



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

TESIS:

MODELO FÍSICO PARA ESTUDIAR LA INFLUENCIA
DE LOS DETRITOS EN LA VELOCIDAD DEL FLUJO
EN CAUCES TORRENCIALES

QUE PARA OBTENER EL GRADO PROFESIONAL DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

PRESENTA:

Miguel Ángel Rodríguez Velázquez

ASESOR:

**Dr. Constantino Domínguez
Sánchez**

CO-ASESOR:

**Dr. Francisco Javier Domínguez
Mota**

Enero de 2021, Morelia, Michoacán

MODELO FÍSICO PARA ESTUDIAR LA
INFLUENCIA DE LOS DETRITOS EN LA
VELOCIDAD DEL FLUJO EN CAUCES
TORRENCIALES

DEDICATORIA

A mis padres, quienes me han enseñado, a pesar de las circunstancias, que no hay que desistir de nuestros objetivos, afrontar nuestros miedos, ser humilde y responsable y a conservar una vida con dignidad.

Espero que este trabajo sea un humilde reconocimiento por todos los sacrificios que han hecho para apoyar a mis hermanos y a mí. Muchas veces nunca supimos cómo lo hacían; sin embargo, nunca nos han fallado.

¡Muchísimas gracias mamá y papá!

AGRADECIMIENTOS

A mi familia decirles que las palabras siempre serán pocas cuando hay tanto que agradecer; así que deseo que el presente trabajo sea un humilde reconocimiento para ustedes, por cada sacrificio realizado, palabra de ánimo dirigida y “gota” de confianza depositada en mí.

Quiero ofrecer un especial agradecimiento a mi novia, Luz María, quien ha estado siempre a mi lado y visto muy de cerca cada uno de los malos y buenos momentos durante este periodo de preparación académica. Muchísimas gracias por brindarme tu amor, paciencia, comprensión e incondicional apoyo.

Al Departamento de Hidráulica y al Laboratorio de Hidráulica Ing. David Hernández Hueramo de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, por sus atenciones y disponibilidad de instalaciones y espacio para el desarrollo del presente trabajo.

Expresar mi más sincero agradecimiento a mis asesores de tesis, el Dr. Constantino Domínguez Sánchez y el Dr. Francisco Javier Domínguez Mota, por todo su apoyo, comprensión y confianza; muchas gracias por todo.

Agradezco a los integrantes del jurado revisor, Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe, Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera y Dr. Sergio Ricardo Galván González, sus comentarios y observaciones para el desarrollo del presente trabajo.

A cada uno de mis compañeros y amigos; y especialmente, reconocer el apoyo incondicional de Israel García Ledesma y María del Mar Navarro Farfán, el cual me brindaron y lo siguen haciendo, muchas gracias por todo.

Ofrecer un especial agradecimiento a los alumnos Oscar Antonio Cedeño Acosta, Víctor Manuel Ayala Torres y Aaron Padilla Villaseñor, integrantes del Servicio Social del Departamento de Hidráulica de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, por su colaboración e incondicional apoyo en el desarrollo del presente trabajo.

Hacer una mención especial a Raúl David Domínguez Sánchez, alumno del Instituto Tecnológico de Monterrey de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica, por su colaboración y apoyo en la instrumentación del modelo hidráulico.

Al M.I. Fernando Ojeda Torres por sus observaciones y comentarios para el presente proyecto de tesis.

Agradecer al Ing. Sergio de Jesús Ríos Rojas, por los gratos momentos y enseñanzas durante la realización de mis prácticas profesionales en Protección Civil de Morelia, y especialmente por su amistad, confianza y motivación otorgada para la culminación del presente proyecto.

RESUMEN

En México, el embate de ciclones tropicales produce lluvias intensas en las partes altas como sierras o montañas que, a su vez, generan desbordamiento de ríos, deslizamiento de laderas y flujo de lodos o de derrubios; y finalmente, producen inundaciones y desastres en poblaciones. Los deslizamientos constituyen uno de los procesos geológicos con mayor repercusión social y económica en el mundo, de aquí la necesidad por estudiar y analizar estos fenómenos.

Desde hace algunas décadas se han producido flujos hiperconcentrados o de derrubios y fenómenos similares, que han ocasionado trágicos desastres en poblaciones cercanas a la zona de iniciación del fenómeno, registrando numerosas pérdidas humanas y económicas.

La propagación del movimiento del geo-material, dadas sus características dinámicas, puede describirse empleando mecánica de fluidos y mediante modelación numérica aproximar la solución de las ecuaciones que describen los fenómenos. Sin embargo, los métodos numéricos de análisis están limitados, ya que deben ser utilizados sólo cuando la estructura matemática del fenómeno en cuestión se encuentra totalmente definida (Ojeda,1987).

La comprensión de los flujos de detritos puede ser a través de estudios experimentales que sean capaces de reproducirlos a escala. Los aparatos y modelos experimentales utilizados deben permitir la medición del mayor número posible de variables involucradas durante el desarrollo del flujo, reproduciendo las características de laderas, barrancas naturales, condiciones de sedimentación y hasta la rugosidad del terreno (Bartali et al.,2012).

La comparación de los resultados obtenidos, con los datos proporcionados trabajando con materiales artificiales, es de gran utilidad para determinar las ecuaciones que modelan los fenómenos naturales, calibrar y validar modelos numéricos de análisis, desarrollar y probar equipos de medición que pueden ser utilizados en el campo con fin de prevenir desastres relacionados con ellos, salvaguardando así, las vidas de las personas e infraestructuras.

Mediante este trabajo se desarrollará una herramienta que proporcione información acerca de las características de interés en el diseño y formulación de medidas de protección, prevención y mitigación de fenómenos de flujo de detritos.

Palabras clave: Flujo de detritos, modelos hidráulicos, concentración de sedimentos.

ABSTRACT

In Mexico, the onslaught of tropical cyclones produces intense rainfall on the higher parts of the country, such as mountain ranges or mountains, which, in turn, generate river overflows, landslides and mud or debris flows; and finally, they produce floods and disasters in towns. Landslides are one of the geological processes with the greatest social and economic impact in the world, hence the need to study and analyze these phenomena.

For some decades there have been hyperconcentrated flows or landslides and similar phenomena, which have caused tragic disasters in populations near the area where the phenomenon started, registering numerous human and economic losses.

The propagation of the movement of the geo-material, given its dynamic characteristics, can be described using fluid mechanics and by means of numerical modeling to approximate the solution of the equations that describe the phenomena. However, the numerical methods of analysis are limited, since they should be used only when the mathematical structure of the phenomenon in question is completely defined (Ojeda, 1987).

The understanding of debris flows can be through experimental studies that are capable of reproducing them to scale. The apparatuses and experimental models used must allow the measurement of the greater possible number of variables involved during the development of the flow, reproducing the characteristics of slopes, natural ravines, conditions of sedimentation and even the roughness of the land (Bartali et al.,2012).

The comparison of the results obtained with the data provided by working with artificial materials is very useful to determine the equations that model the natural phenomena, to calibrate and validate numerical models of analysis, to develop and test measurement equipment that can be used in the field to prevent disasters related to them, thus safeguarding the lives of people and infrastructure.

Through this work, a tool will be developed to provide information about the characteristics of interest in the design and formulation of protection measures, prevention and mitigation of debris flow phenomena.

Keywords: Debris flow, hydraulic modeling, sediment concentration.

ÍNDICE

Dedicatoria.....	2
Agradecimientos.....	3
Resumen.....	5
Abstract.....	6
I. Introducción.....	19
Zona de estudio.....	21
II. Objeto de estudio.....	25
III. Planteamiento del problema.....	25
IV. Justificación.....	28
V. Objetivo general.....	29
VI. Objetivos particulares.....	29
VII. Hipótesis.....	29
VIII. Marco Teórico.....	30
clasificación y definición de los flujos de detritos.....	30
Ecuaciones gobernantes de los flujos de detritos.....	32
Modelación física reducida.....	36
Criterios de Semejanza.....	37
Entorno de Arduino.....	40
Arduino/Genuino Mega o Mega 2560.....	42
IX. Diseño de la investigación.....	43
Construcción del modelo.....	43
Características físicas de los materiales de prueba.....	44

Densidad y peso específico	44
Distribución de tamaños de las partículas	45
Instrumentación y monitoreo del modelo hidráulico	46
Puesta en operación y pruebas preliminares	47
Diseños de pruebas y escenarios	47
Realización de pruebas definitivas.....	47
Análisis de los resultados esperados.	48
X. Resultados preliminares.....	49
Construcción del modelo	49
Características físicas de los materiales de prueba	65
Instrumentación y monitoreo del modelo hidráulico	71
Puesta en operación y pruebas preliminares	78
Diseño de pruebas y escenarios	88
XI. Resultados de la modelación	94
Pruebas en condiciones de agua clara.....	94
Pruebas en condiciones de flujo de detritos.....	101
XII. Análisis y discusión de resultados	116
XIII. Conclusiones	120
XIV. Trabajo futuro	123
Validación de modelos.....	123
Análisis y funcionamiento de obras hidráulicas para la prevención de riesgo por flujo de detritos	123
Estudio de parámetros reológicos asociados a diferentes condiciones de concentración y tamaños de partículas	125

Análisis e implementación de equipo de monitoreo en tiempo real de bajo costo y alerta temprana para flujo de detritos	125
XV. Referencias consultadas.....	126
Anexo 1: Tablas de registro de datos de la velocidad de onda del flujo	131
Anexo 2: Tablas de distancias registradas por los sensores 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12.	167

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Localización geográfica de la zona de estudio.	21
Figura 2.- Perfil longitudinal del tramo del río seleccionado.	23
Figura 3.- Sección transversal del tramo de río seleccionado	24
Figura 4.- Clasificación de flujos en función de la concentración volumétrica. (Figuroa, 2013).	31
Figura 5.-Parte del material depositado en la zona urbana. (Recuperado de: Quadratín, Michoacán).....	32
Figura 6.-Semejanza geométrica. (Recuperado de: Echávez, 1996).....	37
Figura 7.- Semejanza cinemática. (Recuperado de: Echávez, 1996).....	38
Figura 8.- Semejanza dinámica. (Recuperado de: Echávez, 1996).	39
Figura 9.- Esquema metodológico para el desarrollo del proyecto de investigación.	43
Figura 10. Juego de tamices, utilizado para pruebas de granulometría.	45
Figura 11. Medidor de flujo ultrasónico TDS-100H.	47
Figura 12.- Simulación en condiciones de agua clara sobre la zona en estudio.	49
Figura 13.- Recorrido del cauce principal de la cuenca en estudio.	50
Figura 14.- Plano de distribución de espacios y ubicación del modelo de flujo de detritos en el "Laboratorio de Hidráulica Ing. David Hernández Huéramo.....	51
Figura 15.- Vista en planta de la configuración topográfica del modelo de flujo de detritos. ..	52
Figura 16.- Despalse y nivelación de la zona de construcción del modelo hidráulico.	53
Figura 17.- Zona de construcción de la modelo hidráulico nivelada.....	53
Figura 18.- Malla rectangular de 0.50m x 0.50m por lado.	54
Figura 19.- Replanteo de secciones transversales y centro de línea del cauce principal.....	54
Figura 20.- Replanteo y colocación de cotas del cauce principal.....	54
Figura 21.- Perfil longitudinal del cauce en estudio y volúmenes de relleno de material granular en el modelo por el método de secciones.	55
Figura 22.- Perfil longitudinal del tramo en estudio durante la construcción del modelo físico.	55
Figura 23.- Sección transversal 0+000.	56

Figura 24.-Sección transversal 0+005.	56
Figura 25.-Sección transversal 0+010.	56
Figura 26.-Sección transversal 0+015.	56
Figura 27.-Sección transversal 0+018.	56
Figura 28.-Sección transversal 0+023.	57
Figura 29.-Sección transversal 0+025.	57
Figura 30.-Sección transversal 0+030.	57
Figura 31.-Sección transversal 0+035.	57
Figura 32.-Sección transversal 0+040.	57
Figura 33.-Sección transversal 0+045.	58
Figura 34.-Sección transversal 0+050.	58
Figura 35.-Sección transversal 0+055.	58
Figura 36.-Sección transversal 0+060.	58
Figura 37.-Sección transversal 0+065.	58
Figura 38.-Sección transversal 0+070.	59
Figura 39.-Sección transversal 0+075.	59
Figura 40.-Sección transversal 0+080.	59
Figura 41.-Sección transversal 0+00585.	59
Figura 42.-Sección transversal 0+090.	59
Figura 43.- Replanteo y colocación de cotas de las secciones transversales en escala 1:10.	60
Figura 44.- Mejoramiento mecánico con grava de ¾" del suelo donde se desplantarán los muros.	60
Figura 45.- Junteado de tabicones para la construcción de los contornos del modelo hidráulico.	61
Figura 46.- Acarreo de material filtro por medios manuales y con apoyo de alumnos que realizan servicio social en el Departamento de Hidráulica.	61
Figura 47.- Nivel de relleno durante la construcción del modelo de hidráulico.	62
Figura 48.- Colocación de malla hexagonal sobre la superficie de relleno del modelo hidráulico.	63
Figura 49.- Geometría a escala 1:10 de la zona de estudio con una malla de 10 600 elementos triangulares Delaunay mediante el modelo de Iber V. 4.3.3.	64

Figura 50.- Panorámica del modelo de flujo de detritos construido. Escala geométrica 1:10. .64	64
Figura 51. Conjunto de partículas obtenidas del material depositado del evento de 10 julio de 2018.66	66
Figura 52.- Diversidad de geo-mataerial susceptible a ser arrastrado por el flujo.67	67
Figura 53.- Distribución teórica del material de prueba (sin escalar).68	68
Figura 54. Curva de distribución teórica del material de prueba a escala.69	69
Figura 55. Separación por su tamaño de partículas del material utilizado en las pruebas de flujo de detritos.70	70
Figura 56. Esquema de la ubicación de los sensores HC-SR04 en la sección transversal 0+040 (aguas abajo).....72	72
Figura 57. Esquema de la ubicación de los sensores HC-SR04 en la sección transversal 0+065 (aguas arriba)72	72
Figura 58. Vista en planta del esquema de ubicación de los sensores HC-SR04.....73	73
Figura 59. Detalle de montaje de los sensores HC-SR04.....74	74
Figura 60. Fabricación de bases o soportes de acero para el montaje de los sensores ultrasónicos HC-SR04.74	74
Figura 61. Montaje de soportes de acero sobre el modelo físico.75	75
Figura 62. Montaje de sensores ultrasónicos HC-SR0475	75
Figura 63.- Acomodo de sensores ultrasónicos para definir la velocidad de la onda de flujos de detritos sobre la sección transversal 0+040.78	78
Figura 64.- Motobomba utilizada en pruebas preliminares para la alimentación de gasto.79	79
Figura 65.- Equipo ultrasónico utilizado en el aforo de tubería principal en el laboratorio de hidráulica79	79
Figura 66.- Aforo de tubería del laboratorio de hidráulica.80	80
Figura 67.- Preparación de la espiga de forma manual para la unión de tramos de tubería.....81	81
Figura 68.- Alineación y unión de la tubería en la línea de alimentación del modelo hidráulico.81	81
Figura 69.- Lubricación de los tramos de tubería para su respectiva unión.82	82
Figura 70.- Construcción de tanque de disipación de energía, con apoyo de compañeros del Departamento de Hidráulica.82	82

Figura 71.- Panorámica de la instalación de la línea de alimentación de flujo del modelo hidráulico.....	83
Figura 72. Ensayo de descarga de los diferentes tamaños de partículas de material pétreo.	84
Figura 73. Ubicación espacial de la tolva, vista en planta.....	85
Figura 74. Dimensionamiento de la tolva para descarga de agregados pétreos, vista en planta, lateral y frontal.....	85
Figura 75. Dimensionamiento de la tolva para descarga de agregados pétreos, vista en planta, posterior y lateral.	86
Figura 76. Fabricación de la tolva para descarga de material pétreo.	86
Figura 77. Colocación de la tolva para descarga de material pétreo sobre el modelo hidráulico.	87
Figura 78. Ensayo de descarga de material pétreo a una apertura de 12.5 cm.	87
Figura 79. Hidrogramas para diferentes períodos de retorno (Tr).....	89
Figura 80. Hidrogramas (a escala) para diferentes períodos de retorno (Tr).	91
Figura 81. Simulación en condiciones de agua clara (vista en planta) para un Tr= 25 años. ...	94
Figura 82. Perspectiva de la simulación en condiciones de agua clara para unTr=25 años.	95
Figura 83. Alturas registradas por el sensor 1 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara.....	95
Figura 84. Alturas registradas por el sensor 2 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara.....	96
Figura 85. Alturas registradas por el sensor 3 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara.....	96
Figura 86. Alturas registradas por el sensor 6 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara.....	97
Figura 87. Alturas registradas por el sensor 5 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara.....	97
Figura 88. Alturas registradas por el sensor 6 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara.....	98
Figura 89. Alturas registradas por el sensor 7 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara.....	98

Figura 90. Alturas registradas por el sensor 8 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara.....	99
Figura 91. Alturas registradas por el sensor 9 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara.....	99
Figura 92. Alturas registradas por el sensor 10 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara.....	100
Figura 93. Alturas registradas por el sensor 11 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara.....	100
Figura 94. Alturas registradas por el sensor 12 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara.....	101
Figura 95. Agregados indicadores del comportamiento de la media de la distribución teórica.	101
Figura 96. Simulación en condiciones de detritos (vista en planta) para un $Tr=25$ años y una apertura de la escotilla de 12 cm.	102
Figura 97. Perspectiva de la simulación en condiciones de flujo de detritos para un $Tr=25$ años y apertura a 12 cm.	102
Figura 98. Simulación de flujo de detritos (vista en planta) para un $Tr=25$ años a una apertura de la escotilla de 15 cm.....	103
Figura 99. Perspectiva de la simulación de flujo de detritos para un $Tr=25$ años a una apertura de la escotilla de 15 cm.....	103
Figura 100. Alturas registradas por el sensor 1 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla	104
Figura 101. Alturas registradas por el sensor 1 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla	104
Figura 102. Alturas registradas por el sensor 2 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla	105
Figura 103. Alturas registradas por el sensor 2 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla.	105
Figura 104. Alturas registradas por el sensor 3 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla	106

Figura 105. Alturas registradas por el sensor 3 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla	106
Figura 106. Alturas registradas por el sensor 4 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla	107
Figura 107. Alturas registradas por el sensor 4 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla.	107
Figura 108. Alturas registradas por el sensor 5 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla.	108
Figura 109. Alturas registradas por el sensor 5 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla.	108
Figura 110. Alturas registradas por el sensor 6 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla	109
Figura 111. Alturas registradas por el sensor 6 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla	109
Figura 112. Alturas registradas por el sensor 7 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla.	110
Figura 113. Alturas registradas por el sensor 7 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla.	110
Figura 114. Alturas registradas por el sensor 8 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla.	111
Figura 115. Alturas registradas por el sensor 8 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla.	111
Figura 116. Alturas registradas por el sensor 9 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla.	112
Figura 117. Alturas registradas por el sensor 9 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla.	112
Figura 118. Alturas registradas por el sensor 10 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla	113
Figura 119. Alturas registradas por el sensor 10 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla	113

Figura 120. Alturas registradas por el sensor 11 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla.	114
Figura 121. Alturas registradas por el sensor 11 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla.	114
Figura 122. Alturas registradas por el sensor 12 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla.	115
Figura 123. Alturas registradas por el sensor 12 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla.	115
Figura 124. Perfil característico de una oleada de flujo de detritos	117
Figura 125. Ejemplo de un flujo de detritos que fluye por hacia aguas abajo. (Recuperado de: Takahashi, T., & Das, D. K., 2014).....	118
Figura 126. Presencia de pequeñas oleadas durante la simulación de flujo de detritos con una concentración en términos de caudales de 0.15.....	118
Figura 127. Depósito de agregados pétreos, debido a la disminución de capacidad erosiva en esa margen.	119
Figura 128. Depósito de material a la margen en el cauce del modelo	121
Figura 129. Ejemplo de represa SABO para el control de flujos de detritos en Minami-Aso Village (Kumamoto). Recuperada de: Villacorta, S.; Huarez, C. & Colina, C., 2016.	124
Figura 130. Presa SABO abierta (tomado de: Ikeda, 2015).	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Clasificación cualitativa de los regímenes para los flujos hiperconcentrados y de detritos.	33
Tabla 2.- Escalas de semejanza para modelos con superficie libre.	40
Tabla 3. Ejemplo de diferentes tipos de tarjetas Arduino.....	41
Tabla 4. Características de la tarjeta Arduino Mega 2560.	42
Tabla 6. Tabla de distribución de frecuencias de las partículas del material depositado en el evento de 10 julio de 2018.....	65
Tabla 7. Dimensiones triaxiales, forma y color de algunas partículas recolectadas durante el evento del 10 de julio de 2018.....	66
Tabla 8.- Características físicas del material pétreo de la cabecera de la microcuenca de aportación.	68
Tabla 9. Densidad y peso específico del material pétreo para pruebas.	70
Tabla 10. Distribución de frecuencias teórica e integración de tamaños de partículas del material para pruebas.....	71
Tabla 11. Variación de caudales para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, 1000, 5000 y 10000 años.....	88
Tabla 12. Variación de caudales para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, 1000, 5000 y 10000 años (a escala).....	90
Tabla 13. Caudales de descarga de material pétreo.....	92
Tabla 14. Concentración de partículas en términos de caudales para diferentes aperturas y períodos de retorno.	92
Tabla 15. Simbología de los agregados "indicadores"	101
Tabla 16. Resumen de la velocidad de onda del flujo para diferentes escenarios.....	116
Tabla 16. Datos de registro de velocidad y alturas para condiciones de agua clara.....	131
Tabla 17. Datos de registro de velocidad y alturas para flujo de detritos con concentración en términos de caudal de 0.12	138
Tabla 18. Datos de registro de velocidad y alturas para flujo de detritos con concentración en términos de caudal de 0.15	154
Tabla 19. Datos de distancia, registrados por los sensores ultrasónicos HC-SR04 para condiciones de agua clara.	167

Tabla 20. Datos de distancia, registrados por los sensores ultrasónicos HC-SR04 para condiciones de flujo de detritos con 0.12 de concentración.	169
Tabla 21. Datos de distancia, registrados por los sensores ultrasónicos HC-SR04 para condiciones de flujo de detritos con 0.15 de concentración.	174

I. INTRODUCCIÓN

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

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

De acuerdo con Sánchez-Núñez et al., (2017), la condición de peligro geológico se magnifica por la presencia de fenómenos hidrometeorológicos anómalos y sobre todo por las actividades antropogénicas que se desarrollan en la región; por ejemplo, la excesiva deforestación de bosques, las actividades agrícolas, la ganadería extensiva, los asentamientos humanos irregulares sobre los cauces de ríos y la construcción de caminos en las partes altas de la sierra,

son algunos factores que incrementan la inestabilidad de laderas, la cantidad de materiales disponibles para su remoción y la situación de vulnerabilidad de la población.

De acuerdo con Díaz (1998), los flujos de detritos son el desprendimiento y transporte de partículas gruesas y finas en una matriz de agua y granos en forma de flujo seco o saturado; y generalmente no se les considera como procesos de deterioro sino como deslizamientos.

En diversos países alrededor del mundo se han realizado estudios de este tipo de flujos, los cuales tienen el objetivo de caracterizarlos mediante la definición de su reología. De éstos, los más relevantes se han desarrollado en Japón, país donde este tipo de flujos ocurren con más frecuencia (Gómez Cortés, D. A., 2012). Los estudios experimentales son los de mayor aporte para este tipo de fenómenos, ya que han permitido establecer las teorías físicas y ecuaciones constitutivas existentes para describir el flujo y el proceso de deposición.

Michoacán es uno de los estados de la República Mexicana que experimenta año con año el embate de diversos fenómenos de tipo meteorológico; además, la presencia de varios factores condicionantes que participan en el desequilibrio de laderas y su orografía, una de las más accidentadas del país, conformada por parte del Eje Volcánico Transversal y la Sierra Madre del Sur, inciden para que el Estado sea susceptible a desarrollar flujos de detritos en varias regiones. Por ejemplo, en febrero de 2010, Mineral de Angangueo fue sometido por la capacidad destructiva del agua mezclada con geo-materiales y otras partículas sólidas; y recientemente, el 10 julio de 2018, la zona norte de la ciudad de Morelia.

ZONA DE ESTUDIO.

La zona de estudio corresponde a un tramo de uno de los ríos tributarios de cabecera de la microcuenca del dren “El Quinceo”, éste se ubica al norte del municipio de Morelia, al norte del estado de Michoacán (ver Figura 1).

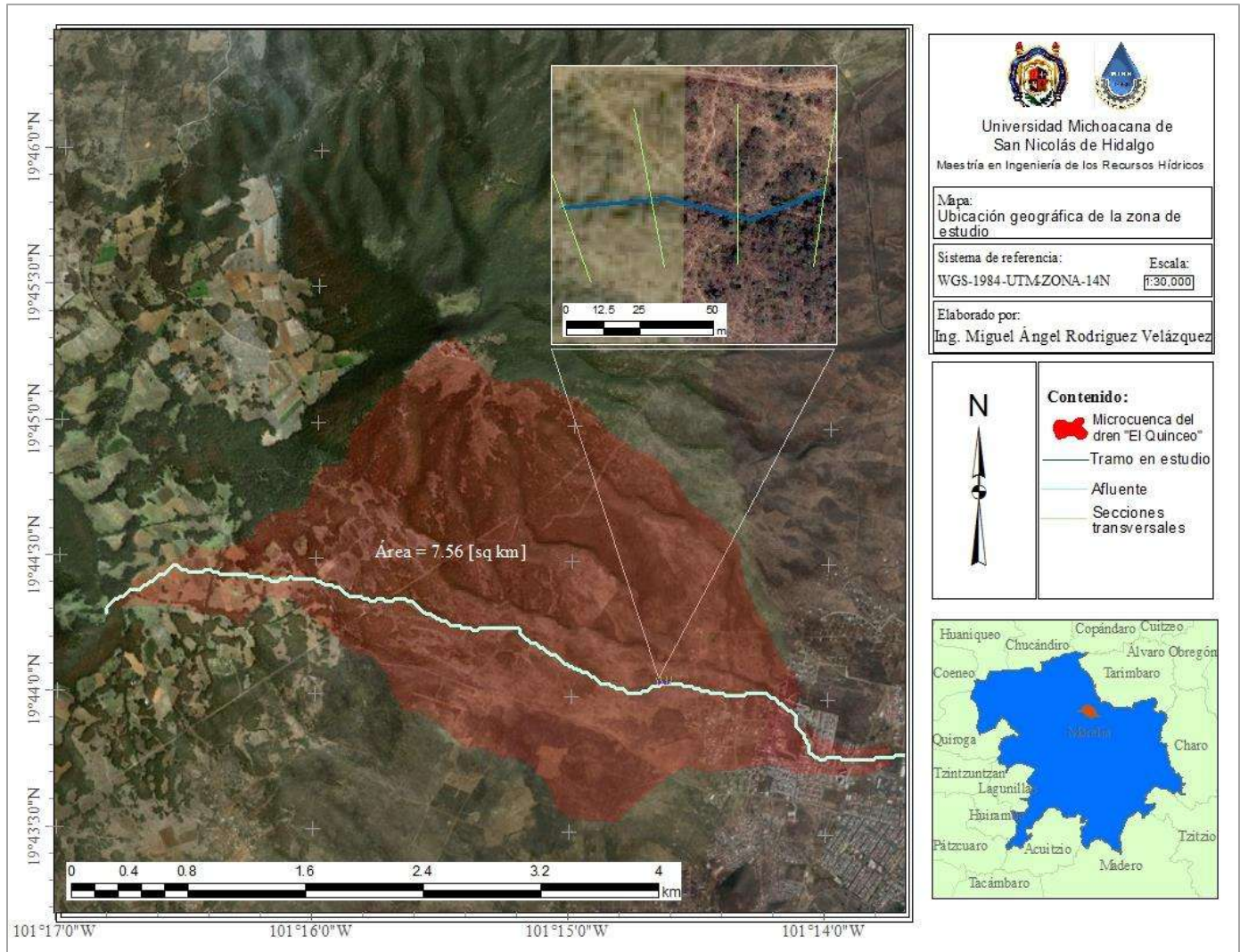


Figura 1.- Localización geográfica de la zona de estudio.

Con base a visitas de campo, se ha reconocido que el río seleccionado para estudiar es el que tuvo mayor influencia en el desastre del 10 de julio de 2018; además, por simulaciones numéricas realizadas en condiciones de agua clara mediante el software Iber v.2.4.3, sobre el tramo seleccionado (ver Figura 2), se observa que es la zona en la que se confina el flujo debido

a la forma “triangular o V” de la sección transversal del río, típica en cauces torrenciales (ver Figura 3), pudiendo alcanzar tirantes relativamente grandes. Lo anterior implica que en el modelo físico se generen menores deformaciones de la escala vertical, y de forma conveniente, tirantes que sean medibles con instrumentos de laboratorio.

El tramo seleccionado del río afluente, entre los puntos de color rojo de la siguiente figura, tiene una longitud de 92 m y una pendiente media de 12%.

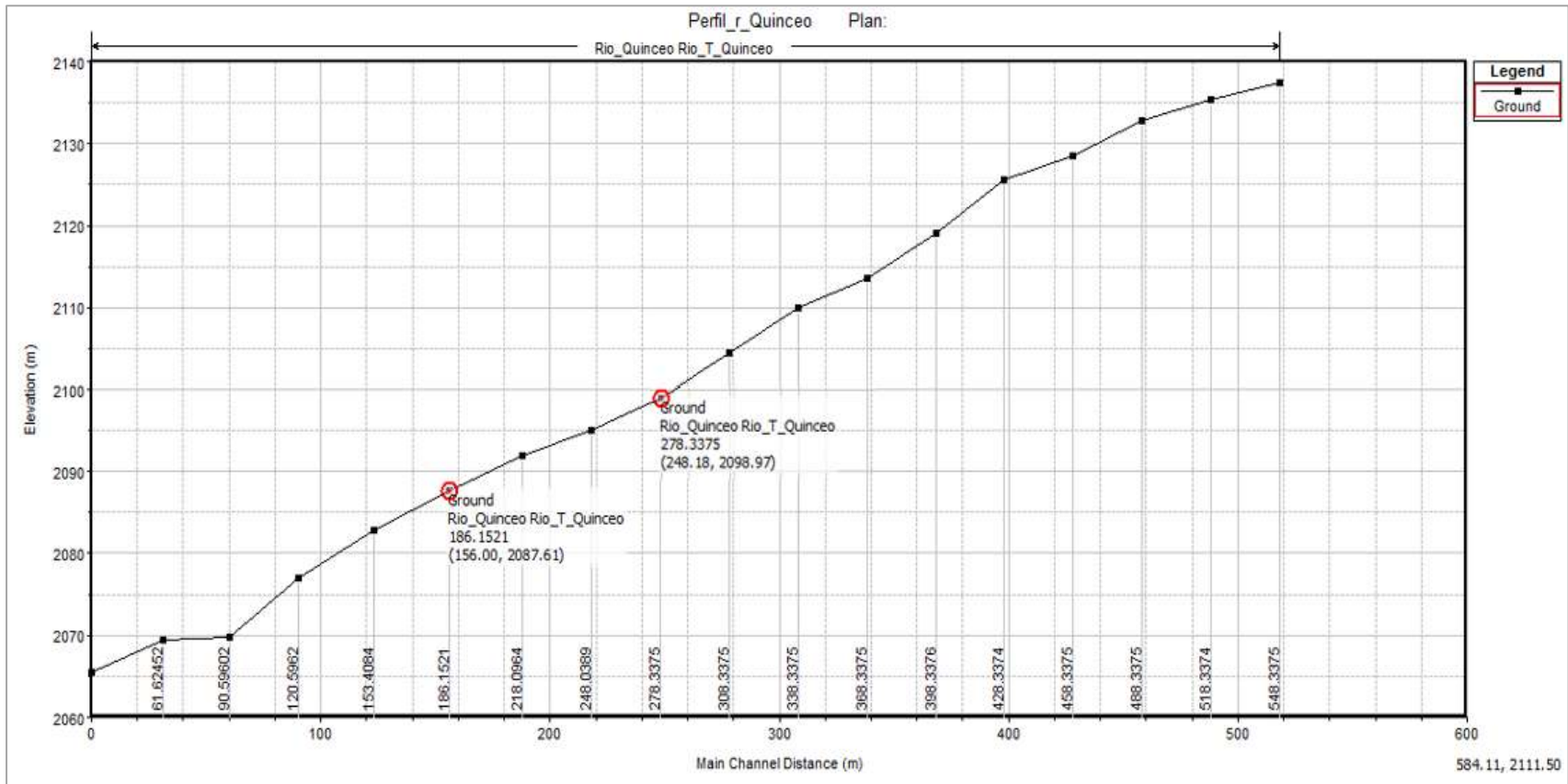


Figura 2.- Perfil longitudinal del tramo del rio seleccionado.

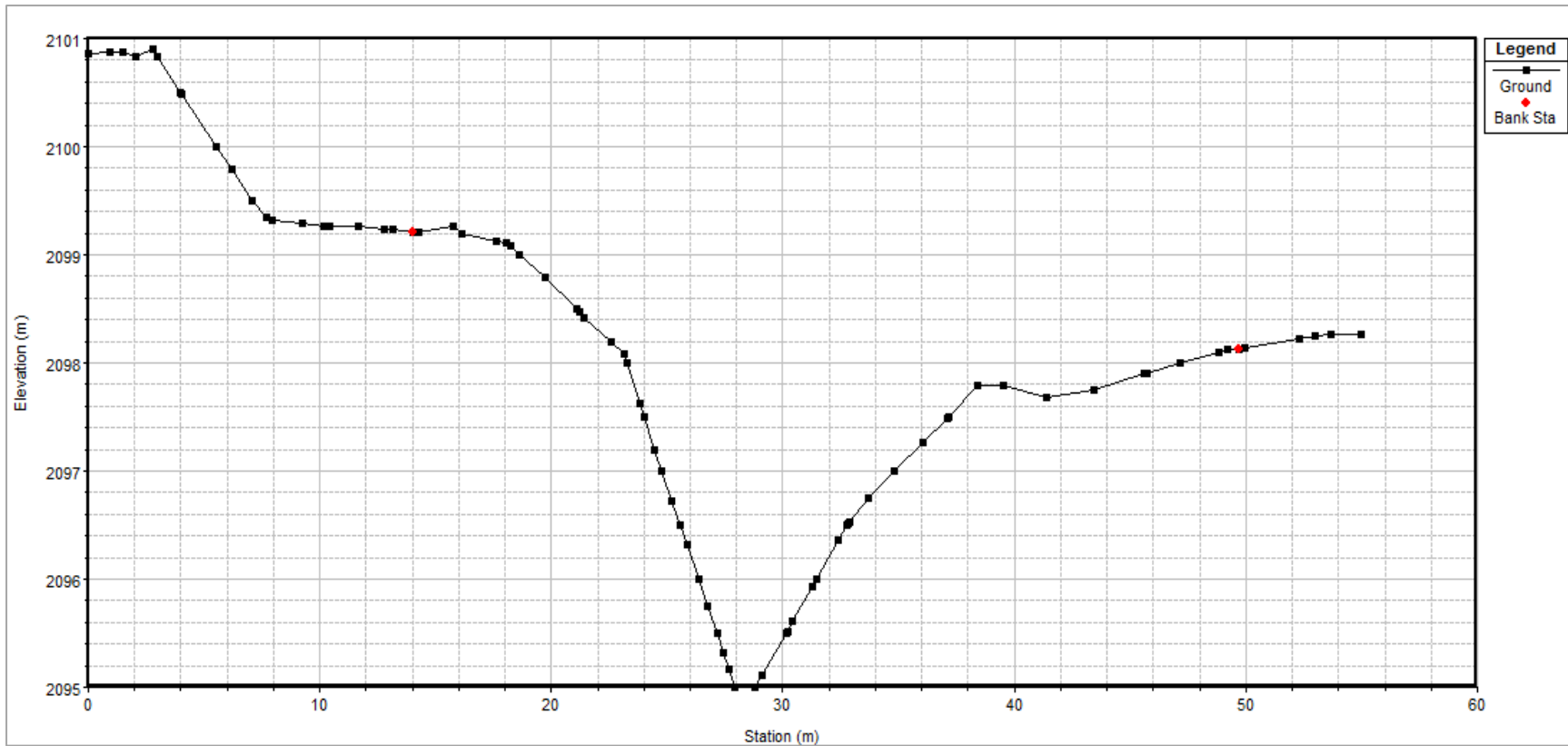


Figura 3.- Sección transversal del tramo de río seleccionado

II. OBJETO DE ESTUDIO

La presente investigación se enfoca en el comportamiento del movimiento de flujo de detritos (*debris flow*), debido a que varias regiones de nuestro país se encuentran potencialmente activas a desarrollar este tipo de deslizamientos de ladera.

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De acuerdo con Lugo-Hubp et al., (2005), los procesos gravitacionales o de remoción en masa cobraron mayor importancia en el mundo en las tres últimas décadas del siglo XX debido al considerable incremento en los daños y desastres, los cuales, a su vez, están relacionados con el desarrollo de asentamientos humanos hacia zonas peligrosas. Los conceptos teóricos que explican los procesos de remoción de masa han sido tratados por varios autores, estando entre los principales Sharpe (1938), Varnes (1958, 1978), Záruba y Mencl (1969), Crozier (1986) y Dikau et al. (1996), quienes consideran la influencia del agua superficial y subterránea, la litología, la estructura geológica y el relieve, además de la sismicidad y la actividad humana, como factores principales para el desarrollo del movimiento de laderas. Sin embargo, las contribuciones hechas por Bagnold (1954) y Takahashi (1978) han permitido el análisis reológico de los flujos de detritos y el desarrollo de modelos reológicos.

En la década de 1990, se realizaron estudios experimentales de deslizamientos de laderas en los que se demuestra, a través de modelos experimentales de laboratorio, que la presión de poro en el suelo, la influencia de flujo subterráneo y la intensidad de la precipitación son factores relevantes que pueden detonar la movilización de masa de suelo; que en combinación con el agua y otras partículas sólidas dan origen al desarrollo de flujo de detritos (e.g., Johnson y Sitar 1990, Montgomery et al. 1990 y Reid et al. 1997).

En septiembre de 1998 y octubre de 2005 los municipios de Motozintla y Tapachula, Chiapas sufrieron los desastres históricos más significativos registrados hasta la fecha (Caballero et al., 2006; Murcia y Macías, 2009).

En 2012, Bartali y colaboradores, presentaron un modelo multisensor, GRANFLOW-SIM (*Granular Flows Simulator*), que permite el estudio y la simulación de diferentes tipos de flujos granulares observados en la naturaleza (tales como avalanchas, lahares y flujos de escombros) a escala y en tiempo real, por lo que emplea gran cantidad de sensores y cámaras de video de alta velocidad, repartidos a lo largo de las diferentes secciones que lo componen. Este trabajo permitió corroborar una vez más que la comprensión de los eventos precursores y detonadores, así como la manera en que estos flujos se desarrollan a lo largo de las pendientes, es de fundamental importancia para prevenir desastres relacionados con ellos, salvaguardando así vidas e infraestructura.

De acuerdo con Arévalo (2015), la metodología comúnmente utilizada para el estudio de procesos de remoción de masa presenta varias limitaciones, entre ellas se destaca que el modo de deformación supuesto no es el que se presenta en la mayoría de las situaciones en campo; la suposición de movilización de resistencia en la totalidad de la superficie potencial de falla; la exclusión de características importantes del movimiento como la velocidad de la masa y distancia a la que se deposita; y la asunción de que el medio es continuo, pero en realidad su naturaleza es discreta, por lo que las características relacionadas con la granulometría no se pueden considerar en el análisis.

En el estudio de los deslizamientos de laderas se puede identificar claramente tres líneas de investigación: la iniciación o rotura, propagación y deposición. Además, de acuerdo con Diaz (1998), se identifica que se requiere un análisis especial de cada caso para su tratamiento. Actualmente estos fenómenos pueden ser estudiados y modelados a través de aparatos experimentales que sean capaces de reproducirlos a escala, o por medio de simplificaciones matemáticas de las ecuaciones que los describen, dando lugar a modelos numéricos (e.g. O'Brien et. al, 1993). Éstos últimos, tienen una desventaja sobre los modelos físico o experimentales, debido a la escasez de datos observacionales, el desconocimiento parcial de las condiciones iniciales y de contorno, la elección del modelo reológico por falta de los parámetros reológicos del material que se movilizará; es decir, expresar las propiedades físicas del material,

determinar la relación esfuerzo-deformación y adicionalmente la dependencia de la solución de condiciones iniciales y de contorno. Esto dificulta la creación y aplicación de modelos teóricos capaces de reproducir completamente los fenómenos de flujo hiperconcentrado y de detritos.

IV. JUSTIFICACIÓN

La importancia de la observación y análisis de los flujos de detritos, radica en conocer las características físicas, el área afectada y el espesor de los depósitos producidos; ya que la predicción precisa de la distancia recorrida por estos flujos, de las velocidades y niveles alcanzados ayuda en la delimitación de áreas de riesgo y proporcionar los parámetros para el diseño de medidas por protección y obras de mitigación, que deben considerar las solicitaciones generadas por estos flujos, tanto desde el punto de vista del diseño estructural, como el hidráulico, dado los esfuerzos actuantes.

De acuerdo con Sánchez-Núñez et al., (2015) el análisis y estudio de depósitos, así como su registro estratigráfico obtenido en abanicos aluviales y terrazas, permiten identificar eventos históricos provocados por fenómenos meteorológicos y sísmicos tan jóvenes como 165 años. En este sentido, las características estudiadas podrían ser utilizadas para la modelación analítica de flujo en ambientes similares en otras regiones del país.

A través de la modelación física, los deslizamientos de ladera pueden ser generados artificialmente y las condiciones geotécnicas e hidrológicas controladas y monitoreadas, lo cual representa una ventaja sobre los modelos numéricos (Ojeda, 1987). Y de acuerdo con Bartali y colaboradores (2012), los resultados obtenidos en estas condiciones permiten crear bases de datos que ayudan a la comprensión de los fenómenos y la creación de modelos teóricos. Adicionalmente, la experimentación a escala sirve también para desarrollar y probar los sensores y equipos de medición que pueden ser utilizados en el campo.

V. OBJETIVO GENERAL

Estudiar el flujo de detritos en un cauce torrencial mediante un modelo físico.

VI. OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar si la concentración de detritos tiene influencia en la velocidad del flujo.
- Determinar si la pendiente longitudinal del fondo tiene influencia en perfil vertical de la concentración y en la distribución de tamaños de material.
- Determinar el tiempo de llegada de la onda a un punto de interés.
- Determinar qué factor tiene mayor influencia en la velocidad de avance de la onda.

VII. HIPÓTESIS

La concentración de detritos disminuye la velocidad de avance de la onda del flujo.

VIII. MARCO TEÓRICO

CLASIFICACIÓN Y DEFINICIÓN DE LOS FLUJOS DE DETRITOS

De acuerdo con Julien, P. Y., & Leon, C. (2000) y Figueroa (2013), los flujos de detritos (*debris flow*), inundaciones de lodo (*mud floods*) y flujo de lodos (*mud flows*), son clasificados como flujo hiperconcentrado; además, resulta conveniente atenderlos bajo la teoría de la hidráulica, ya que ésta tiene mayor injerencia en el tema del desarrollo y comportamiento de los flujos al usar una amplia gama de herramientas para explicar la dinámica del movimiento.

Los flujos de detritos son una mezcla de agua con sedimentos en altas concentraciones, mezclados a su vez con gravas, fragmentos de rocas y material orgánico arrastrado durante su movimiento, es por ello que se consideran como fluidos *no newtonianos*. Estos tipos de flujos son complejos de entender y analizar ya que, existe una gran variedad de materiales que pueden mezclarse con el agua, alterando de manera radical sus propiedades. Esta es la razón principal por la que varios investigadores (e.g. Bagnold, O'Brien, Julien, Takahashi, Pierson, etc.) han dedicado años de investigación para tratar describirlos. Según Takahashi (1991) los flujos de detritos pueden clasificarse en cuatro grupos, esto en función de los esfuerzos predominantes como efecto de la mezcla del líquido sólidos:

- i. **Flujo de derrubios tipo pedregoso (*Stony-type debris flow*)**. En éstos la matriz de flujo está compuesta por partículas gruesas, fragmentos de rocas y cantos rodados. En la dinámica de estos flujos, que mantienen un régimen casi estático, se generan esfuerzos por la colisión entre los componentes de la matriz de flujo, estos esfuerzos son responsables de la dispersión de las partículas.
- ii. **Flujo de derrubios fangosos turbulentos (*Turbulent-muddy type*)**. La matriz de flujo está compuesta por materiales finos cohesivos. Estos flujos son dominados por esfuerzos provocados por la turbulencia de la mezcla.
- iii. **Flujos de detritos viscosos (*Viscous-type*)**. La matriz de flujo es cohesiva, compuesta principalmente por arcillas. En los flujos viscosos predominan los esfuerzos viscoplásticos.

- iv. **Flujos de derrubios híbridos (Hybrid-type).** Los flujos de derrubios generalmente se presentan como un conjunto, es decir, en combinación de dos o más de los flujos mencionados anteriormente, siendo esta situación el caso más general. Los flujos híbridos consisten generalmente de una capa inferior de partículas en colisión y en contacto, y de otra capa superior turbulenta con partículas en suspensión

Así, la clasificación del flujo de detritos queda como se muestra en la siguiente figura:

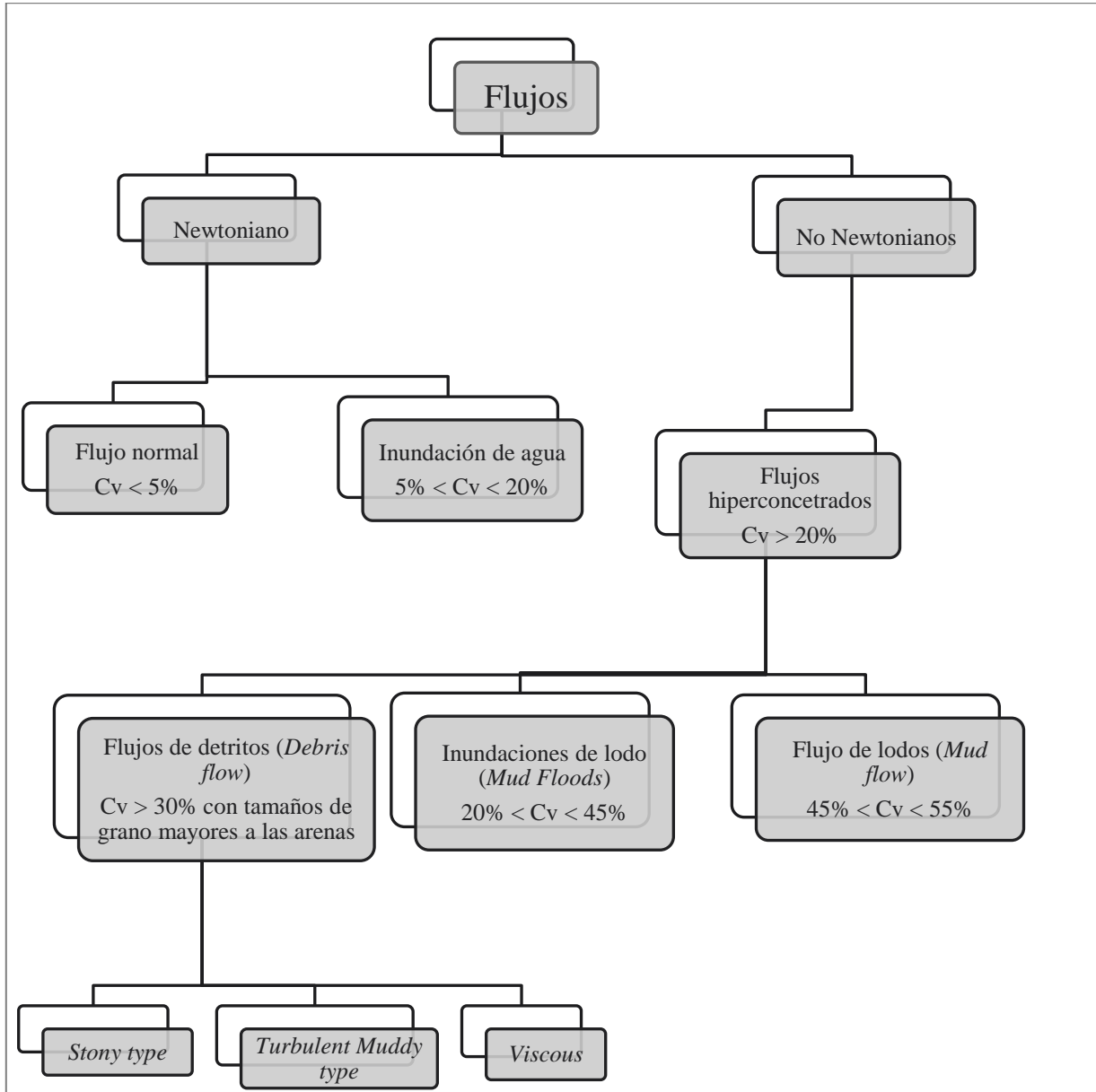


Figura 4.- Clasificación de flujos en función de la concentración volumétrica. (Figueroa, 2013).

Debido a la diversidad de materiales mezclados y acarreados en el evento del 10 de julio de 2018, en la ciudad de Morelia (ver figura siguiente), el presente proyecto se tratará de manera específica a los flujos de derrubios tipo híbridos.



Figura 5.-Parte del material depositado en la zona urbana. (Recuperado de: *Quadratín, Michoacán*)

ECUACIONES GOBERNANTES DE LOS FLUJOS DE DETRITOS.

Los flujos de derrubios implican variabilidad de su composición en el espacio y tiempo, como resultado de la dispersión granulométrica y de la incorporación y pérdida de componentes sólidos y fluidos durante el movimiento del flujo (Sánchez, 2009). Así, estas características plantean muchas complicaciones en la comprensión de la mecánica que los gobierna y en la predicción de su comportamiento. Debido a esto, para determinar las ecuaciones que representan la dinámica de los flujos de detritos a las ecuaciones de Navier-Stokes (ecuaciones 1, 2 y 3), para un flujo newtoniano, se suelen simplificar, integrando en profundidad, y las velocidades de deformación y esfuerzos de cortadura se suelen modificar por medio de una ecuación constitutiva, por ejemplo las que se muestran en la tabla 1; a su vez, éstas se definen de acuerdo a las características del flujo estableciendo un régimen reológico como los propuestos por Jan & Shen (1997).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho uw) - \rho f v + \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \quad \dots (1)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w^2) + \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = 0 \quad \dots (3)$$

donde, u , v , w representan la componente de velocidad en las direcciones x , y , z , respectivamente. t representa al tiempo, P a la presión, ρ a la densidad, g la aceleración de la gravedad, τ_{ij} representa los esfuerzos de cortante ocasionados por las tensiones viscosas.

Tabla 1.- Clasificación cualitativa de los regímenes para los flujos hiperconcentrados y de detritos.

Régimen del flujo de detritos	Características	Modelos reológicos propuestos.	Ecuación constitutiva tensión-deformación.
Friccional	El movimiento de la masa tiende a ser lento, de modo que las partículas se mantienen en contacto casi siempre y el intercambio de momento se debe principalmente al mecanismo de fricción.	Modelo Friccional Puro	$\tau = \sigma_n \tan \varphi$
	En este régimen no interviene la cohesión.		
	Está basado en la ley de fricción de Coulomb.		

Régimen del flujo de detritos	Características	Modelos reológicos propuestos.	Ecuación constitutiva tensión-deformación.
Colisional o Granular-inercial	La distribución de tamaños de las partículas sólidas es muy amplia. La deformación es rápida.	-Modelo Dilatante O Dispersivo de Bagnold (1954).	$\tau = \alpha \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 ;$ $\alpha = \alpha_1 \rho_s \lambda^2 d^2 \sin \phi_d$ $\sigma_{nd} = \frac{\tau}{\tan \phi_d}$ $= \alpha_1 \rho_s \lambda^2 d^2 \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 \cos \phi_d ;$
	Los choques entre partículas generan presiones del líquido en dirección radial, llamadas tensiones dispersivas (σ_{nd}) y son proporcionales a las tensiones tangenciales (τ).	-Modelo de Takahashi (1991).	$\alpha_1 = 0.042$ $\tau = \alpha_1 \rho_s \lambda^2 d^2 \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 \sin \phi_d ;$ $\sigma_{nd} = \frac{\tau}{\tan \phi_d}$
	El mecanismo de dispersión proporciona, además de una tendencia de expansión del material, una fuente de suspensión adicional a las partículas.		$0.35 \leq \alpha_1 \leq 0.5$ $\tan \phi_d = \left(\frac{C_0}{C} \right)^{1/3} \tan \phi$
Friccional-Colisional	Amobos efectos influyen en el comportamiento de la mezcla.	McTigue (1982).	$\tau = \tau_y + \alpha \left(\frac{dv}{dz} \right)^2$
Macro-Viscoso	Se trata de una mezcla muy diluida de partículas suspendidas en un flujo Newtoniano.	Einstein (1956).	$\tau = \mu_m \frac{dv}{dz} ;$ $\mu_m = \mu_f (1 + 2.5C)$
	La relación de esfuerzo y la deformación es similar a la del fluido Newtoniano con una concentración de sedimentos cerca del 9%.	Chu (1983)	$\tau = \mu_m \frac{dv}{dz} ;$ $\mu_m = \mu_f (1 + 2.5KC)$
	En este régimen el flujo puede ser tratado de manera general como flujo Newtoniano con viscosidad	Krone (1984)	$\tau = \mu_m \frac{dv}{dz} ;$ $\mu_m = \mu_f (1 + \epsilon KC)^{-2.5}$

Régimen del flujo de detritos	Características	Modelos reológicos propuestos.	Ecuación constitutiva tensión-deformación.
	efectiva (μ_m), la cual depende de las propiedades del fluido, temperatura y concentración de sedimentos.	Krieger & Dougherty (1986)	$\tau = \mu_m \frac{dv}{dz};$ $\mu_m = \mu_f (1 + KC)^{-B/K}$
	Los modelos reológicos propuestos pueden ser modificados debido a la manera en que se determina la viscosidad efectiva.	Bagnold (1954)	$\tau = \mu_m \frac{dv}{dz};$ $\mu_m = 2.25 \lambda^{1.5} \mu_f$
Visco-Plástico	Su comportamiento está dominado por los efectos viscosos.	Bingham & Green (1919).	$\tau = \tau_y + \eta \frac{dv}{dz}$
	La concentración de sedimentos que incrementa la viscosidad está dada por la parte fin, que proporciona cohesión, y las partículas gruesas, que generan un rozamiento interno; este incremento de viscosidad contribuye a la resistencia del corte del flujo.	Herschel & Bulkley (1926).	$\tau = \tau_y + \kappa \frac{\partial v^n}{\partial z}$
		Coulomb-Viscoso	$\tau = \tau_c + \sigma \tan \varphi + \mu_b \frac{d}{dz}$
Visco-Plástico-Colisional	Se mantiene en flujos de derrubios gruesos con una granulometría amplia.	Modelo Cuadrático de O'Brien & Julien (1985).	$\tau = \tau_y + \mu \left(\frac{dv}{dz} \right) + \zeta \left(\frac{dv}{dz} \right)^2$
	El intercambio de momento se afecata tanto por la interacción de las partículas, como por la viscosidad del fluido.	Modelo Viscoplastico Generalizado	$\tau = \tau_y + \mu_1 \left(\frac{dv}{dz} \right)^n$ $= C_c \cos \varphi + p \sin \varphi + \mu_1 \left(\frac{dv}{dz} \right)^n$
	Es el régimen más general en el caso de flujos hiperconcentrados y de detritos.		

Tomado de: Rodríguez, 2017.

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

La diversidad de la mezcla entre el agua y detritos sólidos, que se puede generar en diversas circunstancias, dificulta totalmente el análisis analítico; no dejando de lado que las “simples” ecuaciones para flujos newtonianos son irresolubles de forma analítica y son realmente un desafío para aproximar su solución por medio de métodos numéricos.

MODELACIÓN FÍSICA REDUCIDA

De acuerdo con Vergara (1995), el término *modelo* corresponde a un sistema que simula un objeto real llamado prototipo (escala natural), mediante la entrada de cierta información que se procesa y presenta de forma adecuada según sea el objetivo de la modelación. Un modelo físico de escala reducida, o en algunos casos aumentada y geoméricamente distorsionada, representa a escala algún fenómeno, estructura o una máquina, y debe cumplir con ciertas condiciones matemáticas definidas.

Existen modelos matemáticos en los que se sustituye la realidad por una definición más o menos exhaustiva de las ecuaciones que la aproximan (Domínguez, 1997). Sin embargo, los modelos físicos a escala reducida; o bien, modelos hidráulicos, permiten estudiar problemas en los que intervienen simultáneamente varios efectos en el escurrimiento y es necesario un análisis tridimensional, además en la mayoría de los casos las condiciones de frontera son complicadas.

El estudio de fenómenos a escala es posible, en gran medida, gracias a los adelantos tecnológicos que se tienen hoy en día, ya que hace algunas décadas, la medición de algunas variables o la distorsión de escalas hacían casi imposible la experimentación.

Como se ha mencionado en líneas anteriores, al utilizar un modelo hidráulico se deben cumplir algunas consideraciones matemáticas; es decir, el prototipo y el modelo deben ser semejantes, para lo cual se tienen que cumplir las leyes o criterios de similitud geométrica, cinemática y dinámica.

CRITERIOS DE SEMEJANZA

Los criterios de semejanza geométrica, cinemática y dinámica en conjunto relacionan las magnitudes físicas homologas definidas entre ambos sistemas, el prototipo y el modelo.

De acuerdo con Domínguez (1997), una reproducción a escala reducida de un fenómeno físico, es un modelo científicamente válido sólo si un cierto conjunto de sus características medibles puede relacionarse con las correspondientes en el fenómeno real mediante proporciones constantes o escalas.

La semejanza geométrica entre el modelo y prototipo está relacionada con el cociente de longitudes correspondientes homologas, para que ésta se cumpla dicho cociente debe ser igual. Esta semejanza permite definir tirantes, anchos, distancias, superficies y volúmenes homólogos. En este caso, dicha relación constante es llamada escala de líneas o longitudes (L_e).

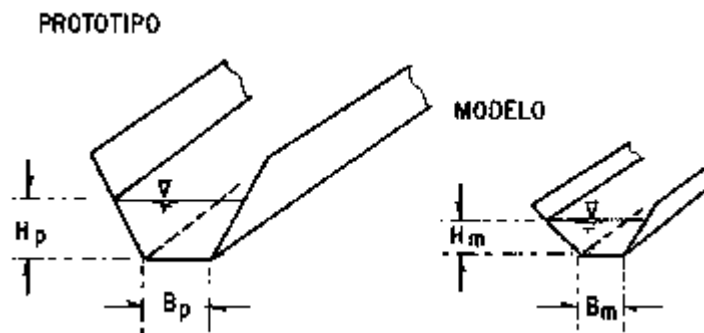


Figura 6.-Semejanza geométrica. (Recuperado de: Echávez, 1996).

$$\frac{H_p}{H_m} = \frac{B_p}{B_m} = \dots = L_e$$

De acuerdo con Vergara (1995) cuando la comparación de los sistemas del prototipo y del modelo es respecto a un movimiento, se establece entonces la similitud cinemática, y se cumple cuando la forma de los patrones de flujo homólogos es igual en cualquier tiempo. Por ello, la relación de velocidades de puntos homólogos debe ser constante y la similitud geométrica debe cumplirse para que se logre la similitud cinemática.

Es decir,

$$\frac{V_{xp}}{V_{xm}} = \frac{V_{yp}}{V_{ym}} = \frac{V_{zp}}{V_{zm}} \dots = Ve \text{ (Escala de velocidades).}$$

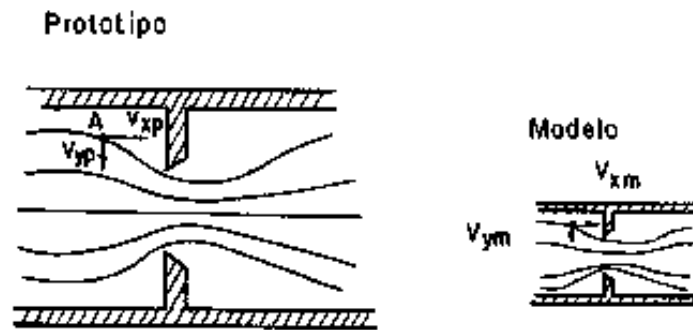


Figura 7.- Semejanza cinemática. (Recuperado de: Echávez, 1996).

La semejanza dinámica toma en cuenta la consideración de fuerzas sobre las partículas del fluido, tales como fricción, tensión superficial, de gravedad o de peso, de inercia, de Coriolis, etc. Lo cual implica que el polígono de fuerzas que actúa sobre puntos homólogos debe ser geoméricamente similar, que a su vez indica que la relación de fuerzas homologas sea un factor constante en todo el sistema.

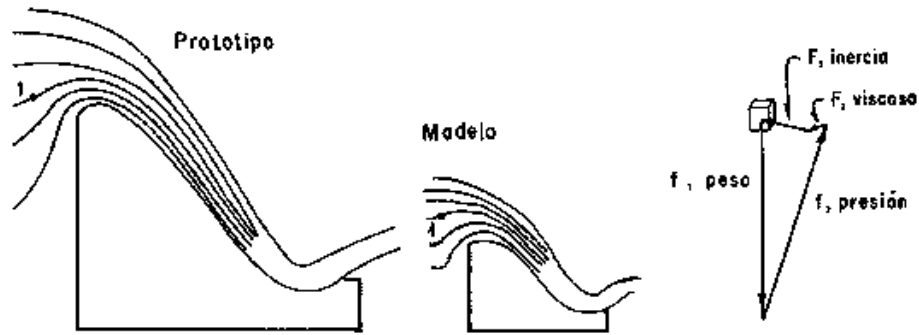


Figura 8.- Semejanza dinámica. (Recuperado de: Echávez, 1996).

Es decir,

$$\frac{F_{ip}}{F_{im}} = \frac{F_{wp}}{F_{wm}} = \frac{F_{pp}}{F_{pm}} = \frac{F_p}{F_m} = \dots = Fe \text{ (Escala de fuerzas).}$$

De acuerdo con Domínguez (1997), Para los modelos hidráulicos utilizados en la práctica, la constancia entre las relaciones llega a ser imposible, salvo para escala natural, ya que la selección de escalas, está sujeta a severas restricciones de naturaleza física, técnica y económica.

De esta forma, en los modelos se suele utilizar el mismo fluido que en el prototipo; es decir, agua. Esto permite que la elección de escalas referente a la viscosidad y densidad sean

$$\nu_e \approx 1 \quad \text{y} \quad \rho_e = 1.$$

Así, si el modelo y el prototipo están bajo las mismas condiciones de la aceleración de la gravedad, entonces se tiene que,

$$g_e = 1$$

con lo que normalmente queda por definir la escala geométrica.

Lo anterior, para el caso en estudio no será así, ya que no se tiene el mismo fluido y no olvidar que la mezcla con material heterogéneo, modificará las propiedades físicas del fluido.

De acuerdo con Echávez (1996), algunas de las relaciones de escala para modelos a superficie libre se pueden definir como se muestra en la tabla; es decir, en función de la escala de longitud y de las propiedades del fluido.

Tabla 2.- Escalas de semejanza para modelos con superficie libre.

	Condición cinemática o dinámica	Derivación de la escala	Modelo distorsionado $r > 1$	Modelo normal $r = 1$
Velocidad			$V_o = \sqrt{\frac{L_r}{n}}$	$V_o = \sqrt{L_o}$
Tiempo	$t = \frac{L}{V}$	$t_o = \frac{L_o}{V_o}$	$t_o = \sqrt{L_o r}$	$t_o = \sqrt{L_o}$
Aceleración	$a = \frac{V}{t}$	$a_o = \frac{V_o}{t_o} = \frac{V_o^2}{L_o}$	$a_o = \frac{1}{r}$	$a_o = 1$
Pendiente	$l = \frac{h}{L}$	$l_o = \frac{h_o}{L_o} = \frac{L_o}{r L_o}$	$l_o = \frac{1}{r}$	$l_o = 1$
No de Reynolds	$R = \frac{Vh}{\nu}$	$R_o = \frac{V_o h_o}{\nu} = \frac{V_o L_o}{r \nu}$	$R_o = \left(\frac{L_o}{r}\right)^{3/2}$	$R_o = (L_o)^{3/2}$
Fuerza	$F = ma$	$F_o = V_o h_o^2 = \frac{V_o L_o^2}{r}$	$F_o = \frac{L_o^3}{r^2}$	$F_o = (L_o)^3$
Presión (carga de velocidad)	$p = \frac{F}{A}$	$p_o = \frac{F_o}{A_o} = \frac{V_o^2 L_o^2}{r L_o^2}$	$p_o = \frac{L_o}{r}$	$p_o = L_o$
Gasto	$Q = VA$	$Q_o = V_o A_o = \frac{V_o^2 L_o^2}{r}$	$Q_o = \frac{L_o^{5/2}}{r^{3/2}}$	$Q_o = (L_o)^{5/2}$
Gasto unitario	$q = Vh$	$q_o = V_o h_o = \frac{V_o L_o}{r}$	$q_o = \left(\frac{L_o}{r}\right)^{3/2}$	$q_o = (L_o)^{3/2}$

Recuperado de: Echávez, 1996.

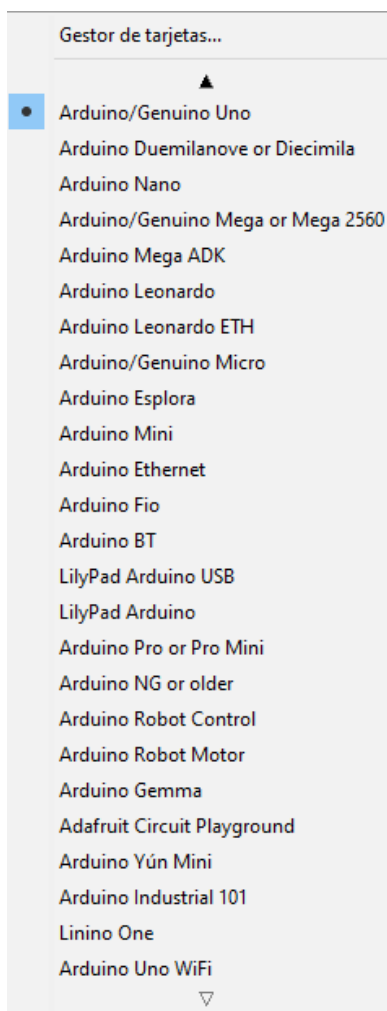
ENTORNO DE ARDUINO

De acuerdo con Montoya (2018), el Arduino es una placa El Arduino es una placa con un microcontrolador basado en la tecnología ATmega328, e incluye reguladores de tensión y un puerto USB conectado a un módulo adaptador USB-Serie que permite programar el microcontrolador desde cualquier computador. Un microcontrolador es un ordenador simplificado, que asume tareas sencillas y mantiene varias ventajas respecto a los ordenadores: su tamaño y consumo energético. Sin embargo, eso también implica limitaciones, sobre todo por la potencia de cálculo (Goilav, N., & Geoffrey, L. O. I., 2016).

En esencia, programar una tarjeta de Arduino representa utilizar un lenguaje especial que permita traducir órdenes dadas por el ser humano a la máquina, en una etapa llamada compilación. El lenguaje utilizado para la programación en Arduino, mediante una interfaz de desarrollo, está basado en C++, con instrucciones que son relativamente fáciles de aprender y usar.

Existen diversos tipos de tarjetas Arduino, algunas se enlistan en la tabla siguiente:

Tabla 3. Ejemplo de diferentes tipos de tarjetas Arduino.



La tarjeta utilizada en el presente proyecto fue una tarjeta Mega 2560.

Arduino/Genuino Mega o Mega 2560

De acuerdo con Novillo-Vicuña, J., Rojas, D. H., Olivo, B. M., Ríos, J. M., & Villavicencio, O. C. (2018), Arduino Mega 2560 es la placa con mayor cantidad de entradas y salidas (E/S), permitiendo la creación de circuitos relativamente grandes.

Tabla 4. Características de la tarjeta Arduino Mega 2560.

ARDUINO MEGA 2560		
	Microcontrolador:	ATmega2560
	Voltaje de Operación:	5V
	Pines digitales:	28
	Pines PWM:	15
	Pines de entradas análogas:	11
	Corriente DC por cada pin I/O:	20 mA
	Corriente DC en el pin de 3.5V:	50 mA
	Memoria Flash:	256 KB
	Memoria SRAM:	256 KB
	Memoria EEPROM:	4 KB
	Velocidad de reloj:	16 MHz

(Recuperado de: Novillo-Vicuña, J., Rojas, D. H., Olivo, B. M., Ríos, J. M., & Villavicencio, O. C. (2018).

IX. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Para la realización del presente proyecto de investigación, se siguió el esquema metodológico propuesto en la Figura 9, el cual muestra las etapas importantes a considerar para el desarrollo de los objetivos planteados en líneas anteriores.

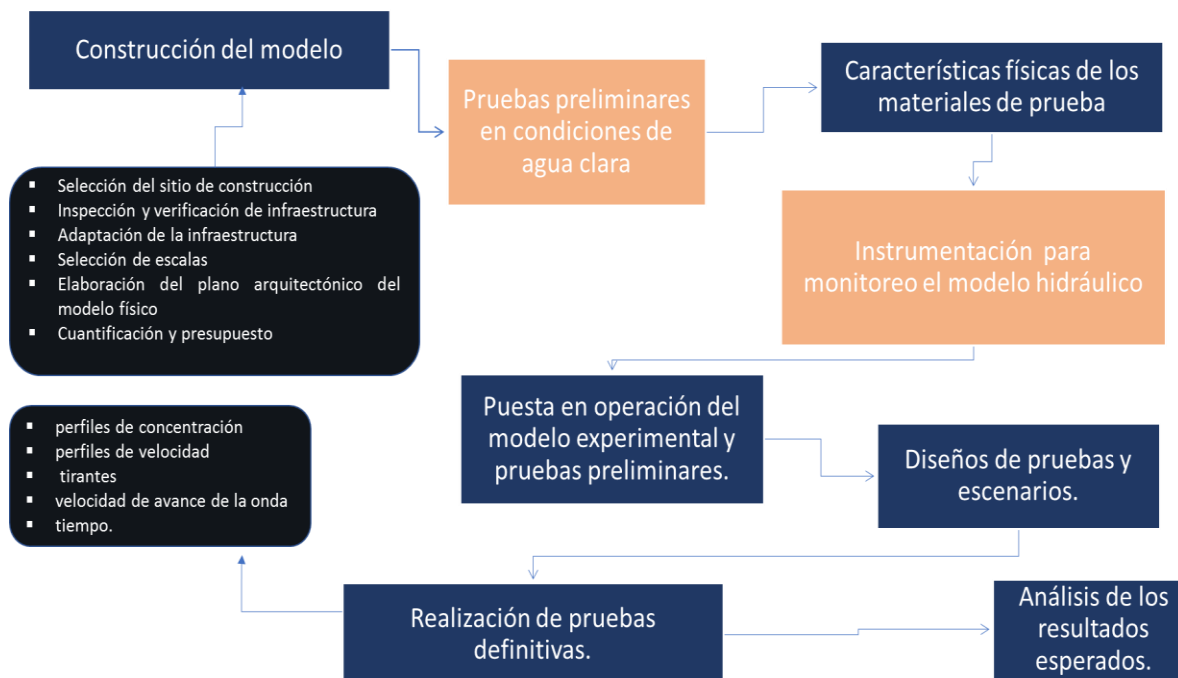


Figura 9.- Esquema metodológico para el desarrollo del proyecto de investigación.

En los subtemas siguientes, del presente capítulo, se describe de forma resumida el proceso metodológico para el desarrollo del presente proyecto

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

En esta etapa del desarrollo de la investigación se realizó la representación física en escala reducida del tramo del cauce seleccionado, la cual representa uno de los elementos más importantes de la investigación dado que la calidad de los resultados depende totalmente de la calidad del mismo. De acuerdo a las recomendaciones propuestas por Vergara (1995), se realizaron las siguientes actividades previas a la construcción del modelo físico:

- Selección del sitio de construcción dentro de las instalaciones del “Laboratorio de Hidráulica Ing. David Hernández Huéramo”, de la Facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Inspección y verificación de infraestructura existente dentro del laboratorio.
- Adaptación de la infraestructura. Esto en el caso de que existe alguna estructura para los fines perseguido en esta etapa.
- Selección de escalas en función a la disponibilidad del sitio y por medio de la teoría de similitud de escalas.
- Elaboración del plano arquitectónico del modelo físico.
- Cuantificación de los materiales a utilizar, así como un presupuesto económico que permita analizar la factibilidad del modelo.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MATERIALES DE PRUEBA

De muestras representativas del material acarreado y depositado durante el evento de julio de 2018, se realizaron pruebas que permitieron caracterizar los materiales a utilizar durante las simulaciones; por ejemplo, la distribución granulométrica, densidad, peso específico, forma de partículas, etc. Sin embargo, este material se encuentra mezclado por otras partículas que el flujo encontró a su paso, aguas debajo del tramo seleccionado. Por ello, se procedió a realizar visitas de campo en la zona de estudio seleccionada, con el fin de realizar análisis visual del geomaterial que pueden conformar la matriz de flujo en eventos futuros; además, se obtuvieron muestras de material que permitieron comparar las características físicas del material depositado durante el evento.

Densidad y peso específico

Las pruebas que se realizaron permitieron definir características físicas, principalmente la densidad y peso específico del material:

$$\rho_m = \frac{m}{V_s};$$

$$\gamma_m = g \frac{m}{V_s};$$

donde, ρ_m , es la densidad de la muestra; γ_m , es el peso específico de la muestra; m , es la masa de la muestra de suelo sin saturación de agua; V_s , es el volumen ocupado por el material sólido; y g , es la aceleración debido a la gravedad.

Adicionalmente, se determinó la densidad y peso relativo de las muestras de material, δ , lo cual queda definido mediante la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{\rho_m}{\rho_w} = \frac{gm}{V_s \gamma_w} = \frac{\gamma_m}{\gamma_w}.$$

Distribución de tamaños de las partículas

Se realizó la separación de las partículas de suelo de las muestras obtenidas del material depositado durante el evento del 10 de julio de 2018; además, del material pétreo recuperado durante las visitas de campo, utilizado en las simulaciones en condiciones de flujo de detritos. La separación de las partículas del conjunto de muestras se realizó mediante diferentes tamices de latón de la marca ALCON, similares a las que se muestran en la imagen siguiente, éstas se acomodaron de forma descendente en relación a su abertura.



Figura 10. Juego de tamices, utilizado para pruebas de granulometría.

Recuperado de: www.alcongdl.com/producto/juego-de-tamices-de-latón-80-completo/

Para partículas con tamaños superiores a 3", se identificaron sus dimensiones triaxiales y se obtuvieron sus respectivos diámetros nominales.

La identificación de los tamaños de las partículas permitió establecer un modelo estadístico de distribución, el cual posteriormente permitió integrar los tamaños de material escalado utilizados en las pruebas de flujo de detritos.

INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL MODELO HIDRÁULICO

Para la instrumentación de equipos de medición se realizó un análisis de las alternativas que hay para el monitoreo de la velocidad y tirantes alcanzados en las simulaciones, del cual resultó que los equipos especializados para la medición de variables hidráulicas mantienen relativamente altos costos económicos, es por ello que se utilizó del siguiente equipo y material:

- 1 placa de Arduino MEGA.
- Software IDE para el desarrollo de la programación de la placa.
- 12 sensores ultrasónicos HC-SR04.
- 4 soportes.
- Cables de conexión.

Las variables medición se obtienen de forma indirecta con los sensores HC-SR04, para ello se realizó un acomodo de éstos en dos secciones específicas en el modelo físico del tramo en estudio.

Para la medición del caudal que ingresa al modelo, se utilizó el medidor de flujo ultrasónico modelo TDS-100H, equipo de medición que se tiene en el Laboratorio de Hidráulica “David Hernández Huéramo”.



Figura 11. Medidor de flujo ultrasónico TDS-100H.

Para el ingreso de un caudal sólido (detritos a escala), se diseñó y construyó una tolva al inicio del modelo, la cual permite realizar el aporte de un caudal de material pétreo de forma continua al flujo de agua clara; además, permitió variar la concentración de éste durante las pruebas.

PUESTA EN OPERACIÓN Y PRUEBAS PRELIMINARES

Dentro de esta etapa de la investigación se verificó el funcionamiento del modelo de forma generalizada a través de pruebas preliminares, en condiciones de agua clara y de flujo de detritos. Dichas pruebas preliminares, permitieron observar cualitativamente cómo se comporta el material en el modelo, permitiendo conocer si el ingreso de sólidos y flujo es adecuado para estudiar las condiciones hidráulicas y delimitar los escenarios de simulación.

DISEÑOS DE PRUEBAS Y ESCENARIOS.

Durante esta etapa se analizaron los gastos a utilizar en las simulaciones, esto en función a la infraestructura hidráulica disponible y de las pruebas preliminares. En esta etapa se definió el número de pruebas de simulación a generar.

REALIZACIÓN DE PRUEBAS DEFINITIVAS.

En este punto se definió algunas variables y características hidráulicas, las cuales son: la concentración en términos de los caudales sólido y líquido, perfiles de tirantes, velocidad de

avance de la onda y tiempo. Para la medición de estas variables dependerá de las escalas e instrumentos que se utilicen para el modelo, de esta forma decidir qué métodos indirectos o directos de medición utilizar.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS ESPERADOS.

El análisis e interpretación de los resultados permitió presentar de forma gráfica relaciones entre las variables; lo cual puede presentarse para ser utilizado en trabajos futuros en los que se requiera información en modelos analíticos con el objetivo de calibrar modelos numéricos; o bien, dado que se trata de la propuesta e implementación de un sistema de monitoreo básico, definir algunas ventajas y limitaciones de éste, y con ello contar con información para su propia verificación y validación en trabajos futuros.

X. RESULTADOS PRELIMINARES

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Para la selección del tramo de la corriente principal de la cuenca en estudio, se realizaron simulaciones preliminares en condiciones de agua clara a través del modelo numérico Iber v. 2.4.3, como se muestra a continuación.

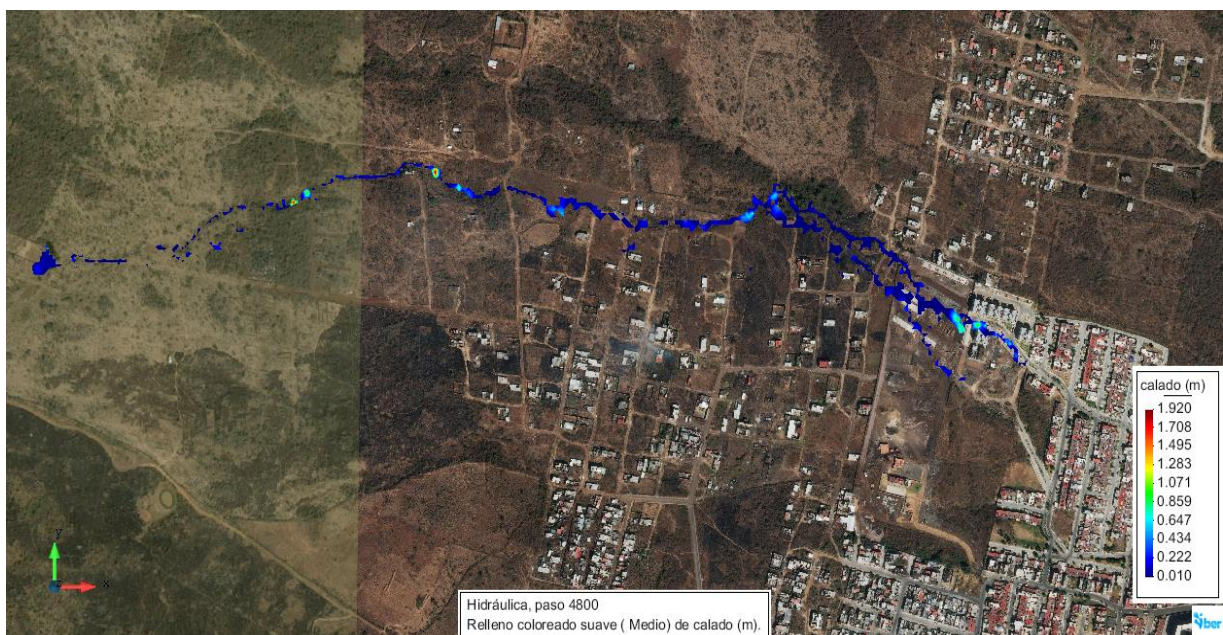


Figura 12.- Simulación en condiciones de agua clara sobre la zona en estudio.

Además, fue necesario realizar visitas de campo en la zona de interés, con el objetivo de identificar visualmente las condiciones topográficas del cauce en estudio, así como los materiales susceptibles a ser arrastrados.



Figura 13.- Recorrido del cauce principal de la cuenca en estudio.

Por razones económicas y de espacio se propone un modelo de escala reducida no distorsionado en la escala vertical. En este sentido, la selección de escala de longitudes queda definido por la longitud del tramo del cauce seleccionado (92 m) y la disponibilidad de espacio; así que queda definida como,

$$Le = \frac{Lp}{Lm} = \frac{92}{9.2} = 10.$$

El modelo de flujo de detritos se ubicó en el patio exterior norte del “Laboratorio de Hidráulica Ing. David Hernández Huéramo”, de la Facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (ver Figura 14 y Figura 15).

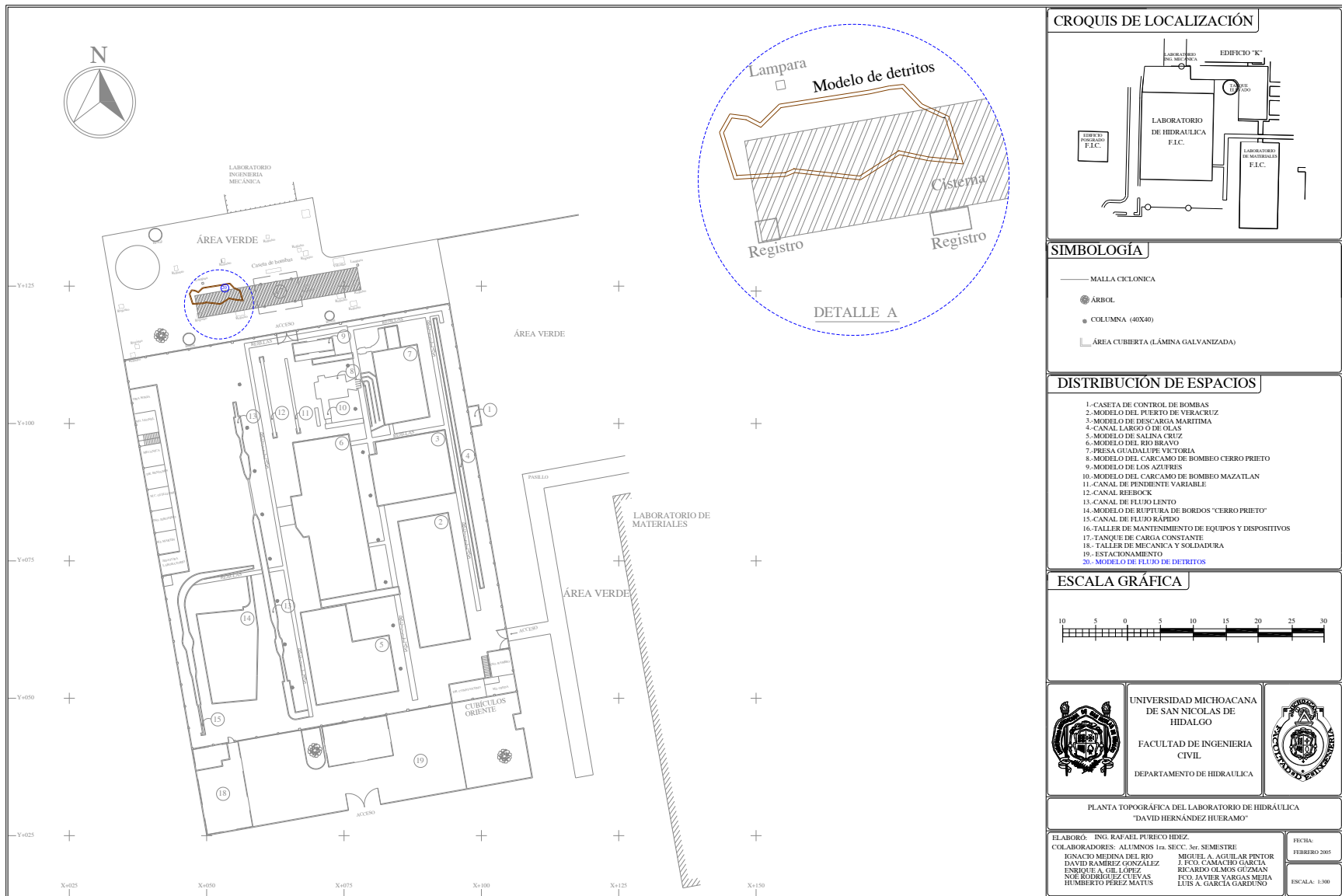


Figura 14.- Plano de distribución de espacios y ubicación del modelo de flujo de detritos en el "Laboratorio de Hidráulica Ing. David Hernández Huéramo".

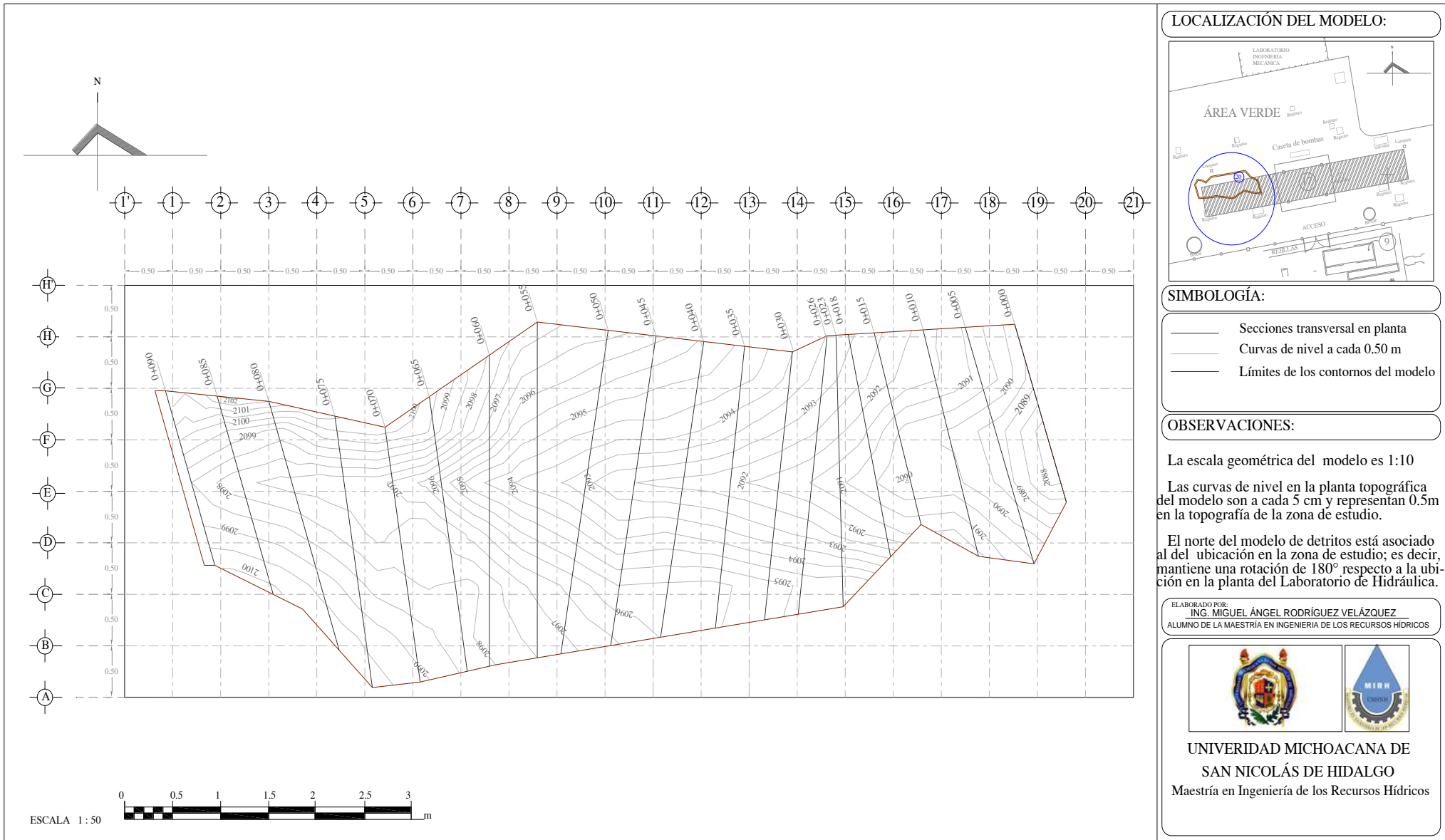


Figura 15.- Vista en planta de la configuración topográfica del modelo de flujo de detritos.

Para la construcción del modelo fue necesario realizar el despalme y nivelación del terreno de forma manual, lo cual facilita la colocación de las cotas. Para la nivelación se estableció la cota 2085 msnm como nivel de referencia.



Figura 16.- Despalme y nivelación de la zona de construcción del modelo hidráulico.



Figura 17.- Zona de construcción de la modelo hidráulico nivelada.

Sobre la zona de construcción, una vez nivelada, se generó una malla rectangular de 0.50m x 0.50m, la cual facilita el replanteo de puntos de interés, secciones transversales y centro de línea del cauce.



Figura 18.- Malla rectangular de 0.50m x 0.50m por lado.



Figura 19.- Replanteo de secciones transversales y centro de línea del cauce principal.



Figura 20.- Replanteo y colocación de cotas del cauce principal.

Perfil longitudinal del tramo en estudio

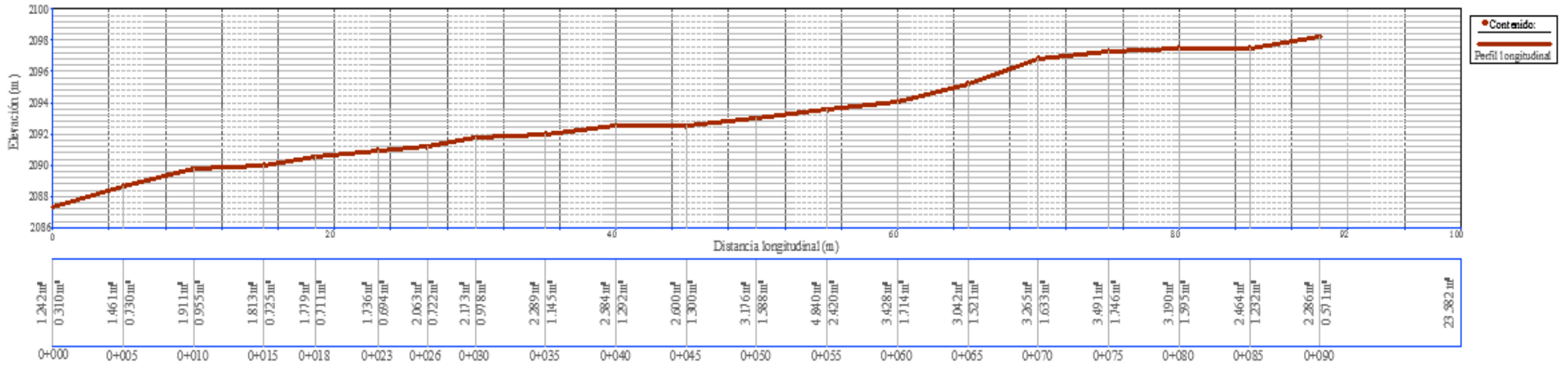


Figura 21.- Perfil longitudinal del cauce en estudio y volúmenes de relleno de material granular en el modelo por el método de secciones.



Figura 22.- Perfil longitudinal del tramo en estudio durante la construcción del modelo físico.

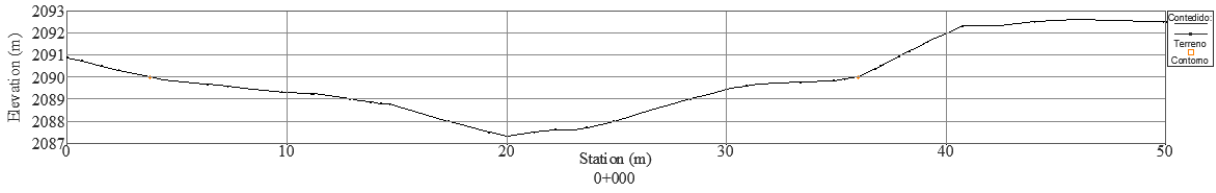


Figura 23.- Sección transversal 0+000.

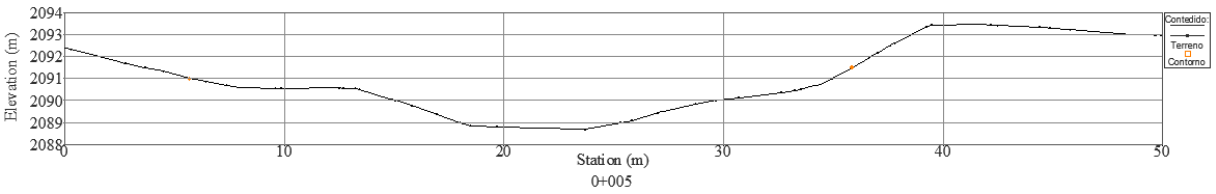


Figura 24.- Sección transversal 0+005.

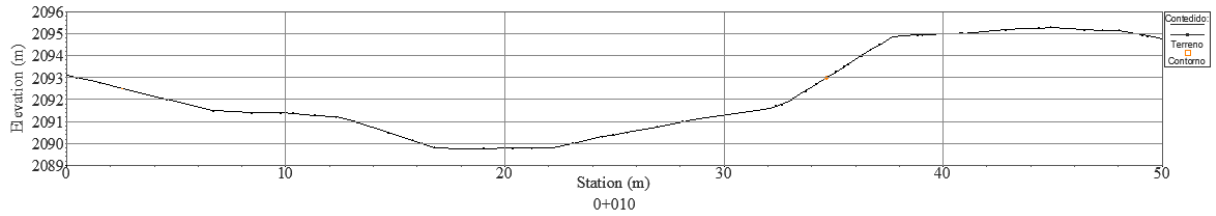


Figura 25.- Sección transversal 0+010.

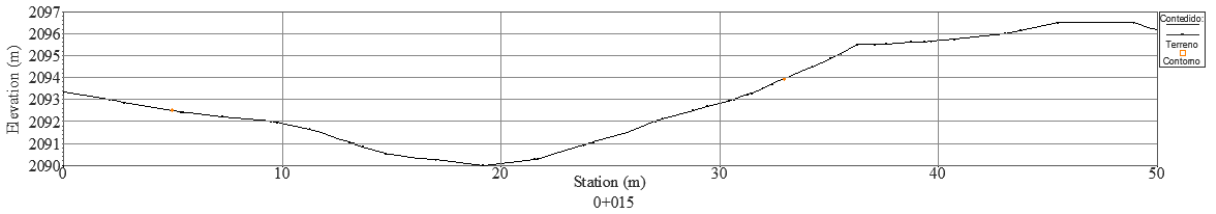


Figura 26.- Sección transversal 0+015.

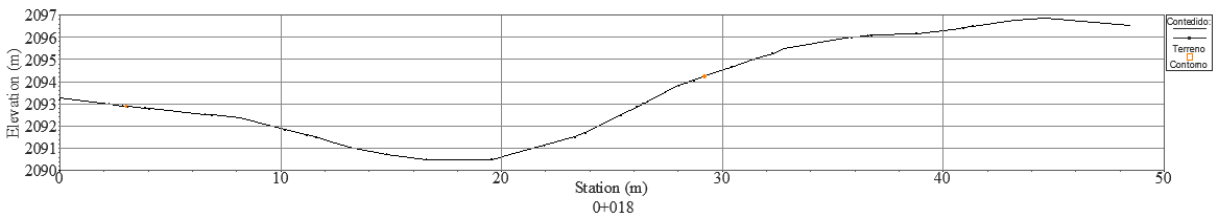


Figura 27.- Sección transversal 0+018.

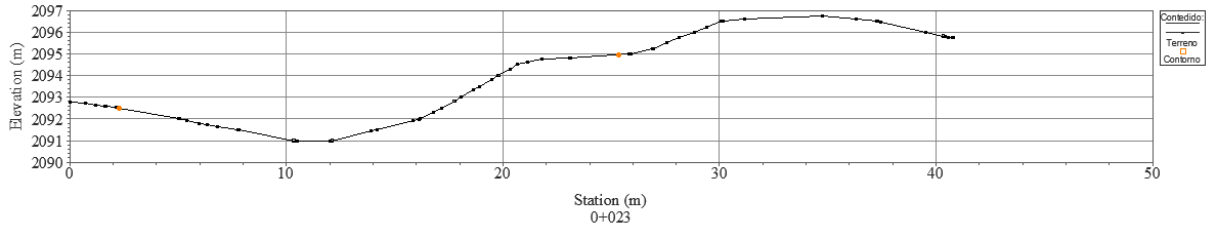


Figura 28.-Sección transversal 0+023.

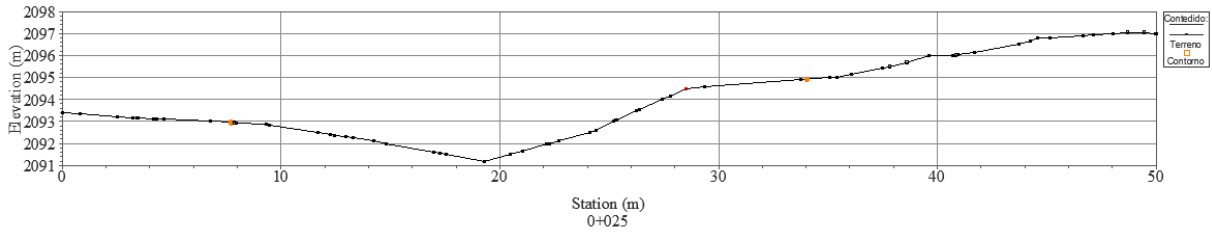


Figura 29.-Sección transversal 0+025.

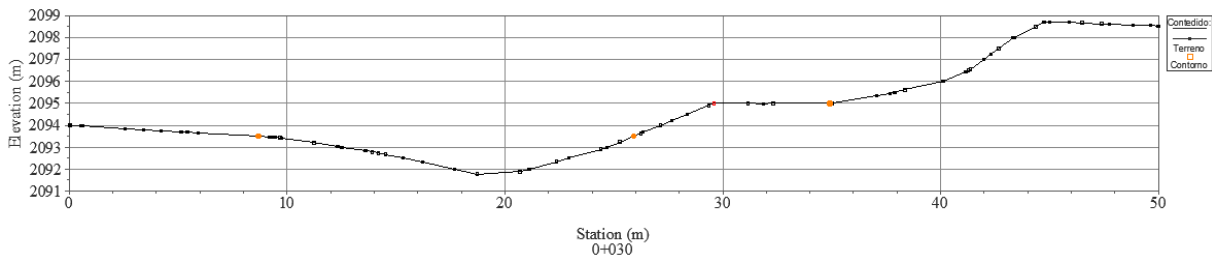


Figura 30.-Sección transversal 0+030

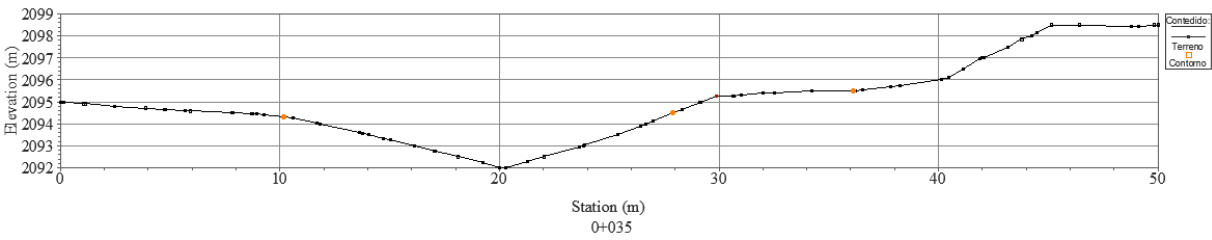


Figura 31.-Sección transversal 0+035

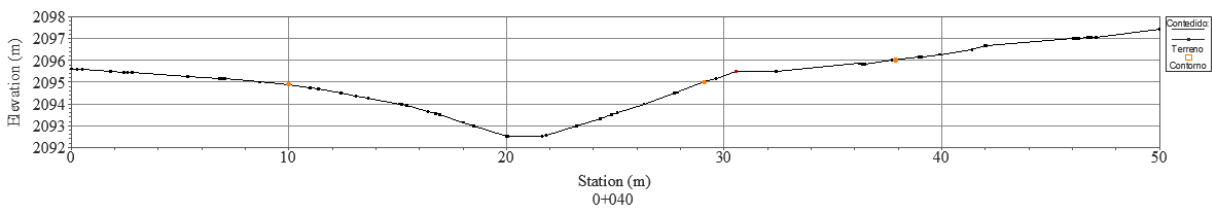


Figura 32.-Sección transversal 0+040

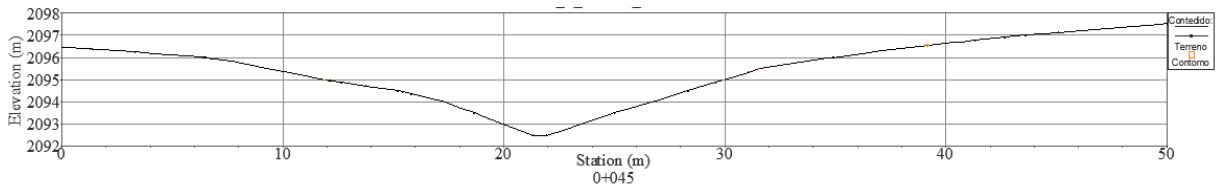


Figura 33.-Sección transversal 0+045

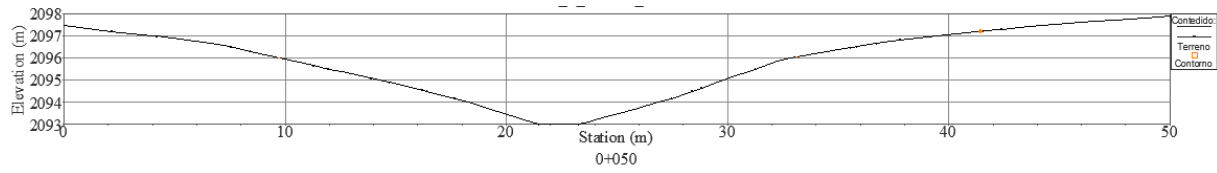


Figura 34.-Sección transversal 0+050

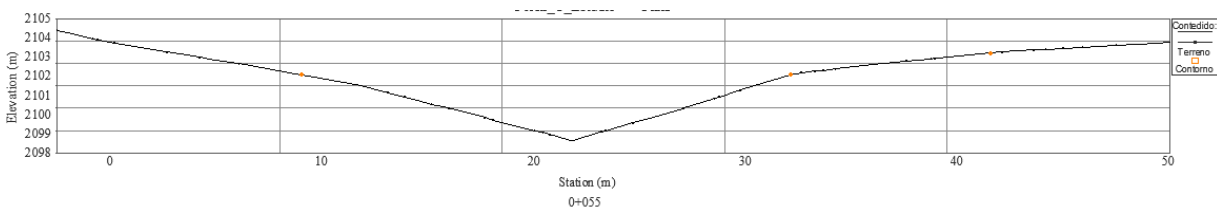


Figura 35.-Sección transversal 0+055

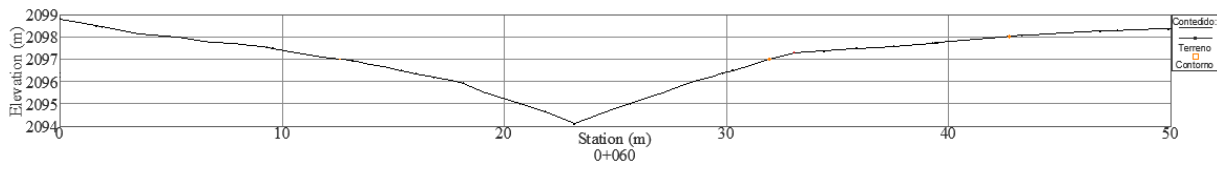


Figura 36.-Sección transversal 0+060

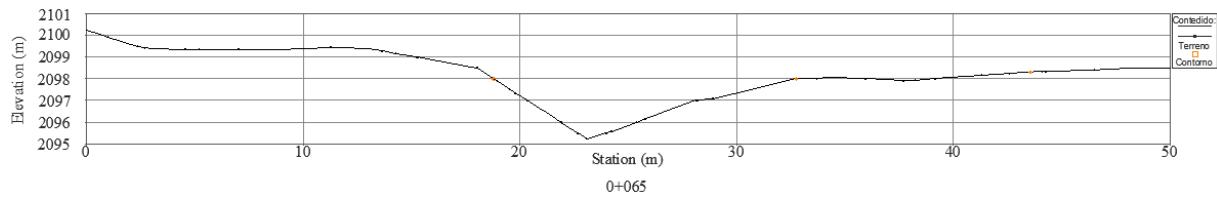


Figura 37.-Sección transversal 0+065

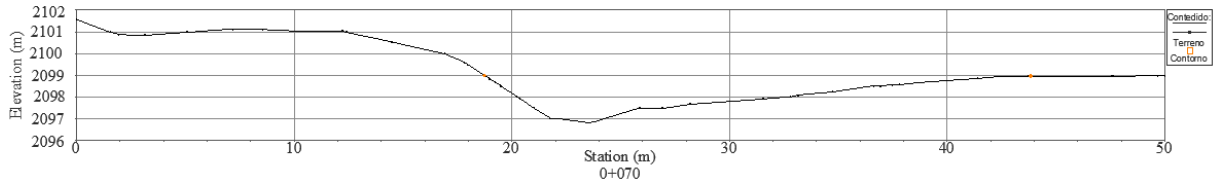


Figura 38.-Sección transversal 0+070

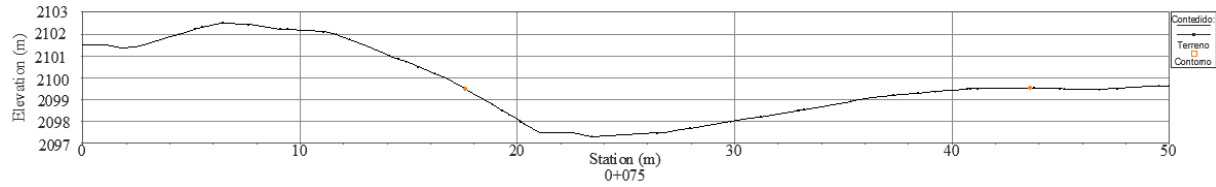


Figura 39.-Sección transversal 0+075

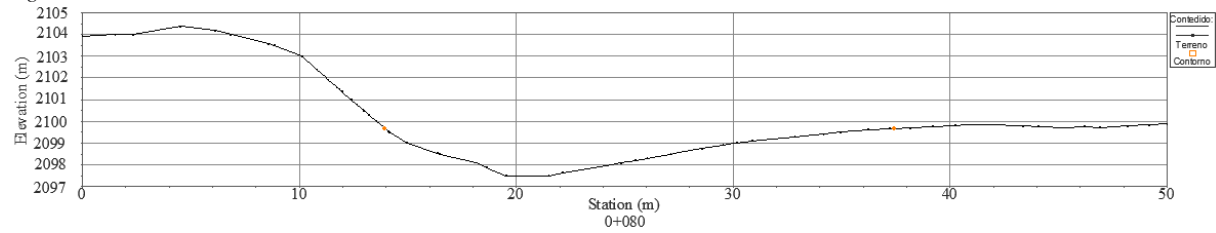


Figura 40.-Sección transversal 0+080

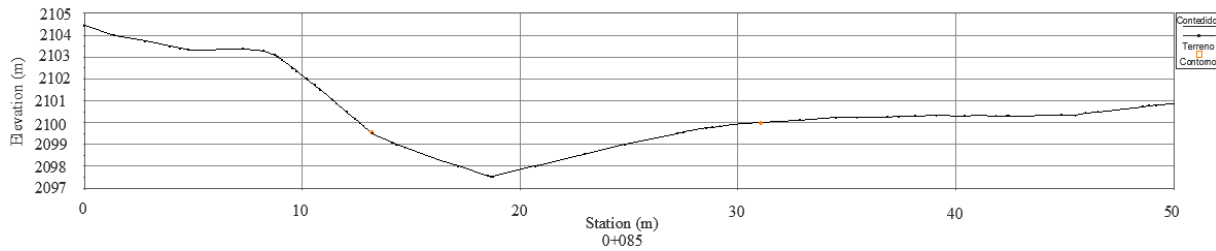


Figura 41.-Sección transversal 0+00585

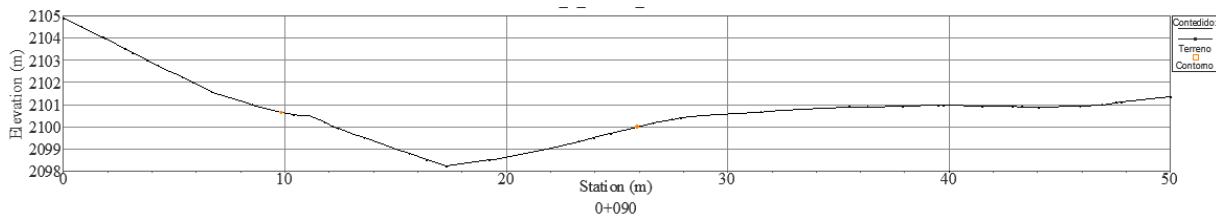


Figura 42.-Sección transversal 0+090



Figura 43.- Replanteo y colocación de cotas de las secciones transversales en escala 1:10.

Para la construcción de los contornos del modelo se utilizaron tabicones juntados con mortero, para ello se realizó un mejoramiento mecánico del suelo con un relleno de 10 cm con grava de $\frac{3}{4}$ " como se muestra en la figura siguiente.



Figura 44.- Mejoramiento mecánico con grava de $\frac{3}{4}$ " del suelo donde se desplantarán los muros.



Figura 45.- Junteado de tabicones para la construcción de los contornos del modelo hidráulico.

Por cuestiones económicas y técnicas para el relleno del modelo se utilizaron aproximadamente 23 m³ de material filtro (ver Figura 20), los cuales fueron colocados de forma manual. Este material es poroso y relativamente ligero, lo cual es importante, ya que no hay que olvidar que parte del modelo está construido sobre la losa de la cisterna del Laboratorio de Hidráulica como se muestra en la Figura 13.



Figura 46.- Acarreo de material filtro por medios manuales y con apoyo de alumnos que realizan servicio social en el Departamento de Hidráulica.

El modelo se rellenó de 3 a 5 cm por debajo de las cotas de elevación a escala 1:10, generadas con estacas de madera.



Figura 47.- Nivel de relleno durante la construcción del modelo de hidráulico.

Previo a la colocación de un concreto hidráulico “pobre” ($f'c \approx 100 \text{ kg/cm}^2$) se colocó una malla hexagonal de acero inoxidable calibre 12, con la finalidad de evitar agrietamientos del concreto por reacción del fraguado.



Figura 48.- Colocación de malla hexagonal sobre la superficie de relleno del modelo hidráulico.

De acuerdo con Vergara (1995), en ciertas ocasiones se puede auxiliar de modelos matemáticos de forma complementaria para describir con suficiente detalle el problema en alguna etapa del programa teniendo resultados satisfactorios. Es por ello que se ha procesado en el modelo de Iber v. 4.3.3 la geometría o el dominio de la zona de estudio y comparar con lo construido en el modelo físico.

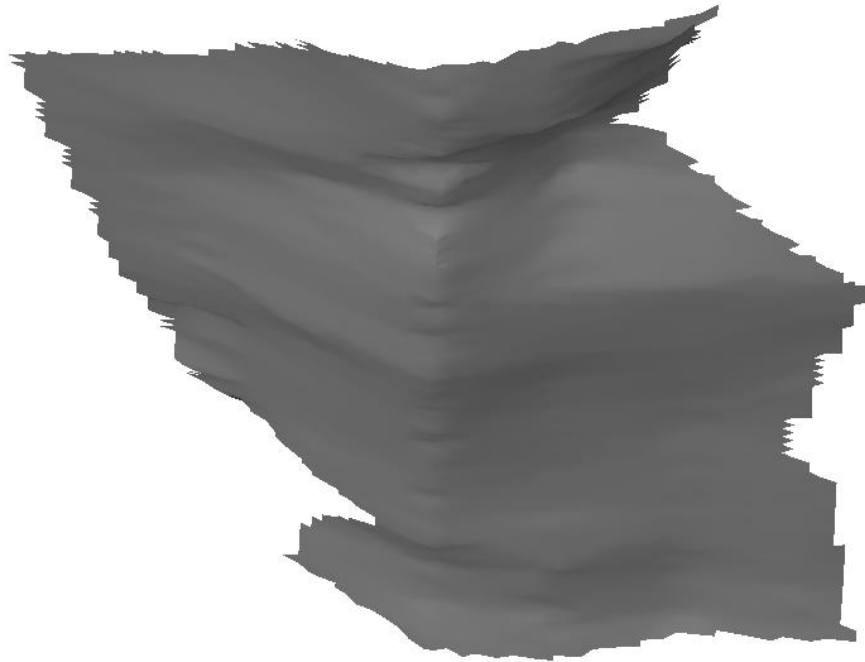


Figura 49.- Geometría a escala 1:10 de la zona de estudio con una malla de 10 600 elementos triangulares Delaunay mediante el modelo de Iber V. 4.3.3.



Figura 50.- Panorámica del modelo de flujo de detritos construido. Escala geométrica 1:10.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MATERIALES DE PRUEBA

Durante el evento se obtuvieron muestras del material depositado, de la cual se identificaron los siguientes tamaños de partículas del conjunto:

Tabla 5. Tabla de distribución de frecuencias de las partículas del material depositado en el evento de 10 julio de 2018.

No malla	Abertura Malla (mm)	Peso Retenido (gr)	% Retenido	% Acumulado	% Pasa
3	76.2	1089.5	8.16502	8.1650242	91.83
2	50.8	1064.5	7.97767	16.142691	83.86
1 1/2	38.1	1834.5	13.7483	29.890958	70.11
1	25.4	1232.5	9.23671	39.127665	60.87
3/4	19.1	758.5	5.68442	44.812081	55.19
1/2	12.7	880	6.59497	51.41	48.59
3/8	9.52	533	3.99445	55.40	44.60
1/4	6.35	738	5.53078	60.93	39.07
8	2.38	1578	11.826	72.76	27.24
10	2	360.5	2.70169	75.46	24.54
16	1.19	677	5.07363	80.53	19.47
20	0.84	417	3.12512	83.66	16.34
30	0.59	744	5.57575	89.23	10.77
40	0.42	91.5	0.68573	89.92	10.08
50	0.279	402.5	3.01645	92.94	7.06
60	0.25	164.5	1.23281	94.17	5.83
100	0.149	281	2.10589	96.28	3.72
200	0.074	314	2.35321	98.63	1.37
charola		183	1.37145	100.00	0.00
Σ Peso retenido=		13343.5			



Figura 51. Conjunto de partículas obtenidas del material depositado del evento de 10 julio de 2018.

Para tamaños superiores a 3 pulgadas de diámetro se definieron las siguientes dimensiones y características físicas:

Tabla 6. Dimensiones triaxiales, forma y color de algunas partículas recolectadas durante el evento del 10 de julio de 2018.

Especimen	A(cm)	B(cm)	C(cm)	Equidimencional	Alargada	Laminar	Color	Imagen
1	15.3	12.30	5.40		x		Café claro	
2	12.2	8.80	7.90	x			Gris	
3	20.8	19.40	12.70	x			Gris	
4	10.6	10.40	9.70	x			Gris	
5	11.7	9.90	9.50			x	Café	
6	17.70	14.70	12.70	x			Café	
7	15.40	11.20	7.70			x	Gris	
8	12.20	10.10	9.90	x			Roja	
9	16.80	15.90	4.10	x			Gris	
10	27.90	23.40	13.60			x	Rosa	
11	18.10	16.60	14.30	x			Gris	

Se realizaron visitas de campo adicionales, ya que parte del material recolectado el día del evento, 10 de julio de 2018, fueron de la zona baja de la microcuenca de aportación; por lo que se considera que parte de la muestra fue contaminada por material pétreo utilizado en la construcción, el cual fue arrastrado y depositado de donde se obtuvieron las primeras muestras.

De aquí la necesidad por realizar otro recorrido desde la cabecera de la microcuenca para identificar el material susceptible a ser arrastrado en eventos futuros. Las primeras muestras, en la zona de deposición, no se descartan, ya que fueron relevantes para identificar los tamaños de partículas que se observaron en la zona de cabecera de la microcuenca de aportación, por lo que si posible que esos tamaños de partículas sí puedan ser transportados.

En las siguientes imágenes se muestran la diversidad de materiales de cabecera, susceptibles a ser arrastrados.



Figura 52.- Diversidad de geo-materiales susceptibles a ser arrastrados por el flujo.

De las muestras, como se mencionó en líneas anteriores, se realizaron pruebas para definir características físicas como densidad y peso específico; así como el cálculo de otros parámetros, obteniendo los siguientes datos de material:

Tabla 7.- Características físicas del material pétreo de la cabecera de la microcuenca de aportación.

ESPECIMEN	NOMBRE (Observación)	Tamaño			Masa seco (gr)	Masa Saturada (gr)	Volumen Seco (cm ³)	Densidad relativa seca (Adimensional)	SF (Adimensional)	% Humedad de absorción	Esfericidad (Krumbein)	Índice de planidad	Índice de largura	Índice de grosor	Diámetro nominal (cm)	Diámetro cribado (cm)	Clasificación (tamaño)
		a	b	c													
Recipiente	Material Probeta	-	-	-	1658	1658	1168.7	1.419	-	0.00	-	-	-	-	-	-	-
1	Roca Chica	Malla de 2" (50 mm)			176	198	100	1.760	-	12.50	-	-	-	-	5	5	Grava gruesa
2	Roca Laminar Alargada	Malla de 3" (75 mm)			596	748	300	1.987	-	25.50	-	-	-	-	7.5	7.5	Cantos pequeños
3	Roca Circular	9.8	8.7	4.6	628	755	203	3.094	0.498	20.22	0.747	2.011	1.126	0.529	7.292	6.563	Cantos pequeños
4	Roca Rectangular	11.7	9.8	9.2	1194	1428	654	1.826	0.859	19.60	0.870	1.168	1.194	0.939	10.769	9.692	Cantos pequeños
5	Roca Triangular	14.4	11	8.2	1754	1843	849	2.066	0.652	5.07	0.758	1.549	1.309	0.745	11.748	10.573	Cantos pequeños
6	Roca Alargada	17.4	9.3	8.9	1891	1949	798	2.370	0.700	3.07	0.649	1.500	1.871	0.957	11.508	10.357	Cantos pequeños
7	Roca grande (Dmax)	125	97	80	-	-	507890.812	-	0.727	-	0.792	1.388	1.289	0.825	98.990	89.091	Bolos Medianos

Nota: El material contenido en el recipiente corresponde a partículas que pasan la malla No. 4; es decir, compuesto por arenas y finos.

De acuerdo con García F. M., & Maza A. J. A. (1998) y con base a los datos obtenidos se realizó una clasificación teórica del material pétreo, esto bajo un análisis de una distribución circular, de la cual se obtiene la siguiente curva de distribución:

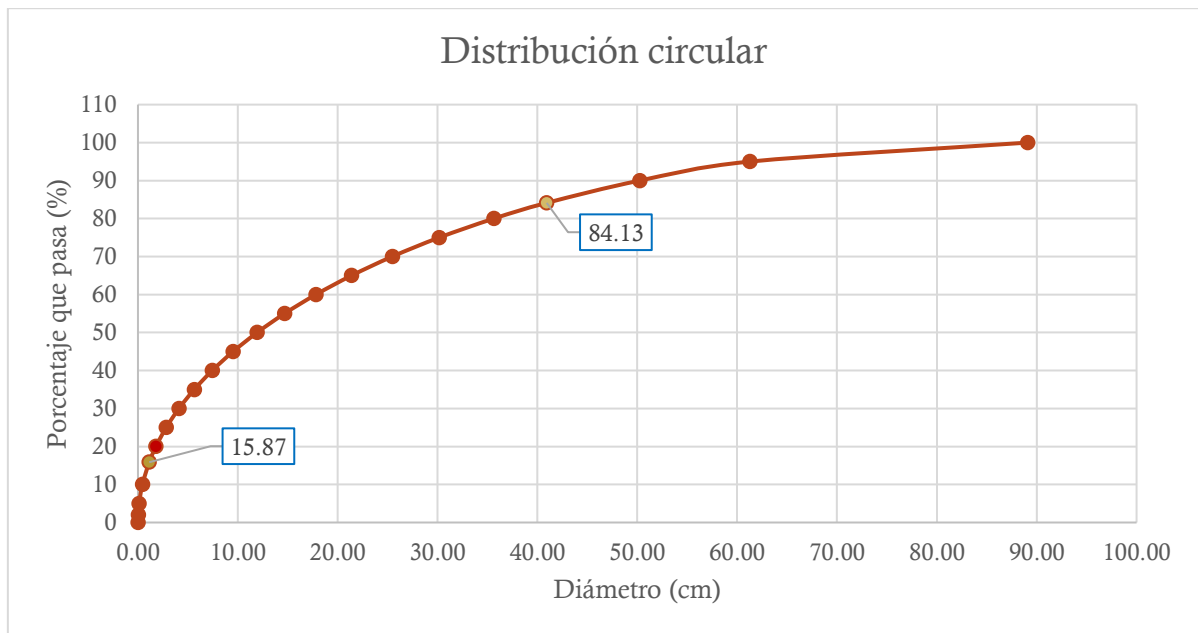


Figura 53.- Distribución teórica del material de prueba (sin escalar).

De la anterior distribución, se puede identificar que el material recolectado y analizado está dentro de la curva de distribución teórica.

Así, con base a los criterios de similitud geométrica, el tamaño del material pétreo se puede escalar considerando una relación de escalas de 1:10, por ello la curva de distribución de tamaños queda ajustada de la siguiente forma:

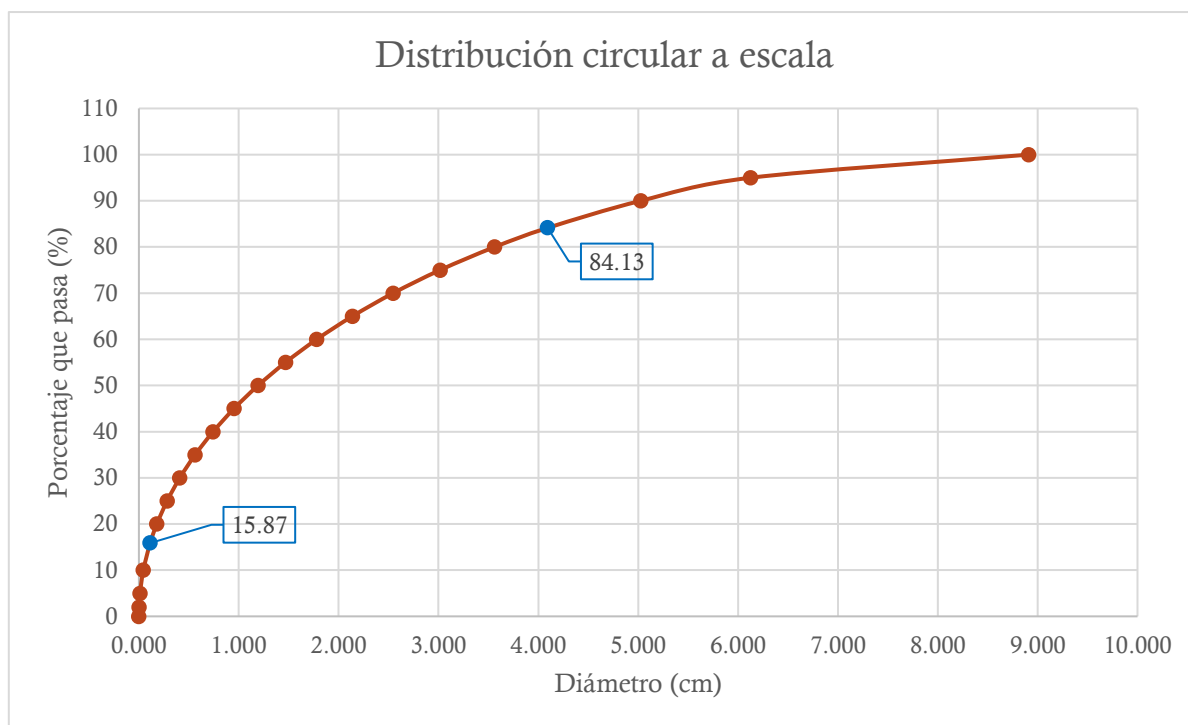


Figura 54. Curva de distribución teórica del material de prueba a escala.

Por otra parte, la similitud dinámica no resulta tan trivial como se hizo anteriormente con la similitud geométrica, se involucra la densidad de las partículas, y la composición química y mineralógica, la cual no es constante en cada una de éstas dentro del conjunto; es decir que, aunque sea fácilmente escalar el tamaño y la forma de una partícula de 100 cm de diámetro, su densidad y composición no lo es para una partícula de 10 cm del conjunto. En este sentido, es que se utilizó una escala dinámica, en la que la relación de las características dinámicas de las partículas del modelo sea similar a las del prototipo. Sin embargo, para las pruebas en condiciones de flujo de detritos se utilizó material pétreo de la zona alta de la microcuenca de aportación, el cual es susceptible a ser mezclado y arrastrado, esto con la intención de mitigar las diferencias en las propiedades físicas del material que se puede presentar en la realidad y el del modelo hidráulico.

Del material de prueba, se definió su densidad, peso específico y separación de las partículas en función de sus tamaños por medio de los tamices utilizados en pruebas de granulometría; y posteriormente se integró para obtener un volumen definido en función de los porcentajes retenidos de cada tamaño de partícula la distribución teórica circular.



Figura 55. Separación por su tamaño de partículas del material utilizado en las pruebas de flujo de detritos.

Para la integración del material se consideró la densidad y peso específico del material de prueba, del cual se muestran los valores a continuación:

Tabla 8. Densidad y peso específico del material pétreo para pruebas.

Densidad	1376.817	kg/m ³
Peso específico	13508.7734	N

A continuación, se presenta la integración de material pétreo, para un 1m³ de volumen utilizado en pruebas de flujo de detritos:

Tabla 9. Distribución de frecuencias teórica e integración de tamaños de partículas del material para pruebas

MALLA	ABERTURA DE MALLA (DISP) (cm)	ABERTURA DE MALLA (DISP) (mm)	% PASA TEÓRICO	% RETENIDO (TEÓRICO)	MATERIAL EN Kg PARA 1 m ³
3"	7.62	76.2	94.70	5.30	72.91
2"	5.08	50.8	92.58	7.42	102.23
1.5"	3.81	38.1	81.54	11.04	151.94
1"	2.54	25.4	68.74	12.80	176.20
3/4"	1.91	19.1	62.42	6.33	87.10
1/2"	1.27	12.7	53.41	9.00	123.95
3/8"	0.952	9.52	46.56	6.85	94.36
1/4"	0.635	6.35	37.04	9.52	131.05
4	0.476	4.76	30.92	6.12	84.24
6	0.303	3.03	23.00	7.92	109.01
8	0.238	2.38	19.65	3.36	46.24
10	0.2	2	17.58	2.07	28.48
12	0.168	1.68	15.77	1.80	24.84
14	0.141	1.41	14.21	1.57	21.59
16	0.119	1.19	12.90	1.31	18.03
20	0.084	0.84	10.75	2.14	29.51
30	0.059	0.59	9.18	1.58	21.72
40	0.042	0.42	8.08	1.09	15.08
50	0.0279	0.279	7.16	0.92	12.70
60	0.025	0.25	6.97	0.19	2.63
80	0.0177	0.177	6.48	0.48	6.66
100	0.0149	0.149	6.30	0.19	2.57
200	0.0074	0.074	5.79	0.50	6.91
charola	0	0	5.2952	0.50	6.87
			Σ	100.00	1376.82

INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL MODELO HIDRÁULICO

Como se menciona en líneas anteriores, para el monitoreo durante la modelación física de flujo de detritos, se implementaron alternativas de monitoreo mediante el uso de sensores ultrasónicos

HC-SR04 programados en Arduino, y un medidor de flujo ultrasónico TDS-100H; con las que se obtuvo información asociada a la velocidad y tirantes del flujo a un bajo costo económico.

A continuación, se muestran los esquemas referentes al acomodo realizado para los sensores HC-SR04 en el modelo físico:

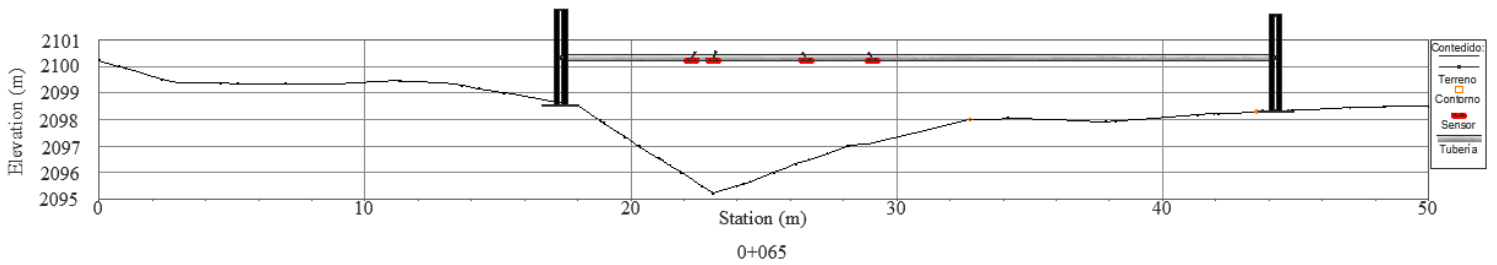


Figura 57. Esquema de la ubicación de los sensores HC-SR04 en la sección transversal 0+065 (aguas arriba)

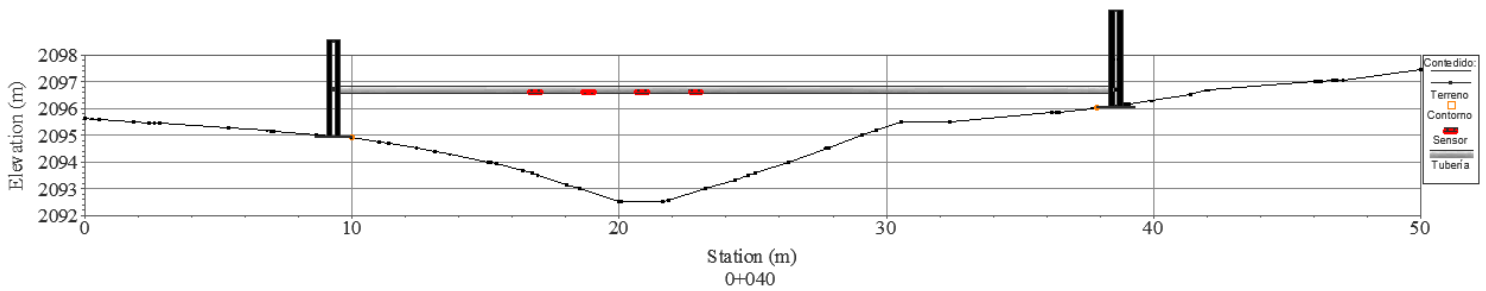


Figura 56. Esquema de la ubicación de los sensores HC-SR04 en la sección transversal 0+040 (aguas abajo).

Nota: Las secciones transversales están representadas a la escala de 1:10.

Como se muestra en la figura siguiente, sobre la sección 0+040 se realizó un acomodo especial de sensores HC-SR04, colocando una segunda línea de sensores que permitió obtener, por diferencia de registros, la velocidad de avance del flujo. Es conveniente mencionar que, esta sección mantiene la forma y pendiente similar a las secciones aguas arriba y aguas abajo, lo cual facilitó el registro de los valores de esta variable durante las simulaciones

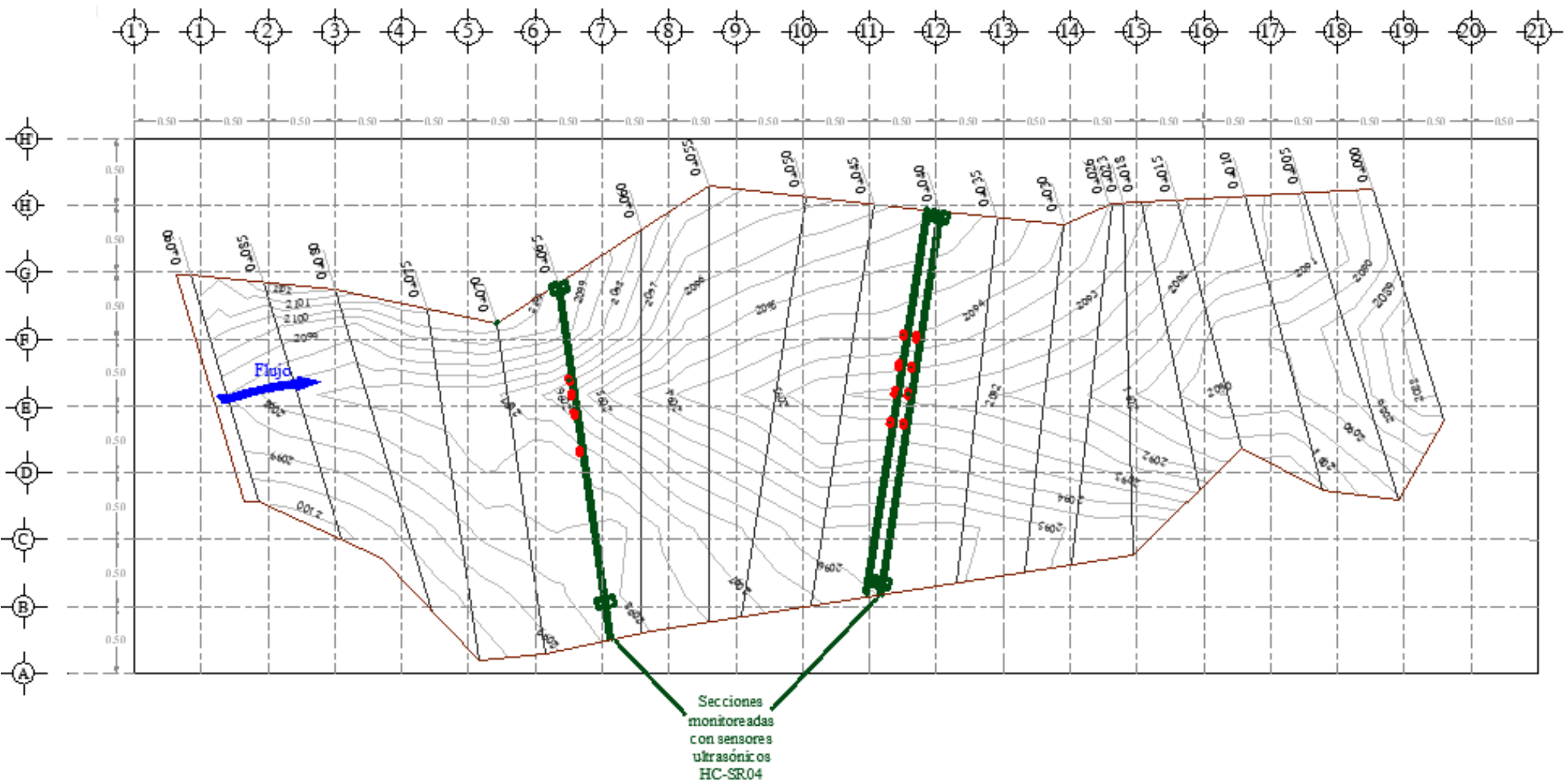


Figura 58. Vista en planta del esquema de ubicación de los sensores HC-SR04.

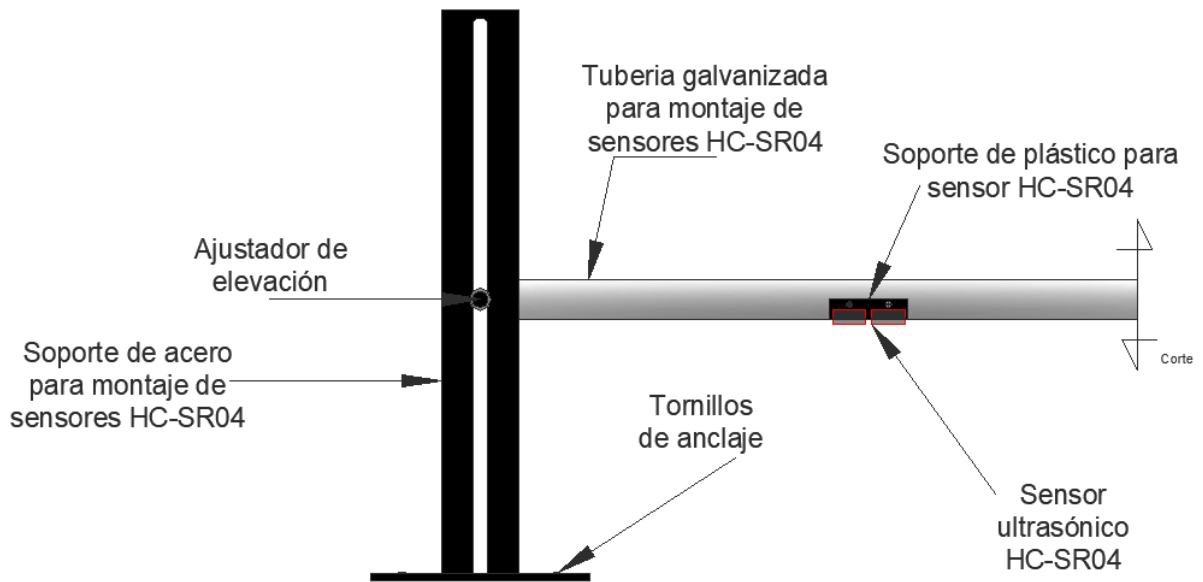


Figura 59. Detalle de montaje de los sensores HC-SR04.

En las siguientes imágenes se presentan etapas del proceso de fabricación y colocación de los sensores ultrasónicos:



Figura 60. Fabricación de bases o soportes de acero para el montaje de los sensores ultrasónicos HC-SR04.



Figura 61. Montaje de soportes de acero sobre el modelo físico.



Figura 62. Montaje de sensores ultrasónicos HC-SR04

A continuación, se presenta el código de programación para el cálculo de tirantes y velocidad de la onda del flujo, para el acomodo de los sensores ultrasónicos HC-SR04 durante las pruebas de monitoreo, el cual se desarrolló con el apoyo y colaboración de Raúl David Domínguez Sánchez, alumno de Ingeniería en Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Monterrey; y alumnos que forman parte del servicio social del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

```
#include <NewPing.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <ArduinoJson.h>

SoftwareSerial CM(5, 6);

#define SONAR_NUM 2 // Numero de Sensores.
#define MAX_DISTANCE 500 // Distancia maxima en milimetros.
int FLAGO = 0; //Bandara para saber en que parte del proceso se va en la primer columna
int v = 0; //Variable para guardar medición de altura
int TINO = 0; //Tiempo en el que se detecta el cambio de altura en el primer sensor de la primera fila
int TFNO = 0; // Tiempo en el que se detecta el cambio de altura en el primer sensor de la segunda fila
float T0 = 1.1; //Diferencia de tiempo entre el primer sensor y segundo sensor de la primer columna
long DES = 1500; //Distancia entre sensores en milimetros
int Vel0 = 0; //Velocidad del primer columna de sensores
int HINO = 0; //Altura cuando se detecta el cambio de altura en el primer sensor de la primer fila
int HFNO = 0; //Altura cuando se detecta el cambio de altura en el segundo sensor de la primer fila
int SWITCH = 52; //Switch para prender o apagar la transmision de datos
int LEDO = 51; //Led que se enciende cuando se hayan obtenido los datos de la primera columna

NewPing sonar[SONAR_NUM] = { // arreglo con la informacion de los sensores
  NewPing(22, 23, MAX_DISTANCE), // cada sensor con su trigger pin, echo pin y distancia maxima posible.
  //NewPing(24, 25, MAX_DISTANCE),
  NewPing(26, 27, MAX_DISTANCE)
};
```

```

void setup() {
  pinMode(SWITCH, INPUT);
  pinMode(LED0, OUTPUT);
  CM.begin(9600);
  Serial.begin(9600); // Open serial monitor at 115200 baud to see ping results.
}

void loop() {
  StaticJsonBuffer<1000> jsonBuffer; //Se genera una seccion de memoria para guarda una coleccion de objetos
  JsonObject& root = jsonBuffer.createObject(); //Se genera la coleccion de objetos llamada root
  for (uint8_t i = 0; i < SONAR_NUM; i++) { // Loop para cambiar entre cada sensor.
    delay(30); // Tiempo minimo para cambiar entre sensores.
    Serial.print(i);
    Serial.print(" ");
    v = ((0.34 * sonar[i].ping()) / 2); //Calculo de altura en milimetros
    if (i == 0) {
      root["F0"] = v; //se guarda la altura del primer sensor
    }
    else if (i == 1) {
      root["F1"] = v; //se guarda la altura del segundo sensor
    }
    Serial.print(v);
    Serial.print("mm ");
    if (FLAGO < 2) { //Condicion para saber la primera vez que se detecten cambios de altura y obtener velocidad
      if (FLAGO == 0 && i == 0 && v < 200 && v>0) { //Condicion cuando se detecta por primera vez un cambio de altura en el primer sensor de la primer fila
        FLAGO = 1; //Se cambia el estado de la bandera
        HINO = v; //Se guarda la altura en ese instante
        TINO = millis(); //Se guarda el tiempo en ese instante
      }
      if (FLAGO == 1 && i == 1 && v < 200 && v>0) { //Condicion cuando se detecta por primera vez un cambio de altura en el primer sensor de la segunda fila
        FLAGO = 2; //Se cambia el estado de la bandera
      }
    }
    if (FLAGO == 0 && i == 0 && v < 200 && v>0) { //Condicion cuando se detecta por primera vez un cambio de altura en el primer sensor de la primer fila
      FLAGO = 1; //Se cambia el estado de la bandera
      HINO = v; //Se guarda la altura en ese instante
      TINO = millis(); //Se guarda el tiempo en ese instante
    }
    if (FLAGO == 1 && i == 1 && v < 200 && v>0) { //Condicion cuando se detecta por primera vez un cambio de altura en el primer sensor de la segunda fila
      FLAGO = 2; //Se cambia el estado de la bandera
      HFNO = v; //Se guarda altura en ese instante
      TFNO = millis(); //Se guarda tiempo en ese instante
      TO = (float)(TFNO - TINO) / 1000; //Se guarda la diferencia de tiempo entre los dos puntos en segundos
      Vel0 = DES / TO; // se obtiene la velocidad de la primer columna mm por seg
      Serial.println();
      Serial.println(TO);
      Serial.println(HINO);
      Serial.println(HFNO);
      Serial.println(Vel0);
      digitalWrite(LED0, HIGH); //Se prende LED para saber que se calculo la velocidad de la primer columna
    }
  }
}

if (digitalRead(SWITCH) == false) { //Condicion para saber estado del switch, si se cumple se mandan datos a la NODE
  root["Vel0"] = Vel0; //Se guarda el objeto Vel0 en la coleccion root
}

```



Figura 63.- Acomodo de sensores ultrasónicos para definir la velocidad de la onda de flujos de detritos sobre la sección transversal 0+040.

PUESTA EN OPERACIÓN Y PRUEBAS PRELIMINARES

Durante algunas pruebas preliminares se analizaron los posibles gastos líquidos que se modelaran, por lo que se intentó utilizar una motobomba agrícola de la marca HYUNDAI, modelo HYW2067, con potencia de 5kW/3600 rpm (ver Figura 64). Esta bomba, instalada y adaptada a las condiciones del modelo, puede otorgar un gasto máximo de 6.8 L/s; lo cual es muy pequeño para los gastos que se pretenden utilizar para modelar diferentes periodos de retorno. En este sentido, fue que se planeó la construcción del modelo en esta zona del laboratorio, debido a las complicaciones de alimentación de gasto líquido que se han presentado.



Figura 64.- Motobomba utilizada en pruebas preliminares para la alimentación de gasto.

Otra alternativa para lograr que entren al modelo gastos superiores, es por medio de un sifón, obtener agua directamente del tanque elevado del laboratorio de hidráulica; sin embargo, es muy poco probable que los gastos obtenidos estén cerca de los requeridos para representar los gastos pico de los diferentes periodos de retorno analizados.

En busca de garantizar un gasto líquido para diferentes periodos de retorno, se realizó el aforo de una de las líneas principales de tubería del laboratorio de hidráulica y conectar directamente una línea de tubería hacia el modelo físico de flujo de detritos. Para ello se utilizó equipo ultrasónico como el que se muestra en las siguientes figuras.



Figura 65.- Equipo ultrasónico utilizado en el aforo de tubería principal en el laboratorio de hidráulica

El gasto medido con el equipo fue de aproximadamente 200 L/s, gasto que permite simular diferentes periodos de retorno.



Figura 66.- Aforo de tubería del laboratorio de hidráulica.

Para la instalación de la línea de alimentación se utilizó tubería policloruro de vinilo (PVC) de 6 pulgadas de diámetro, de clase RD 32.5 (7.0 kg/cm^2). Este material permite que en un futuro se realice la remoción de la tubería de forma sencilla, además, de poder reutilizar en otros proyectos. Previo al modelo se construyó un tanque de disipación de energía con capacidad de retención de 3000 litros aproximadamente.

La conexión de la toma de agua de la línea de alimentación se realizó sobre una válvula situada en una tubería principal de conducción del laboratorio de hidráulica mediante una brida “loca” de PVC de 6 pulgadas de diámetro. Dicha válvula es utilizada para realizar la descarga al sistema pluvial en caso de limpieza de la cisterna que almacena el agua para el funcionamiento del laboratorio de hidráulica; de aquí la importancia porque la nueva tubería sea fácilmente removible.

Cabe mencionar que debido a la colocación de la tubería de forma superficial sobre el terreno natural y a la carencia de herramienta, provocó que la instalación se tornara difícil de realizar.



Figura 67.- Preparación de la espiga de forma manual para la unión de tramos de tubería



Figura 68.- Alineación y unión de la tubería en la línea de alimentación del modelo hidráulico.



Figura 69.- Lubricación de los tramos de tubería para su respectiva unión.



Figura 70.- Construcción de tanque de disipación de energía, con apoyo de compañeros del Departamento de Hidráulica.



Figura 71.- Panorámica de la instalación de la línea de alimentación de flujo del modelo hidráulico.

Para conformar el flujo de detritos experimental para un flujo continuo, se diseñó y construyó una tolva de acero con capacidad de 0.5m^3 de volumen, la cual se colocó por encima del tanque de regulación y disipación de energía del agua que ingresa al modelo.

Para el diseño de la tolva se realizaron ensayos empíricos de caída de partículas, esto para los distintos tamaños de agregados pétreos a utilizar para las pruebas; con ello se definió un ángulo de caída hacia el modelo y la altura de descarga, y se mitigó la influencia de fuerza actuantes adicionales que no se presentan en el prototipo.

De los ensayos realizados se observó que el material con tamaños inferiores al material que pasa la malla No. 10 (2 mm) se retiene cuando se utiliza una inclinación de 15° respecto a la horizontal y una altura de descarga de 40 cm; para tamaños superiores solo una porción de las partículas es retenida. Esto es congruente, dado que el ángulo de reposo del material es relevante, de acuerdo con Kalman et al. (1993), algunos de los factores que intervienen en la medición del ángulo de reposo de una partícula son el tamaño, la forma, la altura de caída del material, esfericidad de la partícula y la rugosidad de la base. Para materiales similares al utilizado en los ensayos (suelo granular) se han definido algunos valores del ángulo de reposo, los cuales oscilan

entre los 15° y 45° para suelos granulares. De base a esto, se ensayó considerando un ángulo de inclinación de 30° , de lo cual se observa que todos los tamaños de partículas se movilizan adecuadamente en la rampa.

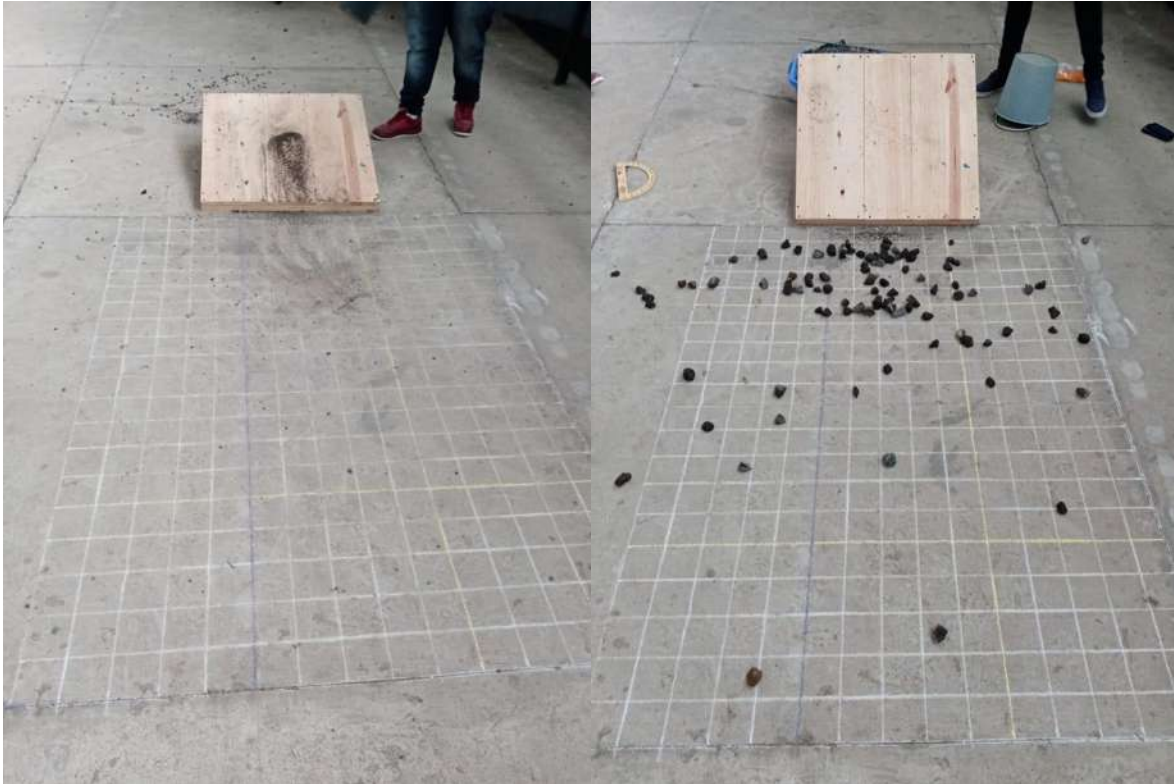


Figura 72. Ensayo de descarga de los diferentes tamaños de partículas de material pétreo.

Nota: A la izquierda se trata de material que se retiene en la malla no. 10; y a la derecha partículas retenidas en la malla de 1".

Para favorecer al desplazamiento de partículas durante la descarga de material pétreo se optó por utilizar para la fabricación de la tolva lamina de acero lisa del calibre 12, otorgando a su vez, resistencia durante el llenado de forma manual.

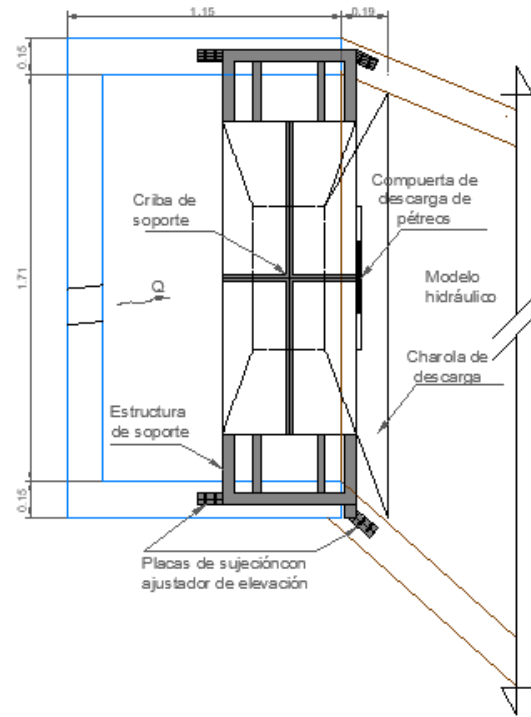


Figura 73. Ubicación espacial de la tolva, vista en planta.

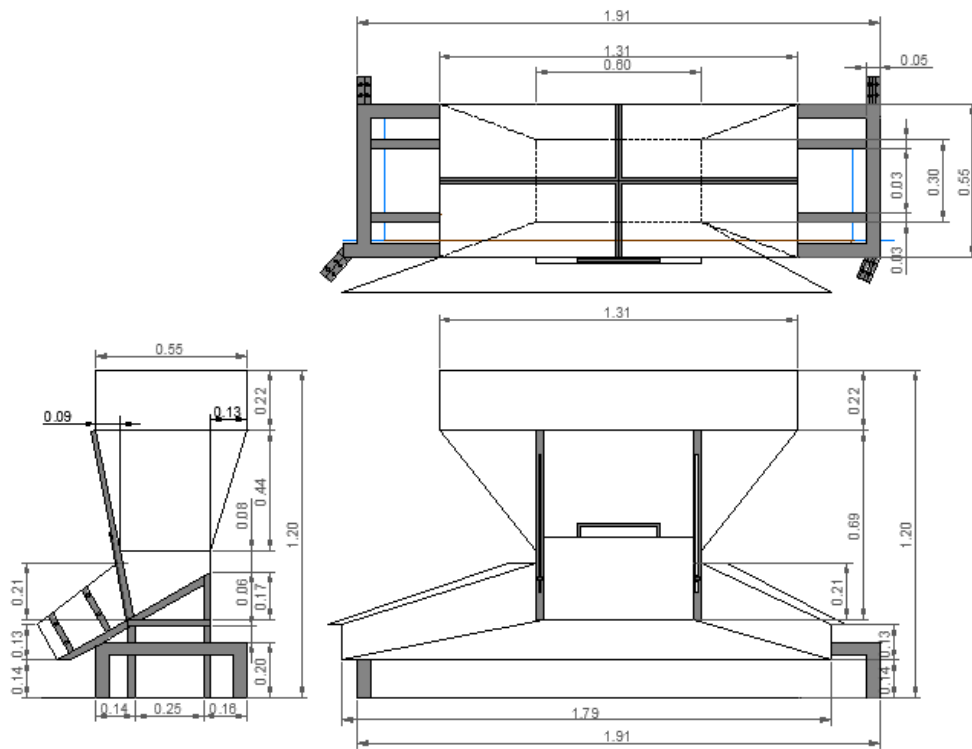


Figura 74. Dimensionamiento de la tolva para descarga de agregados pétreos, vista en planta, lateral y frontal.

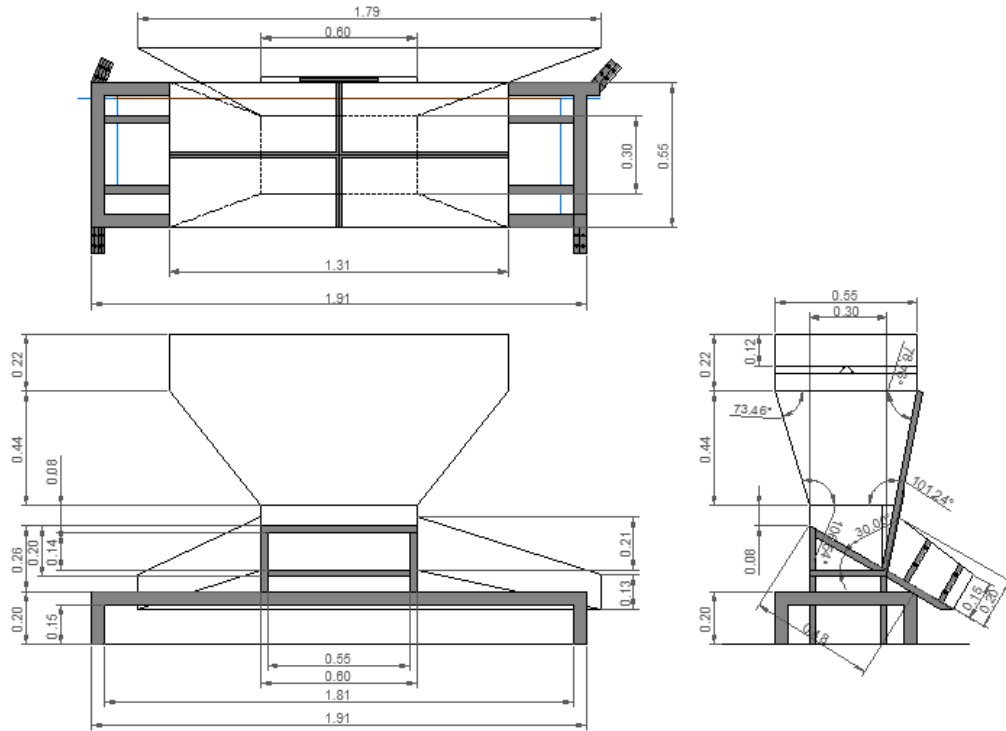


Figura 75. Dimensionamiento de la tolva para descarga de agregados pétreos, vista en planta, posterior y lateral.



Figura 76. Fabricación de la tolva para descarga de material pétreo.



Figura 77. Colocación de la tolva para descarga de material pétreo sobre el modelo hidráulico.

Posteriormente, se realizaron ensayos de descarga del material utilizado en las simulaciones de flujo de detritos. Para ello se realizó la apertura de la escotilla de la tolva a diferentes alturas, y para evitar la acumulación excesiva de material se utilizó 0.1 m^3 de volumen de material.



Figura 78. Ensayo de descarga de material pétreo a una apertura de 12.5 cm.

DISEÑO DE PRUEBAS Y ESCENARIOS

Para las simulaciones realizadas en el presente proyecto, se definieron escenarios en condiciones de agua clara y en condiciones de flujo de detritos.

Con base a un análisis hidrológico de la microcuenca de aportación de la zona de estudio, se definieron los siguientes caudales para diferentes períodos de retorno:

Tabla 10. Variación de caudales para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, 1000, 5000 y 10000 años.

T (h)	Q2 (m ³ /s)	Q5 (m ³ /s)	Q10 (m ³ /s)	Q25 (m ³ /s)	Q50 (m ³ /s)	Q100 (m ³ /s)	Q200 (m ³ /s)	Q500 (m ³ /s)	Q1000 (m ³ /s)	Q5000 (m ³ /s)	Q10000 (m ³ /s)
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.099	0.078	0.144	0.189	0.243	0.282	0.320	0.357	0.405	0.441	0.522	0.556
0.198	0.389	0.722	0.943	1.215	1.411	1.601	1.786	2.026	2.205	2.610	2.781
0.297	0.830	1.541	2.011	2.591	3.009	3.415	3.811	4.323	4.703	5.568	5.933
0.396	1.452	2.696	3.520	4.534	5.266	5.976	6.669	7.565	8.231	9.744	10.384
0.494	2.230	4.141	5.406	6.964	8.087	9.178	10.242	11.618	12.640	14.963	15.946
0.593	3.111	5.778	7.543	9.717	11.284	12.806	14.291	16.212	17.637	20.879	22.251
0.791	4.615	8.570	11.188	14.413	16.739	18.995	21.199	24.047	26.162	30.971	33.005
0.989	5.186	9.630	12.571	16.194	18.807	21.343	23.819	27.019	29.396	34.798	37.084
1.187	4.771	8.859	11.565	14.899	17.303	19.636	21.913	24.858	27.044	32.014	34.118
1.384	3.889	7.222	9.428	12.146	14.106	16.007	17.864	20.264	22.047	26.099	27.813
1.582	2.904	5.393	7.040	9.069	10.532	11.952	13.339	15.131	16.462	19.487	20.767
1.780	2.178	4.044	5.280	6.802	7.899	8.964	10.004	11.348	12.346	14.615	15.575
1.978	1.659	3.081	4.023	5.182	6.018	6.830	7.622	8.646	9.407	11.135	11.867
2.175	1.245	2.311	3.017	3.887	4.514	5.122	5.717	6.485	7.055	8.352	8.900
2.373	0.933	1.733	2.263	2.915	3.385	3.842	4.287	4.863	5.291	6.264	6.675
2.571	0.674	1.252	1.634	2.105	2.445	2.775	3.096	3.512	3.821	4.524	4.821
2.769	0.508	0.944	1.232	1.587	1.843	2.092	2.334	2.648	2.881	3.410	3.634
2.966	0.389	0.722	0.943	1.215	1.411	1.601	1.786	2.026	2.205	2.610	2.781
3.461	0.187	0.347	0.453	0.583	0.677	0.768	0.857	0.973	1.058	1.253	1.335
3.955	0.093	0.173	0.226	0.291	0.339	0.384	0.429	0.486	0.529	0.626	0.668
4.449	0.041	0.077	0.101	0.130	0.150	0.171	0.191	0.216	0.235	0.278	0.297
4.944	0.021	0.039	0.050	0.065	0.075	0.085	0.095	0.108	0.118	0.139	0.148

Sus respectivos hidrogramas se aprecian en la figura siguiente:

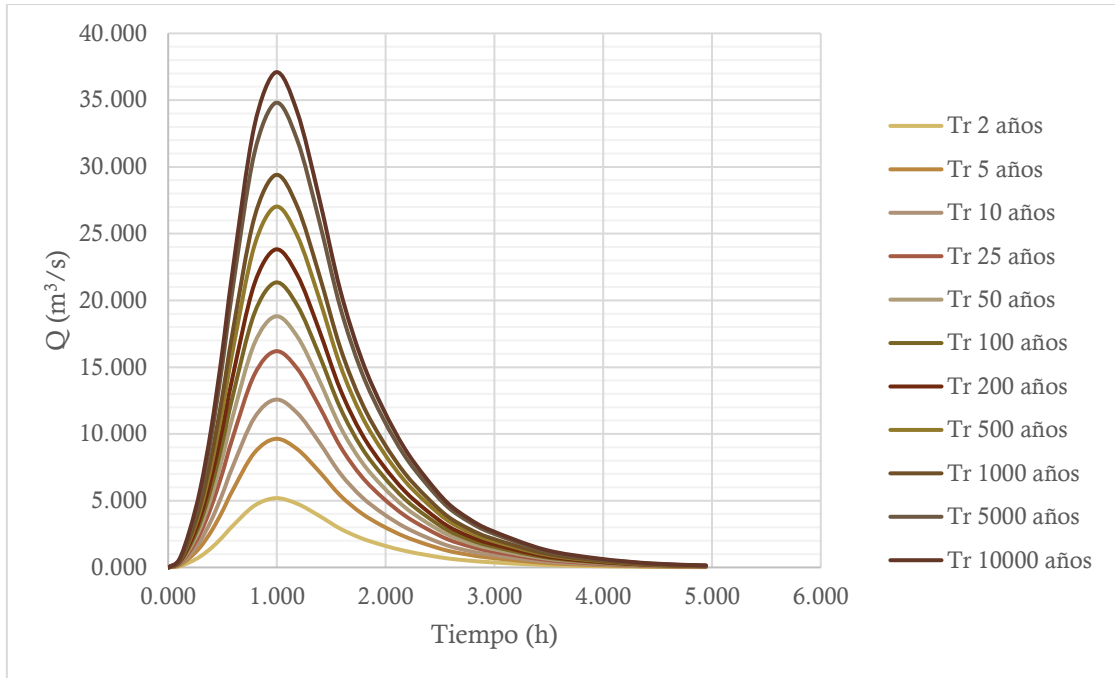


Figura 79. Hidrogramas para diferentes períodos de retorno (Tr).

Con base a la Tabla 2 y a la escala de longitud definida para la construcción del modelo hidráulico, la escala para los diferentes caudales y del tiempo quedó definida como:

$$Q_e = (L_e)^{5/2} = 10^{5/2} \approx 316.2278$$

y,

$$t_e = \sqrt{L_e} = \sqrt{10} \approx 3.162278$$

Por consiguiente, la variación de caudales para para diferentes periodos de retorno aplicables en el modelo se expresan en la tabla siguiente:

Tabla 11. Variación de caudales para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, 1000, 5000 y 10000 años (a escala).

T (h)	Q2 (m ³ /s)	Q5 (m ³ /s)	Q10 (m ³ /s)	Q25 (m ³ /s)	Q50 (m ³ /s)	Q100 (m ³ /s)	Q200 (m ³ /s)	Q500 (m ³ /s)	Q1000 (m ³ /s)	Q5000 (m ³ /s)	Q10000 (m ³ /s)
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.031	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
0.063	0.001	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005	0.006	0.006	0.007	0.008	0.009
0.094	0.003	0.005	0.006	0.008	0.010	0.011	0.012	0.014	0.015	0.018	0.019
0.125	0.005	0.009	0.011	0.014	0.017	0.019	0.021	0.024	0.026	0.031	0.033
0.156	0.007	0.013	0.017	0.022	0.026	0.029	0.032	0.037	0.040	0.047	0.050
0.188	0.010	0.018	0.024	0.031	0.036	0.040	0.045	0.051	0.056	0.066	0.070
0.250	0.015	0.027	0.035	0.046	0.053	0.060	0.067	0.076	0.083	0.098	0.104
0.313	0.016	0.030	0.040	0.051	0.059	0.067	0.075	0.085	0.093	0.110	0.117
0.375	0.015	0.028	0.037	0.047	0.055	0.062	0.069	0.079	0.086	0.101	0.108
0.438	0.012	0.023	0.030	0.038	0.045	0.051	0.056	0.064	0.070	0.083	0.088
0.500	0.009	0.017	0.022	0.029	0.033	0.038	0.042	0.048	0.052	0.062	0.066
0.563	0.007	0.013	0.017	0.022	0.025	0.028	0.032	0.036	0.039	0.046	0.049
0.625	0.005	0.010	0.013	0.016	0.019	0.022	0.024	0.027	0.030	0.035	0.038
0.688	0.004	0.007	0.010	0.012	0.014	0.016	0.018	0.021	0.022	0.026	0.028
0.750	0.003	0.005	0.007	0.009	0.011	0.012	0.014	0.015	0.017	0.020	0.021
0.813	0.002	0.004	0.005	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012	0.014	0.015
0.875	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.007	0.008	0.009	0.011	0.011
0.938	0.001	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005	0.006	0.006	0.007	0.008	0.009
1.094	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004
1.251	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002
1.407	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
1.563	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MAX (L/s) =	16.398	30.451	39.753	51.211	59.475	67.493	75.322	85.442	92.958	110.042	117.271

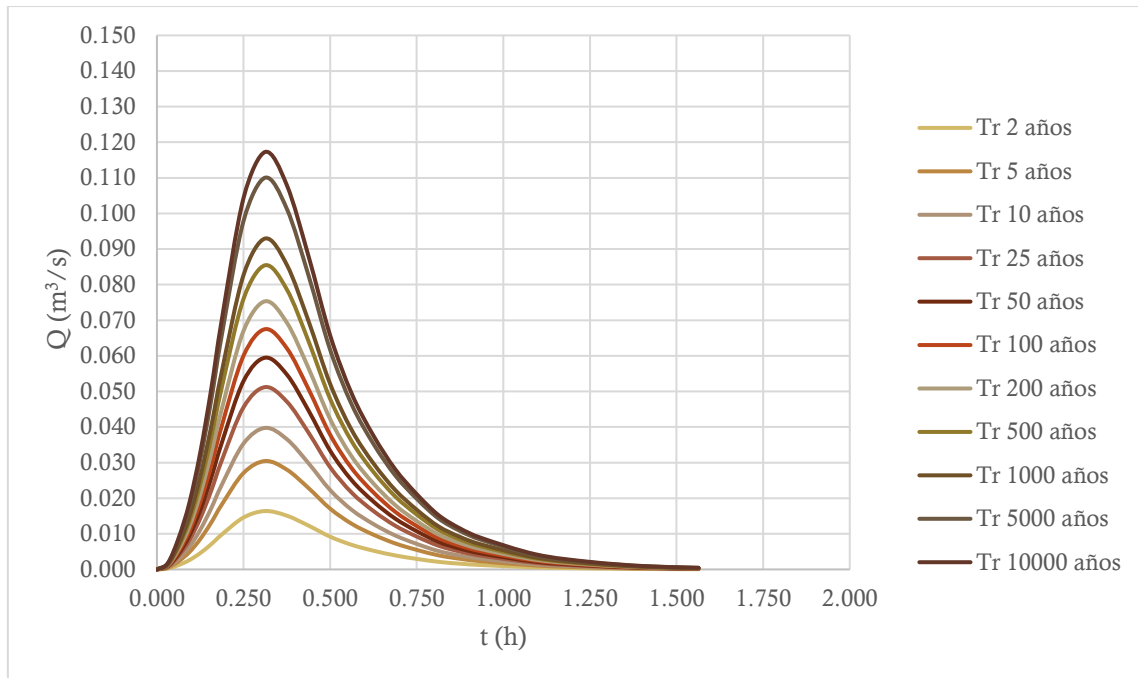


Figura 80. Hidrogramas (a escala) para diferentes períodos de retorno (Tr).

Por otra parte, el Laboratorio de Hidráulica David Hernández Hueramo, de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás, cuenta con la capacidad en infraestructura hidráulica para generar caudales de 200 L/s, esto con base a los aforos realizados; sin embargo, debido a la capacidad y dimensiones del modelo, características que estuvieron condicionadas por varios factores, principalmente el espacio disponible, ubicación dentro de las instalaciones del laboratorio y el presupuesto económico para la construcción del mismo; resulta inconveniente hacer circular caudales relativamente grandes. En este sentido el modelo se encuentra limitado para realizar simulaciones con caudales asociados a periodos recurrencia grandes, a menos que se construyan otros elementos y obras hidráulicas que complementen al modelo y permitan tales objetivos.

Lo anterior es importante mencionarlo ya que, permite establecer una frontera en las simulaciones que actualmente se pueden realizar en el modelo, y marcar parte del trabajo carente que se puede realizar en proyectos de investigación futuros.

Con base a resultados de pruebas preliminares y simulaciones numéricas en Iber, realizadas en condiciones de agua clara, el modelo permite la circulación de gastos de hasta 70 L/s para un tiempo relativamente corto de simulación. Esto implica que se podrían realizar simulaciones para caudales asociados a períodos de retorno de 100 años.

De las los ensayos de descarga de material pétreo, realizadas a través de la tolva, se definieron caudales gasto sólido, dichos caudales están en función de la apertura de escotilla de la tolva. La apertura de la tolva está condicionada debido al tamaño máximo de las partículas que se alojan en ella, de esta forma se definieron los siguientes caudales.

Tabla 12. Caudales de descarga de material pétreo.

Apertura total (cm)	Apertura (cm)	Volumen de material (m ³)	Tiempo (s)	Q _{sólido} (m ³ /s)	Observación
21	0.000	0.000	-	-	Escotilla cerrada
	5.000	0.093	-	-	se detuvo el material pétreo
	10.000	0.093	-	-	se detuvo el material pétreo
	12.000	0.093	14.000	0.007	-
	15.000	0.093	12.000	0.008	-
	20.000	0.126	9.070	0.014	-

Ahora, si recordamos que la concentración de partículas, en términos de volumen, es el cociente que resulta de comparar el volumen de los sólidos que hay una en una muestra con el volumen de la misma (García F. M., & Maza A. J. A., 1998); y dadas las limitaciones de momento para obtener una muestra, se podría definir de manera preliminar una “concentración en términos de caudales”. Con base a esto y a los gastos máximos para los diferentes períodos de retorno se definieron concentraciones en términos de caudal de la mezcla para el flujo de detritos para diferentes aperturas de la escotilla, como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 13. Concentración de partículas en términos de caudales para diferentes aperturas y períodos de retorno.

	Tr 2 años	Tr 5 años	Tr 10 años	Tr 25 años	Tr 50 años	Tr 100 años	Tr 200 años	Tr 500 años	Tr 1000 años	Tr 5000 años	Tr 10000 años
C ₁₂	0.4038	0.2174	0.1666	0.1293	0.1113	0.0981	0.0879	0.0775	0.0712	0.0602	0.0565
C ₁₅	0.4713	0.2538	0.1944	0.1509	0.1299	0.1145	0.1026	0.0904	0.0831	0.0702	0.0659
C ₂₀	0.8440	0.4545	0.3481	0.2703	0.2327	0.2051	0.1837	0.1620	0.1489	0.1258	0.1180

En este sentido, y para fines del presente proyecto, se definió realizar pruebas para un caudal pico continuo asociado a un período de retorno de 25 años (51.21 L/s), a diferentes concentraciones en función de la apertura de la escotilla de 12, 15 y 20 cm, de esta forma generar una comparativa y garantizar concentraciones altas de sedimentos (detritos), principal característica de este tipo de flujos.

XI. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

Se realizaron simulaciones para condiciones de agua clara y de flujo de detritos, para un escenario asociado a un período de recurrencia de 25 años (gasto pico de 50 L/s). Para el caso de las pruebas de flujo de detritos, se utilizaron dos aperturas de la escotilla de la tolva de 12 y 15 cm; es decir, concentraciones en términos de caudales de 0.12 y 0.15, respectivamente.

PRUEBAS EN CONDICIONES DE AGUA CLARA

Finalmente, la simulación en condiciones de agua clara se realizó haciendo pasar un caudal de 50 L/s por el modelo físico, el cual está asociado a un periodo de retorno de 25 años.



Figura 81. Simulación en condiciones de agua clara (vista en planta) para un $Tr= 25$ años.



Figura 82. Perspectiva de la simulación en condiciones de agua clara para un $T_r=25$ años.

A continuación, se presentan gráficamente las alturas registradas por cada sensor utilizado.

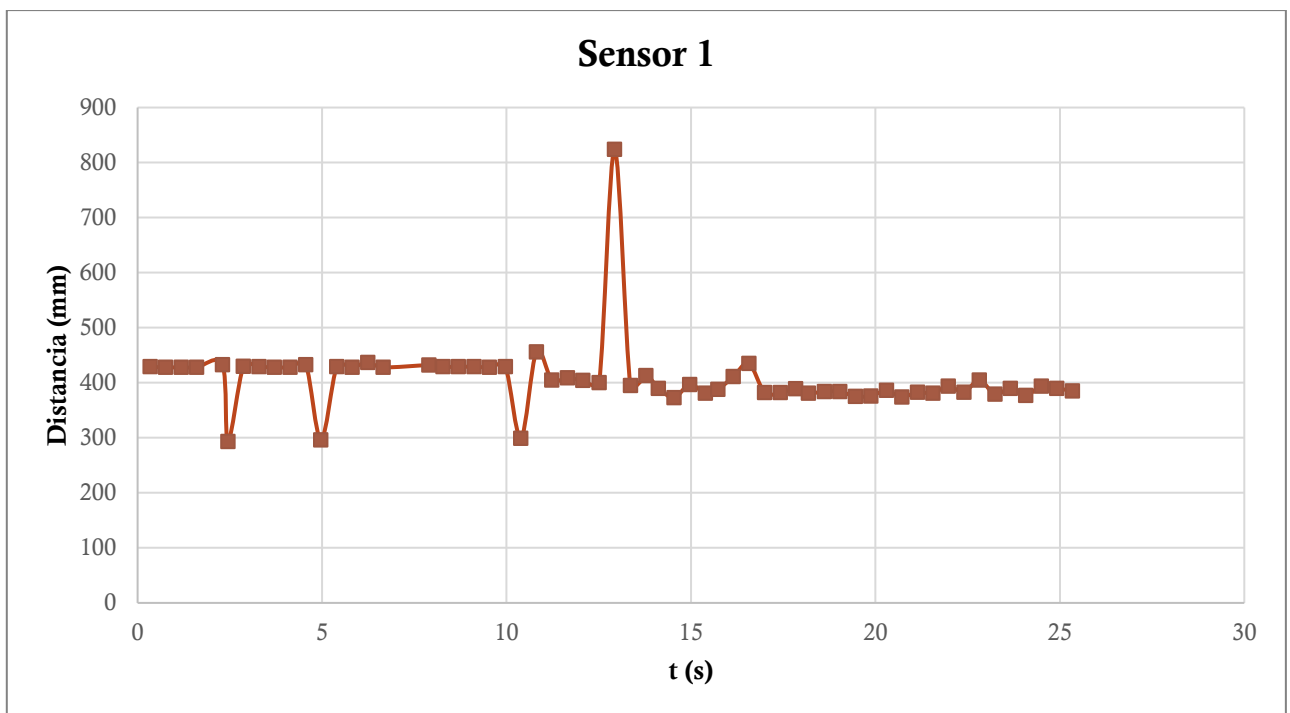


Figura 83. Alturas registradas por el sensor 1 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara

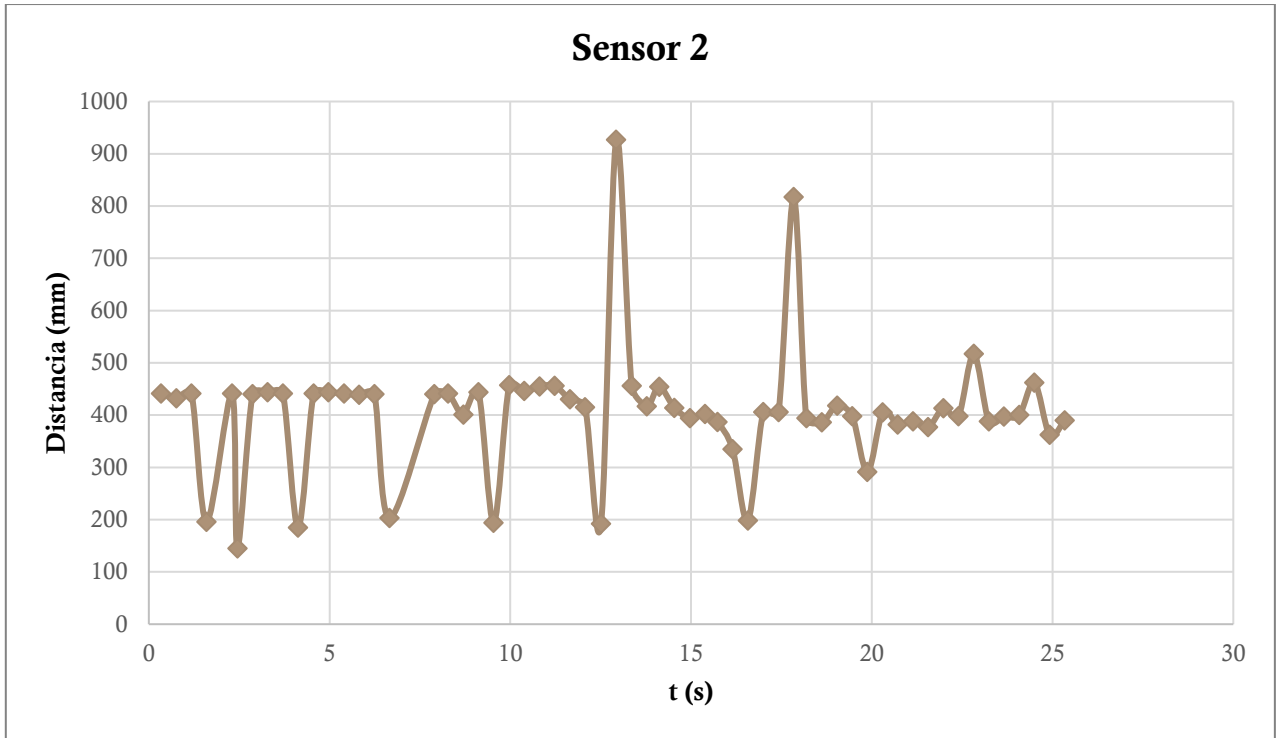


Figura 84. Alturas registradas por el sensor 2 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara

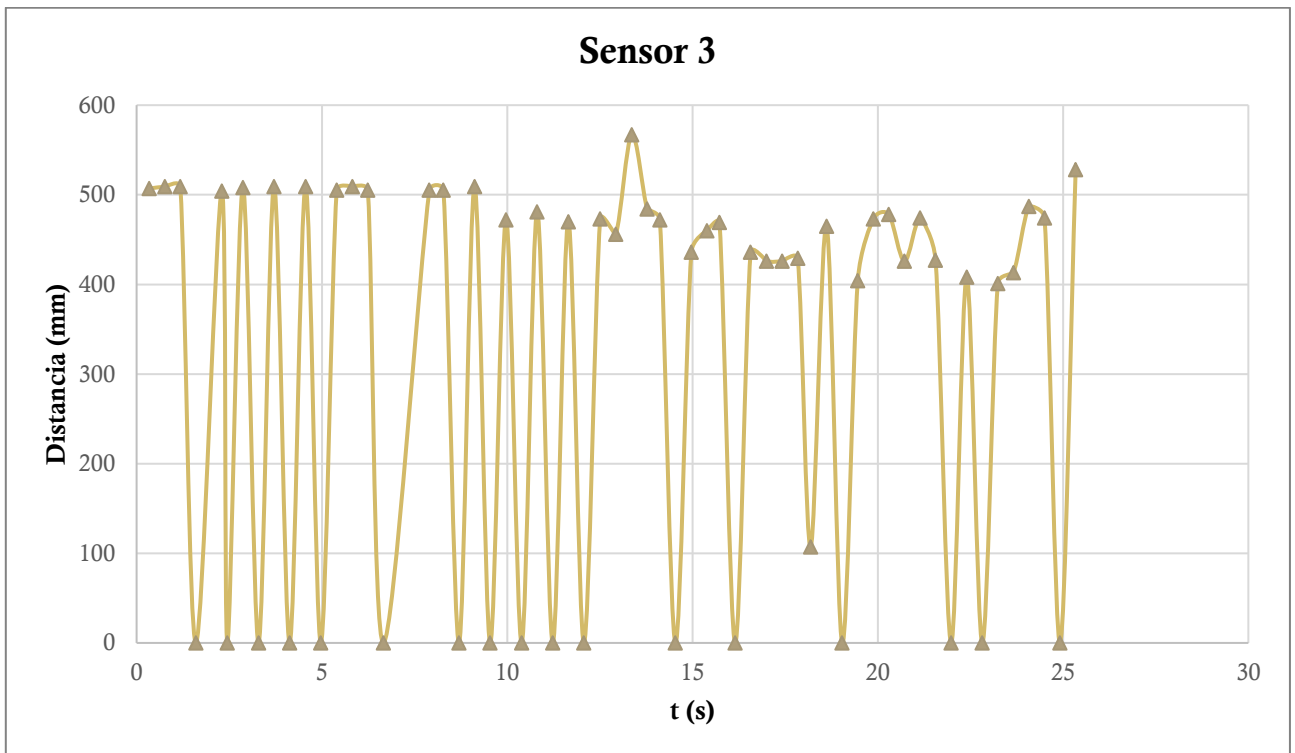


Figura 85. Alturas registradas por el sensor 3 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara

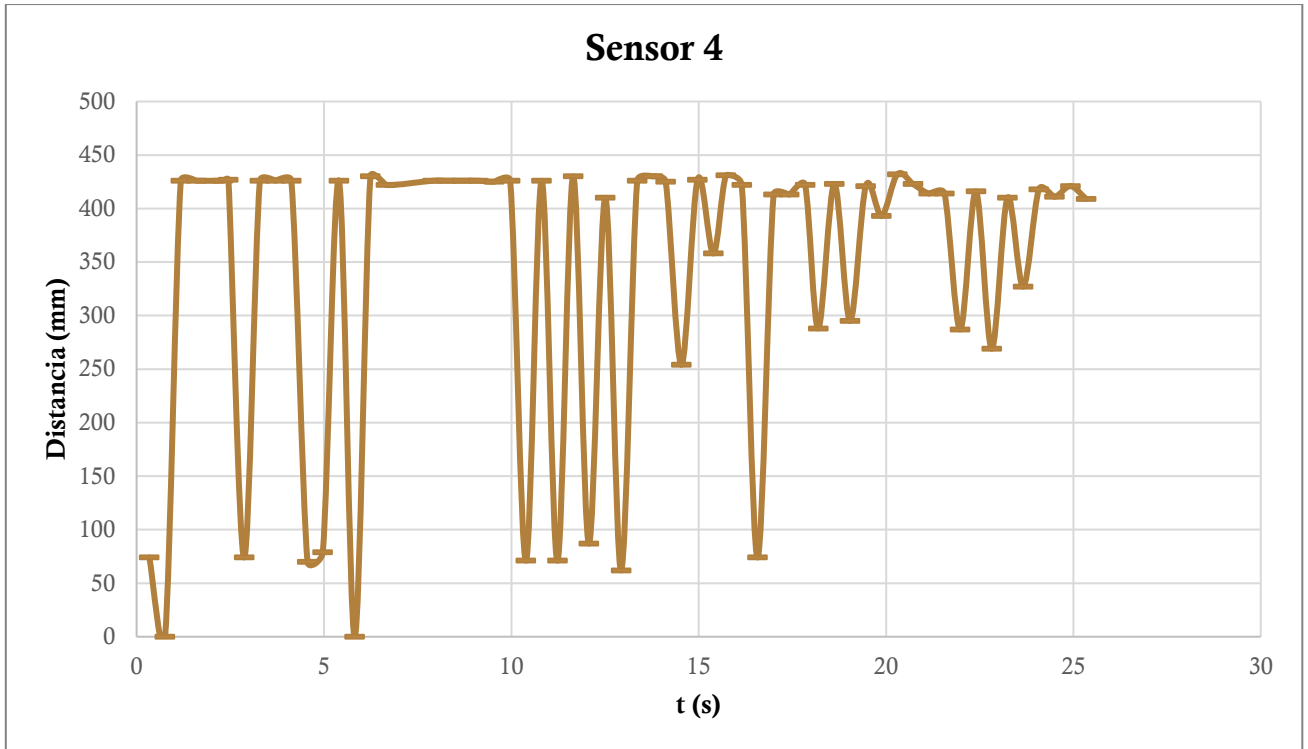


Figura 86. Alturas registradas por el sensor 6 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara

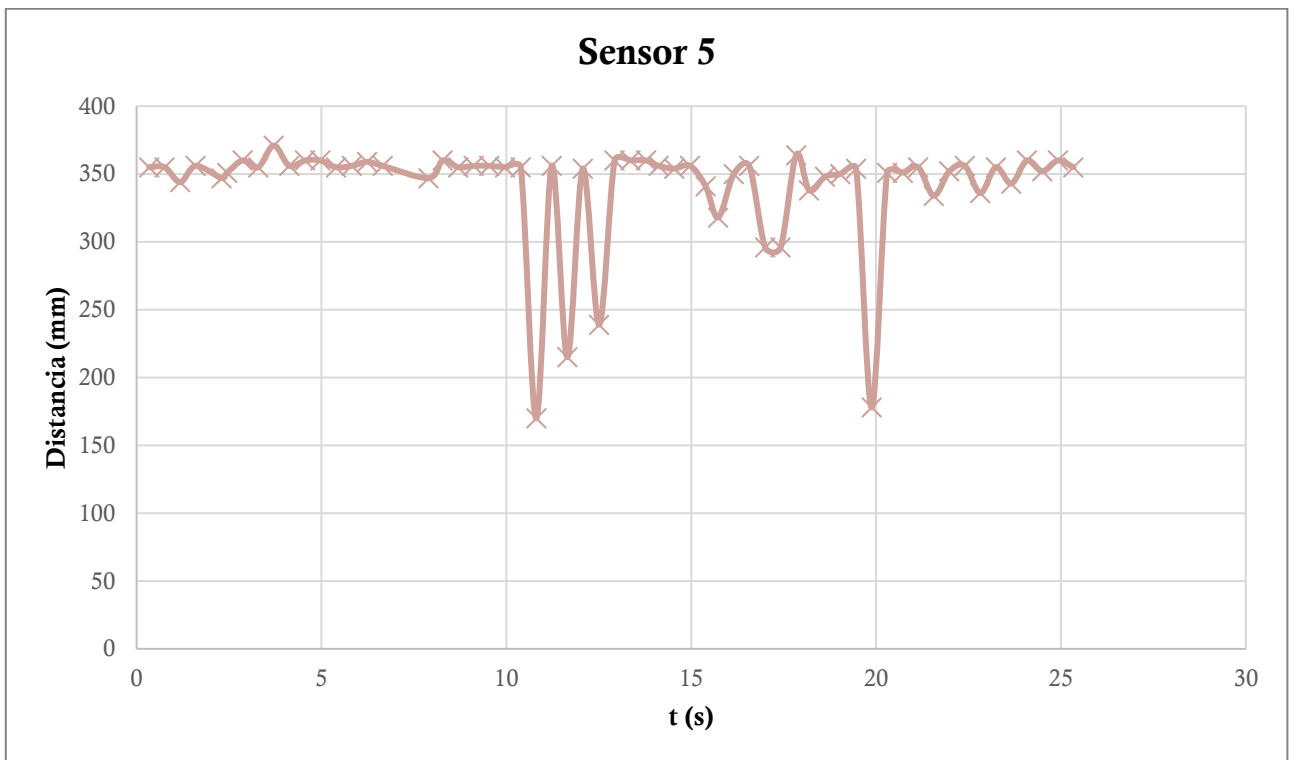


Figura 87. Alturas registradas por el sensor 5 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara

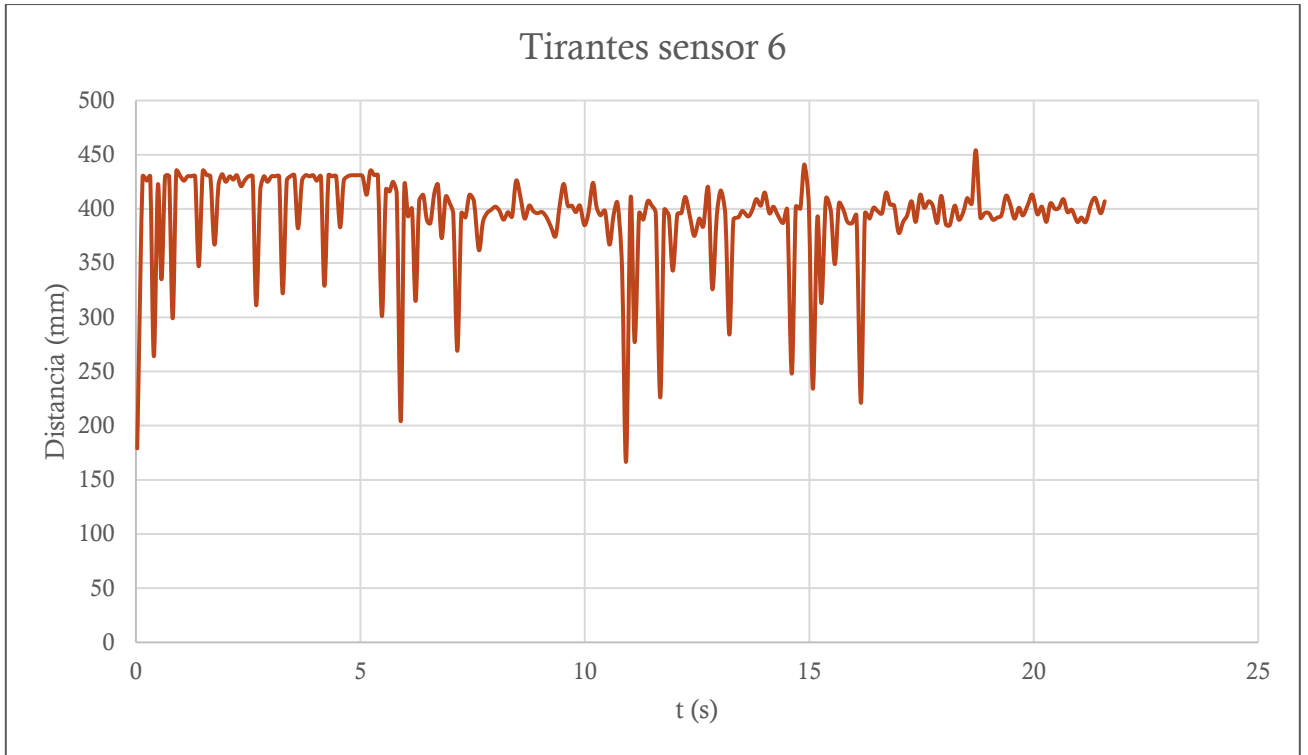


Figura 88. Alturas registradas por el sensor 6 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara

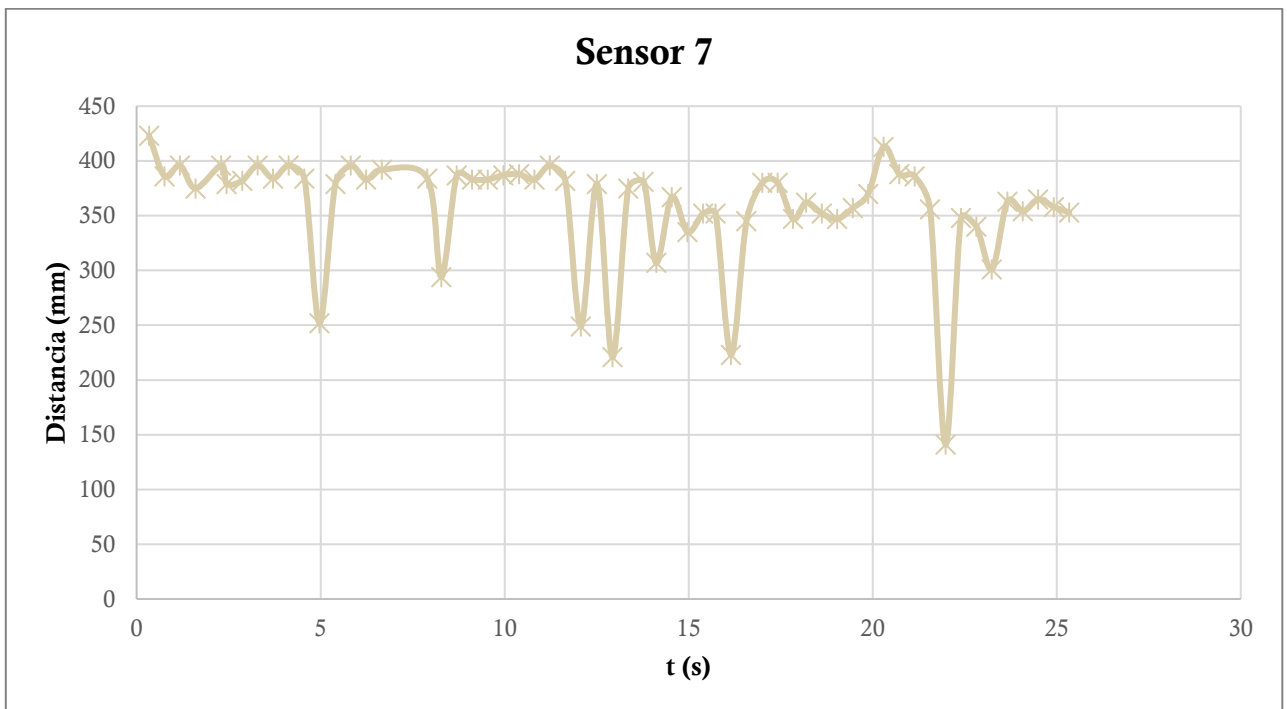


Figura 89. Alturas registradas por el sensor 7 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara

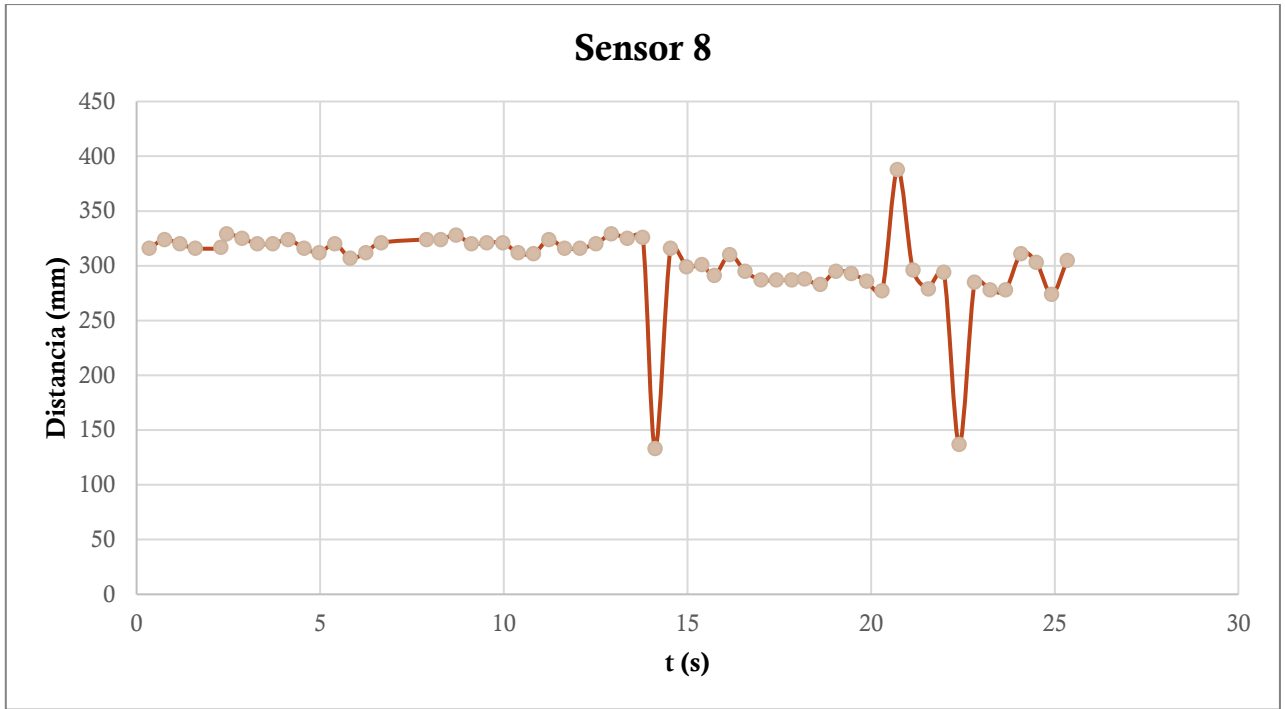


Figura 90. Alturas registradas por el sensor 8 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara

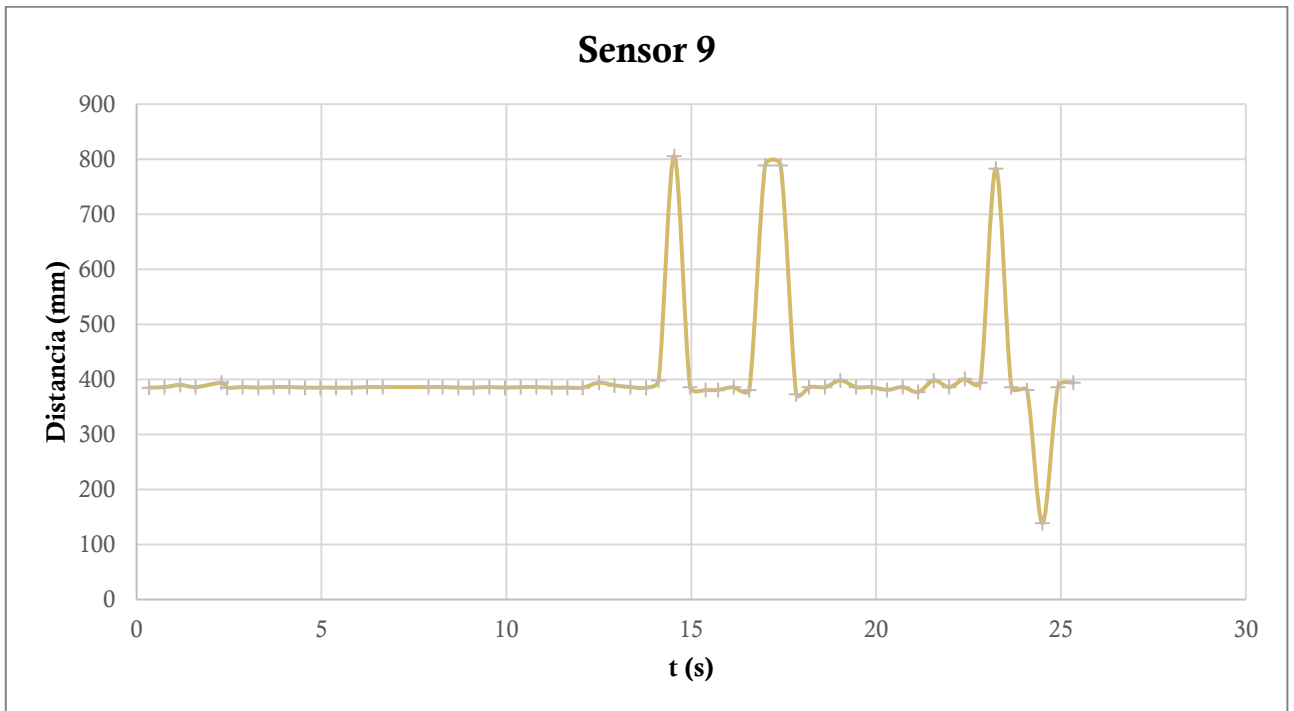


Figura 91. Alturas registradas por el sensor 9 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara

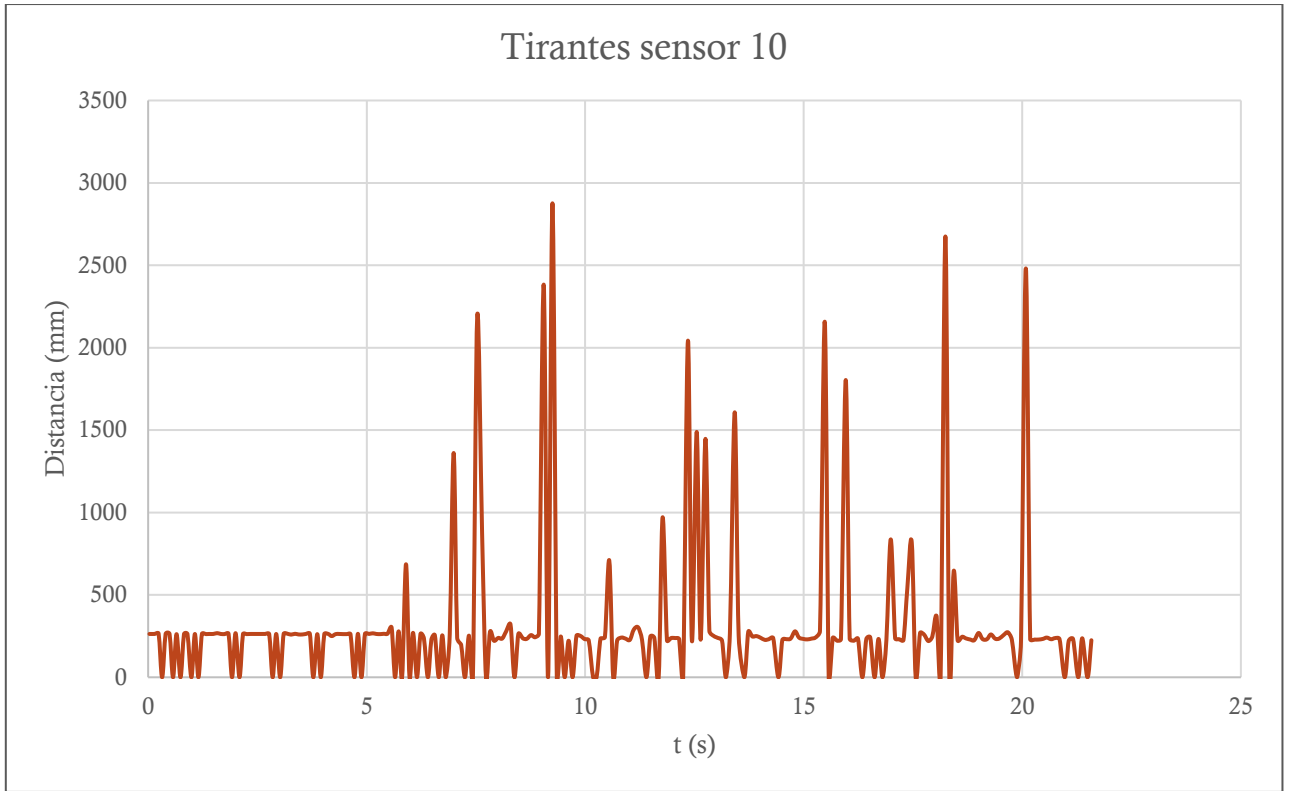


Figura 92. Alturas registradas por el sensor 10 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara

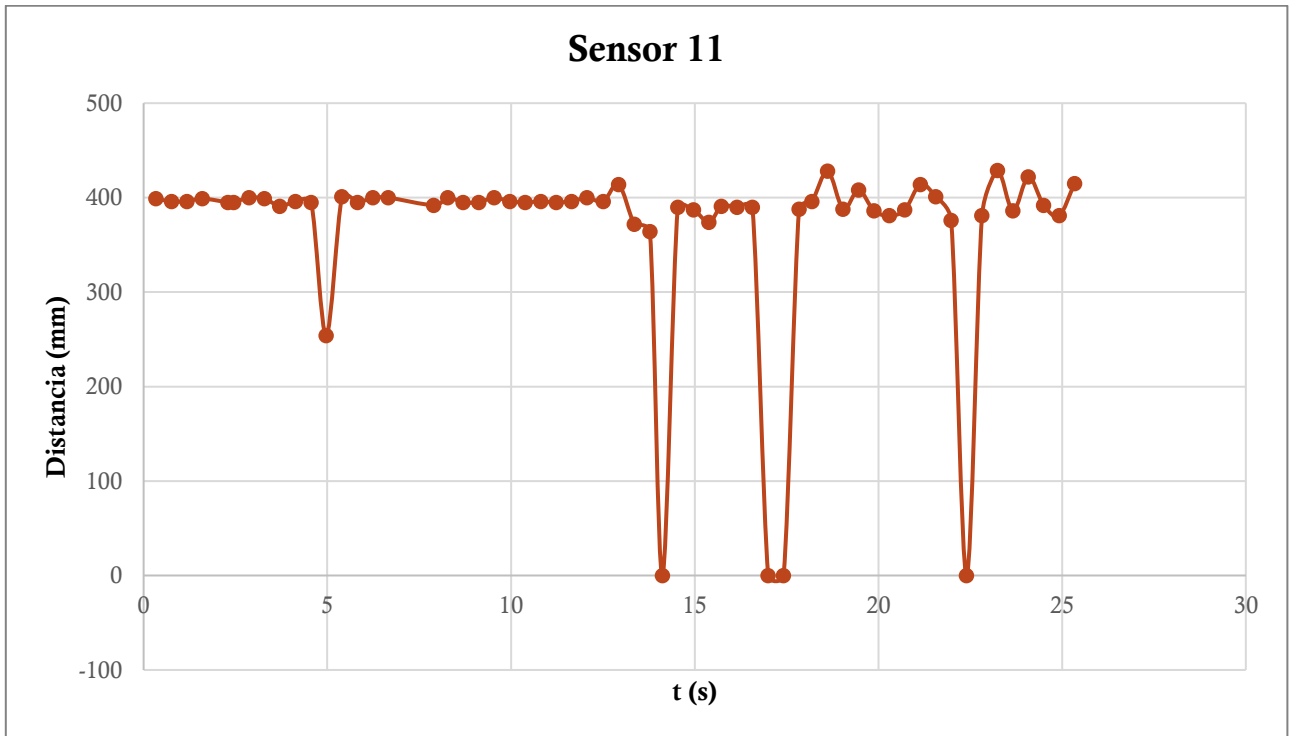


Figura 93. Alturas registradas por el sensor 11 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara

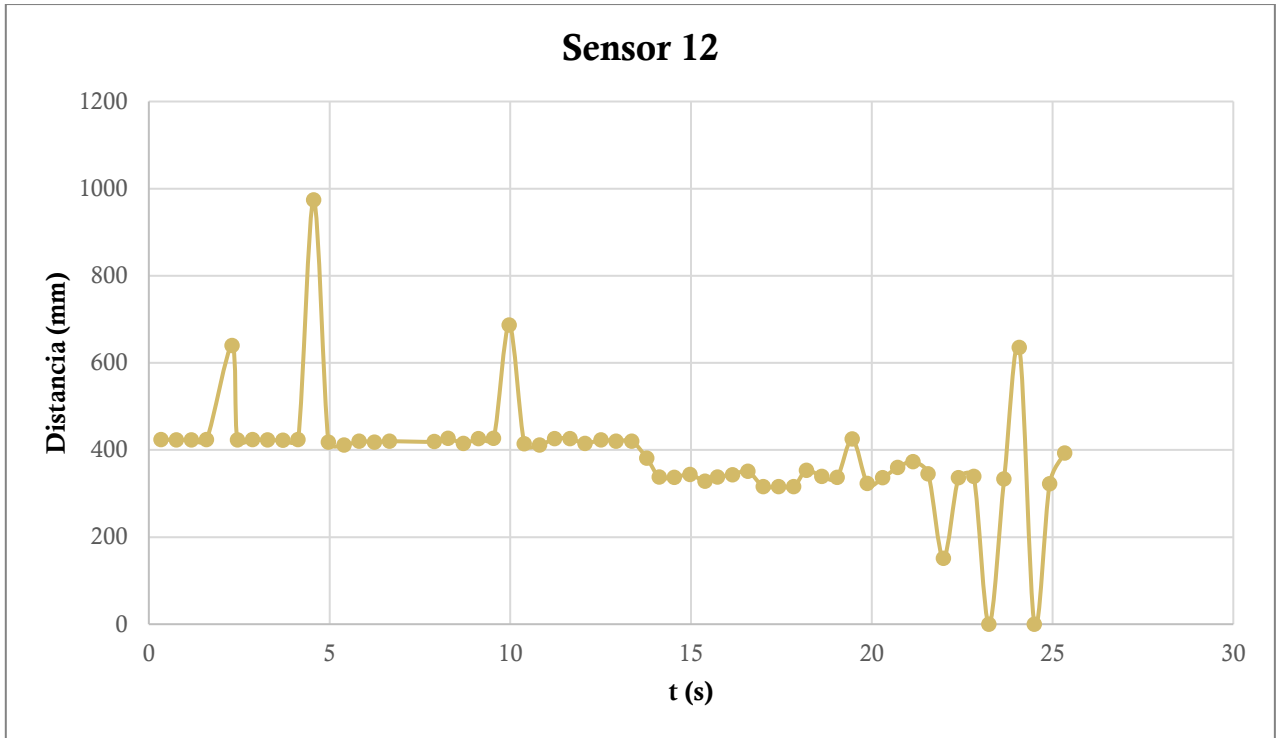



Figura 94. Alturas registradas por el sensor 12 durante la simulación de flujo en condiciones de agua clara

PRUEBAS EN CONDICIONES DE FLUJO DE DETRITOS

Para las simulaciones en condiciones de flujo de detritos se ha agregado material pétreo con un tamaño similar al d_{50} de la distribución teórica (1.19 cm), los cuales funcionaron como indicador visual del comportamiento dispersivo de los detritos que representan la media de la distribución.

Tabla 14. Simbología de los agregados "indicadores"



MALLA	ABERTURA DE MALLA (cm)
3/4"	1.91
1/2"	1.27
3/8"	0.952

Figura 95. Agregados indicadores del comportamiento de la media de la distribución teórica.



Figura 96. Simulación en condiciones de detritos (vista en planta) para un $Tr=25$ años y una apertura de la escotilla de 12 cm.



Figura 97. Perspectiva de la simulación en condiciones de flujo de detritos para un $Tr=25$ años y apertura a 12 cm.



Figura 98. Simulación de flujo de detritos (vista en planta) para un $Tr=25$ años a una apertura de la escotilla de 15 cm.



Figura 99. Perspectiva de la simulación de flujo de detritos para un $Tr=25$ años a una apertura de la escotilla de 15 cm.

A continuación, se presentan las alturas registradas por los sensores durante las simulaciones de flujo de detritos para las concentraciones, en términos de caudal, de 0.12 (12 cm de apertura de la escotilla) y 0.15 (apertura de 0.15):

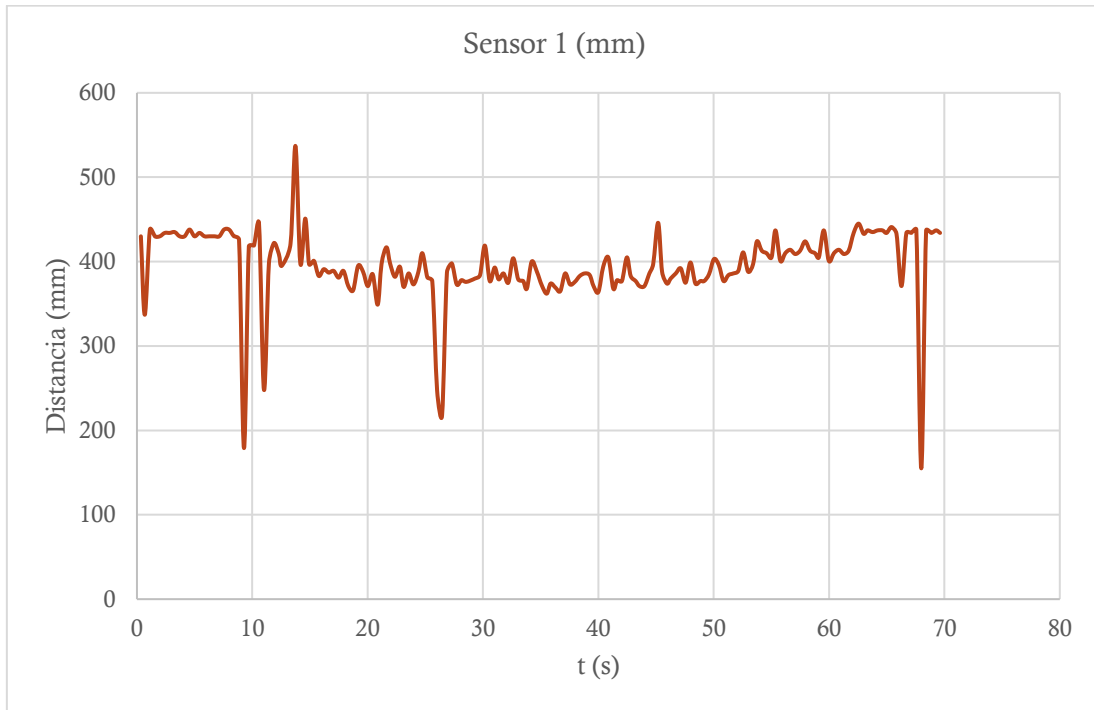


Figura 100. Alturas registradas por el sensor 1 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla

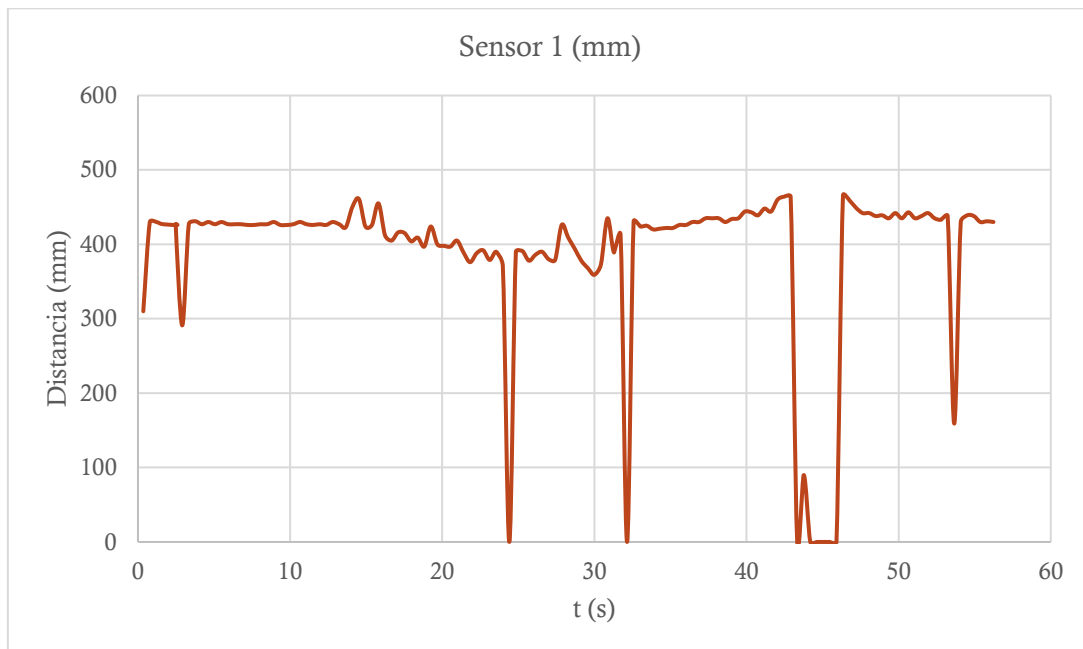


Figura 101. Alturas registradas por el sensor 1 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla

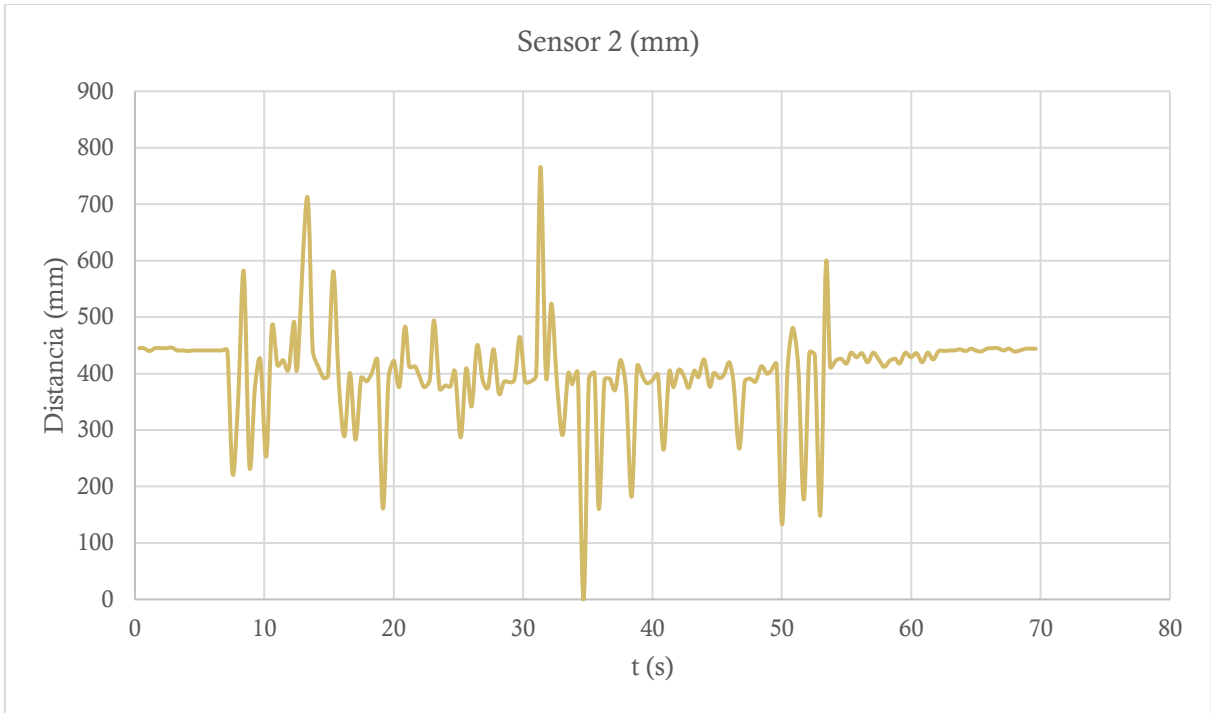


Figura 102. Alturas registradas por el sensor 2 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla

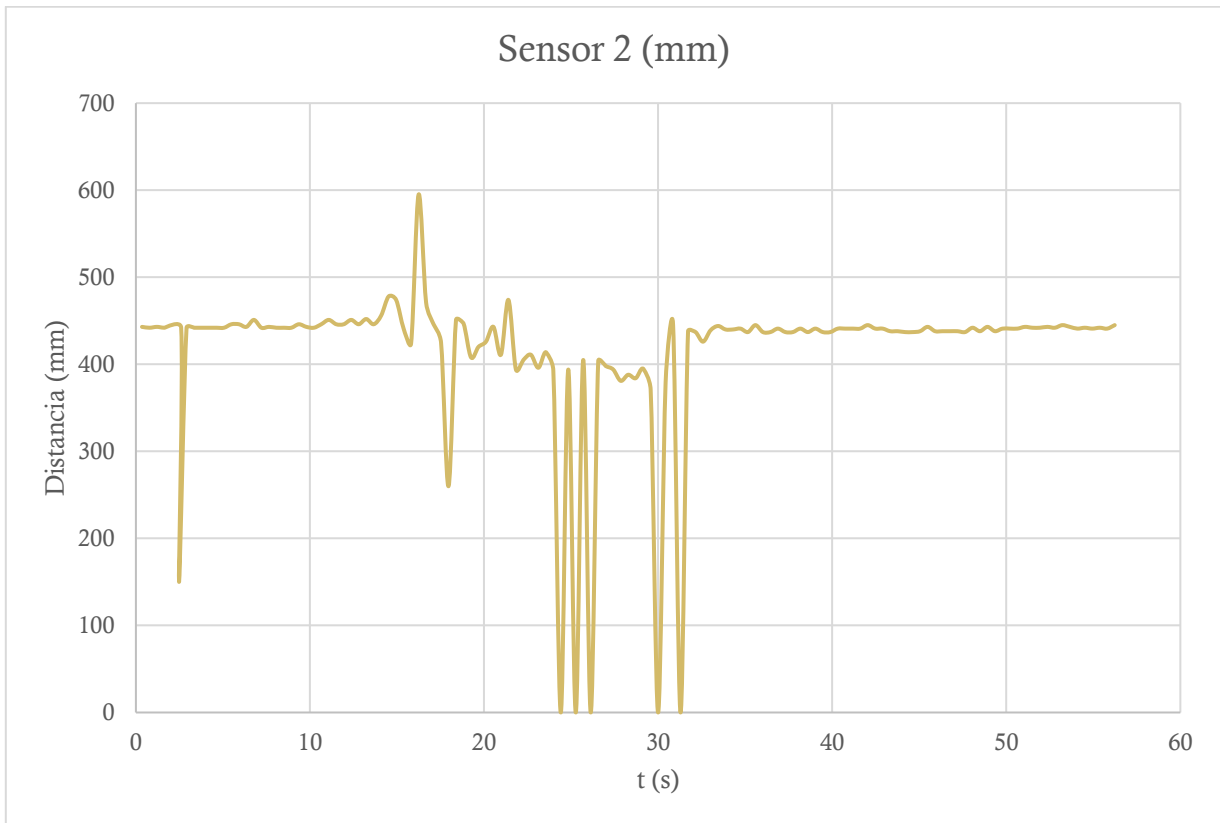


Figura 103. Alturas registradas por el sensor 2 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla.

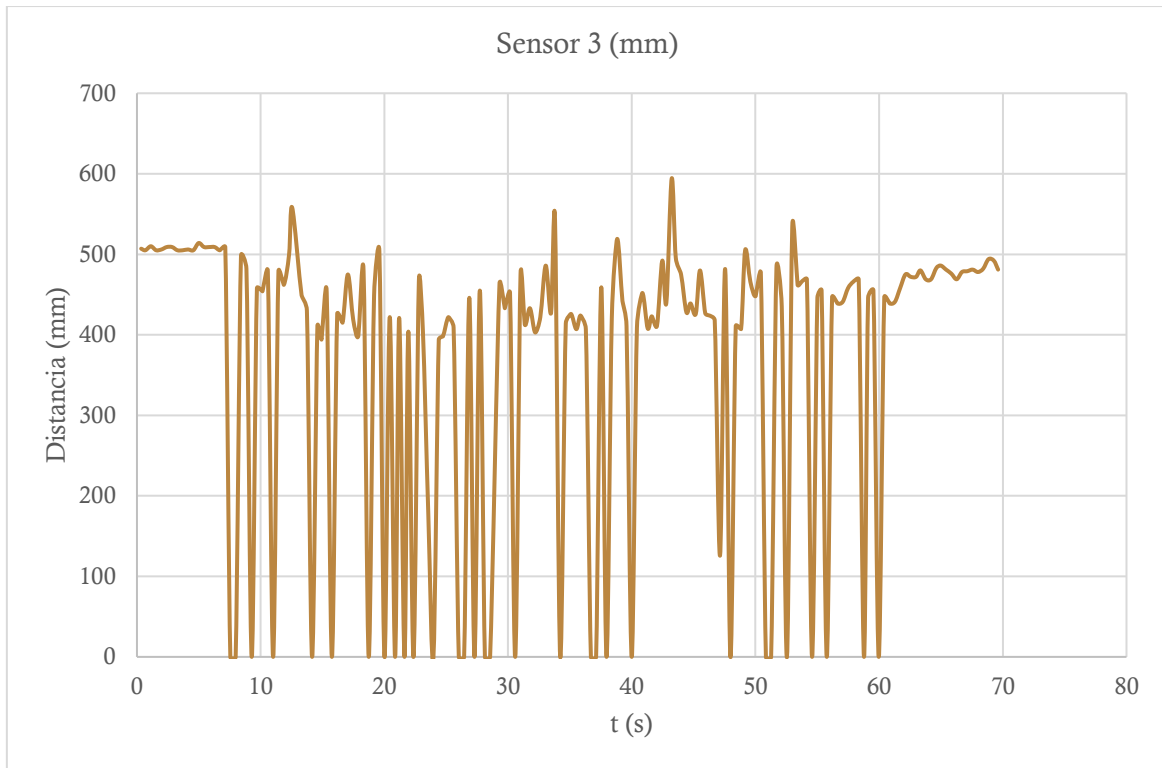


Figura 104. Alturas registradas por el sensor 3 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla

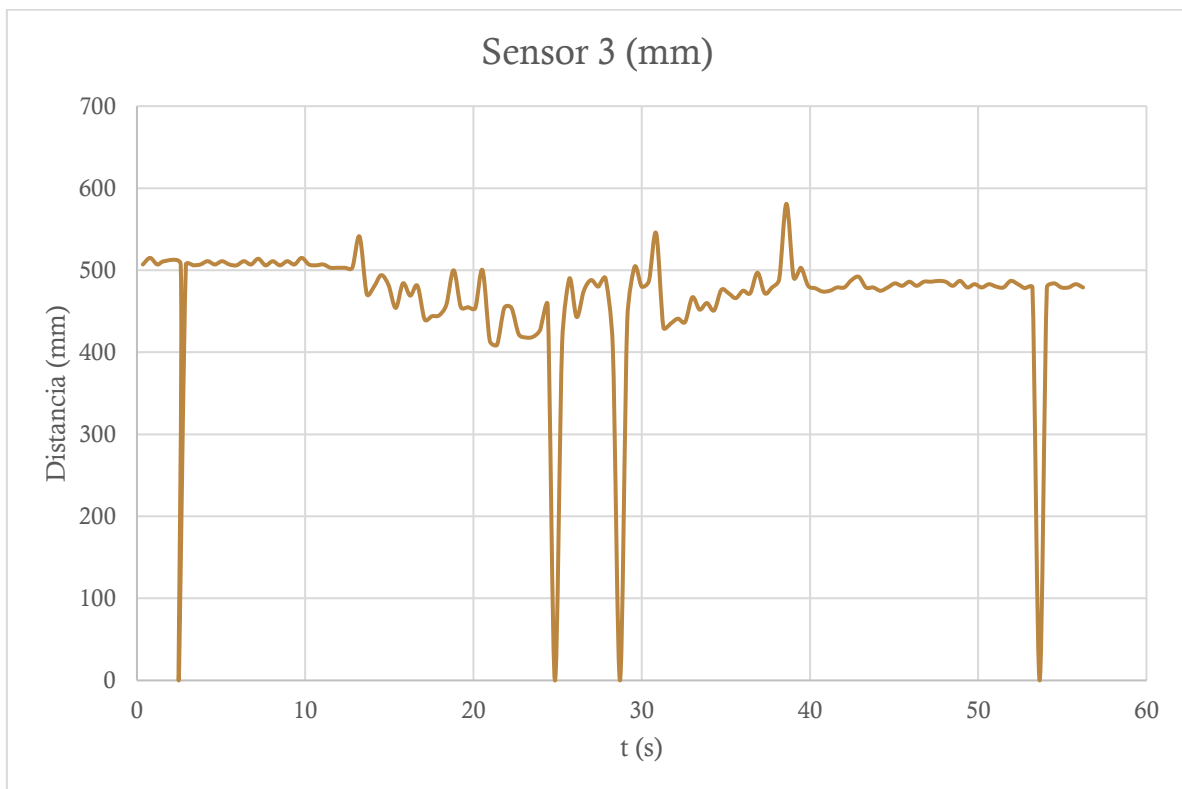


Figura 105. Alturas registradas por el sensor 3 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla

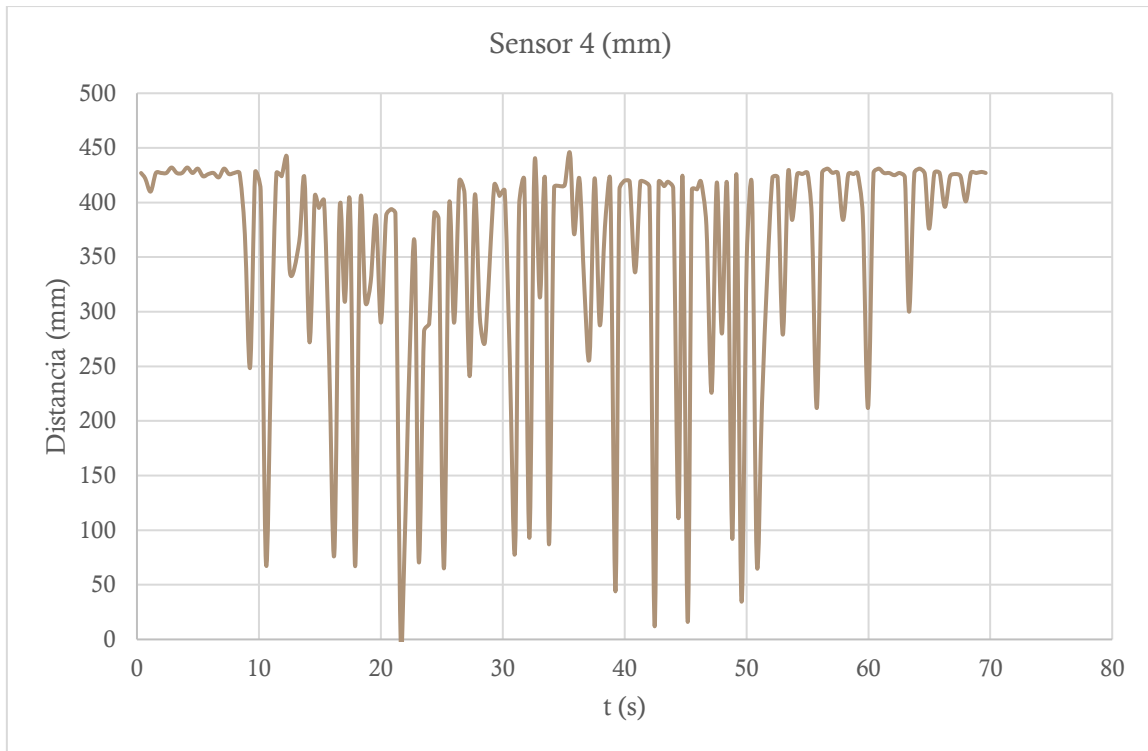


Figura 106. Alturas registradas por el sensor 4 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla

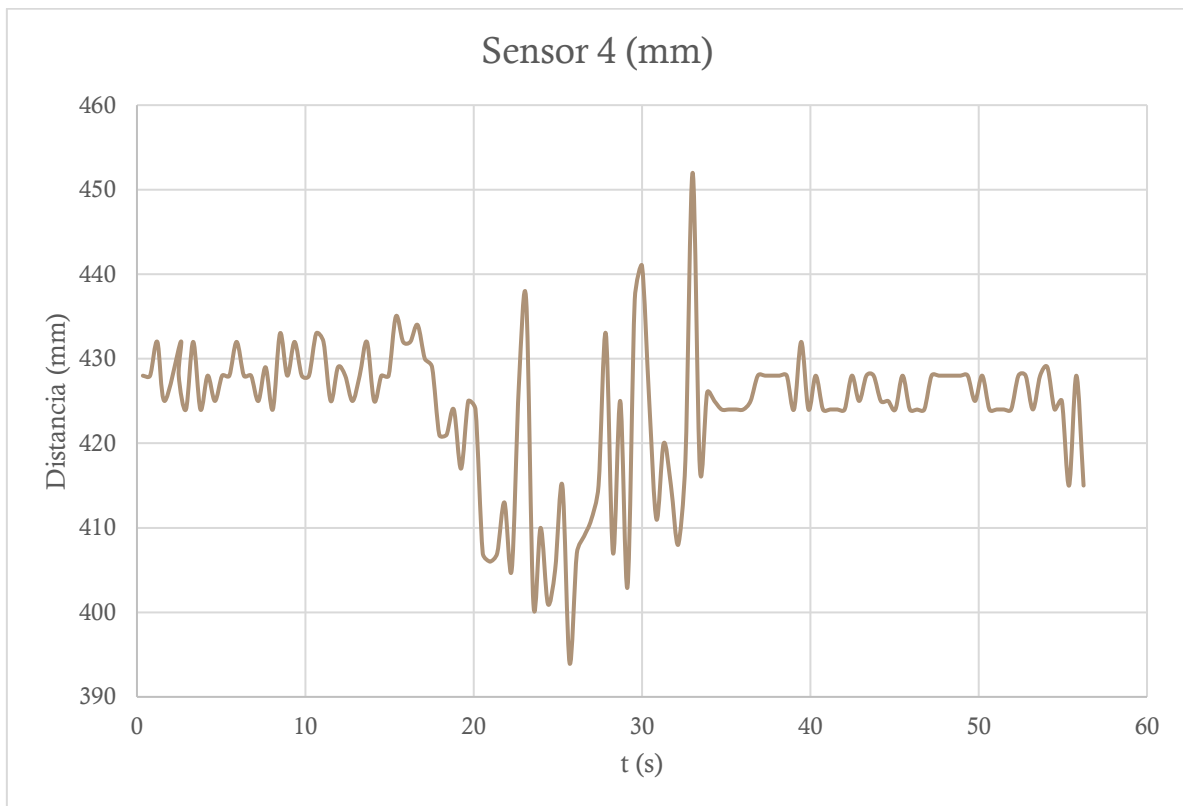


Figura 107. Alturas registradas por el sensor 4 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla.

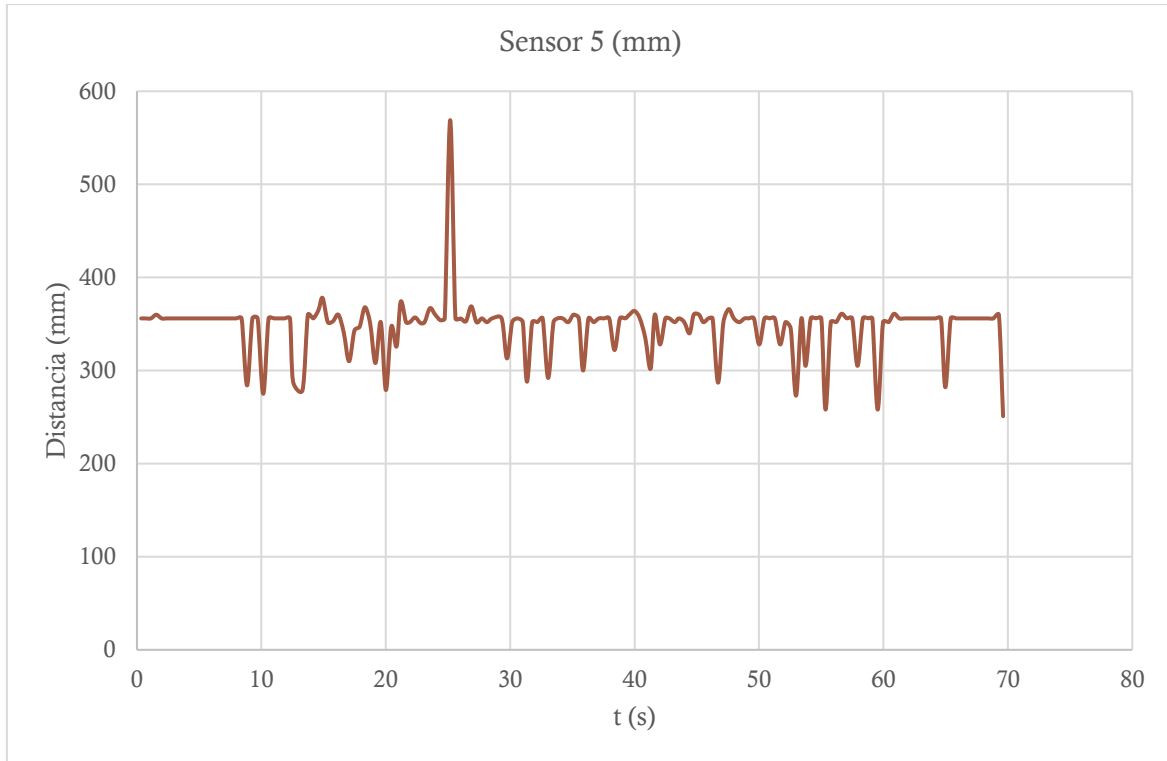


Figura 108. Alturas registradas por el sensor 5 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla.

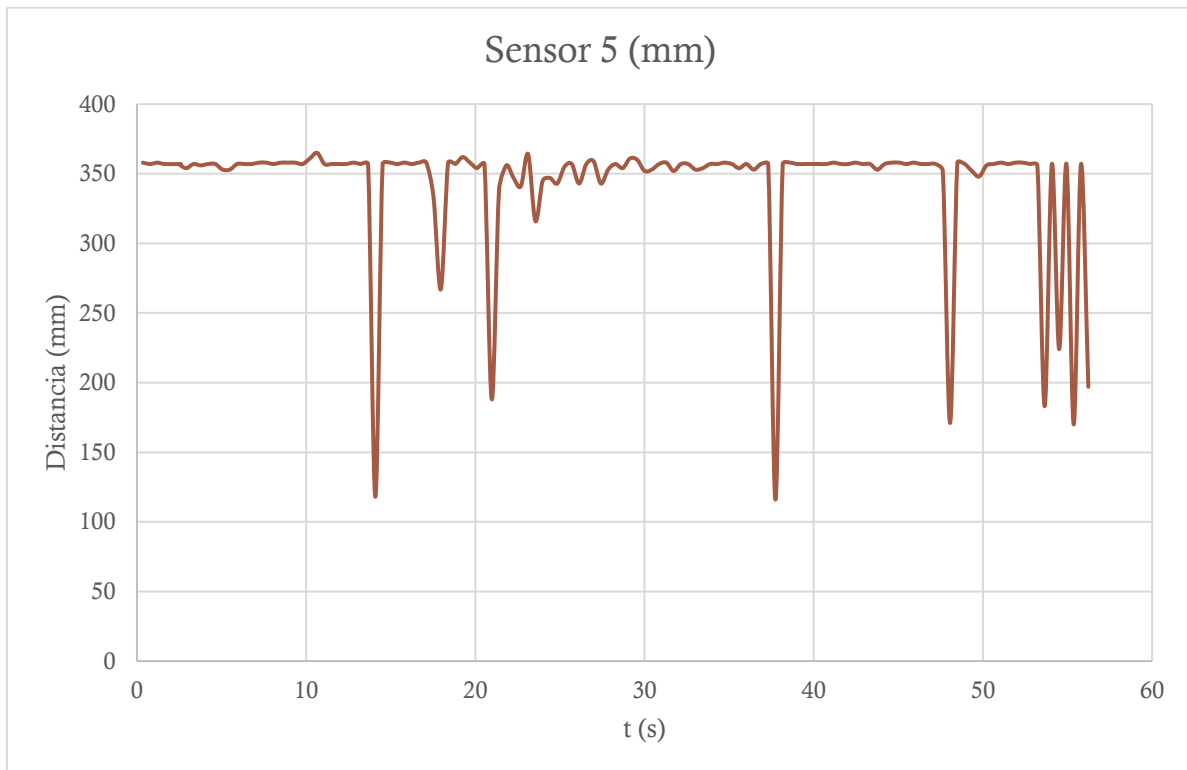


Figura 109. Alturas registradas por el sensor 5 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla.

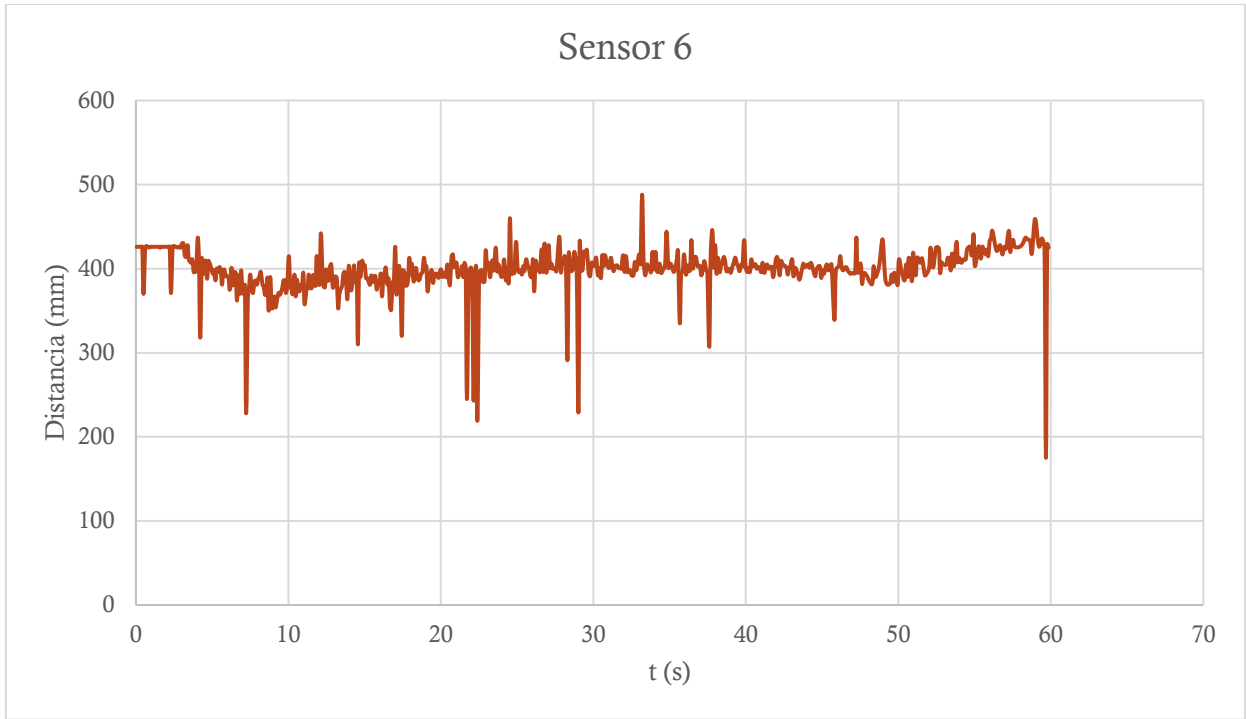


Figura 110. Alturas registradas por el sensor 6 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla

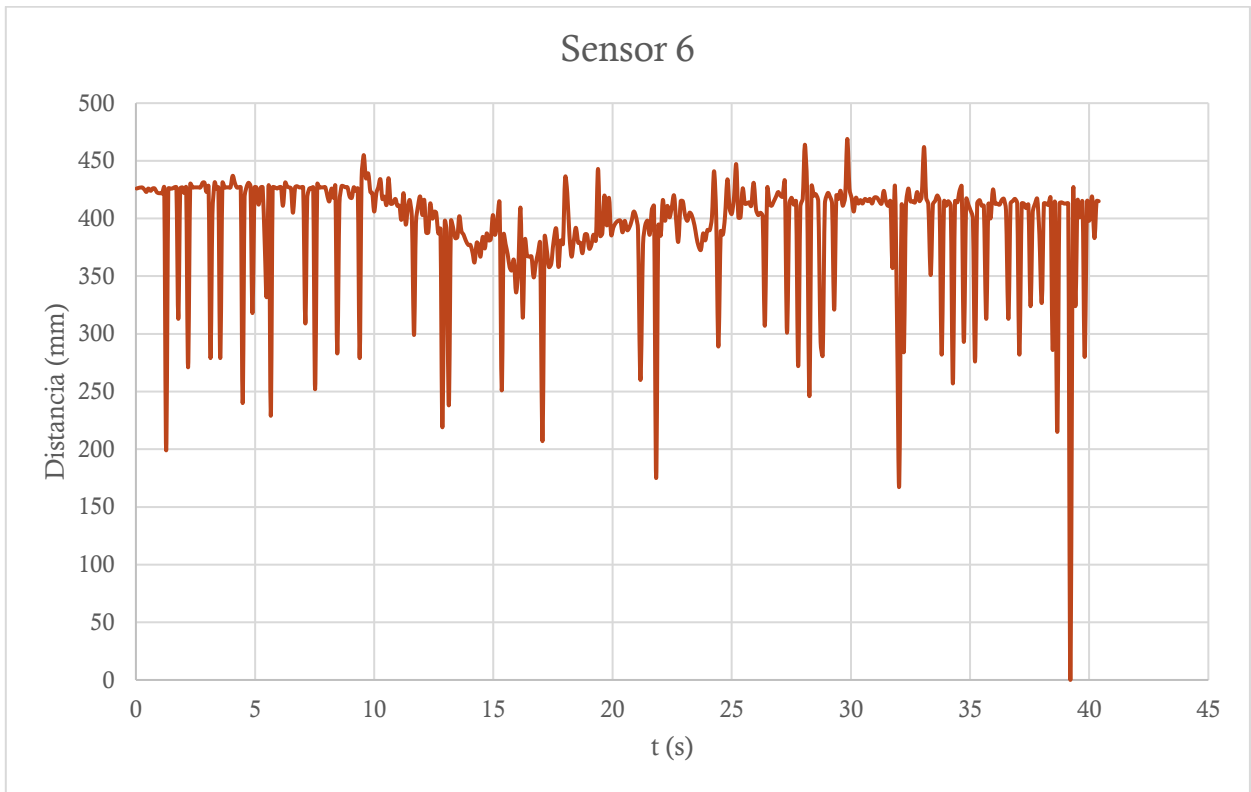


Figura 111. Alturas registradas por el sensor 6 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla

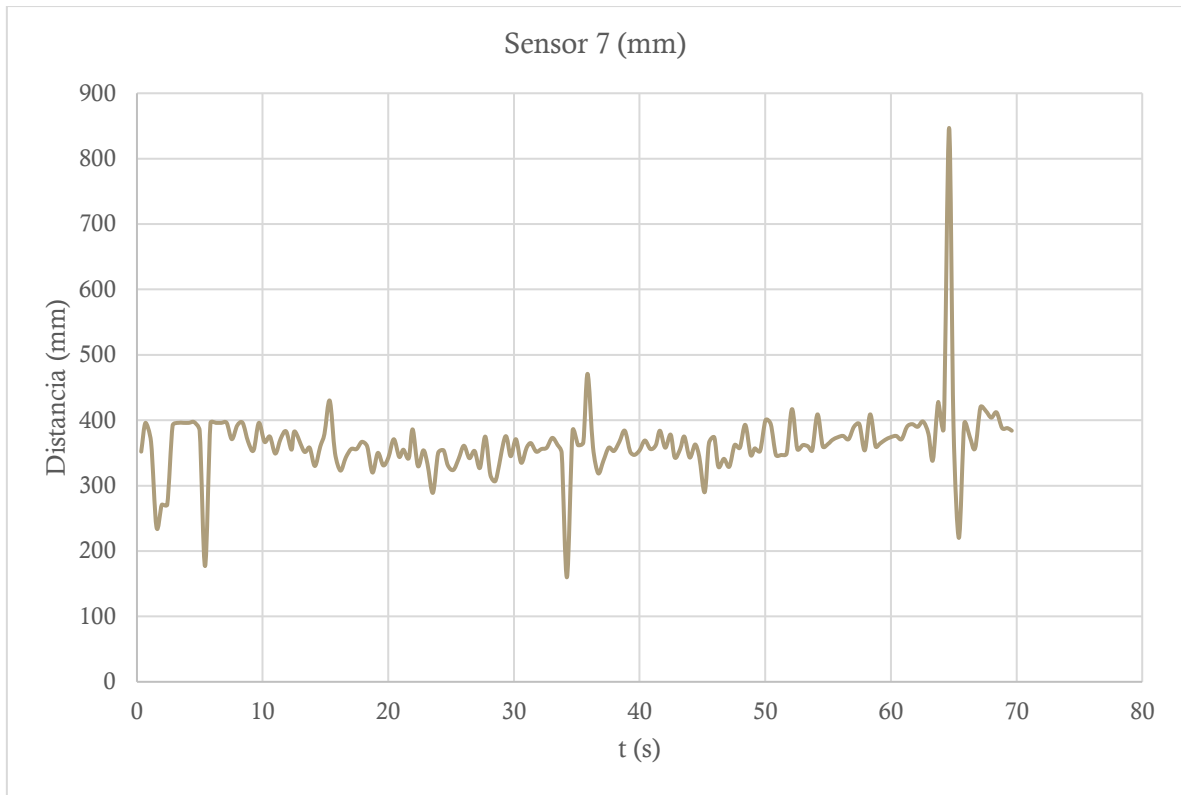


Figura 112. Alturas registradas por el sensor 7 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla.

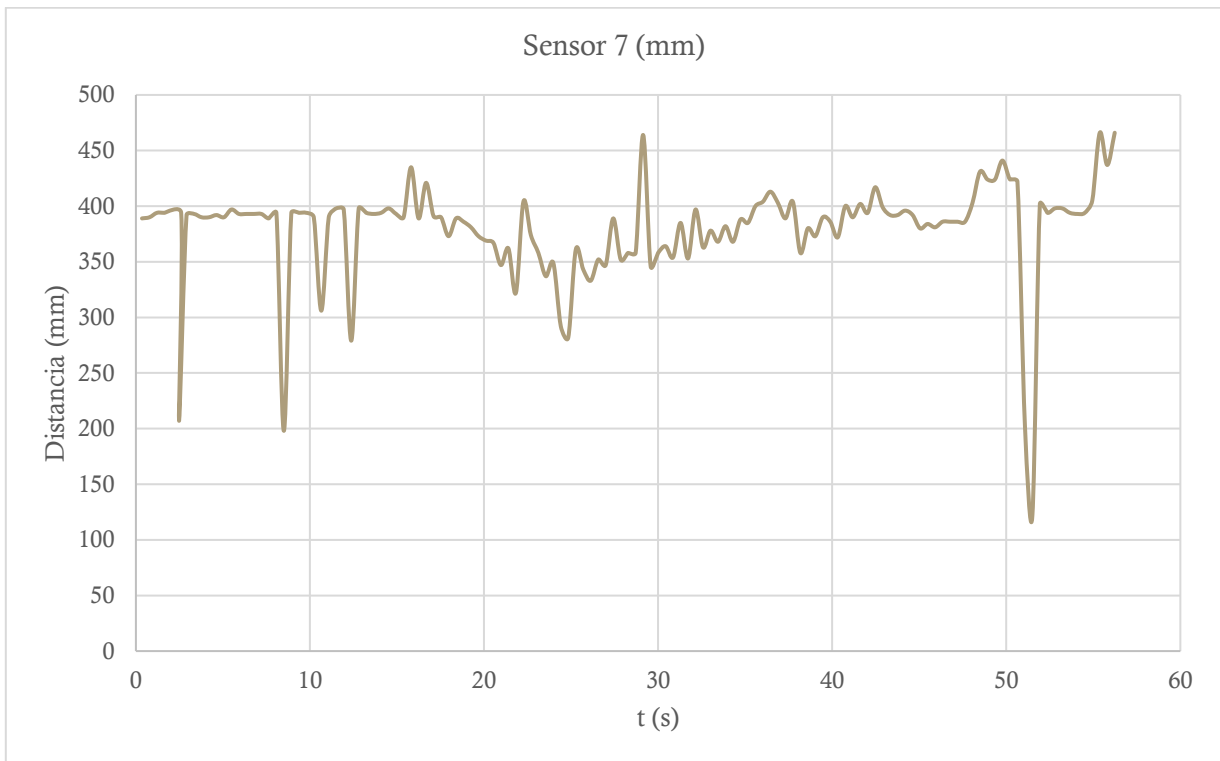


Figura 113. Alturas registradas por el sensor 7 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla.

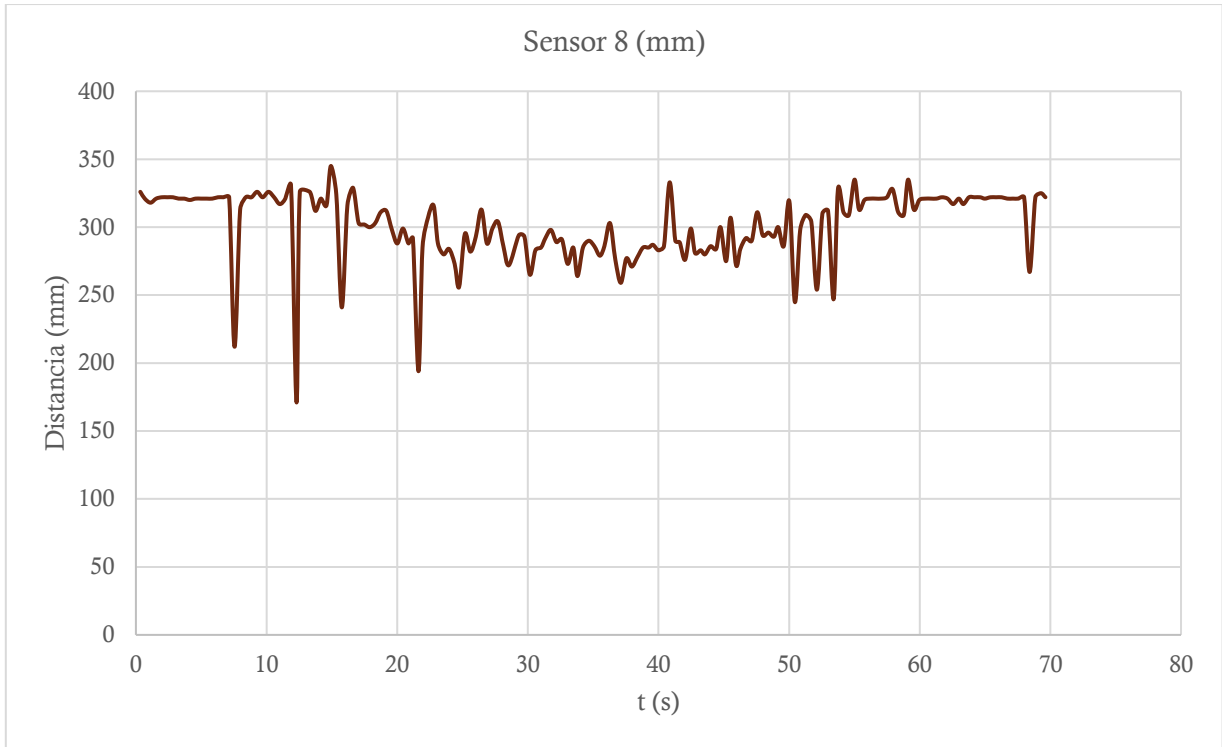


Figura 114. Alturas registradas por el sensor 8 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla.

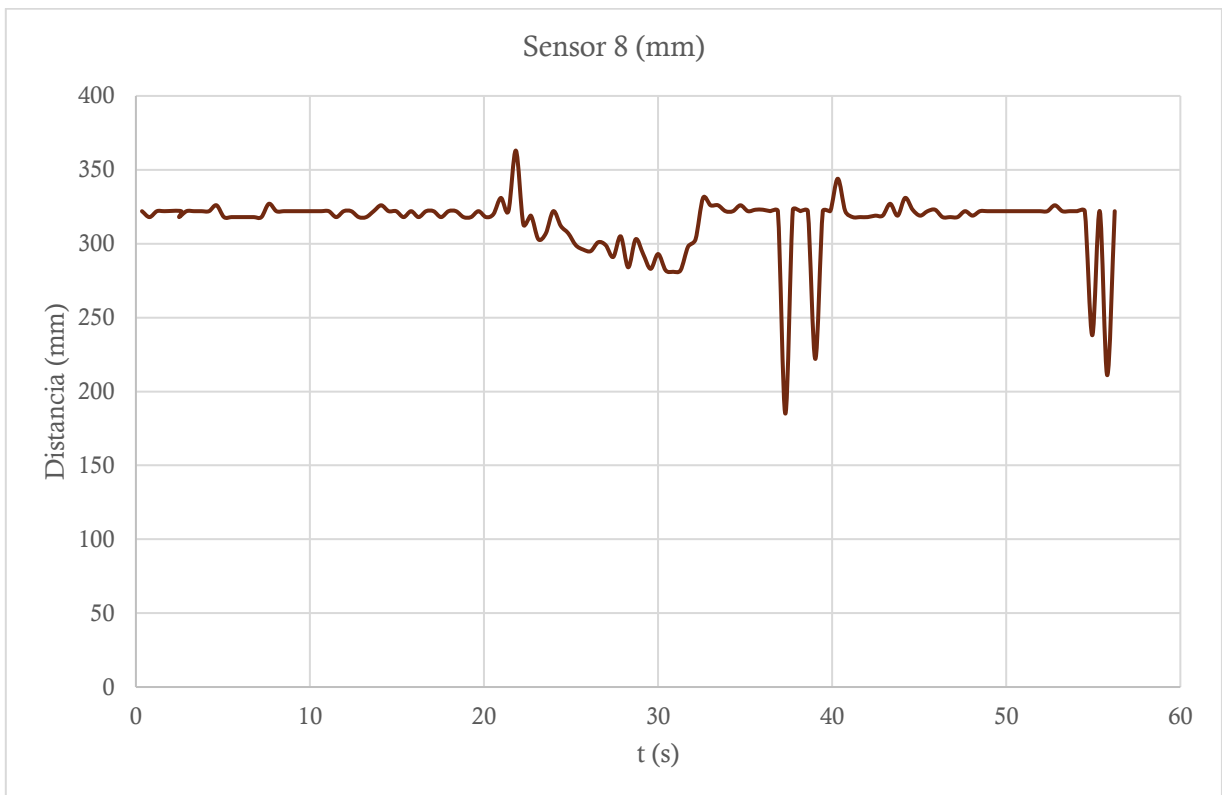


Figura 115. Alturas registradas por el sensor 8 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla.

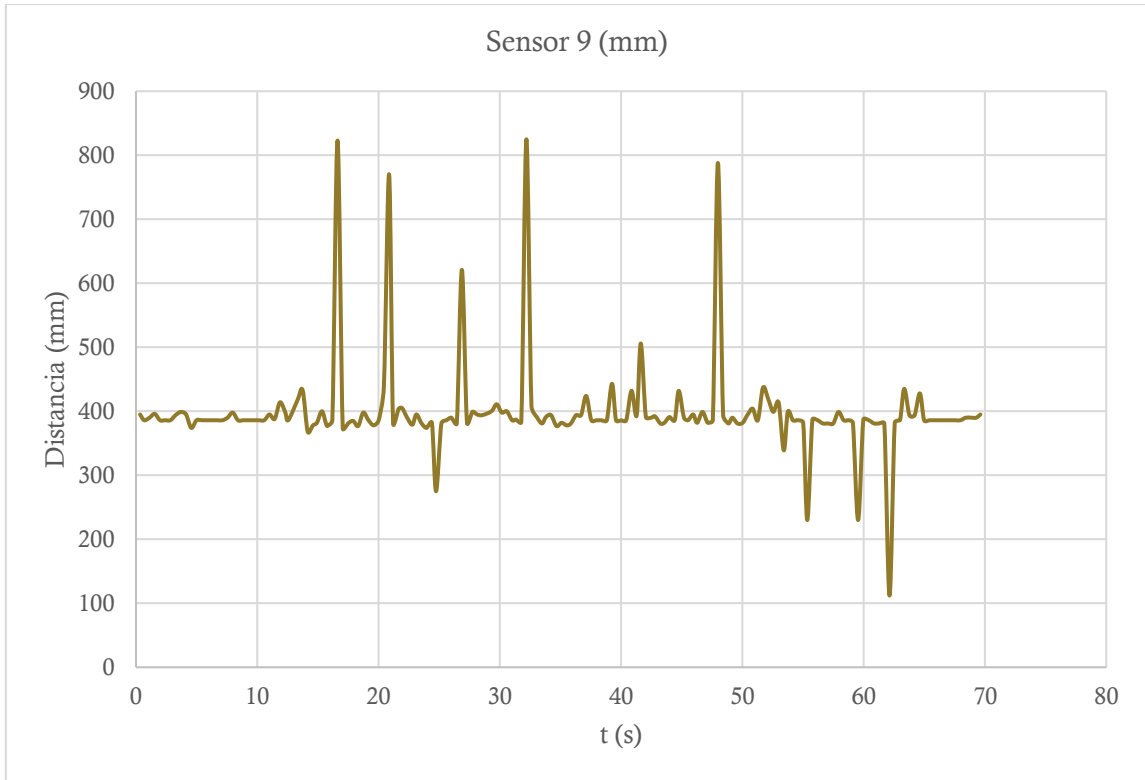


Figura 116. Alturas registradas por el sensor 9 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla.

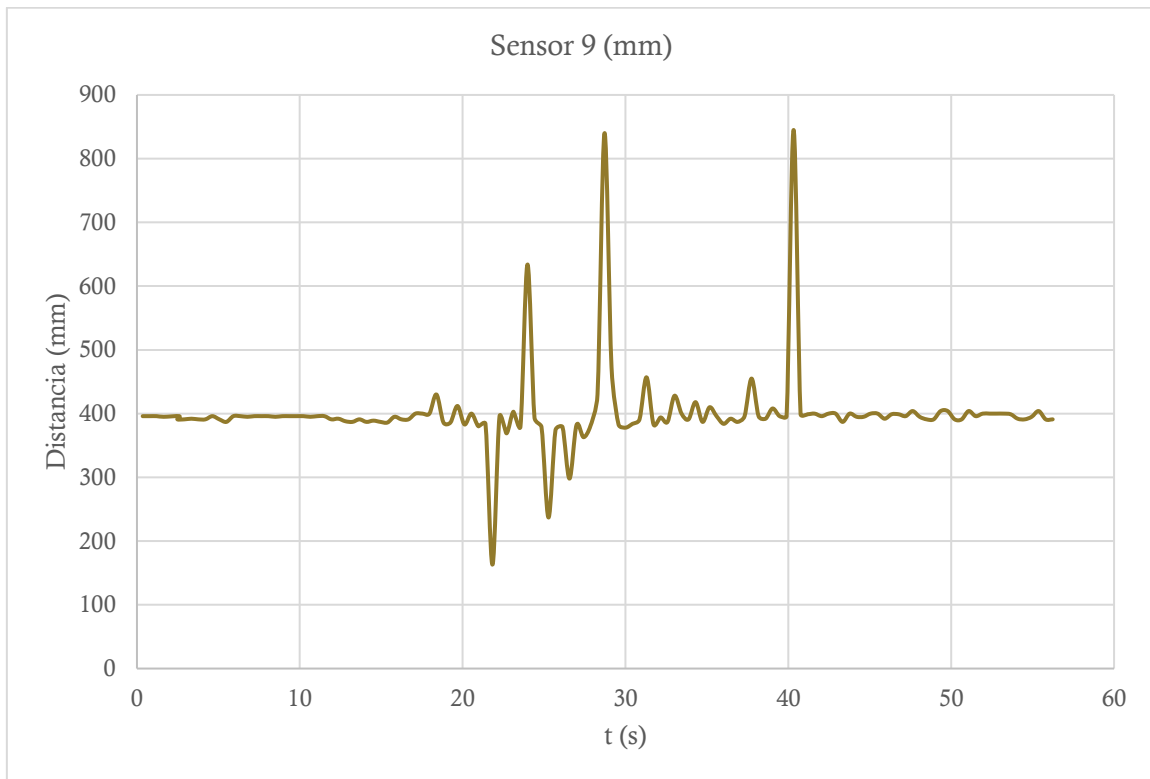


Figura 117. Alturas registradas por el sensor 9 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla.

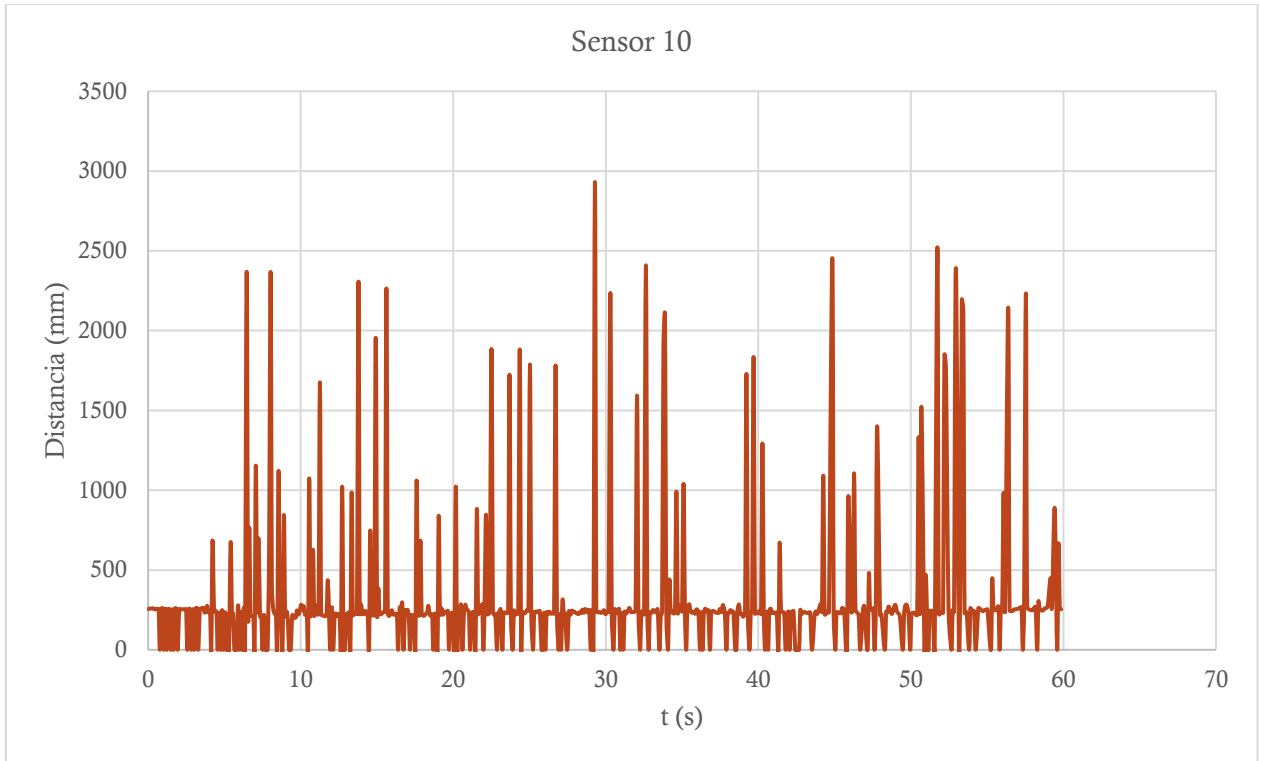


Figura 118. Alturas registradas por el sensor 10 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla

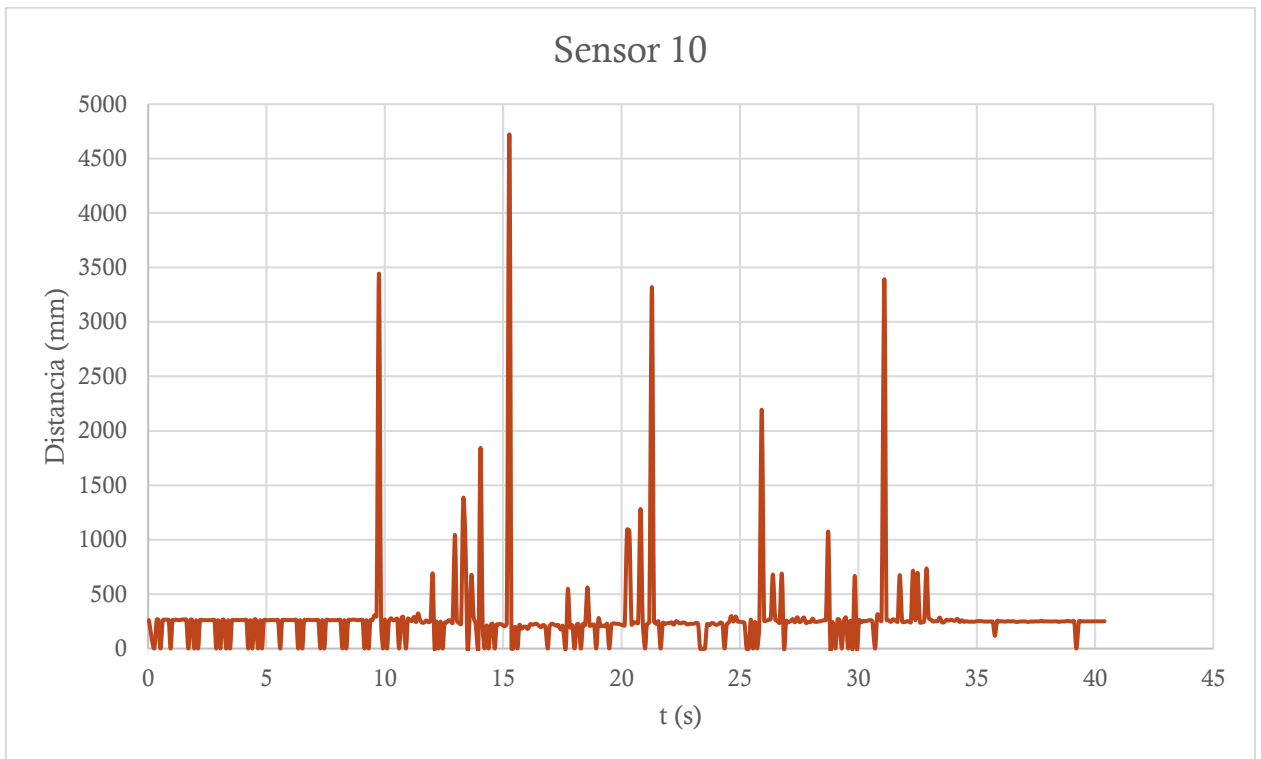


Figura 119. Alturas registradas por el sensor 10 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla

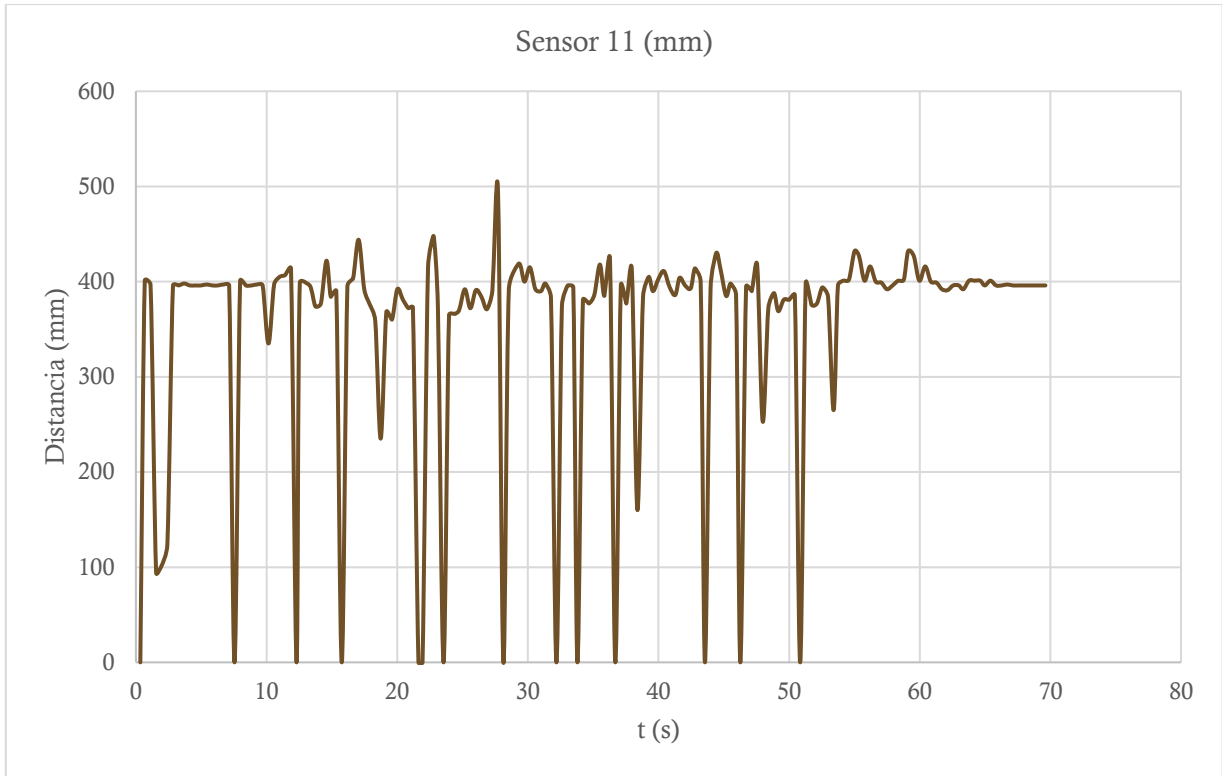


Figura 120. Alturas registradas por el sensor 11 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla.

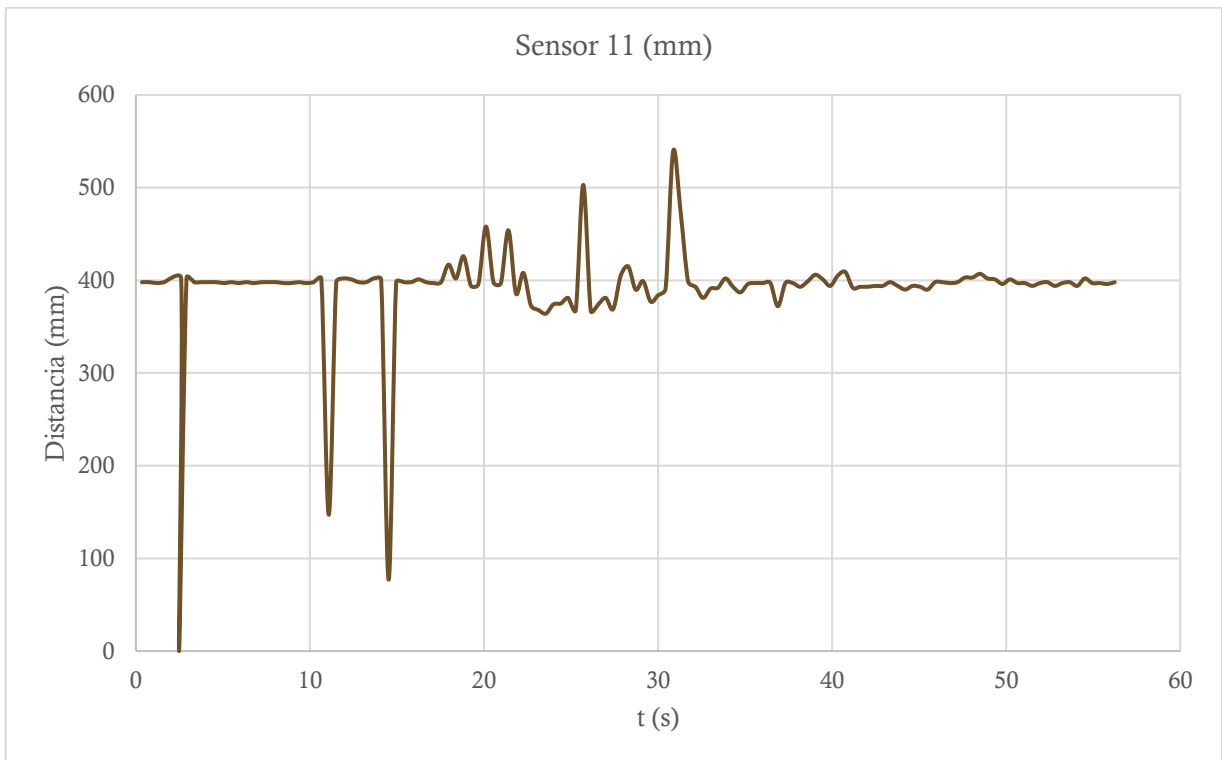


Figura 121. Alturas registradas por el sensor 11 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla.

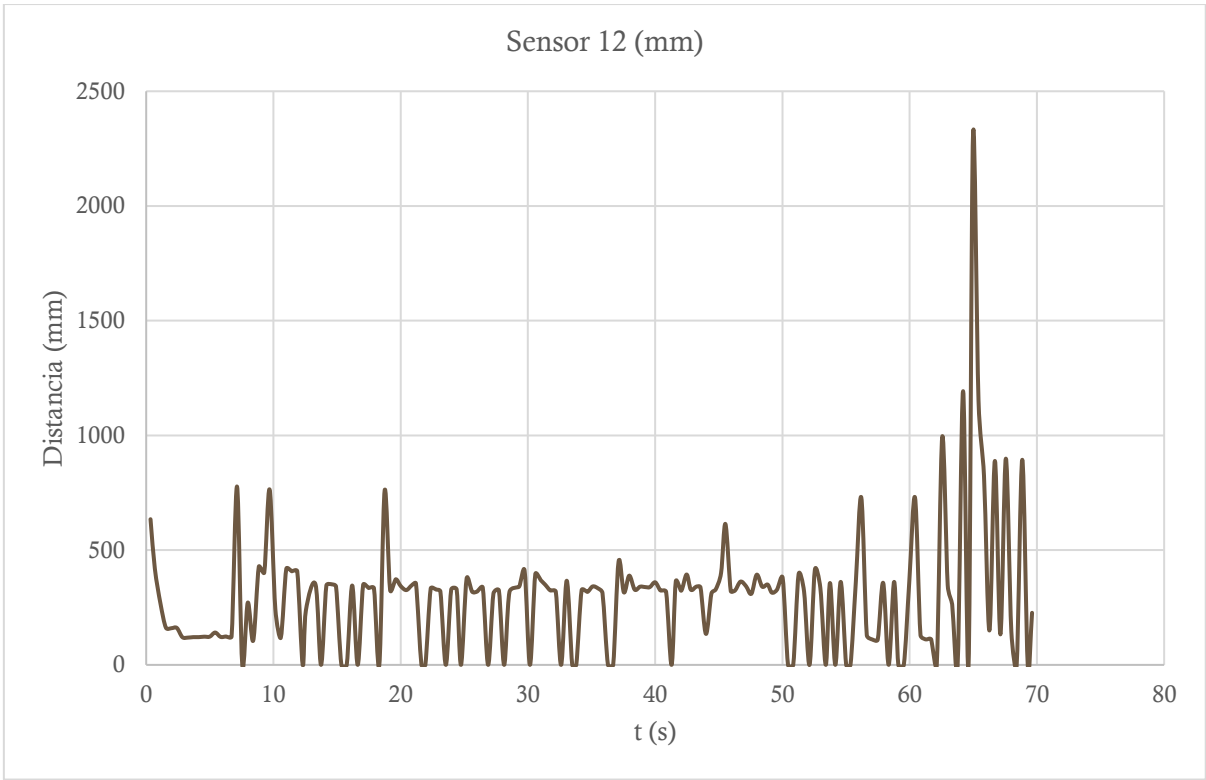


Figura 122. Alturas registradas por el sensor 12 durante la simulación de flujo de detritos a 12 cm de apertura de la escotilla.

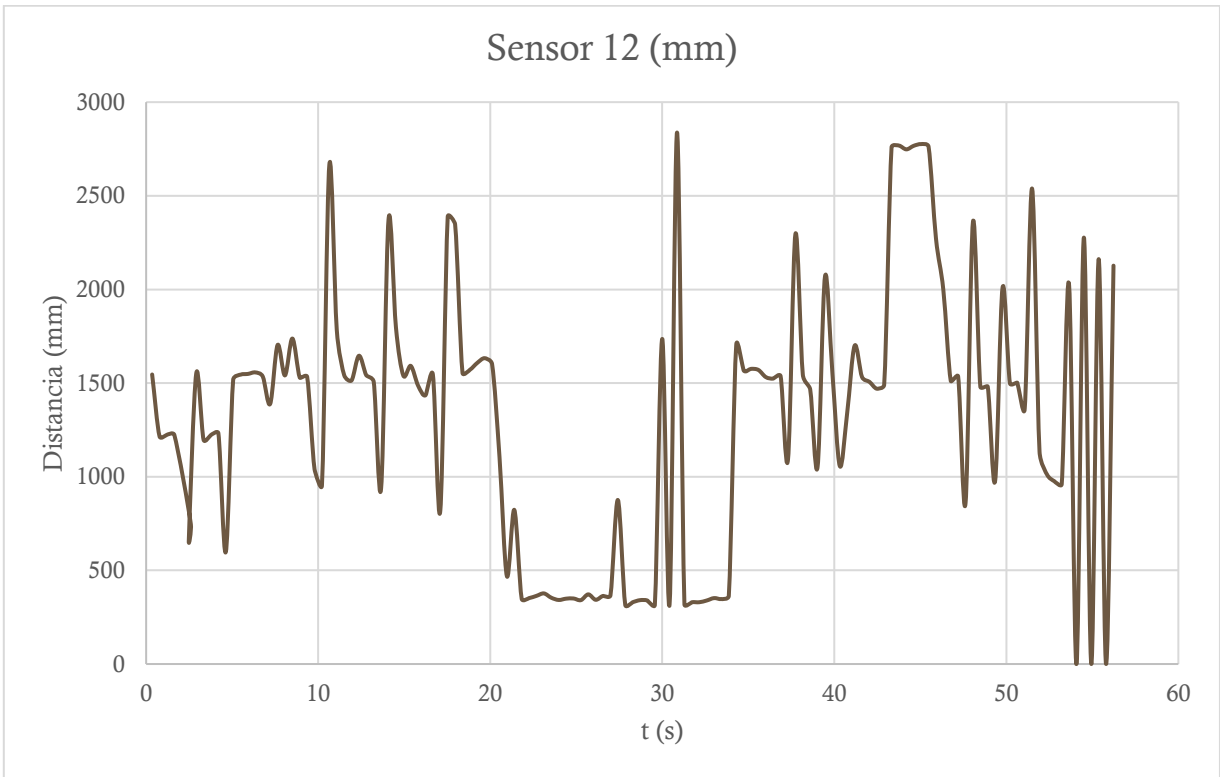


Figura 123. Alturas registradas por el sensor 12 durante la simulación de flujo de detritos a 15 cm de apertura de la escotilla.

En la tabla siguiente se resume la velocidad de la onda de flujo registrada para los diferentes escenarios planteados:

Tabla 15. Resumen de la velocidad de onda del flujo para diferentes escenarios

Condición de Flujo	Velocidad (mm/s)	Velocidad (m/s)	Observación
Agua clara	111	0.111	-
Detritos C ₁₂	-	-	No se presentó registro de velocidad
Detritos C ₁₅	55	0.055	-
Detritos C ₂₁	-	-	Falla el tanque de agua

Nota: le denotación C₁₂, C₁₅, C₂₁, representa la condición de concentración de detritos a las aperturas de 12, 15 y 21 cm de la escotilla, respectivamente.

XII. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos, permiten observar que existe una reducción en la velocidad del flujo cuando incrementa la concentración de los detritos; sin embargo, es necesaria su validación y verificación. En este sentido, es relevante mencionar que los resultados arrojan un registro de datos con incertidumbre, lo cual es generado una posible inestabilidad e interferencia de registro del sensor utilizado; ya que como se observa en las simulaciones, captadas en diferentes ángulos por cámaras de teléfono celular, el tiempo en el que comienza la lectura de datos y en el que se debió registrar la información de las características hidráulicas del flujo (tirantes y velocidad de la onda) no son similares. Es decir, durante la simulación, el tiempo transcurrido para que el flujo pase por las estaciones de monitoreo es mucho más corto en relación con lo que se registra por los sensores. Ver tablas de datos que se presentan en los anexos 1 y 2.

A pesar de las perturbaciones de los datos, en algunos gráficos de registro de alturas por los sensores se puede apreciar un comportamiento congruente a lo sucedido durante las simulaciones; es decir, se mantiene un valor con tendencia constante, y posteriormente disminuye (que es cuando se presenta el flujo) alcanzando y manteniendo un valor, y finalmente aumenta nuevamente (deja de circular el flujo sobre el modelo). Por ejemplo, lo anterior lo podemos observar claramente en la información registrada por el sensor 6.

Debido a la condición del sistema de monitoreo, el cual es una propuesta nueva para tal fin, se han colocado una cantidad suficiente, de tal forma que no provoque situaciones adversas a la tarjeta de Arduino; y con ello tener la posibilidad de registrar la mayor cantidad de información, y a su vez, tener un criterio más amplio para descartar o aceptar información registrada. Desafortunadamente, por cuestiones económicas no se pudo utilizar equipos de monitoreo validados para el registro de velocidad y caudal para flujo continuo a superficie libre, lo cual ayudaría a definir la causa de las perturbaciones de datos; si esto implica la de interferencia entre sensores; o simplemente es parte de las limitaciones de los mismos.

Cualitativamente se aprecia que el flujo de detritos, tiende a generar “oleadas” previo a la llegada de la sección de monitoreo 0+040, lo cual es congruente ya que de esta forma es que se movilizan los flujos de detritos.

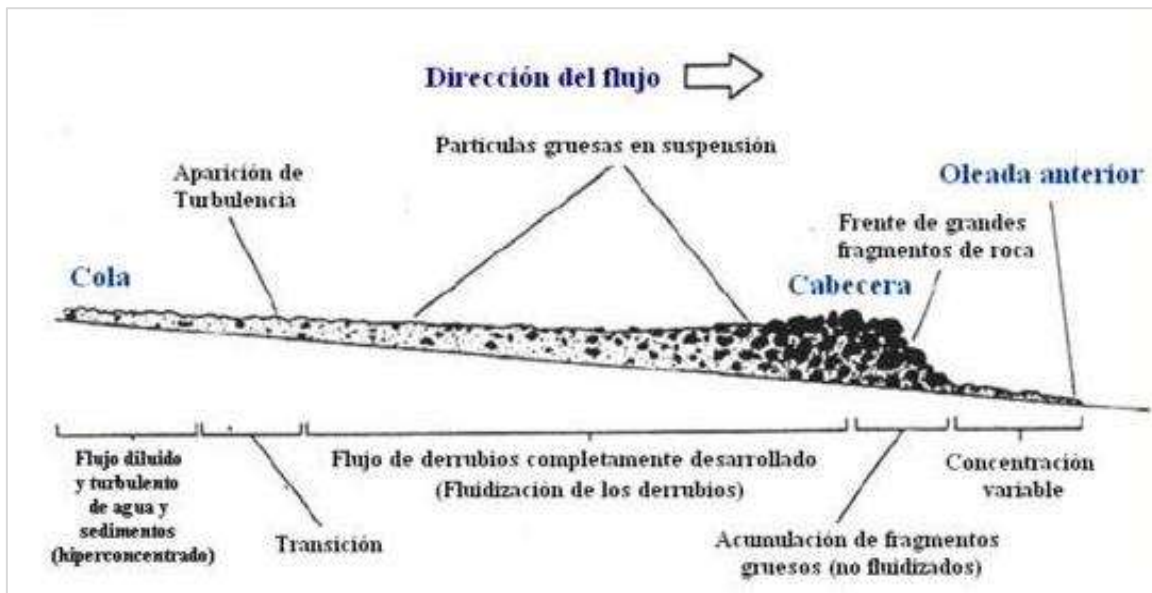


Figura 124. Perfil característico de una oleada de flujo de detritos

Recuperado de: Sánchez, M. M. (2009).



Figura 125. Ejemplo de un flujo de detritos que fluye por hacia aguas abajo. (Recuperado de: Takahashi, T., & Das, D. K., 2014).



Figura 126. Presencia de pequeñas oleadas durante la simulación de flujo de detritos con una concentración en términos de caudales de 0.15

En esta singularidad de los flujos de detritos se observa que los bloques grandes de detritos se

mantienen al frente, y conforme van disminuyendo el tamaño de los agregados estos se distribuyen hacia la cola de la oleada. Lo cual demuestra la razón de su capacidad destructiva, al ser estos bloques grandes los que golpean obstáculos a su paso.

Posterior al paso del flujo, se depositó material en las márgenes del cauce, debido a la disminución de la capacidad erosiva y morfología del cauce, lo cual también es característico de este tipo de flujo.



Figura 127. Depósito de agregados pétreos, debido a la disminución de capacidad erosiva en esa margen.

En la Figura 127, se observa la deposición de agregados que, por los indicadores de colores, corresponde a tamaños $3/8$, $1/2$ y $3/4$ de pulgada (en la realidad corresponderían a 10 cm, 13 cm y 20 cm, respectivamente) y superiores.

Por otra parte, se aprecia en las que durante las pruebas predomina una alteración de la velocidad de flujo por efecto de la descarga del tanque de agua, alterando las condiciones de semejanza. El fallo de éste, corresponde en gran medida a la presión y turbulencia generada en el interior de éste.

XIII. CONCLUSIONES

Dado que el proyecto de investigación está asociado a un programa de posgrado, por cuestiones de tiempo, nos vemos limitados para realizar más escenarios, ya que éstos implican la construcción de un nuevo tanque que permita el manejo de caudales mayores a los utilizados, integrar el material pétreo para usar en flujo de detritos. Sin embargo, se proponen trabajos a futuro en los que se pueden considerar elaborar mayor número de pruebas con gastos que involucren diferentes periodos de retorno y concentraciones de sedimentos mayores y menores.

Respecto al modelo hidráulico, mencionar que se puede mejorar. Por ejemplo, y con base en las simulaciones realizadas y pruebas preliminares en condiciones de agua clara, se observa que existe una influencia directa en el fenómeno la descarga del agua hacia el tanque de regulación, por lo que se deberá realizar las modificaciones que mitiguen perturbaciones, principalmente en la velocidad del flujo. Otro aspecto relevante, es la necesidad de construir un tanque con canales que permitan retener y sedimentar el material pétreo en un proceso de disgregación del flujo de detritos.

El sistema de monitoreo en este tipo de fenómenos es de suma importancia, porque nos permite generar información, que puede ser utilizada para caracterizar futuros flujos, definir parámetros sobre la magnitud de eventos, o bien, validar modelos numéricos, y eventualmente, permite establecer sistemas de alerta temprana; y por lo experimentado en el presente trabajo, particularmente se puede expresar que es desgastante implementarlos, ya que requiere tiempo de análisis específico y experimentación.

La modelación física es una alternativa para crear artificialmente flujos de detritos con condiciones geotécnicas e hidrológicas controladas para analizar las características dinámicas del fenómeno ante un determinado escenario o diferentes condiciones. Sin embargo, la ubicación del modelo e infraestructura existente para la experimentación de este tipo de flujos, provoca limitaciones y dificultades para el presente trabajo, dado que implica un aumento relevante en el presupuesto.

La velocidad de flujo de derrubios disminuye respecto al incremento en la concentración de detritos. Además, el flujo muestra el potencial para afectar vidas humanas y ocasionar daños económicos.

Con base a lo observado en las simulaciones realizadas, el caudal, la pendiente y morfología del cauce son factores importantes en el desarrollo y movilización de flujo de detritos, ya que se observó que en algunos tramos del modelo el material pétreo se iba depositando con facilidad en las márgenes del cauce, lo cual se asocia a la reducción de la pendiente y a la “obstaculización” del flujo por su morfología. Sin embargo, en pruebas preliminares se observaba que, debido al incremento de caudal líquido, la capacidad de arrastre incrementaba y en algunas ocasiones permitía sobrepasar algunos de esos obstáculos morfológicos.



Figura 128. Depósito de material a la margen en el cauce del modelo

Adicionalmente, mencionar que los flujos de detritos son fenómenos de transporte transitorios; es decir son cambiantes, en un mismo evento de flujo de detritos, éste puede ser más erosivo o menos erosivo o puede cambiar su carga de sedimentos. En este sentido, y con base a lo experimentado en el presente trabajo, se afirma que la manera más conveniente de estudiar los flujos de detritos es en una escala natural, en zonas altamente susceptibles al desarrollo de este tipo de flujos.

Considerando que la carga de material fino en la matriz, sus propiedades físicas y químicas permiten modificar las características del agua al mezclarse con ésta, y con ello la capacidad de

arrastré y transporte en suspensión de material grueso, desde gravas hasta bloques grandes; se recomienda realizar pruebas en trabajos futuros, por medio de las cuales se pueda caracterizar claramente los depósitos de material, ya que por las características de las simulaciones realizadas solo se aprecia que comienzan a formarse pequeñas oleadas con frentes compuestos por algunas partículas grandes de 3", aproximadamente. Además, en suspensión se observan los agregados que fueron colocados con fin de ser indicadores del d50 de la distribución; es decir, los agregados de colores, blanco, naranja y verde, con tamaños de 3/8", 1/2" y 3/4", respectivamente.

XIV. TRABAJO FUTURO

En este capítulo se exponen algunas ideas y se proponen posibles proyectos que den continuidad o se relacionen con el presente proyecto. Dichas ideas se proponen con base a lo investigado y desarrollado durante la elaboración de esta tesis, y se desea que se puedan desarrollar ampliamente; y así, dar continuidad y aprovechar el modelo hidráulico construido.

VALIDACIÓN DE MODELOS

Una etapa importante en la modelación para definir la bondad y capacidad predictiva, es la validación o verificación del modelo. En este sentido se puede proceder de forma experimental, otorgando datos que permitan establecer o definir parámetros de ajuste en modelos numéricos. El presente modelo físico contiene una ventaja al mantener una geometría de un cauce natural sobre algunos equipos académicos que se encuentran en el laboratorio; por ello, uno de los campos por trabajar en un futuro es en la validación de modelos numéricos.

ANÁLISIS Y FUNCIONAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS PARA LA PREVENCIÓN DE RIESGO POR FLUJO DE DETRITOS

Ante la generación de flujos de detritos, surge la necesidad de contar con alternativas y tecnología cuya efectividad haya sido demostrada en la solución o mitigación de este tipo de problemas. En este sentido una manera de demostrar la efectividad de las alternativas es a través de la modelación física, como se mencionó en líneas anteriores.

Para el caso de los detritos existe tecnología y obras específicas que se han utilizado de forma satisfactoria en otros países; por ejemplo, la tecnología SABO desarrollada en 1860 con apoyo de expertos suizos y alemanes, y aplicada con gran éxito en Japón (Shima, J., Moriyama, H., Kokuryo, H., Ishikawa, N., & Mizuyama, T., 2016 & Ikeda, A., 2015). Esta tecnología ha sido ampliamente recomendada para pendientes fuertes y cortos recorridos (Villacorta, S.; Huarez, C. & Colina, C., 2016), zonas similares a las que se tienen en el país.

La tecnología SABO incluye todos los trabajos relacionados con la prevención y mitigación de movimientos en masa, considerando la influencia futura de las medidas de control adoptadas con énfasis en su calidad.

Para el caso que nos atiende, el trabajo futuro consiste en la revisión del funcionamiento hidráulico de presas SABO o de control de sedimentos como alternativa para mitigar el riesgo por flujo de detritos, ya que estas estructuras permiten estabilizar márgenes de cauces de fuerte pendiente en las cuencas altas y medias, deteniendo grandes bloques movilizados.



Figura 129. Ejemplo de represa SABO para el control de flujos de detritos en Minami-Aso Village (Kumamoto). Recuperada de: Villacorta, S.; Huaréz, C. & Colina, C., 2016.



Figura 130. Presa SABO abierta (tomado de: Ikeda, 2015).

Es necesario comentar que para desarrollar este trabajo se requiere realizar diferentes escenarios, asociados principalmente a diferentes periodos de recurrencia o retorno, de acuerdo con (Ikeda, 2015), para el diseño de este tipo de infraestructuras el período de retorno recomendado es de 100 años; lo cual implica complementar la estructura actual del modelo físico para hacer circulares adecuadamente caudales asociados a estos periodos de retorno.

ESTUDIO DE PARÁMETROS REOLÓGICOS ASOCIADOS A DIFERENTES CONDICIONES DE CONCENTRACIÓN Y TAMAÑOS DE PARTÍCULAS

Los datos experimentales sobre los parámetros reológicos de los flujos de detritos permiten plantear ecuaciones constitutivas en modelos numéricos.

Por otra parte, existe una gran variedad de materiales que pueden mezclarse con el agua y alterar de manera radical sus propiedades, en este sentido la mayoría de los modelos numéricos suponen el material detrítico, desagregado de los flujos de detritos, como un medio continuo; sin embargo, esto realmente se trata de un medio discreto.

Por medio de la modelación física se puede analizar cualitativamente la interacción de los detritos en un medio semejante a donde movilizan naturalmente; y a raíz de un análisis granulométrico y reológico, tener elementos cuantitativos de diferentes mezclas de materiales, lo que permitirá caracterizar el flujo y asociarlo a un modelo reológico.

ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPO DE MONITOREO EN TIEMPO REAL DE BAJO COSTO Y ALERTA TEMPRANA PARA FLUJO DE DETRITOS

El monitoreo en tiempo real y las alertas tempranas son elementos importantes en las estrategias integrales de mitigación y control de inundaciones y flujo de detritos; lo cual se observa en casos históricos, por ejemplo, en Vargas, Venezuela en 1999, en el que por falta de medidas de mitigación y prevención no se pudieron salvar más vidas humanas.

Durante la instrumentación del presente trabajo, se utilizaron sensores ultrasónicos HC-SR04, para determinar tirantes y definir la velocidad de la onda del flujo; sin embargo, existen más opciones de sensores y de equipos que permiten complementar el monitoreo en tiempo real y establecer alertas tempranas en zonas susceptibles. El enfoque principal es establecer sistemas que impliquen un costo económico bajo en relación a los actuales equipos de monitoreo utilizados en algunas zonas.

En este sentido, la modelación física permite analizar las alternativas de instrumentación para sistemas de monitoreo de variables hidrometeorológicas que sean económicas y permitan la obtención de variables específicas, las cuales faciliten la tarea de establecer estrategias de prevención no estructurales e integrarlas a medidas de mitigación de tipo estructurales.

XV. REFERENCIAS CONSULTADAS

- Alcántara, A. I., Echavarría L. A., Gutiérrez M. C., Domínguez M. L. & Noriega R. I.** (2001). Inestabilidad de laderas. Serie Fascículos. SEGOB, CENAPRED.
- Arévalo Mendoza, B. G.** (2015). Análisis numérico de la influencia de la granulometría en flujo de detritos por DEM. Bogotá, Colombia.
- Bagnold, R. A.** (1954). “Experiments on a gravity-free dispersion of large slid spheres in a Newtonian fluid under shear”, Proc. Royal Soc. Of London, Series A, (225) 49-63.
- Bartali, Roberto, Sarocchi, Damiano, Nahmad-Molinari, Yuri, & Rodríguez-Sedano, Luis Angel.** (2012). Estudio de flujos granulares de tipo geológico por medio del simulador multisensor GRANFLOW-SIM. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 64(3), 265-275. Recuperado en 03 de agosto de 2018, de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140533222012000300001&ln=es&tlng=pt.
- Caballero, G.A., Macías, J.L., García-Palomo, A., Saucedo, R., Borselli, L., Sarochi, D., Sánchez-Núñez, J.M.** (2006). The September 8-9 rain-triggered flows at Motozintla, Chiapas. Mexico: Natural Hazards, 39, 103–126.
- Copons, L. R. & Tallada, M. A.** (2009). Movimiento de ladera (Landslides). Enseñanza de las Ciencia de la Tierra. (173) 284-294 ISSN: 1132-9157.
- Crozier, M.J.,** (1986), Landslides; Cause, Consequences and Environment: Londres, Croom Helm, 252 p.
- Díaz, J. S.** (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos.
- Dikau, R., Brunsten, D., Schrot, L., Ibsen, M.L. (eds),** (1996), Landslide recognition: Chichester, John Wiley and Sons, 251 p.
- Domínguez, S. C.** (1997). Estudio de los Procesos de Erosión Dependientes de Causas Hidrológico-Hidráulicas, en Márgenes de Materiales Cohesivos de Cauces Naturales

Aluviales con Meandros. Modelación Híbrida Físico-Matemática del Proceso Evolutivo Global de la Geometría Fluvial. (Tesis de Doctorado). Universidad Politécnica de Valencia, E. T. S. de ingenieros de caminos, canales y puertos. Valencia, España

Echávez, A. G. (1996). Introducción a los modelos hidráulicos de fondo fijo y a la ingeniería experimental. UNAM-CONACYT-AMH, México.

García F. M., & Maza A. J. A. (1998). Origen y propiedades de los sedimentos. Manual de ingeniería de ríos.

Goilav, N., & Geoffrey, L. O. I. (2016). Arduino: Aprender a desarrollar para crear objetos inteligentes. Ediciones ENI.

Gómez Cortés, D. A. (2012). Medición de los esfuerzos generados por un flujo de detritos sobre una superficie plana (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2002). Ingeniería geológica. Prentice Hall. Madrid, España.

Ikeda, A. (2015). Design of SABO Dam. Presentación de PowerPoint del curso: "Disaster Management for Landslide and Sediment-Related Disasters (triggered by heavy rainfall, earthquake and volcanic activity), Tokyo: Sabo and Landslide Technical Center. Agencia de Cooperación internacional del Japón – JICA.

Jan, C. D. & Shen, H. W. (1997). Review Dynamic Modeling of Debris Flows. Recent Developments on Debris Flows, (93-116). Springer-Verlag, Berlin, Alemania

Johnson, K.A. and Sitar, N. (1990). "Hydrologic conditions leading to debris flow initiation." Can. Geotech. J., 27(6), 789-801.

Julien, P. Y., & Leon, C. (2000). Mud floods, mudflows and debris flows. Classification, rheology and structural design. Jornadas de Investigación JIFI.

Kalman, H., Goder, D., Rivkin, M., & Ben-Dor, G. (1993). The effect of the particle-surface friction coefficient on the angle of repose. Bulk Solids Handling, 13, 123-123.

Li Lue, X. (2002). Deslizamientos de tierras y flujos de escombros en lluvias intensas. TLÁLOC. AMH 25, 32-37.

- Lugo-Hubp, J., Zamorano-Orozco, J. J., Capra, L., Inbar, M., & Alcántara-Ayala, I.** (2005). Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: causa y efectos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2), 212-228.
- Montgomery, D., Dietrich, W.E., Torres, R., Anderson, S.P., Heffner, J.T., Sullivan, K.O., Loague, K.** (1990). "Hydrologic experiments in a steep unchanneled valley: (I) experimental design and piezometric response." *Transactions, Am. Geophys. Union*, 71(43), 1342.
- Montoya Z., J. E.** (2018). Sistema de monitoreo y alerta temprana ante aluviones (Doctoral dissertation, Universidad Andrés Bello (Chile)).
- Murcia, H., Macías, J.L.,** (2009), Registro geológico de inundaciones recurrentes e inundación del 4 de octubre de 2005 en la ciudad de Tapachula, Chiapas, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26, 1–17.
- Novillo-Vicuña, J., Rojas, D. H., Olivo, B. M., Ríos, J. M., & Villavicencio, O. C.** (2018). Arduino y el internet de las cosas (Vol. 45). 3Ciencias.
- O'Brien, J. S.** (2006). *FLO-2D User's manual, version 2006.01*. Flo-2D Software. Inc., Nutrioso.
- O'Brien, J. S., P.Y Julien and W.T. Fullerton** (1993): "Two-dimensional water flood and mudflow simulation". *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE 119 (2), 244-261.
- O'Brien, J. Julien, P.** (1988): "Laboratory Analysis of Mudflow properties". *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE 114, 8, 877-887.
- Ojeda, T. F.** (1987). Introducción a los modelos hidráulicos. Series del Departamento de Hidráulica No.1: Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.
- Reid, M. E., LaHusen, R. G., & Iverson, R. M.** (1997). Debris-flow initiation experiments using diverse hydrologic triggers. *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, 1-11.

- Rodríguez, V. M. A.** (2017). Modelación numérica de flujo hiperconcentrado en cauces torrenciales. (Tesis de licenciatura). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.
- Sánchez, M. M.** (2009). Modelación de flujos de derrubios empleando el método SPH. Aplicación a casos reales. (Tesis de Doctorado). Universidad Politécnica de Madrid, E. T. S. de ingenieros de caminos, canales y puertos. Madrid, España.
- Sánchez-Núñez, J. M., Macías, J. L., Saucedo, R., Novelo, D. A., Zamorano, J. J., & Mendiola, F.** (2017). Caracterización granulométrica de los depósitos de abanicos aluviales en la Cuenca de Motozintla, Chiapas, México: un peligro geológico latente por eventos de inundación. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(3), 529-554.
- Sánchez-Núñez, J.M., Macías, J.L., Saucedo, R., Zamorano, J.J., Novelo, D., Mendoza, M.E., Torres-Hernández, J.R.,** (2015), Geomorphology, internal structure and evolution of alluvial fans at Motozintla, Chiapas, México: *Geomorphology*, 230, 1–12.
- Sharpe, C.F.S.,** (1938), *Landslides and Related Phenomena*: New York, Columbia University Press, 137 p.
- Shima, J., Moriyama, H., Kokuryo, H., Ishikawa, N., & Mizuyama, T.** (2016). Prevention and mitigation of debris flow hazards by using steel open-type sabo dams. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 9(3), 135-144.
- Takahashi T.** (1991). *Debris Flow*. International Association for Hydraulic Research (IAHR). A. A. Balkema. Rotterdam
- Takahashi T.** (1978). “Mechanical characteristics of debris flow” *J. Hydr. Div., ASCE*, 104, 1153-1169.
- Takahashi, T., & Das, D. K.** (2014). *Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures*. CRC press.
- Varnes, D.J.,** (1958), Landslide types and processes, en Eckel, E.B. (ed.), *Landslides and Engineering Practice*: Washington D.C., National Research Council, Highway Research Board, Special Report, 29, 20-47.

Varnes, D.J., (1978), Slope movement and processes, en Schuster, R.L., Krizek, R.J. (eds.), Landslides Anlysis and Control: Washington D.C., National Academy of Sciences, Transportation Research Board, Special Report 176, 11 13.

Vergara, S. M. A., (1995). Técnicas de modelación en hidráulica. In Técnicas de modelación en hidráulica. Alfaomega.

Villacorta, S.; Huarez, C. & Colina, C. (2016). Obras hidráulicas japonesas en la prevención de riesgos por flujos de detritos en Chosica (Perú). Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, 111: 78-84.

Záruba, Q., Mencl, V. (1969), Landslides and their Control: Nueva York, Elsevier y Academia de Ciencia de Checoslovaquia, 205p.

ANEXO 1: TABLAS DE REGISTRO DE DATOS DE LA VELOCIDAD DE ONDA DEL FLUJO

Tabla 16. Datos de registro de velocidad y alturas para condiciones de agua clara.

Tiempo (s)	Altura0 (mm)	Altura1 (mm)	Velocidad (mm/s)	AlturaInicial0 (mm)	AlturaFinal0 (mm)
0.03	179	263	0	179	0
0.15	430	263	0	179	0
0.24	426	265	0	179	0
0.32	430	0	0	179	0
0.4	264	263	0	179	0
0.49	422	263	0	179	0
0.57	335	0	0	179	0
0.65	430	262	0	179	0
0.74	430	0	0	179	0
0.82	299	262	0	179	0
0.9	435	262	0	179	0
0.99	430	0	0	179	0
1.07	426	263	0	179	0
1.15	430	0	0	179	0
1.23	430	263	0	179	0
1.32	430	262	0	179	0
1.4	347	263	0	179	0
1.49	435	263	0	179	0
1.58	431	268	0	179	0
1.66	430	263	0	179	0
1.75	367	262	0	179	0
1.84	422	264	0	179	0
1.92	432	0	0	179	0
2	425	268	0	179	0
2.09	430	0	0	179	0
2.17	427	262	0	179	0
2.25	431	262	0	179	0

2.34	421	263	0	179	0
2.42	426	263	0	179	0
2.51	430	263	0	179	0
2.6	430	263	0	179	0
2.68	311	263	0	179	0
2.77	417	262	0	179	0
2.85	430	0	0	179	
2.93	425	263	0	179	0
3.02	430	0	0	179	
3.1	430	263	0	179	0
3.19	430	264	0	179	0
3.27	322	259	0	179	0
3.36	426	264	0	179	0
3.44	430	260	0	179	0
3.53	431	260	0	179	0
3.61	382	263	0	179	0
3.7	426	264	0	179	0
3.78	431	0	0	179	
3.87	430	262	0	179	0
3.95	431	0	0	179	
4.03	426	262	0	179	0
4.12	430	263	0	179	0
4.2	329	250	0	179	0
4.29	431	262	0	179	0
4.37	430	263	0	179	0
4.46	430	262	0	179	0
4.55	383	262	0	179	0
4.63	426	261	0	179	0
4.72	430	0	0	179	
4.8	431	264	0	179	0
4.88	431	0	0	179	
4.96	431	263	0	179	0
5.05	430	263	0	179	0
5.14	413	267	0	179	0
5.22	435	263	0	179	0
5.31	431	262	0	179	0
5.39	431	264	0	179	0

5.48	301	265	0	179	0
5.57	418	302	0	179	0
5.65	416	0	0	179	
5.73	425	279	0	179	0
5.81	414	0	0	179	
5.9	204	686	0	179	0
5.98	421	0	0	179	
6.06	393	270	0	179	0
6.15	400	0	0	179	
6.23	315	262	0	179	0
6.31	407	236	0	179	0
6.4	413	0	0	179	0
6.48	390	228	0	179	0
6.56	387	255	0	179	0
6.65	415	0	0	179	0
6.73	422	255	0	179	0
6.81	373	0	0	179	0
6.9	411	260	0	179	0
6.99	405	1361	0	179	0
7.07	395	240	0	179	0
7.16	269	199	111	179	199
7.25	396	0	111	179	199
7.34	392	253	111	179	199
7.43	413	0	111	179	199
7.53	407	2196	111	179	199
7.64	362	876	111	179	199
7.73	388	0	111	179	199
7.82	396	275	111	179	199
7.91	399	222	111	179	199
8.01	402	239	111	179	199
8.1	398	235	111	179	199
8.19	390	278	111	179	199
8.29	397	321	111	179	199
8.38	393	0	111	179	199
8.47	426	263	111	179	199
8.57	410	237	111	179	199
8.66	391	233	111	179	199

8.76	403	256	111	179	199
8.85	398	243	111	179	199
8.94	396	264	111	179	199
9.05	397	2383	111	179	199
9.15	392	0	111	179	199
9.25	383	2876	111	179	199
9.35	375	0	111	179	199
9.44	403	248	111	179	199
9.53	423	0	111	179	199
9.62	403	222	111	179	199
9.71	403	0	111	179	199
9.8	397	252	111	179	199
9.89	403	251	111	179	199
9.99	385	231	111	179	199
10.08	396	224	111	179	199
10.18	424	0	111	179	199
10.26	402	0	111	179	199
10.35	394	235	111	179	199
10.45	398	244	111	179	199
10.55	367	709	111	179	199
10.64	394	0	111	179	199
10.73	405	223	111	179	199
10.83	344	241	111	179	199
10.92	167	235	111	179	199
11.02	410	227	111	179	199
11.11	277	289	111	179	199
11.21	396	303	111	179	199
11.3	390	226	111	179	199
11.4	407	0	111	179	199
11.49	403	247	111	179	199
11.58	396	239	111	179	199
11.68	226	0	111	179	199
11.77	399	970	111	179	199
11.87	394	223	111	179	199
11.96	343	238	111	179	199
12.06	395	238	111	179	199
12.15	396	231	111	179	199

12.24	411	0	111	179	199
12.35	391	2043	111	179	199
12.44	375	222	111	179	199
12.55	391	1489	111	179	199
12.64	384	228	111	179	199
12.75	419	1447	111	179	199
12.84	326	282	111	179	199
12.94	394	251	111	179	199
13.03	417	239	111	179	199
13.13	394	222	111	179	199
13.22	284	0	111	179	199
13.31	390	267	111	179	199
13.42	392	1608	111	179	199
13.51	398	255	111	179	199
13.64	393	0	111	179	199
13.73	399	277	111	179	199
13.82	409	248	111	179	199
13.92	403	250	111	179	199
14.01	415	240	111	179	199
14.11	396	227	111	179	199
14.2	402	231	111	179	199
14.3	394	238	111	179	199
14.42	387	0	111	179	199
14.51	399	227	111	179	199
14.61	248	231	111	179	199
14.7	402	235	111	179	199
14.8	400	279	111	179	199
14.89	441	241	111	179	199
14.99	403	233	111	179	199
15.08	234	230	111	179	199
15.18	392	235	111	179	199
15.27	313	242	111	179	199
15.37	409	281	111	179	199
15.48	398	2158	111	179	199
15.57	349	0	111	179	199
15.66	405	238	111	179	199
15.76	399	222	111	179	199

15.85	388	231	111	179	199
15.96	387	1804	111	179	199
16.05	394	234	111	179	199
16.15	221	222	111	179	199
16.24	396	234	111	179	199
16.34	391	0	111	179	199
16.43	401	232	111	179	199
16.52	398	242	111	179	199
16.62	396	0	111	179	199
16.71	415	233	111	179	199
16.8	404	0	111	179	199
16.89	403	228	111	179	199
16.99	378	837	111	179	199
17.09	388	237	111	179	199
17.18	394	232	111	179	199
17.28	407	226	111	179	199
17.37	388	543	111	179	199
17.47	413	820	111	179	199
17.56	401	0	111	179	199
17.66	407	269	111	179	199
17.75	403	260	111	179	199
17.85	387	220	111	179	199
17.94	412	247	111	179	199
18.04	386	368	111	179	199
18.13	385	0	111	179	199
18.24	403	2675	111	179	199
18.33	390	0	111	179	199
18.43	397	645	111	179	199
18.52	410	224	111	179	199
18.62	405	246	111	179	199
18.71	454	236	111	179	199
18.81	392	229	111	179	199
18.9	396	225	111	179	199
19	396	269	111	179	199
19.09	390	232	111	179	199
19.19	392	231	111	179	199
19.28	394	260	111	179	199

19.38	412	234	111	179	199
19.47	405	235	111	179	199
19.57	391	256	111	179	199
19.67	401	273	111	179	199
19.76	394	228	111	179	199
19.88	405	0	111	179	199
19.97	413	227	111	179	199
20.08	395	2481	111	179	199
20.18	402	231	111	179	199
20.28	388	229	111	179	199
20.37	405	229	111	179	199
20.47	400	233	111	179	199
20.56	401	241	111	179	199
20.66	409	231	111	179	199
20.75	397	238	111	179	199
20.85	399	232	111	179	199
20.97	388	0	111	179	199
21.06	392	220	111	179	199
21.16	388	232	111	179	199
21.28	405	0	111	179	199
21.37	410	237	111	179	199
21.49	396	0	111	179	199
21.58	407	225	111	179	199

Tabla 17. Datos de registro de velocidad y alturas para flujo de detritos con concentración en términos de caudal de 0.12

Tiempo (s)	Altura0 (mm)	Altura1 (mm)	Velocidad (mm/s)	AlturaInicial0 (mm)	AlturaFinal0 (mm)
0.03	426	256	0	0	0
0.17	426	259	0	0	0
0.25	426	259	0	0	0
0.34	426	260	0	0	0
0.42	426	254	0	0	0
0.5	370	254	0	0	0
0.61	425	258	0	0	0
0.69	427	254	0	0	0
0.77	426	0	0	0	0
0.87	425	258	0	0	0
0.95	426	260	0	0	0
1.03	426	0	0	0	0
1.14	426	258	0	0	0
1.22	426	0	0	0	0
1.32	426	254	0	0	0
1.4	426	254	0	0	0
1.48	426	0	0	0	0
1.59	425	254	0	0	0
1.67	426	0	0	0	0
1.77	426	259	0	0	0
1.85	426	258	0	0	0
1.93	426	0	0	0	0
2.04	426	254	0	0	0
2.14	426	254	0	0	0
2.22	426	254	0	0	0
2.3	371	254	0	0	0
2.41	426	254	0	0	0
2.49	427	254	0	0	0
2.57	426	0	0	0	0
2.67	426	256	0	0	0
2.75	425	254	0	0	0
2.83	426	0	0	0	0
2.94	425	255	0	0	0
3.02	430	0	0	0	0

3.12	430	259	0	0	0
3.2	416	262	0	0	0
3.28	414	0	0	0	0
3.39	428	254	0	0	0
3.47	411	259	0	0	0
3.62	407	262	0	0	0
3.7	411	234	0	0	0
3.79	396	239	0	0	0
3.87	396	276	0	0	0
3.95	397	235	0	0	0
4.06	437	246	0	0	0
4.14	408	0	0	0	0
4.22	318	685	0	0	0
4.32	411	241	0	0	0
4.4	394	247	0	0	0
4.49	403	230	0	0	0
4.56	409	0	0	0	0
4.67	388	235	0	0	0
4.75	409	0	0	0	0
4.85	406	249	0	0	0
4.93	401	0	0	0	0
5.04	394	236	0	0	0
5.11	398	0	0	0	0
5.22	386	223	0	0	0
5.3	400	0	0	0	0
5.41	396	674	0	0	0
5.49	402	244	0	0	0
5.57	396	226	0	0	0
5.65	381	0	0	0	0
5.72	398	0	0	0	0
5.8	399	0	0	0	0
5.9	391	279	0	0	0
5.98	391	0	0	0	0
6.08	390	238	0	0	0
6.16	375	0	0	0	0
6.27	401	264	0	0	0
6.35	380	0	0	0	0

6.46	396	2369	0	0	0
6.55	395	228	0	0	0
6.63	362	766	0	0	0
6.71	392	226	0	0	0
6.82	370	210	0	0	0
6.9	398	211	0	0	0
6.98	375	0	0	0	0
7.06	370	1154	0	0	0
7.15	380	233	0	0	0
7.23	228	699	0	0	0
7.34	364	208	0	0	0
7.42	377	218	0	0	0
7.5	393	0	0	0	0
7.6	375	219	0	0	0
7.68	371	0	0	0	0
7.75	381	0	0	0	0
7.83	386	0	0	0	0
7.93	381	633	0	0	0
8.03	388	2368	0	0	0
8.11	391	404	0	0	0
8.19	396	262	0	0	0
8.3	381	224	0	0	0
8.38	379	231	0	0	0
8.46	369	0	0	0	0
8.55	369	1121	0	0	0
8.63	389	214	0	0	0
8.71	350	216	0	0	0
8.81	390	0	0	0	0
8.9	353	845	0	0	0
8.98	353	211	0	0	0
9.08	367	241	0	0	0
9.16	354	192	0	0	0
9.24	361	0	0	0	0
9.35	371	0	0	0	0
9.45	369	216	0	0	0
9.6	377	201	0	0	0
9.68	386	203	0	0	0

9.76	386	247	0	0	0
9.84	371	221	0	0	0
9.93	380	238	0	0	0
10.03	415	283	0	0	0
10.12	378	252	0	0	0
10.2	377	274	0	0	0
10.28	370	220	0	0	0
10.4	393	237	0	0	0
10.48	367	0	0	0	0
10.56	387	1074	0	0	0
10.64	374	211	0	0	0
10.73	373	218	0	0	0
10.81	381	627	0	0	0
10.89	376	218	0	0	0
10.98	395	282	0	0	0
11.06	358	227	0	0	0
11.17	373	222	0	0	0
11.26	378	1676	0	0	0
11.34	393	223	0	0	0
11.45	377	215	0	0	0
11.53	377	214	0	0	0
11.61	392	210	0	0	0
11.7	392	226	0	0	0
11.78	380	436	0	0	0
11.86	415	215	0	0	0
11.94	382	0	0	0	0
12.05	381	267	0	0	0
12.13	442	0	0	0	0
12.23	398	222	0	0	0
12.31	379	228	0	0	0
12.4	378	210	0	0	0
12.48	399	225	0	0	0
12.56	389	218	0	0	0
12.64	386	0	0	0	0
12.72	401	1022	0	0	0
12.81	405	0	0	0	0
12.91	378	0	0	0	0

13.01	385	224	0	0	0
13.09	391	228	0	0	0
13.18	388	234	0	0	0
13.26	353	0	0	0	0
13.34	369	986	0	0	0
13.42	375	218	0	0	0
13.53	380	224	0	0	0
13.61	394	233	0	0	0
13.69	396	225	0	0	0
13.79	383	2307	0	0	0
13.87	364	228	0	0	0
13.96	403	284	0	0	0
14.04	387	225	0	0	0
14.12	374	224	0	0	0
14.23	388	244	0	0	0
14.31	404	223	0	0	0
14.39	384	237	0	0	0
14.48	394	0	0	0	0
14.56	310	748	0	0	0
14.64	406	216	0	0	0
14.72	390	226	0	0	0
14.83	409	216	0	0	0
14.92	404	1955	0	0	0
15.01	404	220	0	0	0
15.09	389	386	0	0	0
15.17	389	225	0	0	0
15.25	385	223	0	0	0
15.36	381	229	0	0	0
15.44	392	238	0	0	0
15.53	384	241	0	0	0
15.62	391	2264	0	0	0
15.71	391	227	0	0	0
15.79	375	212	0	0	0
15.87	385	222	0	0	0
15.98	381	248	0	0	0
16.06	394	223	0	0	0
16.14	367	220	0	0	0

16.22	388	227	0	0	0
16.31	395	220	0	0	0
16.39	401	0	0	0	0
16.49	381	265	0	0	0
16.57	388	235	0	0	0
16.66	355	292	0	0	0
16.74	351	0	0	0	0
16.84	384	248	0	0	0
16.92	386	222	0	0	0
17.01	426	251	0	0	0
17.09	369	208	0	0	0
17.17	401	0	0	0	0
17.27	403	218	0	0	0
17.36	374	214	0	0	0
17.44	320	199	0	0	0
17.52	398	0	0	0	0
17.6	396	1061	0	0	0
17.69	380	228	0	0	0
17.77	380	214	0	0	0
17.85	387	684	0	0	0
17.93	413	228	0	0	0
18.02	393	215	0	0	0
18.1	406	214	0	0	0
18.21	385	227	0	0	0
18.29	393	232	0	0	0
18.37	401	276	0	0	0
18.45	390	224	0	0	0
18.54	386	212	0	0	0
18.62	388	222	0	0	0
18.7	394	0	0	0	0
18.8	396	226	0	0	0
18.89	413	215	0	0	0
18.97	402	0	0	0	0
19.05	403	840	0	0	0
19.13	373	222	0	0	0
19.24	391	260	0	0	0
19.32	395	220	0	0	0

19.4	398	240	0	0	0
19.49	383	234	0	0	0
19.57	394	237	0	0	0
19.65	392	244	0	0	0
19.73	394	0	0	0	0
19.84	389	220	0	0	0
19.92	395	233	0	0	0
20	399	222	0	0	0
20.08	390	0	0	0	0
20.17	395	1023	0	0	0
20.25	395	0	0	0	0
20.35	390	243	0	0	0
20.43	405	216	0	0	0
20.52	388	279	0	0	0
20.6	381	0	0	0	0
20.7	414	220	0	0	0
20.79	417	282	0	0	0
20.87	402	256	0	0	0
20.95	404	249	0	0	0
21.03	407	235	0	0	0
21.11	390	0	0	0	0
21.22	396	226	0	0	0
21.3	395	239	0	0	0
21.38	403	226	0	0	0
21.46	390	0	0	0	0
21.55	407	883	0	0	0
21.63	401	224	0	0	0
21.71	245	230	0	0	0
21.82	390	248	0	0	0
21.9	399	282	0	0	0
21.98	401	0	0	0	0
22.06	385	319	0	0	0
22.15	243	846	0	0	0
22.23	391	223	0	0	0
22.31	402	225	0	0	0
22.39	219	233	0	0	0
22.51	392	1885	0	0	0

22.6	398	244	0	0	0
22.68	398	220	0	0	0
22.76	384	222	0	0	0
22.87	385	0	0	0	0
22.94	422	226	0	0	0
23.03	401	239	0	0	0
23.11	407	254	0	0	0
23.22	390	0	0	0	0
23.29	398	231	0	0	0
23.38	410	235	0	0	0
23.48	398	230	0	173	0
23.6	425	236	0	173	0
23.69	397	1724	0	173	0
23.78	405	223	0	173	0
23.89	395	0	0	173	0
23.98	390	245	0	173	0
24.06	393	225	0	173	0
24.15	411	223	0	173	0
24.26	386	231	0	173	0
24.36	402	1882	0	173	0
24.45	384	0		73	0
24.53	460	236	0	173	0
24.62	394	230	0	173	0
24.73	401	232	0	173	0
24.82	395	248	0	173	0
24.93	432	246	0	173	0
25.03	401	1788	0	173	0
25.11	396	243	0	173	0
25.23	398	0		73	0
25.31	393	237	0	173	0
25.4	403	234	0	173	0
25.48	397	241	0	173	0
25.59	411	235	0	173	0
25.68	405	243	0	173	0
25.79	399	0		73	0
25.87	391	0		73	0
25.96	390	233	0	173	0

26.04	411	0		73	0
26.12	373	235	0	173	0
26.21	409	224	0	173	0
26.3	403	239	0	173	0
26.41	399	226	0	173	0
26.5	396	232	0	173	0
26.61	423	228	0	173	0
26.71	396	1782	0	173	0
26.8	430	226	0	173	0
26.91	396	0		73	0
26.99	407	225	0	173	0
27.07	428	0		73	0
27.16	401	309	0	173	0
27.25	406	222	0	173	0
27.33	400	228	0	173	0
27.47	401	0		73	0
27.58	397	241	0	173	0
27.69	424	220	0	173	0
27.78	437	245	0	173	0
27.87	396	237	0	173	0
27.95	409	239	0	173	0
28.04	406	231	0	173	0
28.13	415	227	0	173	0
28.21	398	224	0	173	0
28.3	291	237	0	173	0
28.39	418	231	0	173	0
28.47	403	252	0	173	0
28.56	397	232	0	173	0
28.65	399	256	0	173	0
28.76	420	237	0	173	0
28.91	397	249	0	173	0
29.02	229	0		73	0
29.1	430	250	0	173	0
29.19	398	0		73	0
29.29	398	2931	0	173	0
29.38	420	243	0	173	0
29.49	416	235	0	173	0

29.58	422	237	0	173	0
29.69	395	231	0	173	0
29.78	391	237	0	173	0
29.89	407	248	0	173	0
29.98	403	223	0	173	0
30.09	404	239	0	173	0
30.18	413	236	0	173	0
30.3	392	2236	0	173	0
30.39	401	249	0	173	0
30.5	389	0		73	0
30.59	416	254	0	173	0
30.67	403	242	0	173	0
30.76	416	230	0	173	0
30.87	407	255	0	173	0
30.96	402	0		73	0
31.04	401	231	0	173	0
31.15	413	0		73	0
31.23	405	239	0	173	0
31.32	397	228	0	173	0
31.44	403	241	0	173	0
31.55	404	263	0	173	0
31.64	401	238	0	173	0
31.76	401	236	0	173	0
31.84	400	237	0	173	0
31.95	416	244	0	173	0
32.05	396	1593	0	173	0
32.14	415	250	0	173	0
32.25	396	0		73	0
32.33	398	238	0	173	0
32.42	398	239	0	173	0
32.51	392	223	0	173	0
32.63	392	2409	0	173	0
32.72	408	262	0	173	0
32.81	398	0		73	0
32.89	405	233	0	173	0
33	417	231	0	173	0
33.09	406	249	0	173	0

33.2	488	243	0	173	0
33.29	412	235	0	173	0
33.4	392	254	0	173	0
33.52	405	0		73	0
33.6	400	210	0	173	0
33.69	401	240	0	173	0
33.78	396	1887	0	173	0
33.88	420	2091	0	173	0
33.97	399	219	0	173	0
34.08	420	0		73	0
34.17	397	436	0	173	0
34.25	396	236	0	173	0
34.34	406	246	0	173	0
34.45	395	227	0	173	0
34.54	398	235	0	173	0
34.63	400	991	0	173	0
34.72	408	231	0	173	0
34.8	444	277	0	173	0
34.92	401	257	0	173	0
35	406	241	0	173	0
35.1	405	1040	0	173	0
35.19	400	238	0	173	0
35.27	396	0		73	0
35.35	399	245	0	173	0
35.47	410	286	0	173	0
35.55	421	243	0	173	0
35.67	335	232	0	173	0
35.75	392	240	0	173	0
35.87	398	226	0	173	0
35.95	417	254	0	173	0
36.07	393	239	0	173	0
36.18	404	0		73	0
36.26	397	236	0	173	0
36.35	398	0		73	0
36.43	434	234	0	173	0
36.52	401	258	0	173	0
36.6	409	241	0	173	0

36.72	414	248	0	173	0
36.83	403	0		73	0
36.91	403	239	0	173	0
37	403	242	0	173	0
37.08	392	243	0	173	0
37.2	401	233	0	173	0
37.28	409	233	0	173	0
37.4	398	232	0	173	0
37.48	395	256	0	173	0
37.6	307	237	0	173	0
37.68	407	281	0	173	0
37.8	446	235	0	173	0
37.91	401	0		73	0
37.99	428	229	0	173	0
38.08	394	231	0	173	0
38.17	413	249	0	173	0
38.28	396	239	0	173	0
38.37	403	237	0	173	0
38.48	409	0		73	0
38.56	414	0		73	0
38.64	409	250	0	173	0
38.73	397	285	0	173	0
38.81	397	226	0	173	0
38.93	400	226	0	173	0
39.01	395	207	0	173	0
39.13	403	235	0	173	0
39.22	408	1729	0	173	0
39.31	413	239	0	173	0
39.42	405	0		73	0
39.51	402	239	0	173	0
39.59	397	239	0	173	0
39.69	405	1835	0	173	0
39.78	403	227	0	173	0
39.89	434	239	0	173	0
39.98	403	228	0	173	0
40.09	396	245	0	173	0
40.18	401	226	0	173	0

40.27	396	1293	0	173	0
40.36	411	225	0	173	0
40.44	403	0		73	0
40.53	405	239	0	173	0
40.64	405	0		73	0
40.72	400	248	0	173	0
40.81	402	258	0	173	0
40.9	401	231	0	173	0
41.01	396	235	0	173	0
41.1	407	228	0	173	0
41.21	395	234	0	173	0
41.32	402	0		173	0
41.4	405	672	0	173	0
41.49	400	245	0	173	0
41.69	402	233	0	173	0
41.8	390	0		173	0
41.97	411	241	0	173	0
42.05	414	0		173	0
42.13	407	230	0	173	0
42.22	392	240	0	173	0
42.31	409	243	0	173	0
42.42	404	0		173	0
42.5	404	0		173	0
42.67	401	0		173	0
42.75	393	249	0	173	0
42.84	401	225	0	173	0
42.92	403	233	0	173	0
43.04	411	237	0	173	0
43.12	391	233	0	173	0
43.24	401	231	0	173	0
43.4	394	233	0	173	0
43.52	387	0		173	0
43.69	400	224	0	173	0
43.77	406	241	0	173	0
43.88	402	227	0	173	0
44.09	405	288	0	173	0
44.17	401	241	0	173	0

44.26	407	1091	0	173	0
44.35	403	223	0	173	0
44.55	391	241	0	173	0
44.63	399	235	0	173	0
44.85	403	2454	0	173	0
44.94	389	228	0	173	0
45.05	398	0		173	0
45.13	394	234	0	173	0
45.3	405	232	0	173	0
45.42	398	231	0	173	0
45.5	402	263	0	173	0
45.62	405	252	0	173	0
45.81	339	0		173	0
45.9	398	964	0	173	0
46.1	403	235	0	173	0
46.19	415	250	0	173	0
46.28	403	1106	0	173	0
46.37	398	254	0	173	0
46.57	402	223	0	173	0
46.68	398	0		173	0
46.85	394	245	0	173	0
46.94	395	273	0	173	0
47.16	395	0		173	0
47.25	437	476	0	173	0
47.33	396	254	0	173	0
47.53	406	258	0	173	0
47.62	382	0		173	0
47.7	392	251	0	173	0
47.79	395	1401	0	173	0
47.98	390	218	0	173	0
48.07	386	224	0	173	0
48.29	382	0		173	0
48.38	403	239	0	173	0
48.46	390	235	0	173	0
48.55	391	271	0	173	0
48.75	404	225	0	173	0
48.96	435	282	0	173	0

49.08	404	242	0	173	0
49.16	386	231	0	173	0
49.28	381	211	0	173	0
49.47	383	0		173	0
49.56	393	232	0	173	0
49.64	384	279	0	173	0
49.73	395	282	0	173	0
49.85	390	219	0	173	0
49.96	381	0		173	0
50.04	411	224	0	173	0
50.21	397	233	0	173	0
50.41	386	219	0	173	0
50.51	405	1333	0	173	0
50.59	390	223	0	173	0
50.69	413	1523	0	173	0
50.89	385	0		173	0
50.97	419	471	0	173	0
51.14	392	0		173	0
51.23	413	239	0	173	0
51.44	407	237	0	173	0
51.56	412	0		173	0
51.74	392	2522	0	173	0
51.83	393	224	0	173	0
52.02	401	235	0	173	0
52.11	425	232	0	173	0
52.2	408	1841	0	173	0
52.3	402	1756	0	173	0
52.47	425	252	0	173	0
52.66	424	0		173	0
52.74	395	250	0	173	0
52.83	407	237	0	173	0
52.95	405	2392	0	173	0
53.15	405	0		173	0
53.24	413	452	0	173	0
53.34	410	2188	0	173	0
53.44	398	2111	0	173	0
53.52	418	231	0	173	0

53.65	403	237	0	173	0
53.82	432	0		173	0
53.9	408	260	0	173	0
53.99	413	240	0	173	0
54.14	407	243	0	173	0
54.25	411	0		173	0
54.42	411	261	0	173	0
54.51	423	259	0	173	0
54.71	426	242	0	173	0
54.82	416	249	0	173	0
54.94	441	250	0	173	0
55.02	403	254	0	173	0
55.25	426	0		173	0
55.33	420	443	0	173	0
55.42	412	252	0	173	0
55.51	426	248	0	173	0
55.62	421	250	0	173	0
55.74	417	271	0	173	0
55.82	423	0		173	0
55.9	415	253	0	173	0
55.99	433	284	0	173	0
56.08	436	984	0	173	0
56.17	445	262	0	173	0
56.38	425	2144	0	173	0
56.47	421	248	0	173	0
56.66	428	243	0	173	0
56.75	422	252	0	173	0
56.84	417	254	0	173	0
56.95	426	256	0	173	0
57.07	424	259	0	173	0
57.25	445	265	0	173	0
57.34	420	0		173	0
57.42	432	240	0	173	0
57.54	434	2233	0	173	0
57.63	426	269	0	173	0
57.96	426	247	0	173	0
58.17	430	267	0	173	0

58.28	435	0		173	0
58.36	437	301	0	173	0
58.45	435	255	0	173	0
58.65	433	246	0	173	0
58.76	418	259	0	173	0
58.96	459	271	0	173	0
59.16	432	449	0	173	0
59.25	426	267	0	173	0
59.43	436	887	0	173	0
59.59	423	0		173	0
59.68	175	668	0	173	0
59.76	429	258	0	173	0
59.85	425	254	0	173	0

Tabla 18. Datos de registro de velocidad y alturas para flujo de detritos con concentración en términos de caudal de 0.15

Tiempo (s)	Altura0 (mm)	Altura1 (mm)	Velocidad (mm/s)	AlturaInicial0 (mm)	AlturaFinal0 (mm)
0.03	426	262	0	0	0
0.25	427	0	0		0
0.36	425	265	0	0	0
0.44	423	261	0	0	0
0.52	426	0	0		0
0.62	424	261	0	0	0
0.7	426	265	0	0	0
0.79	426	265	0	0	0
0.87	423	261	0	0	0
0.95	422	0	0		0
1.03	422	260	0	0	0
1.11	422	261	0	0	0
1.19	427	265	0	0	0
1.27	199	261	0	199	0
1.36	426	262	0	199	0
1.44	426	267	0	199	0
1.53	426	266	0	199	0
1.61	427	265	0	199	0
1.7	427	0	0	199	0

1.78	313	262	0	199	0
1.86	426	261	0	199	0
1.95	427	0	0	199	0
2.03	422	260	0	199	0
2.11	427	0	0	199	0
2.19	271	261	0	199	0
2.28	430	261	0	199	0
2.37	427	261	0	199	0
2.45	427	261	0	199	0
2.54	427	261	0	199	0
2.62	427	261	0	199	0
2.71	427	262	0	199	0
2.8	431	261	0	199	0
2.88	431	0	0	199	0
2.96	423	261	0	199	0
3.05	428	0	0	199	0
3.13	279	261	0	199	0
3.21	403	261	0	199	0
3.3	431	0	0	199	0
3.38	426	261	0	199	0
3.46	427	0	0	199	0
3.54	279	260	0	199	0
3.63	431	261	0	199	0
3.72	427	262	0	199	0
3.8	427	262	0	199	0
3.89	427	262	0	199	0
3.97	427	262	0	199	0
4.06	437	262	0	199	0
4.15	431	262	0	199	0
4.23	427	0	0	199	0
4.31	427	261	0	199	0
4.4	427	0	0	199	0
4.48	240	266	0	199	0
4.56	418	261	0	199	0
4.64	427	0	0	199	0
4.73	431	261	0	199	0
4.81	428	0	0	199	0

4.89	318	261	0	199	0
4.98	427	261	0	199	0
5.06	427	260	0	199	0
5.15	412	262	0	199	0
5.24	427	262	0	199	0
5.32	427	262	0	199	0
5.41	375	260	0	199	0
5.49	333	262	0	199	0
5.58	427	0	0	199	0
5.66	229	261	0	199	0
5.74	427	262	0	199	0
5.83	427	262	0	199	0
5.92	426	261	0	199	0
6	427	262	0	199	0
6.09	427	262	0	199	0
6.17	411	262	0	199	0
6.26	431	262	0	199	0
6.34	428	0	0	199	0
6.42	427	262	0	199	0
6.51	426	0	0	199	0
6.59	405	261	0	199	0
6.68	427	262	0	199	0
6.76	428	265	0	199	0
6.85	427	262	0	199	0
6.93	427	261	0	199	0
7.02	427	262	0	199	0
7.11	309	261	0	199	0
7.19	418	261	0	199	0
7.28	426	0	0	199	0
7.36	426	262	0	199	0
7.44	427	0	0	199	0
7.52	252	262	0	199	0
7.61	430	262	0	199	0
7.69	427	260	0	199	0
7.78	427	262	0	199	0
7.86	427	260	0	199	0
7.95	427	262	0	199	0

8.04	419	262	0	199	0
8.12	415	262	0	199	0
8.21	426	0	0	199	0
8.29	418	261	0	199	0
8.37	428	0	0	199	0
8.45	283	261	0	199	0
8.54	413	262	0	199	0
8.63	428	265	0	199	0
8.71	428	266	0	199	0
8.8	427	261	0	199	0
8.88	427	262	0	199	0
8.97	419	262	0	199	0
9.06	418	261	0	199	0
9.14	427	0	0	199	0
9.22	424	261	0	199	0
9.31	426	0	0	199	0
9.39	279	261	0	199	0
9.47	435	261	0	199	0
9.56	455	305	0	199	0
9.65	435	296	0	199	0
9.75	439	3444	0	199	0
9.84	423	262	0	199	0
9.92	422	0	0	199	0
10	406	267	0	199	0
10.09	422	0	0	199	0
10.17	427	251	0	199	0
10.26	434	279	0	199	0
10.34	417	260	0	199	0
10.43	419	265	0	199	0
10.52	412	273	0	199	0
10.6	435	0	0	199	0
10.69	413	271	0	199	0
10.77	413	290	0	199	0
10.89	417	0	0	199	0
10.97	411	273	0	199	0
11.06	411	262	0	199	0
11.14	399	254	0	199	0

11.23	422	290	0	199	0
11.32	395	243	0	199	0
11.4	407	323	0	199	0
11.49	416	262	0	199	0
11.58	401	237	0	199	0
11.67	299	241	0	199	0
11.75	396	258	0	199	0
11.84	411	243	0	199	0
11.93	419	254	0	199	0
12.02	403	688	0	199	0
12.1	416	0	0	199	0
12.18	388	250	0	199	0
12.27	388	0	0	199	0
12.35	413	248	0	199	0
12.44	400	0	0	199	0
12.52	406	235	0	199	0
12.6	405	238	0	199	0
12.69	387	260	0	199	0
12.78	391	253	0	199	0
12.86	219	235	0	199	0
12.96	397	1044	0	199	0
13.04	388	258	0	199	0
13.13	238	235	0	199	0
13.22	398	226	0	199	0
13.31	392	1365	0	199	0
13.4	383	1014	0	199	0
13.49	384	0	0	199	0
13.57	402	225	0	199	0
13.66	389	678	0	199	0
13.75	386	294	0	199	0
13.84	381	221	0	199	0
13.95	377	0	0	199	0
14.04	377	1843	0	199	0
14.13	370	212	0	199	0
14.21	362	0	0	199	0
14.3	379	213	0	199	0
14.38	377	0	0	199	0

14.46	367	211	0	199	0
14.55	384	226	0	199	0
14.64	374	0	0	199	0
14.72	387	220	0	199	0
14.8	381	220	0	199	0
14.89	382	226	0	199	0
14.98	403	215	0	199	0
15.06	386	205	0	199	0
15.15	394	226	0	199	0
15.26	413	4723	0	199	0
15.35	251	0	0	199	0
15.43	386	0	0	199	0
15.51	378	200	0	199	0
15.6	369	0	0	199	0
15.68	358	216	0	199	0
15.77	355	182	55	199	182
15.86	364	200	55	199	182
15.95	336	200	55	199	182
16.04	354	180	55	199	182
16.14	409	224	55	199	182
16.23	314	219	55	199	182
16.32	381	224	55	199	182
16.41	368	228	55	199	182
16.51	367	208	55	199	182
16.6	367	197	55	199	182
16.69	349	217	55	199	182
16.78	361	199	55	199	182
16.88	371	0	55	199	182
16.96	379	205	55	199	182
17.06	207	228	55	199	182
17.15	384	220	55	199	182
17.24	373	209	55	199	182
17.33	358	216	55	199	182
17.43	361	175	55	199	182
17.52	379	207	55	199	182
17.64	391	0	55	199	182
17.73	358	547	55	199	182

17.82	381	195	55	199	182
17.92	378	214	55	199	182
18.01	435	0	55	199	182
18.1	422	216	55	199	182
18.19	386	222	55	199	182
18.28	367	0	55	199	182
18.37	380	226	55	199	182
18.46	392	216	55	199	182
18.56	379	562	55	199	182
18.65	379	210	55	199	182
18.74	370	216	55	199	182
18.84	386	218	55	199	182
18.93	386	0	55	199	182
19.02	374	273	55	199	182
19.11	377	208	55	199	182
19.2	386	212	55	199	182
19.3	381	204	55	199	182
19.39	443	226	55	199	182
19.48	385	0	55	199	182
19.57	387	218	55	199	182
19.66	420	232	55	199	182
19.76	394	227	55	199	182
19.85	418	228	55	199	182
19.94	386	222	55	199	182
20.03	392	216	55	199	182
20.13	396	214	55	199	182
20.23	398	1091	55	199	182
20.33	398	1077	55	199	182
20.42	388	221	55	199	182
20.51	398	241	55	199	182
20.61	390	239	55	199	182
20.7	392	236	55	199	182
20.8	398	1282	55	199	182
20.89	406	271	55	199	182
20.99	401	0	55	199	182
21.07	390	226	55	199	182
21.17	260	245	55	199	182

21.28	378	3320	55	199	182
21.37	394	251	55	199	182
21.47	398	227	55	199	182
21.56	386	249	55	199	182
21.65	408	0	55	199	182
21.74	411	235	55	199	182
21.83	175	226	55	199	182
21.92	394	233	55	199	182
22.02	385	235	55	199	182
22.11	416	240	55	199	182
22.2	398	219	55	199	182
22.3	411	251	55	199	182
22.39	401	239	55	199	182
22.48	409	231	55	199	182
22.58	420	239	55	199	182
22.67	398	237	55	199	182
22.76	380	222	55	199	182
22.86	415	226	55	199	182
22.95	415	228	55	199	182
23.04	403	227	55	199	182
23.14	398	235	55	199	182
23.23	405	228	55	199	182
23.32	403	0	55	199	182
23.44	394	0	55	199	182
23.52	384	0	55	199	182
23.61	376	223	55	199	182
23.71	373	214	55	199	182
23.8	387	234	55	199	182
23.89	381	231	55	199	182
23.98	390	218	55	199	182
24.08	390	223	55	199	182
24.17	401	239	55	199	182
24.26	441	229	55	199	182
24.35	400	0	55	199	182
24.44	289	218	55	199	182
24.54	389	242	55	199	182
24.63	386	299	55	199	182

24.72	402	248	55	199	182
24.82	434	295	55	199	182
24.91	409	249	55	199	182
25	404	246	55	199	182
25.1	419	243	55	199	182
25.19	447	234	55	199	182
25.28	401	0	55	199	182
25.37	401	0	55	199	182
25.46	426	267	55	199	182
25.55	413	0	55	199	182
25.64	413	245	55	199	182
25.73	414	0	55	199	182
25.82	411	237	55	199	182
25.92	431	2194	55	199	182
26.02	408	256	55	199	182
26.11	403	255	55	199	182
26.21	405	265	55	199	182
26.3	402	273	55	199	182
26.39	307	681	55	199	182
26.49	426	266	55	199	182
26.58	413	255	55	199	182
26.67	411	237	55	199	182
26.77	415	687	55	199	182
26.86	419	0	55	199	182
26.95	423	254	55	199	182
27.04	420	241	55	199	182
27.14	419	252	55	199	182
27.23	432	271	55	199	182
27.32	301	241	55	199	182
27.42	413	288	55	199	182
27.51	418	245	55	199	182
27.6	412	254	55	199	182
27.7	415	286	55	199	182
27.79	272	235	55	199	182
27.88	410	246	55	199	182
27.98	417	243	55	199	182
28.07	464	275	55	199	182

28.16	427	247	55	199	182
28.26	246	246	55	199	182
28.35	428	250	55	199	182
28.44	420	253	55	199	182
28.53	421	260	55	199	182
28.63	415	265	55	199	182
28.73	293	1076	55	199	182
28.82	282	0	55	199	182
28.91	413	245	55	199	182
29.03	422	0	55	199	182
29.12	419	267	55	199	182
29.21	413	258	55	199	182
29.3	321	0	55	199	182
29.39	420	254	55	199	182
29.48	417	283	55	199	182
29.57	424	0	55	199	182
29.66	411	256	55	199	182
29.76	419	0	55	199	182
29.85	469	668	55	199	182
29.94	426	0	55	199	182
30.03	418	260	55	199	182
30.12	406	241	55	199	182
30.21	418	254	55	199	182
30.31	413	251	55	199	182
30.4	416	257	55	199	182
30.49	413	261	55	199	182
30.59	417	251	55	199	182
30.71	415	0	55	199	182
30.8	417	311	55	199	182
30.89	413	265	55	199	182
30.98	418	254	55	199	182
31.1	418	3392	55	199	182
31.19	415	266	55	199	182
31.29	413	260	55	199	182
31.38	424	245	55	199	182
31.47	415	269	55	199	182
31.56	411	256	55	199	182

31.66	415	248	55	199	182
31.75	357	675	55	199	182
31.85	428	250	55	199	182
31.94	305	242	55	199	182
32.03	169	250	55	199	182
32.13	411	250	55	199	182
32.22	284	241	55	199	182
32.31	411	716	55	199	182
32.41	426	260	55	199	182
32.5	415	696	55	199	182
32.6	415	241	55	199	182
32.69	414	241	55	199	182
32.78	423	250	55	199	182
32.88	415	736	55	199	182
32.97	419	284	55	199	182
33.07	462	265	55	199	182
33.16	418	248	55	199	182
33.25	412	253	55	199	182
33.35	351	252	55	199	182
33.44	412	285	55	199	182
33.53	415	242	55	199	182
33.63	420	243	55	199	182
33.72	415	264	55	199	182
33.81	282	257	55	199	182
33.91	415	265	55	199	182
34	411	258	55	199	182
34.09	415	256	55	199	182
34.19	411	273	55	199	182
34.28	257	244	55	199	182
34.37	415	260	55	199	182
34.47	414	246	55	199	182
34.56	424	251	55	199	182
34.65	428	247	55	199	182
34.74	293	247	55	199	182
34.84	417	247	55	199	182
34.93	412	247	55	199	182
35.02	407	252	55	199	182

35.12	400	252	55	199	182
35.21	276	252	55	199	182
35.3	413	248	55	199	182
35.4	416	248	55	199	182
35.49	411	248	55	199	182
35.58	411	248	55	199	182
35.68	313	244	55	199	182
35.77	412	117	55	199	182
35.86	400	252	55	199	182
35.96	425	248	55	199	182
36.05	413	252	55	199	182
36.14	413	248	55	199	182
36.24	412	248	55	199	182
36.33	416	252	55	199	182
36.42	417	248	55	199	182
36.51	407	252	55	199	182
36.61	313	248	55	199	182
36.7	413	244	55	199	182
36.79	415	248	55	199	182
36.89	417	249	55	199	182
36.98	413	249	55	199	182
37.07	282	249	55	199	182
37.17	413	244	55	199	182
37.26	413	248	55	199	182
37.35	409	248	55	199	182
37.45	412	249	55	199	182
37.54	324	250	55	199	182
37.63	405	249	55	199	182
37.73	413	254	55	199	182
37.82	417	249	55	199	182
37.91	386	250	55	199	182
38.01	327	249	55	199	182
38.1	413	249	55	199	182
38.19	413	249	55	199	182
38.29	412	249	55	199	182
38.38	418	250	55	199	182
38.47	286	245	55	199	182

38.56	414	249	55	199	182
38.66	215	249	55	199	182
38.75	413	250	55	199	182
38.84	414	254	55	199	182
38.94	413	250	55	199	182
39.03	413	250	55	199	182
39.12	413	250	55	199	182
39.21	0	0	55	199	82
39.32	418	250	55	199	182
39.42	324	250	55	199	182
39.51	415	250	55	199	182
39.6	401	250	55	199	182
39.72	414	250	55	199	182
39.81	280	250	55	199	182
39.91	414	250	55	199	182
40	398	250	55	199	182
40.12	419	250	55	199	182
40.22	383	250	55	199	182
40.31	415	250	55	199	182
40.4	415	251	55	199	182

ANEXO 2: TABLAS DE DISTANCIAS REGISTRADAS POR LOS SENSORES 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12.

Tabla 19. Datos de distancia, registrados por los sensores ultrasónicos HC-SR04 para condiciones de agua clara.

Tiempo (s)	Sensor 1 (mm)	Sensor 2 (mm)	Sensor 3 (mm)	Sensor 4 (mm)	Sensor 5 (mm)	Sensor 7 (mm)	Sensor 8 (mm)	Sensor 9 (mm)	Sensor 11 (mm)	Sensor 12 (mm)
0.34	429	441	507	74	355	423	316	385	399	424
0.76	428	432	509	0	355	386	324	386	396	423
1.18	428	441	509	426	344	396	320	390	396	423
1.6	428	196	0	426	356	375	316	386	399	424
2.3	433	441	504	426	347	396	317	394	395	640
2.45	293	145	0	427	351	379	329	385	395	423
2.87	430	440	508	74	360	382	325	386	400	424
3.29	429	444	0	426	355	396	320	385	399	423
3.71	428	441	509	426	371	384	320	386	391	422
4.13	428	185	0	426	356	396	324	386	396	424
4.56	433	441	509	70	360	384	316	385	395	974
4.97	296	444	0	79	360	252	312	385	254	418
5.4	429	441	505	426	355	379	320	385	401	411
5.82	428	439	509	0	356	396	307	385	395	420
6.24	437	440	505	430	359	383	312	386	400	418
6.66	428	203	0	422	356	392	321	386	400	420
7.9	432	440	505	426	347	384	324	386	392	419
8.28	429	441	505	426	360	294	324	386	400	427
8.7	429	401	0	426	355	387	328	385	395	415
9.12	429	444	509	426	356	383	320	385	395	426
9.54	428	194	0	425	356	383	321	386	400	427
9.97	429	457	472	426	355	387	321	385	396	687
10.39	299	446	0	71	355	388	312	386	395	414
10.81	456	455	481	426	170	383	311	386	396	411
11.23	405	456	0	71	356	396	324	385	395	426
11.65	409	430	470	430	215	382	316	385	396	426
12.07	404	415	0	87	354	249	316	385	400	415
12.51	400	192	473	410	239	379	320	394	396	423
12.93	824	927	456	62	360	221	329	389	414	420
13.36	395	456	567	426	360	375	325	386	372	420

13.78	413	417	484	430	360	381	326	385	364	381
14.12	390	454	472	425	356	307	133	398	0	338
14.54	373	414	0	254	354	367	316	806	390	337
14.97	397	394	436	427	356	335	299	386	387	344
15.39	381	402	460	358	341	352	301	381	374	328
15.73	388	387	469	431	318	352	291	381	391	338
16.15	411	335	0	422	350	223	310	386	390	343
16.57	435	198	436	74	356	345	295	381	390	351
17	382	406	426	413	296	380	287	789	0	316
17.42	382	406	426	413	296	380	287	789	0	316
17.84	389	817	429	422	364	347	287	373	388	316
18.19	381	394	107	288	338	362	288	386	396	353
18.62	384	386	465	423	348	352	283	386	428	339
19.04	384	418	0	295	350	347	295	398	388	337
19.46	375	398	404	421	354	357	293	386	408	425
19.88	376	291	473	393	178	370	286	386	386	323
20.3	386	405	478	432	351	413	277	381	381	336
20.72	374	382	426	423	351	388	388	386	387	360
21.14	383	388	474	414	355	386	296	377	414	373
21.56	381	377	427	414	334	356	279	398	401	345
21.98	394	413	0	287	352	141	294	386	376	151
22.4	383	398	408	416	356	348	137	401	0	336
22.82	405	517	0	269	336	340	285	394	381	339
23.24	379	388	401	410	355	301	278	783	429	0
23.66	390	397	413	327	343	363	278	386	386	333
24.08	377	400	487	418	360	354	311	381	422	635
24.5	394	462	474	411	352	365	303	139	392	0
24.92	390	362	0	421	360	358	274	386	381	322
25.34	385	390	528	409	355	353	305	394	415	393

Tabla 20. Datos de distancia, registrados por los sensores ultrasónicos HC-SR04 para condiciones de flujo de detritos con 0.12 de concentración.

Tiempo (s)	Sensor 1 (mm)	Sensor 2 (mm)	Sensor 3 (mm)	Sensor 4 (mm)	Sensor 5 (mm)	Sensor 7 (mm)	Sensor8 (mm)	Sensor 9 (mm)	Sensor 11 (mm)	Sensor 12 (mm)
0.34	430	445	507	427	356	352	326	395	0	635
0.68	337	445	505	422	356	396	321	386	401	420
1.12	438	440	510	410	356	367	318	390	397	268
1.55	430	445	505	427	360	237	321	396	94	162
1.98	430	445	506	427	356	271	322	386	102	160
2.41	434	445	509	427	356	271	322	386	124	161
2.84	434	446	509	432	356	392	322	386	396	121
3.27	435	441	505	427	356	396	321	394	396	119
3.7	430	441	505	427	356	396	321	399	398	121
4.13	430	440	506	432	356	396	320	395	396	121
4.56	438	441	505	427	356	397	321	374	396	123
4.99	430	441	514	431	356	384	321	386	396	123
5.42	434	441	509	424	356	177	321	386	397	141
5.85	430	441	509	426	356	396	321	386	396	122
6.28	430	441	509	427	356	396	322	386	396	124
6.71	430	441	505	423	356	396	322	386	397	124
7.14	430	441	509	431	356	396	322	386	396	777
7.55	438	222	0	426	356	371	212	390	0	0
7.98	438	356	0	427	356	392	313	398	401	271
8.41	430	581	498	427	356	396	322	386	396	106
8.85	426	236	482	371	284	367	322	386	396	428
9.28	179	377	0	249	356	354	326	386	397	403
9.7	418	424	458	428	356	396	322	386	396	764
10.15	419	253	454	411	275	367	326	386	335	243
10.58	445	482	479	70	356	375	322	386	397	119
11.01	248	415	0	258	356	349	317	395	405	419
11.44	398	424	479	427	356	372	321	388	407	408
11.87	422	407	462	424	356	383	331	414	414	408
12.3	409	492	500	441	356	355	171	399	0	0
12.55	395	411	558	336	288	383	326	386	399	237
13.31	421	713	449	364	279	352	326	417	396	350
13.74	537	442	430	422	360	358	312	433	374	0
14.16	398	413	0	272	356	330	321	368	377	346
14.59	451	392	411	406	365	360	316	378	422	351
14.92	397	396	394	395	378	379	345	382	384	341

15.34	401	581	453	402	352	430	324	400	390	0
15.76	383	384	0	260	353	350	241	377	0	0
16.19	391	289	426	78	360	323	316	386	395	346
16.62	387	401	415	393	341	343	329	823	403	0
17.05	389	283	475	309	310	356	303	373	444	349
17.48	381	392	419	397	343	356	302	381	392	335
17.9	389	386	399	67	347	367	300	385	376	334
18.32	371	401	479	398	368	360	303	377	359	0
18.74	366	424	0	309	351	320	311	398	235	760
19.17	395	161	449	327	308	350	312	386	368	326
19.6	388	392	503	388	352	331	298	378	360	373
20.01	371	423	0	290	279	343	288	386	392	343
20.44	385	377	422	388	347	371	299	439	381	326
20.87	349	483	0	394	326	344	288	770	372	347
21.2	397	413	421	390	374	355	292	381	373	355
21.63	417	413	0	0	352	342	194	403	0	0
21.94	398	398	404	80	352	386	285	405	0	0
22.36	382	376	0	256	357	330	307	390	414	333
22.79	394	389	466	360	351	354	316	379	448	328
23.12	370	494	404	71	352	333	288	395	372	320
23.55	386	373	179	282	367	289	280	381	0	0
23.97	373	379	0	289	360	350	284	374	365	328
24.4	388	378	394	391	354	354	273	382	366	328
24.74	410	403	398	385	356	331	256	275	370	0
25.18	381	287	422	65	569	324	295	381	392	376
25.6	377	409	409	395	356	341	282	386	372	320
26.02	247	342	0	290	356	361	293	390	391	320
26.45	218	450	0	420	353	342	313	381	384	337
26.87	387	389	446	408	369	353	288	621	371	0
27.29	398	375	0	241	352	327	299	382	391	311
27.72	373	443	455	407	356	375	304	399	494	324
28.13	378	365	0	294	352	316	286	395	0	0
28.55	376	386	0	273	356	308	272	394	392	318
29.31	380	388	463	416	356	375	294	400	419	341
29.74	384	465	433	406	313	345	293	411	400	410
30.16	419	386	452	411	352	371	265	398	415	0
30.58	377	386	0	257	356	335	283	400	392	396
31.01	393	397	475	80	352	358	285	386	390	369
31.35	379	766	413	397	288	365	292	387	398	350

31.77	386	396	433	420	352	352	298	383	383	324
32.19	375	524	403	93	352	356	289	825	0	319
32.61	404	386	422	435	356	358	291	408	374	0
33.05	379	291	486	313	292	373	273	391	396	367
33.48	377	400	427	418	352	362	285	381	394	0
33.8	368	381	542	87	356	350	264	391	0	0
34.22	400	402	0	414	356	160	285	394	381	326
34.67	388	0	414	415	352	384	290	377	377	318
35.09	372	391	426	416	360	362	286	382	386	342
35.52	362	401	407	445	356	366	279	378	418	333
35.86	374	160	424	371	300	471	286	381	385	313
36.29	369	389	407	422	356	359	303	394	423	0
36.7	365	391	0	322	352	319	276	394	0	0
37.12	386	371	0	258	356	338	259	424	396	449
37.54	373	424	459	422	356	358	277	386	377	316
37.96	376	372	0	288	356	353	271	386	413	389
38.39	383	182	421	378	322	367	278	386	160	328
38.82	386	413	519	419	356	384	285	386	384	341
39.25	384	394	442	44	356	352	285	443	405	339
39.58	371	383	411	412	360	347	287	386	390	339
40	364	388	0	420	364	354	283	386	403	360
40.42	394	398	409	419	356	369	286	386	411	324
40.86	405	265	452	336	335	356	333	432	394	318
41.29	368	403	408	419	302	362	290	394	386	0
41.62	378	376	423	419	360	384	289	506	404	364
42.04	377	407	411	414	328	358	276	391	396	323
42.47	405	393	492	12	356	378	299	390	393	394
42.8	383	375	440	419	356	343	281	392	414	328
43.23	377	405	594	415	352	356	283	381	400	341
43.56	371	394	496	419	356	375	280	382	0	338
43.99	371	425	475	413	352	343	286	391	393	135
44.42	386	377	428	111	340	363	284	386	430	311
44.75	397	401	439	424	360	344	300	432	413	328
45.18	446	392	426	16	360	290	275	390	385	401
45.52	388	398	480	412	352	365	307	386	398	614
45.94	374	420	427	412	356	374	272	395	386	322
46.27	380	384	424	419	356	329	284	382	0	324
46.71	386	267	418	379	287	341	292	399	395	363
47.14	392	386	126	226	352	329	290	382	390	343

47.56	375	391	481	418	366	362	311	386	417	310
47.98	399	386	0	280	356	358	294	788	253	393
48.41	374	413	411	415	352	393	296	394	372	341
48.84	377	400	407	92	356	347	293	381	388	350
49.17	377	405	505	426	356	357	300	390	369	315
49.59	385	417	466	35	356	353	286	381	381	329
50.02	403	133	448	349	328	400	319	382	381	379
50.44	396	407	476	415	356	394	245	395	386	0
50.85	377	481	0	70	356	347	298	404	0	0
51.27	384	412	0	215	356	347	309	386	398	394
51.7	386	177	483	333	328	349	304	437	376	320
52.13	389	437	435	423	352	417	254	419	377	0
52.55	411	432	0	423	345	356	310	399	394	414
52.98	388	150	534	279	273	362	312	414	384	336
53.41	397	594	462	427	356	360	247	339	265	0
53.74	424	412	466	384	305	354	328	399	396	357
54.16	413	423	469	426	356	409	311	386	401	0
54.58	410	426	0	426	356	360	309	386	402	362
55.01	405	418	446	427	356	364	335	382	432	0
55.35	437	437	455	388	258	370	313	230	427	0
55.77	401	429	0	212	352	374	320	387	401	363
56.2	410	436	447	427	352	376	321	386	416	729
56.63	414	420	439	431	361	371	321	381	400	130
57.06	409	437	441	427	356	390	321	381	399	111
57.49	413	425	458	427	356	394	322	381	392	110
57.92	424	412	466	384	305	354	328	399	396	357
58.35	413	423	469	426	356	409	311	386	401	0
58.78	410	426	0	426	356	360	309	386	402	362
59.11	405	418	446	427	356	364	335	382	432	0
59.54	437	437	455	388	258	370	313	230	427	0
59.97	401	429	0	212	352	374	320	387	401	363
60.42	410	436	447	427	352	376	321	386	416	729
60.85	414	420	439	431	361	371	321	381	400	130
61.28	409	437	441	427	356	390	321	381	399	111
61.7	413	425	458	427	356	394	322	381	392	110
62.13	434	440	475	425	356	390	321	112	391	0
62.56	445	440	472	427	356	398	317	382	396	993
62.99	433	441	472	423	356	379	321	386	396	347
63.34	437	441	480	300	356	339	317	435	392	264

63.77	435	443	469	427	356	428	322	394	401	0
64.2	437	440	469	431	356	388	322	394	401	1193
64.63	437	444	483	426	356	847	322	428	401	0
64.98	434	441	486	376	282	392	321	386	396	2311
65.41	441	439	481	427	356	220	322	386	401	1152
65.84	433	444	476	427	356	395	322	386	396	825
66.27	371	445	469	396	356	375	322	386	396	150
66.7	434	445	478	424	356	357	321	386	397	889
67.13	434	441	479	426	356	420	321	386	396	133
67.56	438	444	481	424	356	414	321	386	396	899
67.99	155	439	478	401	356	404	322	386	396	145
68.41	437	441	482	427	356	412	267	390	396	0
68.85	434	444	494	427	356	388	322	390	396	894
69.28	437	444	492	428	360	388	325	390	396	0
69.62	434	444	481	427	251	384	322	395	396	227

Tabla 21. Datos de distancia, registrados por los sensores ultrasónicos HC-SR04 para condiciones de flujo de detritos con 0.15 de concentración.

Tiempo (s)	Sensor 1 (mm)	Sensor 2 (mm)	Sensor 3 (mm)	Sensor 4 (mm)	Sensor 5 (mm)	Sensor 7 (mm)	Sensor 8 (mm)	Sensor 9 (mm)	Sensor 11 (mm)	Sensor 12 (mm)
0.35	310	443	507	428	358	389	322	396	398	1546
0.78	430	442	515	428	357	390	318	396	398	1215
1.21	430	443	507	432	358	394	322	396	397	1224
1.64	427	442	511	425	357	394	322	395	398	1223
2.6	426	442	507	432	357	394	322	396	402	746
2.48	427	150	0	428	357	207	318	391	0	658
2.91	291	442	507	424	354	392	322	391	403	1550
3.34	427	442	506	432	357	393	322	392	398	1197
3.77	431	442	507	424	356	390	322	391	398	1223
4.2	427	442	511	428	357	390	322	391	398	1232
4.63	430	442	507	425	357	392	326	396	398	598
5.06	427	442	511	428	353	390	318	391	397	1518
5.49	430	446	507	428	353	397	318	387	398	1545
5.92	427	446	506	432	357	393	318	396	397	1549
6.35	427	443	511	428	357	393	318	396	398	1557
6.78	427	451	507	428	357	393	318	395	397	1535
7.21	426	442	514	425	358	393	318	396	398	1389
7.64	426	443	506	429	358	389	327	396	398	1703
8.07	427	442	511	424	357	394	322	396	398	1541
8.5	427	442	506	433	358	198	322	395	397	1738
8.93	430	442	511	428	358	394	322	396	397	1529
9.36	426	446	507	432	358	394	322	396	398	1533
9.79	426	443	515	428	357	394	322	396	397	1040
10.22	427	442	507	428	361	390	322	396	398	955
10.65	430	446	506	433	365	306	322	395	402	2666
11.08	427	451	507	432	357	390	322	396	147	1785
11.51	426	446	503	425	357	398	318	396	398	1543
11.94	427	446	503	429	357	397	322	391	402	1514
12.37	426	451	503	428	357	279	322	392	401	1646
12.8	430	446	503	425	358	398	318	388	398	1541
13.23	427	452	541	428	357	394	318	387	398	1506
13.66	423	446	471	432	357	393	322	391	402	940
14.09	450	456	480	425	118	394	326	387	401	2374
14.52	461	478	494	428	357	398	322	389	77	1798
14.95	424	474	482	428	358	393	322	387	398	1540

15.38	426	441	454	435	357	390	318	386	398	1592
15.81	455	424	484	432	358	435	322	395	398	1486
16.24	412	595	469	432	357	389	318	391	401	1435
16.67	405	471	481	434	358	421	322	391	398	1544
17.1	416	446	440	430	358	391	322	400	397	819
17.53	415	425	444	429	333	390	318	400	398	2388
17.96	404	260	445	421	267	373	322	400	417	2348
18.39	409	451	458	421	358	389	322	430	402	1554
18.82	397	447	500	424	357	386	318	386	426	1571
19.25	424	408	455	417	362	381	318	386	394	1608
19.68	400	420	455	425	358	373	322	412	396	1633
20.11	398	426	454	424	354	369	318	383	458	1601
20.54	397	443	500	407	357	367	320	400	398	1105
20.97	405	411	414	406	188	347	331	380	397	469
21.4	389	474	409	407	338	362	322	384	454	823
21.83	376	394	454	413	356	322	363	163	386	348
22.26	388	405	454	405	347	404	313	395	408	352
22.69	392	411	422	427	341	374	319	369	373	364
23.12	379	396	418	437	364	358	303	403	368	377
23.55	390	414	419	401	316	337	307	380	364	354
23.98	371	393	428	410	345	349	322	634	374	342
24.41	0	0	457	401	347	292	312	394	375	349
24.84	390	394	0	405	343	282	307	379	381	350
25.27	391	0	411	415	355	361	299	237	368	341
25.7	378	405	490	394	357	343	296	374	503	372
26.13	386	0	443	407	343	333	295	379	367	343
26.56	390	404	475	409	357	352	301	298	374	364
26.99	380	398	488	411	359	347	299	382	381	367
27.42	379	394	480	415	343	389	291	363	369	876
27.85	426	381	490	433	353	352	305	381	405	315
28.28	409	388	407	407	357	358	284	430	415	330
28.71	394	384	0	425	354	358	303	840	390	341
29.14	378	395	439	403	361	464	293	473	399	339
29.57	368	371	504	437	360	346	283	383	377	315
30	359	0	480	441	352	358	293	378	384	1736
30.43	373	379	487	425	353	364	282	384	391	324
30.86	435	445	545	411	357	354	281	391	539	2838
31.29	389	0	430	420	358	385	282	457	474	318
31.72	413	438	435	415	352	353	298	383	399	330

32.15	0	437	441	408	357	397	303	394	393	330
32.58	431	426	437	418	357	363	331	387	381	339
33.01	424	439	467	452	353	378	326	428	391	352
33.44	425	444	452	417	354	368	326	400	392	347
33.87	420	440	460	426	357	382	322	391	402	364
34.3	421	440	451	425	357	368	322	418	393	1702
34.73	422	441	476	424	358	388	326	387	387	1568
35.16	422	437	472	424	357	385	322	410	396	1576
35.59	426	445	466	424	354	400	323	396	397	1570
36.02	426	437	475	424	357	404	323	384	397	1532
36.45	430	437	472	425	353	413	322	392	397	1524
36.88	430	441	497	428	357	403	322	387	372	1537
37.31	435	437	472	428	357	389	185	396	397	1093
37.74	435	437	479	428	116	404	323	455	397	2295
38.17	435	441	489	428	357	358	322	396	393	1546
38.6	430	437	581	428	358	380	322	392	399	1466
39.03	434	441	491	424	357	373	222	408	406	1053
39.46	435	437	503	432	357	390	322	396	401	2069
39.89	444	437	481	424	357	386	322	396	394	1555
40.32	443	441	478	428	357	372	344	845	405	1057
40.75	439	441	474	424	357	400	322	399	409	1341
41.18	448	441	475	424	358	390	318	399	392	1699
41.61	444	441	479	424	357	402	318	400	393	1533
42.04	460	445	479	424	357	394	318	396	393	1507
42.47	464	441	488	428	358	417	319	400	394	1470
42.9	464	441	492	425	357	399	319	400	394	1491
43.33	0	438	479	428	357	392	327	387	398	2759
43.76	90	438	479	428	353	392	319	400	394	2768
44.19	0	437	475	425	357	396	331	395	390	2748
44.62	0	437	479	425	358	392	323	395	394	2767
45.05	0	438	484	424	358	380	319	400	393	2776
45.48	0	443	481	428	357	384	322	400	390	2762
45.91	0	438	486	424	358	381	323	392	398	2273
46.34	466	438	481	424	357	386	318	399	398	1997
46.77	459	438	486	424	357	386	318	399	397	1512
47.2	449	438	486	428	357	386	318	396	398	1535
47.63	442	437	487	428	352	386	322	404	403	860
48.06	442	442	486	428	171	403	319	395	403	2360
48.49	438	438	481	428	358	431	322	391	407	1481

48.92	439	443	487	428	357	424	322	391	402	1481
49.35	435	438	479	428	352	424	322	404	401	978
49.78	442	441	483	425	348	441	322	404	396	2009
50.21	435	441	479	428	356	424	322	391	401	1499
50.64	443	441	483	424	357	422	322	391	397	1502
51.07	435	443	480	424	358	203	322	404	397	1364
51.5	438	442	479	424	357	122	322	396	394	2538
51.93	442	442	487	424	358	402	322	400	397	1134
52.36	435	443	483	428	358	394	322	400	398	1013
52.79	433	442	478	428	357	398	326	400	394	976
53.22	438	445	479	424	356	398	322	400	397	960
53.65	159	443	0	428	183	394	322	399	398	2022
54.08	430	441	479	429	357	393	322	392	394	0
54.51	439	442	484	424	224	394	322	391	402	2277
54.94	438	441	479	425	357	405	238	395	397	0
55.37	430	442	479	415	170	466	322	404	397	2162
55.8	431	441	483	428	357	437	211	391	396	0
56.23	430	445	479	415	197	466	322	391	398	2127