediante el teorema de trabajo y energía cinética, utiliza un bloque de masa m que se desliza sobre una trayectoria cualquiera, con

ángulo de pendiente β y con fricción de Coulomb constante cuyo ángulo se denota con la letra ϕ (Hung et al., 2005). Dado que teóricamente las únicas fuerzas que generan trabajo son aquellas que tienen dirección paralela al desplazamiento, la ecuación que modela el cambio de energía cinética por unidad de longitud se expresa mediante la ecuación (2.2).

$$d\left(\frac{mv^2}{2}\right) = mg(\sin \beta - \cos \beta \tan \phi)dL \quad (2.2)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad, β es la inclinación del plano de flujo, dL es el elemento diferencial de longitud de la ruta de deslizamiento, ϕ es el ángulo de fricción entre el bloque y el plano de deslizamiento y, por lo tanto, $\tan \phi$ es el coeficiente de fricción de Coulomb.

Por otra parte, Voellmy (1955) propuso un modelo biparamétrico, es decir, agregar otra fuerza resistiva no conservativa al modelo de deslizamiento en bloque; un esfuerzo basal entre la masa deslizante y la superficie de flujo, dependiente directamente del cuadrado de la velocidad e inverso a un parámetro de turbulencia y al espesor de flujo (Voellmy, 1955). El término ξ , que es el parámetro de turbulencia introducido por Voellmy, aparece comúnmente en presencia de presión de poros, por lo que aplicando el principio de esfuerzo efectivo se obtiene el ángulo de fricción modificado ϕ_b de la siguiente expresión: $\tan \phi_b = (1 - r_u) \tan \phi$ (Hung et al., 2005), donde r_u es el coeficiente de presión de poros usado en la mecánica de suelos. Finalmente, sumando la componente de la fuerza de la gravedad paralela al deslizamiento e introduciendo la reología de Voellmy, la ecuación (2.2) se transforma en la ecuación (2.3).

$$d\left(\frac{mv^2}{2}\right) = mg\left(\sin\beta - \tan\phi_b - \frac{v^2}{h\xi}\right)dL \quad (2.3)$$

Donde m es la masa del deslizamiento, v es la velocidad, g es la aceleración de la gravedad, β es la inclinación del plano de flujo, ϕ_b es el ángulo de fricción modificado, h es la profundidad del flujo, ξ es el parámetro de turbulencia propuesto por Voellmy (1955) y dL es el elemento diferencial de longitud de la ruta de deslizamiento (ver Figura 3b).

Según algunos autores, con este tipo de modelos se pueden simular eventos de flujo en los que el bloque se conforma por granos del mismo tamaño (Pirulli, 2005). Hay que tener en cuenta, que los valores de alcance y velocidad que se pueden encontrar con el modelo de bloque durante deslizamientos y avalanchas son en teoría mucho más altos que los que en realidad ocurren (Körner, 1976), esto se debe a la simplicidad del modelo. Sin embargo, los modelos de deslizamiento en bloque presentan cierta utilidad práctica dada su sencillez. Por ejemplo, en la guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano, en el apartado del cálculo de la intensidad de los movimientos en masa, emplean el modelo de trineo considerando que el deslizamiento discurre a lo largo de un plano inclinado (Ávila et al., 2015).

2.2.2. Modelos bidimensionales. Los modelos de flujo en dos y tres dimensiones se basan en la teoría de la mecánica de medios continuos para su formulación y hacen uso de las ecuaciones de Navier – Stokes (conservación de masa y momentum lineal específicamente) para modelar el transporte del material por el dominio del problema. A partir de ello, dichos modelos se diversifican de amplias maneras. Es usual que algunos modelos bidimensionales empleen sistemas cartesianos de referencia (locales) y eliminen una de las componentes de flujo, generalmente la componente perpendicular a la dirección de flujo principal. Dicho proceso se denomina ponderación en profundidad y se lleva a cabo mediante la integración del efecto que tiene dicha componente sobre las otras, con lo que se obtienen respuestas de velocidad ponderadas. Éste es el caso del modelo propuesto por Savage y Hutter (1989), el cual introdujo una tensión tangencial interna no hidrostática basado en que la masa que fluye es friccional, controlada por un ángulo de fricción interno y está sometida a deformación plástica de acuerdo con la teoría de Rankine. Savage y Hutter (1989) describen un modelo para predecir el flujo de una masa inicialmente en reposo de material no cohesivo a lo largo de una trayectoria curva. Emplean un coeficiente de fricción con base en la ley de Coulomb y obtienen las ecuaciones (2.4) y (2.5) que representan la evolución de la profundidad y la velocidad promedio en la dirección principal de flujo, la cual, según la Figura 4 es la dirección 'x' (Savage & Hutter, 1989).

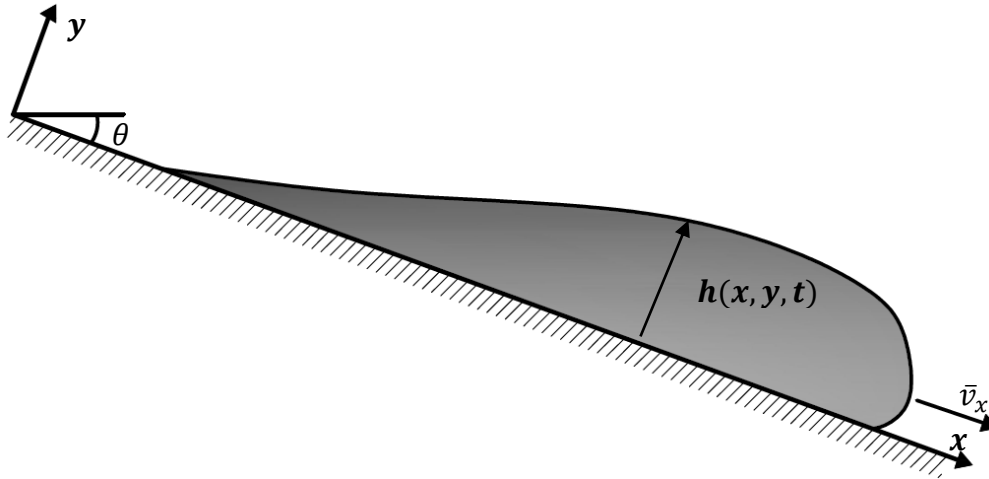


Figura 4. Esquema en 2D de una ola de material en estado dinámico deslizándose a lo largo de un plano inclinado

Fuente: adaptado de (Iverson, 1997)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial \xi} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{d\bar{u}}{dt} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi} = \sin \zeta - \tan \delta \operatorname{sgn}(\bar{u}) (\cos \zeta + \lambda \kappa \bar{u}^2) - \varepsilon k_{actpass} \cos \zeta \frac{\partial h}{\partial \xi} \quad (2.5)$$

Las ecuaciones (2.4) y (2.5) (continuidad y conservación del momentum, respectivamente) representan la variación en la profundidad y en la velocidad promedio en función del tiempo y del espacio (en términos de coordenadas curvilíneas). Donde $\bar{u}$ es la velocidad promedio en la dirección principal de flujo, t es el tiempo, ξ es el eje que representa el plano de flujo en coordenadas curvilíneas, δ es el ángulo de fricción entre el material y el plano de flujo, ζ es el ángulo de inclinación del plano de flujo respecto a la horizontal, $k_{actpass}$ es el coeficiente de presión lateral derivado de la teoría de Coulomb y finalmente, por parte de los parámetros de forma, κ es la curvatura local en coordenadas curvilíneas ($\kappa = 1/r(\xi)$), λ es la curvatura característica del plano de deslizamiento ($\lambda = L/R$, siendo R el

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

radio y L la longitud) y ε es la relación de profundidad – longitud de la masa ($\varepsilon = H/L$, siendo H la profundidad y L la longitud). El modelo fue probado mediante la simulación de experimentos realizados en canales de flujo rectangulares con variaciones en la superficie de flujo y en los materiales ensayados (materiales desagregados completamente friccionantes). Las simulaciones solucionan el sistema de ecuaciones (2.4) y (2.5) numéricamente mediante diferencias finitas desde un marco de referencia como el mostrado en la Figura 4.

Otro modelo similar al anteriormente mencionado es presentado por Iverson (1997), el cual describe un tratado sobre la física de los flujos de escombros, en donde los clasifica como *‘olas de aproximadamente igual volumen de agua y sedimentos pobremente gradados, completamente mezclados y agitados’* (Iverson, 1997). En su documento propone un modelo que incluye la teoría de medios continuos multifase propuesta por Atkin y Craine (1976), en donde se establece un sistema de ecuaciones que es capaz de describir los principios de conservación de la masa y el momentum lineal (despreciando el momentum angular dado que se consideran tensores de esfuerzo simétricos) para medios con fase líquida y sólida (Atkin & Craine, 1976). Con base en la teoría de mezclas y la teoría de profundidad promedio se propone un modelo hidráulico para la predicción del movimiento del flujo de escombros, cuyas ecuaciones de continuidad y momentum son la (2.6) y (2.7) respectivamente.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}_x)}{\partial x} = 0 \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial t} + \bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} = \sin \theta - \operatorname{sgn}(\bar{v}_x) \left(1 - \frac{p_{bed}}{h}\right) \cos \theta \tan \phi_{bed} - v_f \bar{\mu} (n+2) \left(\frac{\bar{v}_x}{h^2}\right) \\ - \epsilon \cos \theta \frac{\partial}{\partial x} [k_{act/pass} (h - p_{bed}) + p_{bed}] \end{aligned} \quad (2.7)$$

Otro modelo bidimensional de flujo que cambia de perspectiva en comparación con los anteriores es el propuesto por Sousa y Voight. En este caso se teoriza un modelo que se desarrolla en el plano 'xy' mostrado en la Figura 5 y no se realiza el procedimiento de ponderación en profundidad. El modelo considera el medio como un medio biviscoso con una capa que posee una alta viscosidad pero una baja tasa de deformación, mientras que la capa subyacente presenta una baja viscosidad pero una alta tasa de deformación. Las ecuaciones de Navier – Stokes modelan la velocidad en el medio y están representadas en las ecuaciones (2.8) y (2.9). Es importante anotar que incluyen el parámetro de reología de Bingham v_b (Sousa & Voight, 1991).

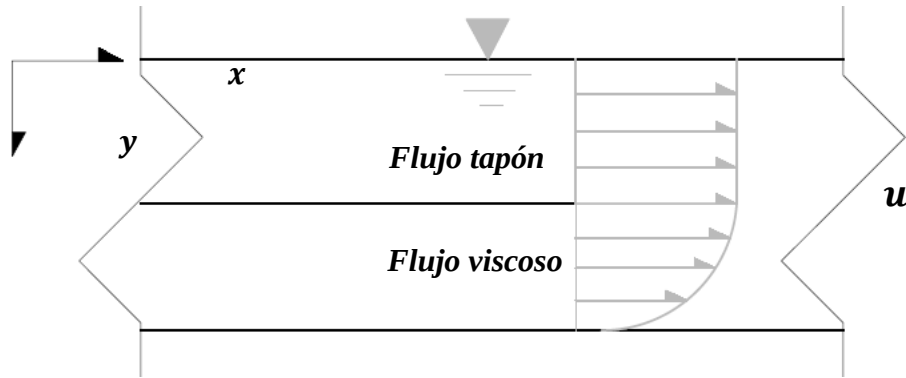


Figura 5. Esquema de volumen de control del flujo para la reología de materiales mixtos

Fuente: Adaptado de (Sousa & Voight, 1991)

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \mathbf{g} + \frac{\nabla p}{\rho} + \nu_b \nabla^2 \mathbf{v} \quad (2.9)$$

Los modelos reológicos de esfuerzos y viscosidades calibradas para diversos eventos (Flujo de escombros de Mayunmarca, Perú (Kojan & Hutchinson, 1978), avalancha del monte Santa Helena, Estados Unidos (Glicken, 1996), y la avalancha de escombros de Ontake, Japón (Endo, Sumita, Machida, & Furuichi, 1986)), fueron presentados por Sousa y Voight (1991), lo que permite la creación de modelos de flujo para prevenir riesgos en taludes peligrosos (Sousa & Voight, 1991). Las relaciones reológicas de un flujo biviscoso que se proponen en el estudio son las (2.10) y (2.11).

$$\frac{\tau}{\rho} = \nu' \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) , \tau \leq k \quad (2.10)$$

$$\frac{\tau}{\rho} = \gamma + \nu_b \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\gamma}{\nu'} \right] , \tau > k \quad (2.11)$$

Donde u es la velocidad en la dirección de flujo (eje x de la Figura 5), τ es el esfuerzo cortante, ρ es la densidad, k es la resistencia de fluencia, ν_b es el coeficiente de viscosidad de Bingham, ν' es el coeficiente de viscosidad cinemático mayor al de Bingham y γ es el parámetro de resistencia al esfuerzo cortante ($\gamma = k/\rho$). Las ecuaciones (2.10) y (2.11) están concebidas por partes teniendo en cuenta la condición de esfuerzos de la masa de material biviscoso deslizante, como el mostrado en la Figura 5, empleando un sistema de coordenadas cartesianas. El modelo continuo que tiene en cuenta los siguientes principios: conservación

de masa, momentum y energía. El material se considera incompresible con viscosidad constante, por tanto, la ecuación de energía no requiere ser considerada (Sousa & Voight, 1991).

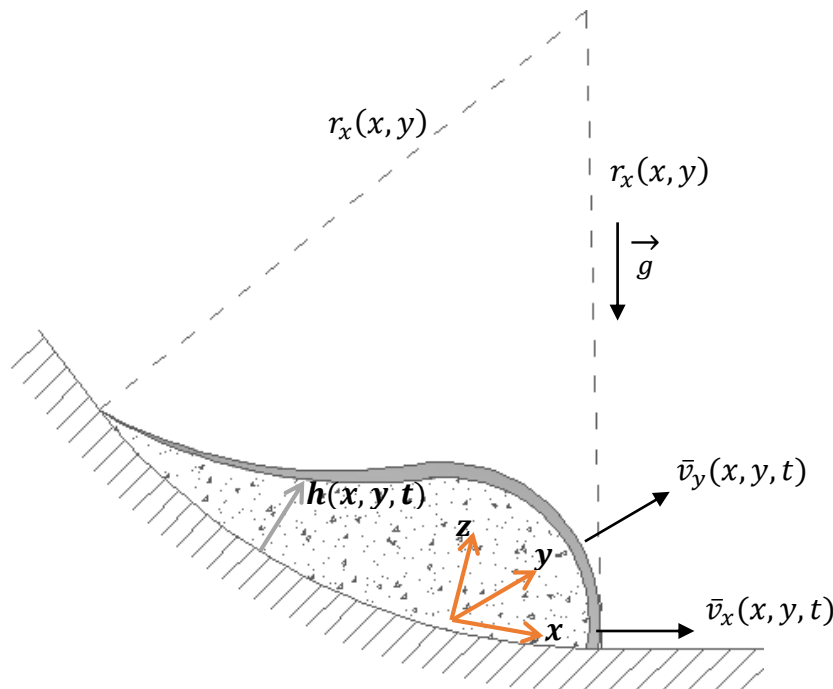
2.2.3. Modelos de flujo tridimensional. Hacen parte de los modelos que, de manera comparativa, abordan mayor complejidad entre los hasta ahora concebidos (desde el paradigma de la mecánica del medio continuo). Uno de ellos es el modelo de Takahashi (1999). En su estudio, desarrolló modelos 3D, basándose en el estudio planteado por Sassa en 1988 (Hung et al., 2005) el cual considera un modelo de deslizamiento en bloque con coeficiente de presión de poros (r_u) variable y que se debe asignar al área de la ruta de deslizamiento de antemano, como una función de entrada. Se recomienda el uso de pruebas de corte directo no drenado para determinar los coeficientes r_u . Una de las grandes limitaciones del modelo es la incapacidad para simular la presión lateral que no sea hidrostática (Hung et al., 2005).

Por otra parte, existen modelos más complejos pero que, en teoría, permiten una mejor comprensión de la cinemática del fenómeno. Se han propuesto modelos dinámicos tridimensionales en los que se modela el flujo de escombros como una masa sujeta a rozamiento y presión de poros seguida de un flujo viscoso. Las interacciones entre la fase fluida y granos sólidos se tienen en cuenta mediante el uso de la ley de tracción de Darcy, con la suposición implícita de que no se tiene en cuenta cualquier arrastre turbulento.

A partir del modelo DAN, propuesto por Hung (1995) (el cual es un modelo para 2D como se describió anteriormente en la sección 3.2.3), McDougall y Hung (2004) presentan

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

una mejora para el modelo, adaptando en un software básico o kernel de programación un modelo con capacidades de permitir la entrada y el depósito de material a lo largo del movimiento, permitiendo a su vez largos desplazamientos y grandes deformaciones, hasta permitir el desacoplamiento de la masa deslizante en un momento dado (McDougall & Hungr, 2004). El nuevo modelo también se basa en una solución lagrangiana para las ecuaciones de flujo integrado en profundidad (la integración se hace normal al plano de deslizamiento) y se tienen en cuenta las asunciones de agua poco profunda en las que, en primer lugar, se considera que la profundidad de la masa varía gradualmente y es pequeña en relación al área en planta del deslizamiento, en segundo lugar, el material es incompresible y, en tercer lugar, los esfuerzos normales a la cama de flujo son hidrostáticos debido a que se asume que se desprecian los esfuerzos actuantes en la dirección normal al plano de deslizamiento al hacer el balance de momentos, sin embargo si se considera la aceleración centrípeta debido a la curvatura de la superficie.



MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Figura 6. Corte isométrico esquemático de un material deslizante a lo largo de una pendiente curva donde se muestran las componentes de la velocidad y el espesor del deslizamiento ($\bar{v}_x$, $\bar{v}_y$, h)

Fuente: Adaptado de (Iverson & Denlinger, 2001)

Iverson y Denlinger (2001) realizan una mejora del modelo presentado por Iverson (1997), ampliando el mismo modelo de 2D a 3D. En la Figura 6 se muestra un corte isométrico de la ola de flujo que es tomada como la representación esquemática para el desarrollo del modelo de Iverson y Denlinger (2001). En este caso desarrollaron un modelo integrado en profundidad para predecir el movimiento o el flujo de masas granulares, teniendo en cuenta fuerzas como interacciones entre una fase fluida y otra sólida, cuyos datos de entrada son, además de las condiciones iniciales y/o de contorno, la ruta topográfica del deslizamiento, los coeficientes de fricción interna y en la base, la viscosidad del fluido, la densidad de la mezcla y la disipación de la presión de poros (Iverson & Denlinger, 2001). Según Iverson y Denlinger el modelo necesita poca calibración dado que los parámetros son valores medidos independientemente. En su estudio investigan la hipótesis de que el flujo libre en flujos que involucran fase sólida y líquida no cumplen una tasa de esfuerzo – deformación específica, pero que sin embargo los esfuerzos intergranulares satisfacen la ley de fricción de Coulomb, el efecto en la variación de la presión de poros, la topografía y las fuerzas inerciales. El modelo obtenido por Iverson y Denlinger argumenta ser efectivo para avalanchas granulares en régimen puramente friccionante (sin presencia de fase líquida), hasta avalanchas que contemplan fase líquida y sólida (Iverson & Denlinger, 2001). Es importante mencionar que el modelo propuesto es un modelo que surge de la solución de la ecuación de momentum de flujo inestable, asumiendo la hipótesis de *‘agua poco profunda’*.

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Iverson y Denlinger (2001) hacen hincapié en que el fenómeno se puede explicar en cierta medida por la teoría de fricción de Coulomb. Discuten los límites de la influencia de la fricción de Coulomb así como los de la influencia del fluido intergranular. Aplican una relación definida por Savage (1984) en la que presentan una relación entre los esfuerzos estáticos de sólidos y líquidos (Savage, 1984). Con base en eso se caracteriza el flujo en dos regímenes; uno en el que domina la característica de fricción de Coulomb, y otro en el que domina un régimen de colisiones entre las partículas que componen el flujo (Iverson & Denlinger, 2001). Para los flujos impulsados por gravedad con superficies superiores libres, la relación casi constante entre el esfuerzo intergranular y las tensiones normales en flujos dominados por fricción y dominados por colisiones, extiende una característica clave del comportamiento de Coulomb más allá del régimen de flujo lento donde la fricción Coulomb domina claramente. El flujo de los granos finos se comporta de manera acoplada con la fase fluida, mientras que el flujo de los granos gruesos en el perímetro exhibe un comportamiento que actúa en el régimen friccional, como se puede deducir de los estudios de Rowley et al. en los depósitos de flujos piroclásticos en la erupción del monte *St. Helens*, y en el estudio de Wilson y Head, en el cual realizan la caracterización morfológica y reológica del flujo del mismo evento (Rowley, Kuntz, & Macleod, 1981; Wilson & Head, 1981). Siempre que exista un fluido cuya viscosidad sea diferente de cero, la tasa de dependencia de esfuerzos en mezclas entre fases sólidas y líquidas reposa en la cuantía de fluidos, debido a que la presión de los fluidos reduce la fricción de Coulomb en el intersticio.

Iverson y Denlinger (2001) también se basan en el equilibrio de masa y momento desde la teoría del continuo para mezclas (Atkin & Craine, 1976). En la teoría propuesta se asume que los tensores de esfuerzo son simétricos y que la mezcla es isotermal (Iverson &

Denlinger, 2001), lo que da lugar a la proposición de las ecuaciones de transporte generalizadas (2.12) y (2.13).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2.12)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla \cdot (\mathbf{T}_s + \mathbf{T}_f + \mathbf{T}') + \rho \mathbf{g} \quad (2.13)$$

Donde ρ es la densidad de la mezcla, $\mathbf{v}$ es el vector de velocidad, $\mathbf{T}_s$ es la componente de esfuerzos de la fase sólida, $\mathbf{T}_f$ es la componente de esfuerzos de la fase fluida, $\mathbf{T}'$ es una componente de esfuerzos generada por el movimiento relativo entre las dos fases y $\mathbf{g}$ es el vector de aceleración de la gravedad. Los valores de $\mathbf{T}$ representan los esfuerzos desarrollados en un punto material de la mezcla (Iverson & Denlinger, 2001).

Tras la ponderación en profundidad de las ecuaciones (2.12) y (2.13) y una evaluación analítica de los esfuerzos ponderados, en primer lugar, de los esfuerzos en la fase sólida, donde se asume que los esfuerzos siguen la teoría de Coulomb con cohesión nula y la teoría de esfuerzos laterales, se introduce el coeficiente de esfuerzo lateral $k_{a/p}$. Por otra parte, en cuanto a los esfuerzos en la fase líquida (o fluida) se asume la reología de fluidos Newtonianos y se aplica a la fracción fluida de la mezcla v_f . Finalmente las ecuaciones generales que se obtienen, modelan un sistema multifase en las direcciones x y y (ver Figura 6) y se presentan en las ecuaciones (2.14), (2.15) y (2.16).

$$\begin{aligned}
 & \rho \left[\frac{\partial(h\bar{v}_x)}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}_x\bar{v}_y)}{\partial y} \right] \\
 &= -\operatorname{sgn}(\bar{v}_x)(\rho g_z h - p_{bed}) \left(1 + \frac{\bar{v}_x^2}{r_x g_z} \right) \tan \varphi_{bed} - 3v_f \mu \frac{\bar{v}_x}{h} \\
 & - h k_{a/p} \frac{\partial}{\partial x} (\rho g_z h - p_{bed}) - h \frac{\partial p_{bed}}{\partial x} + v_f \mu h \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial x^2} \\
 & - \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} \right) h k_{a/p} \frac{\partial}{\partial y} (\rho g_z h - p_{bed}) \sin \varphi_{int} + v_f \mu h \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial x^2} \\
 & + \rho g_x h
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

$$\begin{aligned}
 & \rho \left[\frac{\partial(h\bar{v}_y)}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}_y^2)}{\partial y} + \frac{\partial(h\bar{v}_y\bar{v}_x)}{\partial x} \right] \\
 &= -\operatorname{sgn}(\bar{v}_y)(\rho g_z h - p_{bed}) \left(1 + \frac{\bar{v}_y^2}{r_y g_z} \right) \tan \varphi_{bed} - 3v_f \mu \frac{\bar{v}_y}{h} \\
 & - h k_{a/p} \frac{\partial}{\partial y} (\rho g_z h - p_{bed}) - h \frac{\partial p_{bed}}{\partial y} + v_f \mu h \frac{\partial^2 \bar{v}_y}{\partial y^2} \\
 & - \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial \bar{v}_y}{\partial x} \right) h k_{a/p} \frac{\partial}{\partial x} (\rho g_z h - p_{bed}) \sin \varphi_{int} + v_f \mu h \frac{\partial^2 \bar{v}_y}{\partial y^2} \\
 & + \rho g_y h
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}_x)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}_y)}{\partial y} = 0 \tag{2.16}$$

Donde $\bar{v}_x$ y $\bar{v}_y$, son las componentes de velocidad media en profundidad en las direcciones x e y respectivamente (ver Figura 6). h es la profundidad de flujo medida perpendicularmente a la base, ρ es la densidad de la mezcla, p_{bed} es la presión desarrollada en la base del flujo.

φ_{bed} es el ángulo de fricción entre el material que fluye y la cama de flujo. φ_{int} es el ángulo de fricción interno del material. v_f es la fracción de contenido de material fluido. μ es el coeficiente de viscosidad del fluido. r_x y r_y son los radios de curvatura en las direcciones x e y respectivamente, g_x , g_y y g_z son las componentes de la gravedad en el espacio cartesiano (ver Figura 6).

El modelo de Iverson y Denlinger (2001) ha sido evaluado en diversos escenarios. Por una parte, se ha evaluado a partir de datos experimentales, en cuyos casos se modelan especímenes experimentales en los que fluye un material friccionante (arena fina) a lo largo de una superficie inclinada irregular (Iverson & Denlinger, 2001; Iverson, Logan, & Denlinger, 2004). Y por otra parte, se ha evaluado, en un caso real de deslizamiento, en un estudio realizado por Trujillo y Ramos, quienes, realizando simplificaciones del sistema de ecuaciones (2.17), obtienen la ecuación 19 para estimar la velocidad del flujo y la ecuación (2.18) para estimar la posición del deslizamiento (Trujillo & Ramos, 2012).

$$\bar{v}_x = \frac{\rho g_z H^2}{3n_f \mu} \theta \left[1 - e^{-t/\frac{\rho H^2}{3n_f \mu}} \right] + \bar{v}_0 e^{-t/\frac{\rho H^2}{3n_f \mu}} \quad (2.17)$$

$$x = x_0 + \frac{\rho g_z H^2}{3n_f \mu} \theta \cdot t + \frac{\rho H^2}{3n_f \mu} \left[\bar{v}_0 - \frac{\rho g_z H^2}{3n_f \mu} \theta \right] \left[1 - e^{-t/\frac{\rho H^2}{3n_f \mu}} \right] \quad (2.18)$$

El modelo de Iverson y Denlinger (2001) tiene una fuerte fundamentación teórica en la teoría de mezclas, la cual se basa en la mecánica del medio continuo para materiales multifásicos (Iverson, 1997). La descripción de la física de los flujos de escombros se hace

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

con base en varios años de estudios realizados en un canal experimental del Servicio Geológico de los Estados Unidos, con el cual se puede experimentar con volúmenes de aprox. 10 m^3 (Iverson, Costa, & LaHusen, 1992). Esta fundamentación hace que sea un modelo de interés prioritario para su estudio.

El sistema de ecuaciones se puede solucionar mediante el Método de Volúmenes Finitos (Denlinger & Iverson, 2001) o el Método de Diferencias Finitas (Iverson, 1997). Sin embargo, el Método de Volúmenes finitos es recomendado para realizar la solución del sistema de ecuaciones cuando existen fuertes influencias de la topografía del terreno, es decir, se obtienen mejores resultados mediante la aplicación del Método de Volúmenes Finitos cuando el material fluye sobre pendientes empinadas que se encuentran con cambios de dirección súbitos o cuando existe división o unión de la masa, entre otros casos (Denlinger & Iverson, 2001).

Hay que aclarar que el Método de Volúmenes Finitos es una formulación especial del Método de Diferencias Finitas, y que se encuentra como método de solución central en varios softwares de Dinámica de Fluidos Computacional (*e.g.* Ansys CFD, Ansys FLUENT, POENICS, Star – CD, etc.). Y su algoritmo, en términos generales, requiere de tres pasos substanciales; primero, la integración de las ecuaciones que gobiernan el movimiento, segundo, la discretización del dominio, lo que provee un sistema de ecuaciones algebraicas, y tercero, la solución de las ecuaciones en el dominio (Versteeg & Malalasekera, 2007). El primer paso, el cual se refiere a la integración de las ecuaciones en cada volumen de control del dominio, es el paso que distingue al MVF de otras técnicas numéricas. Dicha distinción se da gracias a que las expresiones resultantes tienen la capacidad de expresar las leyes de

conservación de algunas propiedades relevantes para cada celda o volumen. Por ejemplo la velocidad en un volumen de control puede ser expresada como el balance de ciertos procesos que tienden a hacerla crecer o a hacerla decrecer (Anderson et al., 2009; Versteeg & Malalasekera, 2007).

2.3. Método de Volúmenes Finitos (MVF)

El Método de Volúmenes Finitos (también llamado Método de Volúmenes de Control) es un método basado en esquemas Diferencias Finitas para la aproximación de soluciones de ecuaciones en derivadas parciales pero diferenciado del método de diferencias finitas, principalmente porque discretiza el dominio en volúmenes de control en cuyo dominio local son integradas las ecuaciones de conservación (Moukalled, Mangani, & Darwish, 2016, Chapter 4).

El MVF, tal como otros métodos numéricos para solucionar ecuaciones diferenciales parciales, consta de cuatro pasos fundamentales que se enuncian en la Figura 7.

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

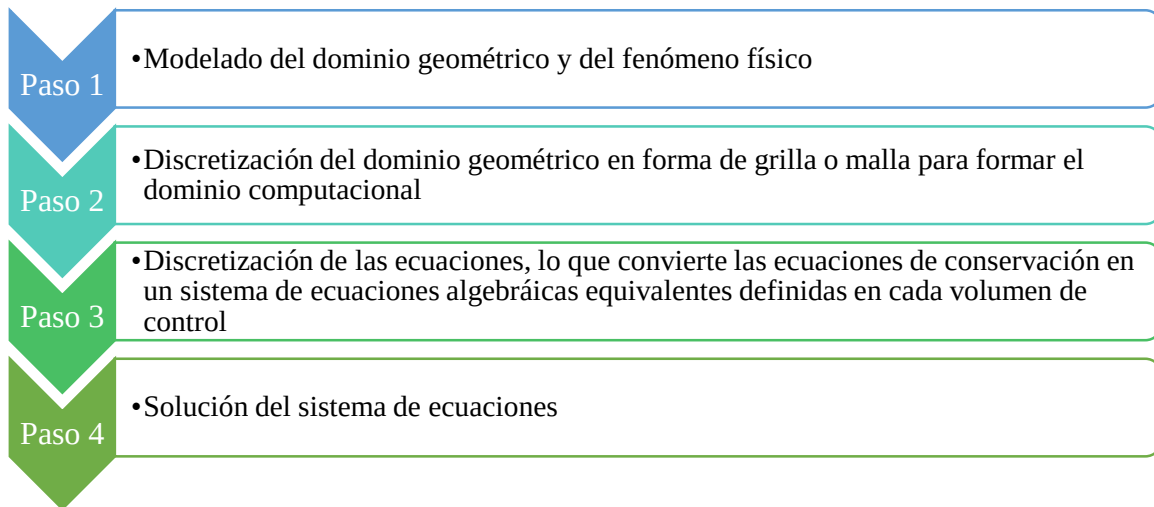


Figura 7. Esquema general para la solución numérica de ecuaciones diferenciales

El ‘Paso 1’ de la Figura 7 se refiere a la concepción del problema físico en general y particular, es decir, el modelo del dominio del problema específico y de las ecuaciones que gobiernan el fenómeno.

El paso 2 se refiere a la organización del dominio en unidades discretas con información topológica suficiente para acceder computacionalmente a cada una de esas unidades. Por ejemplo, en la Figura 8 se muestra una malla con elementos rectangulares del mismo tamaño definidos en coordenadas globales mediante los ejes coordenados ‘ x, y ’, y en coordenadas locales cartesianas en el mismo sentido. La unidad básica está definida por el punto de interés ‘ P ’ y sus vecinos ‘ N, S, E, W ’ (norte, sur, este, oeste respectivamente). La unidad básica ‘ P ’ se denomina celda o volumen de control y está delimitada por sus cuatro caras ‘ n, s, e, w ’. Si bien la Figura 8 muestra elementos rectangulares del mismo tamaño, esta configuración puede variar según las necesidades del problema, es decir, cuando se trabaja con geometrías complejas que requieren mallas finas en ciertas zonas del dominio.

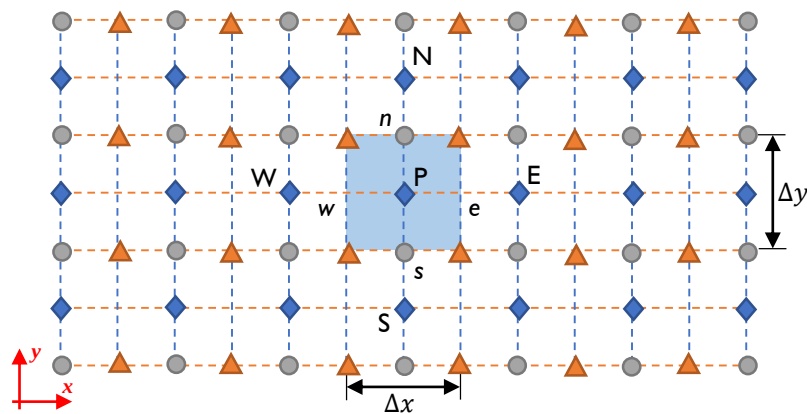


Figura 8. Discretización del dominio mediante celdas rectangulares: Representación de una malla escalonada

El paso 3 se refiere a la reducción del sistema de ecuaciones diferenciales parciales a un sistema algebraico de ecuaciones lineales equivalente. Para tal efecto se tienen en cuenta dos conceptos importantes, primero la reducción a la forma integral de las ecuaciones diferenciales, lo cual no es más que integrar las ecuaciones en un volumen de control. Y segundo, las aproximaciones numéricas de cada término consignado en la ecuación. Los métodos más básicos hacen uso de la aproximación mediante el truncamiento de las series de Taylor. De allí se obtienen los esquemas de discretización a implementar (Diferencias Centrales, UD, QUICK, etc. (Moukalled et al., 2016)).

La elección del(los) esquema(s) de discretización es fundamental. Por lo tanto, se definen las propiedades de los esquemas de discretización elegidos para el modelo numérico. En primer lugar, la conservatividad, es una propiedad que da cuenta del grado en que las ecuaciones de conservación se cumplen en el modelo numérico; es decir, representa el grado de conservación de las propiedades físicas en estudio a través del dominio completo con base en los flujos que salen y entran de volúmenes adyacentes. Por ejemplo, en la Figura 9 se

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

muestra un esquema de detalle de los flujos que van de una cara a la otra. En síntesis, la conservatividad es una propiedad que expresa la conservación general de las variables de flujo en todos y cada uno de los volúmenes que conforman el dominio. Por lo tanto, si se garantiza la conservatividad en cada punto específico, se garantiza la conservación de las variables en el dominio en general (Moukalled et al., 2016).

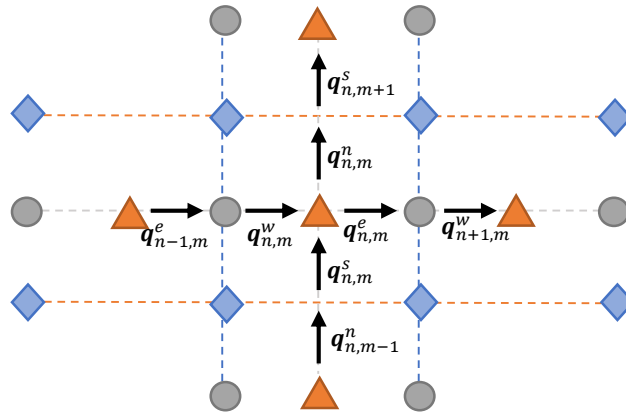


Figura 9. Detalle representativo de los flujos que llegan y abandonan su celda a través de las caras

Otra propiedad es la acotación (Moukalled et al., 2016), la cual es mostrada en la ecuación (2.22), y expresa una condición suficiente para la convergencia del sistema cuando se usa un método iterativo de solución de sistemas de ecuaciones lineales, tales como Gauss – Seidel y Jacobi. En la condición expresada mediante la ecuación (2.22) se relacionan los coeficientes de cada nodo con sus nodos vecinos. Lo que quiere decir que el cumplimiento de la condición representa la dominancia de la diagonal principal en la matriz de coeficientes, lo que, en efecto asegura la convergencia del método. Para expresar mejor ésta propiedad, hay que considerar un sistema (3x3) de ecuaciones lineales como el mostrado en la expresión (2.19).

$$[A]\{u\} = \{S_u\} \quad (2.19)$$

Escrito matricialmente de forma expandida como lo expresa la ecuación (2.20).

$$\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_{u1} \\ S_{u2} \\ S_{u3} \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

Ejecutando las operaciones matriciales correspondientes es fácil llegar a una expresión general como la mostrada en la ecuación (2.21).

$$a_p u_p = \sum a_{nb} u_{nb} + S_u \quad (2.21)$$

Por lo tanto, para garantizar la convergencia del sistema es necesario que se cumpla la condición (2.22).

$$\frac{\sum |a_{nb}|}{|a'_p|} \begin{cases} \leq 1, \text{ en todos los nodos} \\ < 1, \text{ a lo menos en 1 nodo} \end{cases} \quad (2.22)$$

Donde, $|a'_p| = |a_p - S_p|$. Donde S_p representa la porción del término fuente asociada al punto 'P'. Es importante notar que, para que la condición (2.22) se cumpla satisfactoriamente, el término ' S_p ' debería ser siempre negativo, lo que asegura que el coeficiente neto del nodo central (a'_p) sea más grande que el mismo coeficiente del nodo central (a_p). Otra condición para la acotación en la respuesta supone que los coeficientes de las ecuaciones deberían tener

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

el mismo signo. En éste y otros casos tienen signo positivo. Desde el punto de vista físico tiene mucho sentido dado que involucra que un aumento en la variable de flujo en el nodo central involucra un aumento en los nodos adyacentes. Desde el punto de vista numérico esta condición propicia la desaparición de meneos (‘*wiggles*’) en la respuesta.

Por otra parte, la transportividad es una propiedad del flujo de los fluidos que da cuenta del efecto que ejercen los fenómenos de convección y difusión en cada punto o volumen. Para ilustrar dicha propiedad se define el número de Peclet mediante la ecuación (2.23)

$$Pe = F/D \quad (2.23)$$

Donde F es el flujo asociado al fenómeno de convección y D es aquel asociado al fenómeno de difusión.

Finalmente, el paso 4 de la Figura 7 hace referencia a la aplicación de un método numérico para la solución de sistemas de ecuaciones lineales (Moukalled et al., 2016). Los métodos más empleados en este tipo de tareas son los métodos iterativos; en ese orden encontramos métodos como el de Jacobi (ver Anexo 1) y Gauss – Seidel. En términos básicos el método de Jacobi y el de Gauss – Seidel son bastante similares, la diferencia radica en que el método de Gauss resuelve las variables de manera recursiva, lo que le da una tasa de convergencia más alta. Sin embargo, eso hace más compleja la aplicación de computación en paralelo.

3. Sistema de Ecuaciones Simplificado

El dominio del problema físico se discretiza mediante celdas rectangulares ubicadas en una malla tri – escalonada, la cual tiene nodos específicos para el cálculo de las velocidades en las direcciones ‘x’ e ‘y’, así como para el cálculo de alturas. Esto se encuentra consignado en la Figura 10.

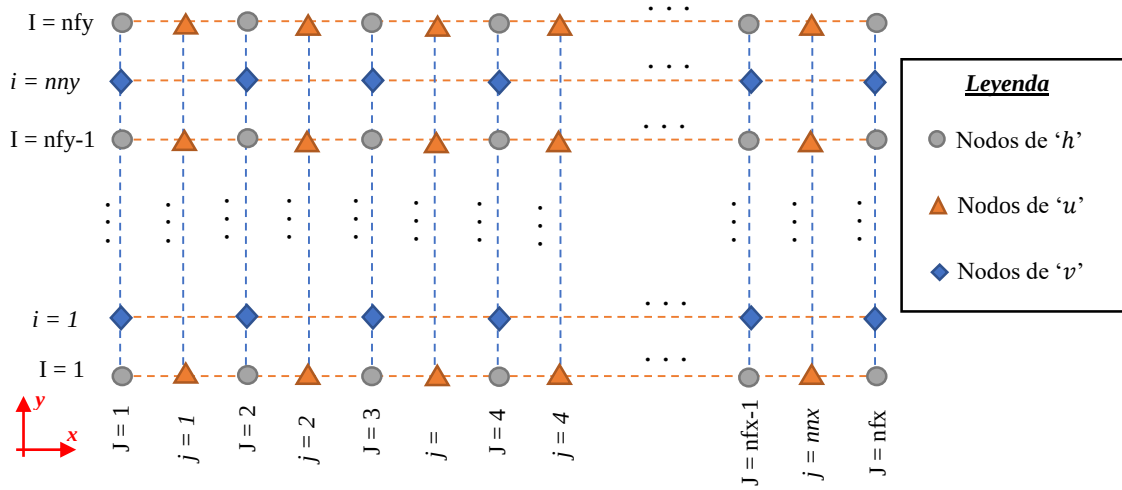


Figura 10. Esquema para la discretización del dominio para el modelo completo

El sistema de ecuaciones original que soluciona el problema físico de flujo de escombros se presenta en las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}_x)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}_y)}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned}
 & \rho \left[\frac{\partial(h\bar{v}_x)}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}_x\bar{v}_y)}{\partial y} \right] \\
 &= -\operatorname{sgn}(\bar{v}_x)(\rho g_z h - p_{bed}) \left(1 + \frac{\bar{v}_x^2}{r_x g_z} \right) \tan \varphi_{bed} - 3v_f \mu \frac{\bar{v}_x}{h} \\
 & - h k_{a/p} \frac{\partial}{\partial x} (\rho g_z h - p_{bed}) - h \frac{\partial p_{bed}}{\partial x} + v_f \mu h \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial x^2} \\
 & - \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} \right) h k_{a/p} \frac{\partial}{\partial y} (\rho g_z h - p_{bed}) \sin \varphi_{int} + v_f \mu h \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial y^2} \\
 & + \rho g_x h
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
 & \rho \left[\frac{\partial(h\bar{v}_y)}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}_y^2)}{\partial y} + \frac{\partial(h\bar{v}_y\bar{v}_x)}{\partial x} \right] \\
 &= -\operatorname{sgn}(\bar{v}_y)(\rho g_z h - p_{bed}) \left(1 + \frac{\bar{v}_y^2}{r_y g_z} \right) \tan \varphi_{bed} - 3v_f \mu \frac{\bar{v}_y}{h} \\
 & - h k_{a/p} \frac{\partial}{\partial y} (\rho g_z h - p_{bed}) - h \frac{\partial p_{bed}}{\partial y} + v_f \mu h \frac{\partial^2 \bar{v}_y}{\partial y^2} \\
 & - \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial \bar{v}_y}{\partial x} \right) h k_{a/p} \frac{\partial}{\partial x} (\rho g_z h - p_{bed}) \sin \varphi_{int} + v_f \mu h \frac{\partial^2 \bar{v}_y}{\partial x^2} \\
 & + \rho g_y h
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Llamando $\bar{v}_x = u$ y $\bar{v}_y = v$, y despreciando las interacciones en la dirección ‘y’, lo que comprende v y las derivadas en esta dirección. Por lo tanto, el sistema de ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3) se reescribe como se muestra en el sistema de ecuaciones (3.4) y (3.5).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} = 0 \tag{3.4}$$

$$\begin{aligned}
 & \rho \left[\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu)u}{\partial x} \right] \\
 & = -\operatorname{sgn}(u)(\rho g_z h - p_{bed}) \left(1 + \frac{u^2}{r_x g_z} \right) \tan \varphi_{bed} - 3v_f \mu \frac{u}{h} \\
 & \quad - h k_{a/p} \frac{\partial}{\partial x} (\rho g_z h - p_{bed}) - h \frac{\partial p_{bed}}{\partial x} + v_f \mu h \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \rho g_x h
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Teniendo en cuenta que $p_{bed} = \lambda \rho g_z h$, donde λ es una fracción propuesta por Iverson y Denlinger (2001) que varía entre 0 y 1, la ecuación (3.5) se puede reescribir como lo expresa la ecuación (3.6).

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu)u}{\partial x} - h \frac{\partial}{\partial x} \Gamma \frac{\partial u}{\partial x} \\
 & = -\operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) g_z h \left(1 + \frac{u^2}{r_x g_z} \right) \tan \varphi_{bed} \\
 & \quad - h g_z k_{a/p} (1 - \lambda) \frac{\partial h}{\partial x} - \lambda g_z h \frac{\partial h}{\partial x} - 3 \Gamma \frac{u}{h} + g_x h
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

En términos generales la ecuación (3.6) se puede escribir como se muestra en la ecuación (3.7). Dicha formulación se denomina forma integral de la ecuación diferencial.

$$\begin{aligned}
 & \int_{CV} \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial(hu)}{\partial t} dt dV + \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \frac{\partial(hu)u}{\partial x} dV dt - \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} h \frac{\partial}{\partial x} \Gamma \frac{\partial u}{\partial x} dV dt \\
 & = \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} S_u dV dt
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

De igual manera, al despreciar las interacciones en la dirección ‘y’, la Figura 10 se puede simplificar, lo que hace que el modelo se pueda visualizar como lo muestra la Figura 11.

Es importante anotar que el primer término del lado izquierdo de la ecuación (3.7) es el término transitivo, el segundo término es el convectivo, el tercero es el difusivo y el que se encuentra al lado derecho es el término fuente.

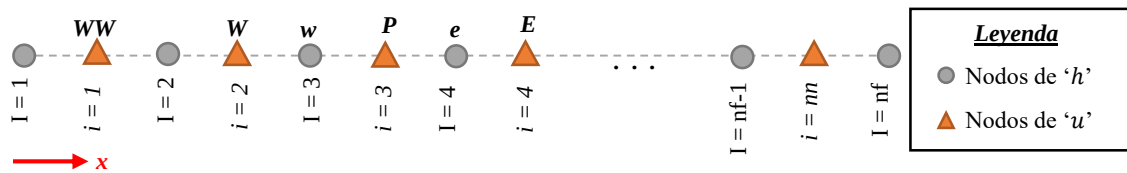


Figura 11. Esquema para la discretización del dominio para el modelo simplificado con la nomenclatura $\{P, E, W, WW\}$ y $\{e, w\}$

De ahora en adelante se empleará la nomenclatura introducida mediante la Figura 8. Por ejemplo, si en el modelo lineal mostrado en la Figura 11. se analiza el nodo $i = 3$, entonces se asignan los nombres $\{P, E, W, WW\}$ a los nodos de las celdas $i = \{3, 4, 2, 1\}$, y $\{e, w\}$ a los nodos de las caras $I = \{3, 4\}$. Esta nomenclatura se adopta de ahora en adelante para la discretización de este modelo simplificado.

4. Discretización de la ecuación de conservación de momentum lineal

Como se discutió en la sección 2.3, ahora se busca un sistema algebraico de ecuaciones (de la forma de (2.19)) equivalente que se pueda resolver numéricamente mediante un método

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

iterativo (*i. e.* Jacobi, Gauss – Seidel). En esta sección se muestra el resultado de dicho proceso.

Para la discretización de la ecuación de conservación de momentum (3.6), la cual expresa la conservación del momentum lineal para el modelo simplificado, se emplean los siguientes esquemas de discretización:

- Crank – Nicolson para el término transitivo
- QUICK para el término convectivo
- Diferencias Centrales para el término difusivo

El proceso detallado (paso a paso) de discretización de los términos de la ecuación (3.6) se encuentra en el Anexo 2. Ahora, reemplazando las ecuaciones (10.1), (10.11), (10.15), (10.17) en la ecuación (3.7), se obtiene la ecuación de conservación del momentum lineal discretizada, como se aprecia en la ecuación (4.1).

$$\begin{aligned}
 & [(hu)_P - (hu)_P^0] \Delta x A \\
 & + \left[\left(\left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8} \right) F_e - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8} \right) F_w \right) u_P \right. \\
 & + \left(\left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8} \right) F_e + (1 - \alpha) \frac{1}{8} F_w \right) u_E - \left(\left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8} \right) F_w + \alpha \frac{1}{8} F_e \right) u_W \\
 & \left. - (1 - \alpha) \frac{1}{8} F_e u_{EE} + \alpha \frac{1}{8} F_w u_{WW} \right] A \Delta t \\
 & - [(h_P^0 - h_e + h_w) D(u_E - 2u_P + u_W)] A \Delta t \\
 & = \left[-\operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) g_z h_P \left(1 + \frac{u_P^G u_P \tan(\Delta\theta/2)}{g_z \Delta x/2} \right) \tan \varphi_{bed} \right. \\
 & \left. - \left((1 - \lambda) k_{a/p} + \lambda \right) h_P g_z \left(\frac{h_e - h_w}{\Delta x} \right) - 3\Gamma \frac{u_P}{h_P} + g_x h_P \right] \Delta x A \Delta t
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Ahora, para obtener los coeficientes de la matriz y el término fuente del sistema de ecuaciones, se factorizan los términos que contienen los valores de velocidad u_P , u_E , u_W , u_{WW} y u_{EE} . Con ello se obtienen los coeficientes a_P , a_E , a_W , a_{WW} , a_{EE} y S_u , conformando un sistema de ecuaciones de la forma de la ecuación (4.2).

$$a_P u_P = a_W u_W + a_E u_E + a_{WW} u_{WW} + a_{EE} u_{EE} + S_u \tag{4.2}$$

Donde $a_P = a_W + a_E + F_e - F_w - S_p$.

Para definir los coeficientes hay que establecer ecuaciones especiales en los nodos internos y en los nodos externos según las condiciones de frontera. En la Tabla 1 y en la Tabla 2 se resumen los coeficientes para los nodos internos.

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Tabla 1. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de 'u' en el nodo $i = \{3, 4, \dots, nn-3, nn-2\}$ (a)

a_E	a_W	a_{WW}	a_{EE}
$D(h_p^0 - h_e + h_w) - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8}\right) F_e$ $- (1 - \alpha) \frac{1}{8} F_w$	$D(h_p^0 - h_e + h_w) + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8}\right) F_w$ $+ \alpha \frac{1}{8} F_e$	$-\alpha \frac{1}{8} F_w$	$(1 - \alpha) \frac{1}{8} F_e$

Tabla 2. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de 'u' en el nodo $i = \{3, 4, \dots, nn-3, nn-2\}$ (b)

S_p	S_u
$-a_p^0 h_p - 2 \operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) u_p^6 h_p \tan(\Delta\theta/2) \tan \varphi_{bed}$ $-\frac{3\Gamma}{h_p} \Delta x$	$-\operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) g_z h_p \Delta x \tan \varphi_{bed}$ $-\left((1 - \lambda) k_{a/p} + \lambda\right) h_p g_z (h_e - h_w)$ $+ g_x \Delta x h_p + a_p^0 (hu)_p^0$

En términos generales para las simulaciones, las condiciones de borde de interés son casi siempre iguales. El proceso consta de una masa que inicia en reposo y que progresivamente va ganando velocidad hasta llegar a un punto estable. Eventualmente empieza su proceso de desaceleración, hasta llegar al reposo nuevamente. En el Anexo 4 se muestra en detalle el proceso de obtención de las ecuaciones especiales para los extremos.

Tabla 3. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de 'u' en el nodo $i = 1$

a_E	a_W	a_{WW}	S_p	a_p	S_u
0	0	0	0	1	0

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Tabla 4. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de 'u' en el nodo i = 2 (a)

a_E	a_W	a_{WW}	a_{EE}
$D(h_p^0 - h_e + h_w) - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8}\right) F_e$	$D(h_p^0 - h_e + h_w) + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{5}{8}\right) F_w$	0	$(1 - \alpha) \frac{1}{8} F_e$
$-(1 - \alpha) \frac{1}{8} F_w$	$+\alpha \frac{1}{8} F_e$		

Tabla 5. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de 'u' en el nodo i = 2 (b)

S_p	S_u
$-a_p^0 h_p$	$-\text{sgn}(u) (1 - \lambda) g_z h_p \Delta x \tan \varphi_{bed}$
$-2 \text{sgn}(u) (1 - \lambda) u_p^G h_p \tan(\Delta\theta/2) \tan \varphi_{bed}$	$-\left((1 - \lambda) k_{a/p} + \lambda\right) h_p g_z (h_e - h_w) + g_x \Delta x h_p$
$-\frac{3\Gamma}{h_p} \Delta x$	$+ a_p^0 (hu)_p^0$

Tabla 6. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de 'u' en el nodo i = nn - 1 (a)

a_E	a_W	a_{WW}	a_{EE}
$D(h_p^0 - h_e + h_w) - \left(\frac{1}{8} + \alpha \frac{5}{8}\right) F_e$	$D(h_p^0 - h_e + h_w) + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8}\right) F_w$	$-\alpha \frac{1}{8} F_w$	0
$-(1 - \alpha) \frac{1}{8} F_w$	$+\alpha \frac{1}{8} F_e$		

Tabla 7. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de 'u' en el nodo i = nn - 1 (b)

S_p	S_u
$-a_p^0 h_p - 2 \text{sgn}(u) (1 - \lambda) u_p^G h_p \tan(\Delta\theta/2) \tan \varphi_{bed}$	$-\text{sgn}(u) (1 - \lambda) g_z h_p \Delta x \tan \varphi_{bed}$
$-\frac{3\Gamma}{h_p} \Delta x$	$-\left((1 - \lambda) k_{a/p} + \lambda\right) h_p g_z (h_e - h_w) + g_x \Delta x h_p$
	$+ a_p^0 (hu)_p^0$

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Tabla 8. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de 'u' en el nodo $i = nn$

a_E	a_W	a_{WW}	S_P	a_P	S_u
0	$\frac{h_{WW}}{h_W}$	0	0	1	0

5. Discretización de la ecuación de conservación de masa

Para discretizar la ecuación de conservación de masa los valores $\{P, E, W\}$ se pasan a los nodos que contienen los valores de altura, tal como se muestra en la Figura 12.

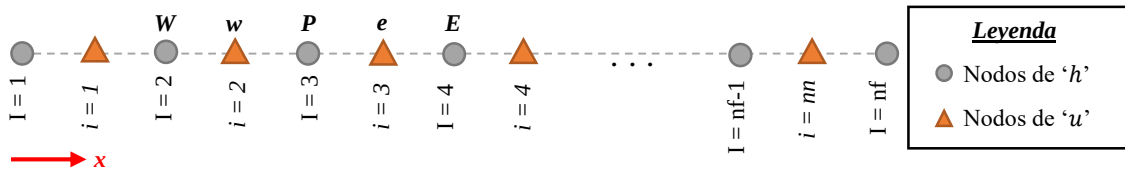


Figura 12. Esquema para la discretización del dominio para el modelo simplificado con la nomenclatura $\{P, E, W\}$ y $\{e, w\}$ empleada en el proceso de discretización de la ecuación de conservación de masa

De manera análoga a la ecuación de conservación de momentum se hallan los coeficientes para un sistema de ecuaciones equivalente al mostrado en la ecuación (5.1).

$$a_P h_P = a_W h_W + a_E h_E + S_h \quad (5.1)$$

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Tabla 9. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de 'h' en el nodo $I = \{2, 3, \dots, nf-2, nf-1\}$ (a)

a_p	a_w	a_{ww}	S_h
			$(3h_p - 2h_w - h_{ww})/8$
$a_p^0 + u_e$	u_w	0	$-(3h_E - 2h_p - h_w)/8$ $+ a_p^0 h_p^0$

Tabla 10. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de 'h' en el nodo $I = 1$

a_p	a_w	a_{we}	S_h
1	0	0	0

Tabla 11. Coeficientes del sistema de ecuaciones para la solución de 'h' en el nodo $I = nf$

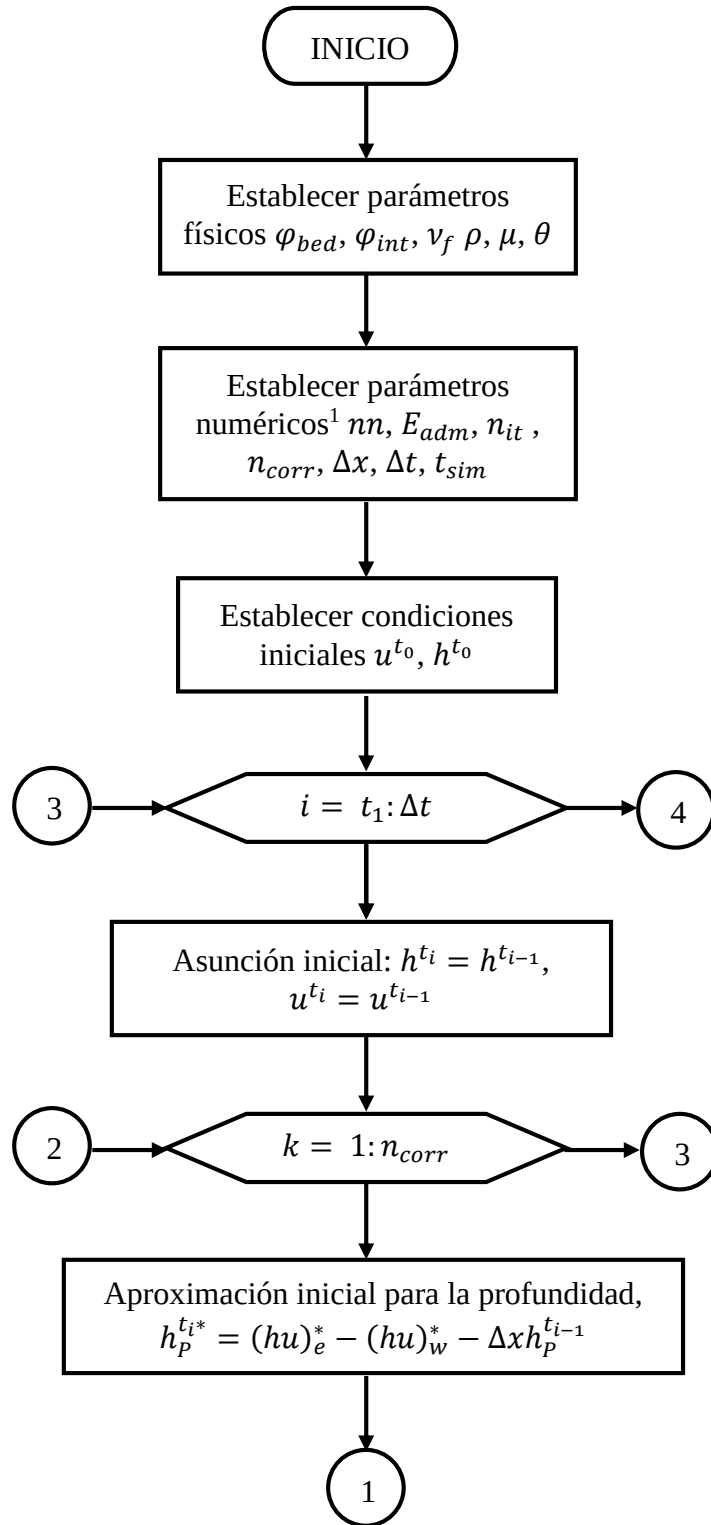
a_p	a_w	a_{we}	S_h
1	h_w	0	0

6. Procedimiento de solución del sistema de ecuaciones

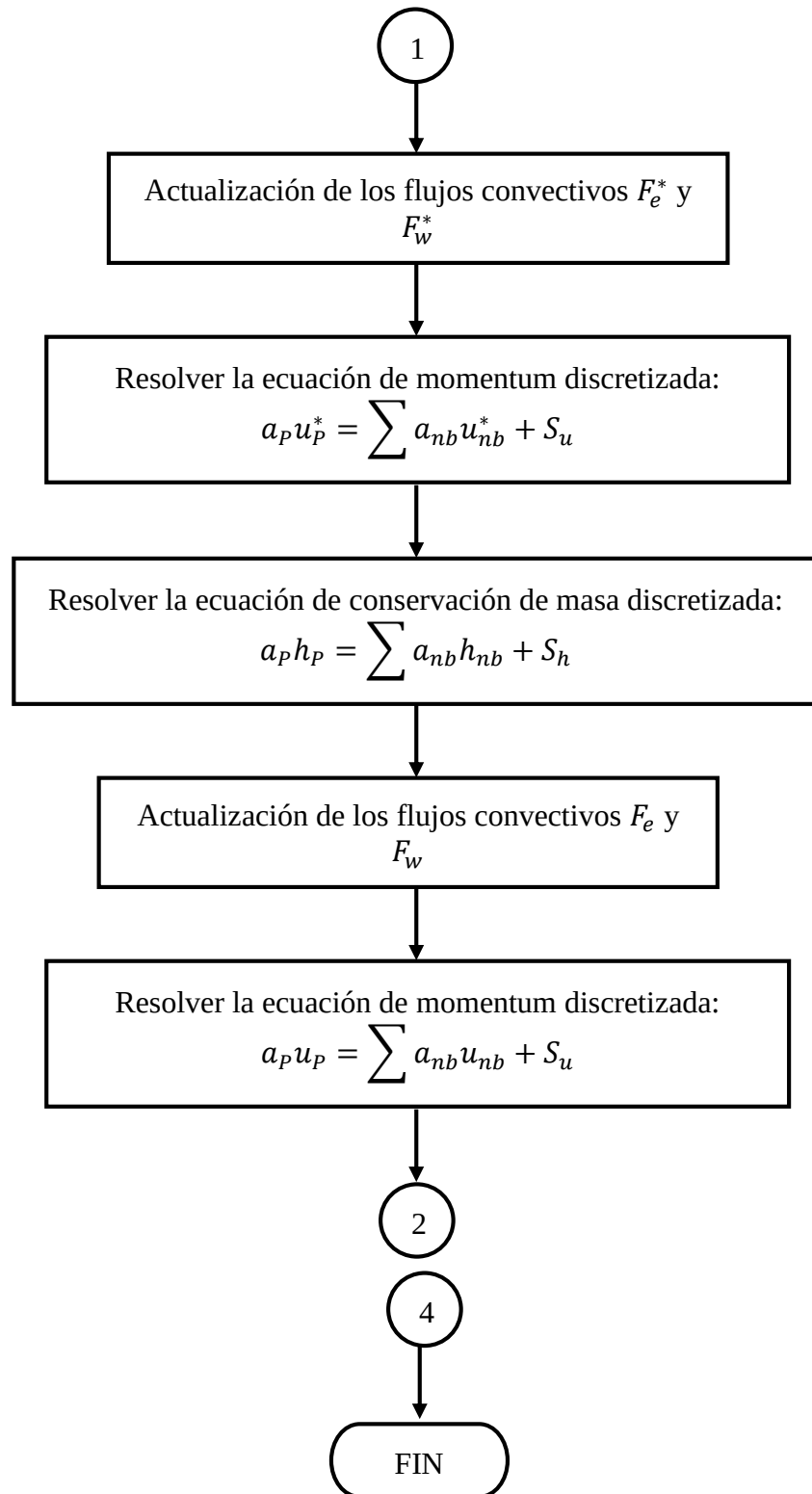
En la literatura concerniente a la Dinámica de Fluidos Computacional se han hecho comunes varios algoritmos de solución; uno de ellos, quizá el más básico y empleado, es el SIMPLE (*Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations*) (Versteeg & Malalasekera, 2007), el cual presenta una serie de pasos para la solución de las ecuaciones de Navier – Stokes (o las ecuaciones diferenciales en general) en su forma numérica basándose en el hecho de que la solución numérica contiene un error proveniente de las aproximaciones consideradas en los esquemas de discretización. Para lograr la corrección se sigue básicamente un procedimiento de solución que se fundamenta en encontrar una ecuación que surge al acoplar las ecuaciones

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

de conservación. Para el problema aquí tratado, no se puede obtener una ecuación en forma explícita para la presión, debido a que solo se considera el espesor o profundidad de flujo y la velocidad como variables de salida, por lo tanto, se realiza un procedimiento de solución análogo con correcciones por profundidad y por velocidad de manera implícita. A continuación, se muestra el algoritmo de solución del sistema de ecuaciones transitivo descrito en las secciones 4 y 5.



¹ $nn \equiv$ Número de nodos, $E_{adm} \equiv$ Error admisible, $n_{it} \equiv$ Número de iteraciones, $n_{corr} \equiv$ Número de ciclos correctores, $\Delta x \equiv$ Delta de espacio, $\Delta t \equiv$ Delta de tiempo, $t_{sim} \equiv$ Tiempo de simulación



7. Análisis de sensibilidad

Para analizar la variación de la respuesta, es decir, la variación de velocidad y profundidad de flujo conforme se varían los parámetros del modelo físico mostrado en las ecuaciones (3.4) y (3.5) se simula un caso genérico para la realización de dicho análisis. Para ello se simula una superficie inclinada con un modelo numérico con las características mostradas en la Tabla 12.

Tabla 12. Parámetros numéricos para construir el modelo para el análisis de sensibilidad

Parámetro	Valor
Número de nodos	1000
Delta de distancia	0.005 <i>m</i>
Delta de tiempo	0.001 <i>s</i>
Número de ciclos correctores	3
Número máximo de iteraciones	1000
Error admisible para ' <i>h</i> '	0.0001 <i>m</i>
Error admisible para ' <i>u</i> '	0.0005 <i>m/s</i>

En la Tabla 13 se muestran los parámetros variados en el modelo. La variación de los parámetros se realiza entre valores que permitan apreciar razonablemente si el cambio en las medidas de los parámetros afecta o no a las variables de salida. En el Anexo 5 se muestran de manera visual las variaciones entre las respuestas obtenidas para la profundidad de flujo en cada uno de los casos de la variación de parámetros en la Tabla 13.

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Tabla 13. Parámetros físicos base para el análisis de sensibilidad

Parámetro	Valor
Ángulo de fricción en la base, ϕ_{bed} (°)	29°
Ángulo de fricción interno, ϕ_{int} (°)	40°
Fracción de volumen de fluido, ν_f	0.4
Viscosidad del fluido, μ (Pa · s)	$2e^{-5}$
Densidad de la mezcla, ρ (kg/m ³)	1600

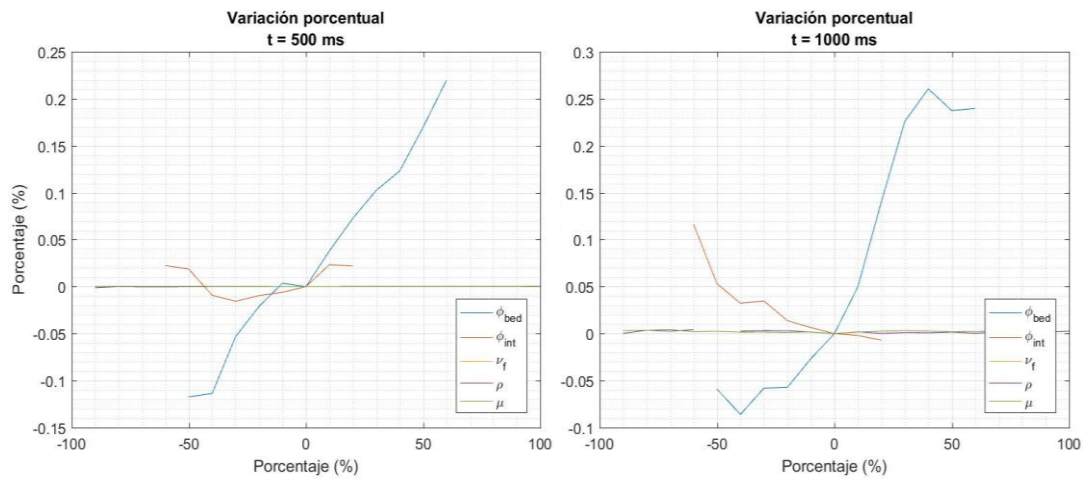


Figura 13. Representación de la variación porcentual en $t = 0.5$ s y en $t = 1$ s

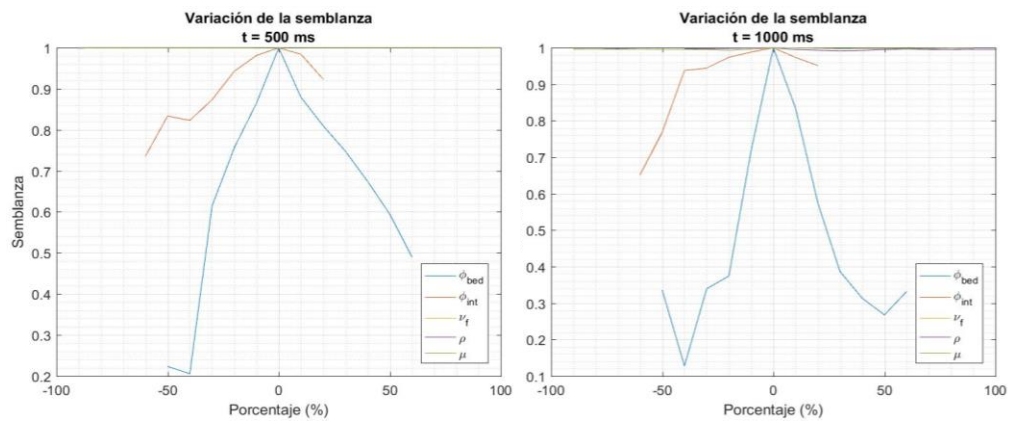


Figura 14. Representación de la variación de la semblanza 0.5 s y en $t = 1$ s

8. Campaña experimental

Se lleva a cabo una campaña experimental completa en el canal de flujo Collapses del grupo INME (ver Anexo 6) concibiendo un diseño experimental que permita realizar pruebas ANOVA DCA y DBCA (Diseño de Bloques Completamente Aleatorizado), a este muestreo de ahora en adelante se le denomina ‘S3’. En la campaña se llevan a cabo 135 unidades experimentales (ver Anexo 7), con lo cual se busca garantizar el cumplimiento de las hipótesis para el ANOVA. Para la realización de ésta fase se contó con la colaboración del grupo INME y un estudiante de pregrado en calidad de pasante (Remolina Reyes, 2018).

Con la información de los ensayos es posible llevar a cabo pruebas de hipótesis con el fin de probar estadísticamente las relaciones existentes entre las variables involucradas en los ensayos de laboratorio, sin embargo, para efectos del presente estudio sólo se reporta la información de los ensayos relevantes con fines de comparación con el modelo numérico desarrollado en las secciones 4 y 5, es decir, se reportan los resultados del Sistema Primario de Adquisición de datos, como se verá a continuación en las secciones subsiguientes.

8.1. Materiales empleados

Para estudiar el fenómeno de flujo de escombros en el canal Collapses, se eligen algunos materiales ideales que tienen diferentes pesos específicos, diferentes formas y diferentes orígenes. En los ensayos preliminares (véase ‘Muestreos S1 y S2’ en el Anexo 6) se encuentra que los materiales que favorecen la adquisición y tratamiento de datos y que a su vez cubren

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

un amplio rango de pesos y formas son: granito triturado (blanco), partículas de cristal y partículas plásticas. En la Figura 15 se muestran los tres materiales empleados para simular el flujo a través del canal y en la Tabla 14 se listan algunas de las características relevantes de cada uno.

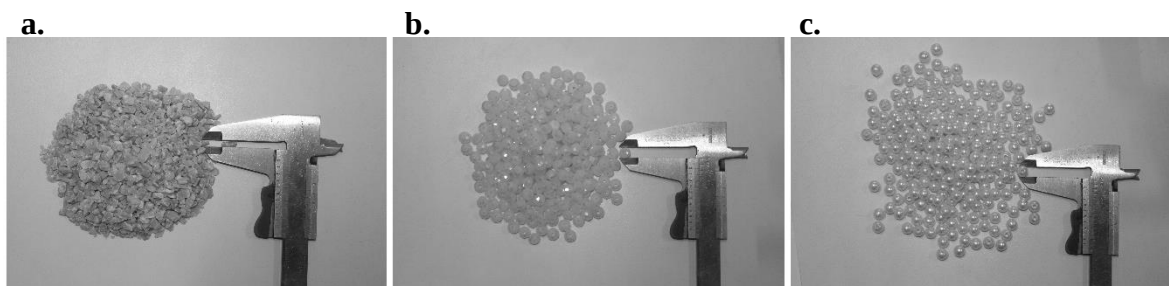


Figura 15. Tres materiales empleados en el muestreo S3: a) Material pétreo b) Partículas de cristal c) Partículas plásticas

Tabla 14. Propiedades generales de los materiales empleados en el muestreo S3

ID material	Descripción	Peso	TMN	Observaciones
		específico [g/cm ³]	[mm]	
Material a	Granito triturado blanco	1514,6	4,75	Pasa tamiz #4 retiene tamiz #8
Material b	Partículas de cristal	1352,8	6,00	Partículas altamente uniformes
Material c	Partículas plásticas	505,8	6,00	Partículas altamente uniformes

8.2. Diseño y ejecución del muestreo

Tras el análisis de los muestreos S1 y S2 se obtienen conclusiones interesantes (ver Anexo 6 numeral 13.b). Se puede concluir que el cambio de volumen entre 1, 2 o 3 litros en el canal

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

de flujo no influye significativamente en la respuesta del experimento, así como tampoco lo hace el peso específico del material.

Tabla 15. Arreglo de las réplicas para el tercer muestreo (S3)

		Rugosidad del fondo del canal (grados SIA)		
		120	150	180
Materiales	Material	S3P1 al	S3P16 al	S3P31 al
	a	S3P15	S3P30	S3P45
	Material	S3P46 al	S3P61 al	S3P76 al
	b	S3P60	S3P75	S3P90
	Material	S3P91 al	S3P106 al	S3P121 al
	c	S3P105	S2P120	S3P135

En el caso del muestreo S3 se usan los mismos materiales del S2, pero se fija un volumen de 3 litros para todos los ensayos contenidos a una distancia de 45 centímetros medida desde el inicio del canal. Se realiza un diseño concebido para evaluar la influencia de la interacción entre el material en movimiento y la base del canal. Para obtener una potencia de la prueba aceptable se realizan 15 réplicas por bloque, luego para 9 bloques se deben realizar 135 unidades experimentales. El diseño estadístico en detalle se explica en el Anexo 7, sección 0. Un resumen de la organización del muestreo se puede apreciar en la Tabla 15. La

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

identificación de cada unidad se hace agregando la letra *P* y el número consecutivo; por ejemplo, la prueba 51 del muestreo S3 se nombra como *S3P51*.

Para la realización del muestreo S3 se sigue el protocolo de carga y uso del canal para una unidad experimental, el cual se encuentra descrito en el Anexo 6.

Como se describe en el Anexo 6 en la sección 0, el Sistema de Adquisición Primario de datos está compuesto por una cámara digital fotográfica configurada para capturar 20 fotogramas por segundo con una resolución de 2336 pixeles por 1752 pixeles. Al final del muestreo se obtienen aproximadamente 10800 fotogramas provenientes de dicho sistema de adquisición.

8.3. Procesamiento de datos

Para procesar los datos obtenidos mediante el Sistema de Adquisición Primario (en adelante SAP) se construye un algoritmo de procesamiento de imágenes que tiene como objeto el reconocimiento automatizado del material en cada fotograma de las 135 unidades experimentales. El algoritmo aplicado se muestra en la Figura 16 y se explica a continuación.

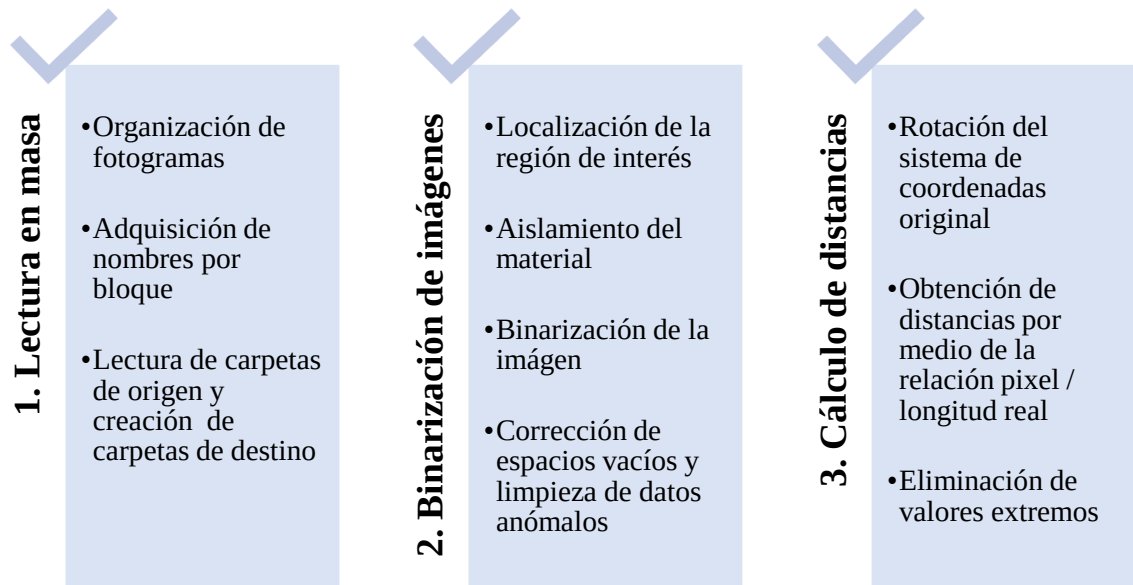


Figura 16. Secuencia para el procesamiento de las imágenes del muestreo S3

El algoritmo aplica la distribución de probabilidad Log – Normal para diferenciar desde el punto de vista estocástico los píxeles que contienen información relevante y los que no. A dicho procedimiento se le denomina proceso de aislamiento, es decir, cuando se aíslan los píxeles que contienen el material y se diferencian del resto. Es importante aclarar que al abordar estos fenómenos desde el punto de vista estocástico se presenta, en teoría, una ventaja conceptual debido a que el desencadenamiento del movimiento está amarrado a variables aleatorias que no se controlan con el montaje del canal tal como se presenta en este documento, sin embargo, se pueden ir controlando para futuras versiones del canal.

Como se aprecia en la Figura 16, el procesamiento de los datos del *SAP* consta de tres etapas principales. La primera etapa se refiere al proceso de lectura en masa de las imágenes, el cual es sencillamente el proceso de almacenar en la memoria RAM, de manera numérica,

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

las imágenes captadas por el sensor; por ejemplo, la primera imagen captada para el ensayo S3P1 se muestra en la Figura 17 y se representa matemáticamente mediante un arreglo tensorial de 2336 por 1752 por 3, que relaciona cada pixel con una tripleta de colores *rojo*, *verde* y *azul*. Así, cada imagen se encuentra compuesta por tres bandas, con la intensidad de cada color en (RGB) cada una de ellas y con una resolución determinada (2336 pixeles por 1752 pixeles, como se mencionó anteriormente).

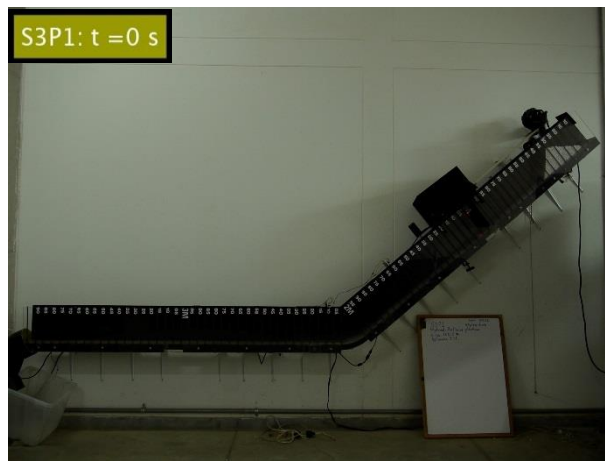


Figura 17. Unidad experimental S3P1 en $t = 0$

Por otra parte, la segunda etapa comprende el proceso de binarización, es decir, un proceso que resulta en la devolución de valores lógicos (Falso o Verdadero) en cada pixel y su valor retorna 0 ó 1 dependiendo si el pixel contiene información de interés o no. Los criterios para valorar si el pixel contiene información de interés o no, se basan en la intensidad de la banda 'R', por lo tanto, el primer paso del proceso es descartar las bandas *verde* y *azul* del arreglo original.

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

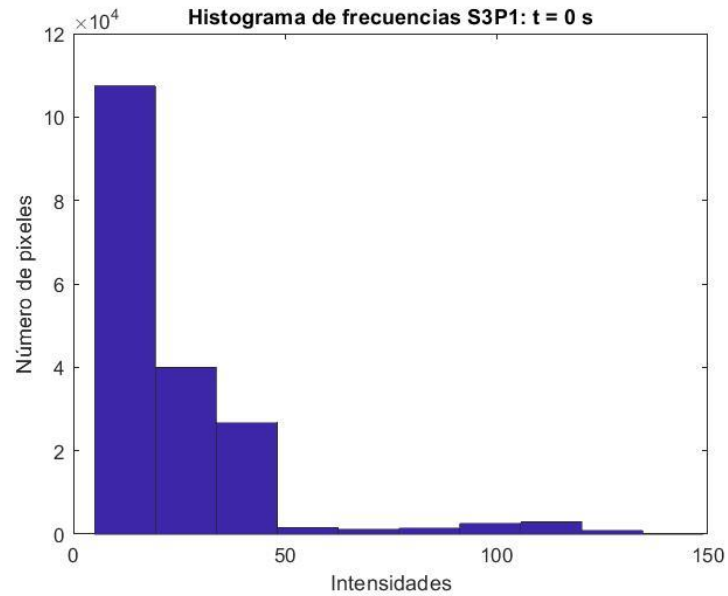


Figura 18. Distribución de frecuencias de las intensidades de la imagen aislada en $t = 0$ s para S3P1

Posteriormente se seleccionan solo los píxeles que contienen la base del canal y se imponen valores de cero a los píxeles que están por encima y por debajo del canal, eliminando la mayor cantidad de ruido (o información que no es de interés) posible. El resultado de la selección de la Región de Interés (*RDI*) se puede apreciar en la Figura 19a.

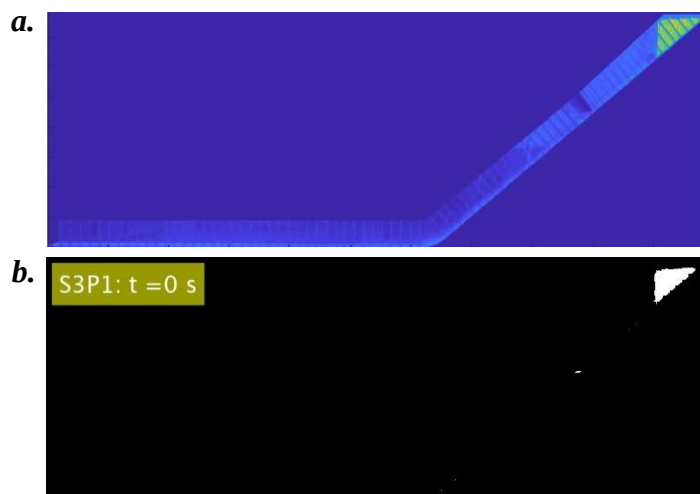


Figura 19. a) Imagen aislada para S3P1 en $t = 0$ s b) Imagen binarizada para S3P1 en $t = 0$ s

Ahora, considerando el histograma generado a partir de la selección de la *RDI* mostrada en la Figura 19a (véase Figura 18), el cual muestra las intensidades en los píxeles del fotograma versus el número de píxeles en cada frecuencia, se hace evidente que los píxeles que contienen material son los máximos y son minoría dentro del conjunto de píxeles, por lo tanto, se decide emplear una distribución Log Normal para estimar los valores máximos dentro de cada fotograma.

Con base en la estimación de los valores máximos a partir de la distribución de probabilidad Log Normal, se configura la prueba lógica para saber qué píxeles contienen una intensidad mayor o igual a la indicada según la función inversa con una probabilidad de excedencia (α) dada. Como resultado se obtienen matrices binarias como la mostrada en la Figura 19b. Sin embargo, el proceso de binarización recoge datos anómalos que no coinciden con lo deseado. Por lo tanto, se procede a realizar un proceso, en primer lugar, de relleno de vacíos, es decir, aquellos píxeles cuyo valor sea 0 pero estén rodeados de píxeles cuyo valor sea 1 su valor por consiguiente será 1. Y en segundo lugar de limpieza, el cual básicamente identifica grupos de píxeles adyacentes con el valor de 1, cuando los grupos son menores a 100 píxeles se identifican como ruido y se descartan dichas medidas, luego no interfieren en las medidas finales.

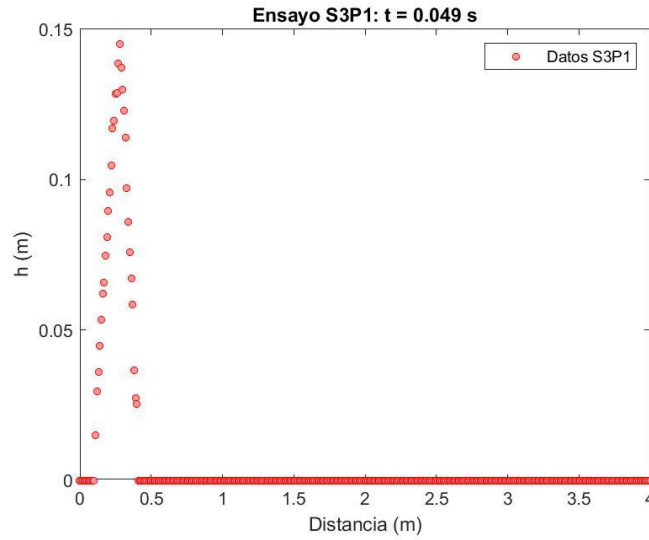


Figura 20. Distribución de alturas en el ensayo S3P1 en $t = 0.049$ s

Finalmente, la última etapa consiste en la medición de distancias a partir de los pixeles de la imagen binarizada. Para ello, por una parte, se calcula el valor medio de la distancia por pixel a partir de distancias reales conocidas y el número de pixeles que la representan ($\Delta pix = L_{real}/(pix_2 - pix_1)$). Mientras que, por otra parte, se divide el dominio en tres tramos. El primero es el inclinado, el segundo es el curvo (transición entre el tramo horizontal y el curvo) y el tercero es el horizontal. En cada uno de esos tramos se calculan los valores del eje de las ordenadas siempre perpendiculares a la superficie del canal, y el eje de las abscisas siempre paralelo al plano de la superficie, con lo cual se obtienen duplas para los pixeles hallados en la segunda etapa. El resultado es la representación de las alturas a lo largo del canal como lo muestra la Figura 20.

Como una representación estadística de cada bloque se muestran los valores promedio obtenidos en cada tiempo con su respectivo error típico representado mediante gráficos de error como se aprecia en la Figura 21.

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

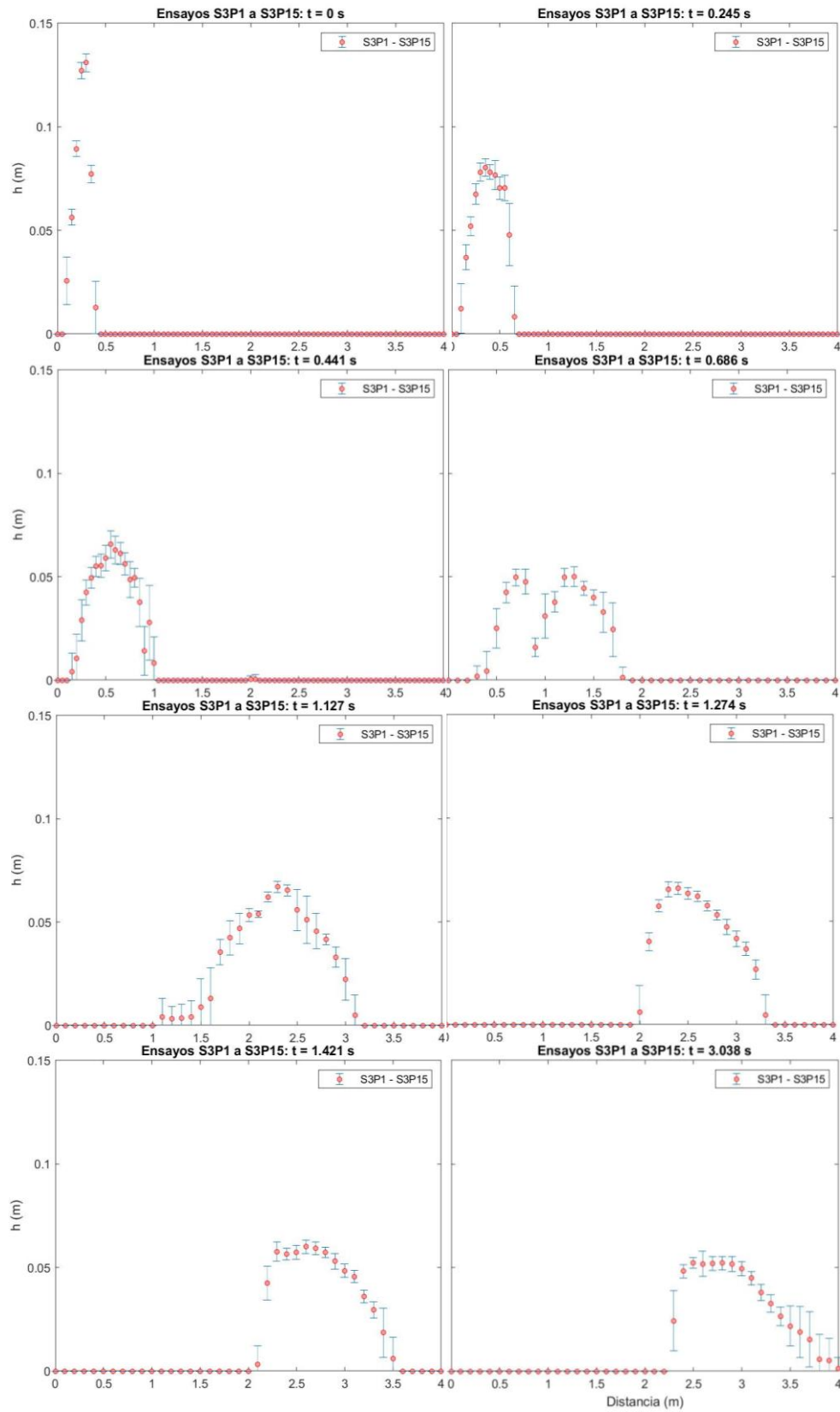


Figura 21. Distribución de alturas promedio y su error típico para algunos tiempos en el bloque S3P1 – S3P15

8.4. Comparación con resultados numéricos

Una vez obtenidos los resultados experimentales con la metodología descrita en la sección anterior, se confía en ellos para realizar un proceso comparativo que permita observar qué sucede al simular un evento de flujo desde el punto de vista computacional, mediante la aplicación del modelo descrito en el capítulo 3. Para tales efectos se construye un modelo bidimensional con los parámetros numéricos enunciados en la Tabla 16, que de manera análoga al procedimiento presentado en el capítulo 7, soluciona las ecuaciones de conservación con el fin de simular un bloque de pruebas determinado.

Tabla 16. Parámetros numéricos para el modelo bidimensional que simula los ensayos S3P1 – S3P15

Parámetro	Valor
Número de nodos	1000
Delta de distancia	0.005 m
Delta de tiempo	0.001 s
Número de ciclos correctores	3
Número máximo de iteraciones	1000
Error admisible para ' <i>h</i> '	0.0001 m
Error admisible para ' <i>u</i> '	0.0005 m/s

En este caso, siguiendo con los resultados del capítulo 8.3, se comparan los resultados de los ensayos del bloque S3P1 – S3P15 para observar el desarrollo de las alturas y velocidades según el modelo, y así observar su diferencia con las medidas logradas en laboratorio. Para

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

ello se usan los parámetros físicos del material empleado en laboratorio (partículas plásticas), los cuales se enuncian en la Tabla 17.

Tabla 17. Parámetros físicos de entrada para el modelo de deslizamiento bidimensional

Parámetro	Valor
Ángulo de fricción en la base, φ_{bed} ($^{\circ}$)	25.1
Ángulo de fricción interno, φ_{int} ($^{\circ}$)	27.8
Fracción de volumen sólido, v_s	0.79
Fracción de volumen fluido, v_f	0.21
Densidad de la mezcla, ρ (kg/m^3)	505.8
Viscosidad del fluido, μ ($Pa \cdot s$)	$2 \cdot 10^{-5}$
Diámetro máximo de las partículas (m)	$6 \cdot 10^{-3}$

En la Figura 22 se muestran de manera comparativa los resultados experimentales del bloque S3P1 – S3P15 con los resultados de la simulación numérica para unos tiempos determinados. Se observa que el modelo presenta una predicción de la profundidad de flujo en el frente de onda que se acerca a las medidas del canal, pero que la precisión de dichas medidas se aleja conforme la cola del deslizamiento se acerca a la cola de la simulación. También se nota que el índice de movilidad del modelo en el segmento horizontal sobrepasa la el índice de movilidad del bloque de pruebas; por tanto las fuerzas restrictivas transversales y la interacción entre el material y los muros juegan un rol clave para estabilizar el modelo en el segmento horizontal. Para compensar la simplificación realizada al modelo original en el presente estudio se propone un proceso básico de calibración.

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

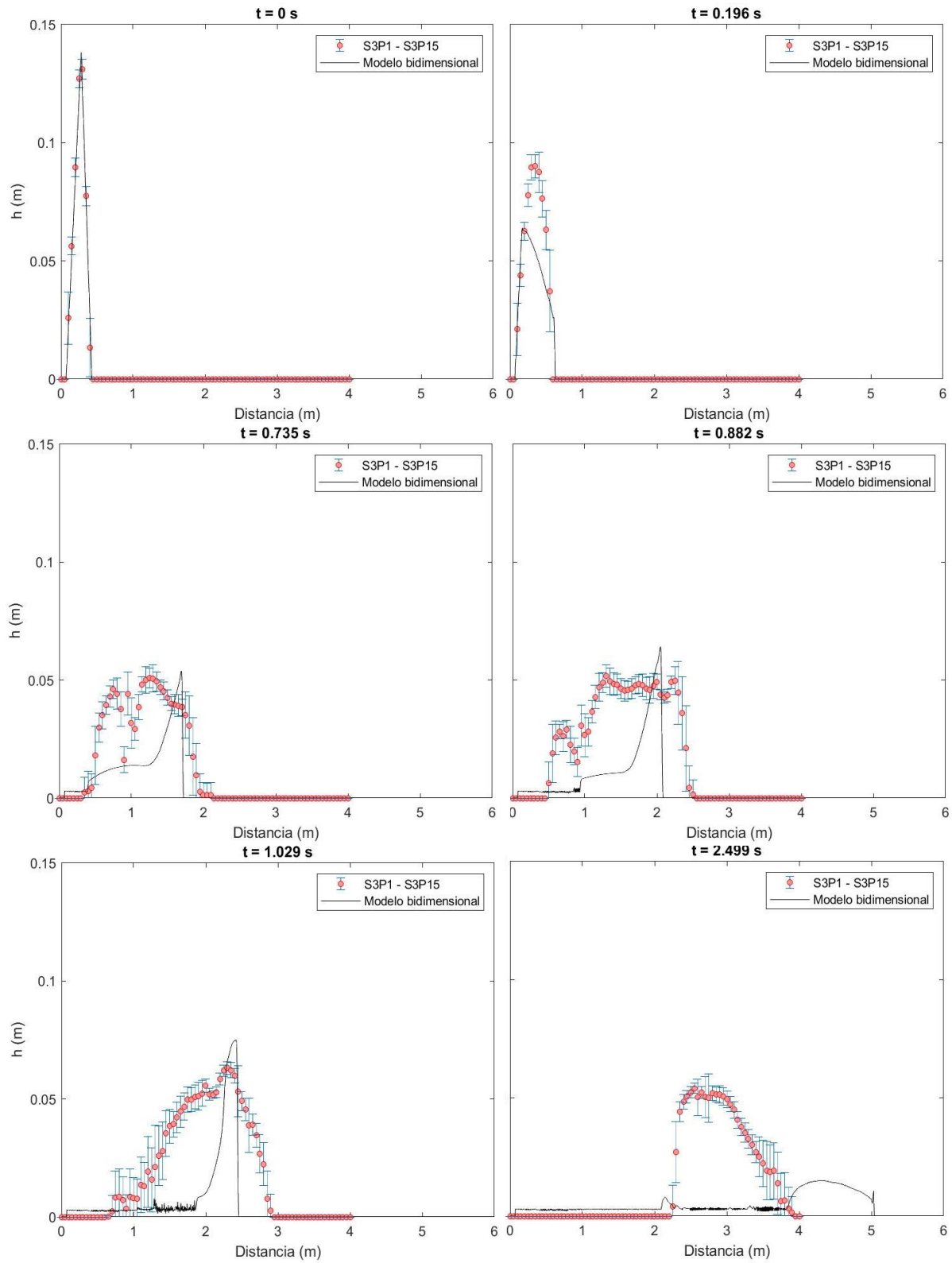


Figura 22. Comparación numérica y experimental de la evolución de un evento de deslizamiento en el canal de flujo: Pre

– Calibración

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Como se aprecia en el capítulo 7, el modelo es notablemente más sensible ante cambios en los ángulos de fricción ϕ_{bed} y ϕ_{int} . Por lo tanto, se plantea una estrategia de calibración que modifica dichos parámetros para compensar el alcance de la simulación. Es decir, se modifican los parámetros ϕ_{bed} y ϕ_{int} conforme cambia el ángulo de inclinación de la base del canal, como se puede apreciar en la Figura 23. En este caso se aumentan los parámetros en un 85 % obteniendo una reducción del 80 %.

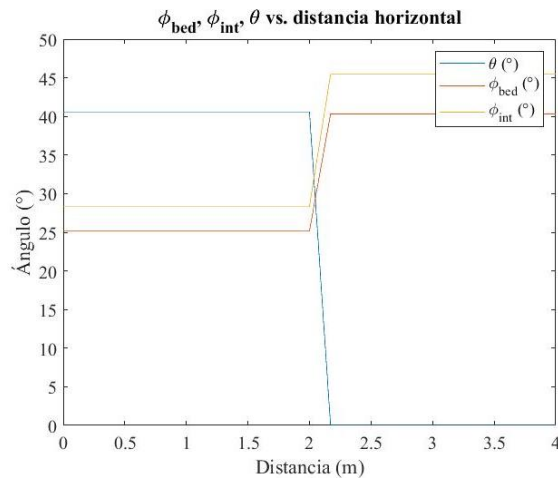


Figura 23. Calibración de los parámetros ϕ_{bed} y ϕ_{int}

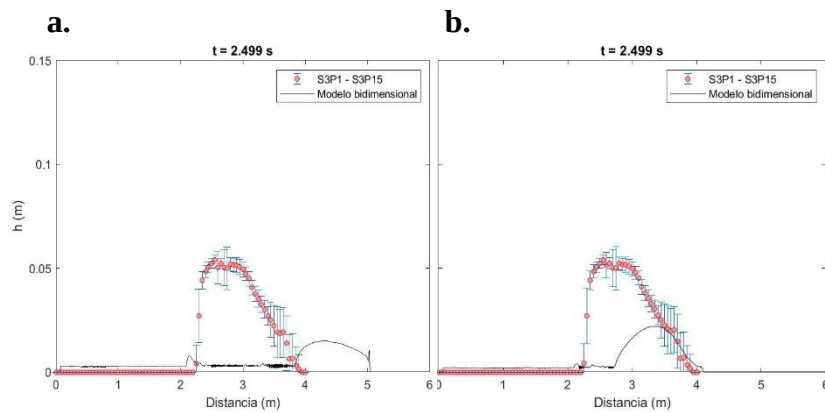


Figura 24. Comparación del alcance experimental con: **a.** Modelo sin calibrar **b.** Modelo calibrado

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

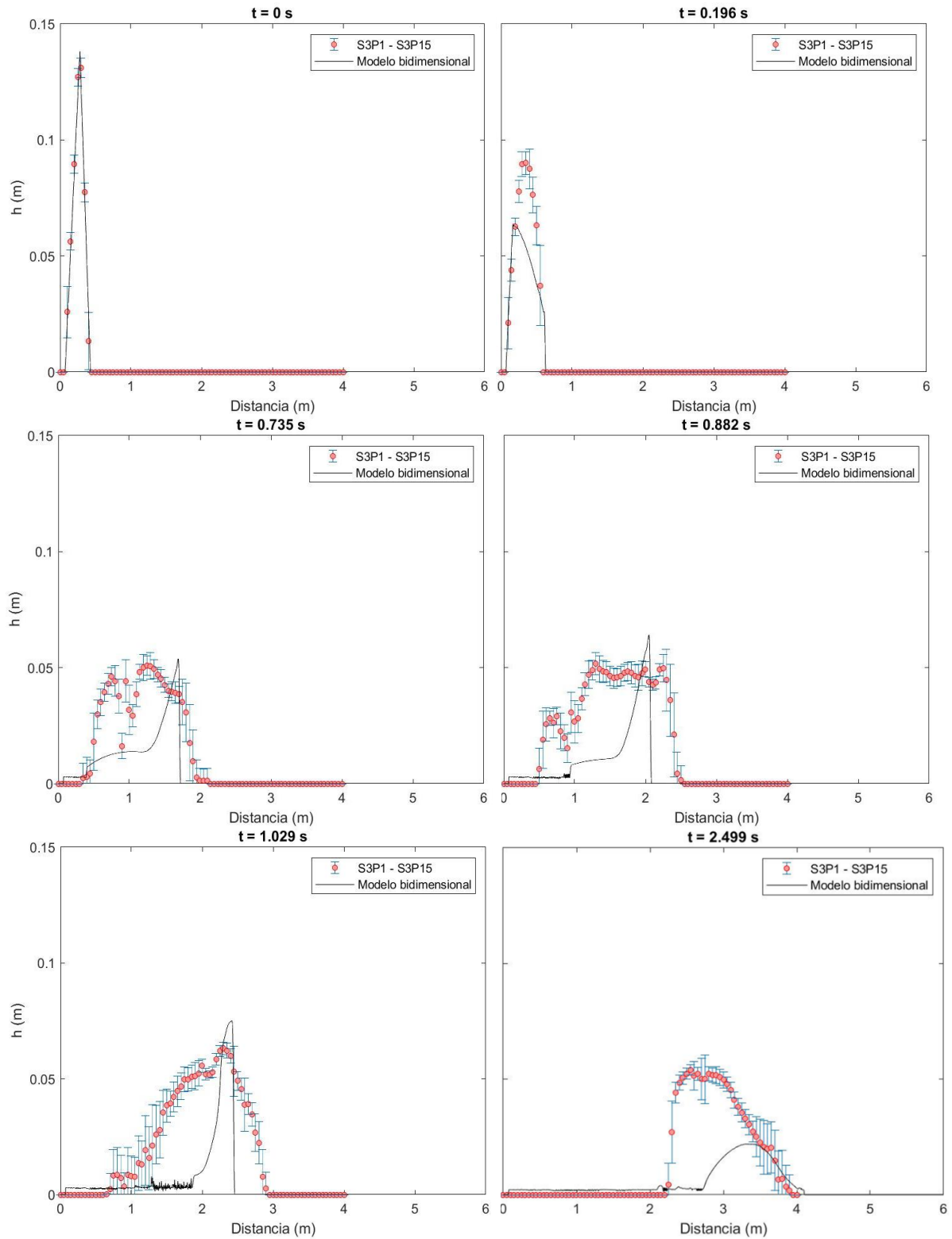


Figura 25. Comparación numérica y experimental de la evolución de un evento de deslizamiento en el canal de flujo: Post

– Calibración

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

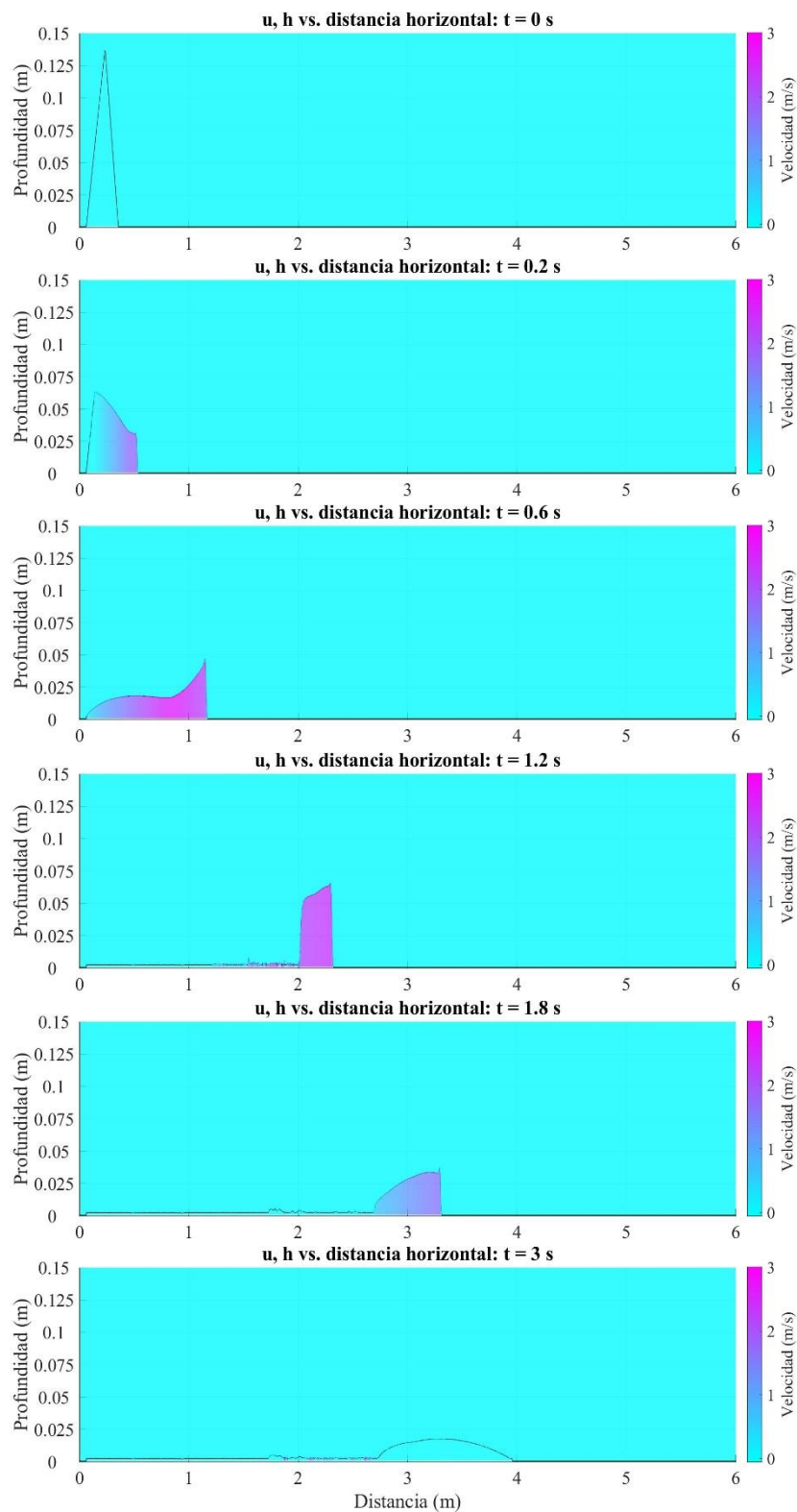


Figura 26. Desarrollo de la respuesta del modelo (alturas y velocidades) para el modelo calibrado

Mediante el proceso de calibración se aumentan progresivamente los ángulos de fricción hasta llevarlos a un 85 % de su valor inicial, con lo cual se lleva al frente de onda de la respuesta numérica a coincidir con el frente de onda de los datos del bloque S3P1 – S3P15 (lo cual representa finalmente una reducción de un 80 % del alcance de la simulación); en la Figura 24 se puede observar el resultado final del alcance logrado mediante el modelo calibrado. Es importante anotar que la reproducción de las alturas en el frente de onda coincide de manera bastante satisfactoria con el modelo calibrado, pero que se sigue observando su imposibilidad de reproducir fielmente la reproducción de profundidades a lo largo del dominio.

Finalmente, una vez calibrado el modelo, la respuesta numérica completa de las ecuaciones propuestas en este estudio se compone de un par numérico de profundidad y velocidad, las cuales se encuentran matemática y físicamente acopladas mediante las teorías de conservación de la masa y el momentum lineal expuestas previamente. Por lo tanto, al calibrar la respuesta para una variable, se considera que la respuesta total se encuentra calibrada. En la Figura 26 se muestra la respuesta completa para la simulación el evento experimental.

9. Caso de estudio: Deslizamiento en la vía Lebrija – Girón, Santander

Para realizar un análisis comparativo, en términos aplicados, entre el modelo descrito en las secciones 3, 4 y 5, y el modelo de deslizamiento en bloque uniparámetro descrito por la ecuación (2.2), se elige un deslizamiento ubicado en la vía Lebrija – Girón a la altura del K6

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

+ 500. En la Figura 27 se aprecia una imagen de la vista frontal del sitio donde ocurrió el deslizamiento. Para la realización de ésta fase se contó con el apoyo del grupo de investigación Geomática, de la escuela de Ingeniería Civil y de un grupo de estudiantes coinvestigadores, quienes llevaron a cabo su proyecto de grado en la modalidad de investigación con base en el caso aquí expuesto (Silva Ardila & Reyes Chinchilla, 2018).

El evento en cuestión está canalizado por paredes del mismo material del suelo como se evidencia en la Figura 27, lo que lo lleva a tener una dirección de flujo predominante a lo largo del drenaje natural. Se puede decir que la última actividad del deslizamiento en cuestión puede estar entre 1 y 5 años según la calidad de la vegetación observada y además que la última región o el volumen deslizado se encuentra claramente en la corona del talud, donde el cambio en la coloración del material y la geoforma observada da cuenta del segmento desprendido.



Figura 27. Deslizamiento en la vía Girón-Lebrija

Fuente: (Silva Ardila & Reyes Chinchilla, 2018)

9.1. Toma de datos en campo

El proceso de medición y toma de datos en campo consiste en obtener datos tanto del material como de la topografía del terreno. En primer lugar, para las mediciones topográficas se emplean dos herramientas: un escáner láser terrestre y un vehículo aéreo no tripulado (VANT), las especificaciones de los equipos y de los procesos de toma de datos se encuentran en el Anexo 8. También se realiza el procedimiento para toma de densidades en campo, mediante el uso del cono de arena aplicando el procedimiento descrito en la NTC 1667.

Con el escáner láser terrestre se realizan 3 estaciones frente al sitio para recoger la mayor cantidad de información de interés que sea posible. De igual manera se realizan tres tomas de densidades a lo largo del deslizamiento, así como la recolección de material subsuperficial de entre 15 cm y 30 cm de la superficie. En la Figura 28 se muestra la ubicación de las estaciones topográficas y de los puntos de medición de densidades y de toma de muestras. Por otra parte, con el VANT se hace un recorrido de aproximadamente 300000 m² para recolectar fotografías de la zona con el fin de realizar de un ortomosaico, como se explica en la siguiente sección.

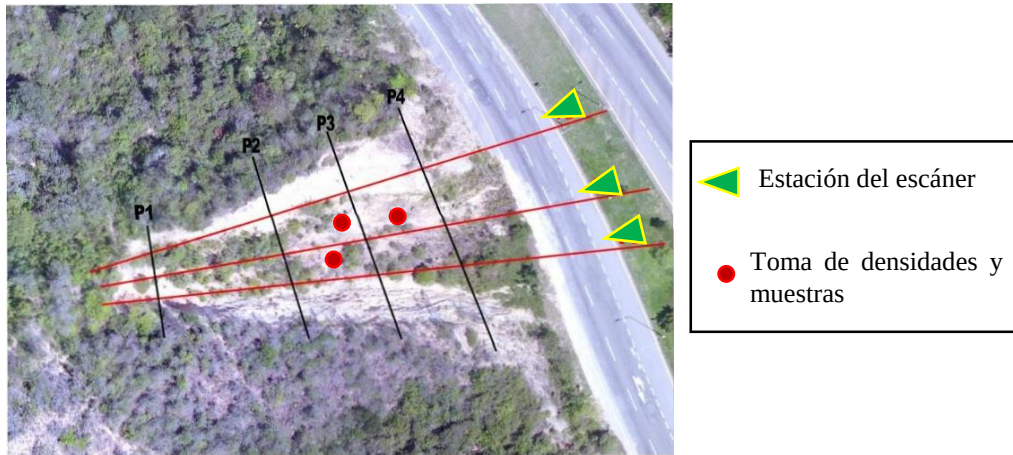


Figura 28. Localización relativa en planta de las estaciones de medición y los puntos de toma de muestras

9.2. Procesamiento de datos

En esta sección se presenta la información obtenida mediante el proceso de análisis de datos obtenido a partir de las mediciones en campo y de ensayos de laboratorio aplicados sobre las muestras del material recolectado. El procesamiento de datos comprende, como se ha dicho previamente, la obtención de la topografía del terreno a partir de los levantamientos descritos en la sección 9.1, la obtención de las densidades a partir del ensayo de cono de arena realizado *in situ* según los lineamientos de la norma INV E – 161, pero además la clasificación del suelo muestreado mediante la carta de Casagrande, con base en las normas INV E – 125 (para el Límite Líquido) e INV E – 126 (para el Límite Plástico y el Índice de Plasticidad) y la obtención de ciertos parámetros de interés como el ángulo de fricción del suelo, con base en el ensayo de corte directo cuyo procedimiento se describe en la norma INV E – 154.

En primer lugar, como se ha mencionado anteriormente, mediante el VANT se realiza un proceso fotogramétrico que permite estudiar el contexto del sitio específico de interés, con

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

dichas fotografías se construye un ortomosaico que muestra, en contexto, el área de estudio. En la Figura 29 se muestra el ortomosaico obtenido del proceso de fotogrametría. De allí se observan geoformas que evidencian que el movimiento se ha presentado en varias etapas, el que está bajo estudio en el presente documento está claramente encerrado entre la corona y el carril derecho de la vía, como se ha hipotetizado en la Figura 32.



Figura 29. Ortomosaico del área de estudio con detalles de la vía existente Lebrija – Girón

Fuente: (Silva Ardila & Reyes Chinchilla, 2018)

Vale la pena resaltar que, si bien el ortomosaico abarca un área considerable, no es recomendable hacer mediciones sobre el Modelo de Elevación Digital generado a partir de este método. Por lo tanto, se usa la nube de puntos obtenida por medio de del escáner láser terrestre. En la Figura 33 se muestran algunas dimensiones características extraídas a partir de la nube de puntos.

Por otra parte, del levantamiento con escáner láser se obtiene una nube de puntos que replica la topografía del lugar concentrada en la región de interés. Mediante el uso de un

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

software SIG se obtiene información de la elevación y el relieve relativo de la región mapeada. En la Figura 30 se observan los puntos tomados de la región de interés con información referente al relieve y la elevación.

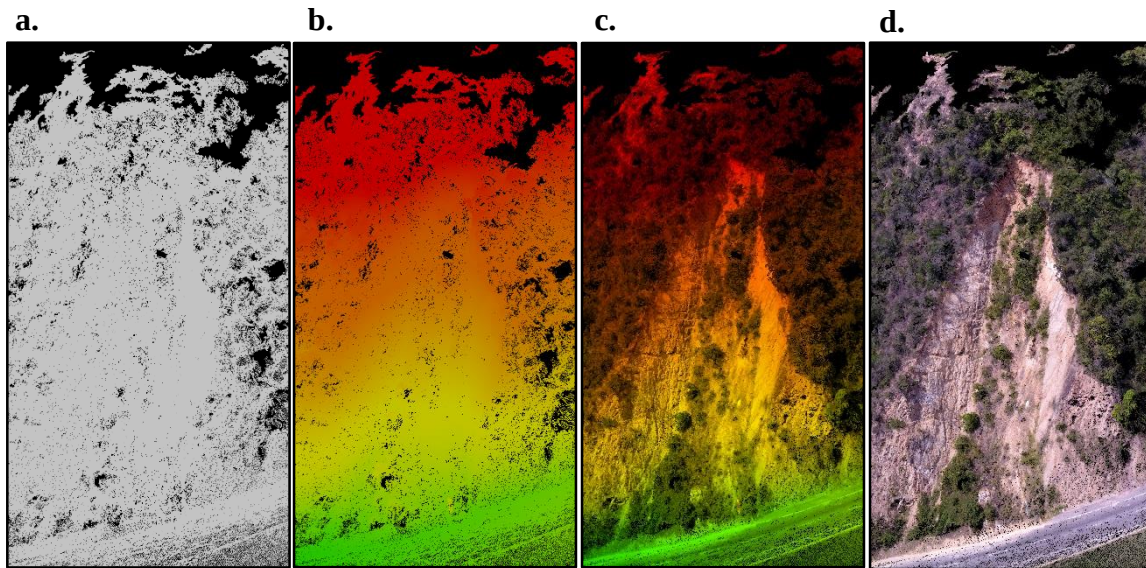


Figura 30. Nube de puntos: a. Puntos únicamente b. Puntos con información de elevación c. Puntos con elevación y relieve d. puntos con relieve

Considerando que el volumen desplazado en el último evento corresponde a la superficie de la corona del talud, cuyo límite se aprecia claramente por el cambio entre colores terracota (en la corona) y un naranja más pálido (en el resto), se estima dicho volumen desplazado en el evento de deslizamiento cubicando entre la zona de origen y el límite en mención, empleando las medidas de la nube de puntos.

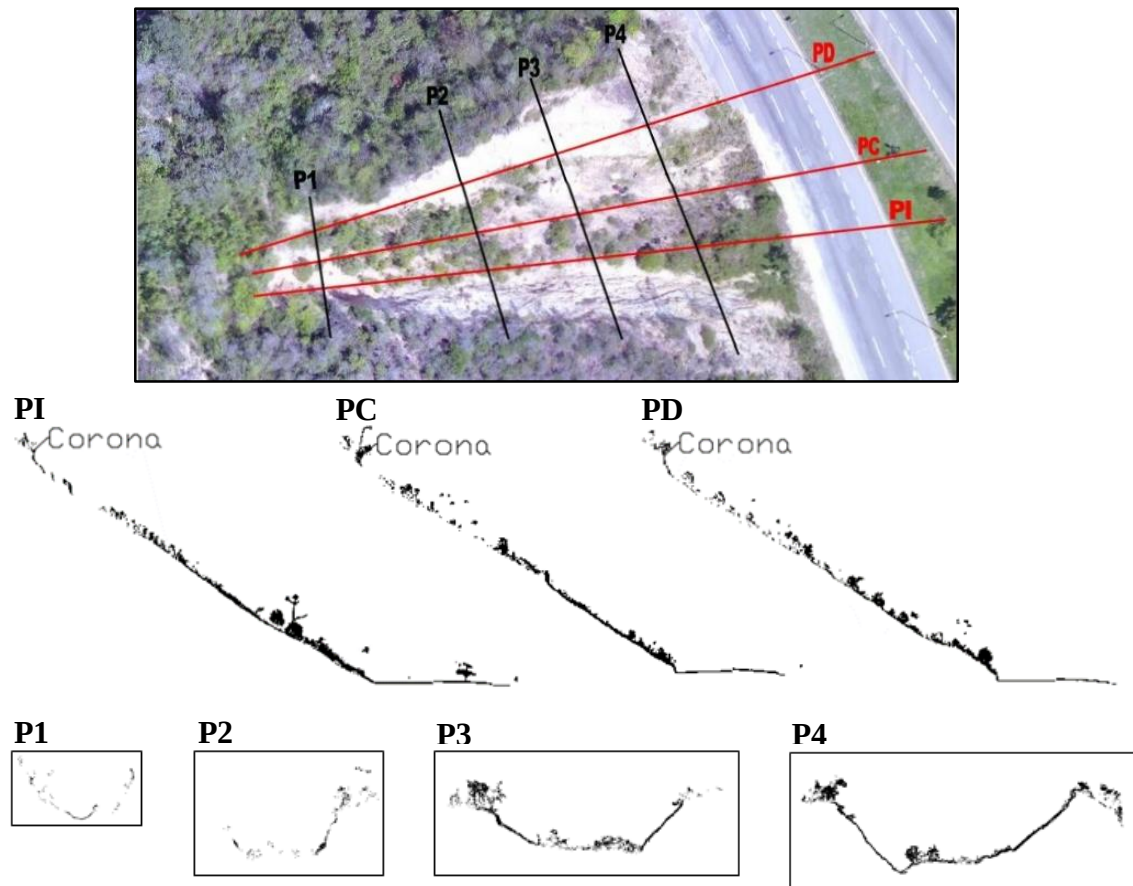


Figura 31. Ubicación en planta y los perfiles obtenidos a partir de la nube de puntos

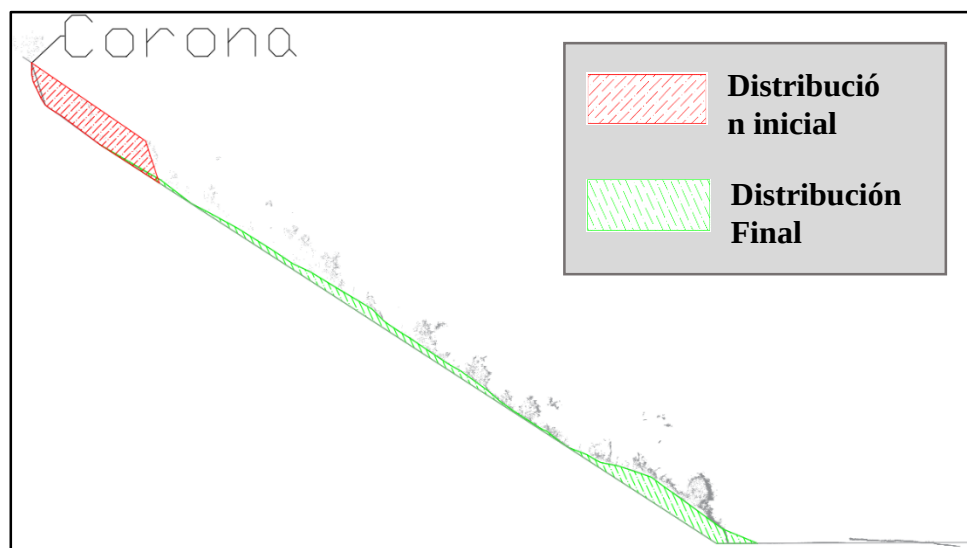


Figura 32. Hipótesis de deslizamiento del material en sus posiciones inicial y final

El volumen desplazado se estima en 338 m^3 aproximadamente. Para efectos de obtención de datos topográficos que sean replicables en la comparación con el modelo numérico se simplifican las medidas del deslizamiento generando una serie de perfiles longitudinales y transversales para tal fin. Por lo tanto, se generan 3 perfiles longitudinales y 4 perfiles transversales. La ubicación de los perfiles obtenidos y los perfiles en sí se observa en la Figura 31. A partir de la información de los perfiles, específicamente usando el perfil central (PC), se realiza la hipótesis de movimiento del material, obteniendo así la distribución de alturas a lo largo del PC, para los tiempos inicial y final, como lo muestra la Figura 32.

9.3. Comparación con resultados numéricos

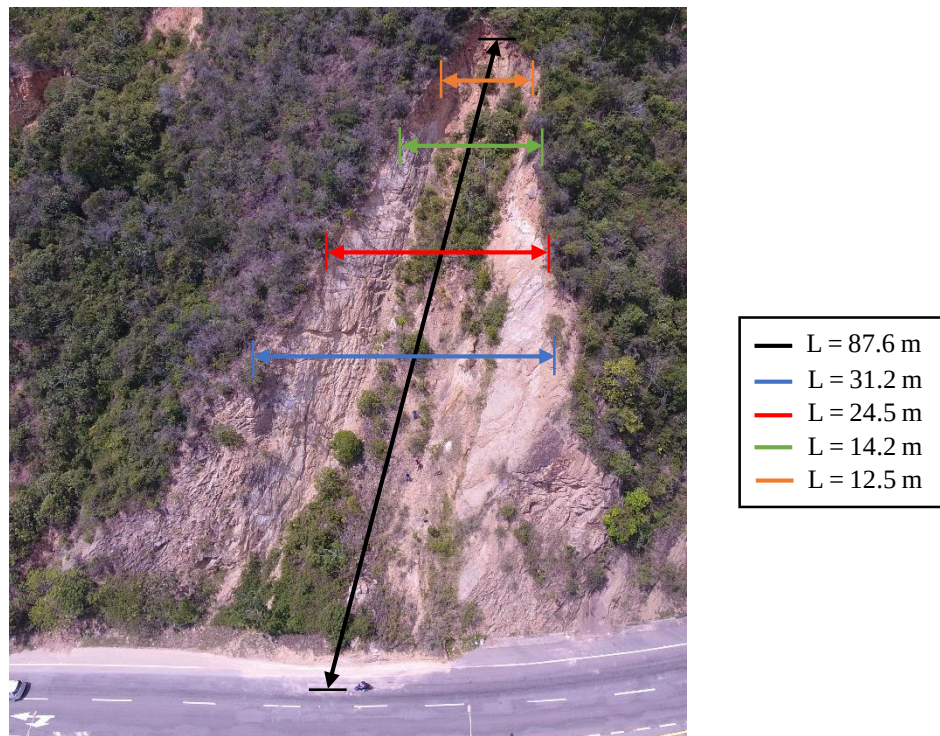


Figura 33. Dimensiones características del lugar donde se presentó el deslizamiento

Retomando lo dicho anteriormente, lo más probable es que este talud haya presentado varios eventos de inestabilidad en el pasado, en el presente estudio se hipotetiza sobre el último evento. Para ello se procede a identificar la condición de inicio del fenómeno. Se identifica la zona de falla en la corona del talud; visualmente se puede apreciar que el material del suelo tiene una tonalidad más rojiza por lo cual se infiere que allí habría material antes del evento. Paso seguido se identifica la zona de depósito frontal del material, con lo que se identifica el alcance del material. En la Figura 34 se identifican gráficamente tales dos zonas. Una vez identificadas y definidas (ver en la Figura 35 la distribución de alturas) la condición inicial y final del deslizamiento, se procede a realizar el análisis numérico desde dos puntos de vista: mediante el deslizamiento en bloque y mediante el modelo bidimensional desarrollado en el presente documento.

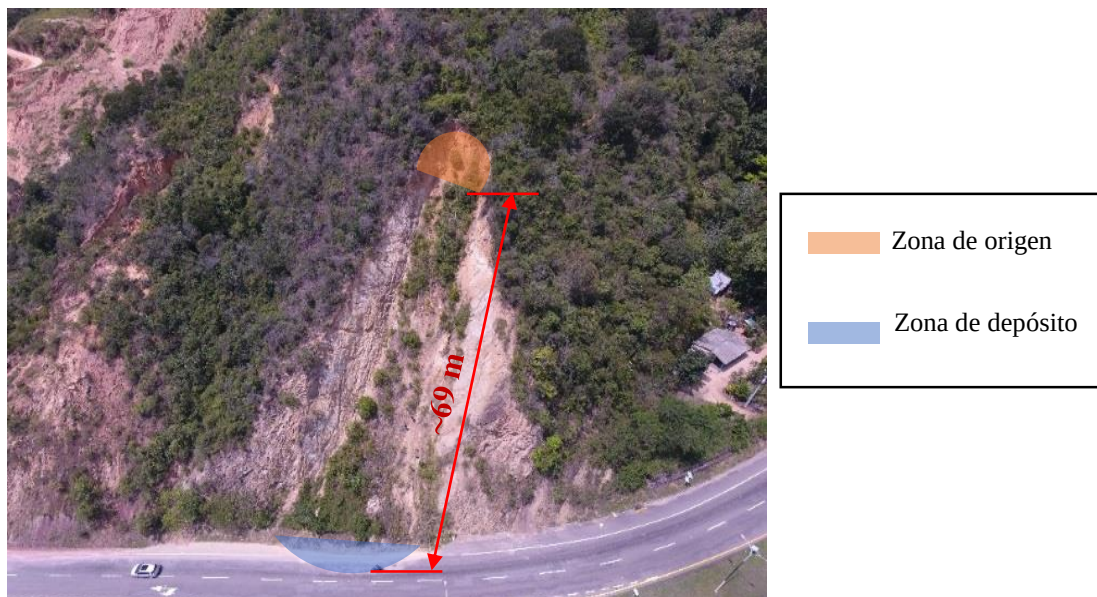


Figura 34. Desplazamiento del frente del material en el deslizamiento

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

El modelo de deslizamiento en bloque, como su nombre lo indica, plantea que el material que se desliza pendiente abajo conserva su forma de bloque, por lo tanto, el desplazamiento que retorna la aplicación de dicho modelo es en sí la medida entre el frente del material en las condiciones inicial y final como se aprecia en la Figura 34.

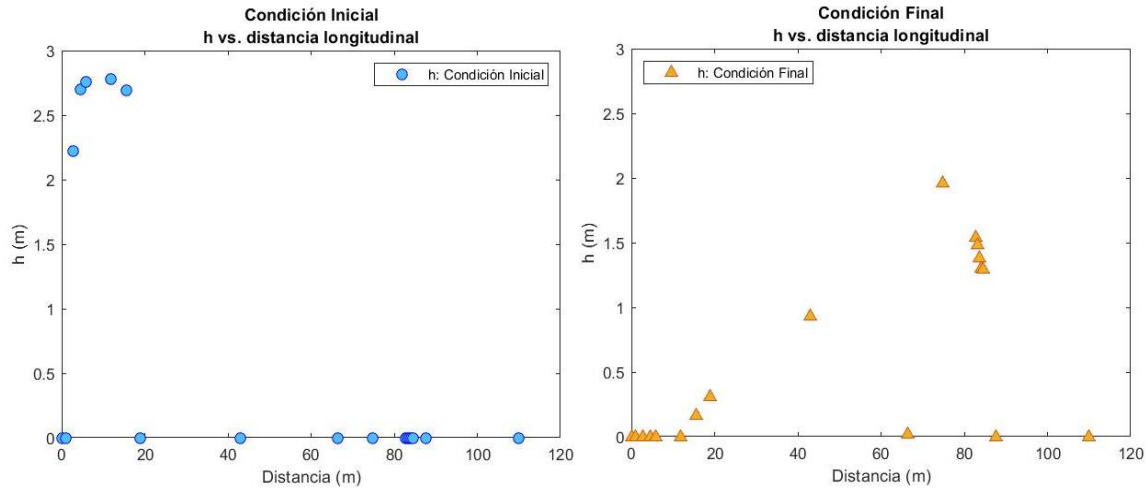


Figura 35. Espesores de material en las condiciones inicial y final para el deslizamiento de la vía Lebrija – Girón

El modelo de deslizamiento en bloque aquí planteado es el modelo Uniparamétrico (Román Quintero & Chio Cho, 2018) descrito mediante la ecuación (2.2), cuya solución se presenta en la ecuación (9.1). Los detalles de la solución de la ecuación (2.2) se encuentran en el Anexo 9. Los parámetros físicos de entrada del modelo se enuncian en la Tabla 18.

$$u = \sqrt{2g(x \tan \theta - x \tan \varphi_{bed}) + u_{ini}^2} \quad (9.1)$$

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Tabla 18. Parámetros físicos para el modelo de deslizamiento en bloque

Parámetro	Valor
Ángulo de fricción, φ_{bed} (°)	30.85
Ángulo de inclinación de la ladera, θ (°)	34.60
Aceleración de la gravedad, g (m/s^2)	9.81
Velocidad inicial, u_{ini} (m/s)	0

En la Figura 36 se muestran, de manera comparativa, los resultados de la simulación mediante la implementación del modelo de deslizamiento en bloque Uniparamétrico (Román Quintero & Chio Cho, 2018) y los espesores (h) del material en las condiciones inicial y final.

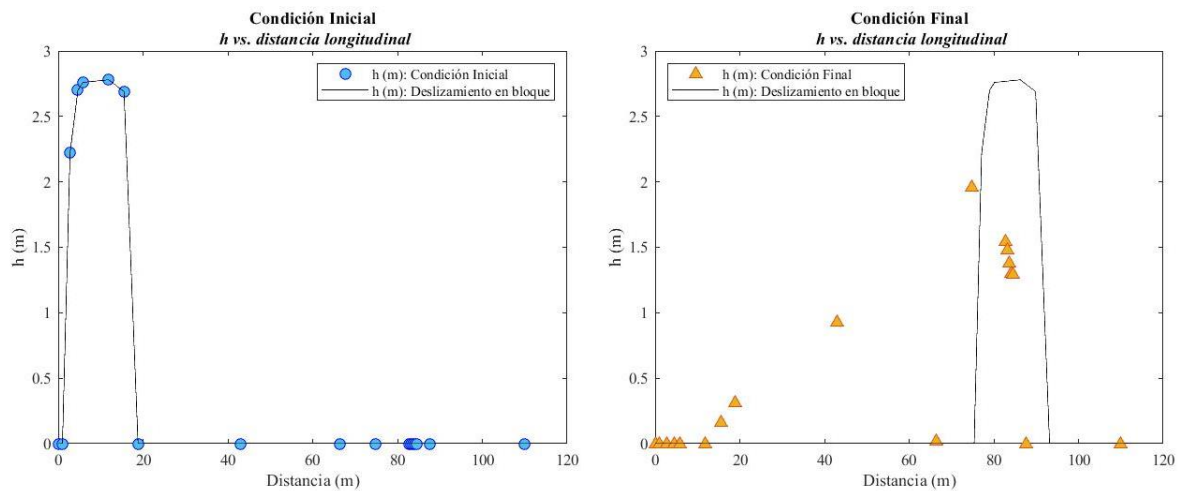


Figura 36. Comparación de los estados inicial y final entre las profundidades reales y las simuladas mediante el modelo de deslizamiento en bloque

Por otra parte, se realiza un análisis paralelo con el modelo de deslizamiento bidimensional propuesto y desarrollado en las secciones 3, 4 y 5, y calibrado según se

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

describió en la sección 8.4. Para ello se usan los parámetros físicos listados en la Tabla 19 y los parámetros numéricos que se encuentran en la Tabla 20.

Desde el punto de vista numérico este modelo se vuelve bastante exigente debido a que, si bien es un deslizamiento pequeño desde el punto de vista práctico, el modelo exige un delta de longitud de entre 1 y 2 cm para asegurar la reducción del error numérico hasta niveles aceptables. Por lo tanto, se usan 8800 nodos para reproducir un dominio computacional de 110 m, lo cual significa que para cada variable va a existir un sistema de ecuaciones equivalentes de $77.4 \cdot 10^6$ elementos, los cuales, a su vez, se resuelven tantas veces como lo indica el algoritmo de solución para cada milisegundo, por lo que se requiere un equipo con capacidad de memoria RAM mayor a 16 GB y preferiblemente un procesador de última generación para agilizar el cálculo. El cómputo se lleva a cabo en una estación de trabajo con 32 GB de RAM y procesador Intel XEON de 4 núcleos.

Tabla 19. Parámetros físicos de entrada para el modelo de deslizamiento bidimensional

Parámetro	Valor
Ángulo de fricción en la base, φ_{bed} (°)	30.85
Ángulo de fricción interno, φ_{int} (°)	30.85
Fracción de volumen sólido, v_s	0.6
Fracción de volumen fluido, v_f	0.4
Densidad de la mezcla, ρ (kg/m ³)	1462
Viscosidad del fluido, μ (Pa · s)	0.1

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

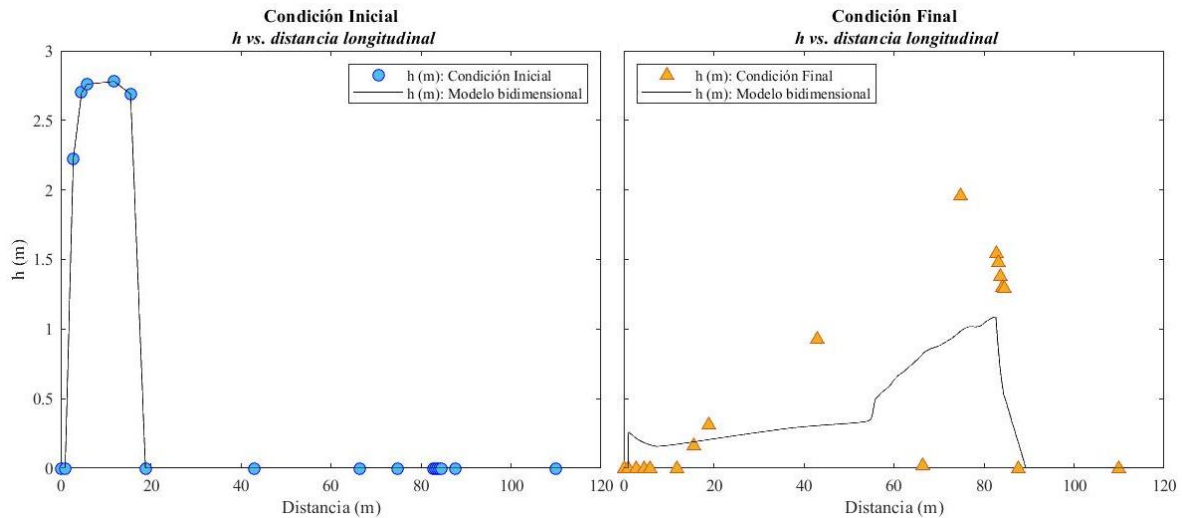


Figura 37. Comparación de los estados inicial y final entre las profundidades reales y las simuladas mediante el modelo de deslizamiento bidimensional

En este caso el modelo encuentra el reposo después de 6.64 segundos a una distancia de 89.32 m. En la Figura 37 se muestra gráficamente, la comparación entre las profundidades reales y las simuladas por el modelo bidimensional.

Tabla 20. Parámetros numéricos para la simulación mediante el modelo bidimensional

Parámetro	Valor
Número de nodos	8800
Delta de distancia	0.0125 m
Delta de tiempo	0.001 s
Número de ciclos correctores	3
Número máximo de iteraciones	1000
Error admisible para 'h'	0.0001 m
Error admisible para 'u'	0.0005 m/s

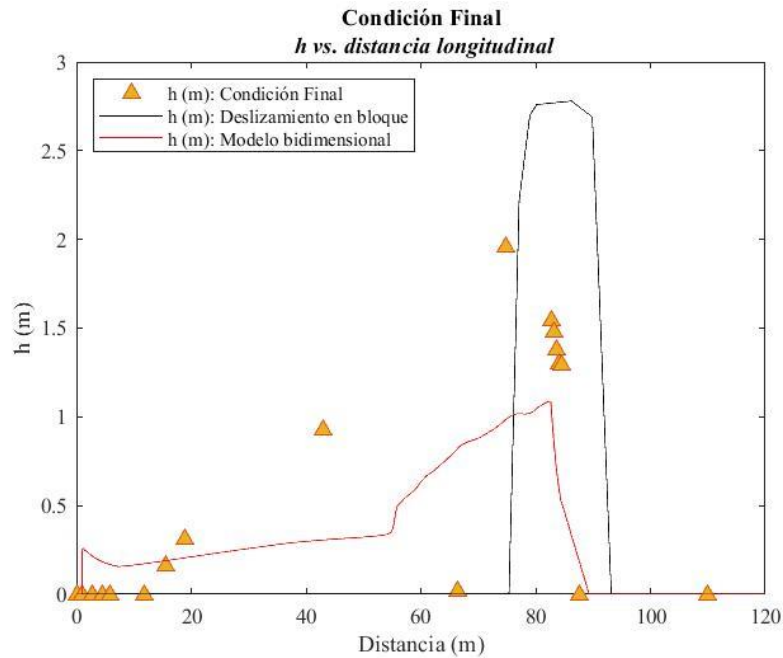


Figura 38. Comparación del estado final entre las profundidades reales y las simuladas mediante los modelos de deslizamiento en bloque y bidimensional

En la Figura 38 se aprecian de manera comparativa los datos de campo (puntos triangulares) y los dos modelos: modelo bidimensional (línea roja) y modelo de deslizamiento en bloque (línea negra)

10. Conclusiones, comentarios y recomendaciones

El modelo de deslizamiento bidimensional planteado en este estudio se ha solucionado mediante esquemas convencionales para la solución de sistemas de ecuaciones diferenciales parciales, empleados en el Método de Volúmenes Finitos. Sin embargo, el problema específico de flujo de escombros involucra un desafío característico desde el punto de vista físico y numérico: existen celdas ‘vacías’ antes y después del volumen inicial, lo cual pone en jaque la hipótesis fundamental de los medios continuos, y de por sí rompe la continuidad

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

numérica en los cálculos, sin embargo se ha encontrado que las invariantes del sistema de ecuaciones equivalen a la respuesta para la interface entre aquellas celdas vacías y las que si tienen masa. También, los cambios súbitos de profundidad reportan tasas de cambio de las cantidades estudiadas en el dominio computacional que se vuelven complejas de simular por los esquemas de discretización planteados (*i.e.* QUICK, Diferencias Centrales, etc.), sobre todo para los cambios de dirección. Una solución al problema es reducir el tamaño del delta de distancia longitudinal. Sin embargo, hay que ser conservadores en éste aspecto, debido a que el error numérico tiene asociados dos estados de error fundamentales: aquel que tiene frecuencias bajas y amplitudes altas (asociado a mallas gruesas) y aquel que tiene frecuencias altas y amplitudes bajas (Wesseling, 1991). Una solución a este inconveniente puede ser dada por el cambio de esquemas numéricos, o bien por la mejora mediante técnicas multimalla.

Por otra parte, según la teoría existente en la literatura científica, las componentes de velocidad transversal a la dirección de momentum principal son despreciables (Denlinger & Iverson, 2001), sin embargo, dichas interacciones pueden jugar un papel importante en la estabilización o equilibrio estático del sistema; por lo tanto la comprobación de dicha hipótesis da lugar a futuros análisis.

Otro aspecto importante por resaltar es que el montaje experimental del canal de flujo intenta disminuir la interacción friccional entre el material granular y las paredes del canal mediante la lubricación con aceite de baja densidad de las paredes antes de cada ensayo. Sin embargo, la interacción o influencia de las paredes del canal sobre el régimen colisional del flujo será objeto de futuros análisis.

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

El movimiento reportado en el caso de estudio planteado en el capítulo 9, plantea a su vez una hipótesis de deslizamiento que se basa en las geoformas observadas *a posteriori* en el análisis de fotogramas obtenidos en campo; con base en esto se idealiza una superficie de deslizamiento lineal que simula la base de un canal y no se han empleado fuentes de pérdida de energía adicionales.

Una vez dicho lo anterior se puede concluir que el modelo de Iverson y Denlinger aplicado en 2D, puede ser solucionado empleando los esquemas convencionales de solución numérica mediante el Método de Volúmenes Finitos y que con deltas de longitud y tiempo lo suficientemente pequeños puede llegar a simular eventos de flujo con errores numéricos admisibles en la respuesta. Como se puede observar tras la comparación de resultados de simulación, en contraste con datos experimentales del canal de flujo Collapses V1.0, el modelo numérico es capaz de simular las profundidades de flujo en los frentes de onda, pero la respuesta se aleja de las medidas experimentales en la cola del deslizamiento. Sin embargo, en la parte horizontal del canal de flujo, el modelo bidimensional presenta un índice de movilidad mayor a los resultados experimentales, por lo tanto es necesario un proceso de calibración para compensar las simplificaciones realizadas al modelo de Iverson y Denlinger; en el capítulo 8.4 se muestra dicho proceso de calibración, con el fin de llevar la respuesta numérica a mayor precisión en términos de alcance. En el presente estudio se presenta un proceso de calibración sencillo, modificando los parámetros sensibles del modelo, sin embargo, vale la pena aplicar procesos de calibración más elaborados para garantizar la generalidad del modelo. Finalmente, comparando el modelo bidimensional propuesto en comparación con el modelo de deslizamiento en bloque presentado en la Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa del Servicio

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Geológico Colombiano (Ávila et al., 2015), en un caso de estudio que involucra un deslizamiento real, se evidencia que el modelo bidimensional tiene mejores resultados que el modelo de deslizamiento en bloque pero que subestima los espesores en la condición final de flujo. De cualquier modo, es notorio que a pesar de que el modelo de deslizamiento en bloque es un modelo bastante simple, la respuesta obtenida es bastante satisfactoria para el caso específico.

Referencias bibliográficas

- Anderson, J., Degrez, G., Degroote, J., Dick, E., Grundmann, R., & Vierendeels, J. (2009). *Computational Fluid Dynamics: An Introduction*. (J. F. Wendt, Ed.) (Third). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Atkin, R. J., & Craine, R. E. (1976). Continuum theories of mixtures: Basic theory and historical development. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 29(2), 209–244. <https://doi.org/10.1093/qjmam/29.2.209>
- Ávila, G. E., Cubillos, C. E., Granados, A. E., Bello, E., Rodríguez, É. A., Rodríguez, C. E., & Ruiz, G. L. (2015). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. (V. E. Buitrón Paz & M. J. Molina Ochoa, Eds.). Bogotá D.C.: Servicio Geológico Colombiano.
- Banco Mundial. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas*. (A. Campos G., N. Holm-Nielsen, C. Díaz G., M. D. Rubiano V., C. R. Costa P., F. Ramírez C., & E. Dickson, Eds.), *Sistema Nacional de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres*. Bogotá. <https://doi.org/333.3109861/A56>
- Cohen, J. (1988a). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (Second Edi). New York: Lawrence Erlbaum Associates.
- Cohen, J. (1988b). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (Second). Lawrence Erlbaum Associates. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1210.1833v0><http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24553217>
- Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 260–271.

- Denlinger, R. P., & Iverson, R. M. (2001). Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 2. Numerical predictions and experimental tests. *Journal of Geophysical Research*, 106(B1), 553. <https://doi.org/10.1029/2000JB900330>
- Endo, K., Sumita, M., Machida, M., & Furuichi, M. (1986). The 1984 collapse and debris avalanche deposits of Ontake volcano, central Japan. In *Proceedings of the International Volcanological Congress* (pp. 210–229). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-73759-6>
- Fannin, R. J., & Wise, M. P. (2001). An empirical-statistical model for debris flow travel distance. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 982–994. <https://doi.org/10.1139/cgj-38-5-982>
- Finlay, P. J., Mostyn, G. R., & Fell, R. (1999). Landslide risk assessment: prediction of travel distance. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(3), 556–562. <https://doi.org/10.1139/t99-012>
- Glicken, H. (1996). Rockslide-debris avalanche of may 18, 1980, Mount St. Helens volcano, Washington. *Open-File Report 96-677*, 1–5.
- Hungr, O., Corominas, J., & Eberhardt, E. (2005). Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity. In O. Hungr, R. Fell, R. Couture, & E. Eberhardt (Eds.), *Landslide risk management* (pp. 99–128). London: Taylor and Francis Group.
- IDEAM. (2012). *Metodología Para La Zonificación De Susceptibilidad General Del Terreno a Los Movimientos En Masa*. Bogotá (Vol. 1). Retrieved from www.ideam.gov.co
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245–296. <https://doi.org/10.1029/97RG00426>
- Iverson, R. M., Costa, J. E., & LaHusen, R. G. (1992). Debris-flow flume at H.J. Andrews Experimental Forest, Oregon. *USGS Open-File Report 92-483*, 2–3.

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

- Iverson, R. M., & Denlinger, R. P. (2001). Flow of variably fluidized granular masses across three dimensional terrain 1. Coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research*, 106, 537–552. <https://doi.org/10.1029/2000JB900329>
- Iverson, R. M., Logan, M., & Denlinger, R. P. (2004). Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 2. Experimental tests. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 109(F01015), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2003JF000085>
- Kojan, E., & Hutchinson, J. N. (1978). Mayunmarca rockslide and debris flow, Peru. In B. Voight (Ed.), *Rockslides and avalanches* (pp. 315–361). Amsterdam: Elsevier. Retrieved from [https://books.google.com.co/books?id=DOx4Wy4sh-QC&lpq=PA315&ots=RL9c6zpCdG&dq=Mayunmarca rockslide and debris flow&lr&hl=es&pg=PA315#v=onepage&q=Mayunmarca rockslide and debris flow&f=false](https://books.google.com.co/books?id=DOx4Wy4sh-QC&lpq=PA315&ots=RL9c6zpCdG&dq=Mayunmarca+rockslide+and+debris+flow&lr&hl=es&pg=PA315#v=onepage&q=Mayunmarca+rockslide+and+debris+flow&f=false)
- Körner, H. J. (1976). Reichweite und Geschwindigkeit von Bergstürzen und Fliefschneelawinen. *Rock Mechanics*, 8, 225–256.
- McDougall, S., & Hungr, O. (2004). A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(6), 1084–1097. <https://doi.org/10.1139/t04-052>
- Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2016). *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics - An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab*. Springer (Vol. 113). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6>
- Pirulli, M. (2005). *Numerical Modelling of Landslides RunOut*. PhD thesis. Politecnico Di Torino, Italy.
- Remolina Reyes, G. A. (2018). *Estudio experimental del fenómeno de remoción de masas empleando el canal de flujo Collapses del grupo de investigación INME*. Universidad

Industrial de Santander.

Roman, D. C. (2017). *Informe técnico: Análisis experimental del movimiento del fenómeno de remoción de masas en materiales granulares*. Bucaramanga.

Román, D. C., & Ruiz, I. T. (2015). *Modelamiento del fenómeno de remoción de masas mediante la implementación de un modelo de deslizamiento en bloque*. Universidad Industrial de Santander, Colombia.

Román Quintero, D. C., & Chio Cho, G. (2018). Análisis de modelos de deslizamiento en bloque para predecir el comportamiento dinámico del fenómeno de remoción en masa: Modelo Uniparamétrico y Modelo Biparamétrico. *Revista Boletín de Geología*, 40(2), 113–124. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n2-2018007>

Rowley, P. D., Kuntz, M. A., & Macleod, N. S. (1981). *Pyroclastic - Flow deposits made on The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington*.

Savage, S. B. (1984). *The Mechanics of Rapid Granular Flows. Advances in Applied Mechanics* (Vol. 24). [https://doi.org/10.1016/S0065-2156\(08\)70047-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2156(08)70047-4)

Savage, S. B., & Hutter, K. (1989). The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *J. Fluid Mech.*, 199(1), 177. <https://doi.org/10.1017/s0022112089000340>

Scheidegger, A. E. (1973). On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mechanics*, 5(4), 231–236. <https://doi.org/10.1007/BF01301796>

Silva Ardila, E., & Reyes Chinchilla, M. F. (2018). *Estimación de las propiedades cinemáticas en un fenómeno de remoción de masa mediante la implementación de un modelo de deslizamiento tridimensional simplificado y un modelo de deslizamiento en bloque*. Universidad Industrial de Santander. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2004.3.66178>

Sousa, J., & Voight, B. (1991). Continuum Simulation of Flow Failures. *Geotechnique*,

41(4), 515–538. <https://doi.org/10.1680/geot.1991.41.4.515>

Suárez, J. (1998). *Deslizamientos Y Estabilidad De Taludes En Zonas Tropicales*. (Ingeniería de Suelos Ltda., Ed.), *Publicaciones UIS* (1st ed., Vol. 1). Bucaramanga: Publicaciones UIS. Retrieved from <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101.pdf>

Trujillo, M. G., & Ramos, A. M. (2012). Modelo para simulación de procesos de remoción en masa desagregados. comparación con el método de talud infinito. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 22(2), 25–37.

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Fluid flow handbook. McGraw-Hill ...* (Second). Pearson Education. Retrieved from <http://www.mie.utoronto.ca/labs/mussl/cfd20.pdf>

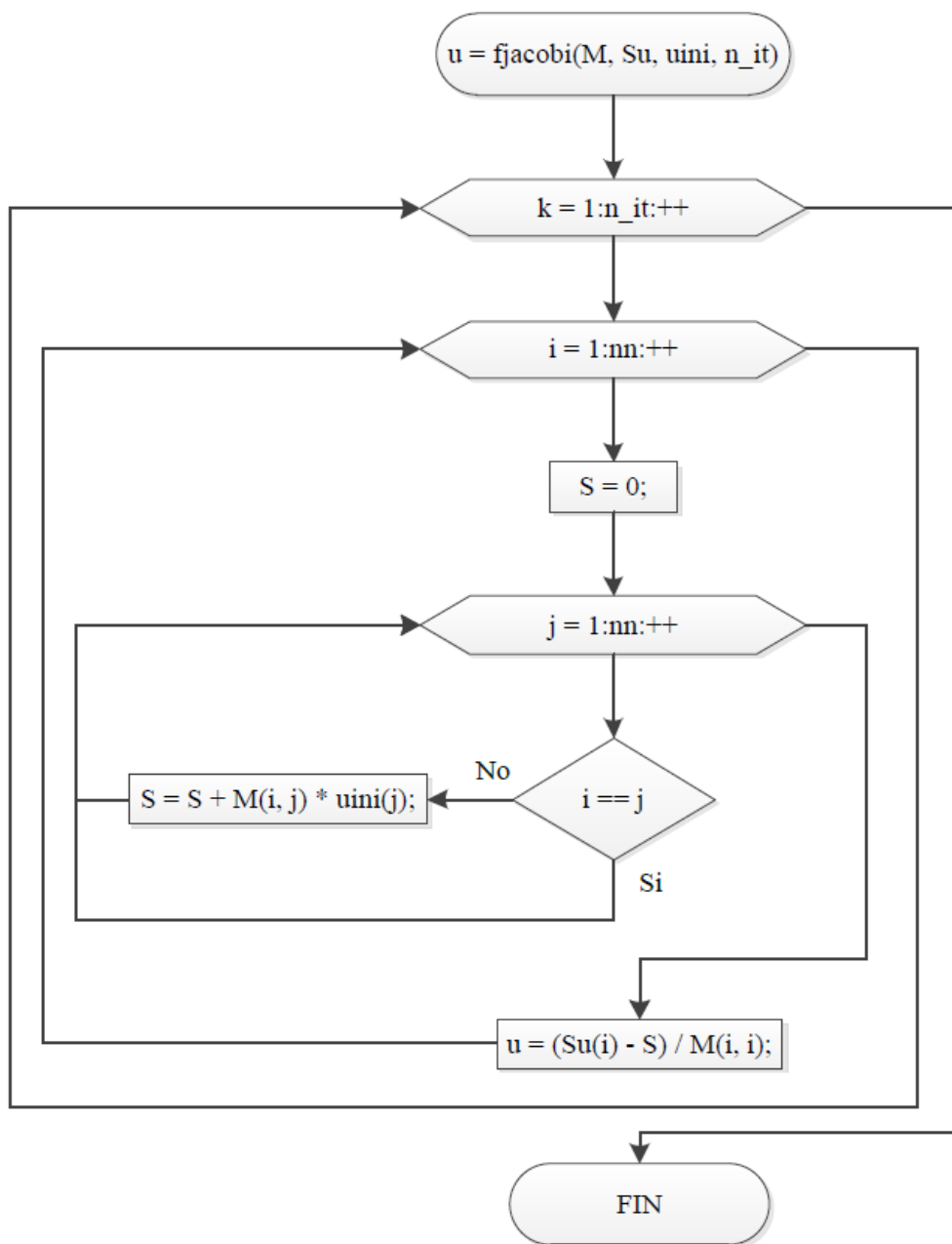
Voellmy, A. (1955). Über die Zerstörungskraft von Lawinen. *Schweizerische Bauzeitung*, 73(12), 159–165.

Wesseling, P. (1991). *Introduction to Multigrid Methods* (First Edit, Vol. i). Delft: John Wiley & Sons Ltd.

Wilson, L., & Head, J. W. (1981). *Morphology and rheology of pyroclastic flows and their depostits, and guidelines for future observations made on The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington*.

Anexo 1

Método de Jacobi



Anexo 2

A continuación, se muestra en detalle el proceso de discretización de la ecuación de momentum lineal.

Discretización del término transitivo

El término transitivo es el primer término de la ecuación (3.7), el cual denota el cambio de ‘ hu ’ en el tiempo. Empleando el esquema de Crank – Nicolson completamente implícito sobre este término (y sobre la ecuación en general) se obtiene lo expresado mediante la ecuación (10.1).

$$\int_{CV} \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial(hu)}{\partial t} dt dV = [(hu)_P - (hu)_P^0] \Delta x * A \quad (10.1)$$

Discretización del término convectivo

El término convectivo es el segundo término del lado izquierdo de la ecuación (3.7). Aplicando sobre él el teorema de Gauss (en la integral de volumen, naturalmente) y operando las integrales definidas entre las áreas (A_e y A_w) y en el tiempo, se obtiene lo expresado mediante la ecuación (10.2).

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \frac{\partial(hu)u}{\partial x} dV dt &= \int_t^{t+\Delta t} \int_{A_w}^{A_e} (hu)u dA dt \\ &= [(huA)_e u_e - (huA)_w u_w] \Delta t \end{aligned} \quad (10.2)$$

Se aproximan los términos de velocidad u_e y u_w mediante el esquema de discretización cuadrático QUICK, considerando que el flujo puede ser tanto positivo como negativo. La predicción de la dirección de flujo se hace por medio del parámetro α . Dicho parámetro se define mediante la función expresada en la ecuación (10.3).

$$\alpha = \begin{cases} 1 & , u > 0 \\ 0 & , u < 0 \end{cases} \quad (10.3)$$

Para el caso de flujo positivo ($u > 0$), las ecuaciones (10.4) y (10.5) expresan las aproximaciones de u_e y u_w respectivamente.

$$u_e = \frac{6}{8}u_E + \frac{3}{8}u_P - \frac{1}{8}u_W \quad (10.4)$$

$$u_w = \frac{6}{8}u_P + \frac{3}{8}u_W - \frac{1}{8}u_{WW} \quad (10.5)$$

Por su parte para el caso de flujo negativo ($u < 0$), las ecuaciones (10.6) (10.7) expresan las aproximaciones de u_e y u_w respectivamente.

$$u_e = \frac{6}{8}u_P + \frac{3}{8}u_E - \frac{1}{8}u_{EE} \quad (10.6)$$

$$u_w = \frac{6}{8}u_W + \frac{3}{8}u_P - \frac{1}{8}u_E \quad (10.7)$$

Fusionando las ecuaciones (10.4) y (10.5), y (10.6) y (10.7) se obtienen las ecuaciones que expresan u_e y u_w respectivamente.

$$u_e = \left(\frac{6}{8} - \alpha\frac{3}{8}\right)u_P + \left(\frac{3}{8} + \alpha\frac{3}{8}\right)u_E - \alpha\frac{1}{8}u_W - (1-\alpha)\frac{1}{8}u_{EE} \quad (10.8)$$

$$u_w = \left(\frac{3}{8} + \alpha\frac{3}{8}\right)u_P + \left(\frac{6}{8} - \alpha\frac{3}{8}\right)u_W - (1-\alpha)\frac{1}{8}u_E - \alpha\frac{1}{8}u_{WW} \quad (10.9)$$

Por lo tanto, reemplazando las ecuaciones (10.8) y (10.9) en la ecuación (10.2) y teniendo en cuenta que el área de las caras de las celdas (A) se considera constante se obtiene la ecuación (10.10).

$$\begin{aligned} & [(huA)_e u_e - (huA)_w u_w] \Delta t \\ &= \left[F_e \left(\left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8} \right) u_P + \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8} \right) u_E - \alpha \frac{1}{8} u_W - (1-\alpha) \frac{1}{8} u_{EE} \right) \right. \\ & \quad - F_w \left(\left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8} \right) u_P + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8} \right) u_W - (1-\alpha) \frac{1}{8} u_E \right. \\ & \quad \left. \left. - \alpha \frac{1}{8} u_{WW} \right) \right] A \Delta t \end{aligned} \quad (10.10)$$

Finalmente, agrupando los términos con velocidades semejantes se obtiene la ecuación (10.11).

$$\begin{aligned}
 & \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \frac{\partial(hu)u}{\partial x} dV dt \\
 &= \left[\left(\left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8} \right) F_e - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8} \right) F_w \right) u_p \right. \\
 &+ \left(\left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8} \right) F_e + (1 - \alpha) \frac{1}{8} F_w \right) u_E - \left(\left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8} \right) F_w + \alpha \frac{1}{8} F_e \right) u_w \\
 &\left. - (1 - \alpha) \frac{1}{8} F_e u_{EE} + \alpha \frac{1}{8} F_w u_{WW} \right] A \Delta t
 \end{aligned} \tag{10.11}$$

Discretización del término difusivo

El término difusivo es el tercer término que aparece en el lado izquierdo de la ecuación (3.7). Se aplica la técnica de integración por partes sobre la integral de volumen en este término, como lo muestran las ecuaciones (10.12) y (10.13).

$$n = h \Rightarrow dn = dh = \frac{\partial h}{\partial x} dx + \frac{\partial h}{\partial t} dt \tag{10.12}$$

$$dm = \frac{\partial}{\partial x} \Gamma \frac{\partial u}{\partial x} dV \Rightarrow m = \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \Gamma \frac{\partial u}{\partial x} dV = \int_{A_w}^{A_e} \hat{n} \cdot \Gamma \frac{\partial u}{\partial x} dA \tag{10.13}$$

Por lo tanto, aplicando $nm - \int m dn$ se obtiene lo expresado mediante la ecuación (10.14).

$$\begin{aligned}
 \int_{CV} h \frac{\partial}{\partial x} \Gamma \frac{\partial u}{\partial x} dV &= h \int_{A_w}^{A_e} \hat{n} \cdot \Gamma \frac{\partial u}{\partial x} dA - \int \left(\int_{A_w}^{A_e} \hat{n} \cdot \Gamma \frac{\partial u}{\partial x} dA \right) \left(\frac{\partial h}{\partial x} dx + \frac{\partial h}{\partial t} dt \right) \\
 &= h_P \Gamma A \left(\frac{u_E - u_P}{\Delta x} - \frac{u_P - u_W}{\Delta x} \right) \\
 &\quad - \int_x^{x+\Delta x} \Gamma A \left(\frac{u_E - u_P}{\Delta x} - \frac{u_P - u_W}{\Delta x} \right) \left(\frac{h_e - h_w}{\Delta x} \right) dx \\
 &\quad - \int_t^{t+\Delta t} \Gamma A \left(\frac{u_E - u_P}{\Delta x} - \frac{u_P - u_W}{\Delta x} \right) \left(\frac{h_P - h_P^0}{\Delta t} \right) dt
 \end{aligned} \tag{10.14}$$

Finalmente, operando las integrales de la ecuación (10.14) y factorizando términos semejantes, se obtiene lo que se muestra en la ecuación (10.15).

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} h \frac{\partial}{\partial x} \Gamma \frac{\partial u}{\partial x} dV dt = \left[(h_P^0 - h_e + h_w) \frac{\Gamma A}{\Delta x} (u_E - 2u_P + u_W) \right] \Delta t \tag{10.15}$$

Discretización del término fuente

El término fuente es el término del lado derecho de la ecuación (3.7), el cual se soluciona como lo muestra la ecuación (10.16).

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} S dV dt = S \Delta x A \Delta t \tag{10.16}$$

Por lo tanto, la discretización del término fuente se expresa mediante la ecuación (10.17).

$$\begin{aligned}
 & \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} S \, dV dt \\
 &= \left[-\operatorname{sgn}(u) (1-\lambda) g_z h_p \left(1 + \frac{u_p^G u_p}{g_z} \frac{\tan(\Delta\theta/2)}{\Delta x/2} \right) \tan \varphi_{bed} \right. \\
 & \quad - h_p g_z k_{a/p} (1-\lambda) \left(\frac{h_e - h_w}{\Delta x} \right) - \lambda g_z h_p \left(\frac{h_e - h_w}{\Delta x} \right) - 3\Gamma \frac{u_p}{h_p} \\
 & \quad \left. + g_x h_p \right] \Delta x A \Delta t
 \end{aligned} \tag{10.17}$$

Coefficientes del sistema

Reorganizando los términos en la ecuación (4.1) se factorizan los términos u_p , u_E , u_W , u_{EE} y u_{WW} , tal como expresa la ecuación (10.18).

$$\begin{aligned}
 & \left(a_p^0 h_p + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8} \right) F_e - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8} \right) F_w + 2D(h_p^0 - h_e + h_w) \right. \\
 & \quad \left. + 2 \operatorname{sgn}(u) (1-\lambda) u_p^G h_p \tan(\Delta\theta/2) \tan \varphi_{bed} + \frac{3\Gamma}{h_p} \Delta x \right) u_p \\
 &= \left(D(h_p^0 - h_e + h_w) - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8} \right) F_e - (1-\alpha) \frac{1}{8} F_w \right) u_E \\
 & \quad + \left(D(h_p^0 - h_e + h_w) + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8} \right) F_w + \alpha \frac{1}{8} F_e \right) u_W + (1-\alpha) \frac{1}{8} F_e u_{EE} \\
 & \quad - \alpha \frac{1}{8} F_w u_{WW} - \operatorname{sgn}(u) (1-\lambda) g_z h_p \Delta x \tan \varphi_{bed} \\
 & \quad - \left((1-\lambda) k_{a/p} + \lambda \right) h_p g_z (h_e - h_w) + g_x \Delta x h_p + a_p^0 (hu)_p^0
 \end{aligned} \tag{10.18}$$

Por lo tanto, los coeficientes del sistema de ecuaciones se muestran en el sistema de ecuaciones de la (10.19) a la (10.24).

$$\begin{aligned}
 a_p = a_p^0 h_p + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8}\right) F_e - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8}\right) F_w + 2D(h_p^0 - h_e + h_w) \\
 + 2 \operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) u_p^G h_p \tan(\Delta\theta/2) \tan \varphi_{bed} + \frac{3\Gamma}{h_p} \Delta x
 \end{aligned} \tag{10.19}$$

$$a_E = D(h_p^0 - h_e + h_w) - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8}\right) F_e - (1 - \alpha) \frac{1}{8} F_w \tag{10.20}$$

$$a_W = D(h_p^0 - h_e + h_w) + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8}\right) F_w + \alpha \frac{1}{8} F_e \tag{10.21}$$

$$a_{EE} = (1 - \alpha) \frac{1}{8} F_e \tag{10.22}$$

$$a_{WW} = -\frac{1}{8} F_w \tag{10.23}$$

$$\begin{aligned}
 S_u = -\operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) g_z h_p \Delta x \tan \varphi_{bed} - \left((1 - \lambda) k_{a/p} + \lambda\right) h_p g_z (h_e - h_w) \\
 + g_x \Delta x h_p + a_p^0 (hu)_p^0
 \end{aligned} \tag{10.24}$$

Donde $F_e = (hu)_e$, $F_w = (hu)_w$, $D = \Gamma/\Delta x$ y $a_p^0 = \Delta x/\Delta t$. u_p^G es un valor numérico supuesto de velocidad en el punto de análisis.

Anexo 3

Discretización de la ecuación de conservación de masa

En este anexo se presenta en detalle el proceso de discretización de la ecuación (3.4).

Como primera medida se integra la ecuación (3.4) en el volumen y en el tiempo. Empleando un esquema Cranck – Nicolson completamente implícito para el tiempo y aplicando el teorema de Gauss para la integral de volumen se obtiene la ecuación (11.1).

$$\begin{aligned} \int_{CV} \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial h}{\partial t} dt dV + \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \frac{\partial(hu)}{\partial x} dV dt \\ = [h_P - h_P^0] \Delta x A \Delta t + [(hu)_e - (hu)_w] \Delta t A \end{aligned} \quad (11.1)$$

Teniendo en cuenta que $(hu)_e = h_e u_e$ y $(hu)_w = h_w u_w$, el esquema de aproximación empleado para h_e y h_w es el esquema QUICK corregido (Versteeg & Malalasekera, 2007). Éste es un esquema de aproximación cuadrática que difiere del empleado en el Anexo 2 debido a que carga el aporte de los valores extremos en el término fuente, lo que favorece la dominancia de la diagonal principal y evita problemas de convergencia para métodos iterativos. La expresión (11.2) muestra la aproximación de los términos usando la nomenclatura mostrada en la Figura 12.

$$\begin{cases} h_e = h_P + (3h_E - 2h_P - h_W)/8 \\ h_w = h_W + (3h_P - 2h_W - h_{WW})/8 \end{cases} \quad (11.2)$$

Reemplazando (11.2) en (11.1) y reorganizando los términos se obtiene la ecuación (11.3)

$$\begin{aligned} (h_p^0 + u_p)h_p = u_w h_w + (3h_p - 2h_w - h_{ww})u_w/8 - (3h_e - 2h_p - h_w)u_e/8 \\ + a_p^0 h_p^0 \end{aligned} \quad (11.3)$$

Anexo 4

En este anexo se describe el tratamiento de las ecuaciones discretizadas especiales, ubicadas específicamente en los nodos más externos.

Ecuaciones especiales: Ecuación de conservación del momentum

Algunos nodos deben tener un tratamiento especial a la hora de discretizar las ecuaciones. En este caso los nodos con tratamiento especial son: para el caso de la ecuación de conservación de momentum, los nodos $i = \{1, 2, nn\}$, y para el caso de la ecuación de conservación de masa, los nodos $I = \{1, 2\}$.

Para $i = 1$. En $i = 1$ se define la condición de borde de entrada, en este caso la entrada de u es nula, por lo que el sistema de ecuaciones (12.1) – (12.2) expresa los coeficientes para el respectivo nodo.

$$a_P = 1 \quad (12.1)$$

$$a_E = 0 \quad (12.2)$$

$$a_W = 0 \quad (12.3)$$

$$a_{WW} = 0 \quad (12.4)$$

$$a_{EE} = 0 \quad (12.5)$$

$$S_u = 0 \quad (12.6)$$

Para $i = 2$. En el nodo $i = 2$, evidentemente existe la imposibilidad física de obtener un coeficiente para la celda ‘WW’, por lo tanto, se construye un nodo virtual ‘WW’ en función de los nodos ‘W’ y ‘P’ mediante la extrapolación con los valores internos conocidos. En la Figura 39 se esquematiza de manera gráfica la extrapolación lineal del término u_{WW} . De allí es se deduce fácilmente u_{WW} en función de u_W y u_P , como lo muestra la ecuación (12.7).

$$u_{WW} = 2u_W - u_P \quad (12.7)$$

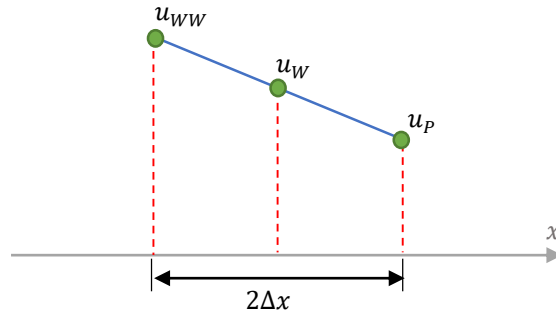


Figura 39. Extrapolación del nodo ‘WW’ para el valor de velocidad en función de los nodos internos

Reemplazando la ecuación (12.7) en la ecuación (10.18) se obtiene la ecuación (12.8).

$$\begin{aligned}
 & \left(a_p^0 h_p + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8} \right) F_e - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8} \right) F_w + 2D(h_p^0 - h_e + h_w) \right. \\
 & \quad \left. + 2 \operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) u_p^G h_p \tan(\Delta\theta/2) \tan \varphi_{bed} + \frac{3\Gamma}{h_p} \Delta x \right) u_p \\
 & = \left(D(h_p^0 - h_e + h_w) - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8} \right) F_e - (1 - \alpha) \frac{1}{8} F_w \right) u_E \\
 & \quad + \left(D(h_p^0 - h_e + h_w) + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8} \right) F_w + \alpha \frac{1}{8} F_e \right) u_W \\
 & \quad + (1 - \alpha) \frac{1}{8} F_e u_{EE} - \alpha \frac{1}{8} F_w (2u_W - u_p) \\
 & \quad - \operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) g_z h_p \Delta x \tan \varphi_{bed} \\
 & \quad - \left((1 - \lambda) k_{a/p} + \lambda \right) h_p g_z (h_e - h_w) + g_x \Delta x h_p + a_p^0 (hu)_p^0
 \end{aligned} \tag{12.8}$$

Factorizando los términos nuevamente se obtiene la ecuación (12.9).

$$\begin{aligned}
 & \left(a_p^0 h_p + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8} \right) F_e - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{4}{8} \right) F_w + 2D(h_p^0 - h_e + h_w) \right. \\
 & \quad \left. + 2 \operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) u_p^G h_p \tan(\Delta\theta/2) \tan \varphi_{bed} + \frac{3\Gamma}{h_p} \Delta x \right) u_p \\
 & = \left(D(h_p^0 - h_e + h_w) - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8} \right) F_e - (1 - \alpha) \frac{1}{8} F_w \right) u_E \\
 & \quad + \left(D(h_p^0 - h_e + h_w) + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{5}{8} \right) F_w + \alpha \frac{1}{8} F_e \right) u_W \\
 & \quad + (1 - \alpha) \frac{1}{8} F_e u_{EE} - \operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) g_z h_p \Delta x \tan \varphi_{bed} \\
 & \quad - \left((1 - \lambda) k_{a/p} + \lambda \right) h_p g_z (h_e - h_w) + g_x \Delta x h_p + a_p^0 (hu)_p^0
 \end{aligned} \tag{12.9}$$

Por lo tanto, los coeficientes serían los expresados en las ecuaciones (12.10) – (12.15).

$$\begin{aligned}
 a_p = a_p^0 h_p + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8}\right) F_e - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{4}{8}\right) F_w + 2D(h_p^0 - h_e + h_w) \\
 + 2 \operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) u_p^c h_p \tan(\Delta\theta/2) \tan \varphi_{bed} + \frac{3\Gamma}{h_p} \Delta x
 \end{aligned} \tag{12.10}$$

$$a_E = D(h_p^0 - h_e + h_w) - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8}\right) F_e - (1 - \alpha) \frac{1}{8} F_w \tag{12.11}$$

$$a_W = D(h_p^0 - h_e + h_w) + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{5}{8}\right) F_w + \alpha \frac{1}{8} F_e \tag{12.12}$$

$$a_{WW} = 0 \tag{12.13}$$

$$a_{EE} = (1 - \alpha) \frac{1}{8} F_e \tag{12.14}$$

$$\begin{aligned}
 S_u = -\operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) g_z h_p \Delta x \tan \varphi_{bed} - \left((1 - \lambda) k_{a/p} + \lambda\right) h_p g_z (h_e - h_w) \\
 + g_x \Delta x h_p + a_p^0 (hu)_p^0
 \end{aligned} \tag{12.15}$$

Para $i = nn - 1$. El caso del nodo $i = nn - 1$, requiere un tratamiento similar al mostrado en la sección 0. En éste caso existe la imposibilidad física de obtener un coeficiente para la celda ‘EE’, por lo tanto, se lleva a cabo un proceso de extrapolación lineal, como se aprecia en la Figura 40. De allí se deduce u_{EE} en función de u_E y u_P , como lo muestra la ecuación (12.16).

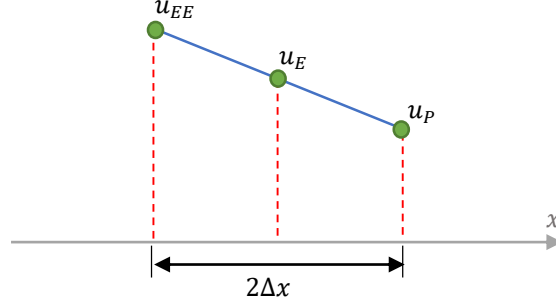


Figura 40. Extrapolación del nodo 'EE' para el valor de velocidad en función de los nodos internos

$$u_{EE} = 2u_E - u_P \quad (12.16)$$

Reemplazando la ecuación (12.16) en la ecuación (10.18) se obtiene la ecuación (12.17).

$$\begin{aligned} & \left(a_p^0 h_p + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8} \right) F_e - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8} \right) F_w + 2D(h_p^0 - h_e + h_w) \right. \\ & \quad \left. + 2 \operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) u_p^G h_p \tan(\Delta\theta/2) \tan \varphi_{bed} + \frac{3\Gamma}{h_p} \Delta x \right) u_P \\ & = \left(D(h_p^0 - h_e + h_w) - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8} \right) F_e - (1 - \alpha) \frac{1}{8} F_w \right) u_E \\ & \quad + \left(D(h_p^0 - h_e + h_w) + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8} \right) F_w + \alpha \frac{1}{8} F_e \right) u_W \\ & \quad + (1 - \alpha) \frac{1}{8} F_e (2u_E - u_P) - \alpha \frac{1}{8} F_w u_{WW} \\ & \quad - \operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) g_z h_p \Delta x \tan \varphi_{bed} - \left((1 - \lambda) k_{a/p} + \lambda \right) h_p g_z (h_e - h_w) \\ & \quad + g_x \Delta x h_p + a_p^0 (hu)_p^0 \end{aligned} \quad (12.17)$$

Factorizando los términos nuevamente se obtiene la ecuación (12.18).

$$\begin{aligned}
 & \left(a_p^0 h_p + \left(\frac{7}{8} - \alpha \frac{4}{8} \right) F_e - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8} \right) F_w + 2D(h_p^0 - h_e + h_w) \right. \\
 & \quad \left. + 2 \operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) u_p^G h_p \tan(\Delta\theta/2) \tan \varphi_{bed} + \frac{3\Gamma}{h_p} \Delta x \right) u_p \\
 & = \left(D(h_p^0 - h_e + h_w) - \left(\frac{1}{8} + \alpha \frac{5}{8} \right) F_e - (1 - \alpha) \frac{1}{8} F_w \right) u_E \\
 & \quad + \left(D(h_p^0 - h_e + h_w) + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8} \right) F_w + \alpha \frac{1}{8} F_e \right) u_W - \alpha \frac{1}{8} F_w u_{WW} \\
 & \quad - \operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) g_z h_p \Delta x \tan \varphi_{bed} - \left((1 - \lambda) k_{a/p} + \lambda \right) h_p g_z (h_e - h_w) \\
 & \quad + g_x \Delta x h_p + a_p^0 (hu)_p^0
 \end{aligned} \tag{12.18}$$

Por lo tanto, los coeficientes serían los expresados en el sistema de ecuaciones (12.19) – (12.24).

$$\begin{aligned}
 a_p & = a_p^0 h_p + \left(\frac{7}{8} - \alpha \frac{4}{8} \right) F_e - \left(\frac{3}{8} + \alpha \frac{3}{8} \right) F_w + 2D(h_p^0 - h_e + h_w) \\
 & \quad + 2 \operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) u_p^G h_p \tan(\Delta\theta/2) \tan \varphi_{bed} + \frac{3\Gamma}{h_p} \Delta x
 \end{aligned} \tag{12.19}$$

$$a_E = D(h_p^0 - h_e + h_w) - \left(\frac{1}{8} + \alpha \frac{5}{8} \right) F_e - (1 - \alpha) \frac{1}{8} F_w \tag{12.20}$$

$$a_W = D(h_p^0 - h_e + h_w) + \left(\frac{6}{8} - \alpha \frac{3}{8} \right) F_w + \alpha \frac{1}{8} F_e \tag{12.21}$$

$$a_{WW} = -\alpha \frac{1}{8} F_w \tag{12.22}$$

$$a_{EE} = 0 \tag{12.23}$$

$$\begin{aligned}
 S_u & = -\operatorname{sgn}(u) (1 - \lambda) g_z h_p \Delta x \tan \varphi_{bed} - \left((1 - \lambda) k_{a/p} + \lambda \right) h_p g_z (h_e - h_w) \\
 & \quad + g_x \Delta x h_p + a_p^0 (hu)_p^0
 \end{aligned} \tag{12.24}$$

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Para $i = nn$. El caso especial del último nodo (nn) representa las condiciones de borde de salida del dominio. En este caso, dado que no se puede asegurar que el gradiente de velocidad es cero, se busca satisfacer la continuidad local como lo expresa la ecuación (12.25).

$$u_P = u_W \frac{h_{WW}}{h_W} \quad (12.25)$$

Por lo anterior se expresan los coeficientes como se muestra en el sistema de ecuaciones (12.26) – (12.31).

$$a_P = 1 \quad (12.26)$$

$$a_E = 0 \quad (12.27)$$

$$a_W = h_{WW}/h_W \quad (12.28)$$

$$a_{WW} = 0 \quad (12.29)$$

$$a_{EE} = 0 \quad (12.30)$$

$$S_u = 0 \quad (12.31)$$

Ecuaciones especiales: Ecuación de conservación de la masa

I = 1. De manera análoga a la ecuación de conservación de momentum, en este caso, al ser el primer nodo, se trata de la condición de borde de entrada. Para este caso la altura en el punto se establece como cero.

$$h_p = 0 \quad (12.32)$$

I = nf. Para este caso, en el nodo $I = nf$ se define la condición de borde de salida, en la cual se considera un gradiente de salida nulo. Dicha condición se satisface mediante la ecuación (12.33).

$$h_p = h_w \quad (12.33)$$

Anexo 5

Variación de ϕ_{bed}

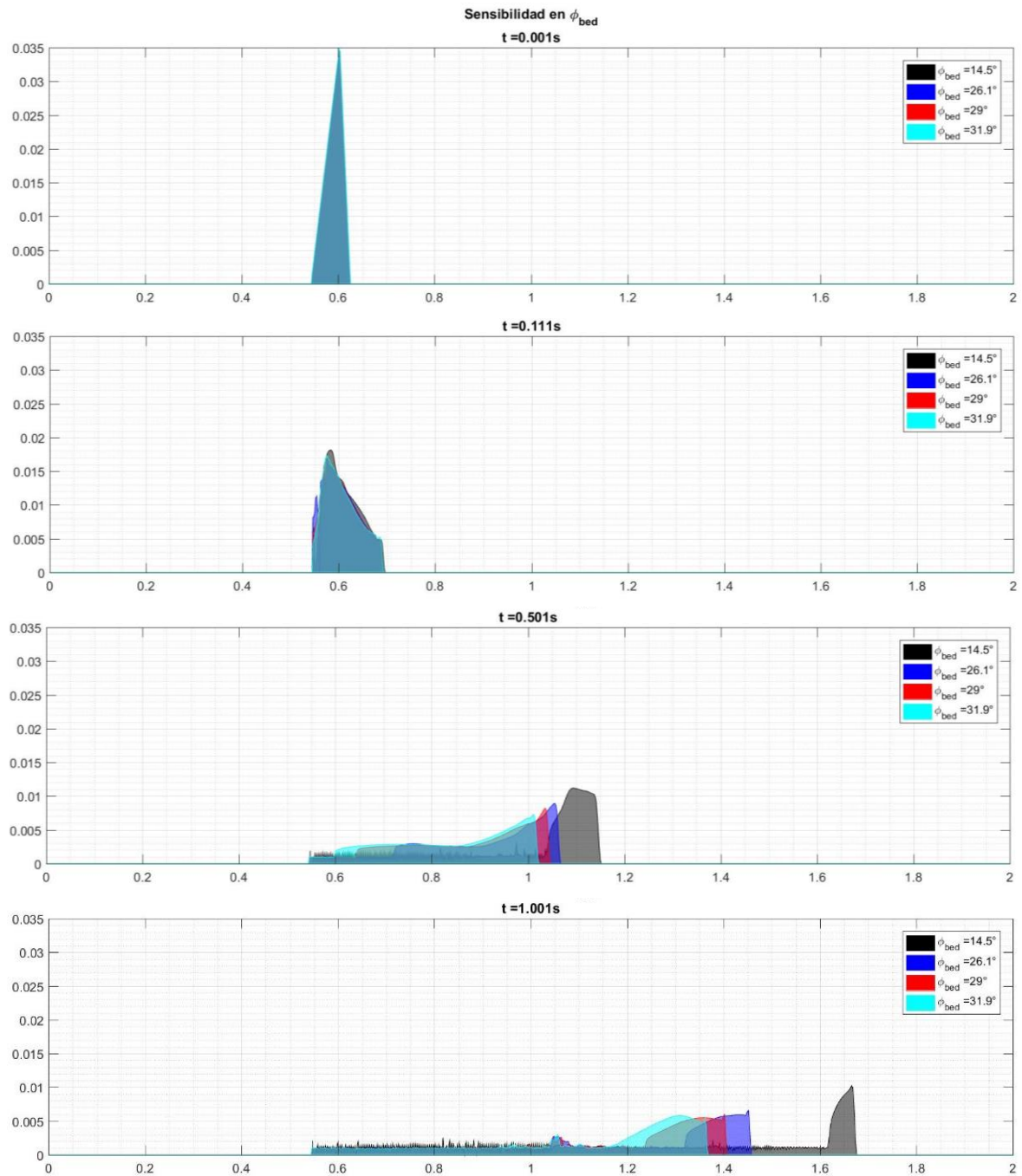


Figura 41. Análisis de sensibilidad del modelo ante variaciones en el ángulo de fricción de la base

Variación de ϕ_{int}

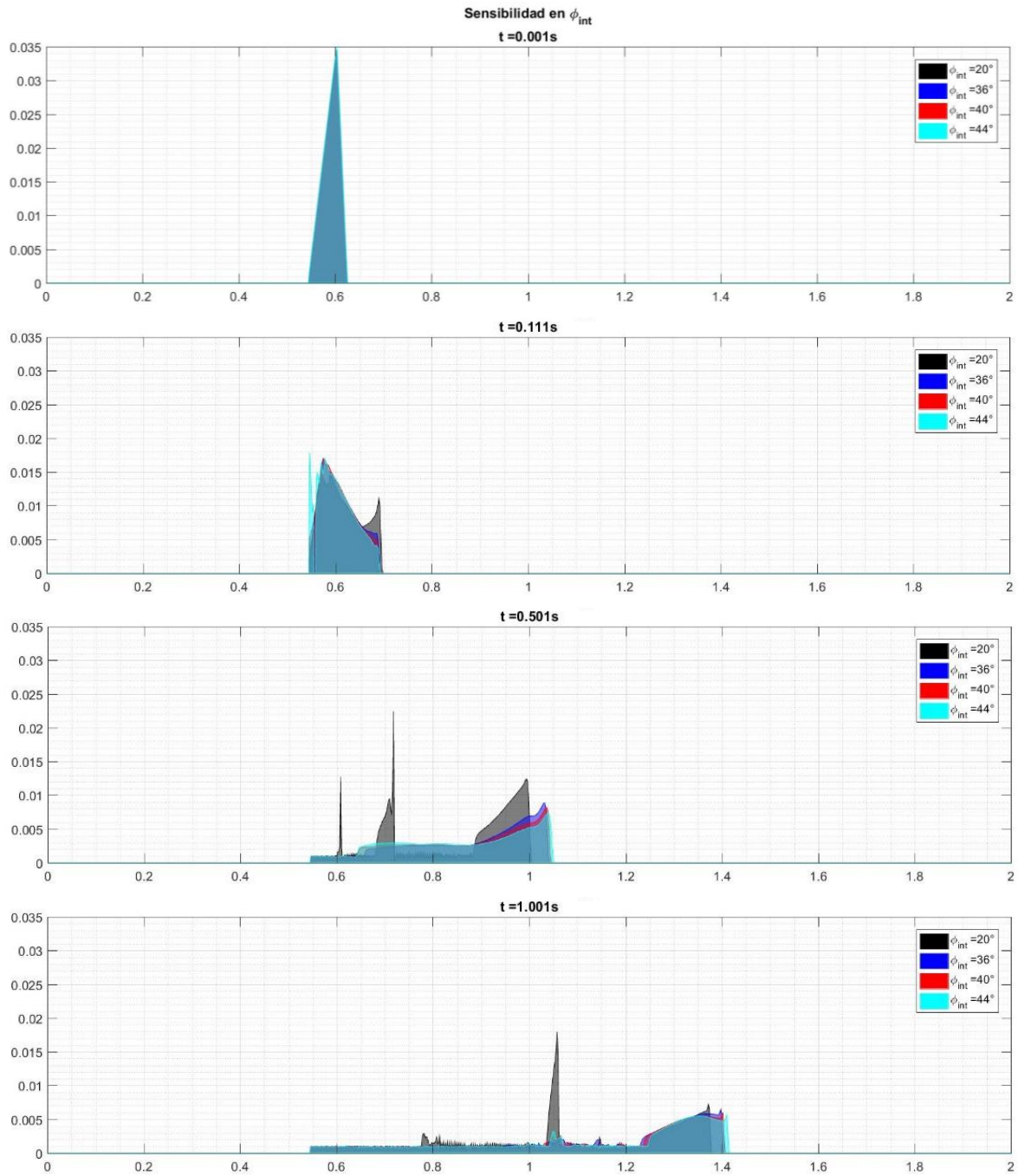


Figura 42. Análisis de sensibilidad del modelo ante variaciones en el ángulo de fricción interno

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Variación de μ

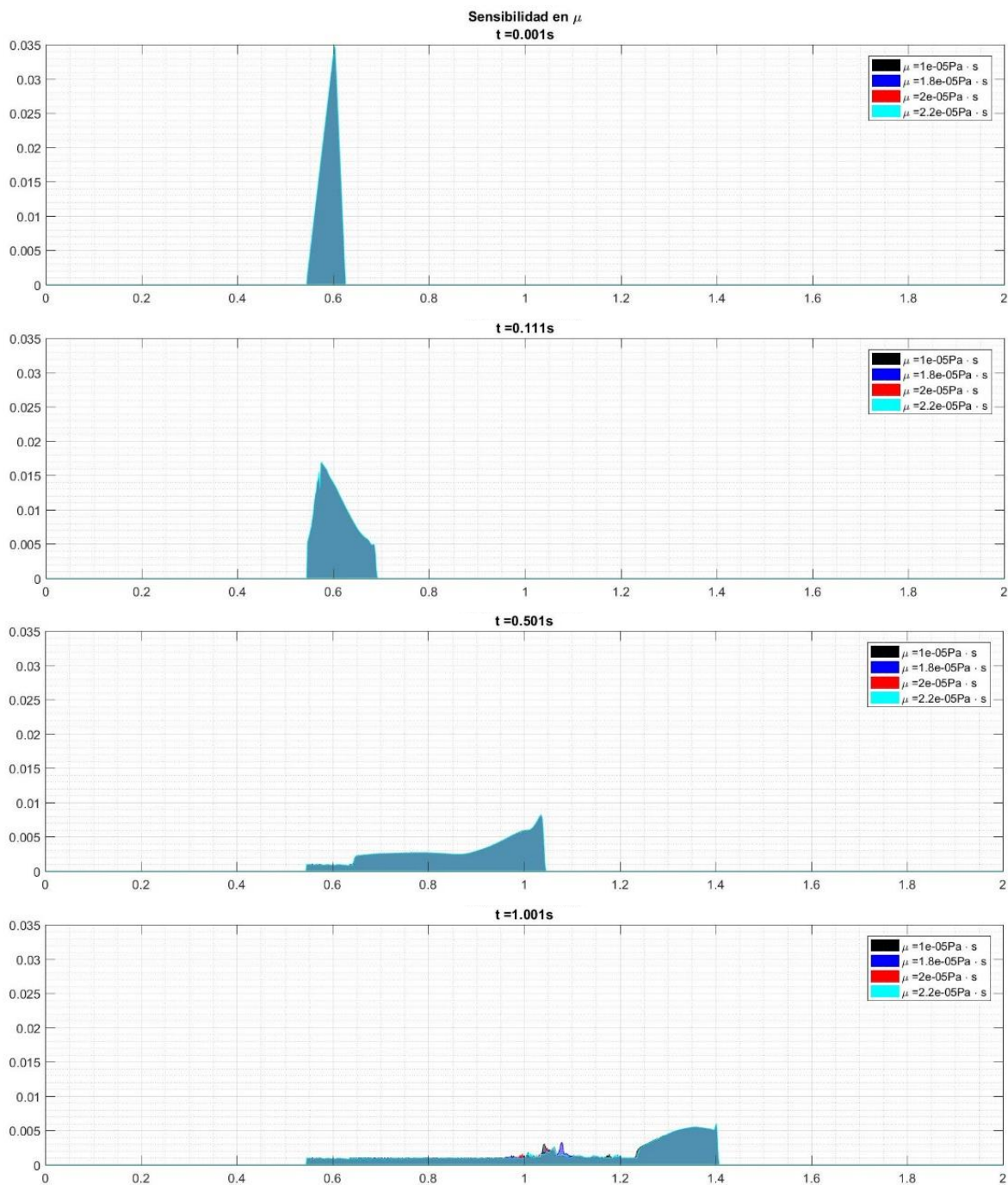


Figura 43. Análisis de sensibilidad del modelo ante variaciones en el coeficiente de viscosidad

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Variación de ρ

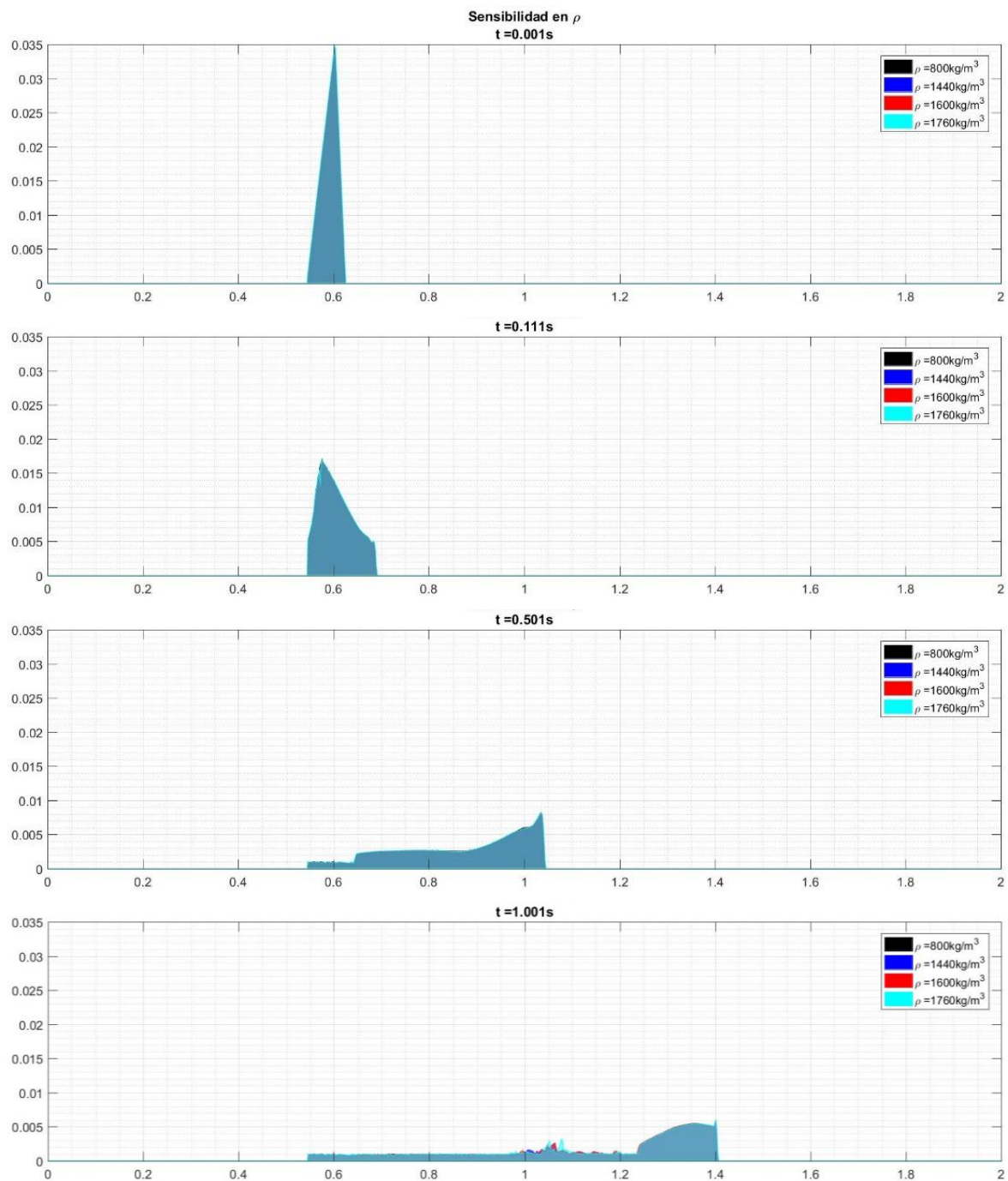


Figura 44. Análisis de sensibilidad del modelo ante variaciones en la densidad de la mezcla

Variación de ν_f

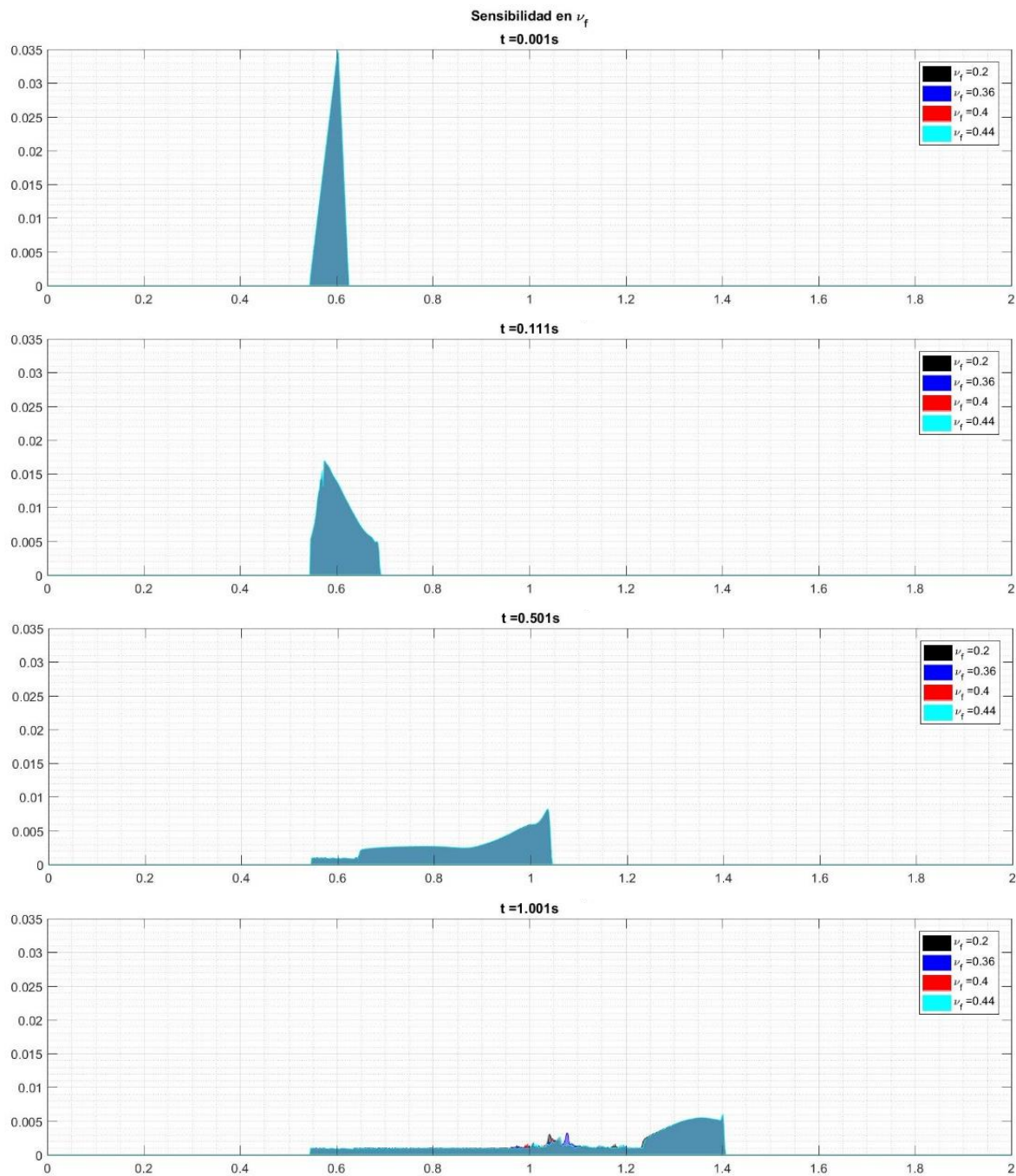


Figura 45. Análisis de sensibilidad del modelo ante variaciones en la porción de fluido

Anexo 6

En esta sección se describen las dimensiones y características técnicas del canal de flujo Collapses. La construcción del canal se financió con dineros del grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción (INME), adscrito a la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander y con recursos del programa Jóvenes Investigadores e Innovadores de Colciencias, así como de la Vicerrectoría de Investigación y extensión de la UIS.

Especificaciones del canal

El canal de flujo tiene las especificaciones enunciadas en la Tabla 21. La construcción del canal se llevó a cabo mediante la unión de láminas acrílicas cuyas dimensiones se pueden apreciar en la Figura 46. Todas las piezas son de acrílico transparente de 5 mm de espesor a excepción de la pieza de la compuerta. Esta pieza está elaborada en aluminio de 1 mm de espesor. El montaje del canal se puede apreciar en la Figura 47. Para construir el canal se unieron las piezas 1-5-3 (vista lateral derecha, anexo 1) y las piezas 2-4-6 (vista lateral izquierda, anexo 1), las uniones se realizaron mediante una junta mecánica con una placa de acrílico de 20 cm por 5 cm (ver figura 1 A y B, esquinas inferior derecha e izquierda respectivamente) y uniendo las piezas entre sí mediante uniones roscadas, estas dos uniones se ubicaron paralelamente con una separación de 10 cm entre ambas mediante la conformación de la base del canal, constituida por la unión mediante empalme sin junta mecánica de las piezas 7-10-8. El soporte se realizó mediante perfiles ‘C’ de aluminio de 5

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

cm de alto del alma y 2.5 cm de ancho del ala, los cuales se conectan a las piezas acrílicas mediante el alma, las cargas recibidas se transmiten mediante el ala inferior a soportes en ‘L’ ubicados de forma equiespaciada cada 20 cm, los cuales a su vez se encuentran conectados a un muro de mampostería en laboratorio (para ver detalles de conexión remitirse a la Figura 48).

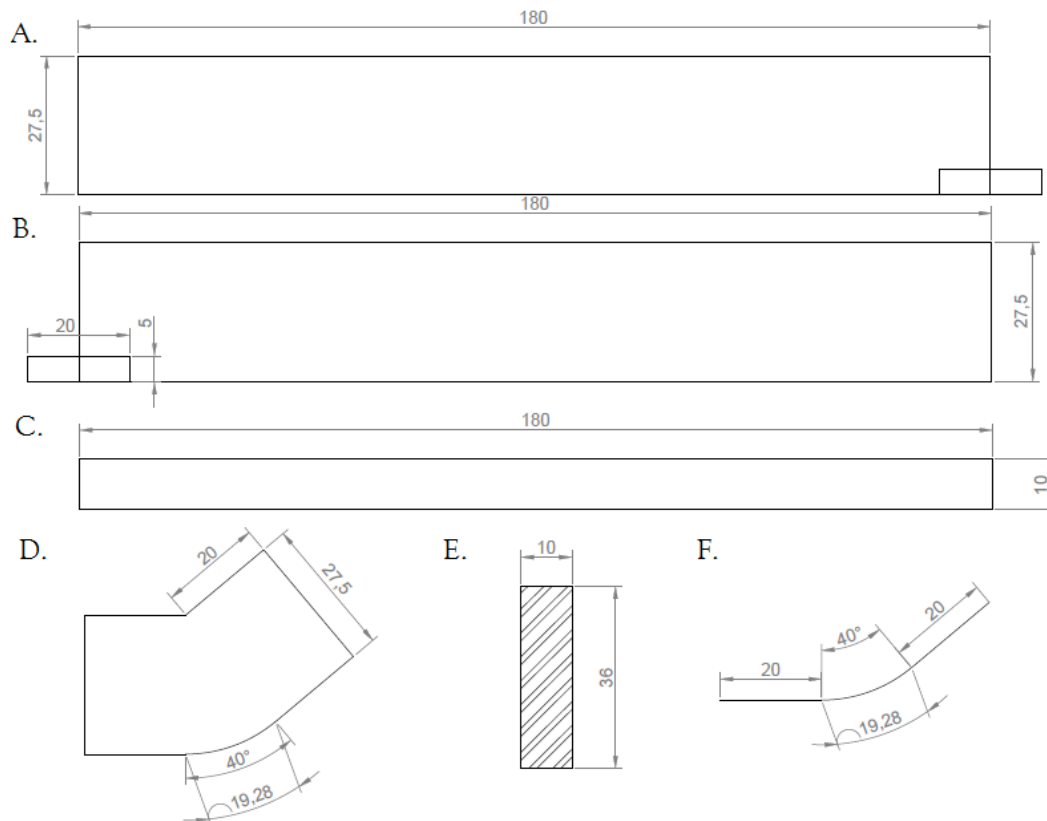


Figura 46. Detalle de las piezas componentes del canal Collapses V1.0: A. Piezas 1 y 2, B. Piezas 3 y 4, C. Piezas 7 y 8, D. Piezas 5 y 6, E. Pieza 9, F. Pieza 10

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Tabla 21. Detalles y dimensiones de cada una de las piezas mostradas en la Figura 46

Dimensiones (cm)				
Pieza	Largo	Alto	Material	Observaciones
1	180	27.5	Acrílico transparente $e = 5$ mm	Contiene placas de conexión en acrílico de 5 mm de espesor para conectar las piezas 1 y 5
2	180	27.5	Acrílico transparente $e = 5$ mm	Contiene placas de conexión en acrílico de 5 mm de espesor para conectar las piezas 2 y 6
3	180	27.5	Acrílico transparente $e = 5$ mm	Contiene placas de conexión en acrílico de 5 mm de espesor para conectar las piezas 3 y 5
4	180	27.5	Acrílico transparente $e = 5$ mm	Contiene placas de conexión en acrílico de 5 mm de espesor para conectar las piezas 4 y 6
5	40	27.5	Acrílico transparente $e = 5$ mm	Pieza con corte curvo, longitud de arco de 19.28 cm
6	40	27.5	Acrílico transparente $e = 5$ mm	Pieza con corte curvo, longitud de arco de 19.28 cm

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

7	180	10	Acrílico	Pieza que conforma la base del canal transparente $e = 5$ mm
8	180	10	Acrílico	Pieza que conforma la base del canal transparente $e = 5$ mm
9	36	10	Placa de aluminio	Pieza especial tipo compuerta $e = 1\ mm$
10	59.26	10	Acrílico	Pieza especial termoformada para la transparente $e = 5$ mm transición entre la sección inclinada y la sección horizontal

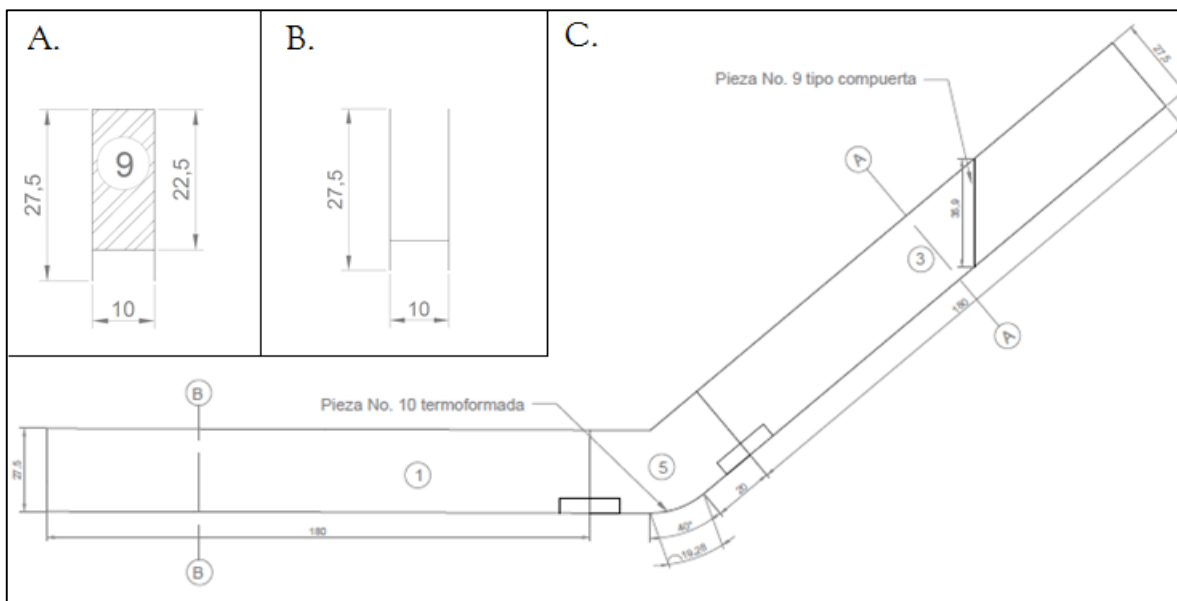


Figura 47. Montaje general del canal Collapses V1.0 mediante la unión de las piezas de la Figura 46: A. Corte A – A de la parte C, B. Corte B – B de la parte C, C. Vista lateral del canal Collapses V1.0

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Para realizar el lanzamiento de cada unidad de análisis o ensayo, se diseñó un mecanismo que funciona mediante la aplicación de un torque a la pieza 9 o compuerta del sistema, por medio de un motor de 120 V. El motor es puesto en marcha y mediante el uso de un vástago retráctil accionado manualmente se sostiene la compuerta hasta que se desee liberar el material de la posición de reposo. El accionamiento del mecanismo se hace manualmente. En la Figura 48B se puede ver un esquema de detalle isométrico del sistema de apertura de la compuerta. Cabe resaltar que el mecanismo de apertura se diseñó de manera tal que la apertura de la compuerta no interfiriera sobre la caída normal del material, es decir la condición de diseño es que la compuerta se abra antes de que el material empiece su movimiento.

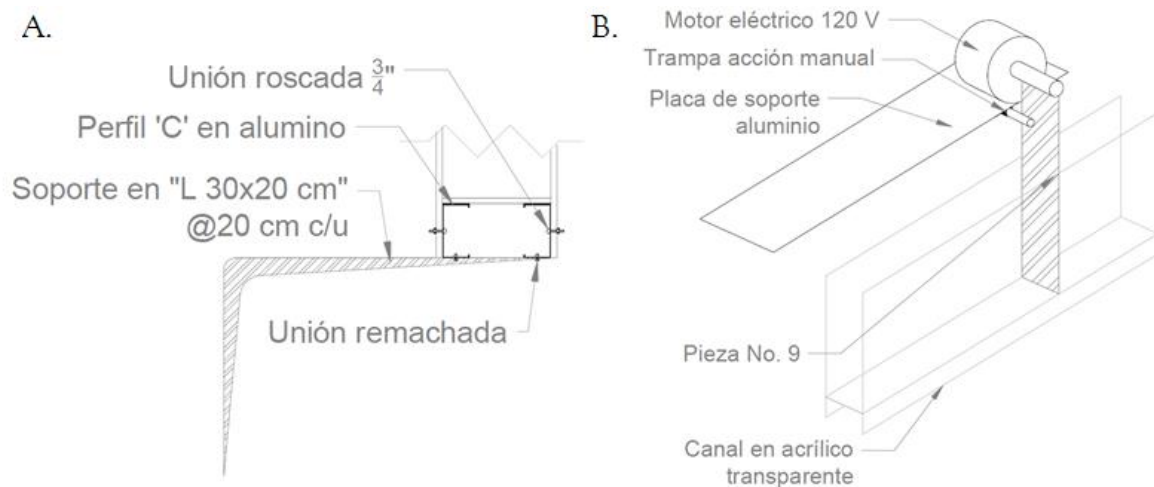


Figura 48. Detalles del montaje del canal Collaptes V1.0: A. Detalles de conexión entre el canal y los soportes, B.

Esquema de detalle de montaje de la compuerta

Por otra parte, se tuvieron en cuenta las condiciones para generación de contraste necesarias para el posterior procesamiento y análisis de imágenes obtenidas. Para ello se forraron las piezas 2, 4 y 6 con papel vinilo adhesivo de color negro, de manera tal que se

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

generase el contraste suficiente para el reconocimiento y binarización de imágenes con un software de adquisición y tratamiento de imágenes; las piezas a las que se les aplicó el proceso mencionado se pueden evidenciar en la Figura 49A y Figura 49B. De igual manera se pintaron de color negro los soportes en aluminio mostrados en la Figura 49A y Figura 49B; el resultado se puede apreciar en la Figura 49C y Figura 49D.

Para la medición del movimiento mediante el uso de fotogramas se realizaron marcas de gradación cada 5 cm en los tramos rectos del canal, y se numeró en la parte superior del mismo. El resultado final del proceso constructivo del canal se puede observar en la Figura 49D.

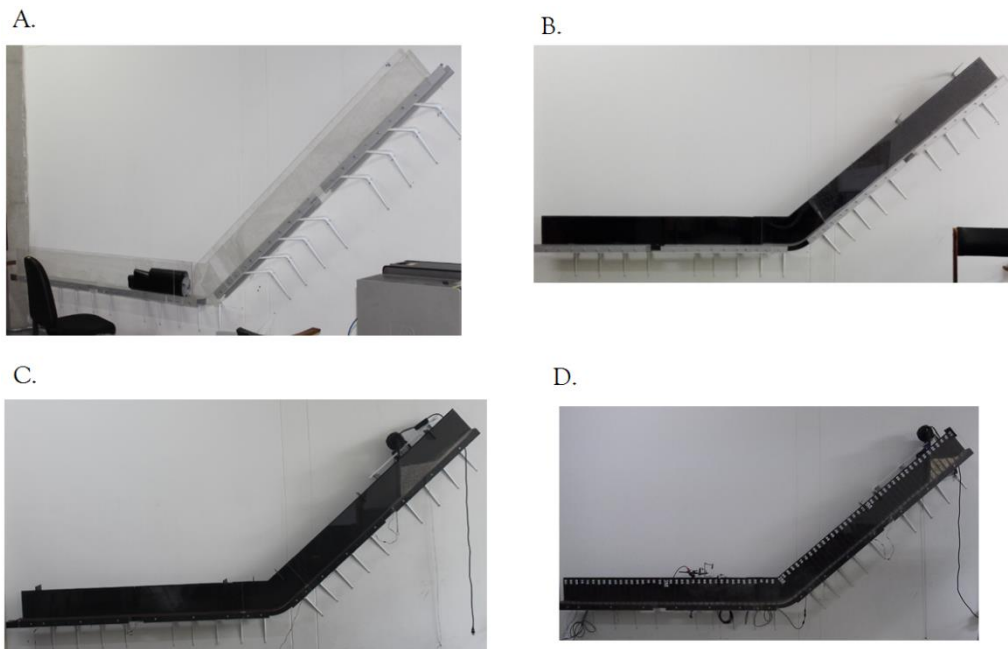


Figura 49. Evolución del proceso de construcción del canal Collapses V1.0: A. Etapa 1 Montaje del canal Collapses V1.0,

B. Recubrimiento de las piezas 2, 4 y 6 con vinilo negro, C. Aplicación de pintura en los soportes de aluminio, D.

Instalación de marcas de gradación cada 5 cm

Sistema de adquisición de datos

El canal cuenta con un sistema de adquisición de datos que consiste en una unidad externa (Sistema de Adquisición Primario) y una interna (Sistema de Adquisición Secundario). Mediante el Sistema de Adquisición Primario se obtiene una visualización global del movimiento del material a lo largo del canal, mientras que mediante el Sistema de Adquisición Secundario se tienen superficies de control que miden tiempos y alturas en zonas fijas del canal. El SAP (también llamado unidad externa) consta de una cámara fotográfica profesional adquirida por el grupo INME controlada de manera remota, para evitar interferencias al momento de adquirir fotografías, y almacena la información de manera individual en una memoria extraíble, un esquema de su disposición se aprecia en la Figura 50.

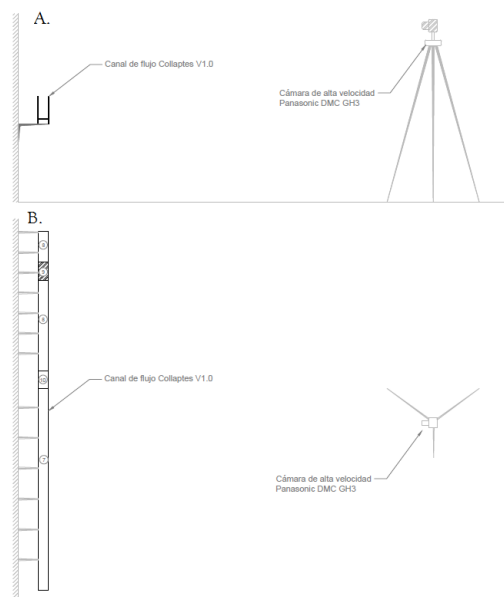


Figura 50. Distribución del montaje experimental: (A) en perfil y (B) En planta

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

La unidad interna usa tres sensores: un sensor óptico (genérico), una cámara con sensor CCD y dos sensores de ultrasonido (HCSR04) y está controlada por medio de dos controladores; un microcontrolador de uso comercial para los sensores de ultrasonido y un controlador dedicado a la cámara CCD integrado al equipo de cómputo. Los sensores se disponen a lo largo del canal como lo muestra la Figura 52. El sistema secundario se integra en un archivo script que sigue el algoritmo mostrado en la Figura 51.

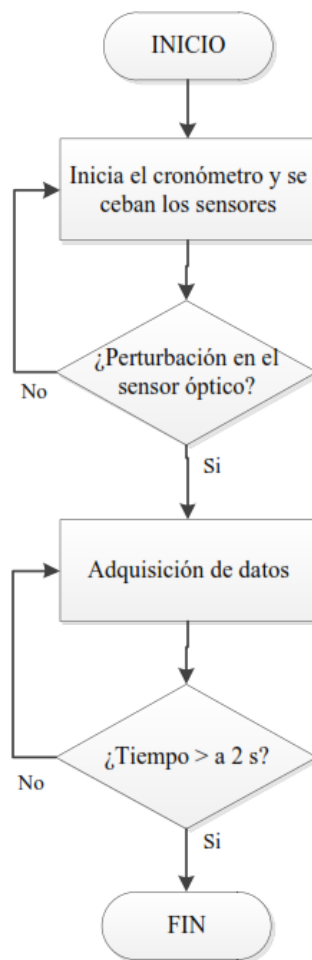


Figura 51. Algoritmo de adquisición de datos del sistema secundario para ensayos en el canal Collapses

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

En detalle, el sistema secundario de adquisición de datos se muestra en la figura Figura 54. El sensor de ultrasonido HCSR04 es un sensor genérico con una sensibilidad de ± 5 mm (± 0.55 mm). En la Figura 54a y la Figura 54b se aprecia la disposición de los sensores de ultrasonido en la sección horizontal y la sección inclinada respectivamente.

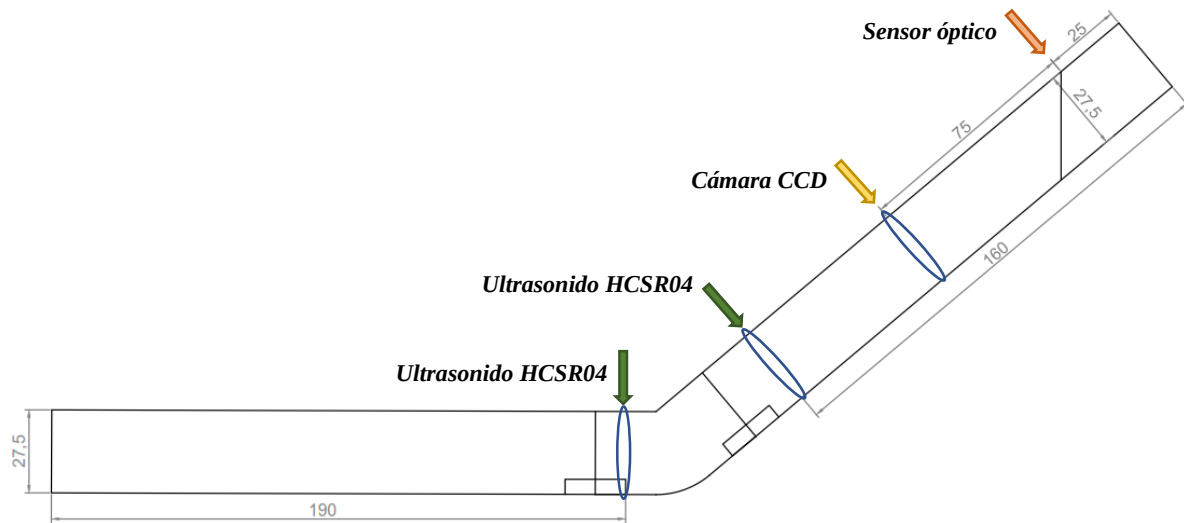


Figura 52. Disposición de los sensores del sistema secundario de adquisición de datos

La cámara con sensor CCD se encuentra referenciada en el mercado como ‘Guppy F046-C’, cuyas características se enuncian en la Tabla 22. Con ésta cámara se crea un sistema de medición que genera una superficie de control a una distancia de un metro del inicio del canal, en la que se mide el paso del material a través de dicha superficie. Para tal propósito se conecta un diodo láser de línea a una fuente de voltaje de manera que el sensor pueda medir las variaciones en la posición de la línea.

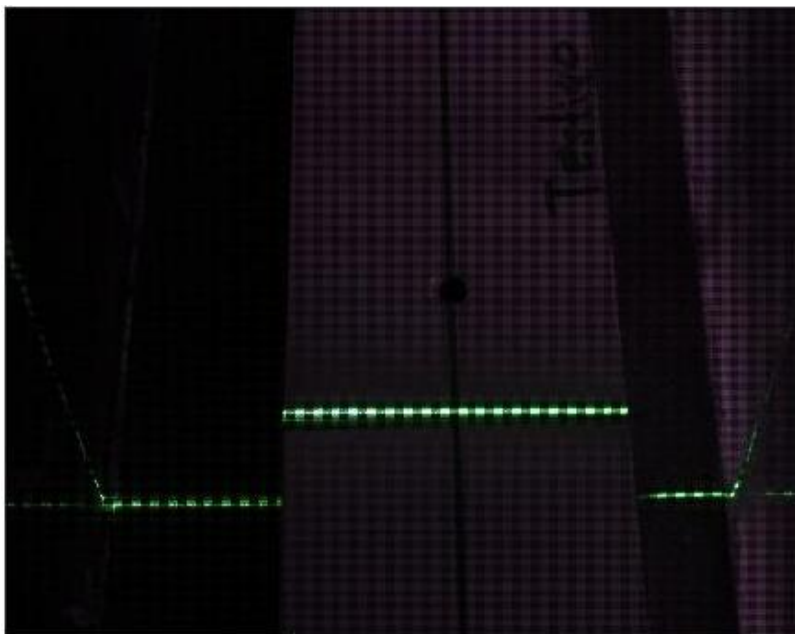


Figura 53. Testigo para la calibración de las medidas de la cámara Guppy

Tabla 22. Características técnicas de la cámara Guppy

Guppy	F046C
Interfaz	IEEE 1394 ^a
Resolución	780 (H) * 582 (V)
Sensor	Sony ICX415
Tipo de sensor	CCD progresivo
Tamaño de celda	8.3 μm * 8.3 μm
Potencia requerida (DC)	8 V – 36 V
Masa	2 colores
Dimensiones (mm)	48.2 * 30 * 30

La Figura 53 muestra una imagen adquirida con la cámara en la que se aprecia el desfase de la línea generada por el diodo láser. Dicho desfase se relaciona con la altura del objeto posicionado que genera la interferencia mediante un proceso de calibración en el cual,

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

básicamente se calibran varias mediciones para calcular el número de pixeles por distancia perpendicular a la base del canal.



Figura 54. Instrumentación del canal para captura de datos. 1. Sensor ultrasonido en la sección horizontal. 2. Sensor ultrasonido en la sección inclinada. 3. Cámara CCD y estación laser. 4. Motor, sensor óptico y compuerta de retención.

Fuente: adaptado de (Remolina Reyes, 2018)

El sensor óptico se conecta por medio de un puerto USB y sólo tiene como función la medición del momento en el que se abre la compuerta.

a. Protocolo de carga y uso del canal para una unidad experimental

Para pruebas preliminares se usa lija 180 SIA como recubrimiento del fondo del canal. Para la adquisición de imágenes se emplea una cámara de alta velocidad, con especificaciones para capturar imágenes en ráfaga a una tasa de 25 fotogramas por segundo. En la Figura 50 se muestra un esquema en planta y en perfil donde se detalla la ubicación de la cámara. La cámara se ubica a una altura de 1.65 m de altura y a una distancia perpendicular de 3.8 m del canal, distancia desde la cual alcanza a obtener la suficiente amplitud angular para lograr la amplitud angular necesaria de 55° para cubrir el canal en toda su longitud.

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Para realización de cada ensayo se define el siguiente procedimiento de ejecución:

- i. Ajuste de la compuerta: En este paso se debe asegurar la compuerta (pieza No. 9) con el pasador retráctil instalado en el soporte de aluminio del motor (ver Figura 48B)
- ii. Disposición del material: Se refiere a la colocación del material de ensayo en el canal por encima de la compuerta
- iii. Puesta en marcha del código que sigue el algoritmo de la Figura 51
- iv. Encendido del motor: Se acciona el motor eléctrico de manera que esté listo para elevar la compuerta
- v. Accionamiento de la cámara: Se acciona el obturador de la cámara para iniciar la toma de fotogramas
- vi. Accionamiento de la compuerta: Se acciona el sistema removiendo el vástago retráctil que se observa en la Figura 48B
- vii. Almacenamiento de información: El sistema primario almacena los datos en una memoria externa y el sistema secundario almacena los datos en el disco duro del equipo de cómputo directamente
- viii. Limpieza del canal: Se realiza la recolección del material que queda represado en el canal y los sobrantes son eliminados con aire a presión

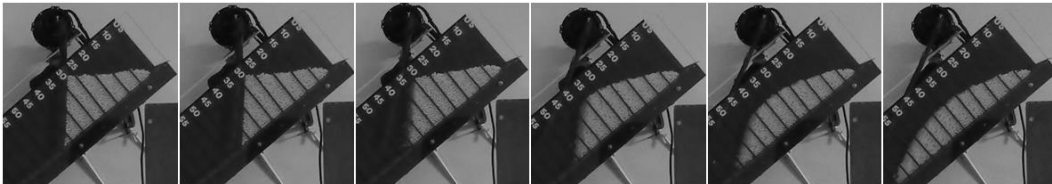


Figura 55. Proceso de apertura de la compuerta accionada por el motor eléctrico de 120 V en el ensayo S1P32



Figura 56. Proceso de movimiento en el ensayo S1P1 en los tiempos (en el orden descendiente) 0.258 s, 0.559 s, 0.903 s y 2.322 s

b. Muestreos S1 y S2

Como punto clave para el diseño del experimento se deben tener en cuenta los materiales a emplear, es decir, cuáles y cuantos materiales se van a usar. Por ello, para la realización de los ensayos se realizó *a priori* la elección de los materiales que iban a ser probados. Para ello se analizaron 8 materiales que abarcan una amplia gama de formas, texturas, tamaños y pesos teniendo en cuenta el origen del material (natural/pétreo o sintético) e intentando abarcar de manera amplia las variables que se definieron operativamente en la sección anterior. Dicho análisis *a priori* se concibe como una serie de ensayos con el fin de observar el comportamiento de los materiales fluyendo a lo largo del canal y se denomina como el primer muestreo ‘S1’. Estos materiales se enuncian y se definen de manera detallada en la Tabla 23.

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

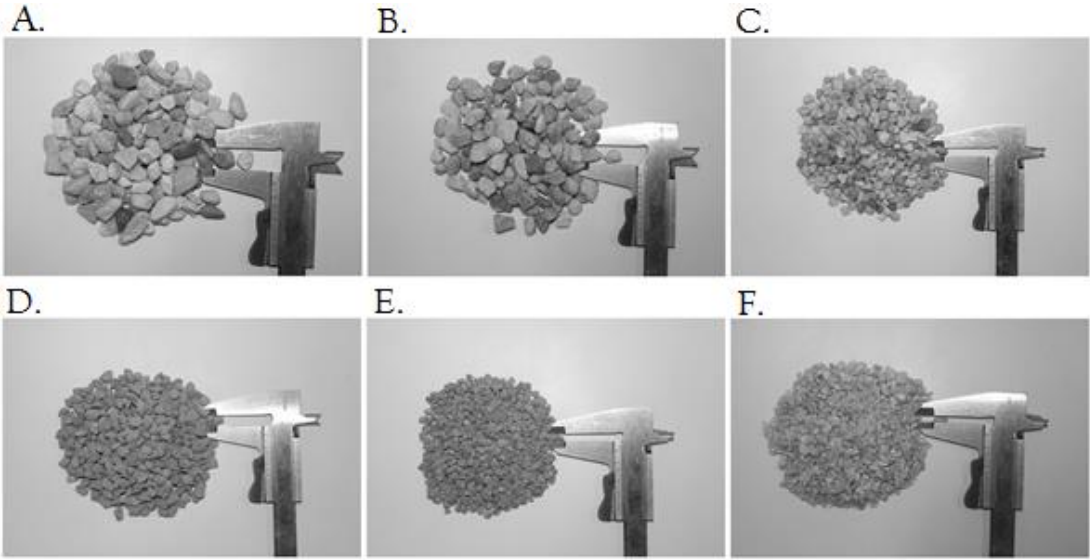


Figura 57. Materiales pétreos del 1 al 6 notados por las letras de la 'A' a la 'F' respectivamente

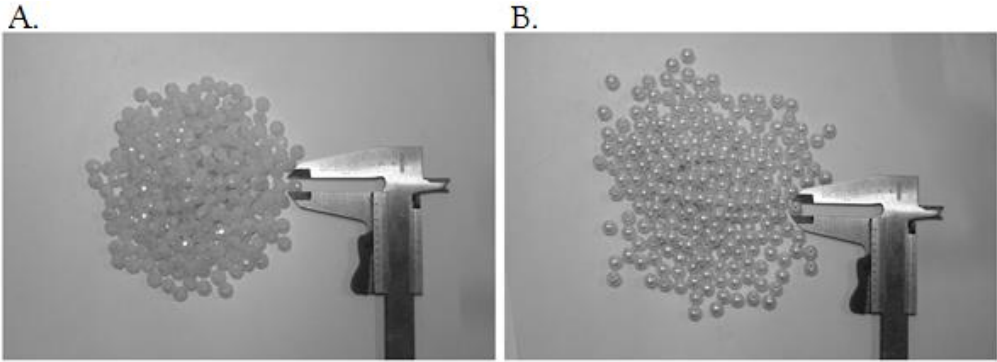


Figura 58. Materiales sintéticos 7 y 8 notados por las letras 'A' y 'B' respectivamente

Tabla 23. Propiedades de los materiales empleados para los ensayos en el canal Collaptes

ID material	Descripción	Pero	TMN	Observaciones
		específico	[mm]	
		[g/cm³]		
Material 1	Grava de arrastre de río	459,31	19	Pasa tamiz 3/4" retiene tamiz 1/2"

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Material 2	Grava de arrastre de río altamente meteorizada	461,64	19	Pasa tamiz 3/4" retiene tamiz 1/2"
Material 3	Gravilla de arrastre de río	461,51	9,53	Pasa tamiz 3/8" retiene tamiz #4
Material 4	Granito triturado gris	464,73	4,75	Pasa tamiz #4 retiene tamiz #8
Material 5	Granito triturado gris	482,21	9,53	Pasa tamiz 3/8" retiene tamiz #4
Material 6	Granito triturado blanco	480,37	4,75	Pasa tamiz #4 retiene tamiz #8
Material 7	Partículas de cristal	442,66	6,00	Partículas altamente uniformes
Material 8	Partículas plásticas	168,77	6,00	Partículas altamente uniformes

Como se nota en la Tabla 23 y, en la Figura 57 y la Figura 58, son 8 los materiales empleados en el muestreo ‘S1’. En la Figura 57 se pueden observar los materiales de origen pétreo ensayados, de los cuales, los materiales de la Figura 57A – C fueron extraídos de una cantera de materiales de arrastre de río, mientras que los materiales de la Figura 57D – F fueron extraídos de una cantera donde pasaron por un proceso de triturado. Por su parte, en la figura 7 se muestran los materiales de origen sintético, los cuales gracias a su proceso de elaboración tienen una alta uniformidad, es decir, el tamaño, forma, peso y demás características es muy similar entre las partículas que componen el material (son altamente homogéneos).

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Tabla 24. Configuración de los 32 ensayos del primer muestreo 'S1'

Código de prueba	ID material	Volumen [litros]
S1P1, S1P2	Material 1	2
S1P3, S1P4	Material 1	3
S1P5, S1P6	Material 2	2
S1P7, S1P8	Material 2	3
S1P9, S1P10	Material 3	2
S1P11, S1P12	Material 3	4
S1P13, S1P14	Material 4	2
S1P15, S1P16	Material 4	4
S1P17, S1P18	Material 5	2
S1P19, S1P20	Material 5	3
S1P21, S1P22	Material 6	2
S1P23, S1P24	Material 6	4
S1P25, S1P26	Material 7	1.5
S1P27, S1P28	Material 7	3
S1P29, S1P30	Material 8	2
S1P31, S1P32	Material 8	4

Para conocer a priori el comportamiento de los materiales granulares y poder depurar los materiales que pueden ser más o menos representativos se hace un primer filtro mediante un primer muestreo. De manera preliminar se llevaron a cabo una serie de pruebas piloto. Cabe resaltar que el hecho de realizar las pruebas piloto en S1 tiene un doble propósito: en primer lugar, observar el correcto funcionamiento del canal y en segundo lugar observar de manera

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

preliminar el comportamiento de los materiales granulares, y como se dijo con anticipación, depurar los materiales que no sean de interés para la investigación. Para ello se realizaron 32 pruebas, 4 con cada material, donde 2 de esas 4 se hicieron con un volumen de 2.0 litros y las otras 2 con un volumen de 4.0 litros (en ocasiones se usaron volúmenes de 1.5 litros y 3.0 litros, para mayor detalle de la configuración de las pruebas S1 ver la Tabla 24).

Del muestreo S1 se puede evidenciar que las propiedades cinemáticas de los materiales pétreos del 1 al 6 son comparablemente parecidas, es decir, se deslizan de una manera comparablemente similar entre sí. También hay que señalar que la capacidad de deslizamiento de los materiales pétreos es bastante reducida en la sección horizontal del canal, lo cual favorece el represamiento del material una vez cruza la sección curva y la pérdida de energía cinética se da en un amplio margen haciendo que la masa en su conjunto llegue al reposo, a excepción de unas cuantas partículas que se separan de la gran mayoría dado que están en la zona frontal del material deslizante. Por su parte los materiales sintéticos presentan una muy buena capacidad de deslizamiento, tanto así que algunas partículas frontales se deslizan por fuera de la zona horizontal del canal. Debido a las razones anteriormente mencionadas se decide tomar uno de los materiales pétreos anteriormente mencionados como referencia del grupo y los dos materiales sintéticos utilizados en S1 para realizar el siguiente muestreo denominado de ahora en adelante como ‘S2’.

Como se ha dicho anteriormente, este experimento tiene básicamente dos factores de análisis; la influencia del tipo de material (lo que involucra de manera intrínseca las características propias de cada material como: peso específico, ángulo de fricción, etc.) y la influencia del volumen desencadenado sobre el desarrollo de velocidades en el canal de flujo

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Collapses V1.0. Dicho esto, un análisis confiable de los datos obtenidos se puede efectuar mediante el análisis de varianza (ANOVA), o análisis homólogos.

Tabla 25. Arreglo de las réplicas para el segundo muestreo (S2)

		Volúmenes		
		1 litro	2 litros	3 litros
Materiales	Material 6	S2P1,	S2P6,	S2P11,
		S2P2,	S2P7,	S2P12,
		S2P3,	S2P8,	S2P13,
		S2P4,	S2P9,	S2P14,
		S2P5	S2P10	S2P15
	Material 7	S2P16,	S2P21,	S2P26,
		S2P17,	S2P22,	S2P27,
		S2P18,	S2P23,	S2P28,
		S2P19,	S2P24,	S2P29,
		S2P20	S2P25	S2P30
	Material 8	S2P31,	S2P36,	S2P41,
		S2P32,	S2P37,	S2P42,
		S2P33,	S2P38,	S2P43,
		S2P34,	S2P39,	S2P44,
		S2P35	S2P40	S2P45

Los materiales elegidos para muestreo S2 son: el material 6, el cual corresponde a un material de origen pétreo (granito triturado) y que por su tonalidad blanca presenta ventajas

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

al momento de la detección del material para facilitar el posterior tratamiento de las imágenes captadas en el montaje. El material 7, es un material de origen sintético (cristal), cuya densidad es parecida a la de los materiales pétreos ensayados en el muestreo 1 (S1), su uniformidad entre partículas es alta y sus granos presentan una forma de elipsoide de revolución con aristas cuya forma se asemeja a un icosaedro. Finalmente, se elige el material 8, el cual es un material de origen sintético, cuya densidad es baja en comparación con los materiales de origen pétreo, la uniformidad entre las partículas es alta y la forma que presentan es completamente esférica.

Una vez definidos los materiales para el segundo muestreo (S2), se procede con el diseño para la realización de réplicas, esto corresponde a la manera de realización del muestreo de tal manera que el análisis de las unidades experimentales sea confiable y se logre capturar la variabilidad que se presenta en el movimiento del material a lo largo del canal. Para ello se fijan tres volúmenes: 1 litro, 2 litros y 3 litros. La repetición del experimento básico o realización de unidades experimentales está sujeta tanto al número de materiales empleados, como a los 3 volúmenes empleados; para cada volumen se realizan 5 pruebas, luego entonces en total se deben realizar 5 ensayos. En la Tabla 25 se muestra el arreglo para los datos que se espera obtener. En la sección 0 se concluye que la potencia esperada para este muestreo es del 88 %.

Anexo 7

Potencia de la prueba: aplicación en el muestreo S2

A continuación, se establece el procedimiento de cálculo para la estimación inicial de la potencia de la prueba, para pruebas de inferencia estadística como inferencia por intervalos o pruebas de hipótesis. Para ello se emplea la ecuación (13.1).

$$n = (t_{\alpha} + t_{\beta})^2 * \hat{\sigma}^2 / \delta^2 \quad (13.1)$$

Donde n es el número de datos de la muestra, $\hat{\sigma}^2$ es la estimación de la varianza de la población de la muestra, δ es la tolerancia que se espera de los ensayos y t_{α} y t_{β} son los estadísticos asociados a las probabilidades de errores tipo 1 y tipo 2 respectivamente (ver Figura 59).

La potencia de la prueba es el inverso de la probabilidad de cometer error tipo 2 (no rechazar la hipótesis nula siendo esta falsa) es decir, $1 - \beta$. Para calcular la potencia de la prueba se despeja el estadístico t_{β} de la ecuación (13.1), resultando como se observa en la ecuación (13.2).

$$t_{\beta} = \sqrt{\frac{\delta^2}{\hat{\sigma}^2} * n} - t_{\alpha} \quad (13.2)$$

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Asumiendo los parámetros de la ecuación (13.2), con una significancia del 5 %, el tamaño de la muestra de 5 unidades, una tolerancia de 10 cm/s, y un error típico estimado de 30 cm/s (asumiendo que sea menor que el estimado en los ensayos del primer muestreo, S1), se obtiene un estadístico para la muestra de error tipo 2, naturalmente de cola izquierda como se observa en la figura 10, $t_{\beta} = -1.39$, el cual tiene una probabilidad adjunta de $\beta = 0.12$, por tanto la potencia es $1 - \beta = 0.88$.

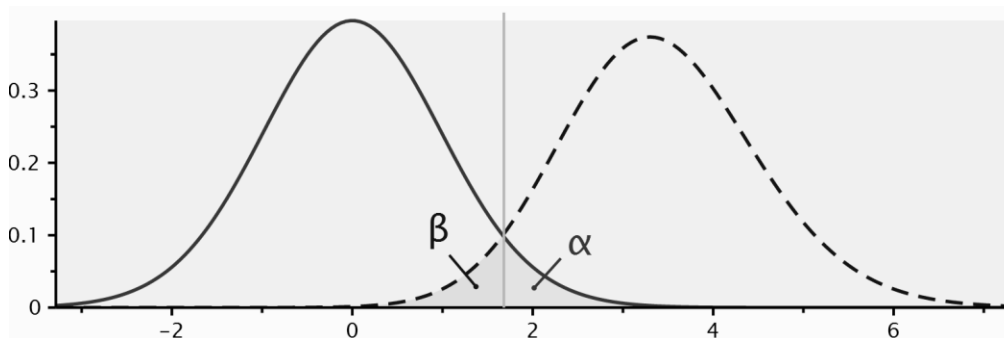


Figura 59. Campanas de Gauss con las probabilidades de error tipo 1 (α) y tipo 2 (β)

Tamaño de la muestra: muestreo S3

Cuando se pretende realizar una campaña experimental, una de las preguntas clave es cuál debe ser el tamaño de la muestra a recolectar. Lo anterior con el fin de obtener resultados estadísticamente significativos del fenómeno cuya existencia se quiere probar estadísticamente. Por ello, en esta sección se muestra el cálculo del tamaño de muestra desde el punto de vista estadístico para el muestreo S3.

En este caso, el experimento tiene como propósito el análisis de dos factores; la influencia del tipo de material (lo que involucra de manera intrínseca las características propias de cada

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

material como: peso específico, ángulo de fricción, etc.) y la influencia de la fricción desarrollada en la interfaz entre el material y la base del canal sobre el desarrollo de velocidades en el canal de flujo Collaptes. Por tal razón, un análisis confiable de los datos obtenidos se puede efectuar mediante el análisis de varianza (ANOVA). Por lo tanto, para la estimación del tamaño de la muestra se realiza un análisis *a priori* de la potencia de la prueba correspondiente a la familia de pruebas *F*, específicamente al ANOVA de una vía y de efectos fijos. Para ello se asumen los parámetros estadísticos nombrados en la Tabla 26.

Tabla 26. Parámetros estadísticos para el cálculo del tamaño de la muestra

Parámetro	Valor
Prob. de error tipo I (α)	0.05
Prob. de error tipo II (β)	0.05
Potencia requerida ($1 - \beta$)	0.95
Número de grupos	3.00

En la Tabla 26 se encuentran los datos del promedio y la desviación estándar correspondientes a los bloques de cada 5 réplicas del muestreo S2, específicamente de la variable que corresponde a la medición de la velocidad máxima instantánea del material de la parte frontal *VMF*. Para dicha variable, la cual se organiza en grupos de 3 cada uno con bloques de 5 réplicas, se estima el tamaño del efecto, que corresponde al grado de significancia de la prueba, es decir, corresponde al grado en el que se espera que el fenómeno esté presente en la muestra con el fin de encontrar significancia estadística. De igual manera se estima el tamaño de la muestra según (Cohen, 1988a).

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

En la Tabla 27 también se muestra el valor de σ_m , que corresponde al valor de la desviación estándar entre cada grupo, el cual se calcula mediante la ecuación (13.3).

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}{3}} \quad (13.3)$$

Tabla 27. Datos promedio y desviación estándar de las variable VMF derivados de la campaña experimental S2

Fuente: Adaptado de (Roman, 2017)

a. Variable: Velocidad Máxima Frontal (VMF)			Volumen: 1 L		No. Muestras: 5	
Identificador	Promedio [cm/s]	Desviación Estándar [cm/s]	Tamaño del efecto		Número de réplicas	
S2P1 – S2P5	454.00	16.88				
S2P16 – S2P20	464.40	38.30				
S2P31 – S2P35	324.80	33.90				
σ_m (Cohen, 1988b)		29,69	>0.4 (grande)		102	
b. Variable: Velocidad Máxima Frontal (VMF)			Volumen: 2 L		No. Muestras: 5	
Identificador	Promedio [cm/s]	Desviación Estándar [cm/s]	Tamaño del efecto		Tamaño de la muestra	
S2P6 – S2P10	430.60	15.88				
S2P21 – S2P25	504.60	58.90				
S2P36 – S2P40	341.60	55.20				
σ_m (Cohen, 1988b)		43,33	>0.4 (grande)		102	
c. Variable: Velocidad Máxima Frontal (VMF)			Volumen: 3 L		No. Muestras: 5	
Identificador	Promedio [cm/s]	Desviación Estándar [cm/s]	Tamaño del efecto		Tamaño de la muestra	
S2P11 – S2P15	444.60	24.80				

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

S2P26 – S2P30	518.40	53.80		
S2P41 – S2P45	362.80	12.36		
σ_m (Cohen, 1988b)	30,32	>0.4 (grande)	102	

Tabla 28. Datos promedio y desviación estándar de las variable VMF derivados de la campaña experimental S2

Fuente: Adaptado de (Roman, 2017)

a. Variable: Velocidad Promedio Frontal (VPF)			Volumen: 1 L	No. Muestras: 5
Identificador	Promedio [cm/s]	Desviación Estándar [cm/s]	Tamaño del efecto	Número de réplicas
S2P1 – S2P5	240.60	7.54		
S2P16 – S2P20	241.40	12.97		
S2P31 – S2P35	160.00	9.70		
σ_m (Cohen, 1988b)	10.07	>0.4 (grande)	102	
b. Variable: Velocidad Promedio Frontal (VPF)			Volumen: 2 L	No. Muestras: 5
Identificador	Promedio [cm/s]	Desviación Estándar [cm/s]	Tamaño del efecto	Tamaño de la muestra
S2P6 – S2P10	254.60	8.35		
S2P21 – S2P25	244.60	18.34		
S2P36 – S2P40	171.80	21.94		
σ_m (Cohen, 1988b)	16,21	>0.4 (grande)	102	
c. Variable: Velocidad Promedio Frontal (VPF)			Volumen: 3 L	No. Muestras: 5
Identificador	Promedio [cm/s]	Desviación Estándar [cm/s]	Tamaño del efecto	Tamaño de la muestra
S2P11 – S2P15	245.80	13.05		
S2P26 – S2P30	248.80	7.26		
S2P41 – S2P45	172.80	11.45		

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

σ_m (Cohen, 1988b)	10,59	>0.4 (grande)	102
---------------------------	-------	---------------	-----

De los resultados presentados en la Tabla 27 y en la Tabla 28 se puede resaltar que al calcular el tamaño del efecto (Cohen, 1988b), para todos los casos se puede clasificar como “grande” por lo que de manera conservadora se asume este valor como 0.4. Del cálculo estadístico se deriva un F (de Fischer) crítico de 3.09, un tamaño de la muestra de 102 unidades experimentales con una potencia verdadera de 0.955.

Para efectos prácticos, con base en los resultados obtenidos, se decide llevar a cabo 135 unidades experimentales, es decir, 15 réplicas por bloque, en 9 bloques en donde en cada uno de ellos se controle el mismo material y la misma fricción entre el lecho del material y la base del canal.

Anexo 8

Equipos para el levantamiento de eventos de deslizamiento

Escáner láser terrestre

El proceso de levantamiento topográfico de nube de puntos consiste en utilizar un hardware especializado que emplee la tecnología necesaria para tomar la mayor cantidad de puntos que sea posible. Específicamente, los levantamientos con el escáner láser terrestre consisten en realizar múltiples estaciones, emulando las estaciones topográficas. El escáner emite y recibe rayos láser y además cuenta con una cámara fotográfica incorporada para recolectar más información del objeto escaneado. En cada una de las estaciones que se hacen con el escáner láser terrestre son tomados millones de puntos que representan fielmente al objeto escaneado, ofreciendo una vista de 360° del entorno en el que se realice el escaneo.

Luego de realizado el levantamiento en campo los datos son descargados en computadora. Luego de tener descargados los datos que contiene el TLS que son nubes de puntos de cada posición de escaneo, fotografías, posición y orientación y demás parámetros tomados por el equipo. Se procede a la conversión en un Proyecto mediante el software Riscan Pr. Posteriormente se procede a realizar el registro que consiste en unir dos o más nubes de puntos de tal forma que estas queden en un sistema de coordenadas común, generando de esta forma una nube de puntos continua con todas las posiciones de escaneo disponibles en el proyecto. Este proceso se puede realizar de diferentes formas dependiendo del uso que vayan a tener los datos obtenidos. En este caso específico, se realizó con un método manual

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

que consiste en encontrar mínimo 4 (cuatro) puntos en común entre dos posiciones de escaneo diferentes, buscando obtener errores en esta unión entre 1 y 5 centímetros ya que entre más pequeño sea este error, los ajustes en los pasos posteriores serán más eficientes en la minimización de estos.

Tabla 29. Especificaciones técnicas del escáner láser terrestre usado en el levantamiento del deslizamiento Lebrija - Girón

Escáner láser terrestre	
Riegl VZ-400	
	
Detalle	Características
Puntos por posición de escaneo	Entre 6 y 8 millones
Alcance	250 m
Peso	9.6 Kg
Tipo Cámara integrada	NIKON D700
Resolución Cámara integrada	12.1 MP
Precisión	3 – 5 mm
Batería	Externa
Duración posición de escaneo	1.5-2.0 min
Resolución de escaneo	0.02°-0.08°
GPS y Brújula	Integrado
Software de procesamiento	Riscan Pro

Los errores presentados en el registro por el método manual pueden ser reducidos mediante una funcionalidad del software *RISCAN PRO* llamada *MULTISTATION ADJUSTMENT* cuya principal función es ajustar la unión en las nubes de puntos hasta llevar los errores al mínimo posible. Al final del procesamiento se obtiene una nube de puntos muy

densa con un alto nivel de precisión sobre la que se pueden realizar mediciones confiables, dibujar, hacer restitución, hacer curvas de nivel, calcular áreas, calcular volúmenes ETC.

Levantamiento con Vehículo Autónomo No Tripulado

Tabla 30. Especificaciones técnicas del VANT usado en el levantamiento del deslizamiento Lebrija - Girón

Plataforma UAV	Phantom 4 pro
	
Detalle	Características
Envergadura	35 cm (diagonal)
Peso	1388 g (Baterías incluidas)
Resolución Cámara	20 MP
Sensor de obstáculos	0.7-15 m
Duración Vuelo	30 – 35 minutos
Velocidad Crucero	50 km / h
Espacio de aterrizaje	Radio de 5 a 10 m
Resistencia al viento	40 km/h (10 m/s)
Radio de comunicación	hasta 5.0 km
Cobertura	0.5 – 0.8 Km2
Resolución de imagen	3-30 cm/pixel
Lanzamiento	Automático
Software	DJI y Pix4D Mapper

El levantamiento mediante el Vehículo Autónomo No Tripulado hace parte de una de las técnicas más recientes de fotogrametría, la cual consiste en la articulación de una cámara fotográfica a un VANT (comúnmente llamado Dron), con la cual se capturan imágenes de una zona predefinida mediante una programación de vuelo. Para realizar este vuelo se debe realizar una planeación en la que son establecidos ciertos parámetros, dependiendo de las

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

características del sector a levantar. Algunas de estos parámetros son: altura de vuelo, traslapo entre imágenes, área de cobertura, entre otros. Después de configurar estos parámetros, la aplicación usada para el levantamiento (en este caso Pix4D) calcula la ruta óptima.

Luego de realizado el levantamiento, las imágenes son llevadas al software para generación de los productos (en este caso pix4D mapper pro). Algunos de los productos obtenidos son:

- Ortofoto: que es una imagen rectificada y georreferenciada con coordenadas conocidas, sobre la cual se pueden realizar mediciones.
- MDS: Modelo Digital de Superficie, también llamado Modelo de Elevación Digital, es una representación 3D de la superficie levantada.
- Nube de puntos tridimensional: Bajo nivel de confiabilidad dado que es generada a partir de fotogrametría, no se recomienda realizar mediciones sobre ella.

Clasificación del suelo

A continuación, se muestran los resultados de la clasificación del suelo del deslizamiento levantado en la vía Lebrija – Girón, mediante los procedimientos descritos en las normas colombianas para hallar el límite líquido (INV E – 125) y el límite plástico e índice de plasticidad (INV E – 126). En la Tabla 31 se relacionan los valores obtenidos del límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad.

MODELADO DEL FLUJO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS

Tabla 31. Límites de Atterberg para la clasificación del suelo del deslizamiento Lebrija – Girón. Fuente: (Silva Ardila & Reyes Chinchilla, 2018)

Límites de Atterberg		
Límite Líquido	LL	25.29 %
Límite Plástico	LP	14.44 %
Índice de Plasticidad	IP	10.85 %
Tipo de suelo	CL	

En la Figura 60 se relacionan de manera gráfica los tres parámetros hallados según los procedimientos descritos en las normas INV E 125 y 126 mediante el nomograma que representa la carta de plasticidad de Casagrande; dicha correlación arroja que el material en estudio es una arcilla arenosa (CL).

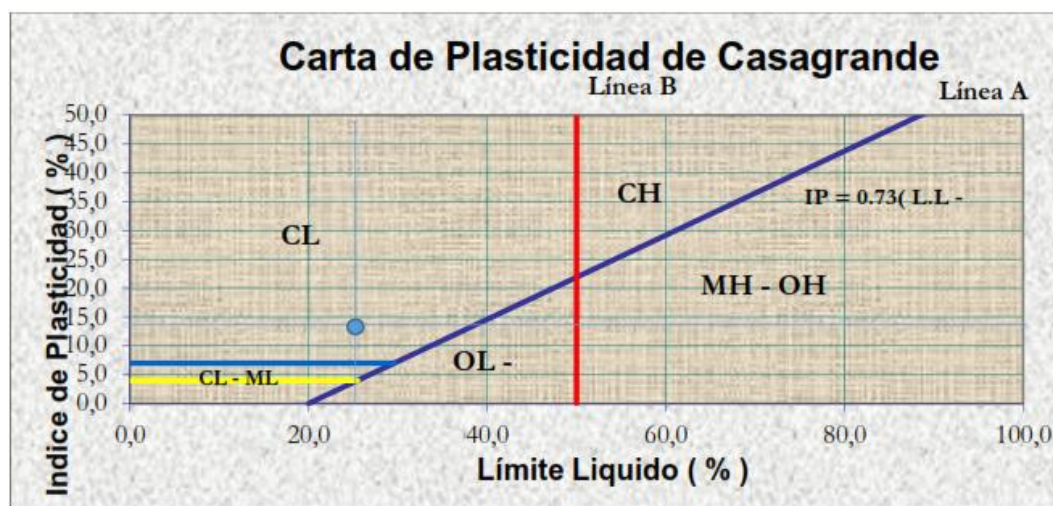


Figura 60. Clasificación del suelo según la carta de plasticidad de Casagrande

Fuente: (Silva Ardila & Reyes Chinchilla, 2018)

Anexo 9

A continuación, se presenta el procedimiento de solución de la ecuación (2.2). En primer lugar, reorganizando sus términos se obtiene la ecuación (14.1).

$$d(v^2) = 2g(\sin \beta - \cos \beta \tan \phi) dL \quad (14.1)$$

De la figura Figura 3c se obtiene la relación trigonométrica $dL = dx/\cos \beta$ por lo tanto, la ecuación (14.1) se reescribe como lo describe la ecuación (14.2).

$$d(v^2) = 2g(\tan \beta - \tan \phi) dx \quad (14.2)$$

Integrando a ambos lados de la ecuación (14.2) y resolviendo la constante de integración se obtiene la ecuación (14.3).

$$v = \sqrt{2g(x \tan \beta - x \tan \phi) + v_{ini}^2} \quad (14.3)$$

Haciendo $u = v$, $\theta = \beta$ y $\phi = \phi_{bed}$ se obtiene de vuelta la ecuación (14.4), la cual coincide con la ecuación (9.1). Para más detalles sobre la derivación matemática del modelo Uniparamétrico remitirse al estudio hecho por Román & Chio (2017).

$$u = \sqrt{2g(x \tan \theta - x \tan \phi_{bed}) + u_{ini}^2} \quad (14.4)$$